

بررسی پتانسیل انرژی باد جهت احداث نیروگاه برق بادی در استان کردستان با

استفاده از توزیع ویبول

مطلب بایزیدی^{۱*}

M.byzedi@gmail.com

بهرام قلیزاده^۲

محمد ادیب عباسی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۰۷

چکیده

زمینه و هدف: انرژی باد یکی از مهمترین انرژی‌های قابل دسترس در سطح زمین می‌باشد و می‌تواند به انرژی الکتریسیته تبدیل شود. انرژی باد در مقایسه با انرژی سوخت‌های فسیلی به علت گستردگی، در دسترس بودن و پایداری، کاهش آلودگی هوا و اقتصادی بودن در ابعاد وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله هدف بررسی پتانسیل انرژی باد ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم شناسی با استفاده از توزیع ویبول و آمارهای ثبت شده هواشناسی و با بکارگیری نرم افزار Windographer می‌باشد.

روش بررسی: در این تحقیق ۶ ایستگاه سینوپتیک و یک ایستگاه اقلیم‌شناسی مورد بررسی قرار گرفت، داده‌های ساعتی سرعت و جهت باد ایستگاه‌های مورد مطالعه طی سالهای ۲۰۰۵ الی ۲۰۰۷ میلادی با تابع توزیع ویبول برازش و نمودارهای مربوطه رسم گردیدند. آنگاه با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای متداول نمودارهای گلباد، سرعت باد، منحنی قدرت و در نهایت چگالی انرژی باد مناطق فوق برآورد گردید. همچنین نقشه پهنه بندی وضعیت بهره‌وری انرژی باد برای منطقه ترسیم گردید.

بحث و نتیجه‌گیری: با توجه به اینکه چگالی قدرت باد در ایستگاه هزار کانپان در ارتفاع ۵۰ متری، ۷۴۵ وات بر متر مربع می‌باشد، طبق جدول کلاس بندی اطلس انرژی باد آمریکا در کلاس ۶ قرار داشته جزء مناطق پر باد و پارک بادی محسوب می‌گردد. بعد از آن ایستگاه‌های بیجار در شرق استان کردستان، با چگالی انرژی ۳۰۱ وات بر متر مربع، ایستگاه زرینه در شمال استان کردستان با توان ۲۹۰ وات بر متر مربع قرار می‌گیرند. سایر ایستگاه‌های موجود در استان دارای میانگین سرعت باد کمی بوده و توان انرژی آنها کمتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع بود که طبق استانداردهای بین‌المللی جزو مناطق کم باد محسوب شده و برای نصب توربین‌های بادی جهت استحصال برق مناسب نمی‌باشند.

واژه‌های کلیدی: انرژی باد، توزیع ویبول، چگالی قدرت باد، استان کردستان.

* ۱- (مسوول مکاتبات): گروه مهندسی آب، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

۲- کارشناس ارشد اداره کل هواشناسی استان گلستان، ایران.

۳- کارشناس ارشد اداره کل هواشناسی استان کردستان، ایران.

Analysis of wind energy potential to set up wind power plants in Kurdistan province using the Weibull distribution model

Motaleb Byzedi ^{1*}

m.byzedi@gmail.com

Bahram Gholizadeh ²

Mohammad Adib Abbasi ³

Abstract

Background and Objective: Wind energy is an important energy source on earth that can be converted to electricity. The wind energy compared to fossil fuels is widely used because of its availability, stability, reducing air pollution and for economic reasons. The aim of this study is to analyze wind energy potential using the Weibull distribution and the data recorded in synoptic and climatologically stations. The Windographer software is used for calculations.

Method: In this study, hourly wind speed and direction data for 2005 to 2007 in 7 stations (6 synoptic and 1 climatology stations) were investigated and Weibull distribution function fitted to data. Then, corresponding plots including wind rose, wind speed, and wind power curve were provided, and finally wind energy density was estimated. Moreover, the zoning map of wind potential density (WPD) for the study area was drawn.

Conclusion: Wind power density was 745 watts per square meter at Hzarkanian station on 50meters height from ground surface, which has been placed in category 6 of American Atlas Table for wind energy. Such region is considered to be windy and wind park. Bijar station in the east of Kurdistan and Zarineh station in the north of Kurdistan, with 301 and 200 watt per square meters wind power density, respectively, ranked in the next place. Other stations had low mean wind speed and power energy lower than 200 watt per square meters. Based on international standards, such places are considered as regions with low wind and inappropriate for installation of wind turbines to extract electricity.

Keywords: Wind energy, Weibull distribution, wind power density, Kurdistan province.

1- Department of Water Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran. * (Corresponding Author)

2- MSc, Meteorological Department in Mazandaran, Iran.

3- MSc, Meteorological Department in Kurdistan, Iran.

مقدمه

بشر از دیر باز از انرژی های تجدید پذیر نظیر خورشید و باد استفاده نموده، و با کشف منابع سوخت های فسیلی نظیر ذغال سنگ و نفت، استفاده از انرژی های تجدید پذیر به تدریج به فراموشی سپرده شد. تا اینکه بحران جهانی نفت در دهه ۷۰ میلادی باعث شد کشورهای صنعتی به منابع دیگر انرژی، نظیر انرژی های تجدید پذیر و هسته ای روی بیاورند (۲). در آغاز استفاده از انرژی های نو با موانعی همچون هزینه سرمایه گذاری بالا و به صرفه نبودن اقتصادی روبرو بود. اما به مرور زمان، پیشرفت تکنولوژی و مزایایی همچون کاهش آلودگی زیستی باعث گردید تا انرژی های تجدید پذیر و به طور اخص انرژی باد به مرحله اقتصادی بودن برسند (۶). ظرفیت نیروگاه های برق بادی جهان تا پایان سال ۲۰۰۵ میلادی برابر ۶۰۰۰۰۰ مگاوات بوده، و نسبت به سال ۲۰۰۴ دارای افزایش ۲۵ درصدی بوده است. در حال حاضر اروپا ۵ سال زودتر به هدف خود در سال ۲۰۱۰ میلادی یعنی ظرفیت ۴۰۰۰۰ مگاوات برق بادی دست یافته است (۷). کشور ایران از سال ۱۳۷۳ با نصب دو واحد توربین بادی به ظرفیت ۵۰۰ کیلو وات در منطقه منجیل و رودبار شروع به تولید برق از انرژی باد نمود. بعداً با توجه به مشخص شدن منافع انرژی برق بادی، در برنامه پنج ساله چهارم توسعه کشور مقرر گردید ۵۰۰ مگاوات از برق مصرفی کشور از انرژی های تجدید پذیر تولید گردد. در حال حاضر دو نیروگاه بادی ۳۰ مگاواتی بینالود و ۱۰۰ مگاواتی منجیل در کشور وجود دارد (۴). پژوهش های زیادی در رابطه با امکان استفاده از انرژی باد برای مناطق مختلف جغرافیایی با استفاده از آمار و اطلاعات باد در ایستگاه های هواشناسی صورت گرفته است. در کشور کامرون در یک تحقیق علاوه بر بررسی توزیع سرعت باد در مقیاس روزانه و سالانه، توزیع فراوانی در مقیاس ساعتی نیز مورد آنالیز قرار گرفت. برای این منظور سرعت باد در فواصل یک متر بر ثانیه کلاسه بندی گردید (۱۳).

