دکتر محمدرضا کاویانی
دانشگاه اصفهان
شماره مقاله: ۳۲۲

توربینهای بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران

Dr. M. R. Kaviani
University of Esfahan

Wind Turbines and an Evaluation of the Potential Energy of Wind in Iran

Two types of important wind Turbines have been introduced and discussed in this article. Due to the staggering expenses of producing electric energy in Iran, the need to utilize cheaper sources of energy emerges as urgent. In this research, the annual and daily speed of wind and its variation throughout the country has been evaluated and the potential energy of wind have been calculated according to KW/h.

It was found that East of Iran (around Zabol), South - east of Khorasan Province and the Southern borders of the country from the area between Chahbahar and Jask alongside the beach towards west to Bushahr, as well as Gheshm, Lark, Kish, Nakhil, and Khark Islands are suitable for Wind - turbines.

مقدّمه

با توجّه به هشدار صاحب نظران و متخصصان مبنی بر اتمام ذخیرهٔ منابع سوختهای فسیلی،

حداکثر تا یک قرن دیگر، قطعاً کشورهایی که از نظر تأمین انرژی در تنگنا قرار دارند، با رکود و بحران روبرو خواهند شد. در این زمان احتمالاً کشورهای پیشرفته آنهایی خواهند بود که تکنولوژی را خردمندانه به کار برده و منابع انرژیهای جدید را از قبل شناخته و مهار کرده‌اند. در صورت پذیرش این واقعیّت که کشور ما از این وضعیت مصون نخواهد بود، ضرورت استفاده از کلیه امکانات، به منظور دستیابی به انرژیهای تجدید شونده آشکار می‌شود. در این راستا انرژی خورشیدی منبعی عظیم برای کشور، به حساب می‌آید. طبق برآورد بودیکو[1] (۴) و سلرز[2] (۶) متوسط سالانه انرژی گلوبال خورشید در کشور ما به ۱۴۰ تا ۲۲۰ کیلو کالری در سانتیمتر مربع می‌رسد. مهار این مقدارعظیم انرژی مستلزم دسترسی به تکنولوژیهای پیشرفته و کاربرد کلکتورهای بزرگ و سلولهای فتوولتائیک می‌باشد. علی‌رغم این که بازده سلولهای فتوولتائیک درحال حاضر ناچیز و هزینهٔ تهیه آنها زیاد است، با این وجود چشم انداز آیندهٔ استفاده از انرژی اقتصادی‌تر خورشید روشن به نظر می‌رسد.

بغیر از انرژی خورشید، جهان امروز به انرژی باد چشم دوخته است. گرچه وضعیت بادهای کشور از دیدگاه انرژتیک، آن طور که باید، مورد بررسی قرار نگرفته است، با این حال می‌توان امیدوار بود که با احداث توربینهای بادی در مناطق مناسب، بخشی از انرژی مورد نیاز کشور تأمین شود. اهمیت این موضوع آنگاه آشکار می‌شود که هزینه‌های سرسام آور تأمین انرژی برق و روند افزایش سالانه آن را در کشور مورد مداقه قرار دهیم. طبق برآوردهای رسمی، به رغم ۱۱٪ رشد سالانه مصرف برق، تولید آن از ۱۷/۴ میلیارد کیلووات ساعت در آغاز انقلاب به ۷۳/۴ میلیارد کیلو وات ساعت در پایان برنامه اول توسعه رسیده است. با توجه به منابع هنگفتی که دولت برای تولید یک کیلو وات برق هزینه می‌کند، این سؤال برای همه ما مطرح است که برای کاهش مصرف و تأمین انرژی ارزانتر چه باید کرد؟ در این تحقیق کوشیده‌ایم تا با دیدگاهی جغرافیایی، به ارزیابی پتانسیل انرژی موجود در بادهای کشور بپردازیم. از این رو ابتدا به ساختار، عملکرد و کاربرد توربینهای بادی اشاره کرده و سپس به ارزیابی توان باد و امکان احداث و بهره‌گیری اقتصادی از توربینهای مزبور برای مناطق مناسب کشور پرداخته‌ایم.

توربینهای بادی

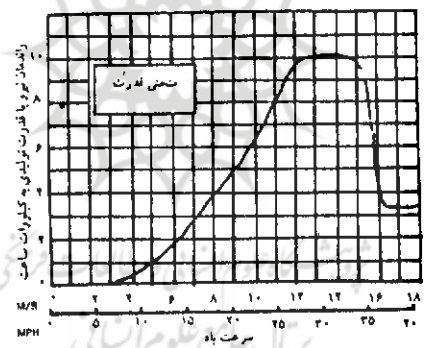
ساختمان و نحوهٔ کار مولّدهای بادی از یک طرف به آسیابهای بادی شبیه است و از طرف

1- Budyko. 2- Sellers.

دیگر بر تجارب آئرودینامیک در صنعت هواپیماسازی استوار است. از نظر فرم ظاهری، دو نوع توربین تشخیص داده می‌شود. توربینهایی که دارای محور افقی بوده و در جهت عمود بر سمت وزش باد و تحت تأثیر نیروی بالا بر[۳] و نیروی رانش ناشی از حرکت هوا به چرخش در می‌آیند. این توربینها به جهت باد وابسته‌اند. نوع دیگر توربینهایی هستند که دارای محور عمودی بوده و تنها تحت تأثیر نیروی رانش به حرکت در می‌آیند. این توربینها به جهت وزش باد وابستگی ندارند. توربینها از نظر قدرت نیز به دو گروه کوچک تا متوسط و توربینهای بزرگ تقسیم می‌شوند:

۱ـ توربینهای کوچک تا متوسط، که ارتفاع دیرک آنها حدود ۱۵ تا ۲۵ متر از سطح زمین و قطر پروانه آنها از یک تا چند متر است. قدرت این توربینها که بیشتر برای تولید برق و مصارف روستایی، در مناطق دور افتاده، به کار می‌روند حدود ۱۰ کیلووات ساعت است. بازده این توربینها نسبت به سرعت باد در شکل شمارهٔ ۱ نشان داده شده است.

