

Assessment of wind power in the synoptic station of Ardebil

Hossein Asakereh¹, Azar Beyranvand², Mehdi doustkamian³

1- Associate Prof. in Climatology, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Ph.D Student of Synoptic Climatology, Department of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Ph.D Student of Climate Change, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract

Wind is an element, useful to create clean energy, but, in the case of occurring any changes in its speed threshold (incremental or decreasing), or the direction of it; or being combined with other elements or phenomena, at different times, this element can bring human and financial losses. In this study, in order to achieve the wind energy potential, we have benefited the hourly data from wind velocity, direction, temperature, humidity and pressure, during the period of 1990-2008. To perform the analytical analysis, WINDOGRAPHER software was used. Results showed the average speed in Ardebil station equal to 4/7, and wind incidence percentage equal to 43%; with the stations' southwest dominant wind, and east vice-dominant wind. Reviews of all hourly analysis showed the overcome of eastern winds, but the highest energy efficiency being in the southwestern winds. With the directional inequality between the maximum reachable speed and the maximum reachable power, representing the energy manner, following from wind speed, not its direction; while the maximum energy being a function of the speed cube. According to the standard classification proposed by the International Electro Technical Commission (IEC), Average speed in Ardabil station is placed in Class 3. Comparison and analysis of the capacity factor and average power coefficients of all turbine types available in this class, indicated that the proper Turbine for the studied area are Win Wind WWD-3-120 and Vestas V112-3.0MW.

Key Words: Ardebil, Wind Energy, Wind Density Power, Turbines' Classification.

فصلنامه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)

سال هشتم، شماره سوم، (پیاپی ۳۰)، پاییز ۱۳۹۷

تاریخ وصول: ۹۶/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۰۷

صص: ۶۵-۸۲

ارزیابی انرژی باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل

حسین عساکره^{۱*}، آذر پیرانوند^۲، سیدمهدی دوستکامیان^۳

۱- استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی سینوپتیک، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری تغییر اقلیم، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

باد، عنصری است که با استفاده از آن انرژی پاک تولید می‌شود؛ اما این عنصر در صورتی که تغییری در آستانه سرعت (به صورت افزایشی یا کاهش) و جهت آن صورت بگیرد یا با عناصر یا پدیده‌های دیگر ترکیب شود، در زمان‌های مختلف خسارات جانی و مالی به بشر وارد می‌کند. در این مطالعه به منظور دستیابی به پتانسیل انرژی باد از داده‌های ساعتی مربوط به سرعت و جهت باد، دما، رطوبت و فشار طی دوره آماری ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۷ بهره گرفته شده است. برای انجام همه تجزیه و تحلیل‌ها، نرم‌افزار WINDOGRAPHER به کار رفته است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد در ایستگاه اردبیل میانگین سرعت برابر با $7/4$ و درصد وقوع باد آرام برابر با 43% بوده است. این ایستگاه باد غالب شرقی و نایب غالب جنوب غربی دارد. بررسی تحلیل‌های ساعتی نشان داد در تمام ساعات غلبه با وزش‌های شرقی بوده است؛ اما بیشترین بازدهی انرژی در جهت جنوب غربی است. نابرابری جهت‌های مربوط به بیشینه سرعت و بیشینه انرژی قابل دسترس نشان‌دهنده تابعیت انرژی از سرعت وزش، نه جهت است و بیشینه انرژی تابعی از مکعب سرعت است. با توجه به طبقه‌بندی استاندارد کمسیون الکترونیکی بین‌المللی، میانگین سرعت ایستگاه اردبیل در کلاس ۳ قرار می‌گیرد. مقایسه و تحلیل ضرایب فاکتور گنجایش و میانگین انرژی در انواع توربین موجود برای این کلاس نشان داد برای منطقه مطالعه‌شده نوع توربین Vestas V112-3.0MW و WinWinD WWD-3-120 مناسب بوده است.

واژه‌های کلیدی: اردبیل، انرژی باد، توان چگالی باد، کلاس‌بندی توربین‌ها.

مقدمه

ارزیابی منبع باد، عاملی حساس و مهم در طرح‌ریزی سطح کارایی توربین در مکانی معین است. انرژی موجود در جریان باد نسبتی از مکعب سرعت آن است و این بدان معناست که دوبرابر شدن سرعت باد، انرژی قابل دسترس را به صورت فاکتوری از هشت افزایش می‌دهد؛ علاوه بر این خود منبع باد به ندرت به صورت مداوم و پایدار است؛ به طوری که میزان آن بسته به زمان، مکان و فصل و همچنین ارتفاع از سطح زمین تغییر می‌یابد.

انرژی باد در سال‌های اخیر به ویژه از سال ۱۹۷۳ (دهه بحران انرژی و بحران جهانی نفت) به بعد، توجه جهان صنعتی را به شدت جلب کرده است (Keyhani et al, 2010: 181)؛ این توجه در قالب سیاست وابسته نبودن به سوخت‌های سنتی و رها شدن از قید مشکل تأمین انرژی و همچنین حفاظت از محیط‌زیست صورت گرفته است (کاوایانی، ۱۳۷۴: ۱۲۸). تحقیق و تفحص برای تعیین استفاده بهینه از پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی اقتصادی آن در کشور ضروری است (سادکین، ۱۳۸۰: ۶۱۷). استفاده مؤثر از انرژی باد مستلزم دانش دقیق از ویژگی‌های باد در موقعیت خاص است؛ مهم‌ترین عوامل در انتخاب یک سایت مناسب بودن سرعت باد (Ramazan, 2004: 1632)، کفایت زیرساخت‌های موجود در سایت (عبدی و همکاران، ۱۳۹۰: ۲)، شبکه فشار متوسط زمین و شرایط زیست‌محیطی (سادکین، ۱۳۸۰: ۶۱۷) است. در ارزیابی، نخستین گام، امکان‌سنجی فنی اقتصادی احداث و استفاده از توربین‌های بادی است. با متوسط‌گیری عددی امکان نشان دادن تصویر واضحی از موقعیت باد و سرعت آن نیست؛ به این دلیل سرعت برداری آن را می‌باید تعیین کرد (عبدلی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۷).

پیشینه پژوهش

وابستگی دنیای امروز به صنایع و نیاز صنایع به انرژی برای راه‌اندازی و فعالیت سبب شده است در سراسر جهان نگاه ویژه‌ای به انرژی در مقیاس‌های کوچک و بزرگ شود و دانشمندان بسیاری در پی تحلیل این موضوع برآیند؛ برای نمونه در مطالعه‌ای گوکیک و همکاران^۱ (۲۰۰۷) در بررسی ویژگی‌ها و انرژی بالقوه باد در کیرکلارالی^۲ ترکیه با استفاده از دو توزیع احتمالاتی ویبول و ریلی داده‌های مربوط به سرعت باد را در ارتفاعات مختلف تحلیل کردند. مطالعه آنها نشان داد در این منطقه میانگین سرعت باد ۶/۱۷-۳/۷۴ متر بر ثانیه است که پیشینه سرعت در فصل زمستان و ماه ژانویه بوده است. در این منطقه میانگین سالیانه چگالی بالقوه توان باد براساس توزیع ویبول ۱۳۸/۸۵ وات بر مترمربع و برای ایجاد سایت مناسب است.

فوزی و جودر^۳ (۲۰۰۹) به منظور تجزیه و تحلیل قدرت باد و محل تطبیق ژنراتور توربین بادی در بحرین در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۰۳، داده‌های مربوط به سرعت باد را در ارتفاعات ۱۰ متری، ۳۰ متری و ۶۰ متری با توزیع ویبول برازش داده‌اند و در نهایت برای هر ارتفاعی توربین مناسب را پیشنهاد کرده‌اند.

یوکار و بالو^۴ (۲۰۰۹) انرژی باد را در ۶ نقطه ترکیه پتانسیل سنجی کردند. میانگین سرعت باد در این ۶ منطقه،

¹ Gokc-ek et al

² Kirklareli

³ Fawzi & Jowder

⁴ Ucar & Balo

۸/۷ متر بر ثانیه به دست آمد. برآزش توزیع ویبول از ۶ منطقه بررسی شده، دو منطقه ارزروم و الازیک^۱ را مناسب‌ترین مناطق برای ایجاد سایت نشان داد.

کیهانی و همکاران^۲ (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای به منظور پتانسیل سنجی انرژی باد در تهران با بهره‌گیری از داده‌های ۳ ساعته در دوره‌ای ۱۱ ساله از توزیع ویبول به این نتیجه رسیدند که بیشینه سرعت باد در ژوئیه و کمینه آن در آگوست رخ داده است؛ همچنین نشان دادند این سایت برای تولید برق در مقیاس بزرگ مناسب نیست و فقط امکان راه‌اندازی ژنراتورهای محلی، شارژ باتری و پمپاژ آب را دارد.

