

## برآورد حداکثر انرژی پتانسیل باد در استان لرستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

صمد خسروی یگانه (دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران)

[samadkhosravi@yahoo.com](mailto:samadkhosravi@yahoo.com)

مصطفی کرم‌پور (استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران، نویسنده مسئول)

[karampoor.m@lu.ac.ir](mailto:karampoor.m@lu.ac.ir)

بهروز نصیری (استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران)

[nasiri.b@lu.ac.ir](mailto:nasiri.b@lu.ac.ir)

صص ۳۲۹ - ۳۰۵

### چکیده

اهداف: هدف این پژوهش، برآورد انرژی پتانسیل باد در سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین در ۸ ایستگاه انتخاب شده در استان لرستان است. روش: در این پژوهش برای برآورد انرژی پتانسیل باد بر پایه داده‌های ساعتی در ۸ ایستگاه انتخاب شده در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۹ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اخذ شده از MERRA-2 Modal انجام شده است. برای صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی، داده‌های ساعتی سرعت باد از سازمان هواشناسی دریافت شد. برای ارزیابی و صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی در تراز ارتفاعی ۱۰ متری، ضریب همبستگی CC، میانگین خطا ME، مجذور مربعات خطا RMSE و تابع اریبی یا تورش‌دار BIAS محاسبه شده است. پس از صحت‌سنجی داده‌ها برای ترسیم گلباد از نرم‌افزار Windographer و برای برازش داده‌ها از توزیع احتمال ویبول استفاده شد. نیروی چگالی باد سالانه در ترازهای ارتفاعی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری محاسبه شد. یافته‌ها/نتایج: در این تحقیق پس از صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی با میزان خطای  $0/4047218$  ثابت شد که داده‌های ماهواره‌ای از وضعیت مناسبی برای استفاده در این پژوهش برخوردارند. بر پایه محاسبات، بیشترین انرژی پتانسیل باد در تراز ارتفاعی ۳۰ متری به‌ترتیب به ایستگاه‌های

بروجرد، الشتر، کمالوند، ازنا، الیگودرز، نورآباد، دورود و کوهدشت با ۱۲۸، ۱۰۲، ۹۸، ۸۶، ۶۹، ۵۷، ۵۰ و ۴۱ وات بر مترمربع در ساعت اختصاص دارد که این مقادیر در ترازهای ۵۰ و ۱۰۰ متری با یک نسبت مشخص و با همین ترتیب در تراز ۳۰ متری برای دیگر ترازهای ارتفاعی در همه ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد.

**نتیجه‌گیری:** ایستگاه‌های بروجرد، الشتر، نورآباد، ازنا و کمالوند در ترازهای ارتفاعی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری و ایستگاه‌های الیگودرز، کوهدشت و دورود فقط در سطح ۱۰۰ متری از سطح زمین پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی از نیروی چگالی باد با توجه به نوع ارتفاع توربین بادی دارند.

**کلیدواژه‌ها:** توزیع ویبول، نیروی چگالی باد، داده ماهواره‌ای، استان لرستان.

#### ۱. مقدمه

از دیرباز انسان به باد به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین منابع انرژی توجه داشته و آن را به کار برده است. استفاده مستقیم از باد به‌صورت خشک‌کردن و تهویه و استفاده غیرمستقیم از آن به صورت تبدیل انرژی جریان باد به انواع مختلف انرژی برای آردکردن غلات، پمپاژ آب به مزارع و استفاده از آن در شبکه سراسری برق است. طی سالیان دراز ثابت شده است که می‌توان از انرژی باد به صورت مکانیکی و الکتریکی استفاده کرد. از طرف دیگر، منابع انرژی فسیلی مشکلات و هزینه‌های مادی و زیست‌محیطی خاص خود را دارد. استفاده از انرژی اتمی نیز صرف نظر از پیامدهای شدید زیست‌محیطی نظیر زباله هسته‌ای و غیره، هزینه زیاد و تکنولوژی پیشرفته‌ای را می‌طلبد. این موضوع سبب شده است که بشر همواره در پی منابع انرژی نو برای جایگزینی دو منبع انرژی ذکر شده باشد؛ منابعی که نه تنها ارزان‌قیمت و در دسترس هستند، بلکه مصرف آن‌ها آلودگی چندانی نداشته باشد. از مجموع انرژی‌های یادشده به نظر می‌رسد که استفاده از انرژی‌های خورشیدی و باد در کشور ایران اقتصادی‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد. استفاده از انرژی خورشیدی بر سایر روش‌های تولید انرژی‌های نو برتری دارد، اما نباید از این نکته غافل شد که اول اینکه بازده استفاده از سلول‌های فتوولتائیک در تبدیل انرژی خورشیدی به برق حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد است و دوم اینکه استفاده از انرژی خورشیدی مستلزم صرف هزینه‌های زیادی است. این موضوع سبب شده است که امروزه

توجه بسیاری به انرژی باد معطوف شود؛ زیرا تجدیدپذیر است و میزان تولید آن به میزان ذخایر آن در دیگر نقاط دنیا وابسته نیست. همچنین، به دلیل پخش بودن و متمرکز نبودن نیروگاه در مواقع جنگ و سایر بلاای طبیعی، آسیب پذیری کمتری در مقایسه با نیروگاه‌های متمرکز دارد (ثقفی، ۱۳۷۲، ص. ۱۲). ماهیت پایان‌ناپذیر بودن انرژی باد و کاهش خطرات زیست‌محیطی موجب شده است که در حال حاضر انرژی باد نقش مهمی در تولید انرژی در جهان داشته باشد؛ از این رو کشورهای مختلف سعی در استفاده از آن در کنار دیگر منابع انرژی دارند. به نظر می‌رسد در آینده نزدیک استفاده از این انرژی به‌طور چشمگیری افزایش یابد؛ این در حالی است که دستیابی به حداکثر استفاده از آن مستلزم چگونگی مکان‌گزینی نیروگاه‌های بادی و انتخاب توربین‌های بادی متناسب با سرعت باد است. بررسی جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در استان و بهره‌برداری از انرژی باد به دلیل ضرورت‌های زیست‌محیطی، تنوع بخشیدن به منابع انرژی و وابستگی نداشتن به دیگر استان‌ها در زمینه انرژی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این پژوهش به ارزیابی انرژی پتانسیل باد پرداخته شده است تا در صورت مناسب بودن شرایط، زمینه استفاده از انرژی باد در استان فراهم شود.

