

پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاههای سینوپتیک استان اردبیل

چکیده

انرژیهای پاک یا تجدید شونده به عنوان یکی از پایه‌های اساسی رشد و توسعه کشورها در آینده خواهند بود. لذا پتانسیل سنجی این انرژیها از هم اکنون الزامی است. در این مقاله پتانسیل انرژی باد در ایستگاههای سینوپتیک استان اردبیل با استفاده از داده‌های بلندمدت سه ساعته سمت و سرعت باد، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات به عمل آمده، چگالی توان باد در ایستگاههای اردبیل، خلخال، پارس‌آباد و مشکین شهر به ترتیب $۰.۲۶/۳۴۲$ ، $۰.۶۶۸/۶۰$ و $۰.۳۶۳/۷۲$ وات در مترمربع است. احتمال تجربی داده‌ها با استفاده از تابع توزیع پیوسته احتمال ویبول محاسبه شده و با توجه به آزمون کی دو، این تابع به عنوان تابعی مناسب برای برآزش داده‌های باد شناخته شده است. با توجه به تعداد ساعات وزش بادهای بالاتر از ۴ متر در ثانیه در سال، ایستگاه سینوپتیک اردبیل می‌تواند به عنوان مکانی مناسب جهت بهره‌برداری از انرژی باد به حساب آید. **کلید واژه‌ها:** استان اردبیل، گلباد، پتانسیل انرژی باد، توزیع ویبول، سرعت متوسط باد، آزمون کی دو

مقدمه

از ابتدای دهه ۱۹۸۰، بررسی جایگزینی سوختهای فسیلی با انرژیهای پاک و تجدیدپذیر در جهان آغاز شده است. بهره‌برداری از این منابع انرژی به دلیل ضرورت‌های زیست محیطی و تنوع بخشیدن به منابع انرژی مورد استفاده، در مقیاسهای کوچک شروع شده و به طور روز افزون در حال گسترش است. در آینده‌ای نزدیک، انرژیهای نو و تجدید شونده سهم بیشتری در تأمین انرژی جهان را به خود اختصاص خواهند داد. تجدیدپذیری، عدم آلودگی، گسترش این منابع در تمام جهان و سادگی بهره‌برداری، انرژیهای تجدیدپذیر را به ویژه برای کشورهای در حال توسعه از

جاذبه بیشتری برخوردار کرده است. از این رو، در برنامه‌ها و سیاستهای ملی و بین‌المللی کشورها، نقش ویژه‌ای به منابع تجدیدپذیر انرژی محول شده است. در این راستا لازم است کشور ما نیز تلاشهای جدی و مؤثری را در جهت توسعه بهره‌برداری از پتانسیل انرژی باد در کاربردهای مختلف آغاز نماید. هرچند تحقیقاتی در این خصوص توسط محققین ایرانی و نیز وزارت نیرو صورت گرفته است ولی به دلیل وسعت زیاد، تنوع توپوگرافی و غیره، تعیین دقیق پتانسیل انرژی باد کلیه نقاط کشور و تهیه اطلس انرژی باد، مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است. بنابراین لازم است توان انرژی باد مناطق جغرافیایی کشور به طور مستقل یا ناحیه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله سعی شده است امکان استفاده از انرژی باد در ایستگاه سینوپتیک استان اردبیل بررسی شود. در استان اردبیل، چهار ایستگاه سینوپتیک اردبیل، خلخال، پارس‌آباد و مشکین‌شهر وجود دارد.

هدف و پیشینه تحقیق

هدف این پژوهش، بررسی اوضاع کلی باد و ویژگیهای سمت و سرعت آن و نیز تعیین پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی استفاده از آن در ایستگاههای سینوپتیک استان اردبیل است. پیش‌بینی درصد وقوع احتمال هر یک از سرعتها و یا محدوده‌ای از سرعتها با استفاده از تابع توزیع پیوسته احتمال ویبول هدف دیگر این تحقیق است. در خصوص روش‌شناسی تحقیق، مطالعات پراکنده‌ای در برخی سایتها انجام گرفته است. برخی پژوهشگران اروپایی، آمریکایی و حتی آسیایی (Dundar, 2001; Adokoga, 1992; Ernest, 1978) و دیگران، پتانسیل سنجی باد را در برخی نقاط دنیا انجام داده‌اند. انجمن انرژی باد آمریکا (Awea)، کانادا (Cwea)، دانمارک، آلمان و ... در سالهای ۱۹۹۰ الی ۲۰۰۳، اقدام به سنجش انرژی باد و تهیه اطلس انرژی باد در برخی مکانها نموده‌اند. در کشور ما نیز برخی تحقیقات در این خصوص در قالب مقالات، طرحهای پژوهشی و رساله‌های کارشناسی ارشد انجام شده است. مجید جمیل (۱۳۷۴)، پتانسیل انرژی باد را در سایت پژوهشگاه مواد و انرژی مشکین دشت کرج بررسی نموده است. جواد نصیری (۱۳۷۶)، پتانسیل انرژی باد را در آذربایجان ایران و نیز برخی شهرستانها محاسبه کرده است. معاونت انرژی نیرو در سال ۱۳۷۴، امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد را در ایران در قالب چند طرح پژوهشی اجرا نموده و چند طرح دیگر نیز در دست اجرا دارد. در خصوص مطالعه موردی، جواد نصیری (۱۳۷۶)، برخی از خصوصیات باد را از نظر سرعت متوسط^۱، قدرت متوسط^۲، سرعت نامی^۳، فاکتور ظرفیت^۴ و غیره با

1. Mean speed of wind

2. Mean power.

3. Rated wind.

4. Capacity factor.

استفاده از آمار ایستگاه سینوپتیک خلخال محاسبه نموده است. طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون بررسی جامعی در خصوص امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان اردبیل صورت نگرفته است. پژوهش حاضر، نمایی از وضعیت انرژی باد را در ایستگاههای سینوپتیک استان اردبیل نشان می‌دهد. جهت حصول نتایج دقیق‌تر در خصوص تعیین دقیق پتانسیل انرژی باد این ایستگاهها، نصب سنسورهای بیشتر در مکانهای مختلف جهت برداشت اطلاعات باد با فواصل کوتاه مدت لازم است.