مصطفایی پور و همکاران^۳ (۲۰۱۱) به منظور امکان‌سنجی انرژی باد در شهر بابک کرمان، داده‌های ۳ ساعته باد را در دوره زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۷ با توزیع احتمالاتی ویبول برآزش داده‌اند. این مطالعه همچنین نصب توربین‌های کوچک را از نظر اقتصادی ارزیابی کرده است. نتایج نشان می‌دهد احداث سایت در این منطقه به تولید برق در مقیاس بزرگ نمی‌انجامد و فقط برای مصرف در ساختمان‌های دولتی و ساختمان‌های عمومی مناسب است.

ندایی^۴ (۲۰۱۲) در راستای پتانسیل سنجی انرژی باد در چالوس، داده‌های مربوط به سرعت باد را در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه در ۱۴ ماه از ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ در ارتفاعات ۳۰ متری و ۴۰ متری استفاده کرد؛ نتایج پژوهش وی نشان داد در هر دو ارتفاع بررسی شده، میانگین سرعت باد کمتر از ۴ متر در ثانیه بوده است و برای تولید برق مناسب نیست؛ چنانچه برنامه‌های کاربردی در منطقه اجرا شود، امکان تأمین برق برای پمپاژ آب را خواهد داشت.

فاضل پور و همکاران^۵ (۲۰۱۵) به منظور ارزیابی انرژی باد در ایستگاه‌های تبریز و اردبیل از توزیع ویبول استفاده کردند. براساس نتایج پژوهش ایشان، ایستگاه تبریز بیشینه پتانسیل قدرت باد را در ماه‌های جولای و آگوست و ایستگاه اردبیل در ماه‌های سپتامبر و اکتبر دارد.

همچنین میرموسوی^۶ (۲۰۱۵) برای ایستگاه سهند پتانسیل باد را با توزیع ویبول ارزیابی و سرعت و توان باد را در ارتفاعات ۱۰، ۴۰ و ۶۰ متری بررسی کرده است. توان تولید انرژی باد در این ایستگاه با چهار توربین مختلف ارائه شده است. براساس این مطالعه ایستگاه سهند در ماه‌های ژانویه تا سپتامبر بیشینه سرعت باد را دارد.

دباغیان و همکاران^۷ (۲۰۱۶) برای استان بوشهر در ۴ ایستگاه مختلف پتانسیل انرژی باد را با توزیع ویبول برآورد و با بررسی ۱۲ توربین مختلف با توان ۱۰۰-۱ کیلووات با مقایسه ضریب گنجایش و انرژی خروجی سالیانه آنها، بهترین توربین را معرفی کرده‌اند.

همچنین به این بحث در مطالعات داخلی نیز توجه شده است؛ برای نمونه کاویانی (۱۳۷۴) به منظور بررسی پتانسیل انرژی باد کشور، آمار ۱۹۸۵-۱۹۸۱ را در ۶۰ ایستگاه سینوپتیک به صورت ماهیانه و سالیانه تحلیل کرد. وی به تهیه اطلس انرژی باد کشور مبادرت ورزید و سرعت و جهت متوسط بادها و انرژی آن را تعیین کرد.

¹ Erzurum, Ezzzgg

² Keyhani et al

³ Mostafaeipour et al

⁴ Nedaei

⁵ Fazelpour et al

⁶ Mirmousavi

⁷ Dabbaghian et al

صلاحی (۱۳۸۳) در پتانسیل سنجی انرژی باد اردبیل با استفاده از توزیع چگالی احتمال ویبول، احتمال تجربی داده‌ها را با بهره‌گیری از تابع توزیع پیوسته احتمال ویبول محاسبه و برازش مناسب این توزیع را بر داده‌های این ایستگاه با آزمون خی دو اثبات کرد. وی نتیجه گرفت ایستگاه سینوپتیک اردبیل، مکان مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی باد است.

جهانگیری و همکاران (۱۳۸۴) در محاسبه انرژی باد کشور با استفاده از توزیع ویبول دوپارامتره طی دوره ۱۹۹۵-۱۹۸۶، توزیع ویبول و رایله را بهترین برازش برای مکعب سرعت باد دانستند. بررسی آنها نشان داد علاوه بر منجیل، امکان بهره‌برداری از انرژی مناطقی نظیر سردشت، اردبیل و ماهشهر نیز وجود دارد. تخمین میزان تولید انرژی الکتریکی، منبع درآمد نیروگاه را تشکیل می‌دهد.

محمدی و همکاران (۱۳۹۱) به منظور پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه در سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶، توزیع احتمال ویبول را به کار گرفتند. آنها چگالی توان باد سالیانه را در ترازهای ارتفاعی ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متر محاسبه کردند. پتانسیل انرژی باد تراز ۱۰ متر در ایستگاه‌های روانسر، سرپل ذهاب، کنگاور، اسلام‌آباد غرب و کرمانشاه به ترتیب ۲۵۴، ۲۲۳، ۲۱۴، ۱۴۶ و ۸۲ وات بر مترمربع در واحد سطح به دست آمده است. نتایج این مطالعه حاکی است در ایستگاه‌های روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور، پتانسیل مناسب برای تولید انرژی باد وجود دارد؛ اما ایستگاه کرمانشاه این پتانسیل را ندارد.

رمزجو و شیرمحمدی (۱۳۹۵) داده‌های سرعت و پتانسیل انرژی باد را برای بندر دیر ارزیابی آماری کرده‌اند. کمینه سرعت باد در این ایستگاه در ماه آگوست و بیشینه آن در ماه مارس است. آنها این ایستگاه را برای نصب توربین‌های کوچک مناسب می‌دانند. با توجه به اینکه منبع تولید انرژی نیروگاه‌های تجدیدپذیر نظیر باد در اختیار طبیعت است و دسترسی همیشگی به آن میسر نیست، بنابراین تعیین میزان انرژی تولیدی سالیانه نیروگاه همواره به صورت تخمینی و تقریبی ممکن خواهد بود.

در زمینه معرفی توربین بادی برای بهره‌برداری از انرژی باد مطالعات زیادی انجام نشده است؛ از این رو در این مطالعه سعی شده است ضمن بررسی توربین مناسب، متناسب با سرعت‌های مختلف باد، گنجایش پتانسیل انرژی باد بررسی و تجزیه و تحلیل شود.

روش‌شناسی پژوهش

در این مطالعه به منظور ارزیابی توان باد در ایستگاه اردبیل از داده‌های مربوط به سرعت و جهت باد، دما، رطوبت و فشار طی دوره آماری ۱۳۶۹ (۱۹۹۰) تا ۱۳۸۷ (۲۰۰۸) در ساعات اصلی (۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸) و ساعات فرعی (۰۳، ۰۹، ۱۵ و ۲۱) به وقت گرینویچ بهره گرفته شده است که در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین اندازه‌گیری شده‌اند. علت انتخاب این بازه زمانی این بود که داده گمشده در این دوره وجود نداشت. برای انجام تجزیه و تحلیل داده‌ها نرم‌افزار WINDOGRAPHER به کار رفته است؛ سپس برای ارزیابی این نرم‌افزار، نتایج حاصل از آن با نرم‌افزار WRPLOT مقایسه و نیز به منظور حصول اطمینان بیشتر، بعضی از محاسبات به صورت دستی انجام شد. در ادامه ضریب ظرفیت انرژی باد با رابطه ۱ محاسبه شده است (Manwell, 2002: 63):

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{\bar{P}}{A} \cdot \frac{8760hr}{Yr} \div \frac{1000w}{kw} \quad (1)$$

$\frac{\bar{E}}{A}$ میانگین ظرفیت انرژی باد (\bar{E}) در واحد سطح (A) است ($kwh/m^2/yr$)؛ $\frac{\bar{P}}{A}$ متوسط چگالی توان باد (\bar{P}) در واحد سطح (A) است. چگالی هوا، جرم از مقدار هوا و تقسیم بر حجم آن تعریف شده است. برای محاسبه چگالی هوا در هر گام زمان، از قانون گاز ایده‌آل و برای محاسبه چگالی توان باد از رابطه ۲ استفاده می‌شود (همان):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (2)$$

در این رابطه:

$\frac{P}{A}$ توان (قدرت چگالی باد/ وات بر مترمربع در واحد سطح)، ρ چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب kg/m^3) و U^3 میانگین سرعت باد به متر در ثانیه (ساعتی و ماهیانه برای هر سال در دوره زمانی بررسی شده) است که در این فرمول P خود از رابطه ۳ حساب می‌شود:

$$P = \rho \frac{R}{M} T \quad (3)$$

P فشار به پاسکال (KPa)، ρ چگالی/کیلوگرم بر مترمکعب ($8.314412 M^3 \cdot Kpa \cdot k^{-1} \cdot kmol^{-1}$)، M جرم مولی (Kg/Kmol)، T میانگین دما برحسب کلوین است. برای هوای خشک جرم مولر برابر با $28.9664 kg/mol$ است؛ اما برای محاسبه آن از رابطه ۴ استفاده می‌شود (همان):

$$\rho = 3.4737 \frac{P}{T} \quad (4)$$

برای بیان چگالی از رابطه ۵ استفاده می‌شود:

$$\rho = \frac{M}{R} \cdot \frac{P}{T} \quad (5)$$

P برابر با فشار هوا (Kpa) است که با رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$01.29 - (0.011837)Z + (4.793 \times 10^{-7})Z^2 \quad (6)$$

Z معادل ارتفاع است.