## ۲. پیشینه تحقیق

از تحقیقات انجام شده در داخل و خارج از کشور که به بررسی و پتانسیل‌سنجی انرژی باد پرداخته‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. پژوهش‌های علمی و مطالعات فرسنگی بیلال، ندونگو، کبه، سامبو و ندیای<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) امکان‌سنجی با استفاده از انرژی باد برای تولید برق در ساحل شمال غرب سنگال را بررسی کردند. نتایج نشان داد چگالی توان باد بین ۱۲۰/۰۱ تا ۳۰/۰۵ وات بر متر مربع است. بیشترین ظرفیت تولید باد در منطقه ساخور و کمترین میزان تولید انرژی در گاندون است. هاروی<sup>۲</sup> (۲۰۱۳) پتانسیل انرژی باد را به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی در کانادا بررسی کرد. وی برای بررسی قدرت توربین‌های

1. Bailal, Ndongo, Kebe, Sambou & Ndiaye

2. Harvey

بادی از داده‌های انرژی باد اطلس کانادا استفاده کرد. نتایج نشان داد که در کانادا مناطقی پراکنده‌ای با ظرفیت بیشتر از ۰/۴ و برخی بیشتر از ۰/۵ وجود دارد و سرمایه مزرعه بادی در حدود ۲۰۰۰ دلار در هر کیلو وات بر کیلومتر مربع و ۰/۷۵ دلار، به ترتیب برای خشکی و دریاست. مورث، بلاسوبرامانیان و دشموخ<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) با به کارگیری نرم افزار Windographer و داده‌های ماهواره‌ای به ارزیابی و بررسی انرژی پتانسیل باد در سطح ۵۰ متری از سطح زمین در کشور هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد میانگین سرعت باد در این کشور ۵/۵۸ متر بر ثانیه با توان تولیدی ۳۳۶ وات بر متر مربع در سال است.

انتظاری و امیراحمدی (۱۳۹۱) پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوهر را بررسی کردند. آن‌ها از داده‌های روزانه و ساعتی سمت و سرعت باد در دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۰۷ با استفاده از روش‌های آماری و ریاضی، مقدار انرژی پتانسیل باد را در ارتفاع ۱۰ متری محاسبه کردند. نتایج نشان داد تندی متوسط سالانه باد در این ایستگاه ۲/۵۳ متر بر ثانیه بوده است. بختیاری، بذرافشان و خانجانی (۱۳۹۲) پتانسیل انرژی باد بر مبنای داده‌های کوتاه‌مدت ۱۰ دقیقه‌ای در مناطق کرمان، جیرفت و بم را با استفاده از توزیع احتمال و محاسبه تابع چگالی بررسی کردند. نتایج نشان داد ایستگاه بم از نظر متوسط تندی باد، درصد فراوانی باد غالب، ضریب تداوم تندی و تابع چگالی توان باد، در مقایسه با دو ایستگاه دیگر برتری دارد و چگالی توان باد در ایستگاه بم ۲۴۵۵/۴ ساعت در سال است. رضایی بنفشه، جهانبخش، دین‌پژوه و اسمعیل پور (۱۳۹۳) امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد را در پنج ایستگاه هم‌دید واقع در استان‌های اردبیل و زنجان بررسی کردند. در میان ایستگاه‌های مطالعه شده، ایستگاه اردبیل با ۲۸۵/۵۹ وات بر متر مربع در ارتفاع ۴۰ متری از بیشترین چگالی توان باد برخوردار بود. فاضل‌پور، مارکاریان و سلطانی (۲۰۱۷) برای برآورد و ارزیابی انرژی پتانسیل باد در استان سیستان و بلوچستان از نرم‌افزار Windographer و داده‌های ماهواره‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد زاهدان، زابل و زهک در این استان دارای ظرفیت بیشتری برای تولید انرژی از نیروی چگالی باد هستند. عساکره، بیرانوند و دوست‌کامیان (۲۰۱۸) برای ارزیابی قدرت باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل از نرم‌افزار Windographer در دوره زمانی ۲۰۰۸-

1. Moorthy, Balasubramanian & Dashmukh

۱۹۹۰ استفاده کردند. نتایج نشان داد میانگین سرعت باد در ایستگاه اردبیل ۷/۴ متر بر ثانیه است و راندمان انرژی باد در جهت جنوب غربی است. با توجه به مطالعات، آنچه باعث تمایز پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های دیگر می‌شود، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای به دست آوردن انرژی پتانسیل باد در استان لرستان است. دلیل استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزار Windographer این است که منطقه مدنظر از نظر توپوگرافی و سایر شرایط طبیعی دارای وضعیت خاصی است که هر یک از شرایط طبیعی و توپوگرافی به‌نوعی باعث می‌شوند سرعت و جهت وزش باد در منطقه مدنظر از تغییرپذیری زیادی برخوردار باشد؛ بنابراین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزار یاد شده به بررسی و محاسبه نیروی چگالی باد به‌منظور جایگزینی انرژی باد با سایر منابع انرژی موجود در استان لرستان پرداخته شد تا بتوان به دیدگاهی جامع و کامل درباره این موضوع دست یافت.