کارشناسان هواشناسی با استفاده از اطلاعات باد ۴۵ ایستگاه هواشناسی و مدل WASP مبادرت به تهیه اطلس باد برای کشور ترکیه نمودند. کارشناسان انرژی باد در نیجریه، با استفاده

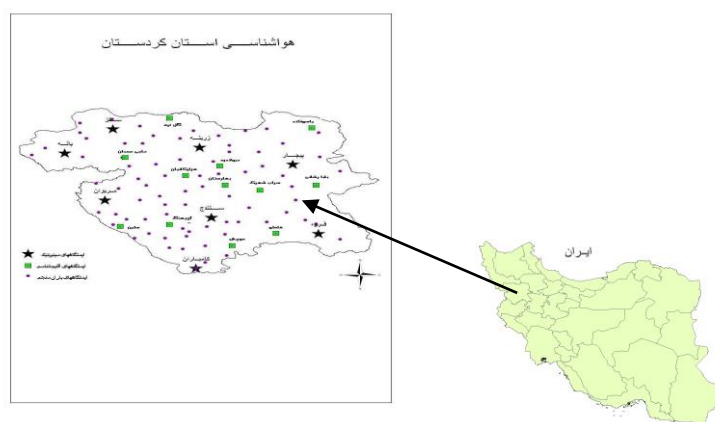
از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی، نقشه پروفیل سرعت باد برای تولید انرژی را ترسیم نمودند. نتایج نشان داد که مدل های شبکه های عصبی مصنوعی با متوسط درصد خطای ۸/۹ درصد و ضریب تبیین ۰/۹۳، پروفیل باد را به خوبی تبیین نموده و متوسط سرعت باد پیش بینی شده با حداکثر مقدار ۱۳/۱ متر بر ثانیه در نواحی شمالی و حداقل مقدار ۰/۹ متر بر ثانیه در مناطق جنوبی بدست آمد (۱۴). در منطقه گلیبولوی ترکیه با استفاده از داده های سرعت باد، تابع چگالی احتمال باد را به صورت مقایسه ۱۰ تابع تعیین نمودند. برای این کار با انجام سه آزمون نیکویی برآزش و روش گرافیک، مناسبترین تابع را بدست آوردند (۱۲) و (۷). پتانسیل یابی انرژی باد در منطقه جرنندق استان قزوین نشان داد که سایت مورد نظر برای تولید برق از انرژی باد بسیار مناسب بوده و در کلاس ۶ قرار دارد. این منطقه به علت قرار داشتن در ادامه تونل باد منجیل دارای جریان باد مناسبی است (۴). ارزیابی منابع باد در یک منطقه به عنوان یک پارامتر کلیدی و یا بحرانی در اجرای استفاده از انرژی باد ذخیره شده توسط توربین های بادی محسوب می شود. تئوری و مبنای روش کار، استفاده تئوری توزیع فراوانی ویبول و تلفیق آن با منحنی های توان توربین های بادی و در نهایت محاسبه و تخمین انرژی قابل حصول برق بادی است. انرژی قابل دسترس در جریان باد متناسب با توان سوم سرعت باد می باشد. میزان چگالی انرژی در ارتفاع ۵۰ متری تقریباً دو برابر چگالی انرژی در ارتفاع ۱۰ متری است. این بدان معناست که اگر سرعت باد دو برابر شود، انرژی تولید شده توسط توربین یا همان انرژی پتانسیل قابل دسترس سه برابر خواهد شد. به طور کلی میانگین سرعت باد بالاتر از ۵ متر بر ثانیه برای اهداف کاربردی مانند تولید الکتریسیته و برقراری جریان، لازم و ضروری است. چگالی نیروی باد روش مفیدی برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد قابل دسترس است و واحد اندازه گیری آن وات بر متر مربع می باشد و به عنوان عاملی است که نشان می دهد که چه مقدار انرژی قابل دسترس در هر مکان می تواند توسط توربین به جریان الکتریسیته تبدیل گردد. چگالی نیروی

استان کردستان دارای ۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، ۲ ایستگاه سینوپتیک تکمیلی و ۱۲ ایستگاه اقلیم شناسی بوده که مشخصات مربوط به داده‌های باد شامل (جهت، سرعت، فراوانی و.....) در آن اندازه گیری می‌شود(شکل ۱). جدول ۱ اطلاعات مربوط مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه واقع در استان کردستان می‌باشد، در این مطالعه از داده‌های سرعت و جهت باد در طول دوره آماری ۲۰۰۵ الی ۲۰۰۷ میلادی که در فاصله‌های زمانی ۶ ساعته در ارتفاع ۱۰ متری ثبت شده‌اند استفاده گردید.