شکل شماره ۱: رابطهٔ قدرت توربین با سرعت باد از اوریل پرایس ـ بودگن ۱۹۹۰.[۴]



همان گونه که ملاحظه می‌شود، نیرو تنها در شرایط سرعت بالاتر از ۳ متر در ثانیه تولید و تا ۱۲ متر در ثانیه بسرعت افزایش می‌یابد. سپس در سرعت ۱۲ تا ۱۵ متر در ثانیه ثابت مانده و پس از آن تا سرعت ۱۶ متر در ثانیه کاهش و از سرعت ۱۶ متر به بالا مجدداً افزایش می‌یابد.

۲ـ توربینهای بزرگ، دارای ارتفاع برج حدود ۱۰۰ متر از سطح زمین و قطر پروانه‌ای در همین حدود می‌باشند. مجموع وزن این گونه توربینها به ۵۰۰ تن می‌رسد و برق تولیدی آنها در حد

۳ـ نیروی بالا بر نیرویی است که از اختلاف فشار بین دو طرف پره‌های توربین حاصل می‌گردد.

4- Avril Price - Budgen.

مگاوات بوده و به شبکه برق رسانی قابل اتصالند. مسائل فنی این‌گونه توربینها بیشتر در مقاومت و کنترل لنگراندازی برجها و فرم و استقامت پروانه‌ها خلاصه می‌شود. در حالی که توربینهای کوچک و متوسط از مرحلهٔ فنی و آزمایشی گذشته و وارد بازار جهانی شده‌اند، توربینهای بزرگ هنوز از نظر فنی و بازدهی اقتصادی در مرحلهٔ آزمایش قرار دارند.

سابقهٔ تاریخی و اهمیت توربینهای بادی

کشف دوبارهٔ انرژی باد در سالهای اخیر، بویژه از سال ۱۹۷۳ یا دهه بحران انرژی به بعد، توجه جهان صنعتی را بشدت برانگیخته است. این توجه در قالب سیاست عدم وابستگی به سوختهای سنتّی و رها شدن از قید مشکل تأمین انرژی و همچنین حفاظت از محیط زیست صورت گرفته‌است.

سابقهٔ استفاده از انرژی باد به ۵ تا ۶ هزار سال قبل می‌رسد. در آن زمان مصریان قایقهای خود را به بادبان مجهز کرده و از انرژی باد برای رفت و آمد بر روی رودخانه نیل استفاده می‌کردند. گرچه کشور چین و حوزهٔ شرقی مدیترانه نیز به زادگاه مولّدهای بادی تعلق دارند، با این وجود افتخار ابداع اولین آسیاب بادی در ۲۲۰۰ سال قبل به نام ما ایرانیها به ثبت رسیده است.

آسیابهای بادی در اروپا در سدهٔ یکم هجری ظاهر شدند و توسط هلندیها تکمیل و سپس در آمریکا مورد استفاده فراوان قرار گرفت. در حد فاصل سالهای ۱۸۸۰ تا ۱۹۳۰ میلادی حدود ۶/۵ میلیون آسیاب بادی در آمریکا مشغول کار بودند. با این حال با اختراع ماشین بخار، موتورهای انفجاری و دیزلی و همچنین بهای اندک نفت، دوران رکود تکنولوژی مبتنی بر باد فرا رسید.

پس از بحران جهانی نفت در سال ۱۹۷۳، در چهارچوب برنامهٔ استفاده از انرژیهای تجدید شونده (انرژی سبز)، به مولّدهای بادی دوباره توجّه شده است، چنانچه طی ۱۳ سال گذشته، جمعاً ۱۰۰۰۰۰ نیروگاه بادی در کشورهای صنعتی نصب شده‌که بیش از ۲۰۰۰۰ مورد آن به شبکه توزیع متصّل شده است.(۱۰)

طبق محاسبات انجام شده، کل انرژی باد در کره زمین به ۱۸۰۰ تراوات می‌رسد[۵]. از این مقدار حدود ۱۰/۶٪ در خشکی و بقیه در سطح اقیانوسها پراکنده است. اگر کل مصرف انرژی سکنهٔ کرهٔ زمین را ۱۰ تراوات به حساب آوریم، حدود ۰/۶٪ آن می‌تواند جوابگوی احتیاجات ساکنین کرهٔ زمین باشد.

۵ـ هر تراوات معادل 10^{12} وات می‌باشد.

نیروگاههای بزرگ بادی، ابتدا در کالیفرنیا ظاهر شدند، با این حال تولید برق بعضی از کشورهای اروپایی از جمله دانمارک، با ۳۶۰ مگاوات، هلند و آلمان با ۵۵ مگاوات قابل ملاحظه است. اتحادیه اروپا با تهیه نقشه بادهای اروپا، حدود ۴۰۰۰۰۰ محل مناسب برای احداث توربینهای بادی تعیین کرده است. با توجه به برآورد اتحادیهٔ مزبور، در صورت استقرار توربینهای بادی با قطر ۱۰۰ متر در مناطق مزبور، حدود ۴ تراوات انرژی که بیش از کل نیاز برق اروپا است قابل استحصال خواهد بود. مسلماً دسترسی به این میزان انرژی مستلزم پایین آمدن هزینهٔ احداث نیروگاههای بادی و ادامه تکامل تکنولوژیهای پیشرفته‌تر است. با این حال، ریسک اقتصادی و فنّی مربوط به تحقیقات مولدهای بادی به اندازه‌ای زیاد است که انجام آنها مستلزم حمایت دولتها می‌باشد. برای مثال در کشور آلمان تحقیق دربارهٔ ایجاد زمینهٔ استفاده ازانرژی باد بطور کامل توسط وزارت فدرال برای تحقیقات و تکنولوژی انجام می‌گیرد. این وزارت تا سال ۱۹۸۴ بیش از ۷۰ پروژه با مجموع هزینهٔ ۲۰۰ میلیون مارک در دست اجرا داشته است. دو پروژهٔ بزرگ مونوپ تروس[6] و گروویان[7] شهرت جهانی دارند(۷).

