

برآورد انرژی باد در ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان

فاطمه رحیم‌زاده، مربی پژوهشکده هواشناسی*

مژده پدرام، مربی پژوهشکده هواشناسی

عبدال... صداقت کردار، دانشیار پژوهشکده هواشناسی

غلامعلی کمالی، دانشیار پژوهشکده هواشناسی

چکیده

در این مطالعه، میانگین ماهانه سرعت باد و انرژی آن براساس داده‌های ساعتی یازده ایستگاه همدیدی (سینوپتیک) در دوره اقلیمی ۱۹۹۲-۲۰۰۵ محاسبه و تحلیل شده است. میانگین انرژی باد با استفاده از برآزش نوع پیوندی (هیبرید) توزیع‌های ویبال و معکوس نرمال به داده‌های ساعتی سرعت باد و هم چنین روش مستقیم، برآورد شده است. نتایج نشان داد که سرعت باد در طول ماه‌های سرد سال (نوامبر، دسامبر و ژانویه) نسبت به سایر ماه‌ها کمتر است. با شروع فصل بهار (آوریل)، سرعت باد در منطقه کم کم افزایش می‌یابد و روند کاهشی از ماه سپتامبر به بعد مجدداً شروع می‌شود. انرژی باد برآورد شده در سطح ایستگاه‌های استان اصفهان نشان داد که در دوره‌ای که سرعت باد کمتر است، چگالی توان باد در ایستگاه‌های استان به کمتر از ۶۰ وات بر متر مربع می‌رسد. چگالی توان باد با شروع ماه فوریه (حدود ماه بهمن) به سبب افزایش سرعت باد در منطقه زیاد می‌شود، به طوری که در ایستگاه‌های اردستان، نایین و کبوترآباد به بیش از ۶۰ وات بر متر مربع و در ایستگاه شهرضا به بیش از ۱۴۰ وات بر متر مربع می‌رسد. پس از سپری شدن ماه آوریل، به جز در ایستگاه اردستان، دوباره چگالی توان باد همگام با کاهش سرعت باد، کاهش می‌یابد. به طور کلی، در بین ایستگاه‌های منطقه، خورو بیابانک، داران و نطنز با سرعت و چگالی توان کم باد مواجه هستند. الگوی تغییرات چگالی ماهانه توان باد در ایستگاه اردستان نیز با سایر ایستگاه‌ها متفاوت است.

واژه‌های کلیدی: میانگین انرژی باد، سرعت باد، ویبال، معکوس نرمال، پیوندی، استان اصفهان.

مقدمه

در دهه‌های اخیر افزایش روزافزون جمعیت و تقاضای فزاینده انرژی و به موازات آن نگرانی از اتمام ذخایر سوخت‌های فسیلی، اهمیت توجه به انرژی‌های نو و تجدیدپذیر را بیشتر نمایان کرده است، به طوری که به کارگیری آن‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های کاهش و مهار بحران تقاضای جهانی انرژی مدنظر قرار گرفته است. در کارگاه آموزشی که در ژانویه سال ۲۰۰۸ میلادی در کشور آلمان برگزار شد، ابعاد جدید استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر تابش خورشیدی، باد، زمین گرمایی و غیره با توجه به مقوله تغییر اقلیم تشریح گردید (URL1). در نشست بیست و هشتم هیات بین الدول تغییر اقلیم^۱ (IPCC) بر لزوم پتانسیل سنجی در سطح ملی و منطقه‌ای این نوع انرژی‌ها نیز تاکید شده است (URL2).

کشور ایران به لحاظ گستره جغرافیایی و تنوع اقلیمی، برنامه‌های ویژه‌ای را در سطح ملی، طی برنامه‌های پنج ساله توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی در دست اقدام داشته و در بخش انرژی، بر استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر تأکید کرده است. در این راستا، تلاش برای شناسایی مناطق مستعد و پتانسیل‌سنجی انرژی بادی در سطح کشور به عنوان ضرورتی اجتناب ناپذیر در دستور کار سیاست‌گذاران و برنامه ریزان قرار گرفته است. مطالعات و تحقیقات

مختلفی درباره این مهم، از جمله توسعه این صنعت، مقرون به صرفه بودن آن، تأثیرات زیست - محیطی و اجتماعی و... به طور پراکنده و گاه موازی انجام شده است.

تعریف و انجام پروژه پتانسیل سنجی و تهیه اطلس باد کشور، ترویج و برنامه‌ریزی برای اجرای طرح‌ها و بهره برداری از انرژی بادی، نصب سایت‌های ثبت آمار لحظه ای باد برای امکان سنجی احداث مزارع بادی، مدیریت طراحی، ساخت و نصب توربین‌های بادی در منجیل، دیزآباد استان خراسان و بجنورد، همکاری با صندوق تسهیلات جهانی زیست - محیطی^۲ (GEF) برای شناخت موانع و توسعه نیروگاه‌های برق بادی، از جمله اقدامات معاونت انرژی‌های نو وزارت نیرو و هم چنین دفتر باد و امواج سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) بوده است (سازمان انرژی‌های نوین ایران، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۳).

از طرفی، پروژه اطلس باد کشور، با هدف برآورد پتانسیل انرژی باد در تعدادی از ایستگاه‌های هواشناسی کشور به انجام رسید (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۷۶). در این پروژه توزیع ویبال^۳ دو پارامتره به داده‌های سه ساعته سرعت باد ایستگاه‌های همدیدی (سینوپتیک^۴) برازش داده شد و میانگین مکعب سرعت باد از طریق گشتاور مرتبه سوم محاسبه گردید (رحیم زاده و جهانگیری، ۱۳۸۲ و جهانگیری و رحیم زاده، ۱۳۸۳). در پروژه دیگری که در سازمان هواشناسی کشور (۱۳۸۵) با

3. Weibull

4. Siap

1. Intergovernmental Panel on Climate Change

2. Global Environment Facility

در این رابطه P چگالی توان باد (وات بر متر مربع)، ρ چگالی هوا (گرم بر سانتیمتر مکعب) و v سرعت باد (متر بر ثانیه)، است، بنابراین متوسط انرژی باد نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

با توجه به دسترس بودن روش‌های مختلف موجود برای برآورد ρ و اختلاف ناچیز در مقادیر حاصل از آن‌ها، برآورد انرژی باد با متوسط توان سوم سرعت باد مرتبط بوده، به صورت رابطه (۳) قابل برآورد است.

$$W = \bar{v}^3 \quad (3)$$

از طریق برازش یک توزیع احتمال به داده‌های سرعت باد، می‌توان میانگین مکعب سرعت باد را از طریق رابطه (۴) که معرف برآورد گشتاور مرتبه سوم v است، به دست آورد، که در آن $g(v)$ تابع چگالی توزیع سرعت باد است

$$W_t = \int_0^{\infty} (v)^3 g(v) dv \quad (4)$$

برای تعیین $g(v)$ ، تلاش‌های متعددی، به ویژه در سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۷۰ صورت پذیرفته است. برای مثال، هنسی^۱ (۱۹۷۷) و همکاران و استوارت و اسن وانگر^۲ (۱۹۷۸) توزیع ویبال را به شکل دو پارامتره در برازش به سرعت باد به کار گرفته‌اند. باردسلی^۳ (۱۹۸۰) تابع معکوس نرمال را به عنوان جایگزینی برای برازش به

عنوان «تحلیل سینوپتیکی انرژی باد در کشور ایران» انجام شد، ابتدا با استفاده از تحلیل خوشه‌ای بر روی داده‌های سمت و سرعت باد پهنه‌های بادی مشخص شد و سپس انرژی باد از دیدگاه سینوپتیکی بررسی گردید.

