

محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع ویبال دوپارامتره

چکیده

گسترده‌گی نیاز انسان به منابع انرژی همواره از مسائل اساسی و مهم در زندگی بشر محسوب می‌شود و تلاش برای دستیابی به یک منبع پایان‌ناپذیر انرژی از آرزوهای دیرینه انسان بوده است. انرژی‌های فسیلی مانند نفت، گاز و زغال سنگ سرانجام روزی به پایان خواهند رسید. این امر سبب شده است که کشورهای توسعه یافته و صنعتی با جدیت هرچه تمام‌تر استفاده از سایر انرژی‌های موجود در طبیعت و به خصوص انرژی‌های نو را مورد توجه قرار دهند. افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوزاندن منابع فسیلی بحث گرمایش جهانی و اثر پدیده گلخانه‌ای و ریزش باران‌های اسیدی همگی لزوم صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی و توجه مضاعف به استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر را ایجاب می‌نمایند. استفاده از انرژی خورشید، باد، امواج، زمین گرمایی، هیدروژن، زیست توده^۱ و غیره که به انرژی‌های نو موسومند، مستلزم مطالعات و تحقیقات فراوان، قبل از استفاده می‌باشند. در کشور ما نیز قابلیت‌ها و پتانسیل‌های خوبی جهت نصب و راه‌اندازی توربین‌های برق-بادی وجود دارد که با توجه به توجیه‌پذیری اقتصادی آن و تحقیقات در این زمینه، سرمایه‌گذاری‌هایی صورت گرفته است. توسعه و کاربرد این تکنولوژی چشم‌انداز روشنی را فراروی سیاست‌گذاران بخش انرژی کشور قرار داده است. در این مقاله با استفاده از داده‌های سه ساعته چند ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره زمانی ده ساله ۱۹۸۶ الی ۱۹۹۵، چگالی توان باد با دو

1. Biomass.

روش مستقیم و توزیع فروانی سرعت و بیال محاسبه شده است. تحقیقات نشان داده که توزیع‌های و بیال و رایله بهترین برازش را برای مکعب سرعت باد ارایه می‌دهند و به خصوص اولین توزیع کاربرد بیشتری در سراسر دنیا داشته است. برای شناسایی اقلیم منطقه از نقطه نظر رژیم باد، تعیین مشخصات سینوپتیکی و نوع توپوگرافی هر ایستگاه لازم است. بدین ترتیب مناطق مستعد برای تولید نیروی برق از انرژی باد با توجه به اقلیم هر منطقه و بادهای محلی موجود شناخته می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند به غیر از دره منجیل مناطق مستعدی نظیر سردشت و ماهشهر از نظر تولید انرژی باد وجود دارند. سرمایه‌گذاری در این زمینه مستلزم تحقیقات فراوان از نقطه نظر اقلیمی و شرایط هواشناسی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: انرژی‌های تجدیدپذیر، باد کوهستان- دره، توده زنده، چگالی توان باد، نسیم دریا و خشکی، توزیع و بیال و رایله، ایران.

مقدمه

انرژی باد نظیر سایر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر از نظر جغرافیایی گسترده و در عین حال به صورت پراکنده و غیرمتمرکز و تقریباً همیشه در دسترس می‌باشد. وزش باد طبیعتی نوسانی، متناوب و غیر دائمی دارد. این انرژی تا پیش از انقلاب صنعتی به عنوان یک منبع انرژی، به طور وسیعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفت، ولی در دوران انقلاب صنعتی، استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل ارزانی و قابلیت اطمینان بالا، جایگزین انرژی باد شد. در این دوره توربین‌های بادی قدیمی، قابل رقابت با بازار انرژی‌های نفت و گاز نبودند ولی مجدداً در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۸ در اثر دو شوک بزرگ نفتی، ضربه بزرگی به اقتصاد انرژی‌های حاصل از نفت و گاز وارد آمد و به این ترتیب هزینه انرژی‌های تولید شده به وسیله توربین‌های بادی در مقایسه با نرخ جهانی قیمت انرژی بهبود یافت. پس از آن مراکز و مؤسسات تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های متعددی در سراسر دنیا به بررسی تکنولوژی جدید استفاده از انرژی باد پرداختند. به علاوه این بحران باعث تمایلات جدیدی در زمینه کاربرد تکنولوژی انرژی باد جهت تولید برق متصل به شبکه، پمپاژ آب و تأمین انرژی الکتریکی نواحی مختلف شد. از سال ۱۹۷۵ به بعد پیشرفت‌های شگرفی در زمینه توربین‌های بادی در جهت تولید برق به عمل آمده است. در سال ۱۹۸۰

اولین توربین برق- بادی متصل به شبکه سراسری نصب گردید. بعد از مدت کوتاهی اولین مزرعه برق- بادی چند مگاواتی در آمریکا نصب و به بهره‌برداری رسید. در پایان سال ۱۹۹۰، ظرفیت توربین‌های برق- بادی متصل به شبکه در جهان به ۲۰۰ مگاوات با توانایی سالانه تولید ۳۲۰۰ Gwh رسید که تقریباً تمام این تولید مربوط به ایالت کالیفرنیا در آمریکا و کشور دانمارک بود (سازمان انرژی‌های نو- سانا، گزارش سوم، ۱۳۸۳، ۵). امروزه کشورهای دیگری نظیر هلند، آلمان، بریتانیا، ایتالیا و هندوستان برنامه‌های ملی و ویژه‌ای را جهت توسعه و عرضه تجاری انرژی باد آغاز کرده‌اند. در دهه گذشته، هزینه تولید انرژی به کمک توربین‌های بادی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

۱. مزایای بهره‌برداری از انرژی باد

انرژی باد نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر از ویژگی‌ها و مزایای بالاتری برخوردار است که اهم آنها عبارتند از:

الف- عدم نیاز توربین‌های بادی به سوخت‌های فسیلی که در نتیجه از میزان مصرف آنها می‌کاهد.

ب- رایگان بودن انرژی باد.

ج- توانایی تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق.

د- کمتر بودن هزینه‌های جاری و سرمایه‌گذاری انرژی باد در بلندمدت.

ه- تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار آن.

و- قدرت مانور زیاد جهت بهره‌برداری در هر ظرفیت و اندازه (از چند وات تا چندین مگاوات).

ز- عدم نیاز به آب.

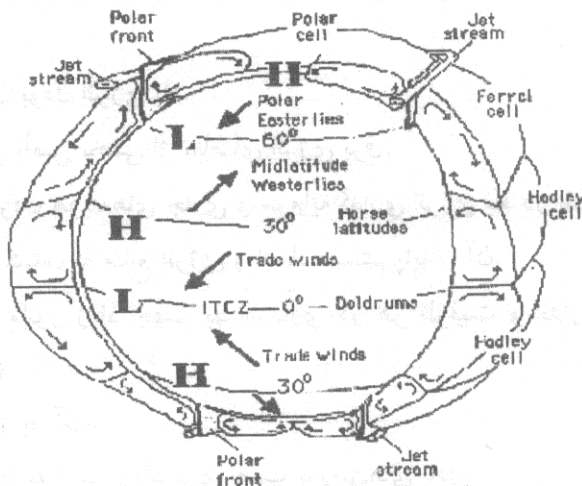
ح- عدم نیاز به زمین زیاد برای نصب توربین‌های بادی.

