

امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان

مجید رضایی بنفشه - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، ایران
سعید جهانبخش - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، ایران
یعقوب دین‌پژوه - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
مرضیه اسمعیل‌پور* - دکتری تخصصی اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۰۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۶/۰۵

چکیده

باد جزء منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر به‌شمار می‌رود و در دهه گذشته، استفاده از انرژی باد در جهان با استقبال فراوان همراه بوده است. در این پژوهش شش روش برآورد پارامترهای توزیع ویبول، شامل گرافیکی، تجربی، گشتاورها، عامل الگوی انرژی، حداکثر راست‌نمایی و گشتاورهای وزنی احتمالاتی، در پنج ایستگاه سینوپتیک در استان‌های اردبیل و زنجان بررسی شدند و یافته‌ها نشان داد، روش گشتاورهای مرسوم روش مناسب‌تری است. تحلیل پتانسیل انرژی باد در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری انجام گرفت و پارامترهای پتانسیل انرژی باد (چگالی توان باد، چگالی انرژی باد، سرعت باد دارای حداکثر انرژی و محتمل‌ترین سرعت باد) محاسبه شدند. بالاترین مقدار شاخص شکل (بی‌بعد) $1/26$ از ایستگاه زنجان در ماه فوریه به‌دست آمد و بالاترین مقدار تخمینی برای شاخص مقیاس برابر با $4/76$ متر بر ثانیه بوده که در ماه فوریه ایستگاه اردبیل مشاهده شد. بررسی‌های مربوط به پتانسیل انرژی باد نشان داد، ایستگاه اردبیل پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی باد دارد. در این ایستگاه چگالی توان باد در مقیاس سالانه و در ارتفاع ۱۰ متری برابر با $285/59$ وات بر متر مربع است که در ارتفاع ۴۰ متری به 491 وات بر متر مربع می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: استان‌های اردبیل و زنجان، انرژی باد، پارامتر شکل و مقیاس، توزیع ویبول.

مقدمه

انرژی نقش مهمی در پیشرفت اقتصادی هر جامعه بازی می‌کند؛ به‌گونه‌ای که فعالیت‌هایی گوناگونی چون مسکن‌سازی، حمل و نقل، پزشکی، صنعت و کشاورزی به آن وابسته هستند. بحث مربوط به تأثیر تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی

همواره مطرح است. علاوه بر خطرات زیست‌محیطی در یک مقیاس محلی، با خطر گرمایش جهانی نیز روبه‌رو هستیم که با آزادسازی دی‌اکسیدکربن به‌وجود می‌آید. به نظر می‌رسد راه حل صریح آن، توقف تدریجی استفاده از انرژی‌های فسیلی و جایگزینی آنها با انرژی‌هایی است که زیان‌های انرژی فسیلی را ندارند؛ یعنی انرژی‌های هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر. در نتیجه بشر به سمت «عصر فوق نفت» در حال حرکت است (راجی، ۲۰۰۹: ۱۸).

در چند دهه گذشته بنا به دلایل زیر، جست‌وجوی برای سیستم‌های انرژی جایگزین جدید افزایش یافته است:

۱. نیاز به انرژی در چند دهه آینده به‌صورتی افزایش خواهد یافت که استفاده از سوخت‌های فسیلی کافی نخواهد

بود؛ بنابراین کمبود انرژی با تولید انرژی مازاد پوشش داده خواهد شد.

۲. سوخت‌های فسیلی در هر کشوری در دسترس نیستند؛ زیرا این سوخت‌ها به‌صورت نامساوی بین کشورهای

جهان توزیع شده‌اند، ولی انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌خصوص تابش خورشید، کم و بیش به‌صورت مساوی توزیع شده و هر کشوری نهایت تلاش خود را خواهد کرد تا بخشی از انرژی مورد نیاز کشور خود را از این طریق تولید کند.

۳. احتراق سوخت‌های فسیلی، به‌دلیل آزادسازی گاز دی‌اکسیدکربن، اثرهای نامطلوبی مانند آلودگی اتمسفر و

مشکلات زیست‌محیطی (آلودگی هوا، باران اسیدی، تأثیر گلخانه‌ای و تغییرات آب و هوایی و ...) برجای می‌گذارد که حتی به‌کمک تکنولوژی‌های پیشرفته کنونی نیز نمی‌توان به‌طور کامل از آثار زیان‌بار آن جلوگیری کرد، اما می‌توان زیان‌های آنها را به حداقل رساند (سعیدی، میرحسینی، صداقت و مصطفایی‌پور، ۲۰۱۱).

در ادامه به پژوهش‌هایی که در ارتباط با پتانسیل انرژی باد در داخل و خارج از کشور انجام شده، اشاره می‌شود.

سگورو و لامبرت (۲۰۰۰) از سه روش حداکثر راست‌نمایی، روش حداکثر راست‌نمایی اصلاح‌شده و روش گرافیکی، برای محاسبه پارامترهای توزیع ویبول استفاده کردند. نامبردگان روش حداکثر راست‌نمایی برای سری‌های زمانی داده‌های باد مناسب دانسته و روش حداکثر راست‌نمایی اصلاح‌شده را برای تطبیق داده‌های باد با یکی از توابع توزیع فراوانی پیشنهاد می‌کنند. آنها نتیجه گرفتند روش گرافیکی دقت کمتری دارد.

دورولو (۲۰۰۱) برای مدل‌سازی سرعت باد در چهار ایستگاه عمان، از توزیع ویبول استفاده کرده است. وی

پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول را با استفاده از روش گشتاورها، روش رگرسیون و روش کی‌دو برآورد کرده است. نتیجه پژوهش دورولو نشان داد که برآوردها با استفاده از روش کی‌دو و آزمون کلموگروف - اسمیرنوف برآزش بهتری با داده‌ها دارد.

صلاحی (۱۳۸۳) با استفاده از توزیع ویبول به بررسی پتانسیل انرژی باد در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل

(خلخال، پارس‌آباد، مشکین‌شهر و اردبیل) پرداخت. نتیجه پژوهش وی نشان داد که چگالی توان باد در اردبیل برابر با ۳۴۲ وات در متر مربع است. در نتیجه از میان ایستگاه‌های مطالعه‌شده، ایستگاه سینوپتیک اردبیل می‌تواند مکان مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی باد محسوب شود.

زاهدی، صلاحی و جمیل (۱۳۸۴) به‌منظور استفاده از انرژی باد، چگالی توان باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل با

استفاده از آمار بادهای ساعتی و روزانه ده سال محاسبه کردند. چگالی توان باد در این ایستگاه ۲۹۵/۳۸ وات در متر مربع

برآورد شد. از کل ساعات سال نیز، توربین بادی می‌تواند ۳۶۵۲/۵ ساعت در این ایستگاه تولید انرژی کند. همچنین این ایستگاه را می‌توان از نقاط مناسب برای بهره‌برداری از انرژی باد دانست.