T برابر با دمای هواست که با رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$T = T_0 - B_z \quad (7)$$

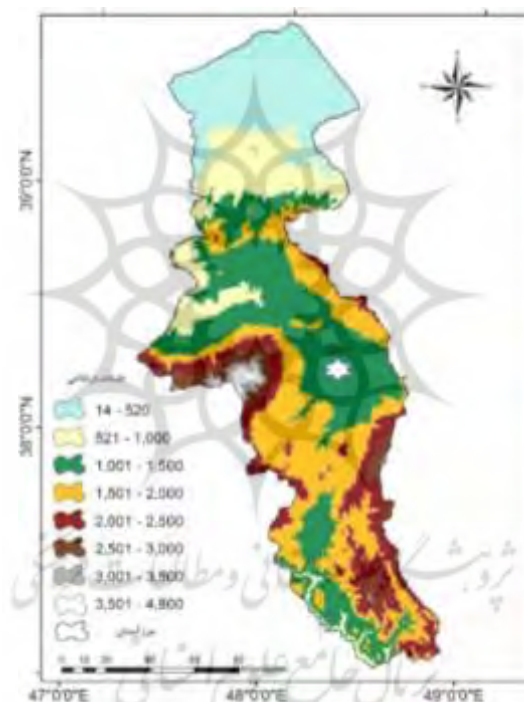
Z ارتفاع و T_0 دمای استاندارد سطح دریاست، معادل: $288.15 K$.

B، میزان استاندارد افتاهنگ محیطی و میزان آن برابر با $0.00650 K/m$ است.

محدوده پژوهش

استان اردبیل، بخشی از فلات مثلثی شکل ایران در شرق فلات آذربایجان است که حدود دوسوم آن بافت کوهستانی با اختلاف ارتفاع زیاد دارد و بقیه را مناطق هموار و پست تشکیل داده است (شکل ۱). مساحت این استان ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع (تقریباً ۱۰۰۹ درصد از مساحت کل کشور) است. با توجه به اینکه استان اردبیل ارتفاعات بلندی دارد، همچون سبلان (۴۸۱۱ متر)، کوه‌های طالش و قوشه‌داغ در غرب سبلان و بزغوش در جنوب و جنوب غربی آن (همگی با ارتفاع متوسط ۲۲۰۰ متر) یا رشته‌کوه پلنگان در حوالی دریاچه نئور و قلعه آق‌داغ (۳۳۲۲ متر)، اقلیم این استان متأثر از آنها از ویژگی‌های خاصی برخوردار شده است.

ایستگاه سینوپتیک اردبیل که در این مطالعه بررسی شده است، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی دارد. ارتفاع این ایستگاه از سطح دریا ۱۳۳۲ متر است و براساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی نیمه‌خشک محسوب می‌شود.



شکل - ۱: موقعیت جغرافیایی و سیمای توپوگرافی استان اردبیل

یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های توصیفی باد در منطقه

برنامه‌ریزی برای به‌دست‌آوردن انرژی از توان بالقوه باد در هر منطقه نخست نیازمند شناخت ویژگی‌های اولیه و بلندمدت در هر منطقه است تا نگاهی جامع حاصل شود. در این راستا محاسبه ویژگی‌های توصیفی و ساده آماری گامی کوچک و ابتدایی جلوه می‌کند، اما در رسیدن به دیدگاهی جامع از وضعیت این پدیده به پژوهشگر یاری می‌رساند. جدول (۱) بعضی از مشخصات آماری باد را در منطقه نشان می‌دهد. از مجموع کل باد منطقه، ۴۳ درصد آن باد آرام است. دامنه تغییرات، همان‌طور که از جدول برمی‌آید، ۵۸ m/s، یعنی برابر با بیشترین سرعت باد در

منطقه و این امر بیان‌کننده تغییرات شدید باد در منطقه است؛ همچنین پراش $66/25$ تأییدی بر این گفته است. زیادبودن چولگی و کشیدگی و همچنین یکسان‌نبودن میانه و مد و میانگین، بیان‌کننده توزیع نابهنجار باد در محدوده پژوهش است. چنک‌ها برای شناخت فراوانی یا درصد تراکمی آستانه‌های مدنظر استفاده می‌شود؛ به بیان دیگر، متغیرها را براساس تفاضل کمینه و بیشینه باد و همچنین براساس تعداد داده‌ها به فاصله چندکی مدنظر تقسیم می‌کند. چگالی انرژی باد که به صورت وات در هر مترمربع (W/m^2) اندازه‌گیری می‌شود، نشان‌دهنده این است که چقدر انرژی برای بازدهی یک توربین بادی در مکان موجود است. میزان متوسط انرژی حاصل از باد طی دوره مطالعه‌شده، $128197/2$ KW/m^2 است؛ این در حالی است که قدرت چگالی آن برابر با 14634 W/m^2 است.

جدول - ۱: مشخصات عمومی باد در منطقه مطالعه‌شده

مشخصات باد	ارزش	مشخصات باد	ارزش
آغاز دوره	۱۳۶۹/۰۱/۰۱ ساعت ۰۰:۰۰	درصد باد آرام	۴۳ درصد
پایان دوره	۱۳۸۷/۱۲/۳۱ ساعت ۲۱:۰۰	کشیدگی	۳/۴۳
میانگین سرعت باد (m/s)	۷/۴	چولگی	۰/۹۲
میانگین قدرت چگالی باد (W/m^2)	۱۴۶۳۴	چارک اول	۰
میانگین انرژی باد (KW/m^2)	۱۲۸۱۹۷/۲	چارک سوم	۱۴
پراش (سرعت)	۶۶/۲۵	ماکزیمم	۵۸
انحراف معیار	۸/۱۳	مینیمم	۰

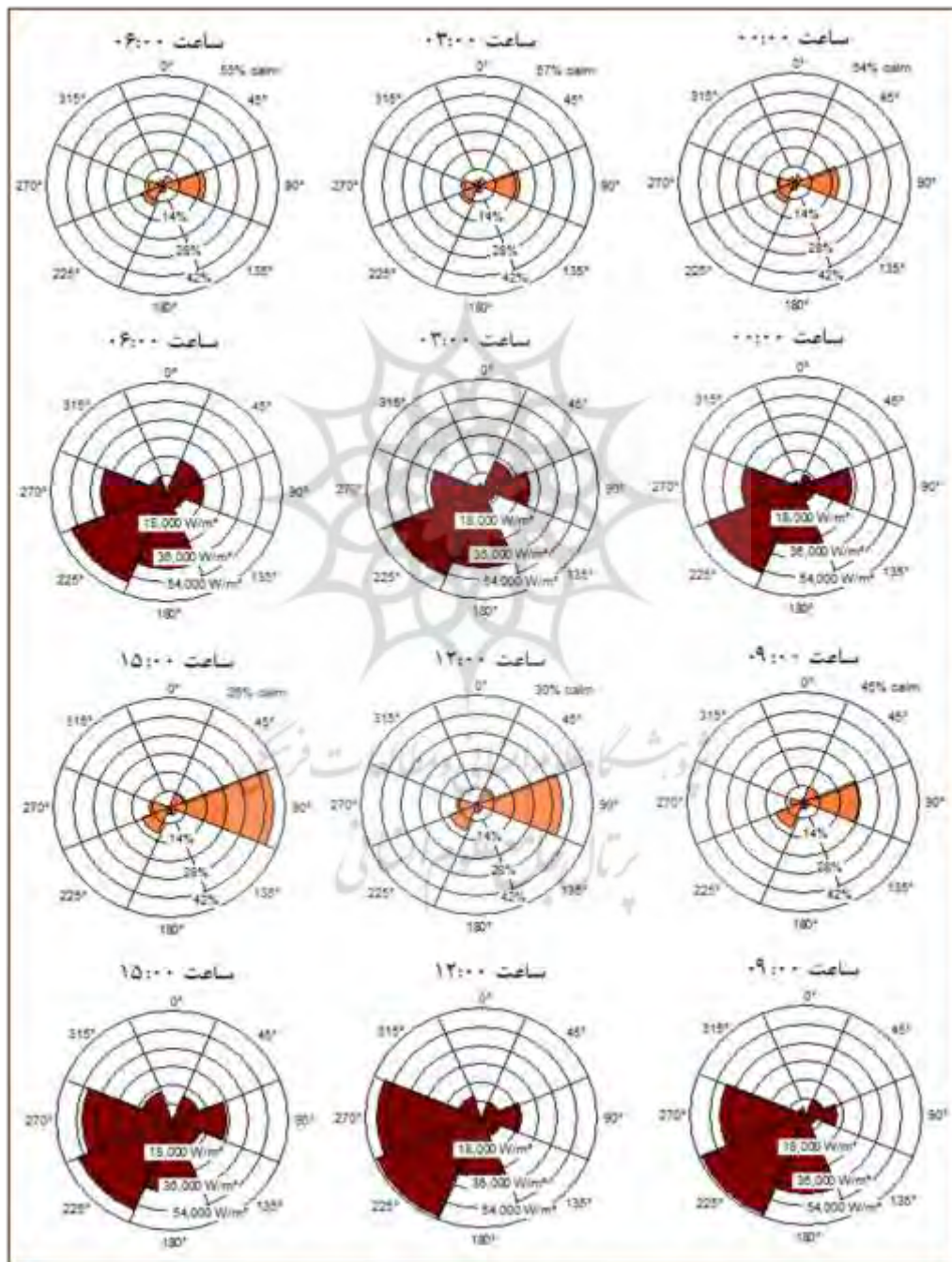
در شکل (۲) گلبادهای مربوط به سرعت و انرژی باد در ایستگاه مطالعه‌شده به تفکیک ساعتی با چرخه‌های سه‌ساعته برای ساعات ۰۰، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱ آورده شده است. برای ایجاد وصفی بهتر از حالات موجود در شبانه‌روز ساعات ۰۰، ۰۳ و ۰۶ به‌منزله ساعات شب، ساعات ۰۶ و ۰۹ به‌منزله ساعات صبح و ساعات ۱۲، ۱۵ و ۱۸ به‌منزله ساعات بعدازظهر تحلیل خواهند شد.

