

## مقایسه روش‌های برآورد پارامترهای توزیع ویبول جهت تولید انرژی باد در استان آذربایجان شرقی

سعید جهانبخش: استناد جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، تبریز، ایران  
یعقوب دین پزوه: دانشیار مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
مجید رضایی بنفشه: استناد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
مرضیه اسمعیل پور: دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران\*

وصول: ۱۳۹۱/۱۰/۵ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۱۹، صص ۸۰-۶۱

### چکیده

در این مطالعه پنج روش تخمین پارامترهای توزیع ویبول در مورد داده‌های باد ارزیابی شده است. بهترین روش با استفاده از آزمون کی دو معرفی شد. برای این منظور تعداد ۶ ایستگاه سینوپتیک در استان آذربایجان شرقی با دوره مشترک آماری ۲۳ سال (۱۹۸۷ تا ۲۰۰۹) انتخاب شدند. محاسبات بر روی داده‌های سه ساعته سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری انجام شد و پارامترهای شکل و مقیاس برای هر ایستگاه با روشهای مختلف محاسبه گردید. با استفاده از تابع تبدیل، پارامترهای فوق در دو ارتفاع ۲۰ و ۴۰ متری به دست آمد. بر اساس نتایج حاصله در مقایسه با سایر روش‌ها، روش گشتاورها که مقدار آماره کی دو کمتری به دست می‌داد روش مناسبی تشخیص داده شد. سپس با استفاده از مقادیر پارامتر شکل (c) و مقیاس (k) حاصل از روش فوق، خصوصیات مربوط به انرژی و سرعت باد در دوره‌های بازگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰، ۴۰ متری از سطح زمین به دست آمد. در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین بالاترین مقدار پارامتر k (۱/۲۲) و c (۳/۳۵) متر بر ثانیه) در مقیاس سالانه در ایستگاه تبریز و کمترین مقدار پارامتر k و c به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۱/۵ متر بر ثانیه در ایستگاه میانه مشاهده شد. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه جلفا از نظر پارامترهای مربوط به انرژی باد نسبت به سایر ایستگاه‌ها وضعیت مطلوب و پتانسیل خوبی جهت بهره برداری از انرژی باد را داراست و ایستگاه اهر رتبه دوم را جهت استفاده از انرژی باد به خود اختصاص داده است. تحلیل سرعت باد در دوره‌های بازگشت مختلف نشان داد که بیشترین سرعت باد در استان آذربایجان شرقی متعلق به ایستگاه جلفا است.

واژه‌های کلیدی: توزیع ویبول، پارامتر شکل و مقیاس، کی دو، انرژی باد، استان آذربایجان شرقی.

### مقدمه

مشاهدات طولانی مدت از سرعت آن ضروری است. سرعت باد یک متغیر تصادفی بوده و بر این اساس داده‌های سرعت آن طی یک دوره زمانی با توابع توزیع احتمالاتی قابل تحلیل می‌باشند. در سال‌های اخیر، توزیع ویبول به عنوان رایج ترین تابع توزیع

تامین انرژی از ضرورت‌های اصلی توسعه اقتصادی و صنعتی هر جامعه محسوب می‌شود. باد یکی از منابع تجدیدپذیر و پاک انرژی محسوب می‌شود. به منظور ارزیابی دقیق پتانسیل و ویژگی‌های انرژی باد، وجود

انرژی باد و مجذور اختلاف مربعات ریشه و خطای پارامتر، مورد ارزیابی و مقایسه واقع شده است. نتایج مقایسه روش‌های فوق نشان داد که روش‌های حداکثر راست نمایی، حداکثر راست نمایی اصلاح شده و گشتاورها نتایج خوبی طی شبیه‌سازی ارائه می‌کنند و در این بین روش گرافیکی پایین‌ترین رتبه را داراست. تحلیل داده‌های واقعی نشان داد که اگر توزیع داده‌ها تناسب بیشتری با توزیع ویبول داشته باشد هر ۶ روش ذکر شده قابل کاربرد است و در غیر این صورت روش حداکثر درست نمایی بهتر عمل می‌کند.

روچا و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۲) با ۷ روش مختلف (حداکثر راست نمایی، حداکثر راست نمایی اصلاح شده، انرژی معادل، روش گشتاورها، فاکتور الگوی انرژی، گرافیکی و تجربی) تعیین پارامترهای تولید انرژی باد را در شمال شرق برزیل در فاصله زمانی اوت ۲۰۰۴ تا آوریل ۲۰۰۶ مقایسه کردند. ایشان برای پیدا کردن موثرترین روش در تعیین پارامترهای توزیع ویبول از روش تحلیل واریانس، آزمون کی دو و معیار جذر میانگین مربعات خطا استفاده کرده و نتیجه گرفتند که روش انرژی معادل در تعیین پارامترهای  $k$  (پارامتر مقیاس) و  $c$  (پارامتر شکل) موثر است.

اوستا و کانتار<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) برای تحلیل سرعت باد در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه در ۴ ایستگاه کشور ترکیه دو روش توزیع  $t$  چوله دار و توزیع خطای تعمیم یافته چوله دار<sup>۵</sup> را در مقایسه با ویبول دو پارامتری و سه پارامتری ارائه کردند. نتایج نشان داد که این توزیع‌ها پیشرفت مهمی در برآورد توزیع

احتمالاتی شناخته شده است. بنابراین، تخمین پارامترهای تابع سرعت باد از نکته نظر اخذ نتایج صحیح در مورد پتانسیل انرژی باد و نیز توجیه اقتصادی طرح‌های مربوط به تامین انرژی اهمیت دارد (آکتاگ و دینلر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۹: ۱۷۶۱).

به دلیل موقعیت منابع کنونی انرژی، نیروی باد به عنوان یکی از مهم‌ترین و موثرترین گزینه‌های تامین انرژی محسوب می‌شود. کشور ایران با دارا بودن آب و هوای متنوع، در مسیر جریان‌های مهم هوایی به خصوص جریان‌های غربی و شمال‌غربی قرار دارد. این مسئله به همراه وجود تنوع توپوگرافی و به تبع آن ایجاد مراکز فشار حرارتی محلی سبب می‌شود تا در نقاط مختلف این کشور در طول سال، بادهایی با شدت‌های متفاوت بوزند. بدیهی است در صورت وجود آستانه‌های سرعت و دوام باد، می‌توان از انرژی آن‌ها استفاده نمود (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۴: ۴۲). همچنین به دلیل نقشی که باد در شهرسازی، کشاورزی، حمل و نقل و صنعت هوانوردی و مطالعاتی مانند مکانیابی استقرار صنایع مختلف دارد، پژوهش و بررسی در مورد این موضوع از دیرباز مطرح بوده و پژوهش‌های زیادی در رابطه با آن به انجام رسیده است.

چانگ<sup>۲</sup> (۲۰۱۱a) کارایی ۶ روش مختلف را برای برآورد پارامترهای توزیع ویبول مورد بررسی قرار داد. این روش‌ها شامل: گشتاورها، گرافیکی، تجربی، حداکثر راست نمایی، حداکثر راست نمایی اصلاح شده و فاکتور الگوی انرژی است. کارایی روش‌های مذکور از طریق تحلیل داده‌های واقعی باد طبق معیارهایی چون آزمون کلموگروف اسمیرنوف، خطای

3 - Rocha et al

4 - Usta and Kantar

5 - Skewed T distribution and skewed generalized error distribution

1 - Aktag and Dinler

2- Chang

سرعت باد در ایران به ایستگاه منجیل با سرعت ۱۲/۵ گره و پس از آن به ایستگاه زابل با سرعت ۱۲ گره تعلق دارد. پایین‌ترین میانگین سالانه سرعت باد نیز مربوط به ایستگاه کاشان است که حدود ۰/۸ گره تخمین زده شد. نتایج نشان داد که در ایران ماههای آوریل تا اوت بسیار بادخیز بوده و در دو ماه ژوئن و ژوئیه بیشتر نقاط ایران توان تولید انرژی برق را از نیروی باد دارا می‌باشند.

سعیدی و همکاران (۱۳۹۰) پتانسیل انرژی باد را در استان خراسان شمالی با استفاده از توزیع ویبول مورد بررسی قرار دادند. ایشان از آمار و اطلاعات دو ایستگاه بجنورد و اسفراین بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد چگالی توان باد برای شهر بجنورد در ارتفاع ۳۰ متری برابر با ۲۰۰ و در ارتفاع ۴۰ متری برابر با ۲۵۰ و برای شهر اسفراین نیز در حدود ۲۰۰ و ۳۰۰ وات بر متر مربع است.

محمدی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های سه ساعته سمت و سرعت باد ۵ ایستگاه سینوپتیک (سرپل ذهاب، کرمانشاه، کنگاور، اسلام آباد غرب و روانسر) در طی دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶ پتانسیل انرژی باد را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان از توزیع احتمالاتی ویبول استفاده کردند و نتایج ایشان نشان داد در بین ایستگاههای مورد مطالعه، سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی باد دارند.

یانیکتپی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) پتانسیل انرژی باد را برای منطقه عثمانیه در کشور ترکیه مورد بررسی قرار دادند. ایشان از داده‌های سرعت باد اندازه گیری شده

سرعت و چگالی نیروی باد نشان می‌دهند. همچنین روش توزیع خطای عمومی شده چوله دار می‌تواند بهتر از ویبول دو پارامتری و سه پارامتری عمل کند. این دو روش می‌توانند برای برآورد توزیع سرعت باد و نیز برای توزیع چگالی نیروی باد مورد استفاده قرار گیرند.

صلاحی (۱۳۸۳) پتانسیل انرژی باد را در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل (شامل ایستگاه‌های خلخال، پارس آباد، مشکین شهر و اردبیل) با استفاده از توزیع ویبول بررسی نمود. نتایج نشان داد که چگالی توان باد در اردبیل برابر با ۳۴۲ وات در متر مربع بوده و در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه اردبیل می‌تواند به عنوان مکانی مناسب برای بهره برداری از انرژی باد در نظر گرفته شود.