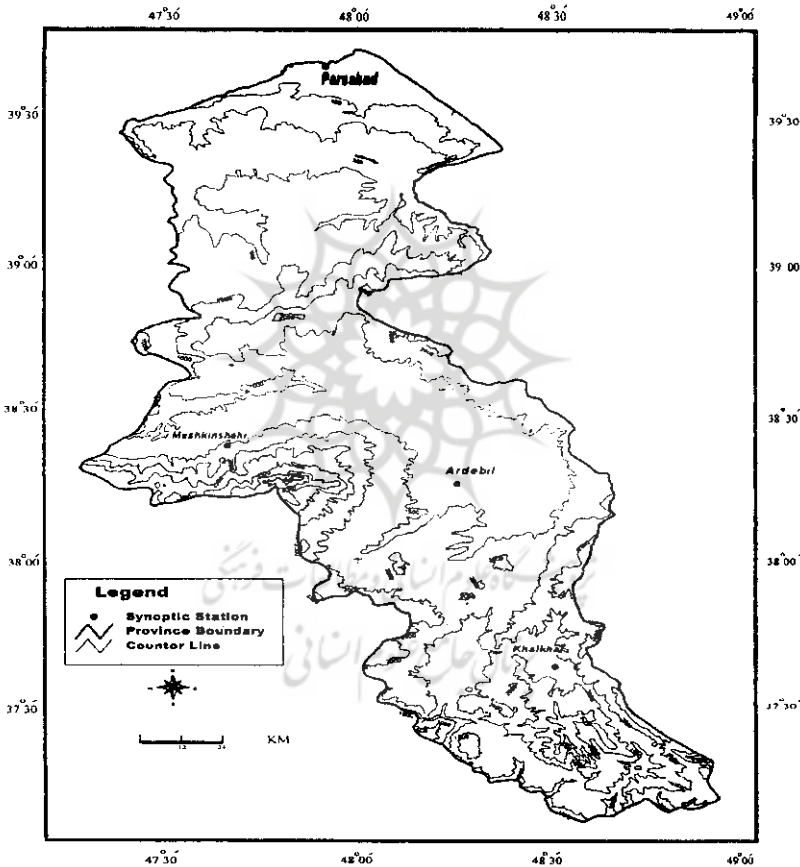
مواد و روشها

آمار سمت و سرعت بادهای سه ساعته روزانه ایستگاههای سینوپتیک مورد بررسی، از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردیده است. آمار سمت و سرعت سه ساعته باد ایستگاههای سینوپتیک اردبیل، پارس‌آباد، خلخال و مشکین‌شهر به ترتیب از سالهای ۱۹۷۷، ۱۹۸۴، ۱۹۸۷، ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۰۱ میلادی در سازمان هواشناسی کشور موجود است. نکته قابل توجه در این آمار، خلأ شدید آماری در اغلب آنهاست. در برخی ایستگاهها، آمار ساعات ۰، ۱۸ و ۲۱ (GMT) در ۸ سال پیاپی ثبت نشده است. از آنجایی که باد یک کمیت برداری بوده و دارای جهت و سرعت است و نیز به شدت تحت تأثیر توپوگرافی و نحوه استقرار جریانات فوقانی جو است، لذا تخمین سمت و سرعت باد در ساعات فاقد آمار، غیر ممکن بوده و در صورت تخمین نیز با خطا همراه است. از طرف دیگر، در بررسی پتانسیل انرژی باد و تصمیم‌گیری در خصوص استفاده یا عدم استفاده از مبدل‌های بادی در یک منطقه، وجود آمار پیاپی در کلیه ساعات شبانه‌روز و در یک دوره ۴ الی ۱۰ ساله الزامی است (Dundar, 1997). این مسأله سبب شد تا آمار انتخاب شده جهت بررسی انرژی باد در ایستگاههای سینوپتیک، بدون خلأ آماری باشند. بدین منظور، آمار سمت و سرعت باد ایستگاههای سینوپتیک اردبیل، پارس‌آباد، خلخال و مشکین‌شهر به ترتیب از سالهای ۱۹۹۰، ۱۹۹۲، ۱۹۹۲ و ۱۹۹۶ لغایت ۲۰۰۱ میلادی به مدت ۱۲، ۱۰، ۱۰ و ۶ سال، انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفت. بجز ایستگاه مشکین‌شهر، سایر ایستگاههای مورد بررسی در این پژوهش، دارای آمار باد ۱۰ ساله و بیشتر هستند. پایین بودن تعداد سالهای آماری ایستگاه مشکین‌شهر نیز به علت تازه تأسیس بودن آن است. در ترسیم گلباد سالانه ایستگاههای مورد مطالعه از نرم‌افزار Wrpplot (۱) نسخه ۳ استفاده شده است. قبل از ترسیم گلباد، کلیه داده‌های مورد استفاده به صورت کدهای ۲۸ کارکتری درآمده و سپس توسط نرم افزار مذکور قابل استفاده شده است. جهت برآزش داده‌ها با توزیع احتمالات، از مدل ریاضی احتمال ویبول استفاده شده است. تجارب به دست آمده نشان می‌دهند که این تابع

توزیع احتمال، در بررسی آماری باد در یک منطقه، کاربرد بیشتری دارد. پس از محاسبه اجزاء تابع مذکور، برخی پارامترهای مربوط به محاسبه انرژی باد قابل تخمین است. با استفاده از آزمون کی-دو، نیکویی برازش منحنی تابع احتمال و بیول بر داده‌های احتمال واقعی باد ایستگاههای مورد مطالعه، محاسبه و بررسی شده است.

محیط پژوهش

موقعیت جغرافیایی ایستگاهها



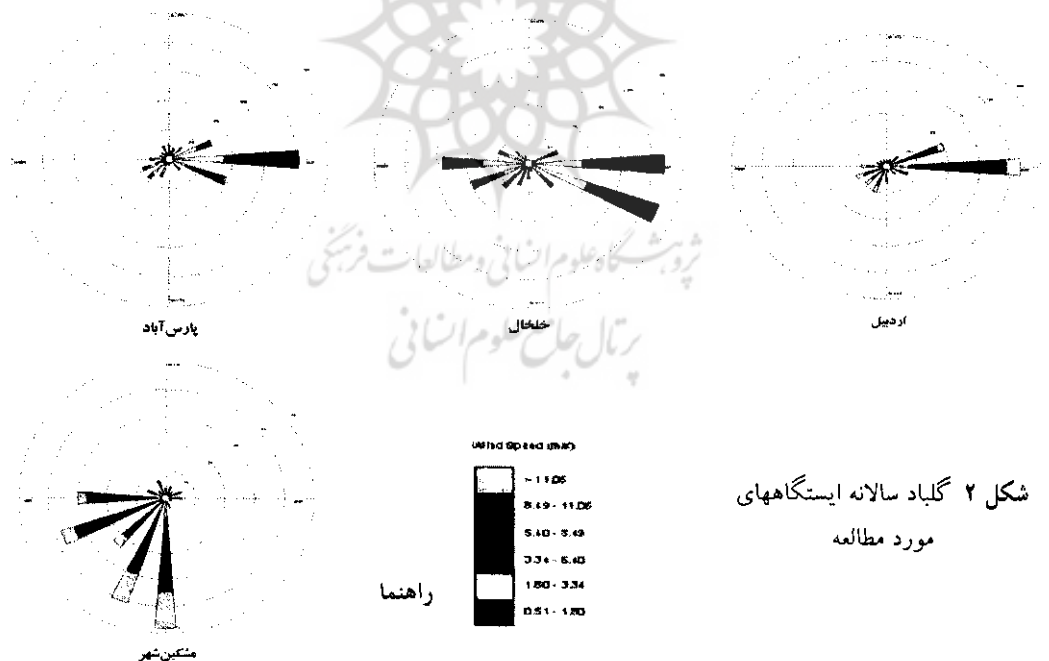
شکل ۱ سیمای توپوگرافی استان اردبیل

ایستگاه سینوپتیک اردبیل در طول $48^{\circ}17'$ شرقی و عرض $38^{\circ}15'$ شمالی قرار دارد. ارتفاع این ایستگاه از سطح دریا ۱۳۳۲ متر است. تا سال ۱۳۷۴ هجری شمسی، ایستگاه سینوپتیک اردبیل در محلی در نزدیکی باند فرودگاه این شهر مستقر بود که از نظر طول، عرض و ارتفاع (با توجه به توپوگرافی دشت اردبیل) تفاوت چندانی با ایستگاه کنونی نداشته و داده‌های مورد استفاده (با توجه

به آزمونهای آماری) قابل‌تعمیم می‌باشند. ایستگاه سینوپتیک پارس آباد مغان، در $47^{\circ}55'$ طول شرقی و $39^{\circ}39'$ عرض شمالی و ارتفاع $31/9$ متر از سطح دریا می‌باشد. این ایستگاه نیز تا سال ۱۳۷۶ در فرودگاه پارس آباد مستقر بوده است ولی از آن سال به بعد، به اولتان مغان (در ۱۵ کیلومتری غرب جنوب غرب پارس آباد) انتقال یافته است که از نظر عرض، طول، ارتفاع و توپوگرافی، تغییر چندانی با هم ندارند. ایستگاه سینوپتیک خلخال در طول $48^{\circ}31'$ شرقی و $37^{\circ}38'$ شمالی و در ارتفاع 1796 متر از سطح دریا واقع شده است. ایستگاه سینوپتیک مشکین شهر نیز دارای طول جغرافیایی $47^{\circ}04'$ شرقی و عرض $38^{\circ}23'$ شمالی و ارتفاع $1568/5$ متر از سطح دریا است. دو ایستگاه اخیر از بدو تأسیس، تغییر مکانی نداشته‌اند (شکل ۱).

بررسی گلبادهای ایستگاه

گلباد هر ایستگاه، وضعیت سمت و سرعت باد را در جهات و رده‌های سرعت مختلف به طور کامل نشان می‌دهد. شکل ۲، گلباد سالانه ایستگاههای سینوپتیک اردبیل، خلخال، پارس آباد و مشکین شهر را به تصویر کشیده است.



گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک اردبیل نشان می‌دهد که در این ایستگاه باد غالب، شرقی است. مکانیسم ایجاد بادهای شرقی در ایستگاه سینوپتیک اردبیل، در نیمه گرم و نیمه سرد سال به ترتیب

اثر فرابار دریای خزر و فرابار حرارتی سیبری است. ایجاد بادهای غربی و جنوب غربی این ایستگاه نیز در نیمه سرد سال، عبور سیستمهای غربی از این ایستگاه و اثرات انحرافی ناهمواریهای غرب و جنوب غرب این ایستگاه است. در ایستگاه سینوپتیک پارس آباد، عملکرد دریای خزر در نیمه گرم سال به صورت فرابار و ارسال هوا در جهت ساعتگرد به اطراف، عمدهترین دلیل ایجاد بادهای شرقی در این نیمه از سال در این ایستگاه است. در فصل زمستان، وزش بادهای شرقی ایستگاه پارس آباد با فرابار سیبری و وزش بادهای غربی و جنوب غربی آن، با عملکرد سیستمهای غربی در رابطه است. جهت باد غالب سالانه در ایستگاه مشکین شهر، جنوبی است. در نیمه گرم سال، حاکمیت با بادهای جنوبی است. ورود سیستمهای غربی به منطقه با آغاز فصل سرما و نیز اثرات ناهمواری سیلان در جنوب مشکین شهر، عامل ایجاد بادهای غربی، جنوب غرب و جنوبی این ایستگاه است. در ایستگاه خلخال، جهت باد غالب در فصل بهار، غربی و در فصل تابستان، شرقی است. عملکرد فرابار دریای خزر و اثرات فرابار ناهمواریهای شرقی این ایستگاه به ترتیب سبب ایجاد بادهای غربی و شرقی در فصول بهار و تابستان می شوند. در فصول پاییز و زمستان، به تدریج از فراوانی بادهای شرقی کاسته شده و بر سرعت و فراوانی بادهای غربی افزوده می شود که این امر ناشی از ورود تدریجی سیستمهای غربی به منطقه است.