باد توسط دو عامل یعنی سرعت باد و ارتفاع تعیین و دسته بندی می‌گردد(۵). طبق بررسی‌های انجام شده تا کنون بررسی جامعی در خصوص امکان سنجی استفاده از انرژی باد در استان کردستان صورت نگرفته است(۸). در این مقاله پتانسیل سنجی باد ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم شناسی با استفاده از توزیع وینبول و آمارهای ثبت شده هواشناسی و نرم افزار Windographer انجام شده است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم شناسی در استان کردستان

Figure1- Climatology and synoptic stations situations in Kurdistan province

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم‌شناسی استان کردستان

Table 1-Climatology and synoptic stations property in Kurdistan province

فعالیت ایستگاه در شبانه روز	نوع ایستگاه	سال تأسیس	عرض جغرافیایی (شمالی)		طول جغرافیایی (شرقی)		ارتفاع (متر)	نام ایستگاه	ردیف
			دقیقه	درجه	دقیقه	درجه			
۲۴ ساعته	سینوپتیک	۱۳۳۸	۲۰	۳۵	۰	۴۷	۱۳۷۳	سندج	۱
۲۴ ساعته	سینوپتیک	۱۳۷۰	۳۱	۳۵	۱۲	۴۶	۱۲۸۷	مریوان	۲
۲۴ ساعته	سینوپتیک	۱۳۶۸	۱۰	۳۵	۴۸	۴۷	۱۹۰۶	قروه	۳
۲۴ ساعته	سینوپتیک	۱۳۶۶	۵۳	۳۵	۳۷	۴۷	۱۸۸۳	بیجار	۴
۲۴ ساعته	سینوپتیک	۱۳۶۸	۴	۳۶	۵۵	۴۶	۲۱۴۲	زرینه	۵
۱۲ ساعته	سینوپتیک	۱۳۸۰	۴۸	۳۴	۵۳	۴۶	۱۴۰۴	کامیاران	۶
۱۲ ساعته	اقلیم شناسی	۱۳۷۶	۴۶	۳۵	۴۸	۴۶	۱۸۹۴	هزار کانیان	۷

روش محاسبه و آنالیز

تابع توزیع ویبول

تابع توزیع احتمال باد که کاربرد زیادی دارد تابع توزیع ویبول است که عبارت است از:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], (k > 0, v > 0, c > 1) \quad (1)$$

به ترتیب پارامترهای k و c سرعت باد V که در آن مقیاس و شکل هستند. این پارامترها را می توان با استفاده از از معادلات زیر محاسبه Maximum likelihood روش نمود(۵):

$$k = \left(\frac{\delta}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (1 \leq k \leq 10) \quad (2)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

جایی که سرعت متوسط باد عبارتند از:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (4)$$

و واریانس سرعت باد ثبت شده از رابطه زیر بدست می آید:

$$\delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad (5)$$

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (6)$$

$$\delta^2 = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (7)$$

سرانجام تابع ریاضی گاما (χ) (فرمول استاندارد) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Gamma(\chi) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{\chi-1} du \quad (8)$$

محاسبه پتانسیل انرژی باد

قدرت انرژی باد با مکعب سرعت باد رابطه مستقیم دارد:

$$p(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (9)$$

که در آن ρ چگالی هوای استاندارد در سطح دریا با دمای

متوسط ۱۵ درجه سانتیگراد و فشار یک اتمسفر ($\frac{kg}{m^3}$) (۱,۲۲۵)

و \bar{v} متوسط سرعت باد می باشد. چگالی تصحیح شده ماهانه هوا از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\rho = \frac{\bar{p}}{R_d \bar{T}} \quad (10)$$

که در آن \bar{P} متوسط ماهانه فشار هوا و \bar{T} متوسط دمای ماهانه برحسب کلوین، ثابت گاز برای هوای خشک ($R_d = 287 J/kgK$) می باشد.

قدرت انرژی باد محاسبه شده در ارتفاع ۱۰ متری از رابطه زیر می باشد.

$$P_{10} = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 (W/m^2) \quad (11)$$

برای تخمین سرعت باد در ارتفاعات بالاتر از رابطه (۱۲) استفاده می شود.

$$\frac{v_z}{v_{z_0}} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^a \quad (12)$$

که v_z سرعت باد در ارتفاع z و v_{z_0} سرعت واقعی باد در ارتفاع z_0 (۱۰ متری) می باشد. مقدار a نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$a = \frac{[0.37 - 0.088 \ln V_{10}]}{[1 - 0.088 \ln(z_{10}/10)]} \quad (13)$$

متوسط شدت باد در دوره ای که باد می وزد به صورت زیر محاسبه می شود:

$$WPD = \frac{\sum_{i=1}^N 1/2 \rho v_i^3}{N} \quad (14)$$

جایی که i سرعت باد ۳ ساعته اندازه گیری شده، و N کل نمونه داده ها برای هر سال، علاوه بر آن محاسبه شدت قدرت باد بر مبنای سرعت باد اندازه گیری شده می تواند به وسیله آنالیز

توزیع ویبول با استفاده از رابطه زیر بدست می آید: (۱۰)

$$\frac{P}{A} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) \quad (15)$$

چگالی انرژی باد

متوقف می-گردد(۱). همچنین در این تحقیق از توانایی توربین انکرون که مشخصات آن در جدول (۲) آمده است استفاده شده است. نمودار منحنی قدرت باد شکل (۲) ویژگی نوع توربین بکار رفته در محاسبات انرژی باد را نشان می‌دهد که حداکثر قدرت تولیدی (قدرت بهینه) را ۳۴۰ کیلووات برآورد می‌کند. مهمترین فاکتور در شاخصه‌های منابع باد، پراکندگی سرعت باد با ارتفاع می‌باشد، با این توصیف سرعت باد در ارتفاعات مختلف از سطح زمین (۱۰ الی ۵۰ متری) اندازه گیری شد، سپس چگالی انرژی باد که تابعی از توزیع سرعت باد و اثر چگالی هوا است محاسبه گردید.