رحیم زاده و همکاران (۱۳۸۸) امکان استفاده از انرژی باد را در یازده ایستگاه سینوپتیک استان اصفهان در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۹۲ بررسی کردند. ایشان از روش‌های توزیع ویبول، نوع پیوندی (هیبرید) و توزیع معکوس نرمال استفاده کردند. نتایج نشان داد که در کل منطقه، مقدار سرعت باد در ماه‌های سرد سال نسبت به سایر ماه‌ها کمتر است. همچنین در دوره سرعت باد کمتر، چگالی توان باد به کمتر از ۶۰ وات بر متر مربع کاهش می‌یابد. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه‌های خور و بیابانک، داران و نطنز دارای سرعت و چگالی باد کمتری هستند.

گندمکار (۱۳۸۸) انرژی پتانسیل باد را در ایران با استفاده از آمار ۱۰ ساله مورد ارزیابی قرار داد. وی میانگین سرعت وزش باد، حداکثر سرعت وزش باد و درصد وقوع بادهایی با سرعت کمتر از ۸ گره (۴ متر بر ثانیه) و بالاتر از آن را به طور جداگانه محاسبه کرد. نتایج پژوهش نشان داد که بالاترین میانگین سالانه

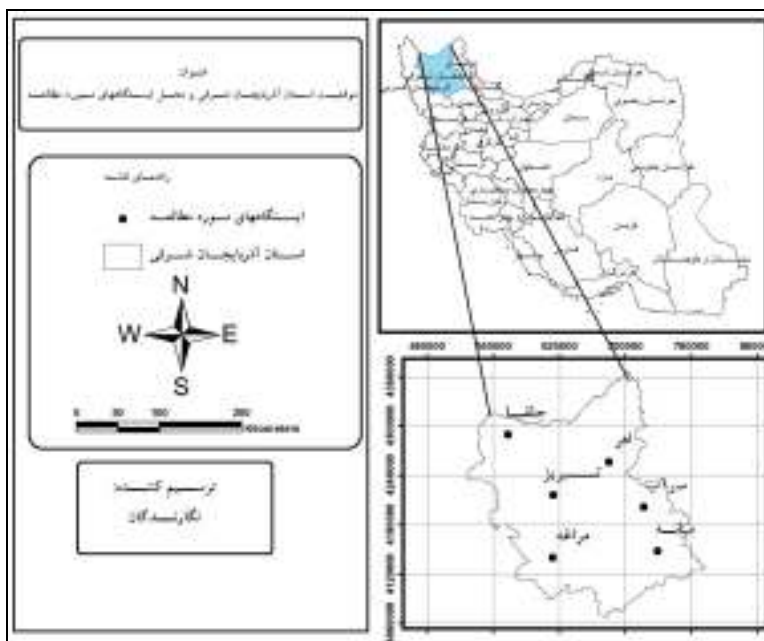
طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه الی ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. در این محدوده ۶ ایستگاه سینوپتیک که دارای داده‌های باد برای دوره مشترک آماری از ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۹ (۲۳ سال) بودند انتخاب شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب را در منطقه و جدول ۱ مشخصات آن‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۲ گلباد ایستگاه‌های مورد مطالعه را برای ماه‌هایی که دارای حداکثر سرعت باد هستند نشان می‌دهد. به طوری که از این شکل می‌توان استنباط کرد، ماه ژوئیه از نظر امکان استحصال انرژی باد در منطقه مورد مطالعه پتانسیل بیشتری را دارا است. در این ماه جهت باد غالباً از شرق به غرب است.

در ارتفاع ۱۰ متری طی ۴۴ ماه (از ژانویه ۲۰۰۸ تا آگوست ۲۰۱۱) استفاده کردند و پارامترهای توزیع ویبول را با استفاده از روش گرافیکی برآورد کردند. نتایج ایشان نشان داد که مقدار پارامتر  $k$  بین ۱ و ۱/۰۴ و مقدار پارامتر  $c$  بین ۱/۵۹ و ۱/۶۶ متر بر ثانیه تغییر می‌کند.

با توجه به پیشینه پژوهش به نظر می‌رسد، استان آذربایجان شرقی از نظر امکان استفاده از پتانسیل انرژی باد به طور دقیق مطالعه نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه بررسی پتانسیل انرژی باد در بین ایستگاه‌های این استان است.

مواد و روش‌ها

استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران در محدوده ۴۵ درجه و ۷ دقیقه الی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه

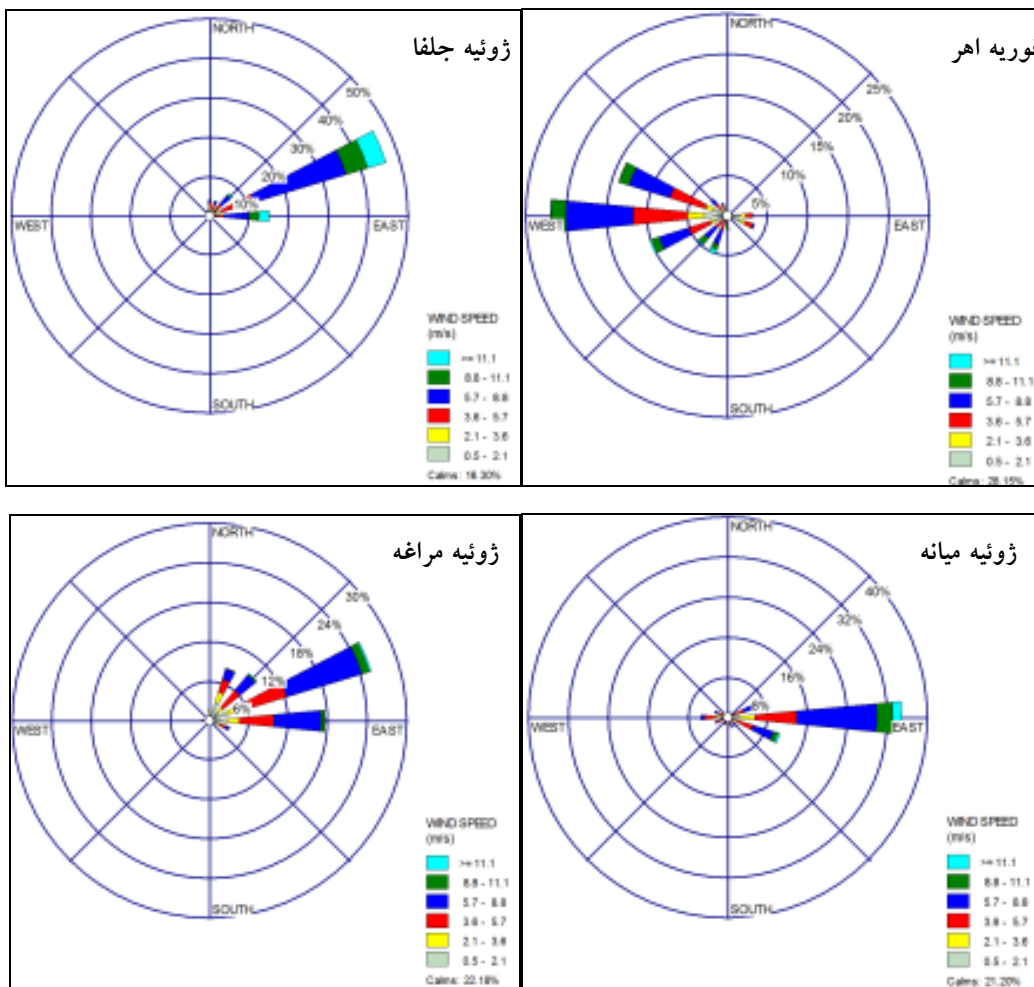


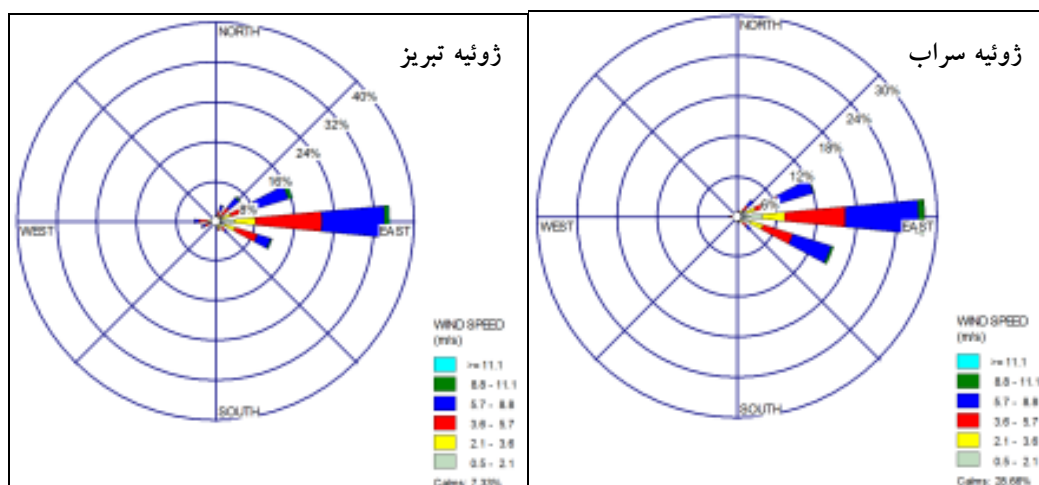
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	میانگین سالانه سرعت باد (متر بر ثانیه)
اهر	۴۷° ۴'	۳۸ ۲۶'	۱۳۹۰/۵	۲/۹۸
جلفا	۴۵ ۴۰'	۳۸ ۴۵'	۷۳۶/۲	۲/۴۲

۲/۳۶	۱۶۸۲	۳۷ ۲۶'	' ۳۲ ۴۷°	سراب
۱/۸۱	۱۱۱۰	۳۷ ۲۷'	' ۴۲ ۴۷°	میانه
۳/۱۴	۱۳۶۱	۳۸ ۵'	' ۱۷ ۴۶°	تبریز
۲/۵۸	۱۴۷۷	۳۷ ۵۶'	' ۳۲ ۴۷°	مراغه