### ۳. روش‌شناسی تحقیق

#### ۱.۳. معرفی پایگاه داده MERRA-2 Modal

مرکز تجزیه و تحلیل نوین ناسا برای پژوهش‌ها و برنامه‌های کاربردی MERRA<sup>۱</sup> یک مجموعه داده‌ای اتمسفری-بازتحلیل است (راینکر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۱، ص. ۱۲، به نقل از شکری کوچک، آخوندعلی و شریفی، ۱۳۹۸، ص. ۵۹) که دفتر جهانی هماهنگ‌سازی و مدل‌سازی ناسا (GMAO) ایجاد کرده است. این پایگاه داده بازتحلیل که از نسخه ۵ سامانه مشاهدات زمینی Goddard (GEOS-5) است و یک مدل گردش عمومی جو است، از سامانه داده‌گواری (DAS)<sup>۳</sup> استفاده می‌کند و به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مشاهدات می‌پردازد و با ترکیب داده‌های مدل به‌کارگرفته‌شده و مشاهدات نامنظم مکانی و زمانی، مجموعه داده‌های شبکه‌بندی و نقطه‌ای را با دقت مناسب تولید می‌کند (رایل رانجل<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷، ص. ۱۵ به نقل از عباس‌زاده مزوجی، ۱۳۹۰).

1. Modern- Era Retrospective Analysis For Research and Applications
2. Suarez, Gelaro, Todling, Bacmeister, Liu, Bosilovich & Reinker
3. Data Assimilation system
4. Rail Rangel



بازتحلیل کسب کرد. این آماره‌ها عبارت‌اند از: ضریب همبستگی<sup>۱</sup>، میانگین خطا<sup>۲</sup> و مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup>. روابط ۱ تا ۴ مربوط به محاسبه آماری خطاست.

رابطه ۱:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o}) \times (s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2}}$$

رابطه ۲:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - o_i)}{N}$$

رابطه ۳:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (s_i - o_i)^2}{N}}$$

$O$  مقدار داده مشاهده‌ای (ایستگاهی) و  $S$  مقدار داده ماهواره‌ای است. ضریب همبستگی، میزان انطباق داده‌ها را نشان می‌دهد. میانگین خطاها به‌طور کلی بیش‌آورد بودن و کم‌برآورد بودن پایگاه داده را تعیین می‌کند. RMSE شاخصی برای میزان خطاها و معیاری برای عملکرد مجموعه داده‌های ماهواره‌ای است.

#### محاسبه تابع اریبی یا تورش‌دار<sup>۴</sup>

در آمار و ریاضیات، تابع اریبی، تورش یک برآوردگر همان اختلاف بین امید ریاضی آن برآوردگر و مقدار داده واقعی (ایستگاهی) است. به عبارت ریاضی فرض کنید  $X_1, X_2, \dots, X_n$  براساس توزیع  $p(X|\theta)$  توزیع شده باشد و  $\hat{\theta}$  یک تخمینگر براساس داده‌های مشاهده‌ای است. اریبی  $\hat{\theta}$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

رابطه ۴:

$$BIAS[\hat{\theta}] = E[\hat{\theta}] - \theta = E[\hat{\theta} - \theta]$$

1. Correlation Coefficient (CC)
2. Mean Squared Error (ME)
3. Root Mean Squared Deviation (RMSE)
4. Bias

در این رابطه، E امید ریاضی متغیر X، نسبت به توزیع  $P(X|\theta)$  است (مروتی و شکوهی، ۱۳۹۳، ص. ۴۴). نتایج صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۹ در جدول ۱ ارائه شده است. به‌منظور پتانسیل‌سنجی انرژی باد در استان لرستان از میانگین داده‌های (سرعت و جهت) باد استفاده شده است. داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش از نوع داده‌های بازکاوی‌شده ماهواره‌ای هستند و زمان اندازه‌گیری داده‌های استفاده‌شده ۲۴ بار در طی شبانه‌روز بوده است یا به‌عبارتی هر ساعت یک بار داده‌ها ثبت شده‌اند و توسط مدل MERRA-2 Model با دقت تفکیک مکانی ۰/۵ × ۰/۶۲۵ درجه مهیا شده است. داده‌ها در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۹ و در سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین هستند که استفاده شده‌اند. در این پژوهش از نرم‌افزار windographer استفاده شده است که خروجی این نرم‌افزار شامل میزان میانگین سرعت باد سالانه برحسب متر بر ثانیه، محاسبه پارامترهای توزیع آماری ویبول k و c و نیروی چگالی باد برحسب وات بر متر مربع و رسم گلباد در هریک از سطوح مختلف می‌شود. برای تمامی محاسبات و آنالیز عددی داده‌ها از این نرم‌افزار استفاده شده است. پارامترهای مندرج در جداول ۲، ۳ و ۴ براساس رابطه‌های ذیل محاسبه شده است. برای محاسبه الگوریتم حداکثر درست‌نمایی<sup>۱</sup> از رابطه ۵ استفاده شده است.

رابطه ۵:

$$K = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N U_i^k}{\sum_{i=1}^N U_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(U_i)}{N} \right]^{-1}$$

در این رابطه U سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، N تعداد اندازه‌گیری‌های ثبت شده داده و K فاکتور تابع توزیع آماری ویبول<sup>۲</sup> هستند. تابع توزیع ویبول دوپارامتره و شکل خاص آن یکی از بهترین توابع برای برازش به داده‌های سرعت باد است که برای توزیع پیوسته سرعت باد از مقادیر گسسته مشاهده‌ای بسیار مناسب است (جاستوس و هارگراو، ۱۹۷۸، ص. ۳۳). برای محاسبه پارامتر ویبول C از رابطه ۶ بهره گرفته شده است.