ط- نداشتن آلودگی‌های زیست‌محیطی نسبت به سوخت‌های فسیلی.

۲. منشأ باد

تابش نور خورشید در عرض‌های جغرافیایی مختلف کره زمین موجب تغییراتی در فشار و دما می‌شود و در نتیجه باد به وجود می‌آید. در مناطق استوایی تابش نور خورشید سبب افزایش دمای محیط و در نواحی قطبی باعث کاهش آن می‌شود. بر روی خط استوا

عرض صفر درجه) هوای گرم صعود کرده و در سطوح بالای جوی به سمت شمال و جنوب منحرف می‌شود. در همان زمان هوای قطبی نزول کرده و در سطوح پایین جوی به سمت استوا حرکت می‌کند. این انتقال همرفتی^۲ هوا بین استوا و قطبین تحت تأثیر گردش زمین واقع شده و سه سلول چرخشی جداگانه را به وجود می‌آورد. سلول جنب حاره‌ای را هادلی^۳، سلول میانی را فرل^۴ و سومی را سلول قطبی^۵ می‌نامند. در نیمکره شمالی در اثر نیروی کوریولیس جهت باد به سمت راست منحرف می‌شود، در نتیجه در عرض‌های کمتر از ۳۰ درجه شمالی بادهای سطوح پایین دارای جهت شرقی و بالاتر از آن، غربی می‌باشند. در همان زمان هوا بالای قطب شمال به سمت راست منحرف شده و در عرض‌های بالاتر از ۶۰ درجه شمالی جهت بادهای شرقی می‌شوند. جهت باد بین عرض ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی غربی است. در نیمکره جنوبی جهت وزش باد معکوس می‌باشد (Sorbian, 2003, 13). کمربند پرفشار تقریباً دائمی (با حرف H نمایش داده شده است) نزدیک عرض جغرافیایی ۳۰ درجه در هر دو نیمکره شکل می‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱ گردش عمومی جو، سیستم‌های کم فشار و پرفشار

هوای اطراف عرض ۶۰ درجه و منطقه کم فشار جنب قطبی^۶ (با حرف L نمایش داده شده است) در دو نیمکره صعود می‌کند. کم فشار جنب قطبی، هوای سرد در حال حرکت به سمت جنوب را از هوای معتدل در حال حرکت به طرف قطب شمال جدا

2. Convective.

3. Hadley.

4. Ferrel.

5. Polar.

6. Subpolar.

می‌کند. مرز بین سلول‌های قطبی و فرل جبهه قطبی^۷ نامیده می‌شود. در منطقه تروپوپاز و بالاتر از جبهه قطبی، جریانی از بادهای غربی وجود دارد که جت استریم نامیده می‌شود. در جت استریم، هوا با سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند. سرعت این جریان چند صد کیلومتر بوده در حالی که عمق آن چند کیلومتر می‌باشد. منطقه نزدیک استوا کمربند^۸ (ITCZ) نامیده می‌شود. این کمربند دارای آب و هوایی یکنواخت و بادهای ضعیف بوده و به منطقه آرامگان استوایی^۹ معروف است. بادهای ثابت شرقی بین عرض صفر و ۳۰ درجه را بادهای تجارتی^{۱۰} می‌گویند. عرض‌های صفر و ۳۰ درجه به عرض‌های راسبی معروفند. بنابراین با توجه به این جریانات دائمی کره زمین جهت‌های باد غالب طبق جدول ۱ تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۵].

جدول ۱ جهت بادهای غالب کره زمین

عرض جغرافیایی	۹۰ تا ۶۰	۶۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۰	۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۶۰	۶۰ تا ۹۰
جهت	درجه شمالی	درجه شمالی	درجه جنوبی	درجه جنوبی	درجه شمالی	درجه جنوبی
	شمال شرقی	جنوب غربی	جنوب شرقی	شمال شرقی	جنوب غربی	جنوب شرقی

باد غالب در استفاده از انرژی باد، نقش مهمی دارد و توربین‌های بادی در مکان‌هایی نصب می‌شوند که در این جهت‌ها دارای کمترین مانع باشند. شرایطی وجود دارد که این سیستم‌های بزرگ مقیاس دارای شدت کمتری بوده و جریانات محلی بر این الگوها حاکم می‌شوند و آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۳. بادهای محلی

بادهای محلی همان جریانات میان مقیاس^{۱۱} با اندازه‌ای از مرتبه چند ده متر تا چند صد کیلومتر می‌باشند. این جریانات در اثر توپوگرافی به صورت مکانیکی یا گرمایی در سطح زمین یا جو آزاد تشکیل می‌شوند. به عنوان مثال بادهای کوهستان- دره به صورت مکانیکی در اثر توپوگرافی سطح زمین شکل می‌گیرند. از جریاناتی که به صورت گرمایی در جو آزاد تشکیل می‌شوند می‌توان به هاریکن‌ها و توفان‌های شدید همرفتی اشاره نمود. از جریانات میان مقیاس می‌توان به نسیم دریا و خشکی، جزایر گرمایی نسیم دریاچه و مونسون اشاره کرد (Sorbjan, 2003, 20).

7. Polar Front.

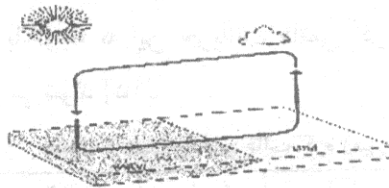
10. Trade Winds.

8. Inter tropical convergence zone.

11. Meso-Scale.

9. Doldrums.

۳-۱- نسیم دریا و خشکی: خشکی‌ها در طول روز نسبت به دریاها سریع‌تر گرم شده و هوای مجاور آنها صعود می‌کند. سپس جریان هوا در سطوح بالای جو به سمت دریا حرکت می‌کند. در نتیجه یک کم فشار در سطح زمین تشکیل شده و هوای سرد را از دریا جذب می‌کند. این پدیده نسیم دریا نامیده می‌شود، یعنی طی روز جریان هوای خنک در سطح زمین از سمت دریا به خشکی می‌وزد. شب هنگام این پدیده عکس شده که به آن نسیم خشکی می‌گویند. نسیم خشکی عموماً در شب دارای سرعت کمتری است زیرا اختلاف دما بین خشکی و دریا در شب کمتر از روز است (شکل ۲).



شکل ۲ نمای شماتیکی از نسیم دریا

جریان مونسون شرقی آسیا همان نسیم دریا و خشکی است و جهت آن با فصل تغییر می‌کند. این جریان باعث بارندگی‌هایی در منطقه جنوب ایران از ماه‌های فروردین تا آبان می‌شود (تقفی، ۱۳۸۲، ۱۴۳).