با کاربرد مولّدهای بادی می‌توان از انرژی جنبشی باد به صورت انرژی مکانیکی، الکتریکی و یا انرژی حرارتی استفاده کرد. بازده توربینها به شدّت و سرعت باد بستگی دارد. علاوه بر آن جنس، فرم و بزرگی پروانه‌ها و ضریب یکپارچگی، گشتاور نیرو و ضریب سرعت نوک پروانه‌ها در میزان نیروی تولید شده، نقش اساسی دارند. ضریب یکپارچگی پروانه‌ها معرّف نسبت سطح پره‌های یک توربین به سطحی است که توسط پره‌های مزبور جاروب می‌شود.

گشتاور نیرو، اندازهٔ نیرویی است که باعث دَوَران محور قدرت خروجی می‌شود و بالاخره ضریب سرعت نوک، نسبت سرعت خطی نوک پروانهٔ گردان به سرعت باد می‌باشد. ضریب مزبور معرّف دور پروانه است و هر چه میزان آن بیشتر باشد، چرخش پروانهٔ توربینها سریعتر خواهد بود.

بین عوامل سه‌گانه فوق رابطه مشخصی وجود دارد؛ بدین نحو که ضریب یکپارچگی بزرگ که مختص توربینهای پُر «پَرّه» می‌باشد با گشتاور نیرو رابطه مستقیم و با ضریب سرعت نوک نسبت عکس دارد. بنابراین توربینهای پُر «پَرّه» از قبیل توربینهای نوع مزرعه که دارای ضریب یکپارچگی بزرگ می‌باشند، دارای گشتاور زیاد و ضریب سرعت نوک کوچک هستند. از این رو آهسته می‌چرخند اما با وزش آرام باد به دوران می‌افتند؛ در حالی که توربینهای کم پَرّه دارای ضریب

6- Monopteros.

7- Growian.

یکپارچگی کم و در نتیجه گشتاور ضعیف اما ضریب سرعت نوک بزرگ می‌باشند. از این رو دیر به چرخش می‌افتند، اما هنگامی که دَوَران آنها آغاز می‌شود بسرعت می‌چرخند.

توربینهای نوع اول که دارای سرعت کم و گشتاور زیاد می‌باشند، برای تلمبه‌های بادی که به قدرت و سرعت عمل زیاد نیاز می‌باشد، مناسب هستند. در این توربینها نیروی مکانیکی حاصل از باد به وسیلهٔ یک محور عمودی به پیستون تلمبه، برای کشیدن آب از چاه و یا رودخانه منتقل می‌شود؛ در حالی که توربینهای نوع دوم برای تولید نیروی برق مناسبند؛ زیرا محور چرخش که دور زیادی دارد به ژنراتورهای برق متّصل شده و باعث القای شدید انرژی الکتریکی در سیم پیچهای ژنراتور که در حوزه مغناطیسی قرار دارند، می‌شود.

قدرت توربینهای بادی به یک سری عوامل فنّی از قبیل جعبه دنده‌ها بستگی دارد که باعث تشدید دَوَران دور ژنراتور نسبت به دور توربین می‌شود. این نسبت معمولاً ۴ تا ۵ و گاهی بیشتر است. برای مثال اگر دور توربین ۱۰۰ دور در دقیقه باشد، به وسیلهٔ جعبه دندهٔ انتقال قدرت، به ۴۰۰ تا ۵۰۰ دور در دقیقه افزایش می‌یابد.

جریان برق مستقیم یا متناوبی که توسط ژنراتورهای بادی تولید می‌شود می‌تواند در باتریها ذخیره شود و یا برای گرم کردن مخازن آب، به وسیلهٔ یک مقاومت الکتریکی، مورد استفاده قرار گیرد. استفاده گرمایی از انرژی باد شاید پربازده‌ترین روش ذخیرهٔ انرژی توربین بادی باشد، زیرا اتلاف انرژی آن در مقایسه با سایر روشها مثلاً استفاده از انواع باتریها ناچیز است.(۹)

از انرژی جنبشی باد می‌توان برای آبکشی از چاه یا رودخانه و سپس از فشار این آب در پایین دست برج برای به حرکت در آوردن یک توربین آبی مولد برق استفاده کرد. بنابراین با کاربرد چند تلمبه بادی می‌توان یک مرکز هیدروالکتریک به وجود آورد و برق تولید کرد. با توجه به اتلاف انرژی زیاد این طرح، در صورتی که برنامه‌ریزی آن چند منظوره باشد، شاید بتوان بازده اقتصادی آن را تضمین کرد.

ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران

برای برآورد و ارزیابی انرژی باد در سطح کشور، ابتدا آمار پنجساله باد، سالهای ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۵، مربوط به ۶۰ ایستگاه سینوپتیکی را مورد تحلیل آماری قرار داده‌ایم. اندازه‌گیریهای روزانهٔ باد در ایستگاههای مزبور در فواصل ۴ تا ۸ بار انجام شده است؛ لذا با توجه به حجم زیاد آنها، در تحلیلهای آماری از نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده کرده‌ایم.به منظور دستیابی به‌یک تصویر روشن از حوزهٔ باد در سطح کشور ابتدا به تهیه اطلس گلباد کشور پرداخته، سرعت و جهت متوسط بادها و

همچنین انرژی آنهارابطور ماهانه وسالانه تعیین کرده‌ایم. ذکراین نکته لازم‌است که کاربرد میانگین سالانهٔ سرعت بادها در ارزیابی میزان انرژی، چنان که بعداً خواهیم دید، فاقد کارآیی لازم است؛ از این رو در مراحل بعدیِ بررسی، به فواصل سرعت بادها که در بازده نیروی توربینها اهمیّت دارد توجه کرده‌ایم.

در نقشهٔ شمارهٔ ۱ خطوط هم سرعت (ایزوتاخ)[8] ایستگاههای کشور ترسیم شده است. در این نقشه، متوسط ۵ ساله سرعت باد در جهات ۸گانه، برای ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین بر حسب متر برثانیه نشان داده شده است. بطور کلی میانگین سالانه سرعت باد در تمامی جهات در کلیه ایستگاههای کشور از ۲/۴ متر در ثانیه (تقریباً معادل ۸/۶ کیلومتر در ساعت) در سواحل جنوبی خزر، دشت گرگان، ناحیه سرخس و سقز تا ۴/۷ متر در ثانیه (تقریباً ۱۷ کیلومتر در ساعت) در ایستگاه زاهدان متغیر است. بطور کلی عامل تغییر و توزیع سرعت باد در سطح کشور، تأثیر توأمان عوامل مختلفی، از قبیل عملکرد سیستمهای جوی، نحوه توزیع گرادیان فشار منطقه‌ای و اختلاف اصطکاک ناشی از تنوع توپوگرافی می‌باشد، به نحوی که سواحل، دشتها و مناطق هموار کشور از شرایط همگن‌تر و مناطق کوهستانی از شرایط نامتجانستری برخوردار بوده، جهت و سرعت بادها در فواصل کوتاه دستخوش تغییرات شدیدی می‌شود. معمولاً سرعت باد در قلهٔ ارتفاعات، بویژه «اینزلبرگها» و نوارهای ساحلی و دره‌های تنگ و باز شدید و در چاله‌های کم وسعت، حوزه‌ها و دره‌های بسته و مناطق پشت کوهی ضعیف می‌باشد. در این جا باریکه سواحل جنوبی خزر، به دلیل سد کوهستانی البرز و اثر بازدارندهٔ آن برای بادهای شمالی و جنوبی استثنایی به وجود آورده و باعث کاهش شدید سرعت باد می‌شود، در حالی که میانگین سرعت بادها در سواحل جنوبی کشور تا رقم ۴/۵ متر درثانیه افزایش می‌یابد. همچنین دربخش قابل توجهی ازناحیه سیستان، جنوب‌شرقی استان خراسان و شمال شرقی استان کرمان، دشت واقع بین چاله اصفهان ـ سیرجان و بخش شمال غربی جلگه خوزستان و همچنین دشت اردبیل میانگین سالانه سرعت باد ۴ متر در ثانیه است.

با توجه به مقیاس نقشه ۱:۵۰۰۰۰۰۰ و عدم تراکم کافی شبکه ایستگاههای هواشناسی کشور، امکان انعکاس وضعیت باد در نواحی محدود، مثلاً در طول درّهٔ منجیل میسر نیست. از این‌رو ویژگیهای محلی که مخصوصاً در مناطق مسکونی و محور کوهستانی البرز و زاگرس با افزایش یاکاهش سرعت باد همراه می‌باشند، در نقشه مزبور درنظر گرفته نشده‌اند. تفاوتهای مزبور گاه در فواصل کوتاه، چشمگیر می‌باشد. برای مثال میانگین سرعت باد در ایستگاه شهر اصفهان ۳/۵

8- Isotach.

نقشهٔ شمارهٔ ۱: میانگین جهات هشتگانه سرعت سالانه باد (متر بر ثانیه) در سطح کشور

و ایستگاه فرودگاه به فاصلهٔ کمتر از ۳۰ کیلومتر در شرق اصفهان ۴ متر در ثانیه و تعداد ساعات آرام در شهر اصفهان ۶۱ و در فرودگاه ۱۸٪ می‌باشد. بنابراین نقش موقعیت ایستگاهها در تفاوت وضعیت کلی باد بسیار اهمیت دارد.

روند سالانهٔ سرعت باد

معمولاً گرادیان فشار در فصول گذار از زمستان به تابستان یعنی فصلهای بهار و پاییز قوی بوده و در بسیاری از ایستگاههای کشور سرعت باد افزایش می‌یابد. با این حال روند سالانه سرعت باد حاصل تغییرات سالانه سیستمهای حاکم جوی و استقرار فشار در منطقه است؛ به گونه‌ای که باعث ایجاد رژیمهای ویژه در بعضی از مناطق مختلف کشور می‌شود. بطور کلی در حاشیهٔ جنوبی سواحل خزر، حداکثر سرعت باد در ماههای پاییز و زمستان مشاهده می‌شود. در این جا نقش گرادیان نسبةً

قوی بین دشت سیبری و دریای خزر در پاییز و تردد سیکلونهای خاورمیانه در زمستان، در افزایش سرعت باد این منطقه اهمیّت دارد. در حالی که برعکس در ایستگاههای حوزهٔ داخلی، حداکثر سرعت به فصول بهار و تابستان تعلق داشته، زمستان و پاییز از سرعت کمتری برخوردار است. بطور کلی گرادیانهای قوی فشار در بهار و نقش فروبارهای محلی تابستانی در شکل گیری سرعت باد در ایستگاههای حوزه‌های داخلی ایران، تأثیر بسزایی دارند.