1. Maximumlikelihood
2. Weibull
3. Justus, & Hargraves



رابطه ۶:

$$C = \left( \frac{\sum_{i=1}^N U_i^k}{N} \right)^{\frac{1}{k}}$$

در این رابطه،  $U$  سرعت باد برحسب متر بر ثانیه،  $N$  تعداد داده ثبت شده و  $K$  فاکتور تابع توزیع آماری ویبول  $K$  است (استیونز و سمولدرز، ۱۹۷۹، ص. ۱۴). برای محاسبه پارامتر ویبول  $C$  از رابطه ۶ بهره گرفته شده است. با استفاده از رابطه ۷ الگوریتم حداقل مربعات<sup>۲</sup> محاسبه می شود.

رابطه ۷:

$$\begin{aligned} F(U) &= 1 - \exp \left[ - \left( \frac{U}{C} \right)^k \right] \\ -\ln[1 - F(U)] &= \left( \frac{U}{C} \right)^k \\ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(U)} \right] &= \left( \frac{U}{C} \right)^k \\ \ln \left\{ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(U)} \right] \right\} &= K \ln \left( \frac{U}{C} \right) \\ \ln \left\{ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(U)} \right] \right\} &= K \ln U - K \ln C \end{aligned}$$

رابطه ۷، یک رابطه خطی است که طرف چپ آن متغیر وابسته  $(y)$  و  $\ln(U)$  متغیر مستقل  $(x)$  فرض می شود. مقدار  $k$  از شیب خط به دست می آید. با قرائت مقدار  $k$  از روی نمودار و مساوی قرار دادن حاصل آن با  $-k \ln(n)$  مقدار  $C$  را می توان محاسبه کرد. با استفاده از رابطه ۸ نیروی چگالی باد برحسب وات بر متر مربع محاسبه می شود.

رابطه ۸:

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

1. Stevens & Sumlders
2. Lastsquares

در این رابطه،  $\frac{P}{A}$  نیروی چگالی باد برحسب وات بر مترمربع و  $\rho$  چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب و  $U^3$  توان سوم سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است. با استفاده از رابطه ۹ پارامتر ویبول C محاسبه می‌شود.  
رابطه ۹:

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

در رابطه ۹،  $\bar{U}$  میانگین سرعت باد برحسب متر بر ثانیه،  $\Gamma$  فاکتور تابع آماری گاما<sup>۱</sup> و k فاکتور توزیع آماری ویبول K و C فاکتور ویبول C است.  
رابطه ۱۰:

$$F(U) = \left(\frac{U}{C}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{C}\right)^k\right]$$

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

در رابطه ۱۰، پارامتر ویبول K که در جداول آمده است، با بهره‌گیری از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. در این رابطه، U سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، C فاکتور تابع توزیع آماری ویبول C و K فاکتور تابع توزیع آماری ویبول K است (صلاحی، ۱۳۸۳، ص. ۲۵). در این پژوهش عدم قطعیت<sup>۲</sup> در داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از رابطه ۱۱ برآورد شده است.  
رابطه ۱۱:

عدم قطعیت داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود. X الگوریتم «نسبت متغیر» رابطه خطی بین سرعت باد سایت مدنظر و سرعت سایت مرجع است.  
رابطه ۱۲. ۱:

$$\hat{Y} = mx + b$$

---

1. Gamma  
2. Uncertainty

هدف این الگوریتم تولید مجموعه‌ای از سرعت‌های باد پیش‌بینی شده است که میانگین و واریانس آن برابر با سرعت باد اندازه‌گیری شده است. برای دستیابی به این هدف، شیب از معادله زیر پیروی می‌کند:

$$m = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

و رهگیری باید از معادله زیر پیروی کند:

$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

همان‌طور که تیلور<sup>۱</sup> (۱۹۹۷، ص. ۱۲۲) بیان می‌کند، عدم قطعیت کسری برای مقادیر به درجه چهار افزوده می‌شود؛ مشروط به اینکه خطاها به صورت غیرمرتبط و به طور عادی توزیع شوند؛ بنابراین پیدا کردن عدم قطعیت پارامتر شیب برابر است با:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\sigma_x}}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\sigma_y}}{\sigma_y}\right)^2}$$

این معادله بیان می‌کند که عدم قطعیت کسری در شیب برابر است با میانگین ریشه دوم عدم قطعیت کسری در انحرافات استاندارد. تیلور (۱۹۹۷، ص. ۱۲۲) اظهار کرد عدم قطعیت انحراف استاندارد از هر متغیر را با جایگزین کردن این معادله برای عدم قطعیت کسری در شیب متوجه می‌شویم:

$$\frac{\sigma_{\sigma_x}}{\sigma_x} = \frac{\sigma_x}{2\sqrt{N-1}}$$

$$\frac{\sigma_{\sigma_x}}{\sigma_x} = \frac{\sigma_{\sigma_y}}{\sigma_y} = \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}$$

این معادله بیان می‌کند، عدم قطعیت کسری در شیب برابر است با میانگین ریشه دوم عدم قطعیت کسری در انحرافات استاندارد. تیلور (۱۹۹۷، ص. ۱۰۲) بیان کرد عدم قطعیت انحراف استاندارد از هر متغیر را با جایگزین کردن X این معادله برای عدم قطعیت کسری در شیب متوجه می‌شویم:

1. Taylor

$$\frac{\sigma_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{2\sqrt{(N-1)}}\right)} = \sqrt{\frac{1}{N-1}}$$

بنابراین عدم قطعیت کسری در شیب برابر است با:

رابطه ۱۲.۲:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \sqrt{\frac{1}{N-1}}$$

$$\sigma_m = \frac{m}{\sqrt{N-1}}$$

رابطه ۱۲.۳:

$$\sigma_b = \sqrt{(\sigma_{\bar{y}})^2 + (\sigma_{m\bar{x}})^2}$$

رابطه ۱۲.۴:

پارامتر رهگیری را با استفاده از روابط زیر پیدا می‌کنیم. حال برای پیدا کردن عدم قطعیت در معادله قطعیت مطلق مقادیر به چهار درجه اضافه می‌کند. با استفاده از این معادله می‌توانیم بنویسیم:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$$

$$\frac{\sigma_{m\bar{x}}}{m\bar{x}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}}\right)^2}$$

$$\sigma_{m\bar{x}} = m\bar{x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}}\right)^2}$$

بنابراین می‌توانیم دوباره عدم قطعیت کسری را در رده بندی اضافه کنیم:

$$\sigma_{m\bar{x}} = m\bar{x} \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{N-1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_x}{x\sqrt{N}}\right)^2}$$

$$= m\bar{x} \sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right) + \left(\frac{\sigma_x^2}{N\bar{x}^2}\right)}$$

$$= \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x} \sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right) + \left(\frac{\sigma_x^2}{N\bar{x}^2}\right)}$$

جایگزین کردن معادله بالا در معادله ۳ می‌دهد:

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{N} + \bar{x}^2 \left[ \left(\frac{1}{N-1}\right) + \left(\frac{\sigma_x^2}{N\bar{x}^2}\right) \right]}$$

$$= \sigma_y \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} \left[ \left(\frac{1}{N-1}\right) + \left(\frac{\sigma_x^2}{N\bar{x}^2}\right) \right]}$$

$$= \sigma_y \sqrt{\frac{2}{N} + \left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2 \left(\frac{1}{N-1}\right)}$$

بنابراین عدم قطعیت در رهگیری توسط معادله زیر آورده شده است:

$$\sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{2}{N} + \left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2 \left(\frac{1}{N-1}\right)}$$

در این رابطه،  $\sigma$  انحراف معیار داده‌ها،  $N$  تعداد کل داده‌ها،  $\bar{x}$  میانگین داده‌ها و  $x_i$  هرکدام از داده‌ها هستند که در این رابطه برآورد شده‌اند (تیلور، ۱۹۹۷). با استفاده از رابطه‌های ذکر شده، هریک از الگوریتم‌ها و پارامترهای مندرج در جداول سه‌گانه (در سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین) در محیط نرم‌افزار Windographer محاسبه شده است (تیلور، ۱۹۹۷، ص. ۵۶).

محاسبه توان تولیدی توربین‌ها

رابطه ۱۳:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3}$$

در این رابطه،  $\rho$  چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $A$  منطقه جاروب شده توسط پره توربین برحسب متر مربع (این پارامتر برای هر نوع توربین متفاوت است)،  $U$  سرعت باد برحسب متر بر ثانیه و  $P$  قدرت الکتریکی تولیدشده توسط توربین برحسب وات است. لازم است توضیح داده شود که بازده پره‌های توربین بادی عبارت است از تبدیل انرژی جنبشی که پره‌ها از باد می‌گیرند، به انرژی جنبشی کل باد که از مقابل پره‌ها عبور می‌کند. پره‌های توربین کل انرژی جنبشی را از باد نمی‌گیرند؛ زیرا در این صورت پس از برخورد با پره‌ها سرعتش به صفر می‌رشد و متوقف می‌شود. بنا بر تئوری فیزیکدان آلمانی، بتز<sup>۱</sup>، ضریب توان نمی‌تواند از  $16/27$  یا تقریباً از  $0/59$  تجاوز کند؛ مقداری که به حد بتز معروف است (صلاحی و همکاران، ۱۳۸۳، ص. ۱۲).

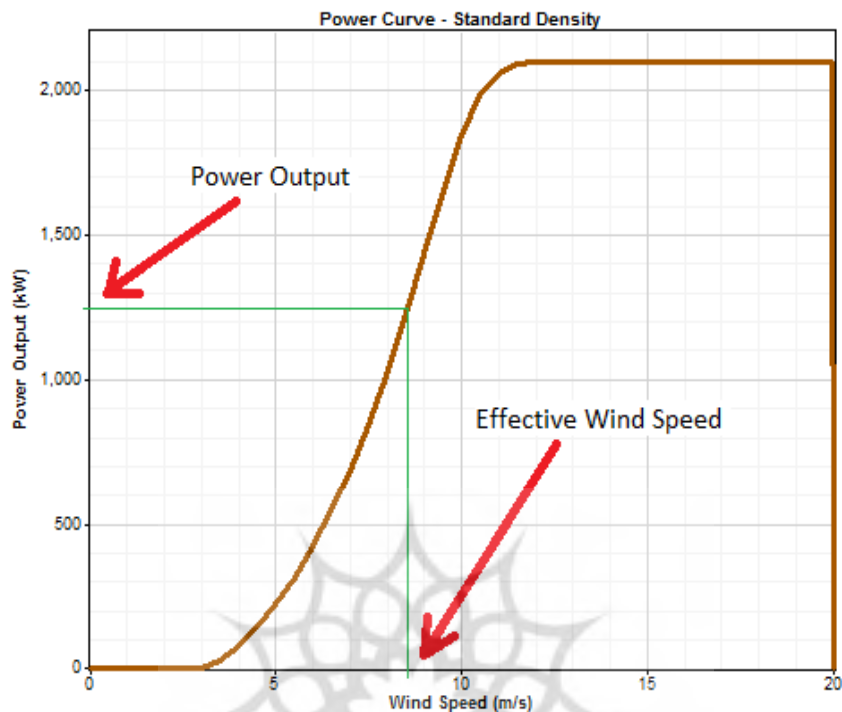
#### توربین‌های کنترل‌شده

برای یک توربین بادی کنترل‌شده از زمین با استفاده از معادله زیر، «سرعت باد مؤثر» ناشی از چگالی هوای فعلی محاسبه می‌شود:

رابطه ۱۴:

$$U_{FF} = U \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$U$  سرعت باد ثبت‌شده برحسب متر بر ثانیه،  $\rho$  چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب و  $\rho_0$  چگالی هواست برحسب کیلوگرم بر متر مکعب که نیرو بر آن اعمال می‌شود. پس از محاسبه سرعت باد مؤثر، از آن برای محاسبه توان تولیدشده توسط توربین بادی استفاده می‌شود. همان‌طور که نمودار زیر نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار توان خروجی توربین در زمان باد مؤثر

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

به عنوان مثال، موردی را در نظر بگیرید که منحنی نیرو در تراکم استاندارد هوا (۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) اعمال می شود و در یک دوره ۱۰ دقیقه ای خاص سرعت باد ۸/۸ متر بر ثانیه و تراکم هوا ۱/۱۰ متر بر ثانیه است. معادله ذکر شده سرعت باد مؤثر ۸/۵ متر بر ثانیه را به دست می دهد؛ یعنی باد ۸/۵ متر بر ثانیه در تراکم هوای استاندارد می تواند همان انرژی را بادی که در ۸/۸ متر بر ثانیه در جریان است، در تراکم هوای کمتر از ۱/۱۰ متر بر ثانیه داشته باشد (تیلور، ۱۹۹۷، ص. ۵۵).

## ۴. یافته‌های تحقیق

ارزیابی صحت داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با صحت داده‌های ایستگاهی در تراز ارتفاعی ۱۰ متری در جدول ۱ معیارهای آماری و صحت‌سنجی بین داده‌های<sup>۱</sup> باد در تراز ۱۰ متری دریافت شده از MERRA-2 Model و داده‌های ایستگاهی دریافت شده از سازمان هواشناسی مربوط به داده‌های سرعت باد ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقه مورد پژوهش در دوره زمانی ۲۰۱۹-۲۰۰۰ ارائه شده است. با توجه به محاسبات انجام شده در این جدول، آماره ضریب همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌ها بسیار مناسب است. میانگین تمامی آماره‌های ضریب همبستگی، میانگین خطا و مجذور مربعات در ۸ ایستگاه انتخاب شده بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاهی ۰/۴۰۴۷۲۱۸ است. به بیان دیگر، هرچه این میزان به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده خطای کمتر داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی است.

جدول ۱- معیارهای آماری صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

نام ایستگاه	داده ایستگاه	داده ماهواره	BIAS	MAE	RMSE	CC	
بروجرد	۳/۴	۴/۱۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۵۴۷۶	۰/۵۴۷۶	۰/۳۱۲۲۰۱۶
الیگودرز	۴/۷	۳/۷۶	۰/۹۴-	۰/۹۴	۰/۸۸۳۶	۰/۸۸۳۶	۰/۴۵۴۹۵۱۶
الشر	۲/۵۶	۳/۱	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۲۹۱۶	۰/۲۹۱۶	۰/۰۷۹۱۰۱۶
کوهدشت	۲/۰۸	۲/۵۷	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۲۴۰۱	۰/۲۴۰۱	۰/۵۷۹۵۰۱۶
نورآباد	۱/۶۴	۱/۷۷	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۰۱۶۹	۰/۰۱۶۹	۱/۴۴۳۰۰۱۶
کمالوند <sup>۲</sup>	۲/۴	۳	۰/۶	۰/۶	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۱۹۴۷۰۱۶

۱. نرم افزار Windographer این قابلیت را دارد که بتوان از داده‌های دریافت شده از MERRA-2 Model از یک منطقه، داده‌های دیگر ترازهای ارتفاعی ده‌گانه، به طور مثال ۱۰ تا ۲۰۰ متری را از یکدیگر تفکیک کرد.
۲. کمالوند منطقه‌ای در شمال شرقی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک خرم‌آباد است. نرم‌افزار به‌کارگرفته شده در این پژوهش این قابلیت را دارد که برای هر منطقه دلخواه داده ماهواره‌ای آن را دریافت کند. در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هواشناسی خرم‌آباد (نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه کمالوند) برای صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای کمالوند در مقایسه با داده‌های ایستگاهی استفاده شده است.



نام ایستگاه	داده ایستگاه	داده ماهواره	BIAS	MAE	RMSE	CC	
دورود	۳/۴	۳/۱	۰/۳-	۰/۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۳۱۲۲۱۶
ازنا	۲/۵۵	۲/۹۸	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۱۸۴۹	۰/۱۸۴۹	۰/۰۸۴۸۲۶۶
متوسط	۲/۸۴۱۲۵	۳/۰۵۲۵	۰/۲۱۱۲۵	۰/۵۲۱۲۵	۰/۳۲۶۸۳۸	۲/۶۱۴۷	۶/۴۶۰۴۸۷۵
					۰/۵۷۱۶۹۷		۰/۴۰۴۷۲۱۸