در پژوهشگاه مواد و انرژی نیز تحقیقاتی در زمینه روش‌های محاسبه و تعیین پتانسیل انرژی باد با استفاده از داده‌های سمت و سرعت باد صورت گرفته (جمیل، ۱۳۸۰) است. در یکی از طرح‌های انجام شده در این پژوهشگاه، پس از نصب یک بادسنج معمولی سیاپ^۱ در یکی از نواحی نه چندان بادخیز کشور، نحوه محاسبه چگالی انرژی باد از طریق توابع احتمال ویبال به طور کامل مشخص شده است.

هدف اصلی این مقاله، شناسایی رژیم باد در ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان و برآورد انرژی باد در آن‌ها، با استفاده از روش‌های آماری است. از آنجا که ایستگاه‌های سنجش باد در نقاط مختلف این استان پراکنده شده‌اند، این فعالیت می‌تواند شناخت پایه‌ای و مقدماتی مناسبی را در رابطه با پتانسیل انرژی باد در منطقه اصفهان، برای مطالعات مورد نیاز بعدی در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهد.

۲- برآورد انرژی باد

جا به جایی هوا از نقطه‌ای به نقطه دیگر انرژی باد را ایجاد می‌کند که میزان کمی با استفاده از معادله (۱) قابل برآورد است.

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

1. Hennessey
2. Stewart & Essenwanger
3. Bardsley
4. Bryukhan
5. Diab
6. Rayleiyh

در رابطه (۷)، $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} dt$ تابع شناخته

شده گاما است. میانگین توان r ام توزیع نیز از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$\bar{x}^r = \beta^r \Gamma\left(1 + \frac{r}{\alpha}\right) \quad (۸)$$

بنابراین، میانگین توان سوم متغیر x (گشتاور مرتبه سوم x) یا عبارت مورد نیاز برای محاسبه انرژی باد مطابق رابطه (۹) پس از برآورد α و β به یکی از روش‌های برآورد آماری به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\bar{x}^3 = \beta^3 \Gamma\left(1 + \frac{r}{\alpha}\right) \quad (۹)$$

برای برآورد پارامترهای شکل و مقیاس ویبال دو پارامتره می‌توان از چندین روش مختلف آماری نظیر کاغذ ویبال، روش برازش حداقل مربعات (جاستوس^۶ و همکاران، ۱۹۷۸؛ جمیل، ۱۳۸۰) و یا روش بیشینه درست‌نمایی (جاستوس و همکاران، ۱۹۷۸؛ سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۷۶) استفاده نمود. خصوصیات توزیع ویبال دو پارامتره و برآورد پارامترهای آن در مقالات متعددی (هنسی، ۱۹۷۷؛ ریموند^۷، ۱۹۷۷؛ جاستوس، ۱۹۷۸؛ پاویا^۸ و ابرین^۹، ۱۹۸۶؛ شوتی و همکارانش، ۱۹۸۶) ارائه شده است. استوارت و اسن وانگر (۱۹۷۸) توزیع ویبال سه پارامتره را در برازش به

سرعت باد توصیه نمود. بریخوان^۱ و دیاپ^۲ (۱۹۹۵) با تاکید بر اهمیت ارزیابی پتانسیل انرژی باد، توجه محققان را به برآورد و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ترازهای بالای جو جلب نمودند و پتانسیل انرژی باد را در ترازهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال با استفاده از توزیع نرمال دو متغیره، ارزیابی نمودند.

۲-۱- تابع توزیع ویبال

توزیع ویبال دو پارامتره و یا شکل خاص آن توزیع رایله^۳، یکی از بهترین توابع برای برازش به داده‌های سرعت باد است که برای برآورد توزیع پیوسته سرعت باد از مقادیر گسسته مشاهده‌ای، بسیار مناسب است. بیان ریاضی تابع چگالی ویبال دو پارامتره متغیر x ، با پارامترهای α و β که به ترتیب عوامل شکل^۴ و مقیاس^۵ نام دارند، به صورت زیر است:

(۵)

$$f(x, \alpha, \beta) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \times \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right]$$

در رابطه فوق، $\alpha > 0$ ، $\beta > 0$ و $x \geq 0$ هستند. میانگین و واریانس توزیع به ترتیب عبارتند از:

$$\bar{x} = \beta \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (۶)$$

$$\sigma^2 = \beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \right] \quad (۷)$$

1. Justus
2. Raymond
3. Pavia

4. O'brien
5. Sutte

7. shape
8. scale

داده غیر صفر محاسبه کرد. گشتاور مرتبه سوم؛ یعنی $E(x^3)$ که در این توزیع برحسب پارامترهای μ و ϕ محاسبه می‌شود، عبارت است از:

$$E(x^3) = \mu^3(1 + 3\phi^{-1} + 3\phi^{-2}) \quad (۱۳)$$

از رابطه (۱۳) نیز نتیجه می‌شود که با افزایش ϕ ، معکوس نرمال به سمت توزیع نرمال میل می‌کند. در استفاده از این توزیع باید دقت نمود که برخلاف توزیع ویبال، در صورت برازش به سرعت باد، پتانسیل انرژی باد دارای توزیع معکوس نرمال نیست. در این جا باید به دو نکته مهم در زمینه به کارگیری توزیع‌های احتمال معرفی شده، اشاره کرد: نکته اول آنکه هرگاه توزیع ویبال به داده‌های ساعتی سرعت باد برازش داده شود، تابع توزیع در نقطه صفر؛ یعنی احتمال وقوع داده‌های مساوی یا کمتر از صفر برابر با رابطه (۱۶) خواهد شد (تاکله^۱ و براون^۲، ۱۹۷۷).

$$F_x(0) = P(X \leq 0) = 0 \quad (۱۶)$$

این در صورتی است که در بسیاری از اوقات داده‌های سرعت برابر صفر (باد آرام) یا نزدیک به آن است و درصدی از فراوانی داده‌های سرعت باد را شامل می‌شود. برای حل این مسأله و کاهش خطا باید از توزیع‌های پیوندی (هیبرید^۳) استفاده نمود. در این صورت تابع توزیع سرعت باد به رابطه (۱۷) تبدیل خواهد شد:

سرعت باد به کار برده اند. در مورد ویبال سه پارامتره (هیبرگاما یا گامای بهبود یافته) باید اذعان نمود که با وجود کارا بودن این توزیع برای برازش به سرعت باد، برآورد پارامتر سوم توزیع، سبب به وجود آمدن مشکلاتی در تابع بیشینه درست نمایی آن می‌گردد.