میرحسینی، شریفی و صداقت (۲۰۱۱) با استفاده از توزیع ویبول، مکان‌های پتانسیل انرژی باد را در پنج شهر استان سمنان (بیارجمند، دامغان، گرمسار، سمنان و شاهرود) برای سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۳ و در ارتفاعات ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری برآورد کردند. نتایج پژوهش نشان داد در بین ایستگاه‌های مطالعاتی، دامغان پتانسیل بالایی برای استفاده از انرژی باد دارد. همچنین چگالی انرژی باد در ارتفاع ۱۰ متری حدود ۱۷۷-۱۷۲ وات بر متر مربع برآورد شد.

علمداری، نعمت‌اللهی و میرحسینی (۲۰۱۲) با استفاده از توزیع ویبول، پتانسیل انرژی باد ایران را در سال ۲۰۰۷ و برای سه سطح ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری با آمار ۶۸ ایستگاه ارزیابی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد مناطق شرق و شمال غربی ایران پتانسیل خوبی برای نصب توربین‌های بادی دارند، در حالیکه مناطق مرکزی و جنوبی ایران از این پتانسیل برخوردار نیستند.

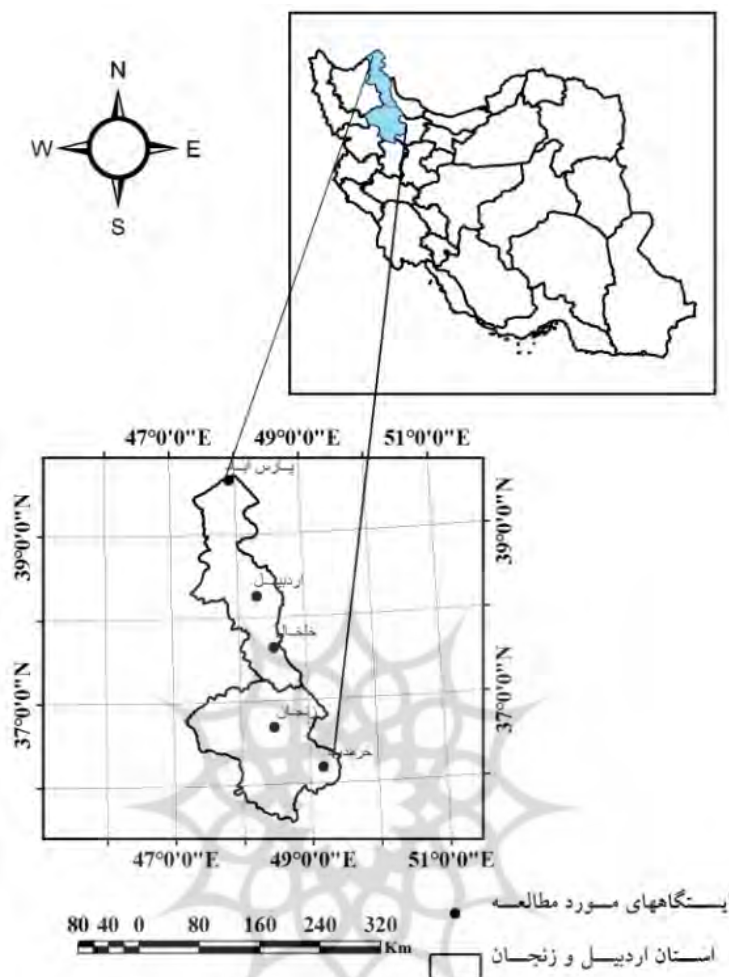
سعیدی، نعمت‌اللهی و عالم رجبی (۱۳۹۰) پتانسیل انرژی باد را در استان خراسان شمالی با استفاده از توزیع ویبول بررسی کردند. آنها برای این کار از آمار و اطلاعات دو ایستگاه بجنورد و اسفراین بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ بهره برده‌اند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد چگالی توان باد شهر بجنورد در ارتفاع ۳۰ متری و ۴۰ متری به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۲۵۰ وات بر مترمربع است. مقدار این شاخص برای شهر اسفراین نیز حدود ۲۰۰ و ۳۰۰ وات بر متر مربع به دست آمده است.

محمدی، رستمی جلیلیان، تقوی و شمسی‌پور (۱۳۹۱) پتانسیل انرژی باد را با استفاده از داده‌های سه ساعته، سمت و سرعت باد پنج ایستگاه سینوپتیک (سرپل ذهاب، کرمانشاه، کنگاور، اسلام‌آباد غرب و روانسر) در یک دوره آماری ده‌ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۷) ارزیابی کردند. آنها برای این کار از توزیع احتمالاتی ویبول استفاده کردند و نشان دادند که در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور، پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی باد دارند.

روش‌های زیادی برای برآورد پارامترهای توزیع ویبول وجود دارد. از آنجایی که این پارامترها در تخمین پتانسیل انرژی باد در یک منطقه به کار می‌روند، استفاده از روش مناسب برای برآورد آنها ضرورت دارد. بنابراین در این مطالعه شش روش برآورد پارامترها بررسی می‌شود تا از بین آنها مناسب‌ترین روش انتخاب شده و به کمک روش برتر، پتانسیل تولید انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان برآورد شود.

معرفی محدوده مورد مطالعه

منطقه منتخب برای مطالعه، استان‌های اردبیل و زنجان در شمال غرب ایران هستند. در این دو استان پنج ایستگاه سینوپتیکی انتخاب شد که حداقل دارای داده‌های دوره آماری ۲۳ سال (۲۰۰۹-۱۹۸۷) سرعت باد بودند. نام و موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور به دست آمده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

برآورد پارامترهای توزیع ویبول

برای تطبیق داده‌های سرعت باد ایستگاه‌ها در مقیاس ماهانه و سالانه، تابع توزیع ویبول انتخاب شد. برای تخمین پارامترهای توزیع ویبول از روش‌های زیر استفاده شده است:

۱. روش گرافیکی

اساس این روش، استفاده از احتمال کمتری ($F(v)$) به شرح رابطه ۱ است.

$$\ln\{-\ln[1-F(v)]\} = k \ln(v) - k \ln(c) \quad \text{رابطه ۱}$$

رابطه ۱، یک رابطه خطی است که طرف چپ آن متغیر وابسته (y) است و $\ln(v)$ متغیر مستقل (x) فرض می‌شود. مقدار k از شیب خط به دست می‌آید. با قرائت مقدار k از روی نمودار و مساوی قرار دادن حاصل آن با $-k \ln(c)$ مقدار c را می‌توان محاسبه کرد.

۲. روش حداکثر راست‌نمایی

این روش مبتنی بر تکرارهای عددی برای تخمین پارامترهای توزیع آماری مانند ویبول است. در این روش پارامترهای k و c با روش‌های عددی و استفاده از روابط ۲ و ۳ برآورد شدند (روکا، سوسا، آندرید و سیلوا، ۲۰۱۲؛ چانگ، ۲۰۱۱).