شکل ۲: گلبادهای ایستگاه‌های سینوپتیک در استان آذربایجان شرقی برای ماه‌هایی با حداکثر سرعت باد

از معادلات زیر تعریف می‌شوند (چانگ a، ۲۰۱۱):

(۲۷۳):

(۱)

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

(۲)

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

در روابط فوق  $f(v)$  و  $F(v)$  به ترتیب pdf و cdf

تابع توزیع ویبول و  $v$  سرعت باد و  $k$  و  $c$  پارامترهای توزیع می‌باشند. برای تخمین پارامترهای توزیع ویبول از روش‌های زیر استفاده شد:

۱- روش گرافیکی: اساس این روش استفاده از

تابع توزیع تجمعی ویبول است. در این روش پس از جابجایی مختصر، با دوبار لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۲) داریم:

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (۳)$$

رابطه فوق یک خط است که طرف چپ آن متغیر

وابسته ( $y$ ) بوده و عبارت  $\ln(v)$  متغیر مستقل ( $x$ )

فرض می‌شود. با رسم مقادیر نظیر طرف چپ تساوی

روش‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده جهت انجام این مطالعه، داده‌های سه ساعته سرعت باد اندازه گیری شده در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین می‌باشند. ۶ ایستگاه سینوپتیک در استان آذربایجان شرقی که دارای دوره آماری بلند مدت بودند انتخاب شدند و پارامترهای توزیع ویبول با استفاده از ۵ روش تخمین زده شد.

اگر توزیع احتمالاتی مناسب مربوط به سرعت باد به دست آید پتانسیل انرژی باد نیز قابل تحلیل خواهد بود. دانشمندان توابع توزیع احتمالاتی متعددی را به عنوان توزیع کانیدیدا جهت توجیه سرعت باد مورد آزمون قرار داده‌اند. این توزیع‌ها شامل تابع بتا، گاما، لوگ نرمال، لجیستیک، ریلی و ویبول می‌باشند که در میان آن‌ها توزیع ویبول بیشتر مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است (چانگ b ۲۰۱۱: ۱۸۴۸).

در این مطالعه نیز تابع مذکور جهت تحلیل داده‌های باد انتخاب شد. تابع چگالی احتمالاتی (pdf) و تابع توزیع تجمعی (cdf) مربوط به توزیع ویبول با استفاده

$$v = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (8)$$

در روابط فوق  $\Gamma(x)$  تابع گاما بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود (رائو و حامد، ۲۰۰۰: ۲۰۴):

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (9)$$

۴- روش گشتاورها: در این روش پارامترهای  $k$  و  $c$  با استفاده از معادلات زیر به دست آمد:

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (10)$$

$$\sigma = c\Gamma\left[\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2} \quad (11)$$

در روابط فوق  $\bar{v}$  میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار داده‌های سرعت باد هستند. حل دستگاه دو معادله دو مجهولی (غیر خطی) فوق (روابط ۱۱ و ۱۰) پارامترها را به دست می‌دهد.

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 که مجهولات آن پارامترهای توزیع است، استفاده شود. این دستگاه به شرح زیر است:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (12)$$

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (13)$$

در این مطالعه سرعت باد علاوه بر ارتفاع ۱۰ متری، در ارتفاع‌های ۲۰ و ۴۰ متری نیز تحلیل گردید. جهت برآورد پارامترهای توزیع ویبول در ارتفاعات فوق از روابط زیر استفاده شد:

$$k_a = k_{10} \left[1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_a}{10}\right)\right]^{-1} \quad (14)$$

$$c_a = c_{10} \left(\frac{z_a}{10}\right)^n \quad (15)$$

$$n = [0.37 - 0.0381 \ln c_{10}] \quad (16)$$

در مقابل  $\ln v_i$  می‌توان به نقاط خطی مستقیم برازش داد و شیب خط،  $k$  را به دست آورد. عرض از مبدا مقدار  $c$  را به دست می‌دهد.

۲- روش حداکثر راست نمایی: این روش مبتنی بر تکرارهای عددی برای تخمین پارامترهای توزیع آماری مثل ویبول است. در این روش پارامترهای  $k$  و  $c$  به شرح زیر تخمین زده می‌شوند (روچا و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۹۶؛ چانگ a، ۲۰۱۱: ۲۷۵).

(4)

$$k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (5)$$

$c = \left( \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}}$   
در روابط فوق  $v_i$  سرعت باد در گام زمانی  $\Delta t$  و  $n$  تعداد داده‌های مشاهداتی غیر صفر است.

ابتدا از رابطه ۴ با توجه به مقادیر سرعت باد ( $v$ ) پارامتر  $k$  را تخمین می‌زنیم سپس مقدار پارامتر  $c$  را از رابطه ۵ به دست می‌آوریم.

۳- روش عامل الگوی انرژی: این روش توسط روچا و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شده است. برای تخمین پارامترهای توزیع ویبول از میانگین داده‌ها و میانگین مکعب داده‌های سرعت باد استفاده می‌شود. در این روش ابتدا مقدار پارامتر  $E_{pf}$  موسوم به عامل الگوی انرژی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{(v^3)} \quad (6)$$

در رابطه فوق  $\bar{v}$  متوسط سرعت باد روزانه است. آنگاه پارامتر  $k$  از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$k = 1 + \frac{3.69}{(E_{pf})^2} \quad (7)$$

مقدار پارامتر  $c$  را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد:

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k-2}{k}\right) T^* \quad (22)$$

در روابط فوق  $\rho$  چگالی هوا است که در این مطالعه به صورت استاندارد معادل ۱/۲۲۵ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شد. میزان سرعت باد با دوره‌های بازگشت مختلف با استفاده از رابطه زیر تخمین زده شد (رائو و حامد، ۲۰۰۰):

$$U = c[\ln(T_r)]^{\frac{1}{k}} \quad (23)$$

در رابطه فوق  $k$  و  $c$  به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس توزیع ویبول می‌باشند و  $T_r$  دوره بازگشت (سال) است. لازم به یادآوری است که پارامتر  $k$  بی بعد و واحد پارامتر  $c$  متر بر ثانیه است.

#### یافته‌های تحقیق

با توجه به نتایج حاصله، در بین ۵ روش مورد بررسی، روش‌های گرافیکی و حداکثر راست نمایی به دلیل معنی دار نبودن کی دو آنها کنار گذاشته شد و از بین سه روش باقیمانده (تجربی، گشتاورها و عامل الگوی انرژی) روش گشتاورها که کی دو کمتری داشت به عنوان مناسبترین روش انتخاب گردید. پس از تخمین پارامترها، سایر محاسبات مربوط به سرعت باد با دوره بازگشت‌های مختلف و مشخصه‌های مربوط به پتانسیل باد با پارامترهای برآورد شده انجام گردید. جدول ۲ پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول را با استفاده از روش گشتاورها در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. شکل ۳ تغییرات سرعت باد را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که در آن‌ها به استثنای ایستگاه اهر، در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت سرعت باد افزایش می‌یابد.

در روابط فوق  $k_{10}$  مقدار پارامتر  $k$  در ارتفاع ۱۰ متری،  $c_{10}$  مقدار پارامتر  $c$  در ارتفاع ۱۰ متری و  $Z_0$  ارتفاع دلخواه و  $n$  نمایه توان است (شاتا وهانیتش<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸: ۱۴۲).

برای آزمون نکویی برازش از آزمون آماری کی دو به شرح زیر استفاده شد (رائو و حامد، ۲۰۰۰: ۴۱):

$$X^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j} \quad (17)$$

در رابطه فوق  $O_j$  تعداد داده‌های مشاهده شده در کلاس  $j$ ام،  $E_j$  تعداد داده مورد انتظار در کلاس  $j$ ام با استفاده از تابع توزیع تجمعی ویبول است.

محتمل ترین سرعت باد و سرعت باد دارای حداکثر انرژی با استفاده از روابط زیر و پارامتر شکل و مقیاس محاسبه شد (لی، ۲۰۰۷: ۷۵؛ اسکین و همکاران، ۲۰۰۸: ۸۴۳):

$$U_{mp} = c(1 - \frac{1}{k})^{1/k} \quad (18)$$

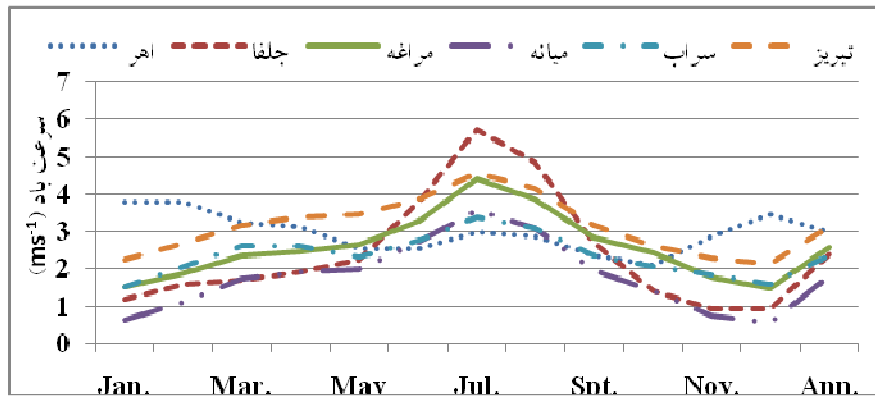
$$U_{max,E} = c(1 + \frac{2}{k})^{1/k} \quad (19)$$

در روابط فوق  $U_{mp}$  محتمل ترین 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  $c$  تخمین زده شده با بهترین روش تخمین پارامترها، محاسبه گردید. در مطالعه حاضر جهت محاسبه چگالی توان باد  $(P/A)$  و چگالی انرژی باد  $(E/A)$  از معادلات زیر استفاده شد (لی، ۲۰۰۷: ۷۶؛ مصطفایی پور و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۵۴۹):

$$P(U) = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (20)$$

$$\frac{P}{A} = \int_0^{\infty} P(U) f(U) dU = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) \quad (21)$$