میزان چگالی انرژی باد در یک مکان می‌تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \Gamma \left(\frac{k+3}{k} \right) T \quad (16)$$

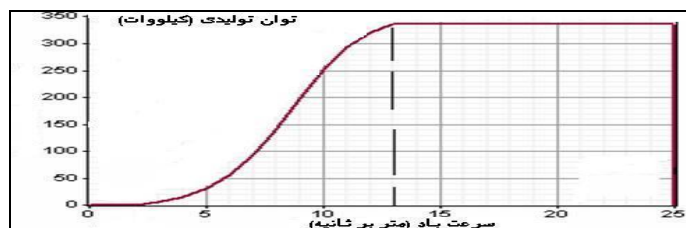
ارزیابی پتانسیل انرژی باد با توربین انکرون

در یک توربین ایده آل پره‌ها در سرعت v_0 شروع به چرخش می‌کنند که به این مرحله اصطلاحاً Cut in گفته، سپس انرژی تولیدی تا سرعت بهینه v_R (Rated Power) افزایش یافته و بعد از آن انرژی تولیدی تا مرحله Cut off ثابت می‌ماند و در سرعت‌های بالاتر از این مرحله برای جلوگیری از خرابی، توربین

جدول ۲- مشخصات توربین بکار رفته جهت محاسبه توان تولیدی انرژی باد

Table 2-Turbin property that used for wind energy calculation

مدل توربین	Enecron E33
ارتفاع	۳۶ و ۵۰ متر
قطر چرخش	۳۳/۴ متر
شرکت سازنده	Enecron
قدرت بهینه (kw)	۳۴۰
ارتفاع توربین (m)	۵۰
سرعت باد در Cut in (m/s)	۳
سرعت باد در تولید بهینه (m/s)	۱۳
سرعت باد در Cut off (m/s)	۲۵



شکل ۲- نمودار منحنی قدرت باد توربین انکرون

Figure 2- Enecron turbine wind power graph

نتایج و بحث

حدود ۱۸ درصد باد وزیده در منطقه سنج در این جهت بوده است و بعد از آن باد جنوبی و جنوب غربی در رتبه دوم قرار دارد. در ایستگاه قروه جهت باد غالب و ماکزیمم انرژی قابل استحصال در جهت جنوب غربی (۲۷۰-۱۸۰ درجه) بوده و بعد از آن نیز باد غربی قرار دارد، همچنین از ویژگیهای مهم این ایستگاه وزش باد به طور مداوم و با شدت و ضعف در تمام طول

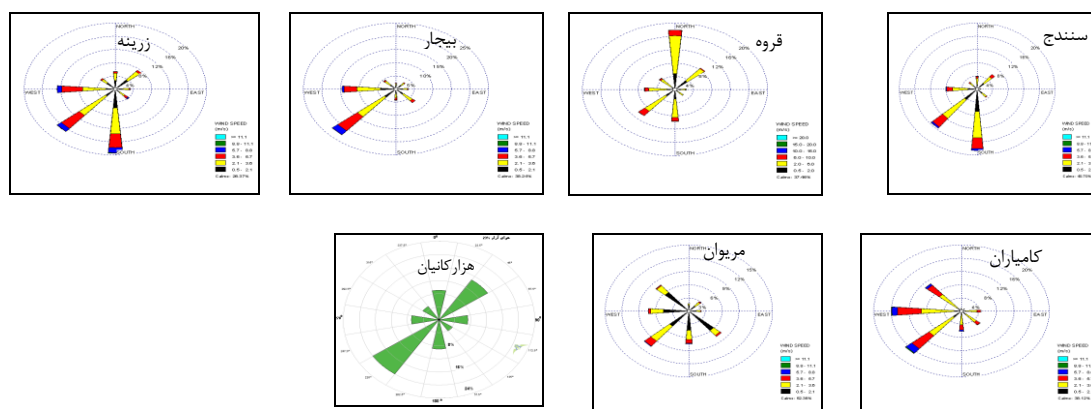
ابتدا برای برآورد اولیه انرژی قابل حصول از جریان باد در منطقه محاسبات لازم بر روی اطلاعات سمت و سرعت باد در یک بازه زمانی سه ساله انجام شد، شکل (۳) نمودارهای مربوط به گلباد ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که پارامتر مهمی در نصب و آرایش توربینها و احداث مزارع باد است. در ایستگاه سنج باد غالب جهت شمالی داشته بطوریکه

از طول سال هوا آرام می‌باشد. در ایستگاه هزارکانیان جهت باد غالب در منطقه جنوب غربی بوده و بعد از آن باد شمال شرقی قرار دارد، همچنین ۲۳ درصد هوای منطقه در طول سال آرام بوده، این بدان معناست که ۷۷ درصد از سال در منطقه وزش باد وجود دارد که از شاخصه‌های مثبت جهت بهره‌وری بهینه انرژی باد می‌باشد (۵).

روند سرعت باد

با توجه به نمودار شکل (۴) میانگین سرعت ماهانه باد نشان می‌دهد که متوسط سرعت در ماههای زمستانی بیشتر است. در ایستگاه سنندج ماه آوریل دارای بیشترین میانگین سرعت باد (۲/۷ متر بر ثانیه) و ماه اکتبر دارای کمترین میزان سرعت (۱/۵ متر بر ثانیه) در ارتفاع ۱۰ متری در طی سال می‌باشند. با توجه به شکل ۴ تند بادهایی با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در ماههای ژانویه و می از ویژگیهای این منطقه می‌باشد. در بین ماهها و فصول مختلف سال، بیشترین میانگین سرعت باد در ماه مارس (۶/۲ متر بر ثانیه) بوده و کمترین آن در فصل زمستان در ماه ژانویه (۳/۸ متر بر ثانیه) در منطقه بیجار می‌باشد.