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{رابطه ۳}$$

ابتدا برای k عددی دلخواه (مانند ۰/۲) انتخاب می‌شود، سپس با توجه به مقادیر سرعت باد (v_i) سمت راست رابطه ۲ تخمین زده می‌شود، حاصل آن تقریب بعدی برای k خواهد بود. این عمل تا جایی تکرار می‌شود که اختلاف k در دو بار محاسبه پیاپی از عدد کوچک مانند ۰/۰۰۰۱ کمتر باشد. در چنین حالتی پارامتر k برآورد شده است. با در دست داشتن مقدار k می‌توان مقدار پارامتر c را از رابطه ۳ به دست آورد. در پژوهش پیش رو این محاسبات به کمک نرم‌افزار متلب انجام شده است.

۳. روش عامل الگوی انرژی

این روش را روکا و همکارانش (۲۰۱۲) ابداع کرده‌اند. در این روش برای تخمین پارامترهای توزیع ویبول از میانگین داده‌های سرعت باد (\bar{v}) و مکعب داده‌های سرعت باد استفاده می‌شود. اکتاگ و دینلر (۲۰۰۹) این روش را با نام روش چگالی توان به کار برده‌اند. در این روش ابتدا مقدار پارامتر E_{pf} از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. آنگاه پارامتر k از رابطه ۵ به دست می‌آید. با در دست داشتن مقدار k پارامتر c به کمک رابطه ۶ برآورد خواهد شد.

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^r}{(\bar{v}^r)} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه \bar{v} سرعت متوسط باد است.

$$K = 1 + \frac{3.69}{(E_{pf})^r} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

۴. روش گشتاورهای مرسوم

در این روش مقادیر پارامترهای k و c همزمان با حل معادلات ۷ و ۸ به دست آمد.

$$\sigma = c \Gamma \left[\left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^r \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/r} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن، \bar{v} میانگین و σ انحراف معیار داده‌های سرعت باد هستند. با حل همزمان دستگاه معادلات دو مجهولی (غیر خطی) در روابط ۷ و ۸، مقدار پارامترهای k و c به دست آمد. محاسبات مربوط به این روش با نوشتن کد برنامه در محیط Maple انجام شد.

۵. روش تجربی

در این روش برای محاسبه پارامترهای تابع توزیع ویبول، لازم است از میانگین سرعت‌های مشاهداتی و انحراف معیار آنها برای حل دستگاه دو معادله دو مجهولی (غیر خطی) استفاده می‌شود که مجهول‌های آن، پارامترهای تابع توزیع ویبول هستند (رابطه‌های ۹ و ۱۰).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

۶. روش گشتاورهای وزنی احتمالاتی

این روش بر پایه محاسبه کمیت‌های a_s ($s = 0, 1, 2$) یا b_r ($r = 0, 1, 2$) بنا شده است (رائو و حامد، ۲۰۰۰: ۵۳).

$$a_s = \hat{a}_s = \hat{M}_{1,s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \binom{N-i}{s} x_i / \binom{N-1}{s} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$b_r = \hat{b}_r = \hat{M}_{1,r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \binom{i-1}{r} x_i / \binom{N-1}{r} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن، N تعداد داده‌ها و x_i هر یک از داده‌ها به ترتیب صعودی هستند. پس از محاسبه a_s یا b_r گشتاورهای خطی به دست آمده و از روی آن پارامترها برآورد شدند. با توجه به پارامترهای برآورد شده، میزان انرژی باد در هر ایستگاه محاسبه شد. یادآوری می‌شود که در مواردی که مقدار پارامتر شکل تابع توزیع ویبول کمتر از عدد ۱ به دست می‌آید، محاسبه بعضی از خصوصیات انرژی باد از نظر ریاضی امکان‌پذیر نبود. محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد دارای حداکثر انرژی با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۴ و پارامتر شکل و مقیاس محاسبه شد (لی، ۲۰۰۷: ۷۵؛ اسکین، آرتار و تولون، ۲۰۰۸).

$$U_{mp} = c\left(1 - \frac{1}{k}\right)^{(v/k)} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$U_{max,E} = c\left(1 + \frac{2}{k}\right)^{(v/k)} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در روابط ۱۳ و ۱۴ U_{mp} محتمل‌ترین سرعت باد (متر بر ثانیه) و $U_{max,E}$ سرعت باد دارای حداکثر انرژی (متر بر ثانیه) است. در این مطالعه، مقادیر U_{mp} و $U_{max,E}$ با استفاده از پارامترهای k و c که با بهترین روش تخمین پارامترها به دست آمد، محاسبه شده است. در این پژوهش برای محاسبه چگالی توان باد (P/A) و چگالی انرژی باد (E/A) از روابط ۱۵، ۱۶ و ۱۷ استفاده شد (لی، ۲۰۰۷: ۷۶؛ مصطفایی پور، صداقت، دهقان نیری و کلانتر، ۲۰۱۱: ۲۵۴۹).

$$P(U) = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\frac{P}{A} = \int_0^{\infty} P(U) f(U) dU = \frac{1}{2} \rho c^r \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^r \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) T^* \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در روابط فوق چگالی هوا است که در این مطالعه مقدار استاندارد آن؛ یعنی ۱/۲۲۵ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شد. بر اساس مقدار چگالی توان باد و معیارهای مربوط به آن، ایستگاه‌ها به این ترتیب طبقه‌بندی شدند (سعیدی و همکاران، ۲۰۱۱):

- چگالی توان باد کمتر از ۱۰۰ وات بر متر مربع باشد = ضعیف
- چگالی توان باد حدود ۴۰۰ = خوب
- چگالی توان باد بیشتر از ۷۰۰ = زیاد.

یافته‌های پژوهش

ابتدا با استفاده از روش‌های تجربی، گرافیکی، گشتاورها، گشتاورهای وزنی احتمالاتی، حداکثر راست‌نمایی و عامل الگوی انرژی، مقادیر پارامتر شکل و مقیاس توزیع ویبول برای ایستگاه‌های مورد مطالعه تخمین زده شد. سپس با استفاده از آزمون کی‌دو مناسب‌ترین روش انتخاب شد. نتیجه این آزمون برای پنج ایستگاه مورد بررسی نشان داد که روش گشتاورهای مرسوم به دلیل مقدار کی دو پایین‌تر، در مقایسه با سایر روش‌ها مناسب‌تر است؛ بنابراین محاسبه پارامترهای مربوط به پتانسیل انرژی باد با استفاده از این روش برای همه ایستگاه‌ها صورت گرفت که به دلیل پرهیز از طولانی‌شدن مقاله، در جدول ۱ فقط نتایج مربوط به ایستگاه اردبیل نشان داده شده است. جدول ۲ نیز مقادیر پارامترهای شکل و مقیاس تابع توزیع ویبول را با استفاده از روش گشتاورها برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود بین سه ایستگاه منتخب واقع در استان اردبیل، پارامتر مقیاس مشابه به هم نبوده و تفاوت زیادی دارد. در ایستگاه اردبیل مقدار سالانه این پارامتر برابر با ۳/۹۰، در پارس‌آباد برابر با ۱/۹۶ و در خلخال ۲/۰۹ متر بر ثانیه است. در ایستگاه اردبیل بالاترین مقدار پارامتر شکل (k) و مقیاس (c) در ماه فوریه بوده، اما در ایستگاه پارس‌آباد و خلخال بالاترین مقادیر شکل و مقیاس در ماه ژوئیه مشاهده شده است. بین دو ایستگاه منتخب در استان زنجان، تفاوت چشمگیری در مقیاس سالانه از نظر پارامتر مقیاس مشاهده نشد. در مقیاس ماهانه نیز بالاترین مقدار پارامترهای توزیع ویبول در هر دو ایستگاه در ماه ژوئیه بوده، اما پایین‌ترین مقدار آن در زنجان در ماه اکتبر و در خرم‌دره در ماه نوامبر به چشم می‌خورد. میرحسینی و همکاران (۲۰۱۱) حداقل و حداکثر مقدار k را برای پنج ایستگاه در استان سمنان به ترتیب ۱/۷۹ و ۳/۱۷ محاسبه کردند و دامنه تغییرات پارامتر c را بین ۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه به دست آوردند. سعیدی و همکاران (۲۰۱۱) نیز مقدار پارامتر c را بین ۵/۹۵ - ۵/۵۱ و تغییرات پارامتر k را بین ۱/۹۳ - ۱/۳۴ گزارش کرده‌اند.