شکل ۳: تغییرات ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

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

ایستگاه	پارامتر ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
اهر	K	۱/۱۳	۱/۱۶	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۹۶	۱/۱۴	۱/۱۱	۰/۹۵	۰/۷۸	۰/۹۲	۱/۰۹	۰/۹۸
	C	۳/۹۵	۳/۹۸	۳/۲۵	۳/۰۶	۳/۳۶	۳/۵۱	۳/۱۵	۳	۳/۳۲	۱/۸۴	۳/۷۸	۳/۵۹	۳/۹۶
تبریز	K	۱/۱۱	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۲۱	۱/۲۹	۱/۵۱	۱/۸۵	۱/۶۷	۱/۲۵	۱/۰۴	۱	۱/۱۲	۱/۲۲
	C	۳/۳۱	۳/۸۳	۳/۳۳	۳/۶	۳/۷۵	۳/۲۹	۳/۱۴	۳/۶۳	۳/۳۸	۳/۶۴	۳/۲۸	۳/۲۳	۳/۳۵
جلفا	K	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۷۶	۱/۰۵	۱/۵۲	۱/۳	۰/۸۴	۰/۶۱	۰/۵	۰/۵۷	۰/۷۵
	C	۰/۸۴	۰/۷۲	۱/۲	۱/۲۷	۱/۹۴	۳/۸۶	۳/۳۷	۳/۲۴	۳/۴۵	۳/۹۶	۳/۴۸	۳/۵۹	۳/۰۵
سراب	K	۰/۶۲	۰/۷۱	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۹۸	۱/۱۸	۱/۰۷	۰/۸۶	۰/۷۶	۰/۷۱	۰/۶۷	۰/۸۲
	C	۱/۰۴	۱/۶۵	۳/۳۶	۳/۴۳	۳/۰۸	۳/۷۴	۳/۵۹	۳/۲۰	۳/۲۱	۳/۷۵	۳/۴۹	۳/۲۱	۳/۱۳
مراغه	K	۰/۶۷	۰/۷۴	۰/۸۲	۰/۸۷	۰/۹۴	۱/۰۷	۱/۳۴	۱/۱۶	۰/۹۴	۰/۸۷	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۸۸
	C	۱/۱۶	۱/۵۸	۳/۱۲	۳/۳۰	۳/۶	۳/۳۷	۳/۸۱	۳/۰۷	۳/۷۵	۳/۲۹	۳/۴۹	۳/۱۶	۳/۴۳
میانه	K	۰/۴۷	۰/۵۷	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۹۹	۱/۲۵	۱/۱۴	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۷۳
	C	۰/۲۹	۰/۷۰	۱/۴۲	۱/۶۴	۱/۷۷	۳/۷۴	۳/۸۶	۳/۲۹	۱/۸۲	۱/۰۹	۰/۴۱	۰/۲۷	۱/۵

بالاترین مقدار پارامتر C (۶/۳۷) در ماه ژوئیه به ایستگاه جلفا و کمترین آن (۰/۲۷) در ماه دسامبر در ایستگاه میانه به دست آمده است. از این پارامترها جهت محاسبه میزان انرژی باد در یک منطقه استفاده می‌شود. چنین وضعیتی در مقادیر k و C در ارتفاع ۲۰ و ۴۰ متری نیز دیده می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود در مقیاس سالانه مقدار پارامتر k از ۱/۲۲ (در ایستگاه تبریز) تا ۰/۷۳ (در ایستگاه میانه) تغییر می‌کند. مقادیر پارامتر C نیز از ۱/۵ (در ایستگاه میانه) تا ۳/۳۵ (در ایستگاه تبریز) تغییر می‌کند. در مقیاس ماهانه نیز کمترین (بیشترین) مقدار k با مقدار ۰/۵ (۱/۸۵) در ماه نوامبر به ایستگاه جلفا (ژوئیه تبریز) تعلق دارد. همچنین در مقیاس ماهانه

جدول ۳: پارامترهای توزیع ویبول با روش گشتاورها برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۲۰ متری.

ایستگاه	پارامتر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
اهر	K	۱/۲۰	۱/۲۳	۱/۰۵	۱/۰۱	۰/۹۰	۱/۰۲	۱/۲۲	۱/۱۹	۱/۰۱	۰/۸۳	۰/۹۸	۱/۱۶	۱/۰۵
	C	۴/۷۰	۴/۷۳	۳/۹۱	۳/۷۰	۲/۹۰	۳/۰۷	۳/۷۹	۳/۶۲	۲/۸۵	۲/۳	۳/۳۷	۴/۲۹	۳/۵۸
تبریز	K	۱/۱۸	۱/۲۲	۱/۲۶	۱/۲۹	۱/۳۸	۱/۶۰	۱/۹۷	۱/۷۸	۱/۳۴	۱/۱۱	۱/۰۷	۱/۱۹	۱/۳۰
	C	۲/۸۴	۳/۴۳	۴	۴/۳۰	۴/۴۷	۵/۰۷	۶/۰۱	۵/۴۵	۴/۰۶	۳/۲۲	۲/۸۱	۲/۷۴	۴/۰۲
جلفا	K	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۳	۰/۸۱	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۳۹	۰/۸۹	۰/۶۵	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۸۰
	C	۱/۱۰	۱/۵۳	۱/۶۱	۱/۹۰	۲/۴۱	۴/۶	۷/۳۵	۶/۱۲	۳	۱/۲۴	۰/۶۵	۰/۷۸	۲/۵۴
سراب	K	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۸۸	۱/۰۵	۱/۲۵	۱/۱۴	۰/۹۲	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۷۱	۰/۸۸
	C	۱/۳۵	۲/۰۷	۲/۹۰	۲/۹۸	۲/۵۷	۳/۳۳	۴/۳۰	۳/۸۵	۲/۷۲	۲/۱۸	۱/۸۸	۱/۵۵	۲/۶۳
مراغه	K	۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۸۷	۰/۹۲	۱	۱/۱۵	۱/۴۳	۱/۲۴	۱	۰/۹۳	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۹۳
	C	۱/۴۸	۱/۹۹	۲/۶۱	۲/۸۳	۳/۱۷	۴/۰۵	۵/۶۵	۴/۸۳	۳/۳۴	۲/۸۱	۱/۸۸	۱/۴۹	۲/۹۷
میانه	K	۰/۵۰	۰/۶۱	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۸۵	۱/۰۵	۱/۳۴	۱/۳۱	۰/۸۷	۰/۷۱	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۷۸
	C	۰/۴۱	۰/۹۳	۱/۸۰	۲/۰۶	۲/۲۱	۳/۳۳	۴/۵۹	۳/۹۵	۲/۲۷	۱/۴۰	۰/۵۶	۰/۳۸	۱/۸۹

جدول ۴: پارامترهای توزیع ویبول با روش گشتاورها برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۴۰ متری.

ایستگاه	پارامتر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
اهر	K	۱/۲۹	۱/۳۲	۱/۱۳	۱/۰۸	۰/۹۷	۱/۰۹	۱/۳۰	۱/۲۷	۱/۰۸	۰/۸۹	۱/۰۴	۱/۲۴	۱/۱۲
	C	۵/۵۸	۵/۶۲	۴/۷۰	۴/۴۶	۳/۵۶	۳/۷۵	۴/۵۷	۴/۳۸	۳/۴۹	۲/۸۶	۴/۰۹	۵/۱۳	۴/۳۳
تبریز	K	۱/۲۶	۱/۳۰	۱/۳۴	۱/۳۸	۱/۴۷	۱/۷۲	۲/۱۰	۱/۹۰	۱/۴۳	۱/۱۸	۱/۱۴	۱/۲۷	۱/۳۹
	C	۳/۴۹	۴/۱۶	۴/۸۱	۵/۱۴	۵/۳۳	۵/۹۹	۷/۰۳	۶/۴۱	۴/۸۷	۳/۹۲	۳/۴۵	۳/۳۷	۴/۸۳
جلفا	K	۰/۷۲	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۹	۰/۸۷	۱/۱۹	۱/۷۴	۱/۴۹	۰/۹۵	۰/۶۹	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۸۶
	C	۱/۴۴	۱/۹۶	۲/۰۶	۲/۴۰	۲/۹۹	۳/۴۷	۴/۴۸	۵/۴۷	۷/۱۵	۳/۶۷	۱/۶۱	۱/۰۵	۳/۱۴
سراب	K	۰/۷۰	۰/۸۱	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۴	۱/۱۲	۱/۳۴	۱/۲۲	۰/۹۸	۰/۸۶	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۹۴
	C	۰/۷۴	۲/۶۰	۳/۵۶	۳/۶۵	۳/۱۸	۴/۰۵	۵/۱۴	۴/۶۴	۳/۳۵	۲/۷۳	۲/۳۷	۱/۹۸	۳/۲۴
مراغه	K	۰/۷۶	۰/۸۵	۰/۹۳	۰/۹۹	۱/۰۷	۱/۲۳	۱/۵۳	۱/۳۲	۱/۰۷	۰/۹۹	۰/۸۵	۰/۷۹	۱
	C	۱/۹۰	۲/۵۰	۳/۲۳	۳/۴۷	۴/۸۶	۶/۶۴	۵/۷۲	۵/۲۲	۴/۰۶	۳/۴۵	۲/۲۷	۱/۹۱	۳/۶۴
میانه	K	۰/۵۴	۰/۶۵	۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۹۱	۱/۱۳	۱/۴۳	۱/۳۰	۰/۹۳	۰/۷۶	۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۸۳
	C	۰/۵۷	۱/۲۳	۲/۲۷	۲/۵۹	۳/۷۶	۴/۰۴	۵/۴۶	۴/۷۵	۳/۸۳	۲/۸۰	۱/۷۷	۰/۵۳	۲/۳۹

اندازه مقادیر پارامترهای مربوط به انرژی باد (چگالی و انرژی) در طول سال تغییرات زیادی خواهند داشت. زمانی که مقدار پارامتر k از ۱ کمتر باشد امکان محاسبه بعضی پارامترها وجود ندارد.