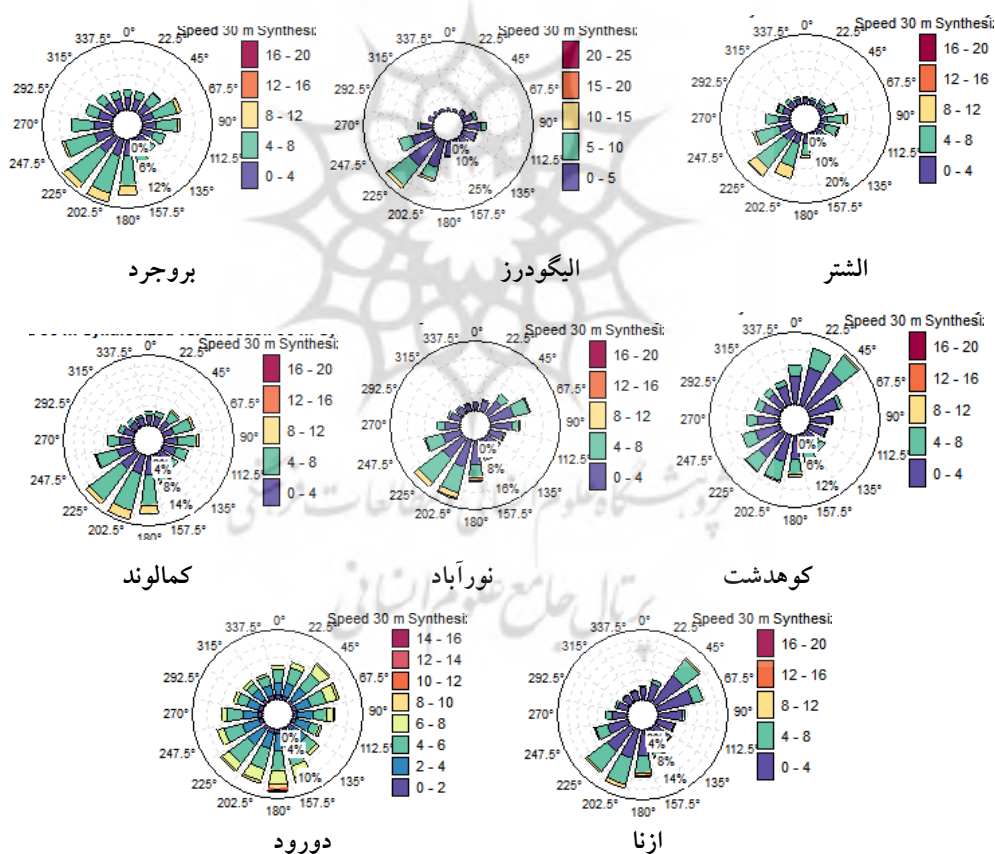
بهترین راه برای ارزیابی منبع باد موجود در یک منطقه، محاسبه مقادیر چگالی توان باد است که نشان می‌دهد چه مقدار انرژی در آن منطقه برای تبدیل به انرژی الکتریسیته توسط توربین بادی وجود دارد. همان‌طور که در جداول ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، تمامی پارامترهای مربوط به باد از جمله توزیع آماری ویبول  $k$  و  $c$  و میانگین سرعت باد برحسب متر بر ثانیه و نیروی چگالی باد برحسب وات بر متر مربع آمده است. با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی و حداقل مربعات، مقادیر شکل و مقیاس توزیع ویبول برای ایستگاه‌های مدنظر در سطوح جداگانه محاسبه شده است. همگی مقادیر و تجزیه و تحلیل‌ها میانگین سالانه هستند. اهمیت ارزیابی سرعت سالانه باد این است که شرکت‌های فعال در زمینه تولید انرژی بادی، ابتدا به میانگین سالانه سرعت باد و تولید انرژی در مقیاس سالانه توجه می‌کنند و در گام بعدی به جزئیات در قالب فصل و ماه توجه می‌کنند.

جدول ۲- تجزیه و تحلیل پارامترهای باد در هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول $k$	ویبول $c$	میانگین سرعت باد $m/s$	نیروی چگالی باد $W/m^2/h$
بروجرد	حداکثر درست‌نمایی	۲/۲۳۱	۵/۵۵۷	۴/۹	۱۲۷
	حداقل مربعات	۲/۲۱۲	۵/۵۸۴	۴/۹	۱۲۸
الیگودرز	حداکثر درست‌نمایی	۱/۷۵۷	۴/۳۹۴	۳/۹	۸۰
	حداقل مربعات	۱/۹۲۵	۴/۳۴۹	۳/۸	۶۹
الشتر	حداکثر درست‌نمایی	۲/۲۶۵	۵/۶۱۶	۴/۱	۱۰۳
	حداقل مربعات	۲/۲۴۴	۵/۶۳۲	۴/۱	۱۰۵
کوهدهشت	حداکثر درست‌نمایی	۲/۱۸۰	۳/۸۸۴	۳/۴	۴۳
	حداقل مربعات	۲/۳۰۸	۳/۸۷۷	۳/۴	۴۱

نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول k	ویبول c	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد W/m <sup>2</sup> /h
نورآباد	حداکثر درست نمایی	۱/۸۵۱	۴/۵۱۸	۴	۶۶
	حداقل مربعات	۲/۰۴۶	۴/۴۷۳	۳/۹	۵۷
کمالوند	حداکثر درست نمایی	۲/۱۹۰	۵/۰۸۵	۴/۵	۹۸
	حداقل مربعات	۲/۱۶۶	۵/۰۹۷	۴/۵	۹۹
دورود	حداکثر درست نمایی	۱/۹۵۳	۳/۹۱۱	۳/۴	۵۰
	حداقل مربعات	۲/۱۴۰	۳/۸۸۲	۳/۴	۴۴
ازنا	حداکثر درست نمایی	۲/۳۶۴	۴/۹۱۶	۴/۳	۸۳
	حداقل مربعات	۲/۳۰۷	۴/۹۳۶	۴/۳	۸۶



شکل ۳- نمودار گلباد میانگین سالانه هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین

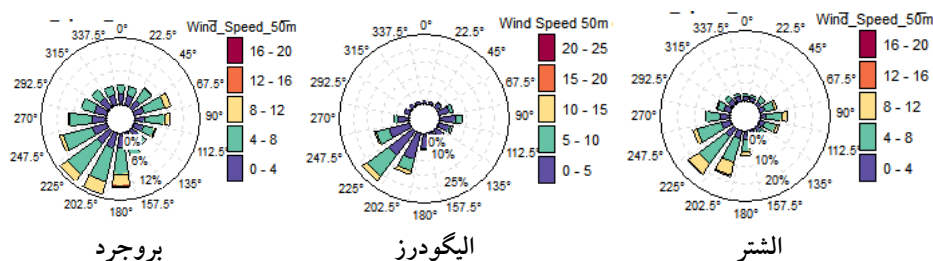
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