۳-۲- بادهای کوهستان- دره: زمانی که هوای دره و مناطق مجاور آن گرم می‌شود، چگالی آن کاهش پیدا کرده و در امتداد شیب به طرف بالا حرکت می‌کند. این جریان در روز اتفاق می‌افتد. در شب جهت حرکت عکس شده و باد روی شیب به سمت پایین وزیده می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳ نمای شماتیکی از بادهای کوهستان- دره

بادهای کوهستان- دره ممکن است مفید باشند مانند پدیده فون^{۱۲} در کوه‌های آلپ و شمال ایران، شینوک^{۱۳} در کوهستان راکی و زوندا^{۱۴} در رشته کوه آند (منبع شماره ۱۶). در ایران

12. Foehn.

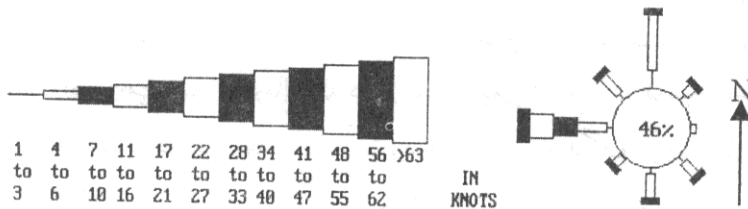
13. Chinook.

14. Zonda.

هم یکی از بادهای کوهستان- دره همان باد صد و بیست روزه سیستان است که از کوه‌های افغانستان به سمت بیابان‌های شرقی ایران می‌وزد، از اردیبهشت شروع شده و تا مرداد ادامه می‌یابد. سرعت آن گاهی تا بیشتر از ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت نیز می‌رسد (ثقفی، ۱۳۸۲، ۱۴۳).

۴. گلباد

گلبادها نمودارهای گرافیکی هستند که توزیع فراوانی سرعت و جهت باد را نشان می‌دهند. این نمودارها معمولاً بادهای غالب مناطق مختلف را نشان می‌دهند و بهترین راهنمای نصب توربین‌های بادی به حساب می‌آیند. گلبادها می‌توانند ۸، ۱۲، ۱۶، و ۳۲ جهتی باشند که نوع ۱۲ جهتی آن در بیشتر مناطق دنیا استفاده می‌شود (منبع شماره ۱۷). گلباد در یک ایستگاه هواشناسی و مناطق اطراف آن تقریباً یکسان است و می‌توان با روش‌های مناسب درون‌یابی (میانگین‌گیری)، گلباد مناطق فاقد ایستگاه هواشناسی را محاسبه نمود. در مناطق کوهستانی و ساحلی ممکن است این ساده‌سازی، جواب صحیح و قابل قبولی را ارائه ندهد (شکل ۴).



شکل ۴ گلباد (رحیم‌زاده، ۱۳۷۳، ۵ و ۶)

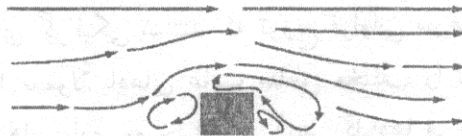
۵. تغییرپذیری سرعت باد

باد دارای تغییرات روزانه، فصلی و سالانه است. در ضمن باد دارای تغییرات کوتاه مدتی است که باعث می‌شود محتوای انرژی باد همیشه متغیر باشد (وزارت نیرو- دفتر انرژی‌های نو، ۱۳۷۵، ۱۹۷). در اغلب جاهای دنیا به دلیل تغییرات دما، سرعت باد در روز بیشتر از شب است. همچنین باد روز متلاطم‌تر بوده و جهت آن بیشتر تغییر می‌کند. باد زمستان نسبت به تابستان دارای سرعت بیشتری بوده و سرعت متوسط آن از سالی به سال دیگر تغییر می‌یابد (منبع شماره ۱۸).

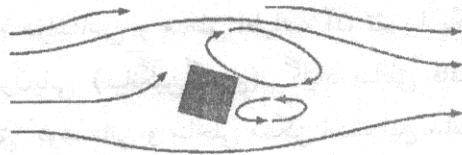
۶. عوامل کاهش‌دهنده محتوای انرژی باد

۱-۶- موانع: ساختمان‌ها، درختان، صخره‌ها و ... سرعت باد را به طور قابل ملاحظه‌ای

کاهش می‌دهند و در پشت خود تلاطم^{۱۵} ایجاد می‌کنند. معمولاً پشت موانع تاوه‌هایی^{۱۶} شکل می‌گیرد که افت و خیزهای سرعت و جهت باد را افزایش می‌دهند، بنابراین محتوای انرژی باد به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. معمولاً وسعت منطقه تلاطم تا سه برابر ارتفاع موانع می‌باشد (شکل‌های ۵ و ۶)، (منبع شماره ۱۹).



شکل ۵ گسترش منطقه تلاطم در جهت باد سوی جریان وقتی که از کنار به آن توجه شود.



شکل ۶ گسترش منطقه تلاطم وقتی که از بالا به آن توجه شود.

بعضی موانع مانند درختان که در تابستان دارای شاخ و برگ بیشتری هستند، سرعت باد را عمدتاً کاهش می‌دهند در حالی که در زمستان نیمی از جریان هوا به راحتی از آنها عبور می‌کند. در تابستان این مقدار به $\frac{1}{3}$ خود می‌رسد. سازندگان توربین‌های بادی اثر موانع را تا یک کیلومتر و کمتر، در جهت وزش باد غالب در نظر می‌گیرند. همچنین با در نظر گرفتن ارتفاع مانع، توربین نباید با فاصله‌ای به اندازه ۵ برابر ارتفاع مانع تا آن قرار بگیرد (منبع شماره ۲۰).

۶-۲- اثر وک^{۱۷}: هوایی که توربین را ترک می‌کند دارای محتوای انرژی کمتری نسبت به جریانی است که به توربین می‌رسد (اصل پایستگی انرژی). به عبارت دیگر توربین خود مانند یک سایبان^{۱۸} در مقابل باد عمل می‌کند، یعنی دنباله‌ای از باد متلاطم و با سرعت کم در پشت توربین تشکیل می‌شود. توربین‌های داخل پارک‌ها معمولاً با فاصله سه برابر قطر پره‌های آنها در کنار یکدیگر نصب می‌شوند (منبع شماره ۲۱).