بررسی گلبادهای سرعت برای مقطع زمانی شب در ایستگاه اردبیل نشان داد در هر سه ساعت بررسی‌شده نمود کلی گلبادهای یکسان و بیشترین فراوانی مربوط به سرعت باد در جهت شرقی با فراوانی ۱۴ درصد و بیشتر و میزان باد آرام به ترتیب ۴۷٪ برای ساعت ۲۱، ۵۴٪ برای ساعت ۰۰ و ۵۷٪ برای ساعت ۰۳ بوده است. بیشینه میزان انرژی دست‌یافتنی برای هر سه ساعت از وزش‌های با جهت جنوب غربی و جنوبی خواهد بود. این انرژی برای ساعات ۰۰ و ۰۳ برای جهت جنوب غربی حدود $45000 W/m^2$ و برای جهت جنوبی حدود $36000 W/m^2$ بوده است؛ اما در ساعت ۲۱ با اینکه جهت تغییری نکرده، میزان بیشینه انرژی که از جهت جنوب غربی دست‌یافتنی است، به حدود $36000 W/m^2$ کاهش یافته است.

در مقطع زمانی صبح گلباد سرعت بیان‌کننده این است که در ساعت ۰۶، بیشترین فراوانی مربوط به جهت شرقی بوده و درصد وزش‌های آرام در این ساعت ۵۵٪ است. بیشینه انرژی حدود $45000 W/m^2$ برای جهت جنوب غربی و $36000 W/m^2$ برای جهت جنوبی است. در ساعت ۰۹ نسبت به چهار زمان پیشین، تغییراتی در هر دو گلباد سرعت و انرژی دیده می‌شود. فراوانی باد غالب همچنان در جهت شرقی است؛ اما از نظر درصد به ۲۱٪ افزایش و درصد وزش‌های آرام به ۴۵٪ کاهش یافته است؛ همچنین میزان انرژی از جهت جنوب غربی به $54000 W/m^2$ و در

جهت غربی و جنوبی به 36000 W/m^2 رسیده است.

در ادامه، بررسی حاصل از گلبادهای ساعتی ظهر و بعدازظهر نشان داد کمترین درصدهای وزش‌های آرام شبانه‌روز در این ساعات به وقوع پیوسته است که به ترتیب برای ساعت ۱۲، ۳۰٪، ساعت ۱۵، ۲۶٪ و ساعت ۱۸، ۳۲٪ را به خود اختصاص داده‌اند. در هر سه ساعت، باد وزشی شرقی داشته است که در ساعت ۱۵ وزش‌های رخ داده، بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند و این میزان ۳۷ درصد بوده است؛ پس از آن در ساعت ۱۸، ۳۴٪ و در ساعت ۱۲، ۳۰٪ وزش‌ها در این جهت بوده‌اند.



شکل ۲- گلباد سرعت و انرژی به تفکیک ساعت طی دوره ۱۳۸۷-۱۳۶۹ در ایستگاه اردبیل

بیشینه انرژی دست‌یافتنی در هر سه ساعت از جهت‌های جنوب غربی و غربی بوده است که در ساعت ۱۲ این میزان برای جهت جنوب غربی، حدود 54000 W/m^2 و در جهت غربی، حدود 48000 W/m^2 بوده است. در ساعت ۱۵ در جهت جنوب غربی، 46000 W/m^2 و در جهت غربی، 46000 W/m^2 و در ساعت ۱۸ در هر دو جهت گفته‌شده، 36000 W/m^2 بوده است.

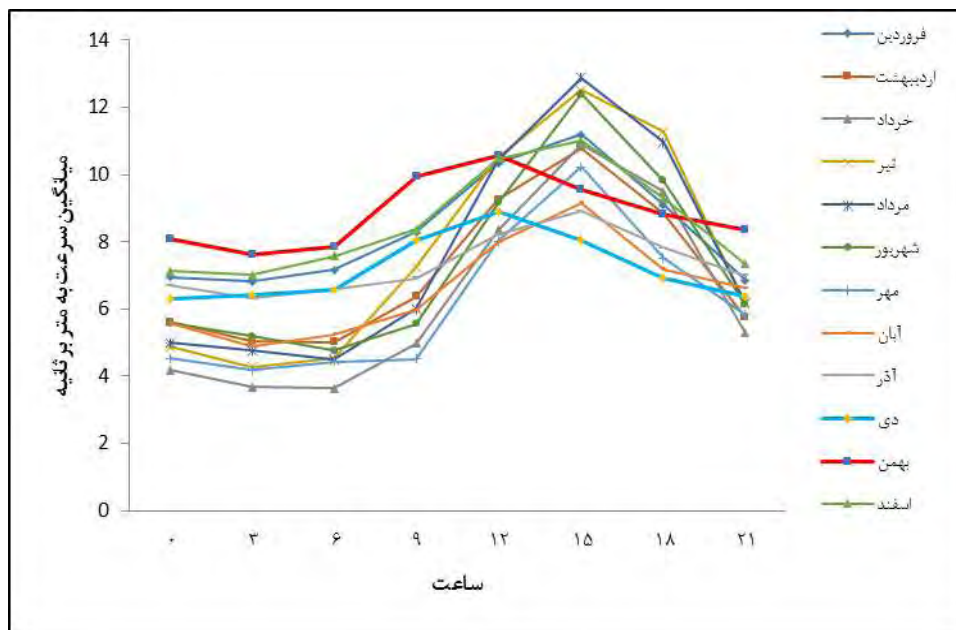
بررسی و تحلیل حاصل از چگونگی وزش در جهات مختلف و انرژی دست‌یافتنی از هر جهت در جدول (۲) به صورت سالیانه ارائه شده است.

جدول-۲: ویژگی‌های سالیانه سرعت و انرژی برای جهت‌های اصلی طی دوره ۱۳۸۷-۱۳۶۹

جهت	میانگین (سرعت)	کمینه (سرعت)	بیشینه (سرعت)	انحراف معیار	فراوانی وزش باد به درصد	میزان انرژی باد (W/m^2)	گنجایش ظرفیت انرژی	درصد باد آرام
شمال	۰/۲۴	۰	۲۵	۱/۴	۱/۴۹	۱۳۴	۱۱۷۳	۹۷/۵
شمال شرق	۱۰/۳۹	۲	۳۹	۵	۵/۹۷	۱۲۳۷۱	۱۰۸۳۶۷	۹/۸
شرق	۱۳/۲۷	۲	۳۹	۵/۳	۲۳/۶۸	۲۱۵۱۶	۱۸۸۴۷۹	۴/۶
جنوب شرق	۹/۴۳	۰	۳۹	۴/۹	۲/۹۲	۱۰۷۳۳	۹۴۰۲۵	۱۴/۳
جنوب	۱۳/۳۲	۰	۵۴	۷/۹	۳/۱۹	۳۴۶۳۳	۳۰۳۳۸۹	۱۰/۹
جنوب غرب	۱۶/۴۱	۲	۵۸	۷/۵	۱۰/۰۴	۴۷۳۸۹	۴۱۵۱۲۳	۳/۷
غرب	۱۴/۲۷	۰	۴۹	۷/۵	۸/۶	۳۴۸۸۷	۳۰۵۶۰۸	۷/۳
شمال غرب	۷/۹۴	۲	۴۹	۴/۳	۲/۶۳	۷۰۵۸	۶۱۸۲۹	۱۹/۹
کل	۷/۴۰	۰	۵۸	۸/۲	۱۶۸۷۲۱	۱۴۷۷۹۹۳	۲۰/۹	