تابع توزیع ویبول و محاسبه پارامترهای آن

خلاصه طبقه بندی شده مشاهدات و اندازه گیریهای سرعت باد (بدون در نظر گرفتن جهت باد) ایستگاههای سینوپتیک استان اردبیل در دوره آماری مربوطه در جداول ۱ تا ۴ ارائه شده است. همان گونه که از این جداول پیداست، هر طبقه سرعت، با یک احتمال تجربی یا واقعی همراه است (ستون درصد فراوانی). تابع چنین احتمالی، یک تابع گسسته است اما سرعت باد، یک متغیر تصادفی پیوسته است که می تواند همه مقادیر واقع در یک فاصله را اختیار کند.

به عبارت دیگر، نمودارهای توزیع فراوانی سرعتهای باد ایستگاههای مورد مطالعه را می توان به کمک توابع توزیع پیوسته احتمال جایگزین نمود. توابع توزیع چگالی احتمال که در زمینه انرژی باد تأیید شده و کاربرد زیادی دارند، توابع توزیع احتمال ویبول^۵ و رایله^۶ می باشند.

تابع ویبول حالت خاصی از توزیع گاما^۷ است. این تابع نسبت به توابع دیگر نظیر رایله از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار بوده و به صورت زیر تعریف می شود (Dundar, 2001, 20):

5. Weibull.

6. Rayleigh.

7. Gamma.

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (۱)$$

در این رابطه، (K) یک پارامتر بدون بعد معروف به «فاکتور شکل»^۸ و (C) پارامتری به نام «فاکتور مقیاس»^۹ است که به واحد m/s محاسبه می‌شود. هرچند در مراجع مطالعاتی مختلف، فاکتورهای شکل و مقیاس را با علائم دیگر نشان می‌دهند (Ernest, 1978, 392)، ولی در این مقایسه، از علائم K و C برای این پارامترها استفاده شده است.

روشهای مختلفی جهت محاسبه پارامترهای مقیاس و شکل تابع ویبول وجود دارد. یکی از این روشها که توسط اغلب پژوهشگران خارجی مورد استفاده قرار گرفته است، روش «برازش حداقل مربعات»^{۱۰} است که به کمک تابع احتمال تجمعی به دست می‌آید.

بدین منظور لازم است با استفاده از معادله رگرسیون، رابطه خطی بین مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع آن به شکل زیر مشخص شود:

$$Y = Ax + b \quad (۲)$$

در این معادله، A ضریب زاویه خط و B عرض تقاطع خط با محور y هاست. مقادیر رابطه خطی بین X_i و Y_i برای تعیین مقادیر A و B مرتبط با پارامترهای C و K تابع ویبول به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$X = \ln(V_i) \quad (۳)$$

$$Y = \ln\{-\ln[1 - P(V)]\} \quad (۴)$$

در روابط مذکور، V_i میانه طبقات سرعت باد و $P(V)$ درصد فراوانی تجمعی هر طبقه است. با مشخص شدن مقادیر ستون‌های X و Y، مقادیر A و B با استفاده از معادلات دو مجهولی و نیز با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند.

$$A = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i} = k \quad (۵)$$

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{A}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (۶)$$

$$C = \exp\left(-\frac{B}{A}\right) \quad (۷)$$

جدول ۱ مقادیر احتمالات تجربی و ویول در ایستگاه سینوتیک اردبیل در دوره آماری سالهای ۲۰۰۱-۱۹۹۰

ردیف	طبقات سرعت	میانۀ طبقات	فراوانی	درصد فراوانی	درصد	ساعت در سال	ساعت در سال	Xi	Yi	تابع ویول
۱	۰/۵-۱/۵	۱	۸۳	۰/۴۱۸	۰/۴۱۸	۲۰/۷۵	۲۰/۷۵	۰	-۵/۴۷۳	۲/۳۵۲
۲	۱/۵-۲/۵	۲	۱۵۱۶	۷/۶۵	۸/۰۶۹	۳۷۹	۳۹۹/۷۵	۰/۶۹۳	-۲/۴۷۵	۶/۲۰۱
۳	۲/۵-۳/۵	۳	۲۹۹۸	۱۵/۱۲۹	۲۳/۱۹۸	۷۴۹/۵	۱۱۴۹/۲۵	۱/۰۹۸	-۱/۳۳۲	۸/۴۳
۴	۳/۵-۴/۵	۴	۱۳۲۷	۶/۶۹۶	۲۹/۸۹۵	۳۳۱/۷۵	۱۴۸۱	۱/۳۸۶	-۱/۰۳۵	۹/۹۱۹
۵	۴/۵-۵/۵	۵	۲۹۲۲	۱۴/۷۴۵	۴۴/۶۴	۷۳۰/۵	۲۲۱۱/۵	۱/۶۰۹	-۰/۵۲۵	۱۰/۶۳۴
۶	۵/۵-۶/۵	۶	۱۵۹۲	۸/۰۳۳	۵۲/۶۷۴	۳۹۸	۲۶۰۹/۵	۱/۷۹۱	-۰/۲۹	۱۰/۶۳۲
۷	۶/۵-۷/۵	۷	۱۹۳۹	۹/۷۸۵	۶۲/۴۵۹	۴۸۴/۵	۳۰۹۴/۲۵	۱/۹۴۵	-۰/۰۲	۱۰/۰۳۶
۸	۷/۵-۸/۵	۸	۲۲۰۹	۱۱/۱۴۷	۷۳/۶	۵۵۲/۲۵	۳۴۴۶/۵	۲/۰۷۹	۰/۲۸۶	۹/۰۱
۹	۸/۵-۹/۵	۹	۵۹۷	۳/۰۱۲	۷۶/۶۱۹	۱۴۹/۲۵	۳۷۹۵/۷۵	۲/۱۹۷	۰/۳۷۳	۷/۷۳۱
۱۰	۹/۵-۱۰/۵	۱۰	۲۰۰۷	۱۰/۱۲۸	۸۶/۷۴۸	۵۰۱/۷۵	۴۲۹۷/۵	۲/۳۰۲	۰/۷۰۳	۶/۳۶۱
۱۱	۱۰/۵-۱۱/۵	۱۱	۴۰۲	۲/۰۲۸	۸۸/۷۷۶	۱۰۰/۵	۴۳۹۸	۲/۳۹۷	۰/۷۸۲	۵/۰۳۱
۱۲	۱۱/۵-۱۲/۵	۱۲	۷۳۲	۳/۶۹۳	۹۲/۴۷	۱۸۳	۴۵۸۱	۲/۴۸۴	۰/۹۵	۳/۸۳۲
۱۳	۱۲/۵-۱۳/۵	۱۳	۵۲۸	۲/۶۶۴	۹۵/۱۳۵	۱۳۲	۴۷۱۳	۲/۵۶۴	۱/۰۰۶	۲/۸۱۴
۱۴	۱۳/۵-۱۴/۵	۱۴	۲۰۰	۱/۰۰۹	۹۶/۱۴۴	۵۰	۴۷۶۳	۲/۶۳۹	۱/۱۸	۱/۹۹۵
۱۵	۱۴/۵-۱۵/۵	۱۵	۴۰۹	۲/۰۶۳	۹۸/۲۰۸	۱۰۲/۲۵	۴۸۶۵/۲۵	۲/۷۰۸	۱/۳۹۱	۱/۳۶۷
۱۶	۱۵/۵-۱۶/۵	۱۶	۹۱	۰/۴۵۹	۹۸/۶۶۷	۲۲/۷۵	۴۸۸۸	۲/۷۷۲	۱/۴۶۲	۰/۹۰۵
۱۷	۱۶/۵-۱۷/۵	۱۷	۳۴	۰/۱۷۱	۹۸/۸۳۹	۸/۵	۴۸۹۶/۵	۲/۸۳۳	۱/۴۹۴	۰/۵۸
۱۸	۱۷/۵-۱۸/۸	۱۸	۹۸	۰/۴۹۴	۹۹/۳۳۳	۲۴/۵	۴۹۲۱	۲/۸۹	۱/۶۱۱	۰/۳۶
۱۹	۱۹/۵-۲۰/۵	۲۰	۷۷	۰/۳۸۸	۹۹/۷۲۲	۱۹/۲۵	۴۹۴۰/۲۵	۲/۹۹۵	۱/۷۷۲	۰/۱۲۵
۲۰	۲۰/۵-۲۱/۵	۲۱	۴	۰/۰۲	۹۹/۷۴۲	۱	۴۹۶۱/۲۵	۳/۰۴۴	۱/۷۸۵	۰/۰۷
۲۱	۲۱/۵-۲۲/۵	۲۲	۱۴	۰/۰۷	۹۹/۸۱۳	۳/۵	۴۹۶۴/۷۵	۳/۰۹۱	۱/۸۳۷	۰/۰۳۸
۲۲	۲۲/۵-۲۳/۵	۲۳	۷	۰/۰۳۵	۹۹/۸۴۸	۱/۷۵	۴۹۶۶/۵	۳/۱۳۵	۱/۸۷	۰/۰۲
۲۳	۲۳/۵-۲۴/۵	۲۴	۷	۰/۰۳۵	۹۹/۸۸۳	۱/۷۵	۴۹۶۸/۲۵	۳/۱۷۸	۱/۹۱	۰/۰۱
۲۴	۲۴/۵-۲۵/۵	۲۵	۱۴	۰/۰۷	۹۹/۹۵۴	۳/۵	۴۹۵۱/۷۵	۳/۲۱۸	۲/۰۴	۰/۰۰۵
۲۵	۲۵/۵-۲۶/۵	۲۶	۳	۰/۰۱۵	۹۹/۹۶۹	۰/۷۵	۴۹۵۲/۵	۳/۲۵۸	۲/۰۹۲	۰/۰۰۲
۲۶	۲۶/۵-۲۷/۵	۲۷	۳	۰/۰۱۵	۹۹/۹۸۴	۰/۷۵	۴۹۵۳/۲۵	۳/۲۹۵	۲/۱۷۴	۰/۰۰۱
۲۷	۲۸/۵-۲۹/۵	۲۹	۲	۰/۰۱	۹۹/۹۹۴	۰/۵	۴۹۵۳/۷۵	۳/۳۶۷	۲/۲۹۲	۰/۰۰۰۲
۲۸	۲۹/۵-۳۰/۵	۳۰	۱	۰/۰۰۵	۹۹/۹۹۹	۰/۲۵	۴۹۵۴	۳/۴۰۱	۲/۶۲۵	۰/۰۰۰۰۹