۲-۲- تابع معکوس نرمال

باردسلی (۱۹۸۰) توزیع معکوس نرمال را به عنوان جایگزینی برای توزیع خانواده ویبال (ویبال دو پارامتره، سه پارامتره و رایله) معرفی و ادعا نمود که برآورد پارامترها در این توزیع به سادگی امکان پذیر است. تابع توزیع معکوس نرمال از رابطه ریاضی زیر تبعیت می‌کند:

$$F_x(x) = \left[\mu\phi(2nx^3)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\phi x\mu^{-1} + \phi - \frac{1}{2}\mu\phi x^{-1}\right) \right], \\ x > 0, \mu > 0, \phi > 0$$

در رابطه (۱۰)، μ میانگین توزیع و ϕ پارامتر شکل و n تعداد مشاهدات است. با افزایش ϕ توزیع به تدریج به سمت نرمال میل می‌کند. این توزیع مانند توزیع ویبال دو پارامتره دارای چولگی مثبت بوده، خواص مناسبی در رابطه با برازش توزیع سرعت باد دارد. برآورد پارامترهای این توزیع، برای n مشاهده غیر صفر $x_i = 1, 2, \dots, n$ با استفاده از روش بیشینه درست نمایی از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\hat{\mu} = \bar{x} \quad (۱۱)$$

$$\hat{\phi} = (\bar{x} \bar{y} - 1)^{-1} \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق $y_i = x_i^{-1}$ است (باردسلی، ۱۹۸۰). بنابراین، می‌توان $\hat{\mu}$ و $\hat{\phi}$ را به سادگی برای هر مجموعه

1. Takle
2. Brown
3. hybrid

ایران مطابقت دارد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۷۶)، استفاده شده است.

$$\rho = \left[\frac{(1000+r)}{(1000+0.62198r)} \right] \left[\frac{QFE}{(2.8704+(T_d+273.15))} \right] \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) r نسبت آمیزه برحسب گرم بر کیلو گرم (gr/kg)، QFE فشار تبدیل شده ایستگاه T_d به تراز متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال (hPa) و نقطه شبنم بر حسب درجه سلسیوس است.

۳- مواد و روش‌ها

شناخت علمی و دقیق رژیم باد و تغییرات آن در هر منطقه باید از طریق تحلیل داده‌های حاصل از دیدبانی روزانه و ساعتی باد و همچنین دیگر پارامترهای جوی مؤثر که به طور صحیح و دقیق در پوشش مکانی و دوره زمانی مناسب اندازه گیری شده اند، صورت پذیرد. بر طبق استانداردهای سازمان هواشناسی جهانی^۳ (WMO) پارامتر برداری باد در ارتفاع ده متری از سطح زمین، در ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی و اقلیم شناسی سازمان هواشناسی کشور، اندازه‌گیری می‌شود.

در ایستگاه‌های همدیدی، حداقل هر سه ساعت یک بار پارامترهای جوی اندازه گیری و ثبت می‌گردند، در حالی که در ایستگاه‌های اقلیم شناسی در فاصله ساعات ۰۳ تا ۱۵ به وقت^۴ UTC، مطابق با ۶/۵ صبح تا ۶/۵ بعدازظهر به وقت محلی؛ یعنی ۱۲ ساعت از شبانه روز، دیدبانی انجام می‌شود. بنابراین، ملاحظه می‌شود که به کار گیری داده‌های ساعتی ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی، به

$$F_x^H(x) = \begin{cases} F_0 + (1-F_0)F_x^w(x) & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (17)$$

که در آن F_0 ، احتمال صفر بودن مقادیر سرعت باد، $F_x^w(x)$ تابع توزیع به کار گرفته شده، و $F_x^H(x)$ شکل پیوندی آن می‌باشد.

ملاحظه می‌شود با به کارگیری رابطه (۱۷)، تابع تجمع در نقطه صفر برابر F_0 خواهد بود. بدین ترتیب، مشکل وجود داده‌های برابر صفر (بادهای آرام) حل خواهد شد. البته، می‌توان از طریق سری مکعب سرعت باد، برآوردی برای \bar{v}^3 از رابطه زیر به دست آورد که در آن n تعداد مشاهدات، v_i سرعت باد و W_d انرژی باد به روش مستقیم^۱ هستند.

$$W_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (18)$$

هرچه تعداد مشاهدات بیشتر باشد و داده‌ها در فواصل زمانی کمتری اندازه گیری شوند، برآورد به دست آمده مناسب تر خواهد شد.

نکته دوم، تعیین مقدار چگالی هواست که یکی از پارامترهای مؤثر بر انرژی باد است. هر چند درصد تأثیر تغییرات آن (به سبب استفاده از فرمول‌های مختلف) ناچیز و بین ۳ تا ۵ درصد است، اما به لحاظ در دسترس بودن داده‌های پارامترهای هواشناسی، نظیر: نسبت آمیزه، فشار و دما، در این مقاله از فرمول محاسبه نسبتاً دقیق آن (رابطه ۱۹) که به طور تجربی به دست آمده و با شرایط

1. Direct
2. World Meteorological Organization

شده است که در جداول و نمودارهای ارائه شده مقایسه خواهند شد.

۴- نتایج

همان گونه که در جدول شماره ۱ ملاحظه می شود، در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه فقط دو ایستگاه اصفهان و کاشان دارای آمار بلند مدت هستند. آمار سایر ایستگاه‌ها از سال ۱۹۹۲ میلادی به بعد اندازه گیری شده است. به این ترتیب می توان دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۹۲ میلادی را به طور مشترک برای یازده ایستگاه مذکور در نظر گرفت.

براساس نمودارهای شماره ۱ و ۲ و جدول شماره ۲، روند خطی میانگین سالانه سرعت باد و میانگین دهه-ای آنها به ترتیب در دو ایستگاه اصفهان و کاشان، در طی دوره آماری موجود هر ایستگاه، کاهش یافته است. نتایج نشان داد که روند میانگین سالانه سرعت باد در دو ایستگاه فوق در دوره بلند مدت در مقایسه با روند آنها در کوتاه مدت کاملاً متفاوت است. بنابراین، برای دو ایستگاه کاشان و اصفهان، برآورد چگالی توان باد براساس دوره‌های بلند مدت، برآورد دست بلایی از انرژی باد خواهد بود. با در نظر گرفتن این نتیجه و وجود دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۹۲ میلادی به طور مشترک برای اغلب ایستگاه‌ها و هم چنین وجود داده‌های توأم شب و روز در این دوره کوتاه مدت برای اکثر ایستگاه‌های همدیدی استان، محاسبات انرژی باد برای این دوره صورت پذیرفت.

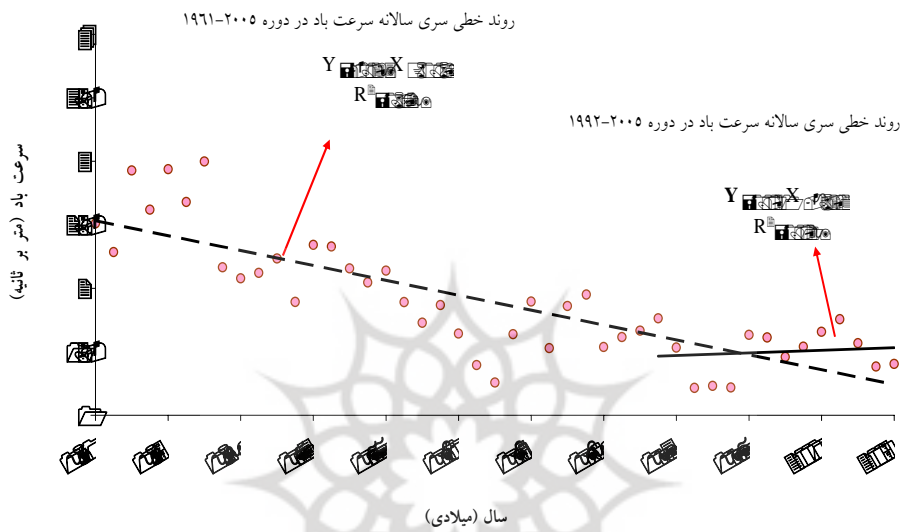
دلیل عدم توزیع یکنواخت در طول شبانه روز، برآورد مناسبی از انرژی باد به دست نمی‌دهد. به علاوه، یکسان نبودن فاصله زمانی ما بین دیدبانی‌های ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی با ایستگاه‌های سینوپتیک، سبب می‌شود که نتایج تحلیل داده‌های حاصل از آنها با یکدیگر قابل مقایسه نباشند.