روند روزانهٔ سرعت باد

مسألهٔ نوسانات روزانه سرعت باد در کاربرد توربینهای بادی از اهمیّت زیادی برخوردار است. بطور معمول سرعت باد در طی شبانه روز در ایستگاههای مختلف دارای دو روند متفاوت است. در سطوح پایین معمولاً حداکثر سرعت در اوایل ظهر و حداقل آن در نیمه‌های شب مشاهده می‌شود، در حالی که در ارتفاعات حداکثر مزبور در اواسط شب و حداقل آن در بعدازظهرها دیده می‌شود. از این رو حداکثر انرژی در توربینهای کوچک تا متوسط متناسب با حداکثر سرعت باد، در ساعات نیمروز و در توربینهای بزرگ در نیمه‌های شب و یا بلافاصله بعد از نیمه‌های شب حاصل خواهدشد. بنابراین تعیین روند روزانهٔ سرعت باد در هر محل، برای برآورد میزان انرژی و زمان استحصال حداکثر بازده توربینهای بادی ضروری است. در این راستا باید به دو نکتهٔ مهم توجه کرد:

۱ـ متوسط نوسانات روزانه سرعت باد تا حدودی تابع فصل بوده و در تابستانها معمولاً قویتر از زمستانها می‌باشد.

۲ـ روند روزانهٔ سرعت باد به شرایط سینوپتیکی روز بستگی داشته و گاه با روند متعارفی که اشاره شد تفاوت می‌یابد.

تغییرات سرعت باد با افزایش ارتفاع

شکل پروفیل عمودی باد، که معرف گرادیان سرعت باد با ارتفاع می‌باشد، هم از نظر مسائل تئوریک حرکت و مبادله‌های ناشی از توربولانس و هم از نظر بیلان گرما و آب و بسیاری از مسائل کاربردی حائز اهمیّت است. بدیهی است که سرعت باد با افزایش ارتفاع زیاد می‌شود. این افزایش ناشی از تأثیر کاهش اصطکاک بوده و شرایط ترمودینامیکی جو در میزان آن مؤثّر است. بنابراین، هرچه هوا پایدارتر و سطح زمین ناهموارتر و اصطکاک بیشتر باشد، افزایش سرعت باد با افزایش ارتفاع ارتباط مستقیم دارد. از آن جا که اندازه گیری مستقیم سرعت باد با ارتفاع مشکل و غالباً هزینه‌بردار است، هواشناسان فرمولهای تجربی متعددی ابداع کرده‌اند. با توجه به آخرین

اندازه‌گیریهای عملی سازمان هواشناسی آلمان که توسط بنش[9] (۳) و همکاران وی صورت گرفته و با مقایسه و هماهنگی نتایج بررسیهای مزبور، فرمول ذیل را برای شرایط اقلیمی ایران پیشنهاد می‌کنیم:

$$m(Z) = \frac{mh}{mO} \left(\frac{Zh}{ZO}\right) 0.2$$

که در آن m(Z) سرعت باد در ارتفاع (Z) و mO سرعت باد در ارتفاع O یا مبنا می‌باشد.

برآورد میزان انرژی باد نه تنها به سرعت، بلکه به تداوم آن و فراوانی اوقات وزش و یا عدم وزش باد بستگی دارد. از این رو در نقشهٔ شماره ۲ میانگین ساعات آرام و فاقد باد را برای کلیه ایستگاههای کشور محاسبه و به صورت درصد، نسبت به کل اوقات سال نشان داده‌ایم. مسلماً در مناطقی که میزان ساعات آرام زیاد است، احداث توربینهای بادی بیهوده خواهد بود. طبق برآورد ویندهایم[10] (۸)، عملکرد اقتصادی توربینهای بادی مستلزم کارکرد حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال و پیش‌بینی عمر مفیدی در حد ۲۰ سال است. بنابراین، در مناطقی که بیش از ۵۰٪ اوقات سال هوا راکد است احداث توربینهای بادی پیشنهاد نمی‌شود. همان گونه که ملاحظه می‌شود بخشی از مناطق شرقی و جنوبی کشور و همچنین آذربایجان شرقی و مناطق پراکنده و مجزایی از قبیل مناطق شرقی اصفهان، حوالی تهران، همدان وسیرجان از ساعات آرام کمتر از ۵۰٪ برخوردارند، در حالی که در سایر مناطق کشور ساعات آرام بر هوای پر تحرک غالب است. این موضوع بویژه در مناطق کاشان و آذربایجان غربی حاد بوده و حدود ۹۰٪ اوقات سال این نواحی هوا آرام است. گرچه بررسی هوای آرام در بسیاری از زمینه‌های مختلف از قبیل مسائل مربوط به آلودگی هوا و میزان قدرت تهویه طبیعی هوا دارای اهمیت است، با این حال ساعات آرام به تنهایی برای برآورد انرژی باد کافی نیست، چه ممکن است منطقه‌ای از بابت تعداد ساعات آرام فقیر اما فاقد سرعت کافی برای اخذ انرژی باد باشد، عکس این موضوع نیز صادق است.

با توجه به بازدهی قابل توجه توربینها از سرعت ۴ متر در ثانیه به بالا، نقشهٔ شمارهٔ ۳ تهیه شده است. در این نقشه درصد فراوانی اوقات سال که متوسط سرعت باد از ۴ متر در ثانیه تجاوز می‌کند نشان داده شده‌است. همان گونه که ملاحظه می‌شود در بخش محدودی از منطقهٔ سیستان و سواحل جنوبی کشور از ناحیهٔ شرق جاسک تا قسمتی از تنگهٔ هرمز و جزیره قشم و جزایر کیش و لاوان و در طول نوار ساحلی از بندرلنگه تا حوالی جزیرهٔ خارک و همچنین ناحیه شرق

9- Benesh.