جدول ۲ مقادیر احتمالات تجربی و ویبول در ایستگاه سینوپتیک خلخال در دوره آماری ۱۹۹۲-۲۰۰۱

مقادیر تابع ویبول	Yi	Xi	ساعت در سال تجمعی	ساعت در سال	درصد فراوانی تجمعی	درصد فراوانی	فراوانی	میان طبقات	طبقات سرعت	ردیف
۱/۶۹۹	-۳/۴۹۱	۰	۱۰۸/۹	۱۰۸/۹	۲/۹۹۸	۲/۹۹۸	۳۶۳	۱	۰/۵-۱/۵	۱
۱۷/۴	-۱/۲۳۷	۰/۶۹۳	۹۱۴/۱	۸۰۵/۲	۲۵/۱۷۱	۲۲/۱۷۲	۲۶۸۴	۲	۱/۵-۲/۵	۲
۱۹/۴۸۱	-۰/۴۵۷	۱/۰۹۸	۱۷۰۲/۸	۷۸۸/۷	۴۶/۸۸۹	۲۱/۷۱۸	۲۶۲۹	۳	۲/۵-۳/۵	۳
۱۷/۶۶۳	۰/۱۲۷	۱/۳۸۶	۲۴۶۵/۴	۷۶۲/۶	۶۷/۸۸۹	۲۰/۹۹۹	۲۵۴۲	۴	۳/۵-۴/۵	۴
۱۳/۶۵۹	۰/۴۴۵	۱/۶۰۹	۲۸۶۸/۹	۴۰۳/۵	۷۹	۱۱/۱۱۱	۱۳۴۵	۵	۴/۵-۵/۵	۵
۹/۲۲۴	-۰/۸۱۸	۱/۷۹۱	۳۲۵۵/۳	۳۸۶/۴	۸۹/۶۴	۱۰/۶۴	۱۲۸۸	۶	۵/۵-۶/۵	۶
۵/۵۱	۱/۰۷۶	۱/۹۴۵	۳۴۳۸/۶	۱۸۳/۳	۹۴/۶۸۸	۵/۰۴۷	۶۱۱	۷	۶/۵-۷/۵	۷
۲/۹۳۵	۱/۳۳۴	۲/۰۹۹	۳۵۵۰/۲	۱۱۱/۶	۹۷/۷۶۱	۳/۰۷۳	۳۷۲	۸	۷/۵-۸/۵	۸
۱/۴۰۲	۱/۴۶۴	۲/۱۹۷	۳۵۸۳/۵	۳۳/۳	۹۸/۶۷۸	۰/۹۱۶	۱۱۱	۹	۸/۵-۹/۵	۹
۰/۶۰۲	۱/۵۸	۲/۳۰۲	۳۶۰۳/۳	۱۹/۸	۹۹/۲۲۳	۰/۵۴۵	۶۶	۱۰	۹/۵-۱۰/۵	۱۰
۰/۲۳۳	۱/۶۱۵	۲/۳۹۷	۳۶۰۷/۸	۴/۵	۹۹/۳۴۷	۰/۱۲۳	۱۵	۱۱	۱۰/۵-۱۱/۵	۱۱
۰/۰۸۲	۱/۸۲۱	۲/۴۸۴	۳۶۲۴	۱۶/۲	۹۹/۷۹۳	۰/۴۴۶	۵۴	۱۲	۱۱/۵-۱۲/۵	۱۲
۰/۰۰۷	۱/۹۹	۲/۶۳۹	۳۶۲۹/۱	۵/۱	۹۹/۹۳۳	۰/۱۴	۱۷	۱۴	۱۳/۵-۱۴/۵	۱۳
۰/۰۰۱	۲/۱۶۴	۲/۷۰۸	۳۶۳۰/۹	۱/۸	۹۹/۹۸۳	۰/۴۹	۶	۱۵	۱۴/۵-۱۵/۵	۱۴
۰/۰۰۰۴	۲/۶۲۵	۲/۷۷۲	۳۶۳۱/۵	۰/۶	۹۹/۹۹۹	۰/۰۱۶	۲	۱۶	۱۵/۵-۱۶/۵	۱۵

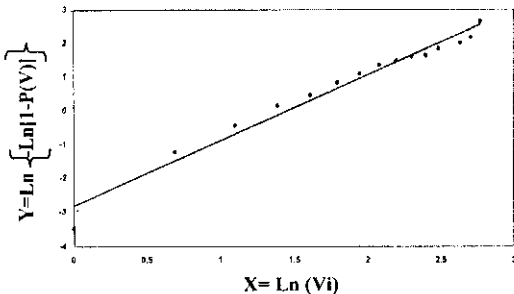
جدول ۳ مقادیر احتمالات تجربی و ویبول در ایستگاه سینوپتیک پارس آباد در دوره آماری ۱۹۹۲-۲۰۰۱

مقادیر تابع ویبول	Yi	Xi	ساعت در سال تجمعی	ساعت در سال	درصد فراوانی تجمعی	درصد فراوانی	فراوانی	میان طبقات	طبقات سرعت	ردیف
۱۵/۳۵	-۲/۷۶۵	۰	۲۲۲/۶	۲۲۲/۶	۶/۱	۶/۱	۷۴۲	۱	۰/۵-۱/۵	۱
۱۹/۸۱۴	-۰/۸۷۳	۰/۶۹۳	۱۲۴۵/۶	۱۰۲۳	۳۴/۱۳۶	۲۸/۰۳۵	۳۴۱۰	۲	۱/۵-۲/۵	۲
۱۹/۰۵۵	-۰/۱۴۸	۱/۰۹۸	۲۱۰۷/۸	۸۶۲/۲	۵۷/۷۶۵	۲۳/۶۲۹	۲۸۷۴	۳	۲/۵-۳/۵	۳
۱۵/۵۳۳	۰/۲۳	۱/۳۸۶	۲۶۱۳/۶	۵۰۵/۸	۷۱/۶۲۷	۱۳/۸۶۱	۱۶۸۶	۴	۳/۵-۴/۵	۴
۱۱/۲۱۷	۰/۵۳۱	۱/۶۰۹	۲۹۸۳/۸	۳۷۰/۲	۸۱/۷۷۲	۱۰/۱۴۵	۱۲۳۴	۵	۴/۵-۵/۵	۵
۷/۳۳۲	۰/۷۹۵	۱/۷۹۱	۳۲۵۰/۸	۲۶۷	۸۹/۰۸۹	۷/۳۱۷	۸۹۰	۶	۵/۵-۶/۵	۶
۴/۳۹۴	۱/۰۱	۱/۹۴۵	۳۴۱۴/۹	۱۶۴/۱	۹۳/۵۸۷	۴/۴۹۷	۵۴۷	۷	۶/۵-۷/۵	۷
۲/۴۳۴	۱/۲۴۵	۲/۰۹۹	۳۵۳۵/۸	۱۲۰/۹	۹۶/۹	۳/۳۱۳	۴۰۳	۸	۷/۵-۸/۵	۸
۱/۲۵۴	۱/۳۵۳	۲/۱۹۷	۳۵۷۳	۳۷/۲	۹۷/۹۱۹	۱/۰۱۹	۱۲۴	۹	۸/۵-۹/۵	۹
۰/۶۰۳	۱/۵۳۳	۲/۳۰۲	۳۶۱۳/۵	۴۰/۵	۹۹/۰۲۹	۱/۱۰۹	۱۳۵	۱۰	۹/۵-۱۰/۵	۱۰
۰/۲۷۲	۱/۶۰۹	۲/۳۹۷	۳۶۲۴/۳	۱۰/۸	۹۹/۳۲۵	۰/۲۹۵	۳۶	۱۱	۱۰/۵-۱۱/۵	۱۱
۰/۱۱۵	۱/۷۶۶	۲/۴۸۴	۳۶۳۸/۴	۱۴/۱	۹۹/۷۱۲	۰/۳۸۶	۴۷	۱۲	۱۱/۵-۱۲/۵	۱۲
۰/۰۴۶	۱/۸۲۲	۲/۵۶۴	۳۶۴۱/۴	۳	۹۹/۷۹۴	۰/۰۸۲	۱۰	۱۳	۱۲/۵-۱۳/۵	۱۳
۰/۰۱۷	۱/۹۴۷	۲/۶۳۹	۳۶۴۵/۶	۴/۲	۹۹/۹۰۹	۰/۱	۱۴	۱۴	۱۳/۵-۱۴/۵	۱۴
۰/۰۰۶	۲/۶۲۵	۲/۷۰۸	۳۶۴۸/۹	۳/۳	۹۹/۹۹۹	۰/۰۰۹	۱۱	۱۵	۱۴/۵-۱۵/۵	۱۵