۶-۳- ناهمواری^{۱۹} و چینش باد^{۲۰}: نیروی مالش تا ارتفاع یک کیلومتری از سطح زمین، باد را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. یعنی سطوح ناهموار مانند جنگل‌ها و

15. Turbulence.
18. Wind Shade.

16. Vortex.
19. Roughness.

17. Wake.
20. Shear.

شهرهای بزرگ به طور قابل ملاحظه‌ای سرعت باد را کاهش می‌دهند در حالی که بزرگراه‌ها و باند فرودگاه‌ها هموارتر هستند. گیاهان بلند درختچه‌ها، بوته‌زارها، چمن‌زارها و ... سرعت باد را خیلی کاهش می‌دهند. گفته می‌شود گوسفندان به واسطه عمل چریدن، بهترین دوستان توربین‌های بادی هستند و سطح زمین را صاف و هموار نگاه می‌دارند. امروزه تقسیم‌بندی‌های معتبری در اکثر اطلس‌های انرژی در سرتاسر دنیا برای طبقه‌بندی ناهمواری وجود دارد. به طور مثال مناطقی با درختان و ساختمان‌های زیاد دارای ناهمواری ۳ تا ۴ هستند در حالی که سطح دریا در طبقه صفر ناهمواری قرار می‌گیرد. سطوح آسفالت (باند فرودگاه‌ها) دارای ناهمواری ۰/۵ می‌باشند. همچنین عدد ۰/۵ برای سطوح صاف و پهناور و بازی که توسط گوسفندان چریده می‌شوند به کار می‌رود. چینش باد به معنی تغییر سرعت با ارتفاع می‌باشد. یعنی نمایه قائم باد با نزدیک شدن به سطح زمین به طرف سرعت‌های پایین منحرف می‌شود. رابطه چینش باد به شکل زیر است:

$$v = v_{ref} \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \quad (1)$$

V عبارت است از سرعت باد در ارتفاع Z از سطح زمین. V_{ref} سرعت باد در ارتفاع Z_{ref} می‌باشد که تابع لگاریتمی طبیعی است. Z ارتفاع بالای سطح زمین برای سرعت مطلوب V می‌باشد. Z_0 طول ناهمواری در جهت جریان باد است. Z_{ref} ارتفاعی است که در آن سرعت دقیق باد یا V_{ref} را می‌دانیم. رابطه (۱) در شرایط پایدار خنثی صادق است که سطح زمین نه گرم و نه سرد می‌شود (منبع شماره ۲۲).

۷. عوامل افزایش‌دهنده انرژی باد

۷-۱- بادهای محلی: می‌توان توربین را در مناطقی نصب کرد که دارای بادهای محلی نسبتاً مساعد هستند. این بادهای (مانند باد دره منجیل) دارای دوره‌های زمانی مشخصی هستند که در این دوره‌ها می‌توان از انرژی باد بیشترین استفاده را به عمل آورد.

۷-۲- اثر تونل: اگر یک تلمبه باد دوچرخه را فشار دهیم متوجه می‌شویم سرعت هوایی که دهانک تلمبه را ترک می‌کند نسبت به هوایی که در حال فشرده شدن در داخل استوانه پمپ قرار دارد، بیشتر است و اگر بین ساختمان‌های بلند و یا در یک جاده باریک بین کوهستان‌ها قدم بزنیم همین اثر را تجربه می‌کنیم. هوا زمانی که به ساختمان‌ها و یا کوهستان‌ها می‌وزد فشرده شده و سرعت آن افزایش می‌یابد. این پدیده را اثر تونل

می‌گویند. به عنوان مثال اگر سرعت باد در یک زمین باز و مسطح ۶ متر بر ثانیه باشد، سرعت آن در یک تونل طبیعی به ۹ متر بر ثانیه خواهد رسید. این پدیده زمانی مؤثر خواهد بود که تونل‌های طبیعی، صاف و هموار باشند تا از سرعت باد بر اثر ناهمواری کاسته نشود. ناهمواری باعث به وجود آمدن تلاطم و بادهای متغیر شده و سرعت باد کاهش می‌یابد، در نتیجه توربین‌ها فرسوده می‌شوند.

۷-۳- اثر تپه: روی تپه‌ها سرعت باد بیشتر از اطرافشان می‌باشد. بردارهای باد وقتی به تپه می‌رسند فشرده شده و وقتی که از آن عبور می‌کنند از حالت فشردگی خارج می‌گردند. بنابراین اگر تپه دارای شیب تند یا سطح ناهموار نباشد می‌توان از آن به عنوان مکانی برای به دست آوردن انرژی بیشتر استفاده کرد (منبع شماره ۲۳).

۸. انتخاب سایت‌های توربین باد

طبیعت یک منطقه بهترین راهنمای انتخاب سایت توربین‌های بادی می‌باشد. اگر در یک منطقه درختان و یا درختچه‌هایی وجود داشته باشد، جهت تکان خوردن آنها در اثر وزش باد، نشان‌دهنده بادهای غالب آن منطقه می‌باشد. در مناطق ساحلی، نواحی ناهموار نشان‌دهنده این است که فرسایش بادی طی قرن‌ها در آن منطقه انجام نگرفته است. گلبادهای ۳۰ ساله شاید بهترین راهنمای استفاده از انرژی باد باشند. انتخاب مزارع توربین‌های باد نیاز به زمین‌های پهناور و بازی دارد که تا حد امکان در جهت باد غالب قرار گرفته باشند. مثلاً تپه‌های بزرگ، هموار و تقریباً گرد بهترین محل نصب توربین‌های بادی هستند. شرایط خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است یعنی باید طوری باشد که امکان تأسیس سازه‌های مرتبط وجود داشته باشد. همچنین اشکالاتی که در داده‌های هواشناسی مخصوصاً داده‌های باد وجود دارد که بایستی به دقت مورد توجه قرار بگیرند. به عنوان مثال داده‌های باد برای استفاده در پیش‌بینی‌های هوا و مقاصد هوانوردی باید دقیق باشند ولی در محاسبات انرژی باد، لازم است دقت از این هم بالاتر رود. در مواردی که داده‌های هواشناسی مستقیماً استفاده می‌شوند، پتانسیل انرژی باد کمتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود (منبع شماره ۲۴).

۹. محاسبات مربوط به انرژی باد

۹-۱- محاسبه چگالی توان باد: انرژی جنبشی باد متناسب با مربع سرعت است. وقتی که باد به سطحی وزیده شود، انرژی جنبشی تبدیل به نیروی وارد بر آن سطح

می‌شود. حاصلضرب نیرو در سرعت، توان را می‌دهد. چون نیروی باد متناسب با مربع سرعت است، توان باد متناسب با مکعب سرعت خواهد بود (تقفی، ۱۳۸۲، ۱۶۲). انرژی جنبشی عبارتست از:

$$K = \frac{1}{2} M v^2 \quad (۲)$$

که K انرژی جنبشی و M جرم هوای متحرک (باد) و v سرعت باد می‌باشد.

$$\rho = \frac{M}{V} \Rightarrow M = \rho V \quad (۳)$$

ρ چگالی و V حجم

$$K = \frac{1}{2} \rho V \cdot v^2 \quad (۴)$$

حجم را می‌توانیم به صورت حاصلضرب سطح در طول بنویسیم. $V = A \cdot l$ که A سطح و l فاصله است.

$$K = \frac{1}{2} \rho A l \cdot v^2 \quad (۵)$$

سرعت عبارتست از فاصله تقسیم بر واحد زمان:

$$v = \frac{l}{t} \Rightarrow l = v \cdot t \quad (۶)$$

$$K = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad (۷)$$

توان عبارتست از انرژی جنبشی در واحد زمان:

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho A v^3 t / t = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (۸)$$

A سطح پره توربین هم می‌تواند باشد.