جدول شماره (۱) مختصات جغرافیایی، طول دوره و شکاف‌های آماری هر یک از ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان را نمایش می‌دهد. در بین این یازده ایستگاه همدیدی پارامترهای جوی ایستگاه گلپایگان، مانند ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی، تنها در ساعات ۰۳ تا ۱۵ اندازه گیری شده‌اند و محاسبات این ایستگاه فقط مربوط به داده‌هایی است که در طول روز اندازه گیری و ثبت شده اند. در این مقاله هرچند نتایج محاسبات این ایستگاه ارائه شده اما در عمل با دیگر ایستگاه‌ها مقایسه نگردیده است.

قبل از برآورد انرژی باد در استان اصفهان، ابتدا به منظور شناخت اولیه از میزان سرعت باد در این استان، میانگین‌های ماهانه سرعت باد محاسبه و گلبادهای ماهانه رسم و تحلیل شد که به علت حجم زیاد آنها در بخش بعد فقط به ذکر اجمالی نتایج اکتفا می‌شود. سپس مقادیر برآورد شده چگالی توان باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه به سه روش مستقیم، ویپال و معکوس نرمال محاسبه

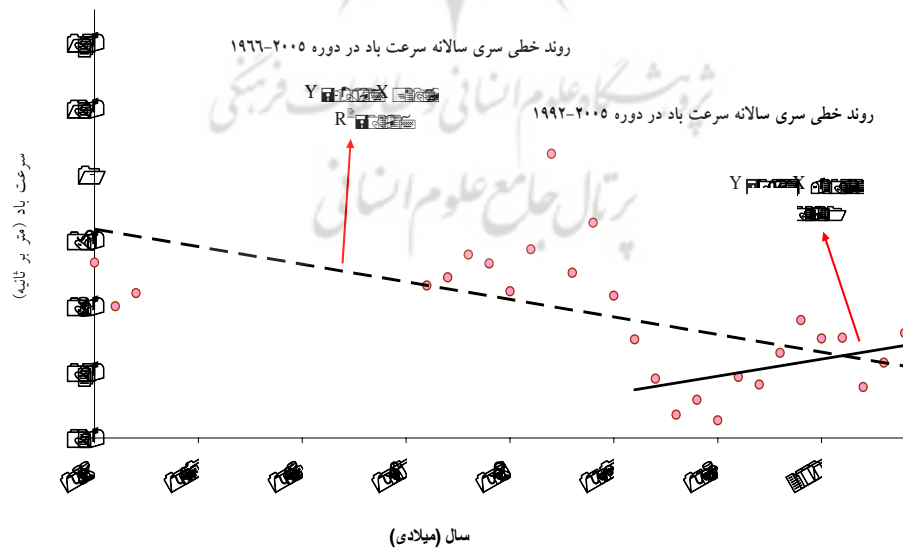
جدول شماره ۲- میانگین سرعت باد ایستگاه‌های اصفهان و کاشان در دهه‌های مختلف (بر حسب متر بر ثانیه).

ایستگاه	دهه	۱۹۶۱-۷۰	۱۹۷۱-۸۰	۱۹۸۱-۹۰	۱۹۹۱-۲۰	۲۰۰۱-۰۵
اصفهان		۲/۵	۱/۲	۱/۶	۱/۵	۱/۵
کاشان		۰/۸	-	۰/۸	۰/۴	۰/۵



شکل شماره ۱ مقایسه سری سالانه میانگین سرعت باد به همراه روند خطی آن در ایستگاه اصفهان برای دوره‌های ۲۰۰۵-

۱۹۹۲ و ۱۹۶۱-۲۰۰۵



شکل شماره ۲ مقایسه سری سالانه میانگین سرعت باد به همراه روند خطی آن در ایستگاه کاشان برای دوره‌های ۲۰۰۵-

۱۹۹۲ و ۱۹۶۶-۲۰۰۵

۴-۱- سرعت باد

مقایسه میزان میانگین ماهانه سرعت باد در طول سال برای ایستگاه‌های استان نشان داد که از این لحاظ ایستگاه‌های استان از حالت یکنواختی برخوردار نیستند. سرعت وزش باد در ایستگاه کاشان نسبت به سایر ایستگاه‌های دیگر استان، بسیار کمتر و در بعضی ماه‌ها ناچیز است. در مقابل سرعت باد، در ایستگاه اردستان بیش از سایر ایستگاه‌ها است.

با شروع فصل سرد سال (ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه) سرعت وزش باد کمتر از دیگر مواقع سال می‌شود؛ به طوری که در ماه دسامبر کمترین مقدار میانگین سرعت باد (۰/۱ متر بر ثانیه) و بیشترین آن (۲/۲ متر بر ثانیه) به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های کاشان و نایین است.

پس از ماه ژانویه، سرعت باد در منطقه کم کم افزایش یافته؛ به طوری که در ایستگاه‌های اردستان، نایین، شهرضا و شرق اصفهان سرعت باد به بیش از ۳ متر بر ثانیه می‌رسد. میانگین سرعت باد در سایر ایستگاه‌های استان کمتر از ۲ متر بر ثانیه است. بیشترین مقدار سرعت باد در ایستگاه‌های استان اغلب مربوط به ماه آوریل (فروردین) است. در برخی ایستگاه‌ها مانند اردستان و خور و بیابانک بالاترین میزان میانگین سرعت

باد، در ماه ژوئیه به دست می‌آید. ایستگاه‌های اردستان و کاشان دارای بیشترین و کمترین میانگین سرعت باد، ۴/۷ و ۰/۸ متر بر ثانیه در ماه ژوئیه هستند.

از اوایل ماه می تا اواخر ژوئیه سرعت باد، به ویژه در اردستان همچنان افزایش یافته، حتی به میزان ۴ متر بر ثانیه می‌رسد. روند کاهشی از ماه سپتامبر به بعد شروع می‌شود. به طور کلی ایستگاه‌های اردستان، نایین، شرق اصفهان و شهرضا در طول مدت سال نسبت به سایر ایستگاه‌ها از سرعت باد بیشتری برخوردارند. تغییرات میانگین ماهانه سرعت باد ایستگاه نایین به مراتب کمتر از دیگر ایستگاه‌ها بوده است.

۴-۲- سمت باد

در فصل زمستان سمت باد غالب در جنوب استان عمدتاً غربی و نیمه غربی، اما در مرکز و شمال استان در نیمه شمالی دیده می‌شود. سمت باد غالب در فصل بهار کمابیش مشابه فصل زمستان است. در فصل تابستان باد غالب در اکثر ایستگاه‌ها، از سمت شرق و شمال شرق می‌وزد. این حالت به صورت همگن در همه ایستگاه‌های استان به چشم می‌خورد. از آنجا که سرعت وزش باد منطقه در فصل پاییز نسبتاً کاهش می‌یابد، و به علاوه این فصل با تغییر ساختار و گذر از کاهش سرعت بادهای شرقی و افزایش بادهای غربی روبروست، تعیین دقیق

ماه مارس و در ایستگاه اردستان، ماه ژوئن، ژوئیه و اوت، ماه‌هایی با بیشترین چگالی توان باد به شمار می‌روند.

کمترین چگالی توان باد در ایستگاه‌های استان نیز اغلب مربوط به ماه دسامبر است. در ایستگاه‌هایی، مانند: نطنز و شهرضا نیز ماه سپتامبر کمترین مقدار انرژی باد را داراست. کمترین مقدار چگالی توان باد ایستگاه نایین مربوط به ماه اکتبر است.