10- Windheim.

نقشهٔ شمارهٔ ۲: میانگین پنجسالهٔ تعداد ساعات آرام (به درصد) در سطح کشور

اصفهان و حواشی اردبیل فراوانی سرعت باد بیش از ۴ متر در ثانیه از ۵۰٪ اوقات سال می‌گذرد. این بدان معنی است که مناطق مزبور برای احداث توربینهای بادی مناسبند، درحالی که فراوانی سرعت باد بیش از ۴ متر در ثانیه در سایر ایستگاههای کشور ناچیز بوده و در نوار ساحل جنوبی خزر، آذربایجان غربی میزان آن به ۱۰٪ هم نمی‌رسد.

درنقشهٔ شماره ۴ فراوانی سرعت باد معادل و یا بیش از ۷ مترملاحظه می‌شود. فراوانی مزبور در ناحیهٔ زابل به ۵۰ و در جاسک به ۳۰٪ می‌رسد و در سایر نقاط ایران با ستثنای مناطق جداگانه‌ای مانند شرق اصفهان، ناحیه یزد، اردبیل و همدان مقادیر آن کمتر از ۱۰٪ است. همچنین سرعت ۱۱ متر در ثانیه که بازده توان توربینها تقریباً به حداکثر می‌رسد، تنها در ناحیهٔ زابل به رقم قابل ملاحظه ۲۰ تا ۲۵٪ می‌رسد در حالی که در نوار ساحلی جنوب و ناحیه اردبیل رقم مزبور در حد ۲ تا ۵٪ باقی می‌ماند.

نقشهٔ شمارهٔ ۳: فراوانیِ سرعت باد معادل یا بیش از ۴ متر در ثانیه

بازده توان حداکثر و واقعی توربینهای بادی

انرژی جنبشی باد از فرمول زیر به دست می‌آید.

$$EC = \frac{1}{2} MV^2$$

که درآن M جرم توده هوا و V سرعت باد (برحسب متردرثانیه) می‌باشد. با توجه به این که جرم هوای متحرک،معادل حاصل ضرب‌دانسیته (D = ۱/۲۹ کیلوگرم،به ازای هرمترمکعب هوا)،سرعت (V= متر بر ثانیه) و سطح جاروب شده هوا توسط پرّه‌های توربین (A = متر مربع) می‌باشد، لذا حداکثر انرژی باد(P برحسب وات) که می‌بایست دربرخورد به پروانه‌های توربین‌به نیروتبدیل شود عبارت‌است از:

$$P = \frac{1}{2} D.A.V^{3.}$$

نقشهٔ شمارهٔ ۴: فراوانیِ سرعت باد معادل یا بیش از ۷ متر در ثانیه

پرّه‌های توربین، همه انرژی جنبشی باد را نمی‌گیرند. طبق برآوردهای بتز،[11] (۲) حداکثر قدرت باد که در یک توربین بادی ممکن است به انرژی مکانیکی تبدیل شود، معادل ۵۹/۳٪ است که به آن «ضریب توان ماکزیمم» می‌گویند. معمولاً بازده واقعی توربینها را معادل ۳۰٪ = e به حساب می‌آورند. بنابراین:

$$P = \frac{1}{2} eDAV^3$$

دانسیته هوا در ارتفاع و دمای متفاوت تغییر می‌کند، لذا میزان آن را نسبت به شرایط متعارف سطح دریا و دمای ۱۵/۵ درجه سانتیگراد، طبق جداولی که در دست است تصحیح کرده و آن را ضریب دانسیته نسبت به ارتفاع (DRA)[12] و ضریب دانسیته نسبت به دما (DRT)[13] می‌نامند.

11- Betz.

12- Density Ratio At Altitude.

13- Density Ratio At Temperature.

جدول شماره ۱: نمونه‌هایی از مقادیر ضریب دانسیته نسبت به ارتفاع (طبق ارائه م. ثقفی)

ارتفاع بر حسب فوت	۰	۲۵۰۰	۵۰۰۰	۷۵۰۰	۱۰۰۰۰
ضریب دانسیته نسبت به ارتفاع	۱	۰/۹۱۲	۰/۸۳۲	۰/۷۵۶	۰/۶۸۷

جدول شمارهٔ ۲: نمونه‌هایی از مقادیر ضریب دانسیته نسبت به دما (طبق ارائه م، ثقفی)

دما بر حسب فارنهایت	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
ضریب دانسیته نسبت به دما	۱/۳۰	۱/۰۸۳	۱/۰۴	۱	۰/۹۶۳	۰/۹۲۹	۰/۸۹۷

برای تسهیل محاسبهٔ قدرت عملی توربینها، با توجه به واحدهای انتخاب شده برای دانسیته (سرعت و سطحی که توسط پرّه‌ها جاروب می‌شود و همچنین واحد $\frac{1}{2}$ از فرمول فوق) ضرایبی پیشنهاد شده است که آنها را با K نشان می‌دهند. رقم این واحد در صورتی که سرعت را در مقیاس متر بر ثانیه و سطح جاروب شده توسط پرّه‌ها را بر حسب متر مربع به کار بریم، معادل K =۰/۶۱۲۵ می‌باشد. بنابراین فرمول کلی بازده توان واقعی توربینها به صورت ذیل خواهد بود:

$$P = K.e.DAR.DRT.A.V^3$$

برای مثال اگر در ایستگاهی به ارتفاع ۱۵۰۰ متر (حدوداً ۵۰۰۰ فوت) دمای ۱۵/۵ درجه سانتیگراد (معادل ۶۰ فارنهایت) و سرعت باد ۹ متر بر ثانیه حاکم باشد، در این صورت ماکزیمم توان یک توربین بادی با قطر پروانه ۶ متر و بازده ۳۰٪ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = ۰/۶۱۲۵ \times ۰/۳ \times ۰/۸۳۲ \times ۱ \times ۳/۱۴ \times (۶)^۲/۴ \times (۹)^۳ = ۳۱۴۹/۶$$

وات و یا ۳/۱۵ کیلو وات.