اما چگالی توان عبارتست از توان بر واحد سطح عمود بر جریان باد (سطح پره‌های

توربین):

$$p = \frac{P_1}{A} = \frac{\frac{1}{2} \rho A v^3}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (۹)$$

همچنین می‌توانیم به جای سطح A ، πr^2 قرار دهیم که r شعاع سطح پره‌های توربین است.

چگالی توان بر حسب وات بر متر مربع، ρ چگالی هوا برابر با ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب در فشار سطح تراز دریا و دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه خواهد بود (منبع شماره ۲۵).

۹-۲- محاسبات مربوط به چگالی هوا

روش اول: می‌توان چگالی هوا را مساوی با مقدار ثابت ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفت.

روش دوم: می‌توان از رابطه تجربی زیر استفاده نمود (Hughes, 2000, 1).

$$\rho = 1.225 - (1.194 * 10^{-4}) * z \quad (10)$$

که Z ارتفاع ایستگاه در سطح تراز دریا برحسب متر می‌باشد.

روش سوم: اگر فشار و دما را داشته باشیم:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (11)$$

p فشار هوا برحسب پاسکال یا نیوتن بر مترمربع و R ثابت گازها برابر ۲۸۷ ژول بر کیلوگرم درجه کلوین و T دمای هوا برحسب درجه کلوین است.

روش چهارم: اگر دمای هوا معلوم و فشار مجهول باشد:

$$\rho = \left(\frac{p_0}{RT} \right) * \exp\left(-g * z / RT \right) \quad (12)$$

p_0 فشار استاندارد در سطح تراز دریا و برابر است با ۱۰۱۳۲۵ پاسکال و g ثابت گرانشی برابر است ۹/۸ متر بر مجذور ثانیه و z ارتفاع ایستگاه در بالای سطح تراز دریا برحسب متر می‌باشد. در ایران رابطه تجربی زیر برای محاسبه چگالی هوا استفاده شده است (اطلس انرژی باد در کشور، ۱۳۷۶، ۶۶).

$$\rho = \left\{ \frac{(1000 + Amix)}{\left(1000 + \frac{Amix}{0.62198} \right)} \right\} * \left\{ \frac{QFE}{(2.8704 + (T_a + 273.15))} \right\} \quad (13)$$

که $Amix$ همان نسبت آمیزه^{۲۱} (جرم بخار آب موجود بر واحد جرم هوای خشک برحسب گرم بر کیلوگرم) و QFE فشار ایستگاه می‌باشد.

۹-۳- میانگین سرعت باد: کمیت میانگین سرعت باد^{۲۲} (MWS) شاخصی است که پتانسیل باد را نشان می‌دهد. مثلاً میانگین سالانه باد با مقدار ۶ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری می‌تواند یک کمیت مطلوب اقتصادی در مزارع توربین‌های بادی باشد (Rosen, 1998, 11).

21. Mixing ratio.

22. Mean Wind Speed.

میانگین سرعت باد از نظر ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MWS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (14)$$

N اندازه نمونه و v_i سرعت باد در i امین مشاهده می‌باشد. اندازه نمونه بزرگ است و برای گروهی از داده‌های سرعت باد با فاصله‌های مشخص مفید می‌باشد. این داده‌ها هیستوگرامی از توزیع سرعت باد به وجود می‌آورند. احتمال اینکه سرعت باد مشاهده شده در یک فاصله معین قرار گرفته باشد عبارتست از:

$$p(v_j) = \frac{n_j}{N} \quad (15)$$

که v_j میانه^{۲۳} و n_j تعداد مشاهدات در فاصله z ام می‌باشد. بنابراین میانگین سرعت باد عبارتست از:

$$MWS = \sum_{j=1}^M p(v_j) v_j \quad (16)$$

که M تعداد فواصل می‌باشد. بنابراین داریم:

$$MWS = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv \quad (17)$$

که $f(v)$ تابع توزیع احتمال غیرتجمعی است. توزیع فراوانی سرعت باد می‌تواند به صورت توزیع ویبال^{۲۴} نمایش داده شود. در اکثر نقاط دنیا برای نشان دادن توزیع فراوانی سرعت باد از روابط ویبال و رایله^{۲۵} استفاده می‌نمایند. رابطه توزیع تجمعی ویبال به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$F(v, \alpha, \beta) = \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (18)$$

توزیع غیرتجمعی ویبال عبارتست از:

$$f(v, \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^\alpha \right] & v \geq \alpha \geq \beta \geq 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (19)$$

23. Median.

24. Weibull.

25. Rayleigh.

α عبارتست از پارامتر شکل^{۲۶} و β پارامتر مقیاس^{۲۷} می باشد. توزیع ویبال بهترین روش برای برازش به داده های باد می باشد و برای برآورد توزیع پیوسته سرعت باد از مقادیر گسسته مشاهده ای بسیار مناسب است. اگر پارامترهای α و β تعیین گردند میانگین سرعت باد با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۹) به صورت زیر محاسبه می شود.

$$MWS = \beta \Gamma(z) = \int_0^{\infty} v \cdot \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha}\right] dv \quad (20)$$

معادله (۲۰) با استفاده از توزیع گاما، ساده سازی می گردد:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} dt \quad (21)$$

$$\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha} = t \quad \text{و} \quad (z-1) = \frac{1}{\alpha} \quad (22)$$

بنابراین میانگین سرعت باد عبارتست از:

$$MWS = \beta \cdot \Gamma\left[1 + \frac{1}{\alpha}\right] \quad (23)$$

۹-۴- چگالی توان باد: با امید ریاضی گرفتن از رابطه چگالی توان باد داریم

(Hennessy, 1977, 275):

$$E(P) = \frac{1}{2} E(\rho v^3) \quad (24)$$

با در نظر گرفتن استقلال بین دو پارامتر ρ و v ، امید ریاضی توان باد به شکل زیر

در می آید:

$$E(P) = \frac{1}{2} E(\rho) \cdot E(v^3) \quad (25)$$

$$E(P) = \frac{1}{2} \rho E(v^3) \quad (26)$$

$$E(P) = \frac{1}{2} \rho \int v^3 \cdot f(v) \cdot dv \quad (27)$$

می توان نتیجه گرفت که میانگین مکعب سرعت باد از رابطه گشتاور سوم حول نقطه

صفر به دست می آید.

$$E(v^3) = \sigma^3 \left[\sqrt{\beta_1} + 3 \frac{\mu}{\sigma} + \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^3 \right] \quad (28)$$