جدول ۱. مقادیر ماهانه پارامتر شکل و مقیاس با روش‌های مختلف در ایستگاه اردبیل

روش	پارامتر/ ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
گرافیکی	k	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۳
	c	۲/۸۲	۳/۹۳	۳/۳۴	۳/۴۰	۲/۶۳	۲/۷۴	۳/۴۷	۳/۱۱	۲/۶۱	۲/۲۳	۲/۴۷	۲/۹۸
تجربی	k	۰/۸۵	۱/۰۲	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۰	۰/۹۳	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۹
	c	۳/۷۵	۴/۷۷	۴/۲۲	۴/۳۱	۳/۵۳	۳/۶۶	۴/۳۹	۴/۰۶	۳/۵۸	۳/۱۵	۳/۴۳	۳/۹۸
گشتاورهای مرسوم	k	۰/۸۶	۱/۰۲	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۴	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸۴	۰/۹۰
	c	۳/۷۹	۴/۷۶	۴/۲۲	۴/۱۷	۳/۵۴	۳/۶۷	۴/۳۹	۴/۰۶	۳/۵۹	۳/۱۷	۳/۴۷	۴/۰۱
حداکثر راست‌نمایی	k	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۸
	c	۲/۸۱	۳/۷۲	۳/۲۲	۳/۲۸	۲/۵۹	۲/۶۸	۳/۳۰	۲/۹۹	۲/۵۶	۲/۲۳	۲/۴۸	۲/۹۳
گشتاورهای وزنی	k	۰/۸۱	۱/۰۹	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۸۱	۱/۰۱	۰/۹۱	۰/۷۸	۰/۶۷	۰/۷۳	۰/۸۷
	c	۳/۲۶	۳/۶۲	۳/۳۴	۳/۴۴	۲/۹۲	۲/۹۶	۳/۳۲	۳/۱۵	۲/۹۱	۲/۷۳	۳/۰۴	۳/۳۴
عامل الگوی انرژی	k	۱/۰۷	۱/۱۶	۱/۱۳	۱/۱۲	۱/۱۰	۱/۱۲	۱/۱۹	۱/۱۷	۱/۱۳	۱/۰۸	۱/۰۷	۱/۰۹
	c	۴/۱۹	۴/۹۹	۴/۴۹	۴/۶۰	۳/۸۴	۳/۹۴	۴/۶۰	۴/۳۰	۳/۸۷	۳/۵۱	۳/۸۸	۴/۳۶

جدول ۲. پارامترهای توزیع ویبول با روش گشتاورها برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری

ایستگاه	پارامتر/ ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
اردبیل	k	۰/۸۶	۱/۰۲	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۴	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۹۳
	c	۳/۷۹	۴/۷۶	۴/۲۲	۴/۱۷	۳/۵۴	۳/۶۷	۴/۳۹	۴/۰۶	۳/۵۹	۳/۱۷	۳/۴۷	۴/۰۱	۳/۹۰
پارس‌آباد	k	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۸۳
	c	۱/۵۷	۱/۷۱	۲/۰۸	۲/۱۳	۲/۲۳	۲/۵۷	۲/۷۵	۲/۶۳	۲/۰۲	۱/۳۲	۱/۱۵	۱/۳۲	۱/۹۶
خلخال	k	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۸۹	۰/۸۴	۱/۰۴	۱/۲۵	۱/۱۰	۰/۸۶	۰/۷۶	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۸۷
	c	۱/۲۷	۱/۷۳	۱/۸۸	۲/۳۳	۱/۹۴	۲/۷۷	۳/۷۷	۳/۰۶	۱/۹۹	۱/۵۵	۱/۴۱	۱/۳۴	۲/۰۹
زنجان	k	۱/۲۰	۱/۲۶	۱/۲۴	۱/۲۵	۱/۲۲	۱/۱۹	۱/۲۵	۱/۲۳	۱/۱۶	۱/۱۴	۱/۲۱	۱/۲۳	۱/۲۱
	c	۲/۶۶	۳	۳/۲۲	۳/۲۱	۲/۹۳	۳	۳/۲۹	۳/۱۳	۲/۷۰	۲/۴۵	۲/۵۰	۲/۵۴	۲/۸۹
خرم‌دره	k	۰/۹۶	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۱۱	۱/۰۵	۱/۰۹	۱/۱۴	۱/۰۷	۰/۹۴	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۶	۱
	c	۲/۴۳	۲/۸۶	۳/۰۲	۳/۲۲	۲/۸۳	۳/۵۸	۳/۹۶	۳/۴۳	۲/۶۷	۲/۱۸	۲/۰۱	۱/۸۵	۲/۸۴