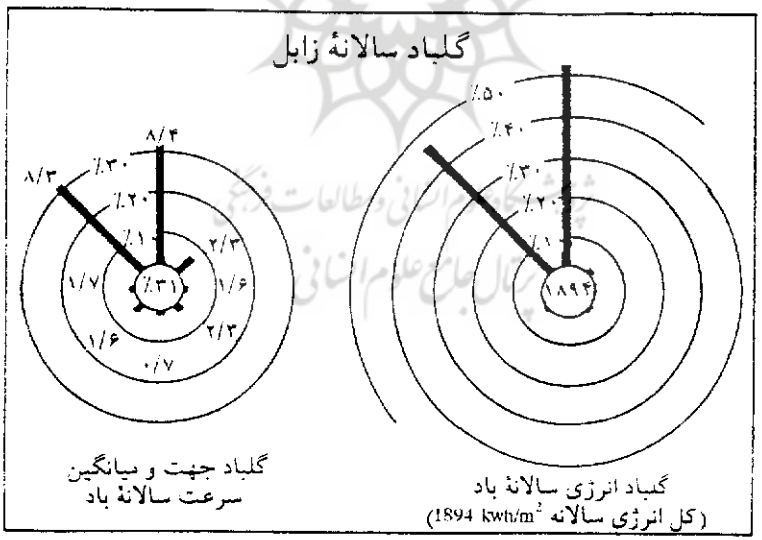
اینک به منظور ارزیابی میانگین سالانه انرژی باد کلیه ایستگاههای کشور، ابتدا انرژی باد در هر کدام از جهات را با توجه به میانگین سرعت و فراوانی ساعات وزش سالانه آنها طبق فرمول فوق محاسبه و سپس از مجموع انرژی در جهات ۸ گانه، ماکزیمم انرژی باد ایتسگاههای مزبور را به دست آورده‌ایم. حاصل این بررسی به صورت گلبادهای انرژی ماهانه و سالانه ترسیم شده که نمونه‌هایی از آن را برای چند ایستگاه از زابل و جاسک ارائه داده و مقادیر انرژی کلیه

ایستگاههای کشور را در نقشهٔ شمارهٔ ۵ به صورت میانگین سالانه توان انرژی باد منعکس کرده‌ایم.

بطور کلی بین ایستگاههای کشور، ایستگاه زابل با رقم ۱۸۹۴ کیلووات ساعت به ازای هر متر مربّع از سطحی که به وسیله پروانه‌ها جاروبْ می‌شود از بهترین شرایط احداث توربینهای بادی برخوردار است، همچنین ایستگاههای جاسک، بندر لنگه، جزیره کیش با مقادیر ۷۵۶، ۶۱۸ و ۵۶۹ کیلو وات ساعت در مقامهای دوم تا چهارم قرار دارند. لازم به ذکر است که میزان واقعی انرژی توربینها با توجّه به بازده توربین و قطر پروانه آنها تعیین می‌شود. برای مثال اگر قطر پروانهٔ توربین در ایستگاه زابل ۴ متر انتخاب شود، با توجه به بازده ۳۰٪ توربین، توان سالانه مورد انتظار در ایستگاه مزبور به قرار ذیل خواهد بود:

کیلو وات ساعت $۷۱۳۶/۶ = ۱۸۹۴ \times ۰/۳۰ \times ۳/۱۴ \times (۲)^۲$

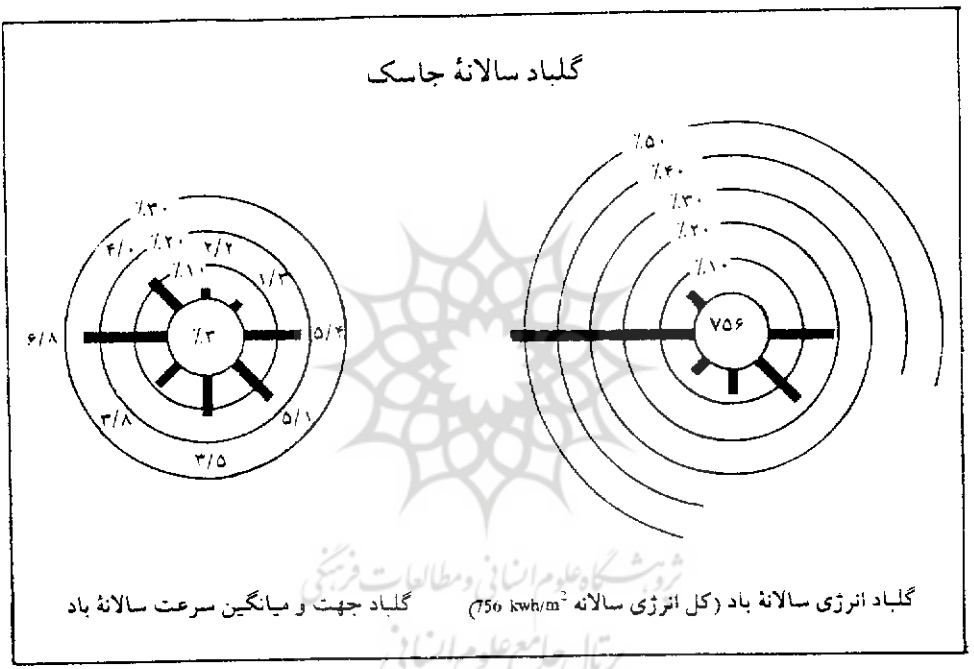
شکل شمارهٔ ۲: میانگین گلباد جهت، سرعت و انرژی سالانه ایستگاه زابل