که در آن μ و σ و β_1 به ترتیب میانگین، انحراف معیار و چولگی توزیع سرعت

26. Shape parameter.

27. Scale parameter.

محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع ویبال دو پارامتره ۱۶۵

باد هستند. در صورتی که توزیع سرعت باد متقارن باشد ($\beta_1 = 0$) میانگین سرعت باد از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$E(v^3) = 3\mu\sigma^3 \quad (29)$$

r امین گشتاور متغیر تصادفی x حول نقطه صفر از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶].

$$E(x^r) = \beta^r \Gamma(1 + \frac{r}{\alpha}) \quad (30)$$

میانگین و واریانس و سایر مشخصات توزیع ویبال به ترتیب عبارتند از:

$$\mu = \beta \Gamma(1 + \frac{1}{\alpha}) \quad \text{میانگین} \quad (31)$$

$$\sigma^2 = \beta^2 \{ \Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) - [\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})]^2 \} \quad \text{واریانس} \quad (32)$$

$$\text{Mode} = \beta [\frac{\alpha - 1}{\alpha}]^{\frac{1}{\alpha}} \quad \text{نما} \quad (33)$$

$$\text{Median} = \beta (\ln 2) \quad \text{میانه}$$

۵-۹- روش آغازگری نیوتن-رافسون در تخمین پارامترهای توزیع ویبال به شیوه

بیشینه درست‌نمایی^{۲۸}: تخمین‌های بیشینه درست‌نمایی برای پارامترهای α و β با حل دستگاه معادلات زیر امکان‌پذیر است [۱۱].

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = 0 \quad \& \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \beta} = 0 \quad (34)$$

که در آن $\ln L$ لگاریتم تابع احتمال درست‌نمایی است و با معادله (۳۵) نوشته می‌شود.

$$\ln L = N \ln \alpha - N \alpha \ln \beta + (\alpha - 1) \sum_{i=1}^N \ln x_i - \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i}{\beta} \right)^\alpha \quad (35)$$

در صورتی که نمونه اطلاعاتی ما به حجم N دارای توزیع ویبال باشد، روش نیوتن-رافسون برای حل معادلات چند مجهولی فوق با الگوریتم زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برآورد پارامترها به روش گشتاورها (α_m, β_m) به عنوان مقادیر اولیه مناسب در روش آغازگری در نظر گرفته می‌شوند.

$$\left. \begin{aligned} \alpha(r) &= \alpha(r-1) + h(r) \\ \beta(r) &= \beta(r-1) + k(r) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

که در آن $h(r)$ و $k(r)$ جملات تصحیح شده‌ای هستند که در r امین مرحله آغازگری

به دست می‌آیند.

28. Likelihood.

۱۰. برآورد سرعت باد در راستای قائم

برای برآورد قائم سرعت باد از مدل قانون توان^{۲۹} استفاده می‌شود. سرعت باد در اثر نیروی مالش سطح زمین کاهش یافته و با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود. ارتفاع استاندارد دیدبانی سرعت باد ۱۰ متر است. به دلیل آنکه ارتفاع مؤثر^{۳۰} توربین‌های بادی بین ۲۰ تا ۵۰ متر متغیر است، معمولاً برای تخمین پتانسیل انرژی باد نیاز به برون‌یابی سرعت باد در ارتفاع‌های مطلوب داریم. مثلاً برای مناطق نسبتاً هموار و با پوشش گیاهی اندک بهترین روش همان قانون توان $\frac{1}{7}$ طبق معادله زیر می‌باشد.

$$\frac{v(z)}{v(z_0)} = \left[\frac{z}{z_0} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (37)$$

z ارتفاع سرعت باد مطلوب است، $v(z)$ سرعت بادی است که باید برآورد شود و z_0 و $v(z_0)$ به ترتیب ارتفاع مرجع و سرعت باد مرجع هستند {محل ارتفاع ۱۰ متری} (روزن، ۱۹۹۸، ۱۳).

۱۱. طبقه بندی توان باد

در اطلس انرژی باد آمریکا طبقه‌بندی از ۱ تا ۷ برای توان باد استفاده می‌شود و عدد ۷ بالاترین پتانسیل انرژی باد را نشان می‌دهد (جدول ۱) (روزن، ۱۹۹۸، ۱۴).

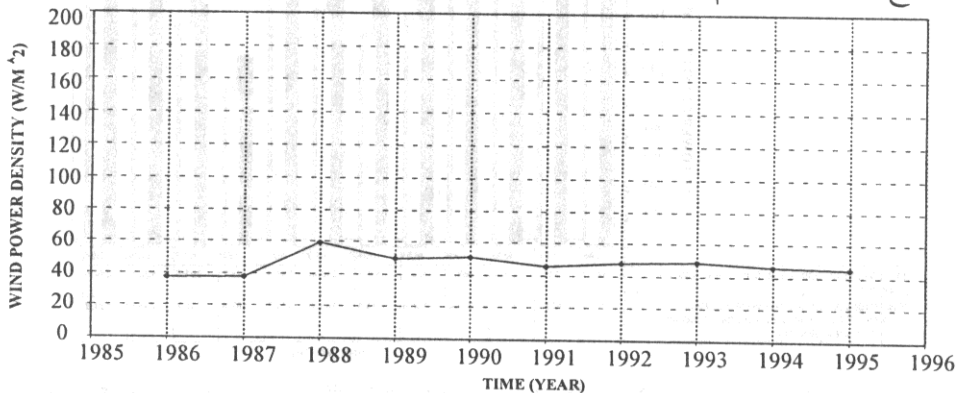
جدول ۱ سرعت باد، چگالی توان و طبقه‌بندی آن

طبقه‌بندی اطلس انرژی باد آمریکا	چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری $(\frac{w}{m^2})$	میانگین سالانه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری $(\frac{m}{s})$
۱	۰-۱۰۰	۰-۴/۴
۲	۱۰۰-۱۵۰	۴/۴-۵/۱
۳	۱۵۰-۲۰۰	۵/۱-۵/۶
۴	۲۰۰-۲۵۰	۵/۶-۶/۱۰
۵	۲۵۰-۳۰۰	۶/۱۰-۶/۴
۶	۳۰۰-۴۰۰	۶/۴-۷/۱۰
۷	۴۰۰-۱۰۰۰	۷/۱۰-۹/۴

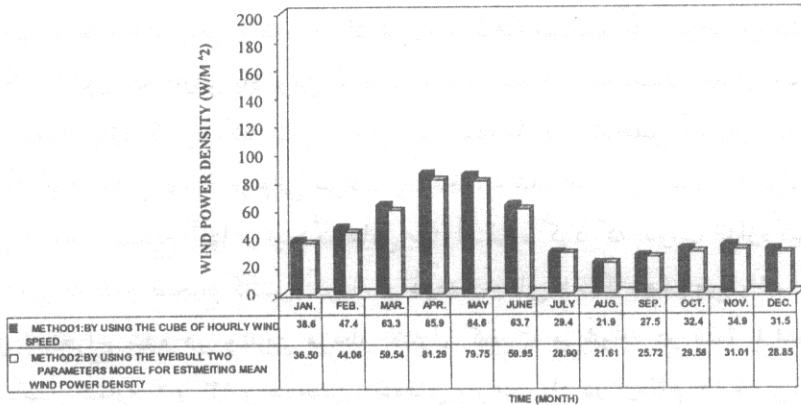
روش انجام کار و نتایج

با توجه به یکنواخت بودن توزیع سرعت باد و استفاده بهینه از اطلاعات موجود، برای محاسبه چگالی توان باد از یک دوره آماری ده ساله (۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵) همراه با کمترین