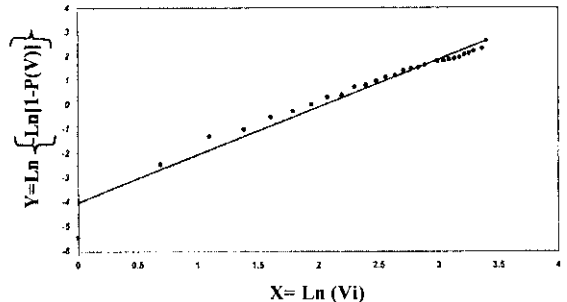
جدول ۴ مقادیر احتمالات تجربی و ویبول در ایستگاه سینوپتیک مشکین شهر در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۰۱

ردیف	طبقات سرعت	میانة طبقات	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی تجمعی	ساعت در سال	ساعت در سال تجمعی	X_i	Y_i	مقادیر تابع ویبول
۱	۰/۵-۱/۵	۱	۳۲	۰/۸۰۶	۰/۸۰۶	۱۶	۱۶	۰	-۴/۸۱۶	۳/۵۶۹
۲	۱/۵-۲/۵	۲	۲۷۱	۶/۸۲۹	۷/۶۳۵	۱۳۵/۵	۱۵۱/۵	۰/۶۹۳	-۲/۵۳۲	۶/۳۳۳
۳	۲/۵-۳/۵	۳	۳۲۸	۸/۲۶۶	۱۵/۹۰۱	۱۶۴	۳۱۵/۵	۱/۰۹۸	-۱/۹۰۸	۸/۴۰۴
۴	۳/۵-۴/۵	۴	۷۰۱	۱۷/۶۶۶	۲۳/۵۶۷	۳۵۰/۵	۶۶۴	۱/۳۸۶	-۰/۸۱۸	۱۱/۷۳
۵	۴/۵-۵/۵	۵	۴۲۶	۱۰/۷۳۵	۳۴/۳۰۲	۲۱۳	۸۷۹	۱/۶۰۹	-۰/۵۳۵	۱۰/۳۳۸
۶	۵/۵-۶/۵	۶	۵۶۲	۱۴/۱۶۳	۴۸/۴۶۵	۲۸۱	۱۱۶۰	۱/۷۹۱	-۰/۱۲۹	۱۰/۲۸۷
۷	۶/۵-۷/۵	۷	۱۰۵	۲/۶۶۶	۶۱/۱۱۱	۵۲/۵	۱۲۱۲/۵	۱/۹۴۵	-۰/۰۵۷	۹/۷۰۸
۸	۷/۵-۸/۵	۸	۴۱۳	۱۰/۴۰۸	۷۱/۵۱۹	۲۰۶/۵	۱۴۱۹	۲/۰۷۹	-۰/۲۲۷	۸/۷۵
۹	۸/۵-۹/۵	۹	۱۵۳	۳/۸۵۵	۷۵/۳۷۴	۷۶/۵	۱۴۹۵/۵	۲/۱۹۷	-۰/۳۳۷	۷/۵۷
۱۰	۹/۵-۱۰/۵	۱۰	۲۸۲	۷/۱۰۶	۸۲/۴۸	۱۴۱	۱۶۳۶/۵	۲/۳۰۲	-۰/۵۵۵	۶/۳۰۶
۱۱	۱۰/۵-۱۱/۵	۱۱	۸۷	۲/۱۹۲	۸۴/۶۷۲	۴۳/۵	۱۶۸۰	۲/۳۹۷	-۰/۶۲۹	۵/۰۷۱
۱۲	۱۱/۵-۱۲/۵	۱۲	۲۰۵	۵/۱۶۶	۸۹/۸۳۸	۱۰۲/۵	۱۷۸۲/۵	۲/۴۸۴	-۰/۸۲۷	۳/۹۴۳
۱۳	۱۲/۵-۱۳/۵	۱۳	۳۷	۰/۹۳۲	۹۰/۷۷	۱۸/۵	۱۸۰۱	۲/۵۶۴	-۰/۸۶۸	۲/۹۶۹
۱۴	۱۳/۵-۱۴/۵	۱۴	۶۸	۱/۷۱۳	۹۲/۶۸۳	۳۴	۱۸۳۵	۲/۶۳۹	-۰/۹۵۱	۲/۱۶۷
۱۵	۱۴/۵-۱۵/۵	۱۵	۱۱۱	۲/۷۹۷	۹۵/۲۸	۵۵/۵	۱۸۹۰/۵	۲/۷۰۸	-۰/۱۱۶	۱/۵۳۵
۱۶	۱۵/۵-۱۶/۵	۱۶	۵۳	۱/۳۳۵	۹۶/۶۱۵	۲۶/۵	۱۹۱۷	۲/۷۷۲	-۰/۲۲	۱/۰۵۶
۱۷	۱۷/۵-۱۸/۵	۱۸	۶۸	۱/۷۱۳	۹۸/۳۲۸	۳۴	۱۹۵۱	۲/۸۹	-۰/۴۵۹	۰/۴۵۹
۱۸	۱۹/۵-۲۰/۵	۲۰	۴۲	۱/۰۵۸	۹۹/۳۸۶	۲۱	۱۹۷۲	۲/۹۹۵	-۰/۱۷۸	۰/۱۷۸
۱۹	۲۱/۵-۲۲/۵	۲۲	۱۱	۰/۲۷۷	۹۹/۶۶۳	۵/۵	۱۹۷۷/۵	۳/۰۹۱	-۰/۶۲	۰/۰۶۲
۲۰	۲۲/۵-۲۳/۵	۲۳	۲	۰/۰۵	۹۹/۷۱۳	۱	۱۹۷۸/۵	۳/۱۳۵	-۰/۳۵	۰/۰۳۵
۲۱	۲۳/۵-۲۴/۵	۲۴	۲	۰/۰۵	۹۹/۷۶۳	۱	۱۹۷۹/۵	۳/۱۷۸	-۰/۱۹	۰/۰۱۹
۲۲	۲۴/۵-۲۵/۵	۲۵	۷	۰/۱۷۶	۹۹/۹۳۹	۳/۵	۱۹۸۳	۳/۲۱۸	-۰/۰۱	۰/۰۱
۲۳	۲۸/۵-۲۹/۵	۲۹	۲	۰/۰۵	۹۹/۹۹۹	۱	۱۹۸۴	۳/۳۶۷	-۰/۰۰۷	۰/۰۰۷

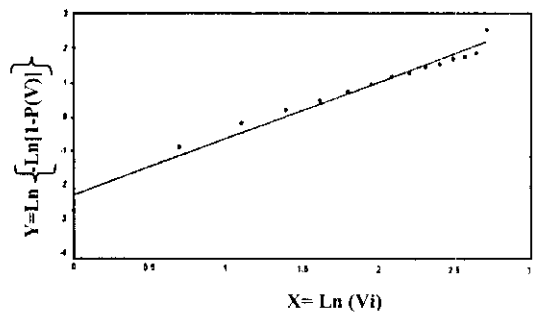
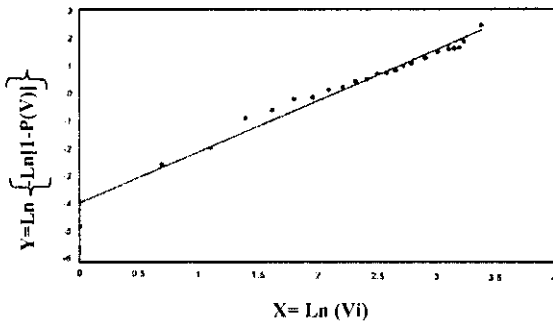
شکلهای ۳ تا ۶ نیز این روابط را نشان داده و خط $y = Ax + b$ را که از تقاطع (X_i, Y_i) می گذرند، نشان می دهد.