سال می‌باشد. بطور کلی حدوداً ۳۸ درصد از طول سال هوا آرام می‌باشد. جهت باد غالب و ماکزیمم انرژی قابل استحصال در منطقه بیجار جهت جنوبی بوده و رتبه بعد از آن نیز باد جنوب غربی قرار دارد. همچنین در این ایستگاه وزش باد به طور مداوم و با شدت و ضعف در تمام طول سال می‌باشد. بطور کلی حدوداً ۲۶ درصد از طول سال هوا آرام می‌باشد. شکل ۳ نشان می‌دهند که جهت باد غالب و ماکزیمم انرژی قابل استحصال در منطقه مریوان در جهت جنوب غربی (۲۷۰-۱۸۰ درجه) می‌باشد که حدوداً ۲۸ درصد باد وزیده را به خود اختصاص داده است. وزش باد به طور مداوم و با شدت و ضعف در تمام طول سال می‌باشد، بطور کلی حدوداً ۵۲ درصد از طول سال هوا آرام می‌باشد. جهت باد غالب و ماکزیمم انرژی قابل استحصال در جهت جنوب بوده و بعد از آن نیز باد جنوب غربی قرار دارد. بطور کلی حدوداً ۶۰ درصد از طول سال هوا دارای وزش باد می‌باشد. جهت باد غالب و ماکزیمم انرژی قابل استحصال در جهت غرب و جنوب غربی می‌باشد که حدوداً ۴۰ درصد باد وزیده در ایستگاه زرینه را به خود اختصاص داده است و حدوداً ۳۸ درصد



شکل ۳- دیاگرام گلباد ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم شناسی استان کردستان

Figure 3- Wind digram for Climatology and sinoptic stations in Kurdistan province

سرعت بالای ۳ متر بر ثانیه در منطقه وجود دارد. بیشترین سرعت باد در ماه آوریل (۲/۳ متر بر ثانیه) بوده و کمترین آن در فصل زمستان در ماه ژانویه (کمتر از ۲ متر بر ثانیه) در منطقه مریوان می‌باشد. در سری زمانی میانگین سرعت باد برای ایستگاه کامیاران بیشترین سرعت باد در ماه مارس (۳/۶ متر بر

در کل حدود ۶ ماه از سال سرعت بالای ۳ متر بر ثانیه را تجربه می‌کنند. در اکثر مواقع سال سرعت باد بالاتر از ۵ متر بر ثانیه بوده و حداکثر آن در ماه ژوئن رخ داده است. برای ایستگاه قروه در بین ماهها و فصول مختلف سال، بیشترین سرعت باد در ماه مارس (۴/۸ متر بر ثانیه) می‌باشد، در کل در اکثر ماههای سال

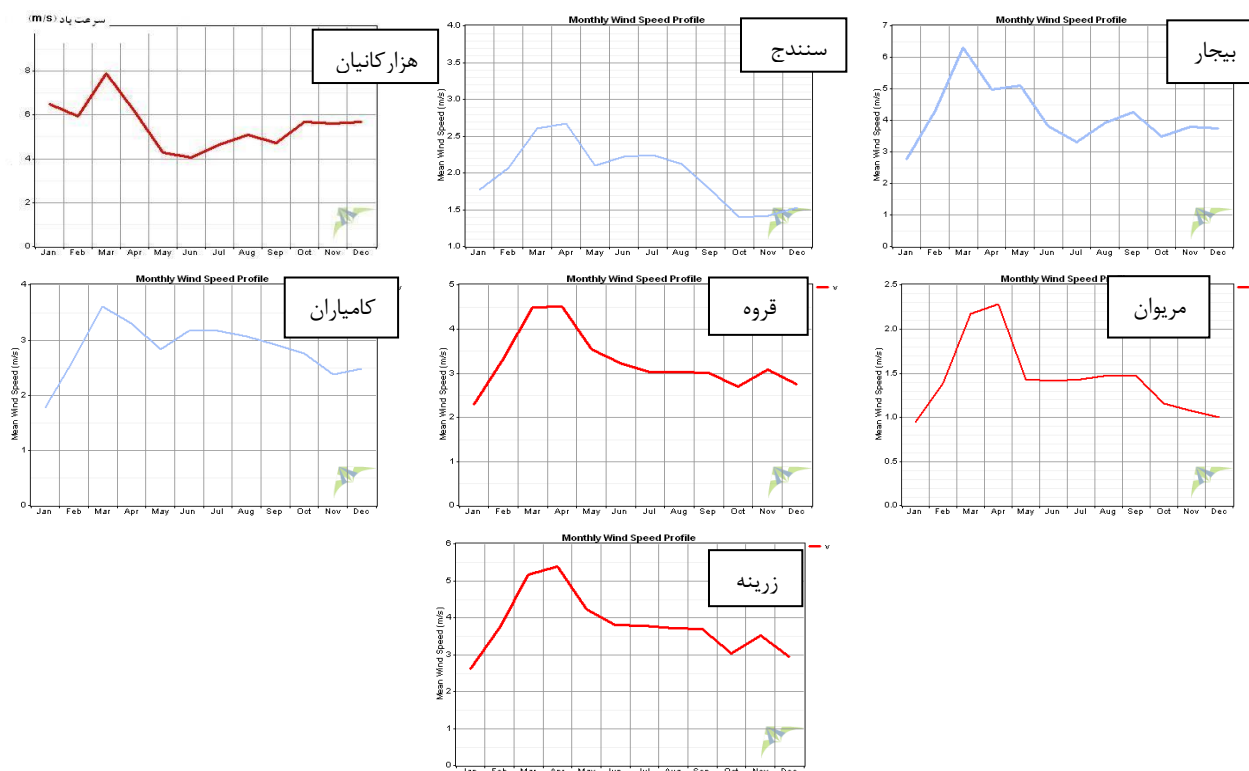
را نشان می‌دهد و طبق شکل مذکور پارامترهای توزیع ویبول (C و k)، که توسط توزیع حداکثر احتمال برای ایستگاه‌های سنندج، بیجار، قروه، مریوان، کامیاران، زرینه و هزارکانیان محاسبه شده‌اند به ترتیب (۲/۱۸ و ۱/۰۳)، (۴/۴۴ و ۱/۱۱)، (۱/۲۸ و ۰/۵۸)، (۳/۵۶ و ۱/۲۸)، (۱/۰۸۴ و ۱/۱۸)، (۳/۱۴ و ۱/۲۶) و (۵/۸ و ۱/۲۸) و (۶/۱۹ و ۱/۲۸) متر بر ثانیه محاسبه شده‌اند. نمودار توزیع ویبول حاکی از آن است که فراوانی سرعت‌های بالاتر از ۵ متر بر ثانیه بیشتر از سرعت‌های دیگر است که می‌تواند از شاخصه‌های خوب یک مکان جهت احداث نیروگاه باشد.