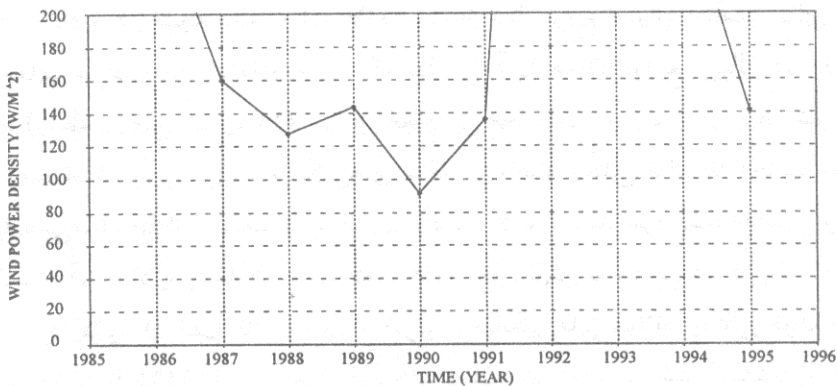
خلاً آماری استفاده شد. بدین منظور از داده‌های سه ساعته سرعت باد مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک کشور که دارای بالاترین کیفیت هستند استفاده شده است. بعد از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، کنترل کیفیت بر روی آنها انجام شده و شاخص آماری سرعت باد، مکعب آن و همچنین توزیع فراوانی سرعت باد محاسبه شده است. به منظور کنترل کیفیت داده‌ها و انتخاب صحیح آنها از ایستگاه‌هایی باید استفاده کرد که ادوات اندازه‌گیری آنها سالم بوده و به طور صحیح کالیبره گردند و درصد خطای دستگاه مشخص باشد و سپس داده‌های استخراج شده در چندین مرحله کنترل کیفیت می‌شوند. در ابتدا با استفاده از رابطه ریاضی شماره ۹ و ۱۳ و همچنین داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، چگالی توان باد به طور مستقیم محاسبه شده است. این روش چگالی توان باد را در یک نقطه با استفاده از مقادیر گسسته سرعت باد به دست می‌دهد. اما برای داشتن یک توزیع پیوسته از سرعت باد و در نتیجه مکعب آن، لازم است از یک توزیع فراوانی مناسب برای بازش به داده‌های سرعت باد استفاده شود، که بهترین آنها همان توزیع ویبال دو پارامتره می‌باشد (رابطه ریاضی شماره ۱۹). مراحل انجام این محاسبات به ترتیب از رابطه شماره ۲۰ تا ۳۶ آمده است. بدین ترتیب میانگین‌های سالانه و ماهانه چگالی توان باد محاسبه شده‌اند. در پایان می‌توان مناطق مستعد تولید انرژی باد در کشور مانند سردشت، ماهشهر و غیره را به دست آورد. لازم به تذکر است که بادهای محلی نقش به‌سزایی در افزایش توان باد دارند. نمودارهای ۱- الف تا ۴- الف به ترتیب میانگین‌های سالانه چگالی توان باد در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵ را برای چهار ایستگاه تهران- مهرآباد، سردشت، ماهشهر و اردبیل نشان می‌دهند. نمودارهای ۱- ب تا ۴- ب نیز میانگین‌های ماهانه چگالی توان باد را با استفاده از توزیع ویبال و مستقیم برای چهار شهر ذکر شده در همان فاصله زمانی ارائه می‌دهند.



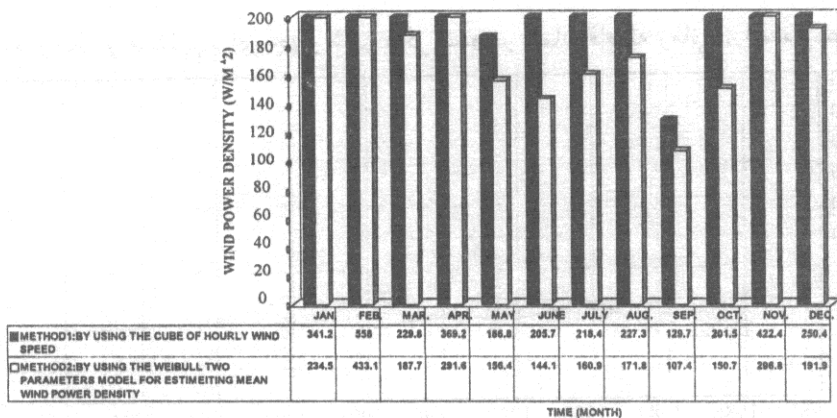
نمودار ۱- الف میانگین سالانه چگالی توان باد در تهران در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵



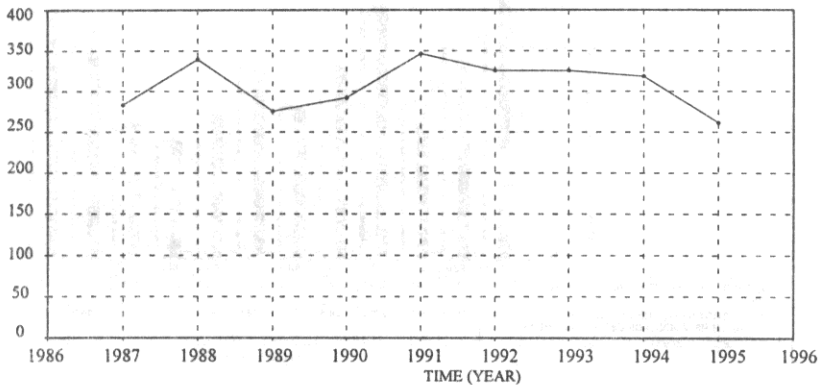
نمودار ۱- ب میانگین ماهانه چگالی توان باد (مقایسه بین محاسبه مکعب سرعت باد لحظه‌ای و برازش مکعب سرعت باد با توزیع ویبال) در تهران در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵



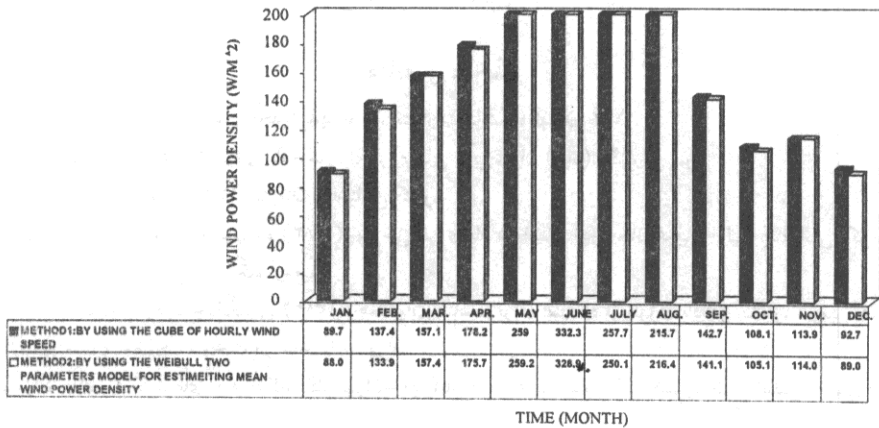
نمودار ۲- الف میانگین سالانه چگالی توان باد در سردشت در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵



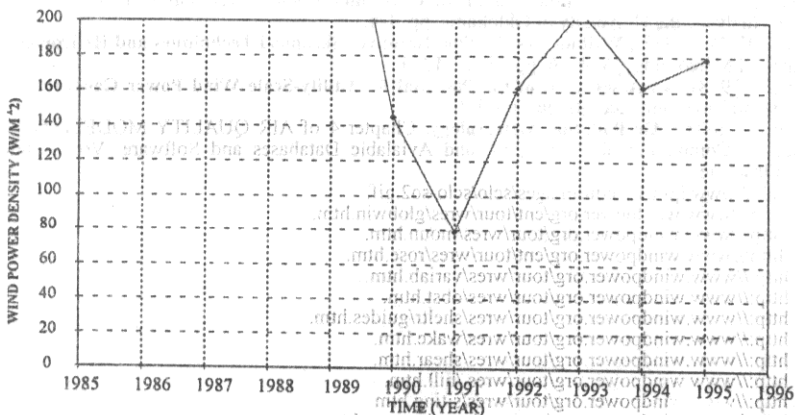
نمودار ۲- ب میانگین ماهانه چگالی توان باد (مقایسه بین محاسبه مکعب سرعت باد لحظه‌ای و برازش مکعب سرعت باد با توزیع ویبال) در سردشت در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵



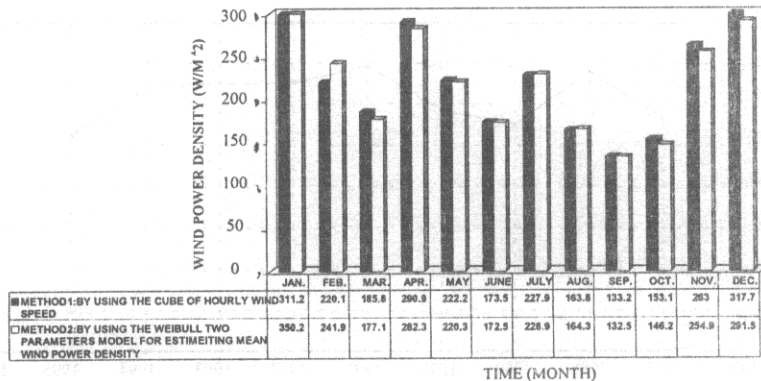
نمودار ۳- الف میانگین سالانه چگالی توان باد در بندر ماهشهر در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵



نمودار ۳- ب میانگین ماهانه چگالی توان باد (مقایسه بین محاسبه مکعب سرعت باد لحظه‌ای و برازش مکعب سرعت باد با توزیع ویبال) در بندر ماهشهر در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵



نمودار ۴- الف میانگین سالانه چگالی توان باد در بندر ماهشهر در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵



نمودار ۴- ب میانگین ماهانه چگالی باد (مقایسه بین محاسبه مکعب سرعت باد لحظه‌ای و برازش مکعب سرعت باد با توزیع ویبال) در اردیبه‌ل در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۵

منابع و مآخذ

۱. ثقفی، محمود (۱۳۸۲)؛ انرژی‌های تجدیدپذیر نوین، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۱۷۷.
۲. از انرژی‌های نو چه می‌دانید؟ انرژی باد- سازمان انرژی‌های نوین ایران (سانا)، گزارش سوم.
۳. اطلس انرژی باد در کشور، ۱۳۷۶، سازمان هواشناسی کشور.
۴. جهانگیری، زهره و فاطمه رحیمزاده (۱۳۸۳)؛ بررسی انرژی باد در استان آذربایجان غربی، اولین کنفرانس اکوانرژی ایران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.
۵. رحیمزاده، فاطمه و زهره جهانگیری (۱۳۸۲)؛ مکان‌یابی مناسب برای استفاده از انرژی باد در کشور، سومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.
۶. رحیمزاده، فاطمه؛ گلبادهای ماهیانه ایستگاه تهران- مهرآباد در ساعات سینوپتیک کشور، طرح اطلس اقلیمی ایران، سازمان هواشناسی کشور.
۷. شورای جهانی انرژی (۱۳۷۵)؛ منابع انرژی‌های تجدیدپذیر نوین، چاپ اول، وزارت نیرو، ۵۷۵.
8. EUREC Agency (2002); *The Future for Renewable Energy 2W* James & James Ltd.
9. Hennessey J. P. (1977); *Some Aspects of Wind Power Statistics*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 16, No. 2, pp.1269 – 1280.
10. Hughes T. (2000); *Lesson Number 3 in an Oklahoma Wind Power Tutorial Series*, Environmental Verification Analysis, the University of Oklohama, pp. 1-4.
11. Raymond K. W. (1977); *Weibull Distribution, Iterative Likelihood Techniques and Hydrometeorological*, Journal Applied Meteorology, Vol. 16, pp.1360 – 1364.
12. Rosen K. (1998); *An Assessment of the Potential for Utility-Scale Wind Power Generation in Eritrea*, Master Thesis in Environmental Studies, pp. 1-15.
13. Sorbjan Z. (2003); *Air Pollution Meteorology*, Chapter 4 of AIR QUALITY MODELING-THEORIES, Methodologies, Computational Techniques, and Avialable Databases and Software. Vol. I-Fundamentals, EnviroCom Institute.
14. URL: <http://www.lpi.usra.edu/images/sclo/sclo-so2.gif>.
15. URL : <http://www.windpower.org/ent/tour/wres/globwin.htm>.
16. URL : <http://www.windpower.org/tour/wres/moun.htm>.
17. URL : <http://www.windpower.org/ent/tour/wres/rose.htm>.
18. URL: <http://www.windpower.org/tour/wres/variab.htm>.
19. URL: <http://www.windpower.org/tour/wres/obst.htm>.
20. URL: <http://www.windpower.org/tour/wres/sheltr/guides.htm>.
21. URL: <http://www.windpower.org/tour/wres/wake.htm>.
22. URL: <http://www.windpower.org/tour/wres/shear.htm>.
23. URL: <http://www.windpower.org/tour/wres/hill.htm>.
24. URL: <http://www.windpower.org/tour/wres/siting.htm>.
25. URL: <http://www.windpower.org/ent/tour/wres/enrspeed.htm>.
26. URL: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr162.htm>.