شکل ۴ رابطه خطی بین X_i و Y_i برای تعیین مقادیر A و B مرتبط با پارامترهای C و k تابع ویبول در ایستگاه سینوپتیک خلخال



شکل ۳ رابطه خطی بین X_i و Y_i برای تعیین مقادیر A و B مرتبط با پارامترهای C و k تابع ویبول در ایستگاه سینوپتیک اردبیل

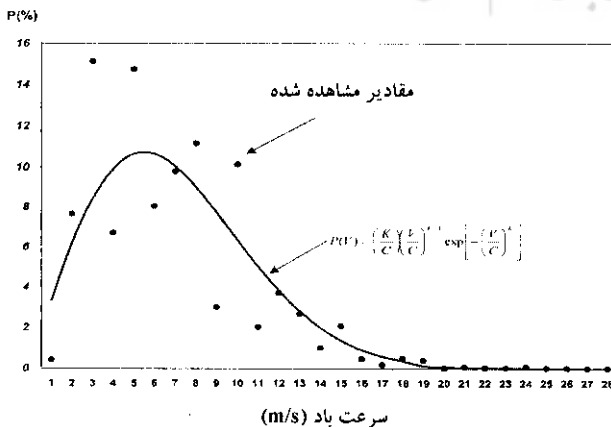


شکل ۵ رابطه خطی بین X_i و Y_i برای تعیین مقادیر A و B مرتبط با پارامترهای C و K تابع ویبول در ایستگاه سینوپتیک پارس آباد

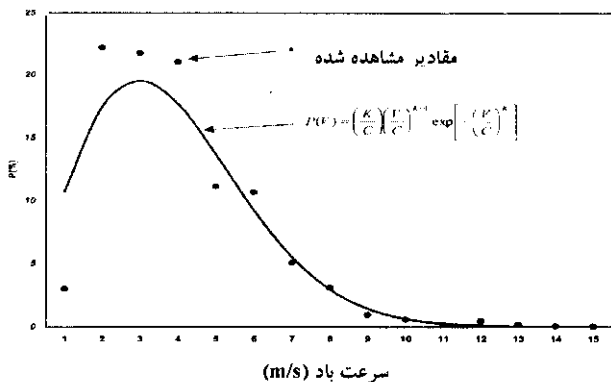
شکل ۶ رابطه خطی بین X_i و Y_i برای تعیین مقادیر A و B مرتبط با پارامترهای C و K تابع ویبول در ایستگاه سینوپتیک مشکین شهر

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده برای پارامترهای C و K با استفاده از روابط (۵) و (۶) و (۷) بسیار دقیق‌تر از نتایج مشابه با استفاده از معادلات دو مجهولی می‌باشد. مقادیر فاکتور C در ایستگاههای اردبیل، خلخال، پارس آباد و مشکین شهر به ترتیب $۷/۹$ ، $۴/۳۲$ ، $۳/۸۹$ و ۸ و مقادیر K در این ایستگاهها به ترتیب $۱/۹۶$ ، $۱/۹۴$ ، $۱/۶۹$ و $۱/۹$ است.

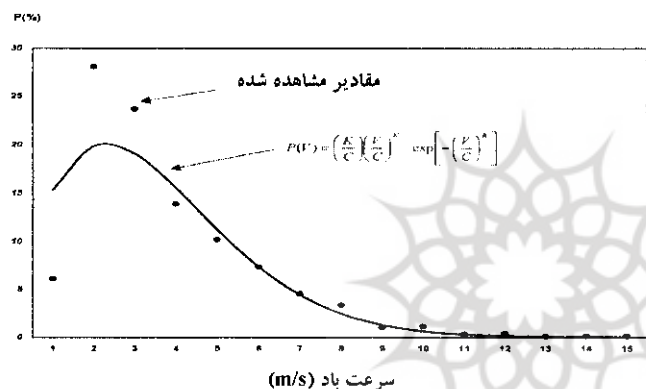
با داشتن پارامترهای شکل و مقیاس (K, C) و با استفاده از V_i های موجود در جداول ۱ تا ۴ و نیز با استفاده از رابطه (۱)، مقادیر تابع احتمال پیوسته ویبول (P_W) محاسبه و در همان جداول ارائه شده است. برای داده‌های بلند مدت باد و مشاهدات و اندازه‌گیریهای سرعت، تابع احتمال پیوسته ویبول نتایج خوبی ارائه می‌کند ولی بادهای آرام و کم سرعت را توجیه نمی‌کند (jamil, 1994, 234). در شکل‌های ۷ تا ۱۰ مقادیر مشخص شده برای احتمال وقوع سرعت‌های باد ایستگاههای سینوپتیک مورد بررسی از طریق مقادیر تابع ویبول و احتمال واقعی سرعت‌های باد، ترسیم و جهت مقایسه، نمایش داده شده است.



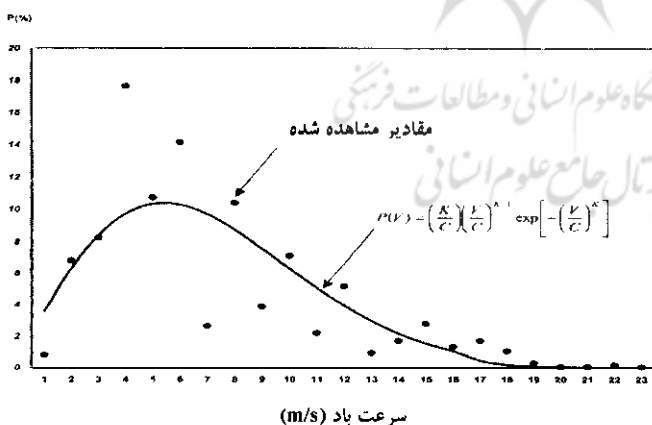
شکل ۷ برازش مقادیر احتمال سرعت‌های مشاهده شده با استفاده از مدل ریاضی ویبول در ایستگاه سینوپتیک اردبیل



شکل ۸. برازش مقادیر احتمال سرعت‌های مشاهده شده با استفاده از مدل ریاضی ویبول در ایستگاه سینوپتیک خلخال



شکل ۹. برازش مقادیر احتمال سرعت‌های مشاهده شده با استفاده از مدل ریاضی ویبول در ایستگاه سینوپتیک پارس آباد



شکل ۱۰. برازش مقادیر احتمال سرعت‌های مشاهده شده با استفاده از مدل ریاضی ویبول در ایستگاه سینوپتیک مشکین شهر

آزمون نیکویی برازش^{۱۱} تست کی دو^{۱۲}

در صفحات قبل، احتمال تجربی داده‌های سرعت باد، با تابع توزیع ویبول جایگزین شدند. صحت این جایگزینی (نیکویی برازش مجموعه داده‌ها به توزیع داده شده) را می‌توان با آزمونهای

11. Goodness of fit.

12. Chi - square Test.

مختلفی، ارزیابی نمود. آزمون «کی دو» که مجذور خی نیز گفته می‌شود، یکی از آزمونهای نیکویی برآزش است که با آن می‌توان صحت جایگزینی احتمال تجربی داده‌ها با توزیع داده شده را سنجید (عبدالله زاده، ۱۳۷۹، ۲۵۰). آماره آزمون در تست کی دو بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$X^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (۸)$$

که در آن،

O_i = فراوانی مشاهده شده E_i = فراوانی مورد انتظار است.

با توجه به مشاهدات و ویژگیهای آزمون، فرضهای زیر مطرح شوند:

H_0 = سرعتهای مشاهده شده باد در ایستگاههای مورد بررسی، دارای توزیع ویبول است.

H_1 = سرعت مشاهده شده باد در ایستگاههای مورد بررسی، دارای توزیع ویبول نیست.

آماره آزمون در توزیع ویبول، با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده و مقادیر آن در جدول ۵ ارائه شده است. آزمون کی دو مبتنی بر جدول خاصی است که در برخی منابع آمده است. اگر آماره آزمون، از مقدار جدول کوچکتر باشد، فرض صفر پذیرفته و در غیر اینصورت، فرض صفر قابل رد است. با توجه به مقادیر آماره آزمون و نیز مقدار بحرانی $X^2 = 0.095$ ($\alpha = 0.05$) در ایستگاههای مورد مطالعه، دلیلی برای رد فرض صفر وجود نداشته و این نتیجه حاصل می‌شود که سرعتهای مشاهده شده باد در ایستگاههای مورد بررسی، با توزیع ویبول همگون است.