چنانچه دیده می‌شود بیشترین فراوانی وزشی در جهت شرق و کمترین فراوانی در جهت شمال به وقوع پیوسته است؛ این در حالی است که بیشترین انرژی دست‌یافتنی به ترتیب از جهت جنوب غرب، غرب و جنوب بوده است. گنجایش ظرفیت انرژی نیز در همین جهات بیشینه خود را داشته است؛ با این تفاوت که درباره میزان انرژی تفاوت در نخستین جهت که بیشترین وزش را داشته و دو جهت نامبرده دیگر، کمتر از 10000 W/m^2 بوده است؛ در حالی که درباره گنجایش ظرفیت انرژی، این میزان به حدود ۱۰ برابر تفاوت پیشین رسیده است. کمترین درصد وزش‌های آرام مربوط به جهت جنوب غرب و بیشترین درصد وزش‌های آرام مربوط به جهت شمال بوده است.

در شکل (۳) میانگین سرعت باد ساعتی برای ماه‌های مختلف نشان داده شده است. بیشترین سرعت باد در مقاطع زمانی بررسی شده مربوط به ساعات ظهر و بعدازظهر و بیشینه آن در ساعت ۱۵ در فصل تابستان رخ داده است.

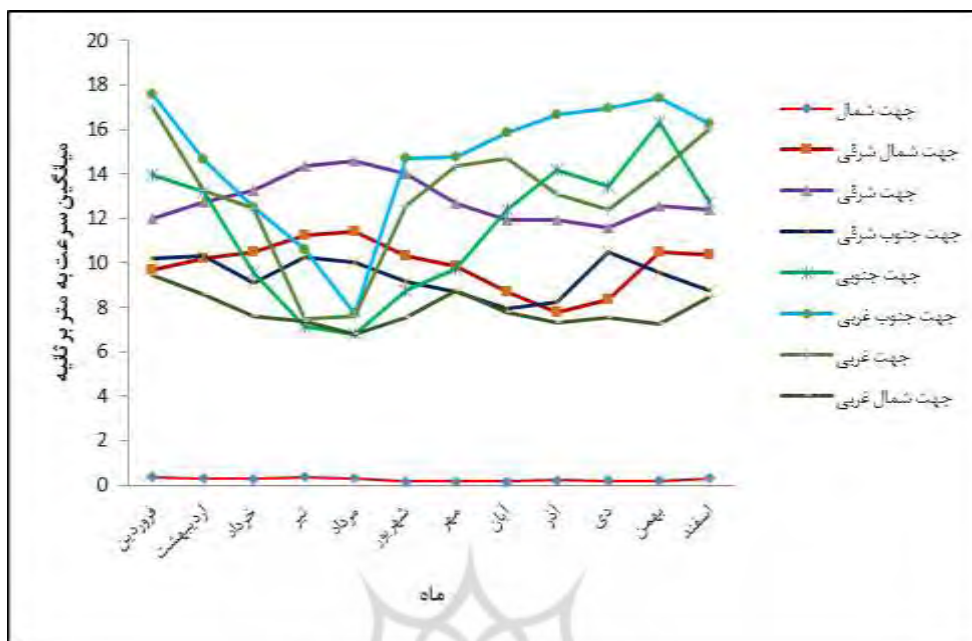


شکل - ۳: نمودار مربوط به سرعت باد در ساعات مختلف هر ماه

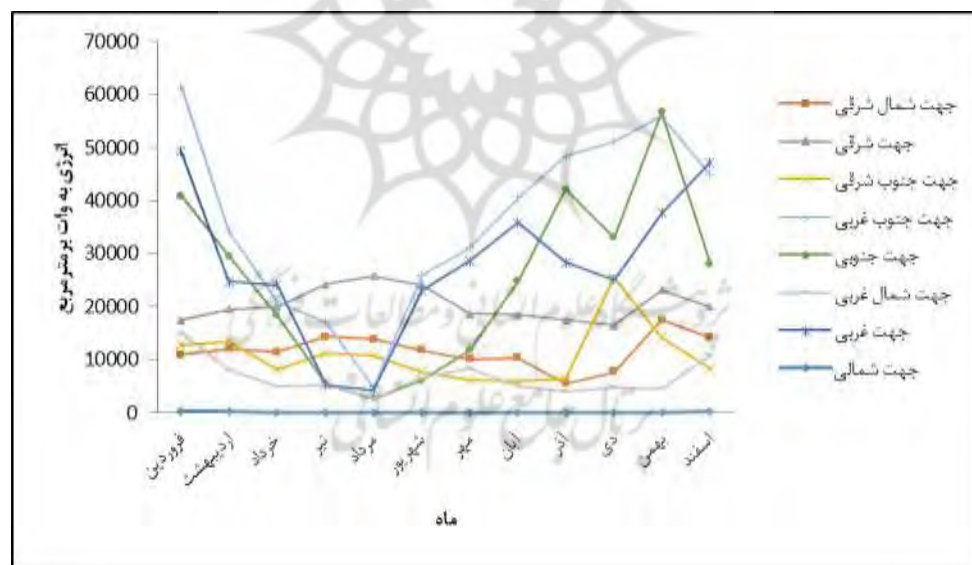
بیشینه سرعت‌ها در ساعات شب و صبح مربوط به فصل زمستان است؛ این در حالی است که بیشینه سرعت بعدازظهر مربوط به فصل تابستان است. نکته جالب توجه در این نمودارها این است که در فصول بهار و پاییز در تمام ساعات شبانه‌روز کاهش در سرعت باد دیده می‌شود؛ به گونه‌ای که در نمودارها حالت نوسانی حاکم شده است. با توجه به اینکه کمینه سرعت برای دستیابی به انرژی از باد ۴ متر بر ثانیه است، فقط در ساعت ۰۳ و ۰۶ در ماه خرداد سرعت باد از این آستانه کمتر و میانگین سرعت باد در سایر ساعات شبانه‌روز در تمام ماه‌ها بیش از این میزان بوده است.

همچنین نتایج حاصل از بررسی میانگین سرعت باد در هر ماه به تفکیک ساعات مختلف بیان‌کننده این است که جز در ماه دی و بهمن که وقوع بیشینه سرعت در ساعت ۱۲ بوده است، در سایر ماه‌ها این بیشینه در ساعت ۱۵ رخ داده است. در شکل (۴) نمودار مربوط به میانگین سرعت باد در جهت‌های مختلف برای تمام ماه‌ها آورده شده است؛ چنانچه در نمودار دیده می‌شود، کمترین میانگین‌ها در تمام ماه‌ها در این ایستگاه از وزش‌های با جهت شمالی حاصل شده است؛ بیشترین نوسان در نمودارها در جهت‌های جنوبی، جنوب غربی و غربی دیده می‌شود؛ به طوری که در این سه جهت در فصل تابستان کمترین سرعت‌ها دیده می‌شود؛ بیشینه میانگین سرعت باد در تمام ماه‌های سال جز تیر، مرداد و شهریور، از جهت جنوب غربی رخ داده است؛ این در صورتی است که بیشینه میانگین سرعت در این ماه (تیر، مرداد و شهریور) از جهت شرقی بوده است. شکل (۵) نوسانات انرژی را در ماه‌های مختلف برای هر جهت نمایش می‌دهد. چنانچه دیده می‌شود در وزش‌های با جهت شمالی، تولید انرژی کمترین میزان را دارد. بیشینه میزان انرژی مربوط به ماه فروردین در جهت جنوب غرب است. چنانچه نمایان است این جهت نسبت به سایر جهات بیشترین انرژی را در تمام ماه‌ها جز خرداد تا شهریور و اسفند داشته است. نوسانات انرژی در جهت‌های شمال شرقی، شمال غربی و جنوب شرقی بسیار مشابه و در سطح کمتری نسبت به دیگر

جهت‌ها بوده است؛ در واقع بیشترین اعتماد در تولید انرژی به جهت‌های جنوب غربی، غربی و جنوبی است؛ زیرا در این جهت‌ها در تمام ماه‌ها میزان انرژی بسیار است.