در نمودارهای شماره ۴-الف تا ۴-د چگالی توان باد، به ترتیب در چهار ماه مارس، آوریل، ژوئن و ژوئیه به عنوان نمونه ارائه شده است، زیرا همان طور که پیش از این نیز اشاره شد، در ماه‌های مارس و آوریل اکثر ایستگاه‌های استان بیشترین مقدار چگالی توان باد را دارند. همچنین بیشینه چگالی توان باد ایستگاه اردستان در ماه‌های ژوئن و ژوئیه مشاهده می‌شود. در دوره‌ای که سرعت باد در استان اصفهان کمتر است؛ یعنی ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه، چگالی توان باد در ایستگاه‌های استان اصفهان به کمتر از ۶۰ وات بر متر مربع می‌رسد. با اتمام دوره و شروع ماه فوریه (حدود بهمن) به سبب افزایش سرعت باد در منطقه چگالی توان باد زیاد می‌شود. به طوری که در ایستگاه‌های اردستان، نایین و کبوترآباد به بیش از ۶۰ وات بر متر مربع و در ایستگاه شهرضا به بیش از ۱۴۰ وات بر متر مربع می‌رسد. پس از

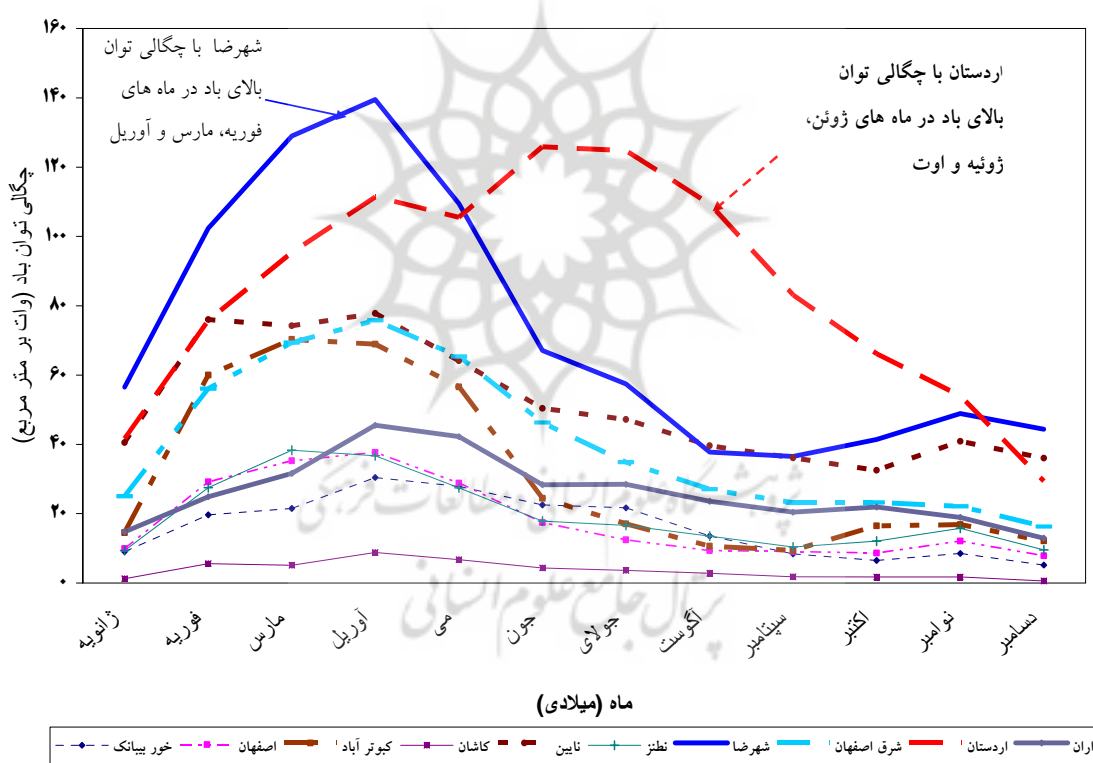
الگوی واحد برای جهت غالب باد منطقه کمی دشوار است. شایان گفتن است که بررسی علل وزش باد از یک سمت معین در بازه زمانی خاص در منطقه، به مطالعه و تحقیق جداگانه‌ای در مقیاس محلی و سینوپتیکی نیاز دارد که از موضوع و هدف این مقاله بیرون است.

۴-۳- چگالی توان باد

میانگین چگالی توان باد در استان اصفهان به سه روش مستقیم، برازش توزیع هیبرید ویبال و هیبرید معکوس نرمال و با استفاده از داده‌های ساعتی یازده ایستگاه همدیدی استان، برای دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۲، برآورد شده است. هرچند مقادیر به دست آمده از سه روش فوق در جدول شماره (۳) ارائه شده، اما با توجه به کارایی بیشتر مدل ویبال، تحلیل نتایج بر اساس این روش صورت گرفته است. در این روش برآوردها غالباً کمتر از دو روش دیگر بوده است. در نمودار شماره ۳ چگالی توان باد در ده ایستگاه استان به طور مقایسه‌ای (همه ایستگاه‌ها به جز گلپایگان) در دوازده ماه سال نمایش داده شده است.

با نگاهی به این نمودار در می‌یابیم که غالباً بیشترین مقدار چگالی توان باد ایستگاه‌های استان مربوط به ماه آوریل است. در برخی ایستگاه‌ها، مانند: نطنز و کبوترآباد،

طی ماه آوریل به جز در ایستگاه اردستان دوباره چگالی توان همگام با کاهش سرعت باد کاهش می‌یابد، به طور کلی در بین ایستگاه‌های منطقه ایستگاه‌هایی مانند خور و بیابانک، داران و نطنز که از سرعت باد کمی برخوردارند و در نتیجه چگالی توان باد آن‌ها نیز کم است. الگوی تغییرات چگالی ماهانه توان باد در ایستگاه اردستان با سایر ایستگاه‌ها متفاوت است.



شکل شماره ۳ مقایسه چگالی توان باد بر حسب وات بر متر مربع برای ایستگاه‌های همدیدی (سینوپتیک) استان اصفهان

جدول ۳ برآورد چگالی توان باد با استفاده از روش‌های مستقیم، ویبال و معکوس نرمال برای ایستگاه‌های همدیدی (سینوپتیک) استان اصفهان (بر حسب وات بر متر مربع)