جدول ۳. مقادیر چگالی توان باد در استان‌های زنجان و اردبیل

	اردبیل			پارس آباد			خلخال			زنجان			خرم‌دره			
	۴۰ m	۲۰ m	۱۰ m	۴۰ m	۲۰ m	۱۰ m	۴۰ m	۲۰ m	۱۰ m	۴۰ m	۲۰ m	۱۰ m	۴۰ m	۲۰ m	۱۰ m	
ژانویه	۵۸۵/۸	۴۵۵/۳	۳۵۸/۱	۷۹/۳	۶۸/۴	۴۸/۷	۹۳/۶	۶۷/۱	۴۸/۹	۸۸/۲	۵۷/۱	۳۷/۳	۱۲۵/۲	۸۵/۸	۵۹/۴	
فوریه	۶۲۰/۸	۴۷۱/۳	۳۶۱/۳	۱۱۱/۷	۷۸/۹	۵۶/۶	۱۲۸/۹	۹۲/۶۱	۶۷/۴	۱۱۰/۱	۷۱/۹	۴۷/۴	۱۵۴/۹	۱۰۶/۵	۷۳/۹	
مارس	۵۳۹/۳	۴۰۹/۲	۳۱۳/۷	۱۳۵	۹۵/۳	۶۸	۱۳۴/۲	۶۹/۵	۶۹/۳	۱۳۶/۵	۹۰/۸	۶۰/۸	۱۸۳/۶	۱۲۷/۹	۹۰	
آوریل	۵۸۲/۸	۴۴۷	۳۴۶/۷	۱۳۸/۶	۹۷/۸	۶۹/۸	۱۴۸/۱	۱۰۴	۷۴	۱۳۳/۷	۸۸/۷	۵۹/۳	۱۷۵/۸	۱۲۰/۷	۸۳/۶	
می	۴۰۳/۱	۳۰۲/۲	۲۲۹/۲	۱۳۴/۲	۹۳/۷	۶۶/۲	۱۱۰/۴	۷۶/۷	۵۴	۱۱۰/۴	۷۲/۵	۴۷/۹	۱۴۵/۲	۹۹/۱	۶۸/۳	
ژوئن	۴۰۲/۵	۳۰۰/۴	۲۲۶/۶	۱۴۲/۷	۹۸/۶	۶۸/۸	۱۴۱/۲	۹۶/۴	۶۶/۴	۱۲۲/۲	۸۱	۵۴/۱	۲۴۲/۸	۱۷۰/۹	۱۲۱/۳	
ژوئیه	۴۸۱/۴	۳۵۸/۶	۲۶۹/۳	۱۶۰/۷	۱۱۱/۶	۷۸/۳	۲۰۱/۲	۱۳۷/۲	۹۴/۳	۱۴۲/۱	۹۴/۶	۶۳/۵	۲۸۰/۵	۱۹۸/۱	۱۴۱/۱	
اگوست	۴۳۵/۷	۳۲۳/۸	۲۴۳/۱	۱۵۷/۱	۱۰۹/۵	۷۷/۱	۱۵۷/۲	۱۰۷/۲	۷۳/۸	۱۲۸/۴	۸۵	۵۶/۸	۲۲۹	۱۶۱	۱۱۴/۲	
سپتامبر	۳۸۵/۲	۲۸۶/۷	۲۱۵/۸	۱۲۴	۸۷	۶۱/۷	۱۰۷/۴	۷۴/۲	۵۱/۸	۹۹/۲	۶۵	۴۳	۱۷۳/۴	۱۲۲/۱	۸۶/۸	
اکتبر	۳۶۳/۶	۲۷۳/۲	۲۰۷/۸	۹۱/۱	۶۴/۹	۴۶/۹	۹۳/۴	۶۵/۵	۴۶/۵	۸۰/۵	۵۲/۲	۳۴/۱	۱۳۲/۲	۹۲/۵	۶۵/۴	
نوامبر	۵۰۵/۹	۳۹۰/۸	۳۰۵/۶	۷۵/۶	۵۳/۵	۳۸/۵	۹۵	۶۷/۴	۴۸/۵	۷۴/۴	۴۷/۶	۳۰/۶	۱۰۷/۳	۷۴	۵۱/۶	
دسامبر	۵۸۷/۱	۴۵۳/۲	۳۵۳/۸	۸۹/۱	۶۳/۳	۴۵/۷	۹۳/۹	۶۷	۴۸/۵	۷۴/۲	۴۷/۳	۳۰/۴	۹۲/۶	۶۳/۴	۴۳/۹	
سالانه	۴۹۱/۲	۳۷۳/۶	۲۸۵/۵	۱۱۸/۹	۸۷/۲	۶۱/۷	۱۱۹/۱	۸۵/۶	۵۹/۳	۱۰۷/۲	۷۰/۸	۴۷	۱۶۶/۴	۱۱۵/۱	۸۲/۴	

بهترین راه برای ارزیابی منبع باد موجود در یک منطقه، محاسبه مقادیر چگالی توان باد است که نشان می‌دهد چه مقدار انرژی در آن منطقه برای تبدیل به الکتریسیته توسط توربین بادی وجود دارد (میرحسینی و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۵۷). نتایج نشان داد که در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، چگالی توان باد در ایستگاه اردبیل چشمگیر است. در سایر ایستگاه‌ها و در ارتفاع ۱۰ متری، در اکثر ماه‌های سال این مقدار کمتر از ۱۰۰ است. از نظر تغییرات زمانی نیز بین ایستگاه‌های منتخب اختلاف وجود دارد. برای مثال، در ایستگاه خرم‌دره حداکثر چگالی توان باد در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت مشاهده می‌شود؛ در حالیکه در ایستگاه اردبیل بیشترین توان باد در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه به دست می‌آید. ایستگاه اردبیل با توجه به معیار تقسیم‌بندی ایستگاه‌ها که در قسمت مواد و روش‌ها ذکر شده است، در گروه سوم جای می‌گیرد و از توان زیادی برخوردار است. سایر ایستگاه‌ها عموماً در گروه اول جای می‌گیرند و توان ناچیزی دارند. میرحسینی و همکاران (۲۰۱۱) مقدار این پارامتر را در ارتفاع ۱۰ متری استان سمنان بین ۱۷۲-۱۷۷ وات بر متر مربع برآورد کرده‌اند.