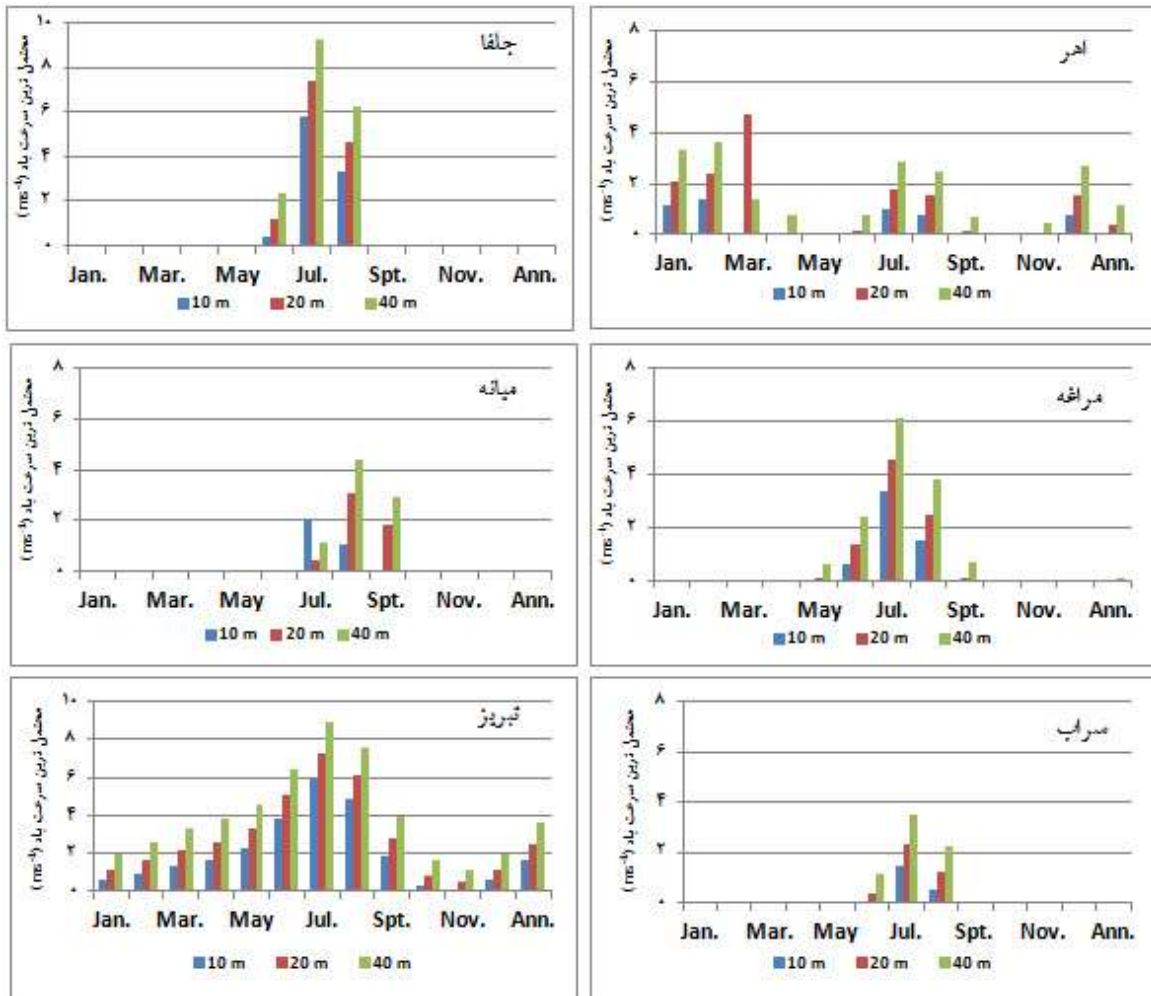
#### محتمل‌ترین سرعت باد

حداکثر سرعت باد محتمل  $U_{mp}$  (بر حسب متر بر ثانیه)، برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری محاسبه شد. در ارتفاع ۱۰ متری مقدار این پارامتر بین ۵/۸۳ متر بر ثانیه در ایستگاه

با توجه به جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که مقادیر k و c در طی ماه‌های سال در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه تغییر می‌کنند. این تغییرات در ایستگاه‌های تبریز، جلفا، مراغه، میانه و سراب همزمان هستند. به عبارت دیگر در این ایستگاه‌ها در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت مقادیر این دو پارامتر افزایش می‌یابند. در حالی که ایستگاه اهر از این نظر وضعیت متفاوتی داشته و افزایش این مقادیر روند خاصی در بین ماه‌های سال نشان نمی‌دهند. هر اندازه دامنه تغییرات این پارامترها در بین ماه‌های سال در یک ایستگاه زیاد باشد به همان

مقادیر سرعت باد محتمل را در ماه ژوئیه نشان می‌دهند. شکل ۴ مقادیر آن را در ایستگاه‌های مختلف و در سه ارتفاع مورد بررسی نشان می‌دهد.

جلفا تا ۰/۰۴ متر بر ثانیه در ایستگاه تبریز در ماه نوامبر تغییر می‌کند. در دو ارتفاع ۲۰ و ۴۰ متری نیز حداکثر مقدار آن به ترتیب برابر با ۷/۴ و ۹/۳ متر بر ثانیه است. بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه حداکثر



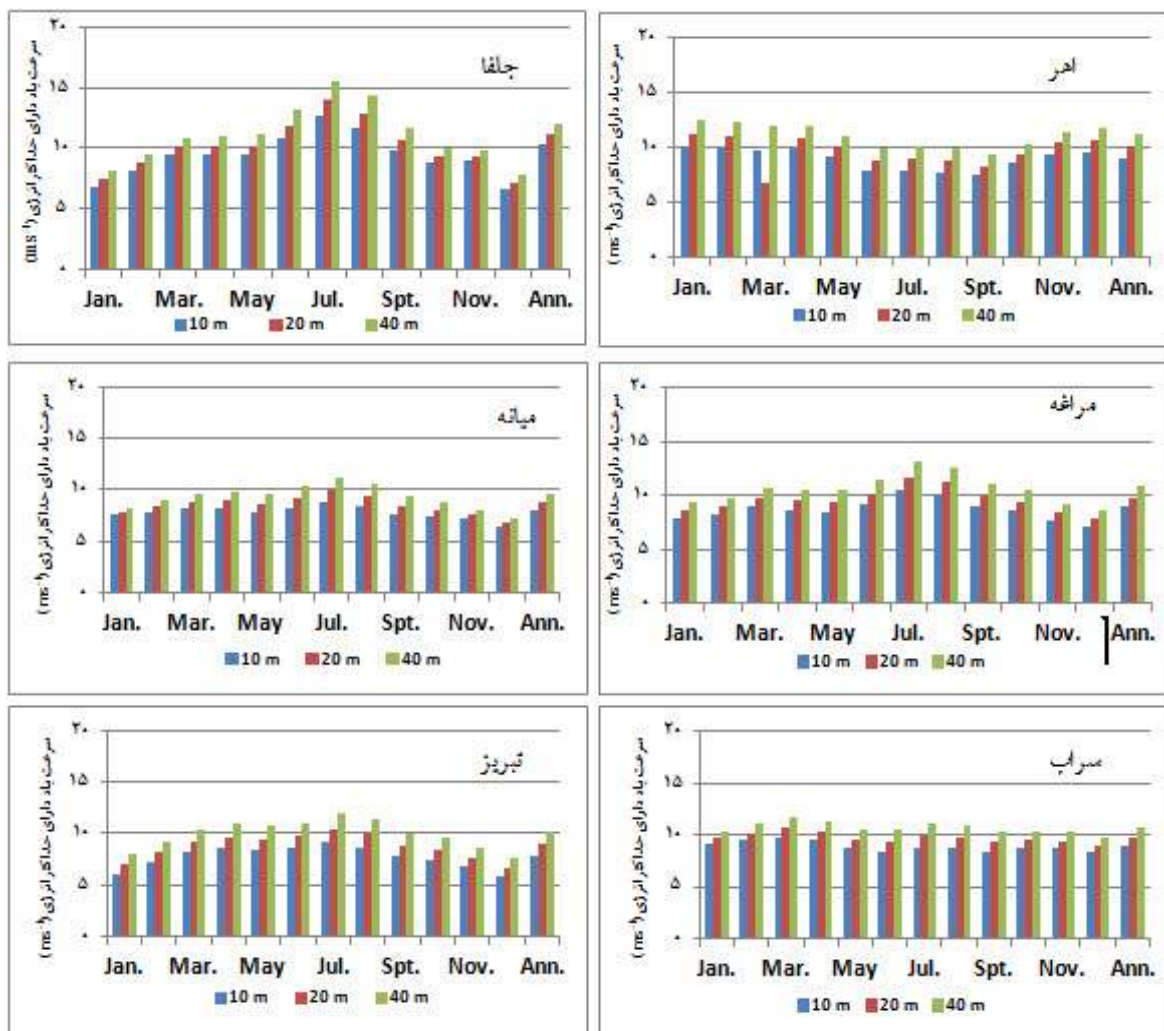
شکل ۴: مقادیر محتمل ترین سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری

ایستگاه تبریز تغییر می‌کند. در ارتفاع ۱۰ متری، در مقیاس ماهانه حداکثر مقدار آن در ایستگاه جلفا برابر با ۱۲/۶ متر بر ثانیه و حداقل مقدار آن در ایستگاه تبریز در ماه دسامبر با مقدار ۵/۷۷ متر بر ثانیه مشاهده شده بود. شکل ۵ مقادیر سرعت باد دارای حداکثر