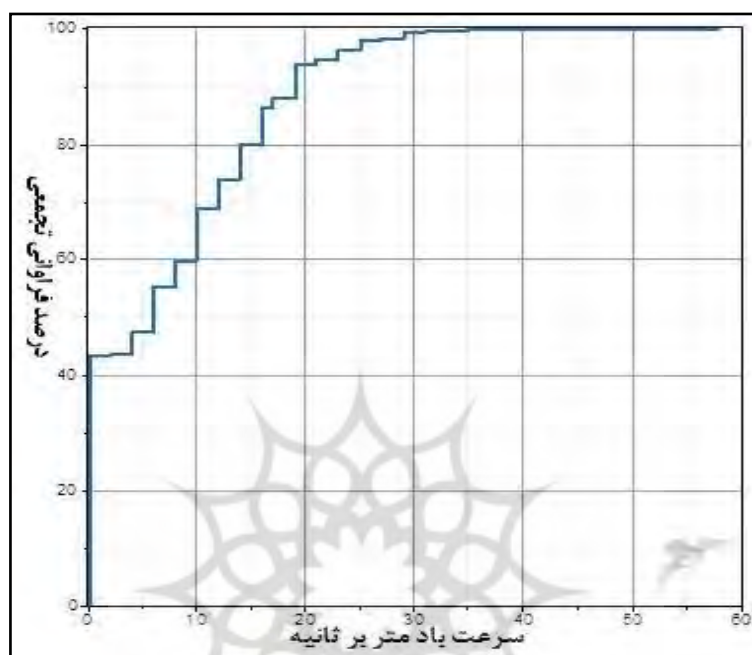
شکل - ۴: نمودار مربوط به سرعت باد در جهت‌های مختلف



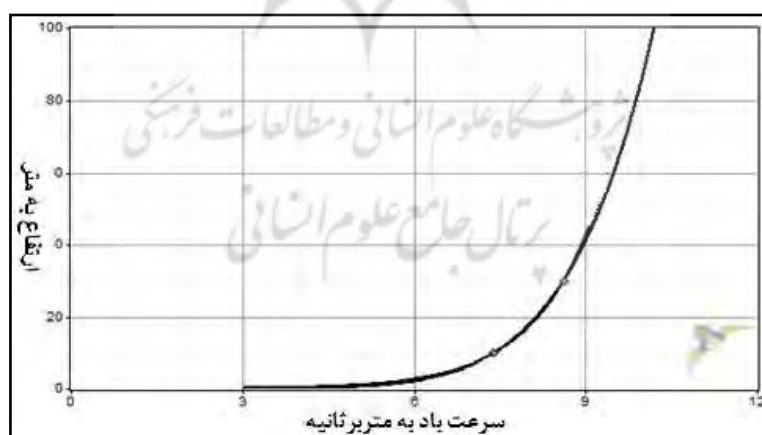
شکل - ۵: نمودار مربوط به انرژی باد در جهت‌های مختلف

شکل (۶) درصد تجمعی سرعت باد را به صورت سالانه طی دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۸ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل هم پیداست، در مجموع ۴۳ درصد از سرعت باد منطقه بین $0 - 4$ m/s، یعنی بادی آرام بوده است. بیشترین سرعت باد در مجموع در بازه $10 - 20$ m/s رخ داده است؛ به طوری که نزدیک به ۲۵ درصد باد منطقه در این بازه رخ داده است. کمتر از ۲ درصد باد منطقه سرعتی بیش از 30 m/s داشته است.

شکل (۷) نیمرخ سرعت باد متناسب با ارتفاع را نشان می‌دهد. سرعت باد با افزایش ارتفاع زیاد می‌شود. در ارتفاعات کم‌تر، ناهمواری‌ها بر سرعت باد تأثیر فاحشی دارد؛ اما با افزایش ارتفاع این تأثیر بسیار ناچیز است؛ تا جایی که در ارتفاعات زیاد به دلیل از بین رفتن آثار اصطکاک، ناهمواری‌ها بر سرعت باد اثری ندارند؛ بنابراین سنجش واقعی باد در سطح زمین به دلیل تأثیر عوامل محلی با مشکلاتی مواجه است و از طرفی سرعت باد با افزایش ارتفاع از سطح زمین زیاد می‌شود و جهت آن نیز تغییر می‌کند.



شکل - ۶: نمودار تابع توزیع تجمعی سالیانه (تهیه و ترسیم: نگارندگان)



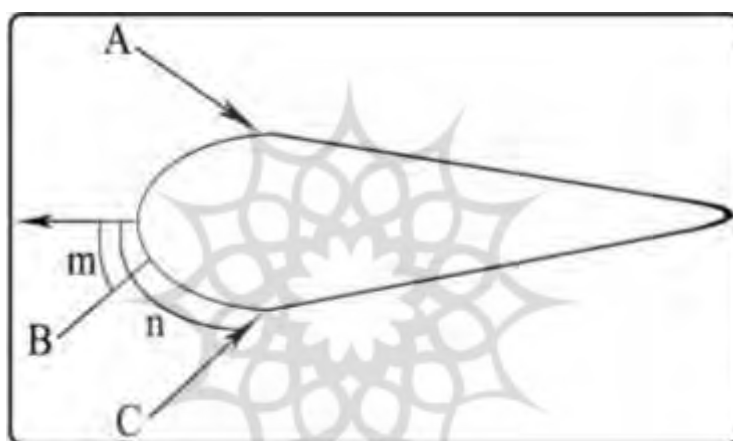
شکل - ۷: پروفیل سرعت باد متناسب با ارتفاع (تهیه و ترسیم: نگارندگان)

کلاس‌بندی توربین‌ها

اختلاف فشار در لایه‌های مختلف اتمسفر روی تیغه‌ها نیروی کشنده ایجاد می‌کند. در اثر این نیرو تیغه‌های توربین به چرخش درمی‌آیند. تغییر زاویه تیغه توربین در راستای وزش باد، این نیرو را افزایش یا کاهش می‌دهد؛

به طوری که اگر این زاویه از حد مشخصی بیشتر شود که نسبت به سرعت باد تعیین می‌شود، نیرو از بین می‌رود و در نتیجه توربین می‌ایستد.

شکل (۸) چگونگی نحوه اثر باد بر تیغه‌های توربین نشان می‌دهد. در این شکل، n زاویه حمله ایستا یا زاویه بین تیغه پره توربین و وزش باد طبیعی (C) و B راستای وزش نسبی باد است. A راستای وزش باد ناشی از حرکت توربین و m زاویه حمله طبیعی است؛ بنابراین راستای سرعت نسبی، برآیند راستای وزش باد طبیعی و بادی است که توربین در اثر حرکت خود به وجود می‌آورد. زاویه حمله باد در حالت ایستادن و چرخش توربین متفاوت است. در صورتی که میزان باد طبیعی از میزان تولید باد حاصل از توربین بیشتر شود، m یا زاویه حمله به سمت زاویه راستای وزش باد طبیعی (C) تمایل می‌یابد. در صورتی که A بر C غلبه کند، راستای وزش حمله واقعی باد یا m به سمت A تمایل می‌یابد؛ بنابراین میزان چرخش و در نتیجه تولید انرژی به میزان اختلاف تولید باد حاصل از توربین و وزش باد طبیعی بستگی دارد.



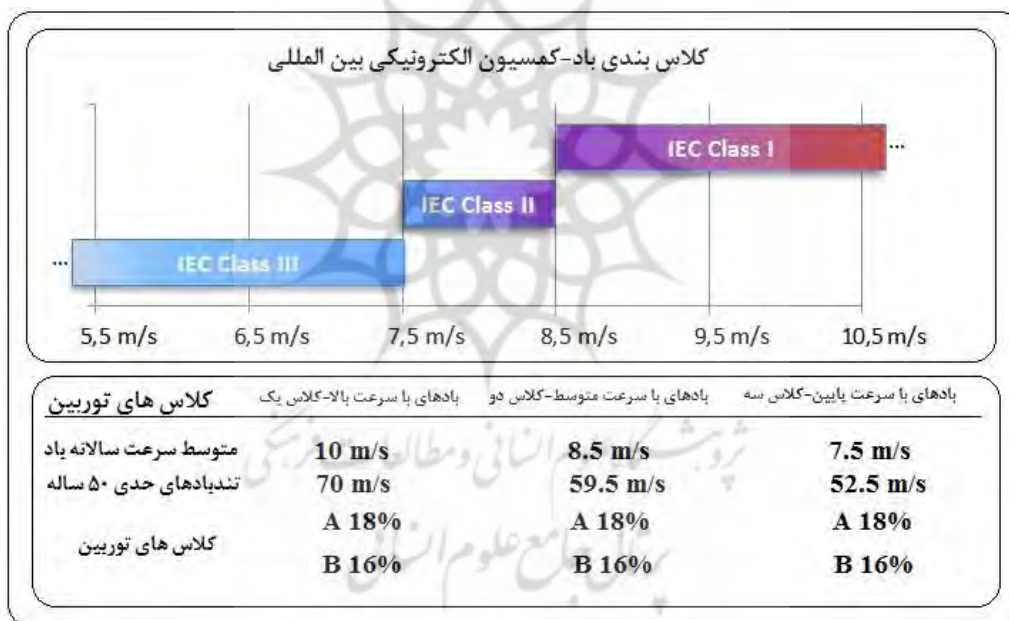
شکل - ۸: چگونگی اثر باد بر پره‌های توربین (تهیه و ترسیم: نگارندگان)