جدول ۵ مقادیر آماره کی دو در توزیع ویبول با مقادیر بحرانی کی دو در سطح معنی داری ۰/۰۵

و درجه آزادی مربوطه در ایستگاههای مورد بررسی

ایستگاه پارامتر	اردبیل	خلخال	پارس آباد	مشکین شهر
درجه آزادی	۲۶	۱۳	۱۲	۲۱
آماره آزمون	۲۲/۸۹	۱۵/۷۵	۱۳/۵۶	۲۹/۲۸
مقدار بحرانی ۹۵٪	۳۸/۹	۲۲/۴	۲۲/۴	۲۹/۳۱

محاسبات انرژی باد

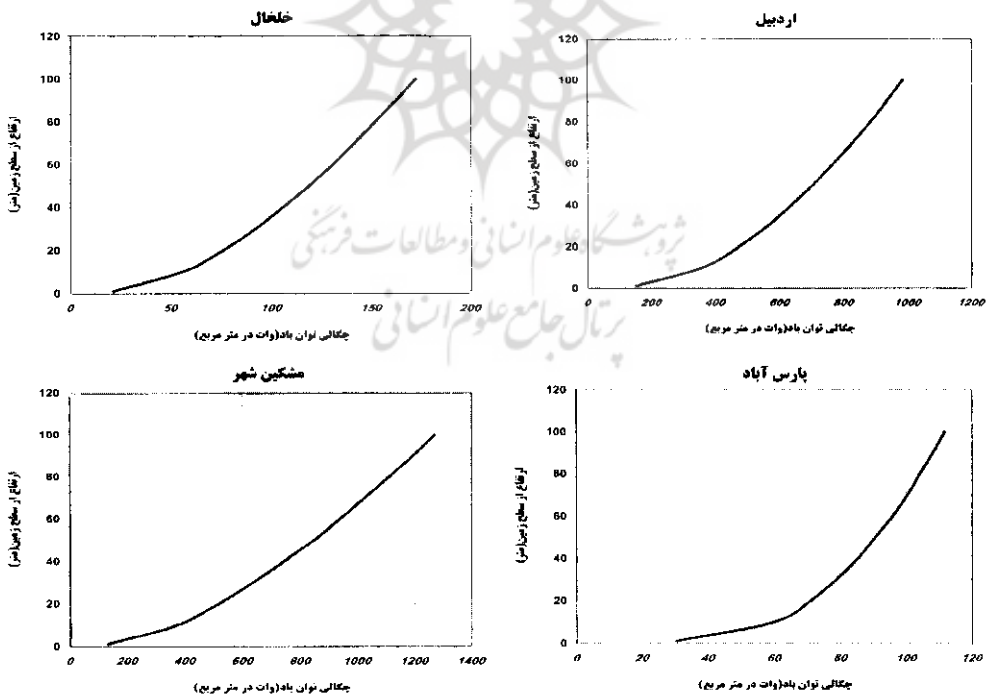
با داشتن مقادیر سرعت متوسط باد و پارامترهای C و K می‌توان وضعیت ایستگاههای سینوپتیک را از نظر پتانسیل انرژی باد بررسی نمود. گام اول جهت بررسی انرژی باد یک منطقه، محاسبه چگالی انرژی باد آن منطقه است. قدرت حاصل از انرژی باد در واحد سطح از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\langle P_a \rangle}{S} = \frac{1}{2} \rho \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (۹)$$

که در آن، Γ = تابع گاما، C و K پارامترهای تابع ویبول و ρ چگالی هوا است. مقدار چگالی

هوا در شرایط متعارف دما و فشار برابر $۱/۲۲۵$ کیلوگرم در مترمکعب است. این مقدار برای ایستگاههای اردبیل، خلخال، پارس آباد و مشکین شهر به ترتیب $۱/۰۸۳$ ، $۱/۰۲۲$ ، $۱/۲۵۲$ و $۱/۰۴۸$ کیلوگرم در مترمکعب محاسبه شده است. با توجه به رابطه (۹) و نیز واحد بودن سطح می توان دریافت که مقدار چگالی انرژی باد یک منطقه، وابستگی کامل به پارامترهای تابع ویبول دارد. این مقدار برای ایستگاههای سینوپتیک اردبیل، خلخال، پارس آباد و مشکین شهر به ترتیب $۳۶۲/۵۵$ ، $۵۶/۳۵$ ، $۶۰/۲۴$ و $۳۷۵/۰۶$ وات در مترمربع در زمان موجودیت باد است.

مقادیر چگالی انرژی محاسبه شده، مربوط به اطلاعات ثبت شده در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین است. در حالی که بررسی منابع نشان دادند که ارتفاع محور اغلب توربینهای بادی تجاری، حدود ۳۰ الی ۸۰ متر از سطح زمین است. لذا بررسی روند تغییرات چگالی انرژی باد نسبت به ارتفاع ضروری است. از طرف دیگر، با افزایش ارتفاع از سطح زمین و کاهش اثر ناهمواریهای سطحی، بر مقدار سرعت باد و به تبع آن قدرت باد افزوده می شود. این افزایش سرعت متناسب با زبری سطح زمین است. شکل ۱۱ روند تغییرات چگالی توان باد در ایستگاههای مورد بررسی در ارتفاعات مختلف از سطح زمین (با در نظر گرفتن زبری اطراف ایستگاهها) نشان می دهد.



شکل ۱۱ چگالی توان باد (وات در متر مربع) در ارتفاعات مختلف از سطح زمین در ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعه (بر اساس تابع ویبول)

سرعت نامی باد که در محاسبات انرژی باد با علامت V_{mec} نشان داده می‌شود، سرعتی است که بیشترین انرژی را در طول سال تولید می‌کند. این سرعت که از پارامتری مهم در طراحی توربینهای بادی می‌باشد، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V_{mec} = C \left(1 + \frac{2}{k} \right)^{\lambda} \quad (10)$$

که در اینجا $\lambda = \frac{1}{k}$ می‌باشد. با توجه به مقادیر پارامترهای C و K ، سرعت نامی باد در ایستگاههای اردبیل، خلخال، پارس آباد و مشکین شهر به ترتیب برابر با ۱۱/۳۱، ۶/۲۲، ۶/۱۷ و ۱۱/۶۸ متر در ثانیه است.

محتمل ترین سرعت باد یا سرعت بیشترین احتمال وقوع باد که با علامت (V_{mp}) نشان داده می‌شود از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$V_{mp} = C(1 - \lambda)^{\lambda} \quad (11)$$

که λ برابر با $\frac{1}{k}$ می‌باشد. با توجه به مقادیر C و K ، مقدار V_{mp} برای ایستگاههای مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۲/۹۷، ۵/۴۸، ۲/۲۸ و ۵/۴ متر در ثانیه است. جهت تصمیم گیری در طراحی و نصب توربینهای بادی و با توجه به این که توربینهای بادی در یک سرعت مشخص، راه اندازی شده و در یک سرعت خاص از حرکت باز می‌ایستند، احتمال وقوع سرعتهای باد بالاتر از V^* را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تعیین نمود (jamil, 1994, 399):

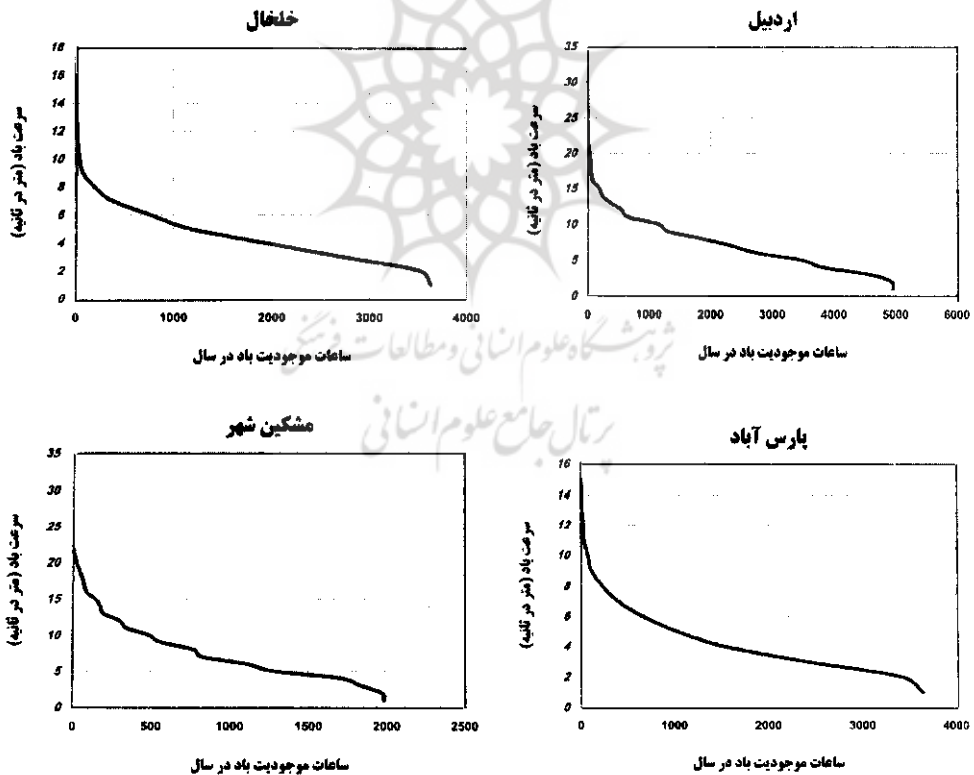
$$P(V > V^*) = \exp \left[- \left(\frac{V^*}{V} \right)^k \right] \quad (12)$$

با توجه به اینکه سرعت راه انداز و سرعت توقف اکثر توربینهای بادی به ترتیب ۴ و ۲۵ متر در ثانیه است لذا احتمال وقوع سرعتهای باد بین مقادیر مذکور را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۳ به صورت زیر به دست آورد. لذا چنانچه ۴ برابر با V_1 و ۲۵ برابر با V_2 در نظر گرفته شود آنگاه:

$$P(V_1 < V < V_2) = \exp \left[- \left(\frac{V_1}{C} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{V_2}{C} \right)^k \right] \quad (13)$$

خواهد بود. با توجه به رابطه فوق می‌توان دریافت که در ایستگاههای اردبیل، خلخال، پارس آباد و مشکین شهر به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۴۲، ۰/۳۵ و ۰/۷۶ درصد از ساعات موجودیت باد، سرعت باد بین ۴ الی ۲۵ متر در ثانیه است. ساعات موجودیت باد در ایستگاههای مذکور به ترتیب ۴۹۵۴، ۳۵۳۱/۵، ۳۶۴۸/۹ و ۱۹۸۴ ساعت در سال است.