سرعت باد دارای حداکثر انرژی  
سرعت باد حاوی حداکثر انرژی ( $U_{max,E}$ ) برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس‌های ماهانه و سالانه محاسبه شد. در مقیاس سالانه، مقدار پارامتر مذکور بین ۱۰/۳۳ در ایستگاه جلفا تا ۷/۹۱ در

برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

انرژی (متر بر ثانیه) را در سه ارتفاع مورد بررسی

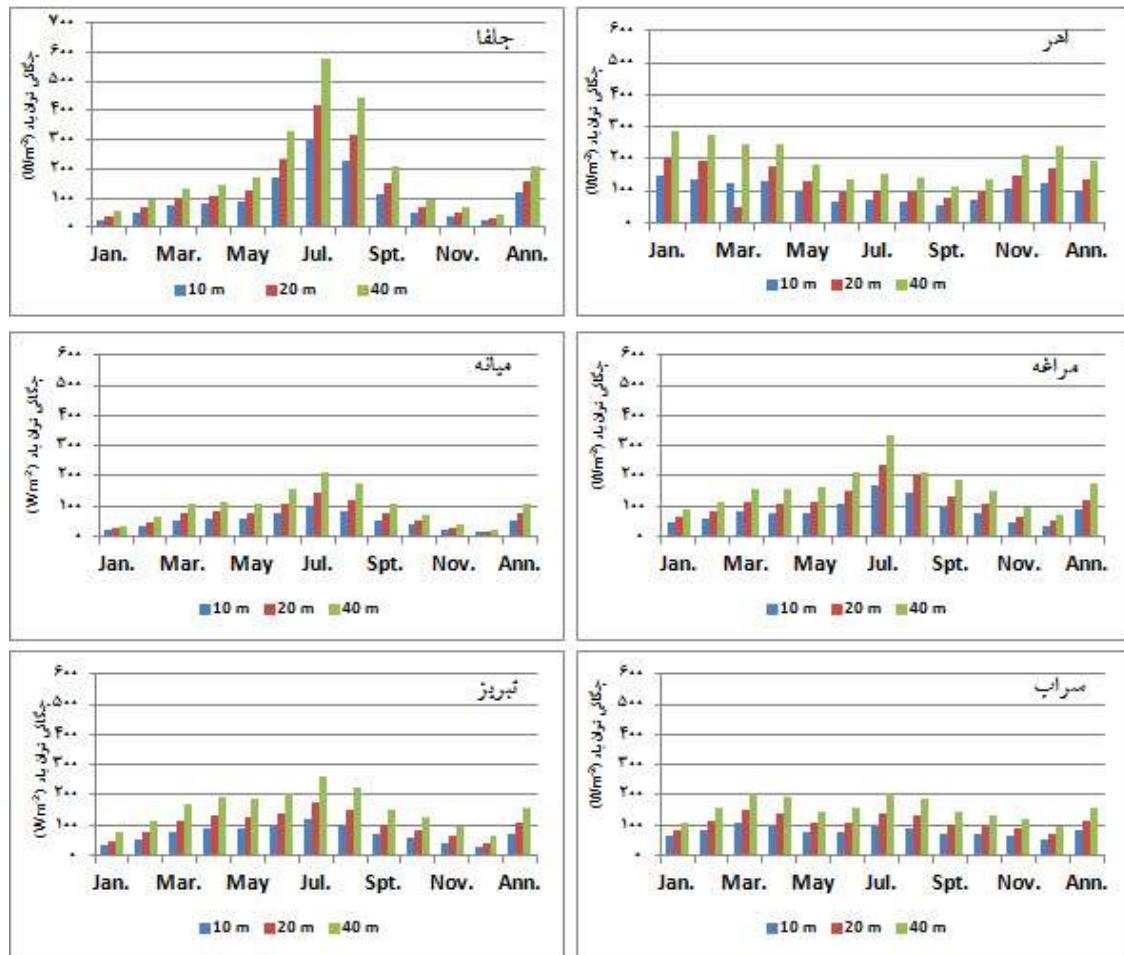


شکل ۵: نمودار سرعت باد دارای حداکثر انرژی در ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری.

ارتفاع ۴۰ متری  $210 \text{ Wm}^{-2}$  در ایستگاه جلفا مشاهده شد. حداقل چگالی توان باد در ارتفاع ۲۰ متری برابر با  $75 \text{ Wm}^{-2}$  و در ارتفاع ۴۰ متری  $106 \text{ Wm}^{-2}$  به دست آمد. شکل ۶ تغییرات چگالی توان باد را در سه ارتفاع مورد نظر نشان می‌دهد.

### چگالی توان باد

در مقیاس سالانه بیشترین مقدار چگالی توان باد ( $\text{Wm}^{-2}$ ) در ایستگاه جلفا مشاهده شد ( $118 \text{ Wm}^{-2}$ ). کمترین مقدار این پارامتر ( $54 \text{ Wm}^{-2}$ ) متعلق به ایستگاه میانه است. در مقیاس سالانه در ارتفاع ۲۰ متری حداکثر مقدار چگالی توان باد برابر با ۱۵۶ و در



شکل ۶: تغییرات چگالی توان باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه

زیر (سعیدی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱: ۳۵۶۸) ایستگاه‌ها از نظر چگالی توان باد سالانه در ارتفاع ۴۰ متری تقسیم بندی شدند:

- poor  $P/A < 100 \text{ Wm}^{-2}$
- good  $P/A \approx 400 \text{ Wm}^{-2}$
- great  $P/A > 700 \text{ Wm}^{-2}$

طبق تقسیم بندی فوق، می‌توان ایستگاه‌های منتخب در استان آذربایجان شرقی را طبق مقادیر چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری در رده ضعیف تا خوب دسته‌بندی کرد. در این زمینه چگالی توان باد برای

بیشترین مقدار چگالی توان باد در مقیاس ماهانه در ماه ژوئیه در ایستگاه جلفا مشاهده شد که مقدار آن در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۴۱۴ و  $577 \text{ Wm}^{-2}$  است. بیشترین مقدار چگالی توان باد در اکثر ایستگاه‌ها در ماه ژوئیه و کمترین مقدار آن در ماه ژانویه در ایستگاه میانه مشاهده شد که برابر با  $19 \text{ Wm}^{-2}$  است. شکل ۶ نشان می‌دهد که چگالی توان باد در ایستگاه جلفا بیش از سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه است. همچنین حداکثر چگالی توان باد در این ایستگاه در ماه ژوئیه تجربه می‌شود. طبق معیار

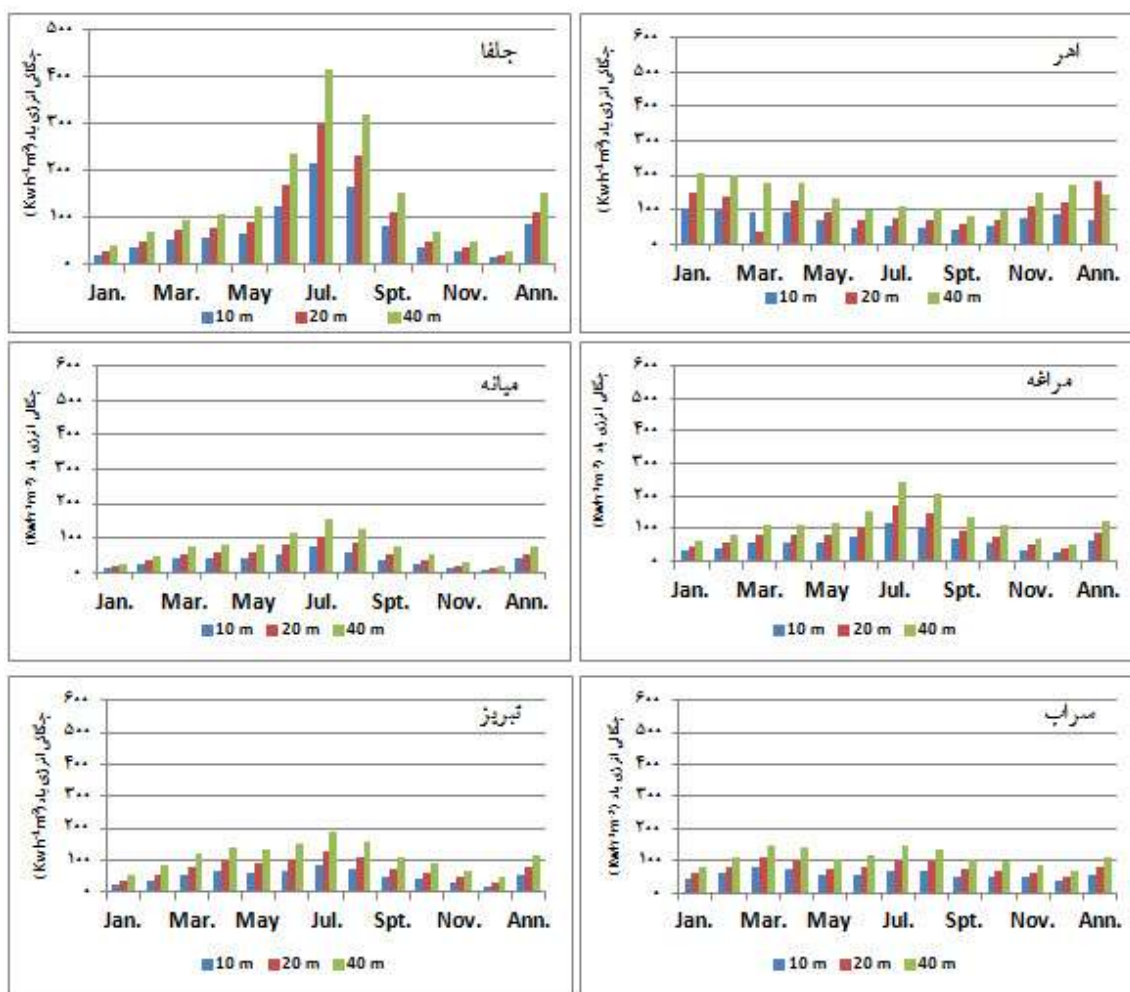
1 - Saeidi et al.