مکان‌گزینی توربین‌های بادی مناسب برای بهره‌برداری از پتانسیل انرژی باد همواره با محاسبات پیچیده‌ای همراه بوده است؛ به طوری که در مطالعات پیشین در زمینه توربین‌های بادی متناسب با سرعت باد منطقه، قطر توربین در اندازه‌های مختلف بررسی می‌شد و سپس درباره توان انرژی آن تصمیم‌گیری می‌کردند. به‌تازگی کمیسیون الکترونیکی بین‌المللی (IEC)^۱ سه طبقه استاندارد را برای کلاس‌بندی توربین‌های بادی ارائه کرده است. در این کلاس‌بندی متناسب با سرعت باد، نوع توربین را برای استقرار و نصب آن پیشنهاد می‌دهد؛ بدین صورت که سرعت بین $5/5 - 7/5$ m/s در کلاس ۳، سرعت بین $7/5 - 8/5$ m/s برای کلاس ۲ و در نهایت $9/5$ m/s و بیشتر برای کلاس ۱ ارائه شده است. این سازمان کلاس‌بندی را بر مبنای سرعت متوسط باد سالیانه تعریف کرد. در این کلاس‌بندی متناسب با سرعت‌های خاص، نوع توربین متناسب با آن سرعت را پیشنهاد می‌دهد؛ بنابراین با در دست داشتن این نوع کلاس‌بندی و همچنین میانگین سالیانه سرعت باد در منطقه مدنظر، توربین متناسب برای بهره‌برداری انرژی نصب می‌شود.

¹ International Electrotechnical Commission

میانگین سرعت سالیانه باد اردبیل در طول دوره مطالعه شده $7/4 \text{ m/s}$ بوده است؛ بنابراین در کلاس ۳ قرار دارد. پس از مشخص شدن کلاس توربین در مرحله بعد، نوع توربین مشخص شده است؛ بدین منظور نرم‌افزار WINDOGRAPHER به کار رفته است؛ بنابراین توربینی که گنجایش و میانگین قدرت توان انرژی آن بیشتر بود، به‌منزله توربین مناسب انتخاب شد.

در شکل (۹) کلاس‌بندی توربین‌های بادی متناسب با سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به اینکه میانگین سرعت سالیانه در اردبیل طی دوره مطالعه شده $7/4 \text{ m/s}$ بوده است و بر مبنای شکل (۴) این میانگین سرعت در کلاس ۳ قرار دارد، با دستیابی به اطلاعات انواع توربین موجود تولیدشده در جهان که برای این نوع کلاس و محیط خشکی (توربین‌های تولیدی برای محیط دریا و خشکی در بیشتر کارخانه‌های تولیدی متفاوت‌اند) تولید می‌شوند، برای هر یک از توربین‌های بالا شاخص‌های مدنظر به‌منظور قراردادی توربین در منطقه و بازدهی آن با توجه به ویژگی‌های باد در منطقه استخراج شده است. ملاک انتخاب بهترین توربین این است که توربین مدنظر در مرحله اول ضریب فاکتور زیاد و در مرحله بعد میانگین انرژی زیادی داشته باشد؛ بر این اساس بهترین نوع توربین برای منطقه مطالعه‌شده، توربین WinWinD WWD-3-120 و Vestas V112-3.0MW شناخته شد.



شکل - ۹: کلاس‌بندی توربین متناسب با سرعت باد (منبع: کمیسیون الکترونیکی بین‌المللی)

در جدول (۳) و (۴)، ضریب فاکتور و میانگین انرژی توربین برای ماه‌های مختلف در توربین‌های منتخب آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین درصد فاکتور مربوط به ضریب گنجایش انرژی و میانگین انرژی تولیدی در هر دو نوع توربین برگزیده برای ماه‌های اردیبهشت و اسفند است.

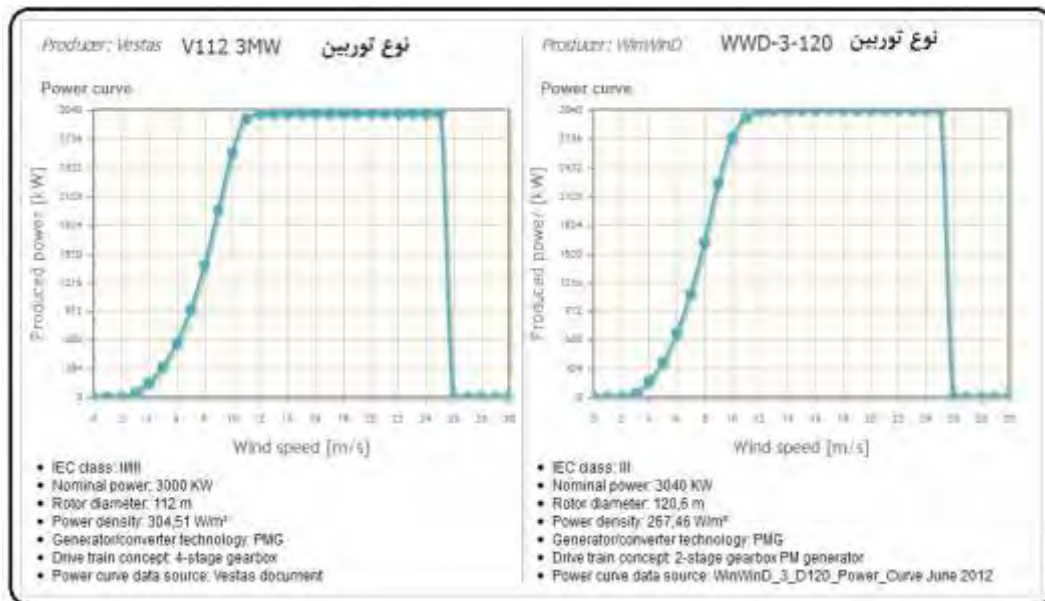
جدول - ۳: ضریب فاکتور و میانگین انرژی توربین WESTAES V112 - 3.0MW برای ماه‌های مختلف در ایستگاه اردبیل

ماه	میانگین انرژی خروجی (KWh/yr)	ضریب فاکتور گنجایش (%)
فروردین	۳۱۰۳۶۰	۱۴/۴
اردیبهشت	۳۳۵۳۵۰	۱۵/۰
خرداد	۲۹۶۶۶۸	۱۳/۷
تیر	۲۹۳۹۲۵	۱۳/۲
مرداد	۲۶۷۸۸۵	۱۲/۰
شهریور	۲۴۸۸۱۲	۱۱/۵
مهر	۲۸۳۶۶۹	۱۲/۷
آبان	۲۹۴۳۰۸	۱۳/۶
آذر	۲۹۹۸۲۹	۱۳/۴
دی	۲۹۵۳۹۲	۱۳/۲
بهمن	۲۶۶۳۹۳	۱۳/۲
اسفند	۳۳۴۵۰۱	۱۵/۰
جمع کل	۳۵۲۷۰۵۲	۱۳/۴

جدول - ۴: ضریب فاکتور و میانگین انرژی توربین WIWIND WWD- 3 120 برای ماه‌های مختلف در ایستگاه اردبیل

ماه	میانگین انرژی خروجی (KWh/yr)	ضریب فاکتور گنجایش (%)
فروردین	۳۱۰۰۷۲	۱۴/۴
اردیبهشت	۳۳۴۹۷۳	۱۵/۰
خرداد	۲۹۶۲۱۷	۱۳/۷
تیر	۲۹۳۴۴۸	۱۳/۱
مرداد	۲۶۷۴۳۲	۱۲/۰
شهریور	۲۴۸۴۲۱	۱۱/۵
مهر	۲۸۳۳۳۷	۱۲/۷
آبان	۲۹۴۱۱۳	۱۳/۶
آذر	۳۰۰۵۷۵	۱۳/۵
دی	۲۹۶۶۴۸	۱۳/۳
بهمن	۲۶۶۴۲۱	۱۳/۲
اسفند	۳۳۴۷۷۸	۱۵/۰
جمع کل	۳۵۲۶۳۲۸	۱۳/۴

نمودار مربوط به تولید انرژی توربین‌ها در شکل (۱۰) آورده شده است. چنانچه دیده می‌شود برای شروع تولید انرژی به دست کم سرعت ۴ متربرثانیه نیاز است و چنانچه میزان سرعت به ۲۵ متربرثانیه برسد، تولید انرژی متوقف می‌شود.