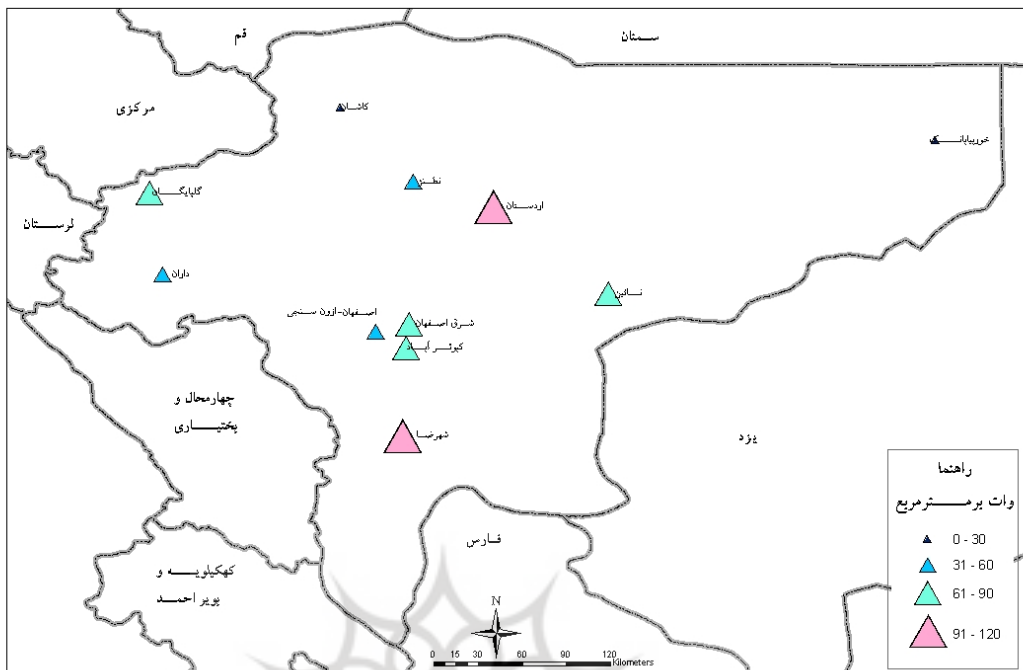
در دوره آماری ۱۹۹۲-۲۰۰۵

ماه												روش	ایستگاه
دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اوت	ژوئیه	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه		
۳۶/۲۰	۵۷/۲۸	۶۸/۰۴	۸۱/۴۴	۱۰۵/۹۴	۱۲۲/۴۲	۱۲۳/۵۱	۱۱۰/۷۲	۱۲۰/۹۹	۱۱۲/۴۲	۹۰/۴۸	۴۷/۱۰	مستقیم	اردستان
۲۹/۳۷	۵۳/۹۶	۶۶/۱۹	۸۳/۱۲	۱۰۹/۳۵	۱۲۴/۷۵	۱۲۵/۸۷	۱۰۵/۵۱	۱۱۱/۳۸	۹۵/۲۹	۷۵/۷۲	۴۱/۶۱	ویبال	
۳۸/۷۸	۷۶/۷۸	۸۴/۲۳	۱۰۶/۳۱	۱۳۷/۳۹	۱۶۱/۳۳	۱۶۲/۷۸	۱۲۹/۱۵	۱۴۵/۹۸	۱۲۸/۸۸	۱۰۳/۷۶	۵۶/۴۰	معکوس نرمال	
۱۱/۴۸	۱۸/۱۶	۹/۸۲	۱۰/۸۶	۱۰/۸۳	۱۳/۷۰	۲۰/۱۶	۳۹/۶۷	۵۰/۴۰	۴۳/۷۵	۳۵/۹۳	۱۲/۳۱	مستقیم	اصفهان
۷/۸۴	۱۲/۰۸	۸/۶۵	۹/۱۰	۹/۳۶	۱۲/۴۶	۱۷/۴۶	۲۸/۸۵	۳۷/۷۳	۳۵/۲۶	۲۹/۲۰	۹/۹۴	ویبال	
۸/۰۹	۱۳/۲۹	۸/۶۶	۹/۴۰	۹/۷۳	۱۲/۸۶	۱۸/۴۰	۳۲/۵۲	۴۴/۵۷	۴۰/۸۵	۳۲/۸۵	۱۰/۲۹	معکوس نرمال	
۸/۳۰	۱۵/۸۷	۸/۴۶	۱۰/۹۸	۱۵/۷۱	۲۳/۶۶	۲۷/۷۲	۳۸/۹۸	۳۹/۲۲	۲۹/۶۲	۲۷/۸۳	۱۳/۱۹	مستقیم	خورریابانک
۵/۱۸	۸/۵۳	۶/۵۱	۸/۴۰	۱۳/۵۸	۲۱/۷۰	۲۲/۵۴	۲۷/۸۶	۳۰/۴۷	۲۱/۵۰	۱۹/۶۷	۹/۰۶	ویبال	
۵/۸۵	۱۰/۱۲	۷/۱۲	۹/۰۳	۱۴/۷۴	۲۴/۷۸	۲۶/۰۰	۳۳/۳۴	۳۷/۶۷	۲۷/۴۴	۲۴/۳۰	۱۱/۱۹	معکوس نرمال	
۱۴/۱۳	۲۰/۸۱	۲۴/۶۶	۲۱/۶۵	۲۵/۱۴	۳۰/۴۰	۳۰/۳۴	۴۶/۹۶	۵۰/۰۳	۳۴/۳۲	۲۶/۱۶	۱۵/۸۱	مستقیم	داران
۱۲/۹۴	۱۸/۹۴	۲۱/۹۱	۲۰/۴۲	۲۳/۵۹	۲۸/۴۶	۲۸/۳۸	۴۲/۲۵	۴۵/۵۰	۳۱/۶۴	۲۴/۹۲	۱۴/۷۷	ویبال	
۱۶/۴۸	۲۳/۰۱	۲۶/۴۲	۲۴/۲۷	۲۸/۲۹	۳۳/۴۱	۳۳/۶۷	۵۳/۶۲	۵۶/۲۱	۳۸/۸۸	۳۲/۷۰	۱۹/۱۶	معکوس نرمال	
۱۹/۹۸	۲۹/۴۰	۳۰/۲۸	۲۵/۸۹	۳۰/۱۸	۳۷/۸۳	۵۱/۴۷	۷۸/۶۸	۹۰/۲۹	۸۲/۳۳	۶۶/۸۵	۳۲/۱۱	مستقیم	شرق اصفهان
۱۶/۲۹	۲۲/۰۷	۲۳/۲۵	۲۳/۱۹	۲۷/۰۳	۳۴/۸۵	۴۶/۲۶	۶۵/۳۶	۷۵/۷۷	۶۹/۳۶	۵۶/۰۳	۲۵/۰۴	ویبال	
۱۶/۷۹	۲۴/۰۸	۲۵/۱۶	۲۴/۸۷	۲۹/۲۰	۳۸/۹۸	۵۳/۰۶	۷۹/۳۶	۹۲/۷۸	۸۵/۳۵	۶۷/۰۶	۲۷/۸۷	معکوس نرمال	