جدول ۴. مقادیر چگالی انرژی باد در استان‌های زنجان و اردبیل

	خرم‌دره			زنجان			خلخال			پارس آباد			اردبیل		
	۱۰	۲۰	۴۰	۱۰	۲۰	۴۰	۱۰	۲۰	۴۰	۱۰	۲۰	۴۰	۱۰	۲۰	۴۰
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
ژانویه	۴۲/۷	۶۱/۸۰	۹۰/۲۱	۲۶/۸۷	۴۱/۱۶	۶۳/۵۵	۳۵/۲۳	۴۸/۳۶	۶۷/۴۲	۳۵/۱۲	۴۹/۲۹	۷۰/۱۲	۲۵۷/۸۷	۳۲۷/۸۶	۴۲۱/۸۱
فوریه	۵۳/۲	۷۶/۶۹	۱۱۱/۵۶	۳۴/۱۴	۵۱/۸۲	۷۹/۲۸	۴۸/۵۴	۶۶/۶۸	۹۲/۸۶	۴۰/۷۵	۵۶/۸۷	۸۰/۴۳	۲۶۰/۱۶	۳۳۹/۲۵	۴۴۷/۰۲
مارس	۶۴/۸۱	۹۲/۱۳	۱۳۲/۲۳	۴۳/۸	۶۵/۳۸	۹۸/۳۲	۴۹/۹۲	۵۰/۱۰	۹۶/۶۳	۴۸/۹۸	۶۸/۵۹	۹۷/۲۴	۲۲۵/۹۱	۲۹۴/۶۴	۳۸۸/۳۵
آوریل	۶۰/۲۰	۸۶/۹۲	۱۲۶/۶۲	۴۲/۷	۶۳/۹۰	۹۶/۳۲	۴۹/۹۲	۵۰/۱۰	۹۶/۶۳	۵۰/۲۸	۷۰/۴۲	۹۹/۸۲	۲۴۹/۶۲	۳۲۱/۸۹	۴۱۹/۶۲
می	۴۹/۲۴	۷۱/۴۱	۱۰۴/۵۴	۳۴/۵	۵۲/۲۱	۷۹/۵۲	۳۸/۸۸	۵۵/۲۷	۷۴/۹۴	۷۹/۵۴	۶۷/۵۳	۹۶/۶۵	۱۶۵/۰۴	۲۱۷/۶۵	۲۹۰/۲۳
ژوئن	۸۷/۳۹	۱۲۳/۰۵	۱۷۴/۸۲	۳۹	۵۸/۳۶	۸۸/۰۴	۴۷/۸۴	۶۹/۴۰	۹۰/۱۶۶	۴۹/۵۸	۷۱/۰۲	۱۰۲/۸۱	۱۶۳/۱۶	۲۱۶/۲۹	۲۸۹/۸۳
ژوئیه	۱۰۱/۶۲	۱۴۲/۶۶	۲۰۱/۹۹	۴۵/۷۳	۶۸/۱۴	۱۰۲/۳۲	۶۷/۹۲	۹۸/۸۲	۱۴۴/۸۹	۵۶/۳۹	۸۰/۳۸	۱۱۵/۷۳	۱۹۳/۹۰	۲۵۸/۰۲	۳۴۶/۶۷
آگوست	۸۲/۲۵	۱۱۵/۹۲	۱۶۴/۸۹	۴۰/۹۰	۶۱/۲۶	۹۲/۴۶	۵۳/۱۶	۷۷/۲۳	۱۱۳/۲۰	۵۵/۵۱	۷۸/۸۴	۱۱۳/۱۵	۱۷۵/۰۵	۲۳۳/۱۷	۳۱۳/۷۴
سپتامبر	۶۲/۵۵	۸۷/۹۲	۱۲۴/۹۱	۳۰/۹۷	۴۶/۸۴	۷۱/۴۴	۳۷/۳۶	۵۳/۴۵	۷۷/۳۶	۴۴/۴۷	۶۲/۶۵	۸۹/۳۴	۱۵۵/۴۰	۲۰۶/۴۹	۲۷۷/۳۶
اکتبر	۴۷/۱۵	۶۶/۶۰	۹۵/۲۰	۲۴/۵۷	۳۷/۵۹	۵۸/۰۲	۳۳/۵۱	۴۷/۱۶	۶۷/۲۸	۳۳/۷۸	۴۶/۷۵	۶۵/۶۶	۱۴۹/۶۲	۱۹۶/۷۷	۲۶۱/۸۴
نوامبر	۳۷/۲۱	۵۳/۳۲	۷۷/۲۹	۲۲/۰۹	۳۴/۲۷	۵۳/۵۹	۳۴/۹۸	۴۸/۵۷	۶۸/۴۱	۲۷/۷۳	۳۸/۵۵	۵۴/۴۳	۲۲۰/۰۴	۲۸۱/۴۲	۳۶۴/۲۹
دسامبر	۳۱/۶۷	۴۵/۷۰	۶۶/۷۴	۲۱/۸۹	۳۴/۰۷	۵۳/۴۳	۳۴/۹۷	۴۸/۲۸	۶۷/۶۵	۳۲/۹۰	۴۵/۶۲	۶۴/۱۹	۲۵۴/۷۴	۳۲۶/۳۲	۴۲۲/۷۵
سالانه	۵۹/۳۷	۸۲/۹۲	۱۱۹/۸۴	۳۳/۸۷	۵۱/۰۴	۷۷/۲۲	۴۲/۷۰	۶۱/۶۳	۸۵/۷۸	۴۴/۴۲	۶۲/۸۳	۸۵/۶۳	۲۰۵/۶۳	۲۶۹/۰۱	۳۵۳/۶۸

واحد ارقام فوق کیلو وات ساعت بر متر مربع است.

در جدول ۵ مقادیر چگالی انرژی باد در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری آمده است. بالاترین مقدار چگالی انرژی باد در ایستگاه اردبیل و حداقل آن در ایستگاه زنجان مشاهده می‌شود. از نظر تغییرات زمانی نیز بین ایستگاه‌های مطالعه شده تفاوت‌هایی به چشم می‌خورد؛ به طوری که در ایستگاه اردبیل در ماه‌های سرد سال مقدار چگالی انرژی باد بیشتر بوده و سپس با نزدیک شدن به فصل بهار این مقدار کاهش می‌یابد، در دو ماه آخر سال بار دیگر این مقدار افزایش نشان می‌دهد؛ در حالیکه در سایر ایستگاه‌ها این روند به چشم نمی‌خورد. کمترین مقدار سالانه این پارامتر در ایستگاه زنجان مشاهده می‌شود.

حداکثر سرعت باد محتمل برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری محاسبه شد. در جدول ۵ ستون‌های بدون عدد نشان می‌دهند که در این ماه‌ها مقادیر پارامتر شکل از عدد ۱ کمتر بوده است. در ارتفاع ۱۰ متری بالاترین مقدار این پارامتر در ایستگاه خلخال (برابر با ۲ متر بر ثانیه) در ماه ژوئیه مشاهده می‌شود. حداقل مقدار آن نیز در ماه مارس در ایستگاه خرم‌دره روی می‌دهد که برابر با ۰/۱۸ متر بر ثانیه است.

جدول ۵. مقادیر محتمل‌ترین سرعت باد در استان‌های اردبیل و زنجان

اردبیل			پارس آباد			خلخال			زنجان			خرم‌دره			
۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۸۴	۱/۸۸	۱/۱۶	۰/۸۲	۰/۱۹	-	ژانویه
۲/۳۵	۱/۰۸	۰/۲۰	-	-	-	-	-	-	۳/۵۷	۲/۴۹	۱/۶۵	۱/۶۸	۰/۸۱	۰/۲۳	فوریه
۱/۲۸	۰/۲۸	-	-	-	-	-	-	-	۳/۶۵	۲/۵۲	۱/۶۵	۱/۶۵	۰/۷۶	۰/۱۸	مارس
۰/۸	-	-	-	-	-	۰/۱۱	-	-	۳/۷۱	۲/۵۸	۱/۷۰	۲/۶۲	۱/۵۷	۰/۸۱	آوریل
۰/۴۸	-	-	۰/۰۷	-	-	-	-	-	۳/۲۲	۲/۱۸	۱/۳۹	۱/۷۹	۰/۹۱	۰/۳۲	می
۰/۸۴	۰/۰۳	-	۰/۹۰	۰/۲۳	-	۱/۶۶	۰/۸۱	۰/۲۴	۳/۱۲	۲/۰۷	۱/۲۸	۲/۶۷	۱/۵۵	۰/۷۵	ژوئن
۲/۳۹	۱/۱۷	۰/۳۲	۱/۱۴	۰/۳۹	-	۴/۳۲	۳/۰۴	۲/۰۴	۳/۸۱	۲/۶۶	۱/۷۶	۳/۵۰	۲/۲۴	۱/۲۹	ژوئیه
۱/۷۴	۰/۶۷	-	۰/۸۱	۰/۱۵	-	۲/۳۹	۱/۴۰	۰/۶۹	۳/۵۲	۲/۴۱	۱/۵۷	۲/۳۴	۱/۲۹	۰/۵۵	اگوست
۰/۷۸	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۶۲	۱/۶۷	۰/۹۷	۰/۶۳	۰/۰۲	-	سپتامبر
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۲۷	۱/۴۰	۰/۷۷	-	-	-	اکتبر
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۷۵	۱/۸۳	۱/۱۴	-	-	-	نوامبر
۰/۳۴	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۹۴	۱/۹۹	۱/۲۸	-	-	-	دسامبر
۰/۷۲	-	-	-	-	-	-	-	-	۳/۱۱	۲/۰۹	۱/۳۰	۱/۲۸	۰/۵۳	-	سالانه

واحد ارقام فوق متر بر ثانیه است.