شکل - ۱۰: نمودار تولید انرژی برای توربین‌های برگزیده در منطقه مطالعه شده

نتیجه‌گیری

به‌منظور بهره‌برداری از پتانسیل‌های موجود انرژی و روند تحولات حامل‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور، شناخت دقیق محدودیت‌ها، موانع و امکانات موجود برای استفاده از منابع انرژی در کشور ضروری است. نیروی برق بادی، انرژی ذخیره‌شده را افزایش می‌دهد و ارزش اقتصادی زیاد این انرژی به‌ویژه در زمان اوج تقاضای برق آشکار می‌شود. درآمد حاصل از این پتانسیل، هزینه و ضایعات ذخیره‌سازی را کاهش می‌دهد.

کشور ایران از لحاظ منابع مختلف انرژی، یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌شود؛ زیرا از یک‌سو منابع گسترده سوخت‌های فسیلی و تجدیدنپذیر نظیر نفت و گاز و از سوی دیگر پتانسیل فراوانی برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله باد دارد. در این مطالعه به‌منظور پتانسیل‌سنجی باد در ایستگاه اردبیل از داده‌های ساعتی سرعت و جهت باد، دما، رطوبت و فشار استفاده شد. به‌منظور انجام تجزیه و تحلیل و ترسیم همه‌نمودارها، نرم‌افزار WINDOGRAPHER به کار رفت. میانگین سرعت سالیانه باد در ایستگاه اردبیل طی دوره مطالعه‌شده (۱۳۸۷ - ۱۳۶۹)، $7/4 \text{ m/s}$ حاصل شد. براساس استاندارد کمیسیون الکترونیکی بین‌المللی (IEC) برای کلاس‌بندی توربین‌های بادی و از آنجایی که سرعت باد در ایستگاه اردبیل $7/4 \text{ m/s}$ است، توربین‌های کلاس سه برای این ایستگاه پیشنهاد می‌شود.

بیشترین سرعت باد در مقاطع زمانی بررسی‌شده مربوط به ساعات ظهر و بعدازظهر است و بیشینه آن در ساعت ۱۵ در فصل تابستان رخ داده است. بیشینه سرعت‌ها در ساعات شب و صبح مربوط به فصل زمستان است؛ این در حالی است که بیشینه سرعت بعدازظهر مربوط به فصل تابستان است.

بیشترین نوسان سرعت باد در جهت‌های جنوبی، جنوب غربی و غربی دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که در این سه جهت در فصل تابستان، کمترین سرعت‌ها دیده می‌شود. بیشینه میانگین سرعت باد در تمام ماه‌های سال جز تیر،

مرداد و شهریور از جهت جنوب غربی رخ داده است.

تحلیل طبقات مختلف رخداد سرعت باد در منطقه نشان داد تقریباً در ۶۷٪ مواقع سرعت باد بیش از 4 m/s بوده است که از این درصد نزدیک به ۲۵٪ مربوط به وقوع سرعت در بازه $10-20 \text{ m/s}$ است. توزیع میانگین سرعت در تمام ماه‌ها به صورت چوله به چپ بوده است؛ به این معنا که تعداد رخداد سرعت‌های بزرگ‌تر از میانگین بیشتر از سرعت‌های کوچک‌تر از میانگین بوده است. در ماه فروردین و آذر بیشترین دامنه سرعت بین $0-58 \text{ m/s}$ و در ماه مرداد کمترین دامنه بین صفر تا حدود 33 m/s بوده است. به طور کلی در سال‌های مختلف متوسط سرعت باد تغییرات زیادی می‌یابد؛ به طوری که در بیشتر نواحی جغرافیایی، اختلافات چشمگیر فصلی در سرعت متوسط باد حاصل می‌شود. معمولاً بادهای زمستانی سرعت متوسط بیشتری دارند؛ ولی استثناً هم وجود دارد. در استان اردبیل به علت فعال شدن بادهای غربی و همچنین توپوگرافی، بیشترین سرعت باد در فصل زمستان دیده می‌شود. به سبب تغییرات فصلی، ممکن است انرژی بالقوه باد در فصول مختلف برای تولید قدرت به طور چشمگیری بیش از سرعت متوسط سالیانه باد باشد. از آنجایی که سرعت باد بسته به شرایط اتمسفری و ارتفاع طی سال‌های مختلف، هم به لحاظ مکانی و هم به لحاظ زمانی متفاوت است، در محاسبه میان بازدهی انرژی توربین‌های بادی در یک منطقه علاوه بر سرعت متوسط باد، باید توزیع تناوبی (سالیانه، ماهیانه، فصلی و روزانه) سرعت باد را مدنظر قرار داد. برای استقرار و نصب توربین در منطقه نیاز به بررسی ایستگاه‌های بیشتری است که از پراکندگی یکنواختی برخوردار باشند.

منابع

- ۱- جهانگیری، زهره، رحیم‌زاده، فاطمه و کمالی، غلامعلی، (۱۳۸۴)، محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع ویبال دو پارامتره، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۶، مشهد، ۱۳۰۸۳-۱۳۰۶۴.
- ۲- رزمجو، علی و شیرمحمدی، رضا، (۱۳۹۵)، ارزیابی آماری داده‌های سرعت و پتانسیل انرژی باد جهت نصب توربین‌های بادی در سواحل خلیج فارس: یک مطالعه موردی، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۹، شماره ۱، تهران، ۱۶۷-۱۷۹.
- ۳- سادکین، محمد، (۱۳۸۰)، تحلیل اقتصادی و اجتماعی به کارگیری انرژی خورشیدی در تأمین آبگرم مصرفی، سومین همایش ملی انرژی، تهران، ۶۱۷ - ۶۲۴.
- ۴- صلاحی، برومند، (۱۳۸۳)، پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبال در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۲، مشهد، ۱۲۳۲۷-۱۲۳۱۱.
- ۵- عبدلی، حبیب، ساری صراف، بهروز و حسینی شمعچی، عباس، (۱۳۸۸)، امکان‌سنجی پتانسیل انرژی باد و کاربرد آن در طرح‌های توسعه صنعتی (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)، فضای جغرافیایی، شماره

۲۸، مهر، ۵۷ - ۷۴.

۶- عبدی، حمدی، حسین‌زاده‌خنکداری، تقی، ذاکری‌فر، رزم‌آرا، عباسیه‌کهن، سید حسین و هاشمی پنبه‌چوله، سید ابراهیم، (۱۳۹۰)، امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی مراوه‌تپه، نشریه انرژی ایران، شماره ۱، تهران، ۱ - ۲۲.

۷- کاویانی، محمدرضا، (۱۳۷۴)، توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۳۶، مشهد، ۷۰۲۶-۷۰۱۰.

۸- محمدی، حسین، رستمی جلیلیان، شیما، تقوی، فرحناز و شمسی‌پور، علی‌اکبر، (۱۳۹۱)، پتانسیل‌سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره ۲ (پیاپی ۸۰)، تهران، ۱۹-۳۲.

9- Dabbaghiyan, A., Fazelpour, F., DehghanAbnavi, M., Rosen, M.A., (2016). **Evaluation of wind energy potential in province of Bushehr, Iran**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, No 55, UK (United Kingdom), Pp 455- 466.

10- Fawzi, A, Jowder, L., (2009). **Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain**, Applied Energy, No 86, Sweden, Pp 538- 545.

11- Fazelpour, F., Soltani, N., Soltani, S., Rosen, M.A., (2015). **Assessment of wind energy potential and economics in the north-western Iranian cities of Tabriz and Ardebil**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, No 45, UK (United Kingdom), Pp 87- 99.

12- Gokc-ek, M, Bayulken, A, Bekdemir, S., (2007). **Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey**, Renewable Energy, Cyprus, Pp 1739-1752.

13- Keyhani, A., M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, R., Abbaszadeh, (2010). **An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran**, Energy, No 35, Denmark, Pp 188- 201.

14- Manwell, J.F, McGwan, J.G., and Rogers, A.L., (2002). **Wind Energy Explained**, John Wiley & Sons Ltd, United States of America.

15- Mirmousavi, S. H., (2015). **Assessment of Wind Energy Potential in East Azarbaijan Province of Iran (Case Study: SAHAND Station)**, Global NEST Journal, 17 (2), Greece, Pp 418- 425.

16- Mostafaeipoura, A., A., Sedaghatb, A.A., Dehghan-Niric, V., Kalantarc, (2011). **Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, No 152, UK (United Kingdom), Pp 545- 2556.

17- Nedaei, M., (2012). **Wind Energy Potential Assessment in Chalus County in Iran**, International Journal of Climatological Of Renewable Energy Research, No 2 (2), UK (United Kingdom), Pp 338- 347.

18- Ramazan, Kose, (2004). **An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kutahya, Turkey**, Energy Conversion and Management, No 45, Jordan, Pp 1631- 1641.

19- Tekikic, M, Ordogomes, G., (2004). **An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kutahya, Turkey**, Energy Conversion and Management, No 45, Jordan, Pp 1631- 1641.

20- Ucar, A., Figen, Balo., (2009). **Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey**, Applied Energy, No 86, Sweden, Pp 1864- 1872.