ادامه جدول ۳

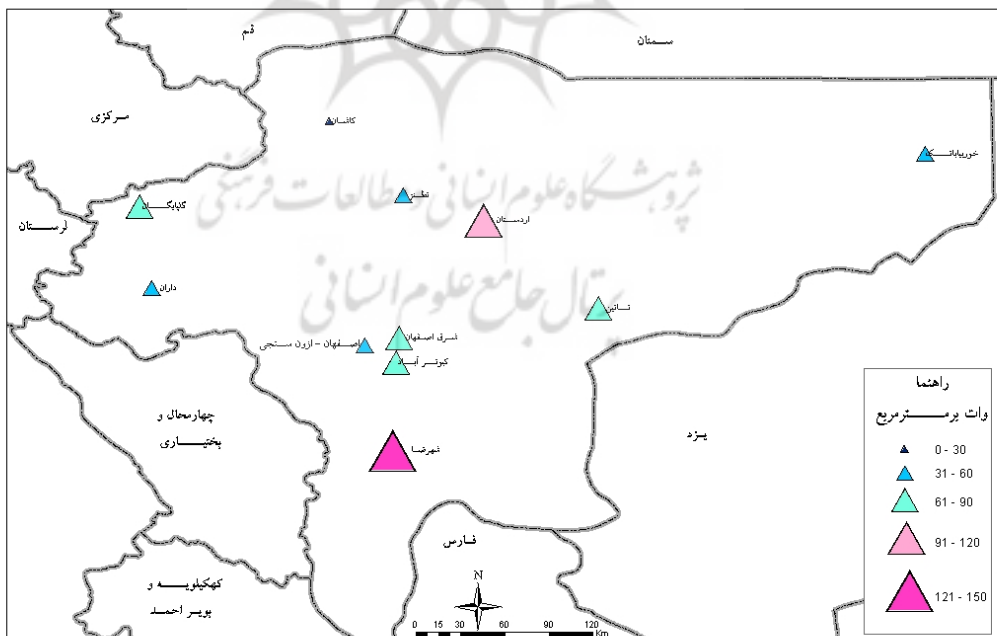
ماه												روش	ایستگاه
دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اوت	ژوئیه	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه		
۴۷/۴۷	۶۱/۷۱	۴۸/۲۸	۳۹/۹۹	۳۹/۰۶	۶۰/۸۳	۷۰/۹۲	۱۲۴/۶۲	۱۵۱/۰۲	۱۵۰/۵۴	۱۱۰/۹۵	۶۱/۰۲	مستقیم ویبال معکوس نرمال	شهرضا
۴۴/۳۸	۴۸/۹۳	۴۱/۴۳	۳۶/۵۳	۳۷/۷۵	۵۷/۴۱	۶۷/۰۶	۱۰۹/۴۹	۱۳۹/۵۲	۱۲۸/۹۹	۱۰۲/۴۰	۵۶/۵۲		
۵۸/۸۰	۶۷/۶۲	۵۵/۳۹	۴۷/۶۵	۴۶/۲۱	۷۴/۷۸	۸۸/۷۳	۱۵۹/۳۷	۲۰۸/۲۳	۱۹۷/۲۳	۱۴۴/۳۵	۷۶/۴۹		
۰/۷۶	۲/۴۷	۲/۱۱	۲/۱۹	۳/۵۹	۴/۱۳	۵/۴۶	۸/۷۶	۱۳/۷۴	۶/۶۴	۷/۷۹	۲/۲۲	مستقیم ویبال معکوس نرمال	کاشان
۰/۶۱	۱/۷۲	۱/۷۵	۱/۸۰	۲/۸۳	۳/۶۴	۴/۳۲	۶/۷۵	۸/۷۹	۵/۱۳	۵/۵۸	۱/۲۵		
۰/۶۲	۱/۸۳	۱/۸۶	۱/۸۳	۲/۹۹	۳/۹۶	۴/۸۴	۷/۶۶	۱۰/۳۱	۵/۷۵	۶/۲۶	۱/۳۳		
۱۳/۱۱	۲۶/۵۹	۳۳/۲۸	۱۱/۵۳	۱۴/۶۷	۲۱/۶۳	۲۱/۹۱	۸۸/۹۸	۹۴/۲۳	۹۰/۵۴	۸۷/۵۵	۱۷/۲۷	مستقیم ویبال معکوس نرمال	کبوترآباد
۱۲/۱۶	۱۶/۸۶	۱۶/۵۰	۹/۳۸	۱۰/۶۱	۱۷/۰۱	۲۴/۴۱	۵۶/۵۷	۶۸/۹۳	۷۰/۲۸	۶۰/۰۱	۱۵/۵۶		
۱۸/۹۵	۲۶/۷۷	۲۶/۴۵	۱۲/۴۲	۱۳/۹۱	۲۳/۴۴	۳۶/۳۸	۹۶/۸۱	۱۲۲/۰۶	۱۱۶/۶۰	۱۰۱/۷۲	۲۱/۳۳		
۲۲/۵۶	۳۲/۶۳	۴۹/۷۹	۳۷/۹	۲۹/۰۲	۳۳/۲۱	۴۴/۷۱	۶۶/۲۸	۸۰/۱۶	۷۱/۲۹	۵۸/۷۱	۲۷/۶۸	مستقیم ویبال معکوس نرمال	گلپایگان
۲۱/۳۱	۲۹/۶۲	۴۵/۳۷	۳۴/۸۳	۲۶/۵۸	۳۱/۲۹	۴۱/۶۱	۶۲/۲۱	۷۴/۴۸	۶۳/۳۲	۵۴/۳۴	۲۵/۲۲		
۲۵/۳۸	۳۵/۳۵	۵۴/۲۸	۴۰/۱۸	۲۹/۶۱	۳۶/۶۳	۴۸/۸۶	۷۵/۵۶	۹۱/۶۳	۷۶/۸۰	۶۷/۴۲	۲۹/۷۶		
۴۶/۲۲	۴۹/۷۳	۳۶/۹۸	۳۸/۷۷	۴۲/۴۲	۴۹/۵۵	۵۴/۹۰	۷۵/۱۳	۸۹/۶۳	۸۵/۱۵	۸۷/۵۴	۴۶/۵۹	مستقیم ویبال معکوس نرمال	نابین
۳۶/۰۲	۴۰/۸۸	۳۲/۵۴	۳۶/۱۳	۳۹/۶۳	۴۷/۲۰	۵۰/۴۲	۶۴/۱۰	۷۷/۷۸	۷۴/۱۹	۷۶/۰۱	۴۰/۵۳		
۴۲/۳۴	۴۷/۶۱	۳۶/۰۳	۳۹/۹۰	۴۴/۳۸	۵۳/۰۶	۵۷/۷۲	۷۷/۶۲	۹۵/۲۶	۹۲/۲۹	۹۳/۹۲	۴۷/۴۰		
۱۶/۲۵	۲۷/۱۹	۱۵/۹۲	۱۲/۷۴	۱۴/۶۸	۱۷/۸۴	۲۰/۴۵	۴۰/۴۵	۵۰/۵۵	۷۸/۰۹	۴۹/۴۹	۱۷/۱۱	مستقیم ویبال معکوس نرمال	نظنز
۹/۵۲	۱۵/۷۷	۱۰/۳۴	۱۲/۱۲	۱۳/۵۴	۱۶/۶۴	۱۷/۸۵	۲۷/۴۸	۳۶/۷۰	۳۸/۳۲	۲۷/۵۱	۹/۳۷		
۱۲/۳۲	۲۰/۶۸	۱۱/۸۲	۱۴/۲۶	۱۵/۱۳	۱۸/۷۴	۲۰/۴۹	۳۵/۴۱	۴۹/۲۵	۵۷/۳۵	۳۸/۶۶	۱۲/۰۶		

چگالی توان باد در ایستگاههای سینوپتیک استان اصفهان در ماه مارس برای دوره ۱۹۹۲-۲۰۰۵



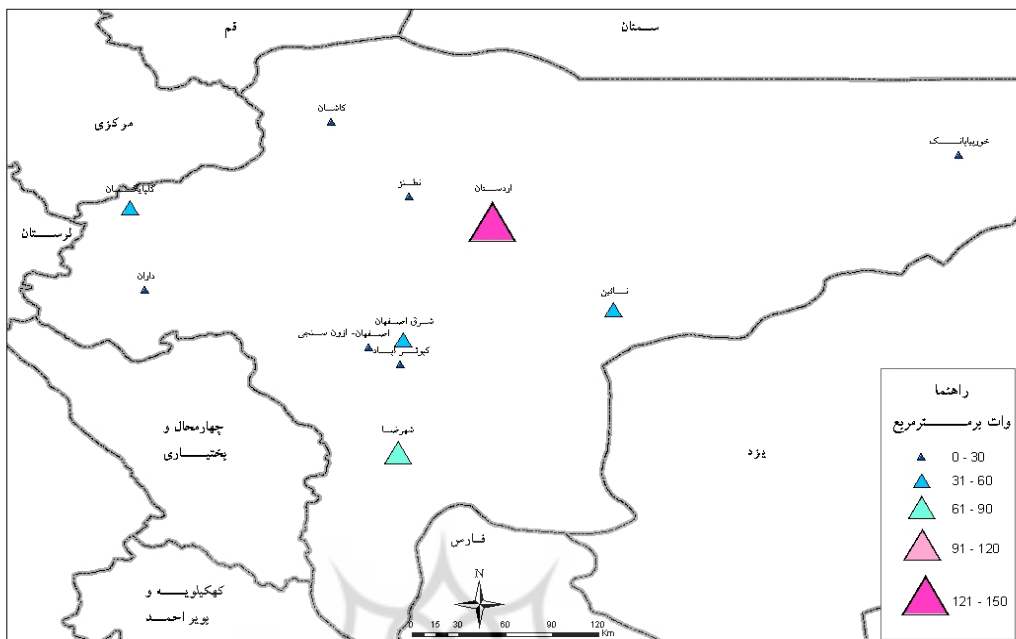
الف) مارس

چگالی توان باد در ایستگاههای سینوپتیک استان اصفهان در ماه آوریل برای دوره ۱۹۹۲-۲۰۰۵