جدول ۶. مقادیر سرعت باد دارای حداکثر انرژی در استان‌های اردبیل و زنجان

اردبیل			پارس آباد			خلخال			زنجان			خرم‌دره			
۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	۴۰	۲۰	۱۰	
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
۱۶/۴۱	۱۵/۲۹	۱۴/۳۳	۹/۲۶	۸/۳۹	۷/۶۵	۹/۴۲	۸/۶۴	۷/۹۸	۸/۴۲	۷/۳۲	۶/۳۸	۹/۶۵	۸/۵۹	۷/۶۸	ژانویه
۱۶/۳۵	۱۵/۰۳	۱۳/۸۹	۹/۶۵	۸/۷۶	۷/۹۹	۱۰/۱۹	۹/۳۰	۸/۵۵	۹/۰۴	۷/۸۸	۶/۸۸	۱۰/۲۷	۹/۱۳	۸/۱۶	فوریه
۱۵/۷۰	۱۴/۴۶	۱۳/۳۹	۱۰/۱۱	۹/۱۳	۸/۳۰	۱۰/۲۳	۸/۲۱	۸/۵۱	۹/۷۲	۸/۵۲	۷/۴۹	۱۰/۸۸	۹/۷۲	۸/۷۳	مارس
۱۶/۱۹	۱۴/۹۸	۱۳/۹۴	۱۰/۱۸	۹/۱۹	۸/۳۵	۱۰/۳۲	۹/۲۹	۸/۴۱	۹/۶۵	۸/۴۵	۷/۴۲	۱۰/۶۵	۹/۴۵	۸/۴۲	آوریل
۱۴/۳۵	۱۳/۱۹	۱۲/۱۹	۱۰	۸/۹۸	۸/۱۲	۹/۴۴	۸/۴۹	۷/۶۷	۹/۰۷	۷/۹۱	۶/۹۳	۱۰/۰۴	۸/۹۱	۷/۹۳	می
۱۴/۲۹	۱۳/۱۰	۱۲/۰۷	۱۰/۰۷	۸/۹۹	۸/۰۶	۹/۹۶	۸/۸۳	۷/۸۷	۹/۳۹	۸/۲۲	۷/۲۳	۱۱/۸۸	۱۰/۶۳	۹/۵۵	ژوئن
۱۵	۱۳/۷۰	۱۲/۵۶	۱۰/۴۵	۹/۳۴	۸/۳۹	۱۱/۰۶	۹/۷۷	۸/۶۶	۹/۸۵	۸/۶۳	۷/۵۹	۱۲/۴۲	۱۱/۱۲	۹/۹۹	ژوئیه
۱۴/۵۶	۱۳/۳۰	۱۲/۲۱	۱۰/۴۱	۹/۳۲	۸/۳۹	۱۰/۲۷	۹/۰۹	۸/۰۹	۹/۵۳	۸/۳۴	۷/۳۲	۱۱/۶۷	۱۰/۴۴	۹/۳۹	اگوست
۱۴/۰۹	۱۲/۹۰	۱۱/۸۸	۹/۸۳	۸/۸۶	۸/۰۳	۹/۳۲	۸/۳۵	۷/۵۳	۸/۷۷	۷/۶۶	۶/۷۱	۱۰/۷۹	۹/۷۰	۸/۷۶	سپتامبر
۱۳/۹۹	۱۲/۸۹	۱۱/۹۴	۹/۲۶	۸/۴۶	۷/۷۹	۹/۱۴	۸/۲۷	۷/۵۳	۸/۱۹	۷/۱۳	۶/۲۲	۹/۹۷	۸/۹۷	۸/۱۱	اکتبر
۱۵/۶۹	۱۴/۶۰	۱۳/۶۷	۸/۸۰	۸/۰۴	۷/۴۰	۹/۳۲	۸/۵۰	۷/۸۰	۷/۹۵	۶/۸۸	۵/۹۷	۹/۳۰	۸/۳۳	۷/۵۰	نوامبر
۱۶/۳۱	۱۵/۱۴	۱۴/۱۳	۹/۱۹	۸/۳۹	۷/۷۱	۹/۳۶	۸/۵۶	۷/۸۸	۷/۹۴	۶/۸۶	۵/۹۴	۸/۸۹	۷/۹۴	۷/۱۴	دسامبر
۱۵/۳۰	۱۴/۱۲	۱۳/۰۷	۹/۷۲	۸/۹۲	۸/۰۷	۹/۶۴	۸/۷۷	۷/۸۶	۸/۹۸	۷/۸۶	۶/۸۹	۱۰/۵۶	۹/۴۲	۸/۵۲	سالانه

واحد ارقام فوق متر بر ثانیه است.

در این مطالعه سرعت بادی که در آن چگالی انرژی باد در بالاترین سطح خود قرار گرفته باشد، سرعت باد حاوی حداکثر انرژی نامیده می‌شود. این سرعت برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس‌های ماهانه و سالانه محاسبه شد. در مقیاس سالانه، مقدار پارامتر مذکور بین ۶/۸۹ متر بر ثانیه در ایستگاه زنجان تا ۱۳/۰۷ متر بر ثانیه در ایستگاه اردبیل تغییر می‌کند که دو برابر مقدار مشاهده شده در ایستگاه زنجان است. در مقیاس ماهانه ارتفاع ۱۰ متری، حداکثر مقدار چگالی انرژی باد در ایستگاه اردبیل برابر با ۱۴/۳۳ متر بر ثانیه بوده و حداقل مقدار آن در ایستگاه زنجان در ماه دسامبر با مقدار ۵/۹۴ متر بر ثانیه مشاهده شده است. با استفاده از تابع تجمعی توزیع ویبول می‌توان احتمال وقوع باد با سرعت‌های مختلف را در هر منطقه برآورد کرد. در این مطالعه احتمال وقوع باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه محاسبه شد و مقادیر آن در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری در جداول ۷ تا ۹ آمده است.