بطورکلی منطقهٔ شرقی کشور، در حوالی زابل و منتهی الیه بخش جنوب شرقی استان خراسان

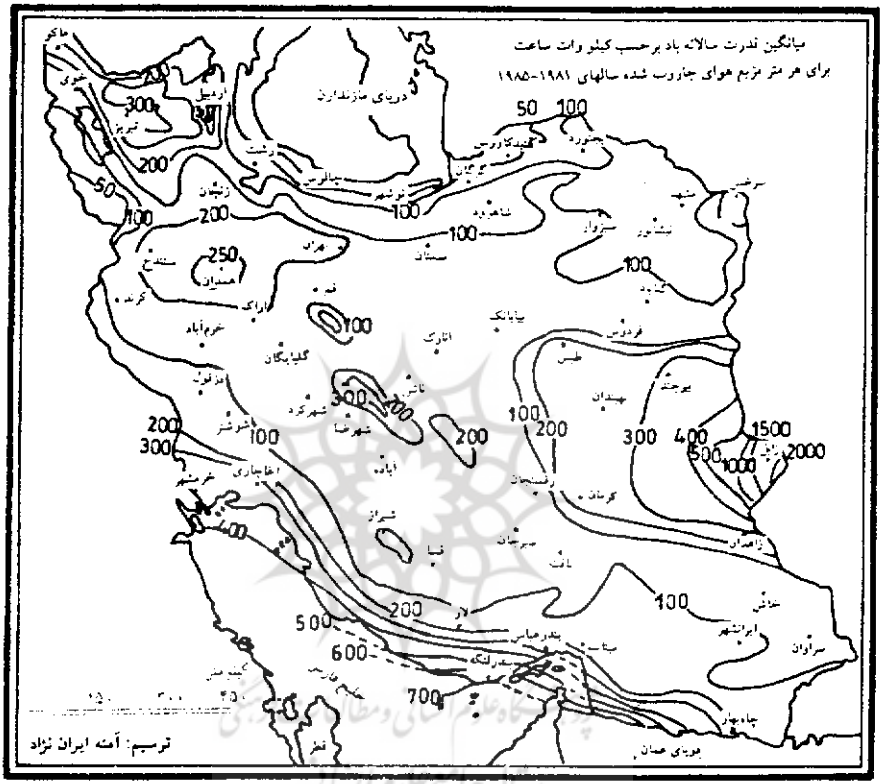
و حاشیهٔ سواحل جنوبی کشور از ناحیهٔ واقع بین چابهار و جاسک در طول ساحل به سمت غرب تا حوالی بوشهر وکلیه جزایر، قشم، لارک، کیش، لاوان، نخیلو وبالاخره خارک برای احداث توربینهای بادی مناسب و در مقایسه با سایر ایستگاههای کشور از بهترین شرایط تولید انرژی باد برخوردارند.

شکل شمارهٔ ۳: میانگین گلباد جهت، سرعت و انرژی سالانه ایستگاه جاسک



لازم به اشاره است که در بعضی از مناطق کشور به دلیل شرایط محلی (دره، تنگه، قلل مرتفع و غیره) سرعت و تداوم باد در طول سال برای احداث توربینها مناسب است. نمونه بسیار ملموسی از این شرایط در درهٔ منجیل وجود دارد که خوشبختانه وزارت نیرو به احداث توربینهای آزمایشی و بهره‌برداری از آنها پرداخته است. بدیهی است که تعیین و ارزیابی دقیقتر وضعیت انرژی باد در مناطق مشابه مستلزم وجود شبکه‌های ایستگاههای هواشناسی فشرده‌تری است که امید است در آینده امکانات تأسیس آنها فراهم شود.

نقشهٔ شمارهٔ ۵:میانگین سالانه توان انرژی بادکشور(برحسب کیلووات ساعت)به‌ازای هر متر مربع از سطح هوایی که توسط توربینها جاروب می‌شود.



منابع و مآخذ:

1- Avril Price - Budgen,: *Using Meteorological Information and Products*. Ellis Horwood 1990.

2- Bets. A, "Windmill in the light of Modern Research". *Tech. Memo*, No 474 National Advisory. Committee for Aearonautics 1927.

3- Benesch, W,: *Die Windverhaltnisse in der Bundesrepublik im Hindblick auf die Windkraftnutzung*. Ber Dt. Wetterd. Nr. 147 (1978).

4- Budyko, M.I,: *The Heat Balance of Earth's Surface*,. U.S - Department of Commerce. Weather Bureau. Washington 1958.

5- *Meteorological Yearbooks 1981 - 1985*. Iranian Meteorological Organization. Ministry of Road and Transportation.

6- Sellers, W.D. *Physical Climatology*,: Chicago and London 1965.

7- Windheim, R, "Wind Energy Utiltisation", *Status of Research and Development Int. Sonnenforum*, Berlin 11. bis 14. Berichte Bd, 2, 1984.

8- Windheim, R, "Storm aus Wind", *Ein Uberblick uber die Aussichten von Forschug und Entwicklung*. Jaherstagung 1982 der Deutschen Gesellschaft fur Luft und Raumfahrt. e. V., Stuttgart, 1982.

۹- ثقفی، محمود. انرژی بادی و کاربرد آن در کشاورزی. انتشارات دانشگاه‌تهران، شماره ۲۱۷۲،آبان ماه ۱۳۷۲.

۱۰- دولتشاهی، ایرج. «نیروگاههای بادی، منبع بی پایان انرژی آینده»، دانشمند، سال ۳۲، شمارهٔ ۳۶-۳۷ اردیبهشت ۱۳۷۳، (ترجمه).