بیشترین بهره‌وری انرژی الکتریکی را در این زمان دارا می‌باشد. در حالیکه ماههای گرم سال از نظر تولید انرژی توان کمتری را دارا بوده که خود می‌تواند زمان مناسبی برای تعمیر و سرویس توربین‌های بادی باشد.

ثانیه) بوده و کمترین آن در ماه ژانویه (۱/۸ متر بر ثانیه) می‌باشد. در بین ماهها و فصول مختلف سال سری زمانی سرعت باد ایستگاه زرینه، بیشترین سرعت باد در ماه آوریل (۵/۱ متر بر ثانیه) بوده و کمترین آن در فصل زمستان در ماه ژانویه (۲/۶ متر بر ثانیه) است. در کل اکثر ماههای سال سرعت بالای ۳ متر بر ثانیه را تجربه می‌کنند. برای ایستگاه هزارکانیان با توجه به داشتن سرعت باد بین ۵ الی ۶ متر بر ثانیه برای احداث نیروگاههای بادی در مقیاس وسیع مناسب می‌باشد. در شکل (۵) هیستوگرام طبقات سرعت طی دوره آماری و توزیع ویبول

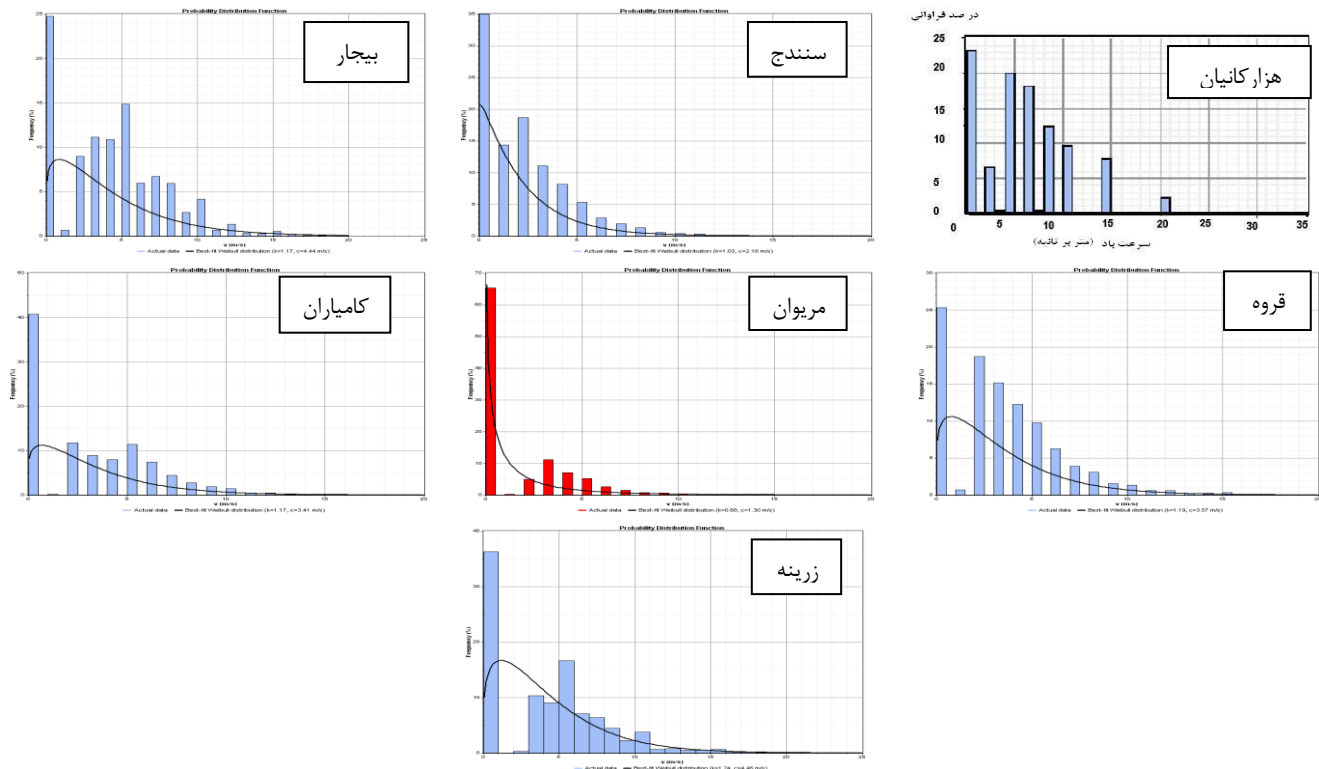
برآورد چگالی انرژی باد

جدول (۳) توزیع ماهانه چگالی قدرت باد بر حسب وات بر متر مربع را نشان می‌دهد. ماههای سرد سال (ژانویه الی مارس) دارای بیشترین میزان چگالی قدرت باد و انرژی تولیدی بوده، که نشان دهنده شدت وزش باد در این مناطق می‌باشد و



شکل ۴- میانگین سرعت باد ماهانه طی دوره آماری

Figure 4- Average of wind velocity for data period



شکل ۵- نمودار فراوانی و توزیع ویبول سرعت‌های مختلف باد ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 5- Wind velocity Frequency and weibull distribution for stations