جدول ۷. احتمال وقوع باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
اردبیل	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۳۲
پارس‌آباد	۰/۰۹	۰/۱	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۷
خلخال	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷
زنجان	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۹
خرم‌دره	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱

جدول ۸. احتمال وقوع باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۲۰ متری

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
اردبیل	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۳۶
پارس‌آباد	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱
خلخال	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۱
زنجان	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۲
خرم‌دره	۰/۱۸	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۴

جدول ۹. احتمال وقوع باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۴۰ متری

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
اردبیل	۰/۴	۰/۴۱	۰/۴	۰/۴	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۴
پارس‌آباد	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۵
خلخال	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۲	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۵
زنجان	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۶
خرم‌دره	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۳	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۲	۰/۱۸

احتمال وقوع باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در ایستگاه اردبیل از سایر ایستگاه‌ها بالاتر است. همچنین در این ایستگاه مقدار احتمال در همه ماه‌های سال به هم نزدیک است؛ در حالیکه احتمال وقوع باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه در بقیه ایستگاه‌ها در طول سال وضعیت متغیری دارد و در طول ماه‌های سال کاهش و افزایش می‌یابد. بعد از ایستگاه اردبیل بالاترین احتمال در ایستگاه خرم‌دره مشاهده می‌شود. میرحسینی و همکاران (۲۰۱۱) برای ایستگاه معلم‌ان در استان سمنان احتمال وقوع باد با سرعت ۴ متر بر ثانیه را در ارتفاع ۱۰ متری برابر با ۵۶ درصد، در ۳۰ متری برابر با ۶۴ درصد و در ۴۰ متری ۶۷ درصد برآورد کرده‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این بررسی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- بررسی تغییرات ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان می‌دهد که در ایستگاه زنجان تغییرات ماهانه سرعت باد چندان زیاد نیست. در همه ایستگاه‌ها (به‌استثنا ایستگاه اردبیل) در ماه‌های آخر سال سرعت باد کاهش می‌یابد.
 - در این پژوهش برای برآورد پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول، شش روش حداکثر راست‌نمایی، گشتاورها، گرافیکی، تجربی، گشتاورهای وزنی احتمالاتی و فاکتور الگوی انرژی بررسی شد و با انجام آزمون کی‌دو، روش گشتاورها بهترین روش انتخاب شد. با استفاده از پارامترهای حاصل از این روش، مقدار تخمینی پارامترهای مربوط به انرژی باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌دست آمد.
 - زمانی که دامنه تغییرات پارامتر شکل و مقیاس در طول سال زیاد باشد، تغییر پارامترهای مربوط به انرژی باد نیز زیاد می‌شود.
 - در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، حداکثر مقدار مربوط به چگالی توان باد در ایستگاه اردبیل مشاهده شده است. در ارتفاع ۴۰ متری این ایستگاه بالاترین مقدار چگالی توان باد برابر با ۴۹۱ وات بر متر مربع بود و کمترین این مقدار نیز در ایستگاه زنجان برابر با ۴۷ وات بر متر مربع مشاهده شده است.
 - احتمال وقوع سرعت باد با سرعت ۵ متر بر ثانیه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری محاسبه شد. نتایج نشان داد در ارتفاع ۱۰ متری در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، بالاترین احتمال به ایستگاه اردبیل اختصاص دارد. بعد از ایستگاه اردبیل بالاترین احتمال در خرم‌دره مشاهده می‌شود.
- پیشنهاد می‌شود توزیع‌های آماری دیگر برای داده‌های سه ساعته سرعت باد برآزش داده شده و نتایج آن با توزیع ویبول مقایسه شود.

منابع

زاهدی، م.؛ صلاحی، ب.؛ جمیل، م. (۱۳۸۴). محاسبه چگالی و توان باد به‌منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۷، شماره ۵۳، ص. ۴۱-۵۵.

- سعیدی، د؛ نعمت‌الهی، ا؛ عالم رجیبی، ع. ا. (۱۳۹۰). بررسی پتانسیل انرژی باد در استان خراسان شمالی در ایران، نشریه علمی - پژوهشی مدیریت انرژی، دوره ۱، شماره ۱، ص. ۴۹-۵۶.
- صلاحی، ب. (۱۳۸۳). پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۹، شماره ۱ (پیاپی ۷۲)، ص. ۱۲۳۱-۱۲۳۲۷.
- محمدی، ح؛ رستمی جلیلیان، ش؛ تقوی، ف؛ شمسی‌پور، ع. ا. (۱۳۹۱). پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۴، شماره ۲، ص. ۱۹-۳۲.
- Aktag, S., Dinler, A., 2009, **A New Method to Estimate Weibull Parameters for Wind Energy Applications**, Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 7, PP. 1761-1766.
- Alamdari, P., Nematollahi, O., Mirhosseini, M., 2012, **Assessment of Wind Energy in Iran: A Review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 1, PP. 836-860.
- Chang, P.T., 2011, **Performance Comparison of Six Numerical Methods in Estimating Weibull Parameters for Wind Energy Application**, Applied Energy, Vol. 88, No. 1, PP. 272-282.
- Dorvlo, A., 2003, **Estimating Wind Speed Distribution**, Energy Conversion and Management, Vol. 43, No. 17, PP. 2311-2318.
- Eskin, N., Artar, H., and Tolun, S., 2008, **Wind Energy Potential of Gökçeada Island in Turkey**, Renewable Energy Reviews, Vol. 12, No. 3, PP. 839-851.
- Li, X., 2007, **Green Energy Basic Concepts and Fundamentals**, British Library Cataloguing in Publication Data.
- Mirhosseini, M., Sharifi, F., Sedaghat, A., 2011, **Assessing the Wind Energy Potential Locations in Province of Semnan in Iran**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 1, PP. 449-459.
- Mohammadi, H., Rostami Jalilian, Sh., Taghavi, F., Shamsipour, A.A., 2012, **Evaluation of Wind Energy Potential in Kermanshah**, Physical Geography Research, No. 2, PP. 19-32.
- Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A. A., Kalantar, V., 2011, **Wind Energy Feasibility Study for City of Shahrabak in Iran**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 6, PP. 2545-2556.
- Rao, A. R. and Hamed, K. H., 2000, **Flood Frequency Analysis**, Chapman and Hall/CRC Press, USA.
- Rocha, P., Sousa, R., Andrade, C., Silva, M., 2012, **Comparison of Seven Numerical Methods for Determining Weibull Parameters for Wind Energy Generation in the Northeast Region of Brazil**, Applied Energy, Vol. 89, No. 1, PP. 395-400.
- Rojey, A., 2009, **Energy and Climate: How to Achieve a Successful Energy Transition**, John Wiley and Sons Publication, London.
- Saeidi, D., Mirhosseini, M., Sedaghat, A., Mostafaeipour, A., 2011, **Feasibility Study of Wind Energy Potential in Two Provinces of Iran: North and South Khorasan**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 8, PP. 3558-3569.
- Saeidi, D., Nematollahi, O., and Alam Rajabi, A. A., 2011, **Consideration of Wind Energy Potential in Northern Khorasan in Iran**, Journal of Energy Engineering Management, Vol. 1, No.1, PP. 49-56.
- Safari, B., 2011, **Modelling Wind Speed and Wind Power Distributions in Rwanda**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 2, PP. 925-935.
- Salahi, B., 2004, **Assessing Wind Energy Potential and Fitting Real Probabilities of Wind Occurrence Using Probability Density Function of Weibull Distribution in Synoptic Stations of Ardebil Province**, Geographical Research, No. 72, PP. 12310-12327.
- Seguro, J.V., Lambert, T.W., 2000, **Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 85, No. 1, PP. 75-84.
- Zahedi, M., Salahi, B., Jamil, M., 2005, **Calculation of Wind Power Density in order to Use its Energy in Ardebil**, Geographical Research Quarterly, No. 53, PP. 41-55.