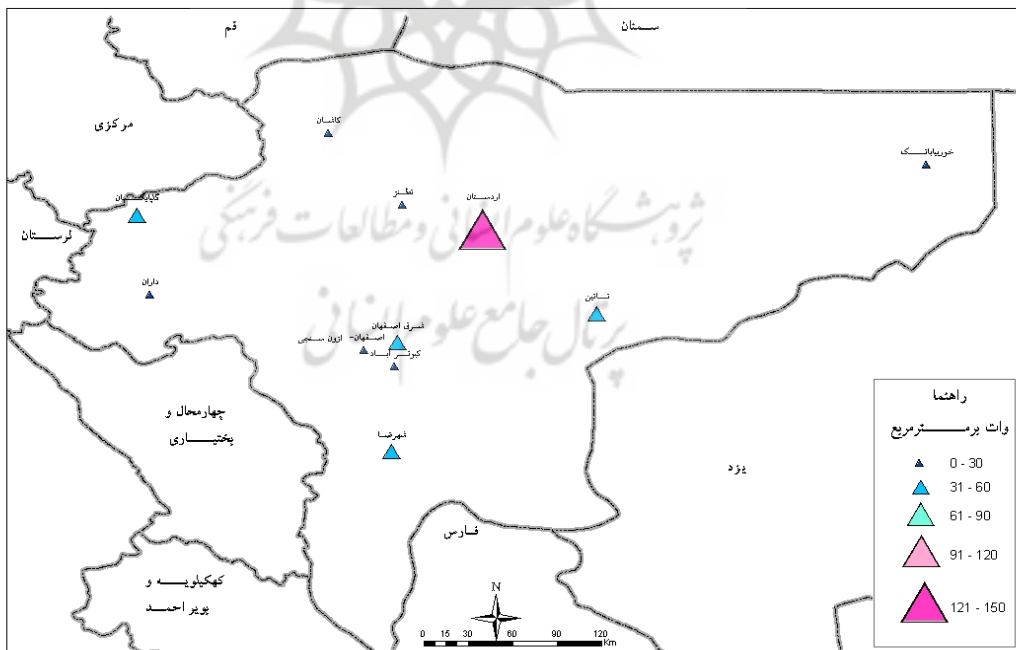
ب) آوریل

چگالی توان باد در ایستگاههای سینوپتیک استان اصفهان در ماه ژوئن برای دوره ۱۹۹۲-۲۰۰۵



ج) ژوئن

چگالی توان باد در ایستگاههای سینوپتیک استان اصفهان در ماه ژوئیه برای دوره ۱۹۹۲-۲۰۰۵



د) ژوئیه

شکل شماره ۴ چگالی توان باد در ایستگاه برای ایستگاه‌های همدیدی (سینوپتیک) برای دوره ۱۹۹۲-۲۰۰۵؛

الف) مارس، ب) آوریل، ج) ژوئن، د) ژوئیه.

منابع

شهرهای بزرگ کشور در ارتفاع ده متری از سطح زمین، نیوار، شماره ۶۲ و ۶۳ پاییز و زمستان، ص ۷-۲۱.

10- Bardsley, E. W., 1980, Note on the Use of the Inverse Gaussian Distribution for Wind Energy Applications, J. Appl. Meteor., 19, 1126-1130.

11- Bryukhan, F. F., Diab, D. R., 1995, Wind Energy Resource Estimation of the Upper Atmosphere over Southern Africa. Appl. Meteor., 34, 2565-2571.

12- Hennessy, J. P., 1977, Some Aspects of wind Power Statistics. J. Appl. Meteor., 16, 119-128.

13- Justus, C. G., W. R. Hargraves, A. Milhai, and D. Garber, 1978, Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. J. Appl. Meteor., 17, 350-353.

14- Justus, C. G., Mikhail, 1976, Height Variation of wind speed and wind speed distribution statistics, Geophys. Res. Lett., 3, 261-264.

15- Pavia, E. G., and J., O'Brien, 1986, Weibull statistics of wind speed over the

۱- سازمان هواشناسی کشور، (۱۳۸۵)، گزارش پروژه ارزیابی انرژی پتانسیل باد در پهنه‌های بادخیز ایران.

۲- سازمان انرژی‌های نوین ایران (سانا)، (۱۳۸۳)، از انرژی‌های نو چه می‌دانید؟ گزارش سوم، انرژی باد.

۳- سازمان انرژی‌های نوین ایران (سانا)، (۱۳۷۵)، گزارش پروژه منابع انرژی تجدیدپذیر نوین، وزارت نیرو، معاونت امور انرژی، دفتر انرژی‌های نو.

۴- سازمان هواشناسی کشور، (۱۳۷۶)، گزارش پروژه اطلس انرژی باد در کشور.

۵- ثقفی، م، (۱۳۸۲)، انرژی‌های تجدیدپذیر نوین، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۹

۶- جمیل، م، (۱۳۸۰)، چگالی انرژی باد، نیوار، شماره ۴۲ و ۴۳ پاییز و زمستان، ص ۵۰-۲۷.

۷- جهانگیری، ز، ف، رحیم زاده، (۱۳۸۳)، بررسی انرژی باد در استان آذربایجان غربی، مجموعه مقالات اولین کنفرانس اکوانرژی ایران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.

۸- رحیم زاده، ف، ز، جهانگیری، (۱۳۸۲)، مکان یابی مناسب برای استفاده از انرژی باد در کشور، سومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.

۹- رحیم زاده، ف، ن، محمدیان، و ج، اکبری نژاد، (۱۳۸۵)، بررسی تغییر پذیری سرعت باد در تعدادی از

19- Raymond, K., W., Wong, 1977, Weibull Distribution, Iterative likelihood Techniques and Hydro meteorological Data, J. of applied Meteor. 16, 1360-1364.

20- URL1:

<http://www.ipcc.ch/meetings/session29/doc2.pdf>, "Meeting for the Special Report on Renewable Energy", January 2008, Lübeck, Germany.

21- URL2:

<http://www.ipcc.ch/meetings/session28.htm>, "Session of the IPCC", April 2008, Budapest, Hungary

ocean, J of climate and applied Meteor., 25, 1324-1332.

16- Stewart, D.A., and O.M., Essenwanger, 1978, Frequency Distribution of Wind Speed Near the Surface. J. Appl. Meteor., 17, 1633-1642.

17- Shutte, T., O.slka and S. Israelssor, 1987, The use of the weibull Distribution for thunderstorm Parameters, J. of App. Meteor. Vol 26. 457-463.

18- Takle, E. S., Brown, J. M., 1977, Note on the Use of Weibull Statistics to Characterize Wind- Speed Data. J. Appl. Meteor., 17, 556-559.