جدول ۳- توزیع ماهانه چگالی قدرت باد در منطقه مورد مطالعه

Table 3- Monthly distribution of wind power density in area of study

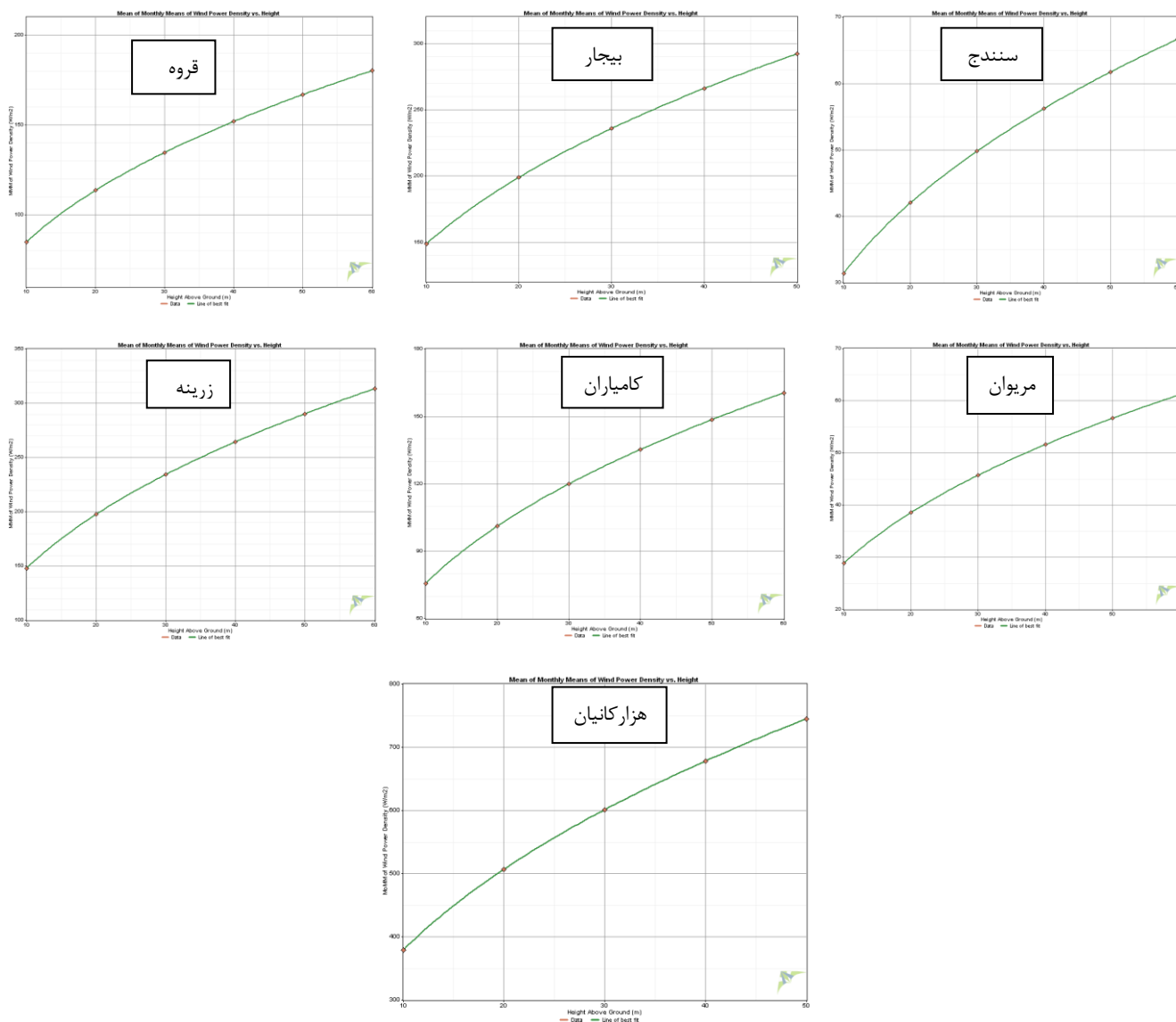
ایستگاه / ماه‌های سال	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
سندج	۷۴۴	۶۸۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۳
قروه	۷۴۴	۶۸۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۱
بیجار	۴۹۶	۴۵۶	۴۹۶	۴۸۰	۴۹۶	۴۸۰	۴۹۶	۴۹۶	۴۸۰	۴۸۰	۷۲۰	۷۴۴
کامیاران	۷۷۵	۷۰۵	۷۷۵	۷۵۰	۷۷۵	۷۵۰	۷۶۲	۷۷۳	۷۵۰	۷۷۵	۷۵۰	۷۷۵
مریوان	۷۴۴	۶۸۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۳۹
زرینه	۷۴۴	۶۸۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۴	۷۲۰	۷۴۳
هزارکانیان	۱۱۴۵	۷۸۹	۱۴۶۱	۹۳۹	۴۱۹	۴۰۶	۶۴۰	۵۷۱	۴۶۱	۸۳۵	۶۷۳	۵۸۷

سایت نیروگاهی تاکستان قزوین با توان برق تولیدی ۶۰۱ وات بر متر مربع در ارتفاع ۵۰ متری (کلاس ۶) و منطقه فیروزکوه با توان ۳۲۶ وات بر متر مربع در ارتفاع ۵۰ متری (کلاس ۳) و (۶) و (۹)، منطقه هزارکانیان کردستان به علت داشتن بادهایی با سرعت بیشتر از ۵ متر بر ثانیه در اکثر اوقات سال و چگالی قدرت ۷۴۵ وات بر متر مربع در ارتفاع ۵۰ متری، می

در یک سایت خوب متوسط قدرت خروجی و تولیدی بین ۲۵ الی ۳۳ درصد از ظرفیت تولیدی می باشد. با توجه به جدول (۳) فاکتور ظرفیت ۲۸/۸ درصد بوده و مقدار کل انرژی الکتریکی تولیدی توسط توربین در طول یک سال ۸۳۱ مگا وات ساعت می باشد. میانگین قدرت تولیدی نیز ۹۴/۹ کیلووات برآورد شده است. با توجه به نتایج سایر تحقیقات مشابه در

انرژی (۳۰۱ وات بر متر مربع)، در ارتفاع ۵۰ متری در کلاس نسبتاً خوب (کلاس ۳) قرار داشته از نواحی پر باد استان نسبت به سایر نقاط محسوب می‌شود.