همان‌گونه که ذکر شد، یکی از مهمترین عوامل در طراحی توربینهای بادی، «سرعت نامی» باد است. یعنی کمترین سرعتی که در آن سرعت، حداکثر بار خروجی تولید می‌شود. در سرعتهای بالاتر از سرعت نامی، قدرت خروجی، همواره توسط سیستمهای کنترل، روی مقدار بار حداکثر خروجی ثابت می‌ماند. این حقیقت که قدرت باد با توان سوم سرعت مناسب است، باد را به عنوان اولین عامل موردنظر در طراحی توربین بادی معرفی می‌کند. از اینرو، سرعت متوسط، توزیع سالیانه و یا تغییرات و تداوم وزش آن حائز اهمیت است. در این رابطه، منحنیهای «سرعت - تداوم»^{۱۳} مورد بررسی قرار می‌گیرند. محور افقی این منحنی، بیانگر ساعات موجودیت باد در سال و محور قائم آن، نشان دهنده سرعت باد می‌باشد. از این منحنی برای بدست آوردن مدت زمان بهره‌برداری یک توربین بادی در طول سال استفاده می‌شود. شکل ۱۲ تداوم سرعتهای مختلف باد در ایستگاههای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ منحنی سرعت - تداوم باد در ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری

نتیجه گیری

بررسیهای آماری نشان دادند که موجودیت سالانه باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل بیشتر از سایر ایستگاههای مورد مطالعه است. همچنین تعداد ساعات وزش بادهای با سرعت بین سرعت راهاندازی و سرعت توقف توربینهای بادی در این ایستگاه بیشتر از بقیه ایستگاههاست. ویندهایم (به نقل از کاویانی، ۱۳۷۴) عملکرد اقتصادی توربینهای بادی را کارکرد حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال می‌داند. آمبروسینی و دیگران (Ambrosini et al, 1992) چگالی توان بیش از ۶۰۰ وات در مترمربع در نیمی از ساعات سال را جهت استحصال انرژی از باد، خوب می‌داند. مجریان طرح نیروگاه بادی منجیل، وجود ۲۰۰۰ ساعت باد با سرعت بین ۷ الی ۲۵ متر در ثانیه را جهت احداث نیروگاه بادی، مقرون به صرفه می‌دانند. با توجه به موارد مذکور و نیز با عنایت به تعداد ساعات کارکرد توربینهای بادی در ایستگاه اردبیل در ارتفاع ۵۰ متری سطح زمین که حدود ۴۴۷۴ ساعت در سال با چگالی توان ۷۰۶/۱۴ وات در مترمربع است و نیز با توجه به وجود ۲۷۰۹ ساعت وزش بادهای با سرعت بین ۷ الی ۲۵ متر در ثانیه، استفاده از انرژی باد در این ایستگاه به شرط استقرار محور توربینهای بادی در ارتفاع ۵۰ متری سطح زمین و بالاتر، امکانپذیر و مقرون به صرفه‌تر از سایر ایستگاههاست.

پیشنهادات

- با توجه به بررسیها، محاسبات آماری و نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌گردد که:
 - سازمان هواشناسی کشور، تمهیداتی را جهت افزایش تعداد ایستگاههای سینوپتیک در سطح استان بیندیشد تا نتایج مطالعات به سایر نقاط استان نیز قابل تعمیم باشد.
 - چنانچه قصد استفاده از انرژی باد در استان اردبیل وجود داشته باشد، بهتر است توجه بیشتری به دشت شرقی ایستگاه سینوپتیک اردبیل و کوهپایه‌های طالش معطوف گردد.
 - مناسب است برداشتهای باد جهت امکانسنجی استفاده از انرژی آن، در فواصل کوتاه‌تری ثبت شود تا با اطمینان بیشتری از میزان پیوستگی بادهای مطلع شد. این فواصل بهتر است حداکثر، ۱۰ دقیقه‌ای باشند.
 - در استفاده از انرژی برق بادی جهت تزریق به شبکه سراسری برق، بهتر است غیر از حواشی شرقی ایستگاه سینوپتیک اردبیل، در جاهای دیگر استان، سرمایه‌گذاری جهت ثبت داده در کوتاه مدت و نیز احداث نیروگاه بادی انجام نگیرد.
 - در شرق ایستگاه اردبیل، چنانچه نصب توربین بادی و استفاده از انرژی باد مدنظر باشد، بهتر

است از توربینهای بادی سه پره با محور افقی با ظرفیت ۳۰۰ الی ۶۰۰ کیلووات که اقتصادی تر هستند، جهت تزریق به شبکه و از توربینهای ساونیس و سه پره، جهت مصارف کشاورزی استفاده شود. ضمناً بهتر است در سفارش توربینهای بادی با محور افقی، تأکید بر این باشد که قدرت نامی توربین، در سرعت نامی باد محل به دست آید.

سپاسگزاری

با تشکر از راهنماییهای استاد ارجمند جناب آقای دکتر مجید زاهدی عضو هیأت علمی گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تبریز و جناب آقای دکتر مجید جمیل، پژوهشگر، استاد و سرپرست گروه انرژیهای نو پژوهشگاه مواد و انرژی و نیز از مدیریت محترم مرکز خدمات ماشینی سازمان هواشناسی کشور و مدیران کارشناسان مرکز تحقیقات هواشناسی استان اردبیل.

پی نوشتها

۱. فایل اجرایی و کد ریجستری این نرم افزار از سایت WWW.lakesenvironmental.Com قابل دریافت است.

منابع و مآخذ

۱. ثقفی، محمود، (۱۳۷۲): انرژی باد و کاربرد آن در کشاورزی، چاپ اول، تهران، دانشگاه تهران.
۲. سازمان هواشناسی کشور، آمار سمت و سرعت بادهای سه ساعته ایستگاه سینوپتیک خلخال در دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۷.
۳. عبدالله زاده، کاوه، عبدالله زاده، یحیی، (۱۳۷۹): مفاهیم کاربردی آمار و احتمالات، چاپ اول، تهران، نشر آبیژ.
۴. کاویانی، محمدرضا (۱۳۷۴): توربینهای بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۳۶.
۵. محمدی، فرهاد (۱۳۷۹): نگاهی به انرژی باد در جهان و ایران در آغاز هزاره سوم، اقتصاد انرژی، تهران، خرداد ۱۳۷۹.
۶. نصیری، جواد (۱۳۷۶): پتانسیل انرژی باد در ایران، مجموعه مقالات انرژیهای نو، وزارت نیرو، پاییز ۱۳۷۶.
7. Adokoga, L.O. and Adewale, A.A (1992): Wind energy potential of Nigeria, Renewable Energy, Vol. 2.
8. Ambrosini, G. Benato, B. Garavaso, c. Botta, G. (1992): Wind energy potential in Emilia Romagna, Italy. Journal of wind engineering and industrial aerodynamic. Vol. 39.
9. Cihan Dunder, Demir Inan (2001): The analysis of wind data and wind energy potential in Band Irma, Turkey. Research Dept. State Meteorological Service.
10. Conradsen, K. Nielson, L.B. (1984): Review of weibull statistics for estimation of wind speed distribution J. Appl. Meteorology. vol. 23.
11. D.L. Elliott, C.G. Holladay et al. (2000): Wind energy resource atlas of the United States. Energy research Institute, Golden co.
12. Dunder, C. and Inan, D. (1997): Wind energy potential of Cesme, Turkey. ISES. Solar world congress, August 1997, Taejon. Korea.
13. Ernest, w. Peterson. Hennessey. Joseph. P. Jr. (1978): On the use of power laws for estimates of wind power potential. J. Appl. Meteorology. Vol. 17.
14. Jamil, Majid (1994): Wind power statistics and evaluation of wind energy density. Wind Engineering, Vol 18. No. 5.
15. Jaya Kumar, prashanthi Deri M (2001): Wind energy potential in tamil Nasv India. Dept. of environmental science.
16. Justus CG, Hargraves WR, Mikhail A. Graber D (1978): Methods for estimating wind speed frequency distribution. Appl. Meteorology. Vol. 17. pp350-353.
17. Messaoudi F, Adan & Itammouche R. (2000): Modelling and Simulation of hourly wind in ALGERIA. U.S.T.H.B, Institute of Electronics.
18. Nassir SM, Raza Sm, Raja IA. (1992): Distribution of wind power resources over pakistan. Renewable Energy. Vol. 2.
19. Rangana Than, C.R.M, and Swaminathan (1991): Estimation of wind power availability in Tami Nadu. Renewable energy. Vol. 1.
20. Risoe National laboratory. (1991): European wind atlas. ISBN, 87-550-1482-8.
21. Vander Alwera, L, Meger, f. Df, Malet, L.M. (1980): The use of the Weibull three - parameter model for estimation mean wind power densities. J. Appl. Meteorology. vol. 19.