حداکثر مقدار چگالی انرژی باد در ماه ژوئیه برابر با  $\text{Kwh}^{-1}\text{m}^{-2}$  ۲۱۶ است. حداقل مقدار این پارامتر در ایستگاه میانه در ماه دسامبر مشاهده می‌شود که برابر با  $\text{Kwh}^{-1}\text{m}^{-2}$  ۹/۲۱ است. شکل ۷ مقادیر چگالی انرژی باد را در ایستگاه‌های مورد مطالعه و در سه ارتفاع مختلف نشان می‌دهد.

ایستگاه‌های جلفا ۲۱۰، اهر ۱۹۶، مراغه ۱۷۲، تبریز ۱۵۶، سراب ۱۵۵ و میانه  $105 \text{ Wm}^{-2}$  به دست آمد.

چگالی انرژی باد

در مقیاس سالانه بیشترین مقدار چگالی انرژی باد ( $\text{Kwh}^{-1}\text{m}^{-2}$ ) در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در ایستگاه جلفا برابر با مقدار  $84 \text{ Kwh}^{-1}\text{m}^{-2}$  است. در مقیاس ماهانه



شکل ۷: چگالی انرژی باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری.

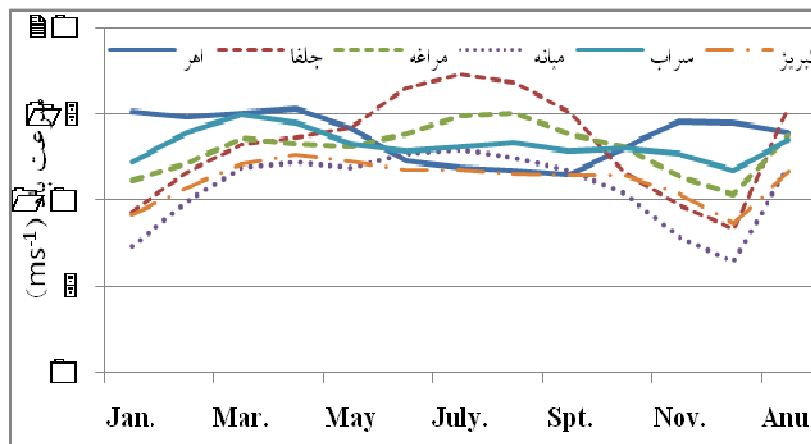
بین ایستگاه‌های منتخب در آذربایجان شرقی به ویژه در ماه ژوئیه به خود اختصاص می‌دهد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که از بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه جلفا بیشترین چگالی انرژی باد را در

سرعت باد  $12/28 \text{ ms}^{-1}$  خواهد بود. بعد از ایستگاه جلفا بالاترین مقدار سرعت باد در همین ارتفاع با دوره بازگشت ۱۰ ساله، در ایستگاه مراغه و سپس در ایستگاه تبریز تجربه می‌شود. در حالت کلی، در مقیاس سالانه از نظر سرعت باد با دوره‌های بازگشت مختلف در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین می‌توان ایستگاه‌ها را به صورت زیر رتبه بندی کرد:

(۱) اهر، (۲) تبریز، (۳) مراغه، (۴) جلفا، (۵) سراب، (۶) میانه

نتایج تحلیل فراوانی سرعت باد با دوره‌های برگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. حداکثر سرعت باد با دوره‌های برگشت مختلف در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین در ایستگاه جلفا در ماه ژوئیه و کمترین مقدار آن در ایستگاه میانه در ماه دسامبر رخ می‌دهد. چنین وضعیتی در دو ارتفاع ۲۰ و ۴۰ متری نیز مشاهده می‌شود. در ارتفاع ۲۰ متری با دوره بازگشت ۱۰ ساله در ایستگاه جلفا در ماه ژوئیه



شکل ۸: سرعت باد با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی در ارتفاع ۱۰ متری.

ایستگاه میانه و در ماه‌های ژانویه و دسامبر تجربه می‌شود. در حالت کلی، سرعت باد در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در استان آذربایجان شرقی از حداقل ۷ تا حداکثر ۱۷ متر بر ثانیه تغییر می‌کند.

شکل ۸ سرعت باد ایستگاه‌های منتخب را با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار سرعت باد در ماه‌های گرم سال به ایستگاه جلفا تعلق دارد. کمترین مقدار آن نیز در ماه دسامبر در

جدول ۵: سرعت باد ( $ms^{-1}$ ) با دوره‌های بازگشت مختلف در ایستگاه‌های منتخب با توجه به بهترین روش

تخمین پارامترها (ارتفاع ۱۰ متری)

ایستگاه	دوره برگشت	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
اهر	$T_r = 10$	۸/۲۵	۸/۱۶	۷/۵۳	۷/۳۸	۷/۲۹	۵/۹۹	۷/۵۲	۷/۳۳	۵/۵۶	۵/۳۷	۶/۸۸	۷/۶۹	۶/۹
	$T_r = 25$	۱۱/۰۹	۱۰/۸۹	۱۰/۵۴	۱۰/۵۱	۹/۳۱	۸/۴۸	۸/۷۲	۸/۵۴	۷/۸۹	۷/۲۴	۹/۸۹	۱۰/۴۴	۹/۶۹
	$T_r = 50$	۱۳/۱۷	۱۲/۸۸	۱۲/۸۳	۱۲/۹۱	۱۱/۷۰	۱۰/۳۸	۱۰/۳۴	۱۰/۱۶	۹/۶۸	۹/۵۷	۱۲/۲۲	۱۲/۴۷	۱۱/۸۱
	$T_r = 100$	۱۵/۲۱	۱۴/۸۱	۱۵/۱۱	۱۵/۳۳	۱۴/۱۶	۱۲/۳۰	۱۱/۹۲	۱۱/۸۶	۱۱/۴۸	۱۳/۰۲	۱۴/۵۹	۱۴/۴۷	۱۳/۸۳
تبریز	$T_r = 10$	۴/۰۱	۵/۳۰	۶/۴۸	۷/۴۵	۵/۷۲	۶/۳۸	۷/۲۹	۶/۹۸	۵/۷۹	۵/۲۴	۸/۱۳	۶/۸۹	۸/۶۶
	$T_r = 25$	۶/۸۸	۸/۴۴	۹/۷۱	۹/۵۴	۸/۵۸	۸/۹۶	۹/۶۹	۹/۵۳	۸/۵۲	۸/۱۳	۱۰/۷۰	۶/۸۹	۶/۸۶
	$T_r = 50$	۸/۵۶	۱۱/۰۸	۱۲/۲۹	۱۱/۹۷	۱۰/۸۶	۱۰/۹۱	۱۱/۴۳	۱۱/۴۳	۱۰/۶۶	۱۰/۵۰	۱۰/۱۲	۹/۲	۱۱/۰۹
	$T_r = 100$	۱۲/۲۴	۱۳/۹۰	۱۴/۹۶	۱۴/۴۸	۱۳/۲۲	۱۲/۸۶	۱۳/۱۲	۱۳/۳۱	۱۲/۸۷	۱۳/۰۱	۱۲/۷۶	۱۱/۷۱	۱۳/۵۱
جلفا	$T_r = 10$	۳/۱۵	۴/۱۵	۵/۵۷	۵/۰۳	۵/۶۶	۸/۵۴	۱۱	۹/۴۲	۶/۶۲	۳/۷۵	۳/۵۰	۳/۵۱	۶/۱۹
	$T_r = 25$	۵/۳۴	۶/۸۱	۷/۶۳	۸/۱۵	۸/۹۰	۱۱/۷۴	۱۳/۶۹	۱۲/۸۲	۹/۸۵	۶/۴۸	۴/۸۳	۴/۵	۹/۶۳
	$T_r = 50$	۷/۳۱	۹/۱۰	۱۰/۳۰	۱۰/۷۹	۱۱/۴۷	۱۴/۱۳	۱۵/۵۵	۱۴/۸۸	۱۲/۴۲	۸/۹۰	۷/۰۸	۶/۳۱	۱۲/۴۵
	$T_r = 100$	۹/۳۹	۱۱/۵۹	۱۳/۳۳	۱۳/۶۵	۱۴/۱۹	۱۶/۴۹	۱۷/۳۱	۱۶/۸۵	۱۵/۰۷	۱۱/۶۱	۹/۷۵	۸/۲۸	۱۵/۴۵
سراب	$T_r = 10$	۴/۹۱	۵/۸۷	۶/۷۵	۷/۱۵	۷/۱۵	۷/۵۵	۸/۰۷	۸/۰۷	۷/۶۳	۵/۸۸	۵/۳۳	۴/۶۹	۶/۶۳
	$T_r = 25$	۶/۶۴	۸/۸۶	۱۰/۹۶	۹/۴۲	۹/۳۶	۹/۳۰	۹/۷۷	۹/۳۱	۸/۵۸	۸/۱۰	۷/۲۹	۶/۳۳	۸/۷۲
	$T_r = 50$	۷/۹۱	۹/۳۱	۱۰/۵۶	۱۱/۰۶	۱۰/۸۶	۱۰/۵۸	۱۰/۷۵	۱۰/۴۶	۱۰/۰۱	۹/۷۷	۸/۸۵	۷/۵۳	۱۰/۲۳
	$T_r = 100$	۹/۱۷	۱۰/۷۴	۱۲/۱۲	۱۲/۶۴	۱۲/۲۰	۱۱/۷۹	۱۱/۷۴	۱۱/۵۳	۱۱/۴	۱۱/۴۲	۱۰/۴۰	۸/۷۰	۱۱/۶۹
مراغه	$T_r = 10$	۴/۰۱	۴/۸۳	۵/۸۶	۶	۷/۲۹	۷/۳۱	۸/۹۴	۸/۳۳	۶/۶۷	۵/۹۵	۴/۵۵	۳/۸۵	۶/۲۷
	$T_r = 25$	۶/۶۰	۷/۵۵	۸/۸۰	۸/۸۱	۸/۹۷	۹/۹۷	۱۱/۴۶	۱۱/۱۰	۹/۵۱	۸/۷۲	۷/۱۱	۶/۲۲	۹/۱۷
	$T_r = 50$	۸/۸۲	۹/۸۰	۱۱/۱۶	۱۱/۰۲	۱۱/۰۳	۱۱/۹۵	۱۳/۲۴	۱۳/۱۲	۱۱/۷	۱۰/۹	۹/۲۲	۸/۳۳	۱۱/۴۵
	$T_r = 100$	۱۱/۳۳	۱۲/۱۸	۱۳/۶۱	۱۳/۳۸	۱۳/۱۱	۱۳/۹۰	۱۴/۹۴	۱۵/۰۸	۱۲/۹	۱۳/۱۴	۱۱/۴۶	۱۰/۳۹	۱۳/۷۸
عیانک	$T_r = 10$	۱/۷۰	۳	۴/۵۵	۴/۴۳	۵/۰۳	۶/۳۵	۷/۴۹	۶/۸۳	۵/۰۴	۳/۷۵	۳/۰۸	۱/۵۳	۴/۶۷
	$T_r = 25$	۳/۴۵	۵/۳۴	۷/۲۵	۷/۶۶	۷/۶۴	۸/۹۰	۹/۷۷	۹/۱۵	۷/۵۸	۶/۱۶	۴/۹۷	۳/۰۵	۷/۳۶
	$T_r = 50$	۵/۱۹	۷/۴۸	۹/۵۱	۹/۸۹	۹/۷۵	۱۰/۸۳	۱۱/۴۱	۱۰/۸۵	۹/۶۱	۸/۲۲	۵/۷۸	۴/۵۷	۹/۵۹
	$T_r = 100$	۷/۳۲	۹/۹۲	۱۱/۹۴	۱۲/۲۵	۱۱/۹۵	۱۲/۷۷	۱۲/۹۸	۱۲/۵۱	۱۱/۷۳	۱۰/۴۶	۷/۹۲	۶/۴	۱۱/۹۶