تواند به عنوان یکی از سایت‌های بسیار خوب جهت نصب و راه اندازی پارک‌های بادی در منطقه کردستان محسوب شود. بعد از آن ایستگاه بیجار، واقع در شرق استان کردستان، با چگالی



شکل ۸- منحنی چگالی قدرت باد (وات بر متر مربع) بر حسب ارتفاع از سطح زمین مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 8- Wind power density curve (w/m^2) based on height from ground surface for stations

استانداردهای بین‌المللی جزو مناطق کم باد و کلاس رده (۱) محسوب شده و برای نصب توربین‌های بادی جهت استحصال برق مناسب نمی‌باشند. (شکل ۹) پارامترها و مشخصه‌هایی از قبیل ویژگی‌های منطقه‌ای، هزینه سوخت نیروگاه‌های فسیلی و سیاست‌های دولت باعث نوسان هزینه تولید الکتریسیته می

منطقه زرینه در شمال استان کردستان با توان ۲۹۰ وات بر متر مربع در ارتفاع ۵۰ متری جزو مناطق با وضعیت متوسط بوده و از نظر کلاس باد در رده (۲) قرار می‌گیرد. سایر ایستگاه‌های موجود در استان دارای میانگین سرعت باد کمی بوده و توان انرژی کمتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع بوده، که طبق

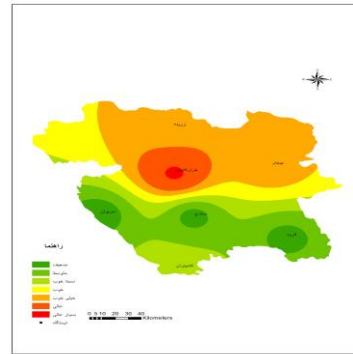
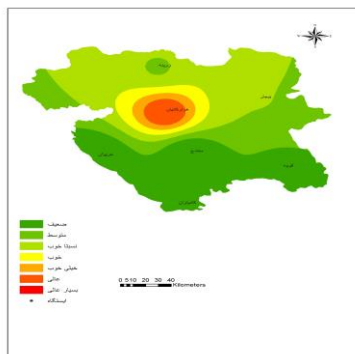
بیان می نماید. لذا بایستی در غالب پروژه های آتی با انجام آنالیز اقتصادی و مقایسه هزینه برق تولیدی نیروگاه بادی و نیروگاههای فسیلی اقدامات لازم صورت گیرد.

گردد. از طرف دیگر با کم شدن ذخایر نفت و گاز و حذف یارانه فرآورده های نفتی، هزینه سوخت نیروگاههای گازی و حرارتی روندی صعودی را طی می کند که این امر در آینده توجیه پذیری نیروگاههای برق بادی به نیروگاههای گازی و حرارتی را

جدول ۴- میزان توان تولیدی سالانه استخراج شده از توربین E33 در استان کردستان

Table 4- Yearly generated power from Enecon E33 turbin in Kurdistan province

ایستگاه	سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری (متر بر ثانیه)	ضریب C	K ضریب	WPD (وات بر مترمربع)	انرژی تولیدی سالانه (MWh /yr)	فاکتور ظرفیت (درصد)	کلاس بهره برداری
هزار کانیان	۶/۸۹	۶/۲۰	۱/۲۸	۷۴۵	۸۳۱	۲۸	عالی
بیجار	۵/۱۳	۴/۴۴	۱/۱۷	۳۰۱	۵۸۶	۲۰/۳	نسبتا خوب
زرینه	۴/۷۶	۵/۸	۱/۲۶	۲۹۰	۵۵۰	۱۹/۱	متوسط
قروه	۴/۰۶	۳/۵۶	۱/۱۸	۱۶۸	۳۶۱	۱۲/۵	ضعیف
کامیاران	۳/۵۶	۳/۴۱	۱/۱۸	۱۵۰	۳۵۴	۱۲/۳	ضعیف
سنندج	۲/۴۹	۲/۱۸	۱/۰۳	۶۳	۱۵۹	۵/۵	ضعیف
مریوان	۱/۸	۱/۰۸	۰/۵۸	۵۷	۱۳۳	۴/۶	ضعیف



شکل ۹- پهنه بندی استان کردستان از نظر وضعیت بهره وری انرژی باد

Figure 9- Zoning of Kurdistan province base on wind energy Productivity

منابع

بادی»، بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۸۸-تهران-ایران.

۱- امامی ، ناصر، بهبهانی نیا ، سید ، علی و خلجی اسدی ، مرتضی، « ارزیابی آماری سرعت باد و پتانسیل انرژی منطقه فیروز کوه برای احداث نیروگاه

- Karnataka, India, using GIS”, Energy Conversion and Management, No. 46, pp.1561–1578.
- 10- Selic A., 2003. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Reyleigh models at the southern region of Turkey”, Renewable Energy, No.29, pp.593–604.
- 11- Windographer software available at, <http://www.mystaya.com>.
- 12- Wiser, D., 2008. Technical note A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the ‘Weibull’ density Function”, Renewable Energy, No. 28, pp.1803-1812.
- 13- Tchinda, R., Kaptouom, E., 2003. Wind energy in Adamou and North Cameroon provinces. Energy Conversion and Management, Vol.44, pp.845–857.
- 14- Fadare, D., 2010. The application of artificial neural networks to mapping of wind speed profile for energy application in Nigeria. Applied Energy Vol.87, pp.934–942.
- ۲- ذوالفقاری، مریم، «برآورد چگالی نیروی باد در استان مرکزی»، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اردیبهشت ۱۳۸۹ - تهران-ایران.
- ۳- ثقفی، مجید، شریفی، مهدی و خلجی اسدی، مرتضی، «بررسی پتانسیل باد سیاهپوش در استان قزوین برای احداث نیروگاه برق بادی»، پنجمین همایش ملی انرژی، بهار ۱۳۸۴- تهران-ایران.
- ۴- شریفی، مهدی و شیرزادسینینی، ابوالفضل، «امکان سنجی احداث نیروگاه برق بادی در جرنندق تاخستان با توجه به پتانسیل جریان باد منطقه»، بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۸۵-تهران-ایران.
- ۵- محمدی، جهانگیر، «مطالعات و برآورد انرژی باد در ایران»، مرکز توسعه انرژی های نو، سازمان انرژی اتمی، ۱۳۸۳.
- 6- Burton T., 2003. Wind Energy Handbook, First Edition, UK, Garrad Hassan and Partners.
- 7- Keyhani A. M., Ghasemi V., 2010. An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran Tehran”, Energy, No. 35, pp. 188–201.
- 8- Mukund R. P., Wind and Solar Power Systems, Second Edition, New York, 2006.
- 9- Ram C. T., Shruthi B., 2005. Wind energy potential mapping in