بر اساس جدول ۶ نتیجه تقریباً مشابه برای ارتفاع ۲۰ متری به دست آمده است. به طوری که در ارتفاع ۲۰ متری، ۵ ایستگاه از کل ۶ ایستگاه حداکثر سرعت باد را در ماه ژوئیه تجربه کرده است و نسبت به ارتفاع ۱۰ متری مقدار سرعت باد اندکی بیشتر می‌شود (در حدود ۱ متر بر ثانیه در دوره بازگشت ۱۰ سال).

به طوری که از جدول ۵ می‌توان استنباط کرد در اکثر ایستگاه‌ها بیشترین مقدار سرعت باد در ماه ژوئیه اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال برای دوره بازگشت ۱۰ سال ایستگاه‌های تبریز، سراب، مراغه و میانه در ماه ژوئیه بیشترین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری را تجربه می‌کنند که مقدار سرعت باد بین ۷/۲۹ تا ۸/۹۴ متر بر ثانیه است. البته در ایستگاه جلفا بیشترین سرعت باد در ماه اوت (گرم‌ترین ماه سال) معادل ۹/۹۲ متر بر ثانیه تجربه شده است.





در محاسبه پتانسیل انرژی باد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه پنج روش حداکثر راست نمایی، گشتاورها، گرافیکی، تجربی و فاکتور الگوی انرژی جهت برآورد پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از آزمون کی دو روش گشتاورها به عنوان بهترین روش انتخاب شد. با استفاده از پارامترهای حاصل از این روش، پارامترهای مربوط به انرژی باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه برآورد شد. زمانی که دامنه تغییرات پارامترهای شکل و مقیاس در طول سال زیاد باشد پارامترهای مربوط به انرژی باد نیز زیاد تغییر خواهند کرد. به عنوان مثال، در ایستگاه اهر پارامترهای مربوط به انرژی باد در طول سال تغییر چندانی نمی‌کند. بهترین راه جهت ارزیابی منبع باد موجود در یک منطقه محاسبه مقادیر چگالی توان باد است که نشان می‌دهد چه مقدار انرژی در آن منطقه جهت تبدیل به الکتریسیته توسط توربین بادی وجود دارد. لذا در این مطالعه پارامترهای مربوط به پتانسیل انرژی باد مانند چگالی توان باد، چگالی انرژی باد، سرعت باد دارای حداکثر انرژی و محتمل‌ترین سرعت باد محاسبه شد. طبق نتایج به دست آمده، در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقادیر حداکثر پارامترهای مربوط به انرژی باد در ایستگاه جلفا مشاهده می‌شود و ایستگاه اهر رتبه دوم را دارد. بالاترین مقدار چگالی توان باد برابر با  $300 \text{ Wm}^{-2}$  در ایستگاه جلفا مشاهده می‌شود. تحلیل سرعت باد با دوره‌های بازگشت مختلف نشان داد که

به طوری که از جدول ۷ می‌توان استنباط کرد در دوره بازگشت ۱۰ سال در ارتفاع ۴۰ متری حداکثر سرعت باد باز هم در ماه گرم سال (ژوئیه) تجربه شده است. به طوری که ۵ ایستگاه از ۶ ایستگاه سرعت باد بین ۹/۵۶ تا ۱۳/۷ متر بر ثانیه در ماه گرم سال تجربه می‌کند که این مقادیر در حدود ۲/۵ متر بر ثانیه نسبت به ارتفاع ۱۰ متری بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت قرار دادن محور توربین بادی در ارتفاع ۴۰ متری منجر به تولید انرژی در مقایسه با ارتفاع‌های ۱۰ و ۲۰ متری خواهد شد.

### نتیجه گیری

بررسی تغییرات ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت در همه ایستگاه‌ها به استثنای ایستگاه اهر سرعت باد افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش در ایستگاه جلفا اتفاق می‌افتد. همچنین حداکثر سرعت باد در ایستگاه اهر در ماه فوریه و در سایر ایستگاه‌ها در ماه ژوئیه مشاهده می‌شود.

تحقیقات محققین مختلف (اسکین و همکاران ۲۰۰۸، میرحسینی و همکاران ۲۰۱۱، مصطفایی‌پور و همکاران ۲۰۱۱) ثابت کرده است که توزیع ویبول در تحلیل داده‌های سرعت باد برتری نسبی در مقایسه با سایر توزیع‌های آماری دارد. بنابراین در این مقاله از توزیع ویبول استفاده گردید. انتخاب روش مناسب جهت برآورد پارامترهای توزیع ویبول اهمیت زیادی دارد به دلیل این‌که این پارامترها

- Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 15: 2545-2556.
- Rahimzadeh, F., M. Pedram, A.Sedaghat kerdar, and GH. Kamali. (2009). Wind energy assessment in synoptic stations of Isfahan Province, *Geography and Environmental Planning*, Vol 3: 155-172.
- Rao, A. R., K. H. Hamed. (2000). *Flood Frequency Analysis*, CRC Press, 321 pages.
- Rocha, P., R. Sousa, C. Andrade and M. Silva. (2012). Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil, *Applied Energy*, Vol 89: 395-400.
- Saeidi, D., M. Mirhosseini, A. Sedaghat, and A. Mostafaeipour. (2011). Feasibility study of wind energy potential in two provinces of Iran: North and South Khorasan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 15: 3558-3569.
- Saedi D., O. Nematollahi, and A. Alemrajabi. (2011). Assessing the wind energy potential of North Khorasan province in Iran, *Journal of Energy Engineering Management*, Vol 1 (1): 49-56.
- Salahi, B. (2004). Wind energy potential and fitting wind occurring real probabilities using density distribution function of weibull in Ardebil province synoptic stations, *Geographical Reserche*, Vol 72: 12310-12327.
- Shata, A.S., R. Hanitsch. (2008). Electricity generation and wind potential assessment at Hurghada, Egypt, *Renewable Energy*, Vol 33: 141-148.
- Usta, I., Y. Kantar. (2012). Analysis of some flexible families of distributions for estimation of wind speed distribution, *Applied Energy*, Vol 89: 355-367.
- Yaniktepe, B., T. Koroglu, and M.M. Savrun. (2013). Investigation of wind speed در مقیاس ماهانه، بیشترین سرعت باد در ایستگاه جلغا رخ خواهد داد. در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه و در دوره بازگشت ۱۰ سال، حداکثر سرعت باد در ماه ژوئیه تجربه خواهد شد.
- References**
- Aktag, S., A. Dinler. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications, *Energy Conversion and Management*, Vol 50: 1761-1766.
- Chang, P.T. (2011a). Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application, *Applied Energy*, Vol 88: 272-282.
- Chang, P.T. (2011b). Estimation of wind energy potential using different probability density functions, *Applied Energy*, Vol 88: 1848-1856.
- Eskin, N., H. Artar, and S. Tolun. (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable Energy Reviews*, Vol 12: 839-851.
- Gandom Kar, A. (2008). Assessment of wind potential energy in Iran, *Geography and Environmental Planning*, Vol 4: 85-100.
- Li, X. (2007). *Green Energy Basic Concepts and Fundamentals*, British Library Cataloguing in Publication Data, 296 pages.
- Mirhosseini, M., F. Sharifi, and A. Sedaghat. (2011). Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 449-459.
- Mohammadi, H., SH. Rostami Jalilian, F. Taghavi, and A.A. Shamsipour. (2011). Evaluation of wind energy potential in Kermanshah Province, *Physical Geography Research*, Vol 2: 19-32.
- Mostafaeipour, A., A. Sedaghat, A. A. Dehghan-Niri, and V. Kalantar. (2011)

order to using its energy in Ardebil Province, Geographical Researche, Vol 53: 41-55.

characteristic and wind energy potential in Osmaniye, Turkey, Renewable and Sustainable energy, Vol 21: 703-711.  
Zahedi, M., B.Salahi, and M. Jamil. (2005). Calculation of wind power and density in