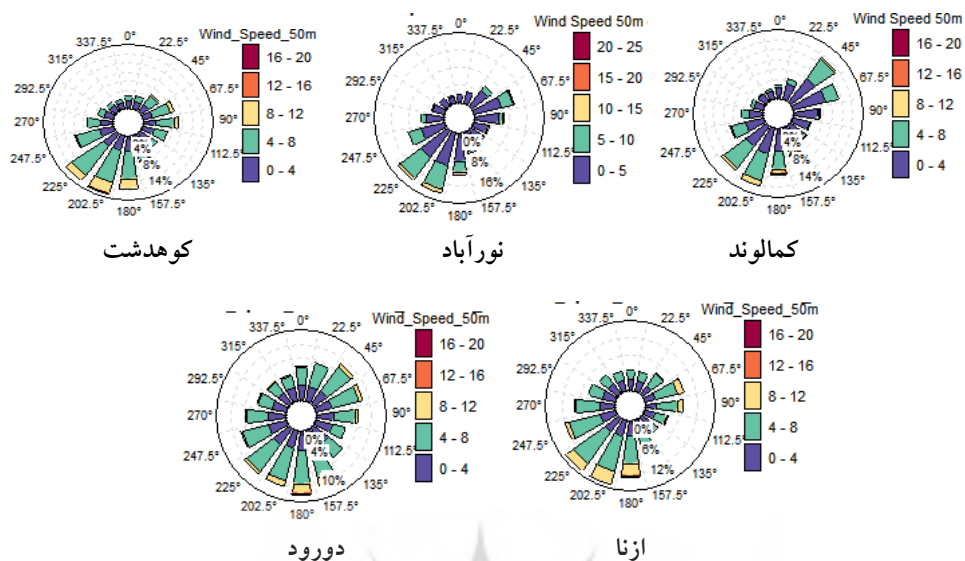
شکل ۳ گلباد سالانه هریک از ایستگاه‌ها را در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در ایستگاه‌های بروجرد، الیگودرز، الشتر، نورآباد و کمالوند جهت باد غالب جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوهدشت و دورود جهت باد غالب شمال شرقی است.

جدول ۳- تجزیه و تحلیل پارامترهای باد در هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول k	ویبول c	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد W/m <sup>2</sup> /h
بروجرد	حداکثر درست نمایی	۲/۲۳۹	۵/۹۵۸	۵/۳	۱۵۷
	حداقل مربعات	۲/۲۱۲	۵/۹۹۸	۵/۳	۱۵۹
الیگودرز	حداکثر درست نمایی	۱/۵۷۷	۴/۷۲۰	۴/۲	۱۰۰
	حداقل مربعات	۱/۹۲۹	۴/۶۷۱	۴/۱	۸۶
الشتر	حداکثر درست نمایی	۲/۲۶۵	۵/۶۱۶	۴/۹	۱۲۸
	حداقل مربعات	۲/۲۴۴	۴/۱۷۲	۴/۹	۱۳۰
کوهدشت	حداکثر درست نمایی	۲/۱۸۰	۴/۱۶۴	۳/۶	۵۴
	حداقل مربعات	۲/۳۰۸	۴/۱۶۴	۳/۶	۵۱
نورآباد	حداکثر درست نمایی	۱/۸۵۱	۴/۵۱۸	۴	۸۲
	حداقل مربعات	۲/۰۴۶	۴/۴۷۳	۳/۹	۷۱
کمالوند	حداکثر درست نمایی	۲/۱۹۰	۵/۴۶۲	۴/۸	۱۲۱
	حداقل مربعات	۲/۱۶۶	۵/۴۷۵	۴/۸	۱۲۳
دورود	حداکثر درست نمایی	۱/۹۵۳	۴/۲۰۱	۳/۶	۶۲
	حداقل مربعات	۲/۱۴۰	۴/۱۶۹	۳/۶	۵۵
ازنا	حداکثر درست نمایی	۲/۳۶۴	۵/۲۸۰	۴/۶	۱۰۶
	حداقل مربعات	۲/۴۱۶	۵/۳۰۴	۴/۷	۱۰۳





شکل ۴- نمودار گلباد میانگین سالانه هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

شکل ۴ نمودار گلباد سالانه هریک از ایستگاه‌های مدنظر را در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جهت باد غالب در ایستگاه‌های بروجرد، الیگودرز، الشتر، نورآباد و کامالوند جهت غالب جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوهدهشت و دورود جهت باد غالب شمال شرقی است. در ایستگاه ازنا نیز جهت باد غالب جنوبی است.

جدول ۴- تجزیه و تحلیل پارامترهای باد در هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰۰ متری از زمین

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول c	ویبول k	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد W/m <sup>2</sup> /h
بروجرد	حداکثر درست نمایی	۲/۲۴۰	۶/۵۹۴	۶/۳	۲۱۰
	حداقل مربعات	۲/۲۲۰	۶/۶۰۹	۶/۳	۲۱۳
الیگودرز	حداکثر درست نمایی	۱/۷۵۹	۵/۲۰۱	۴/۶	۱۳۳
	حداقل مربعات	۱/۹۲۸	۵/۰۱۴	۴/۵	۱۱۵
الشتر	حداکثر درست نمایی	۲/۲۸۵	۶/۱۸۸	۵/۴	۱۷۱
	حداقل مربعات	۲/۲۴۹	۶/۲۰۵	۵/۴	۱۷۴

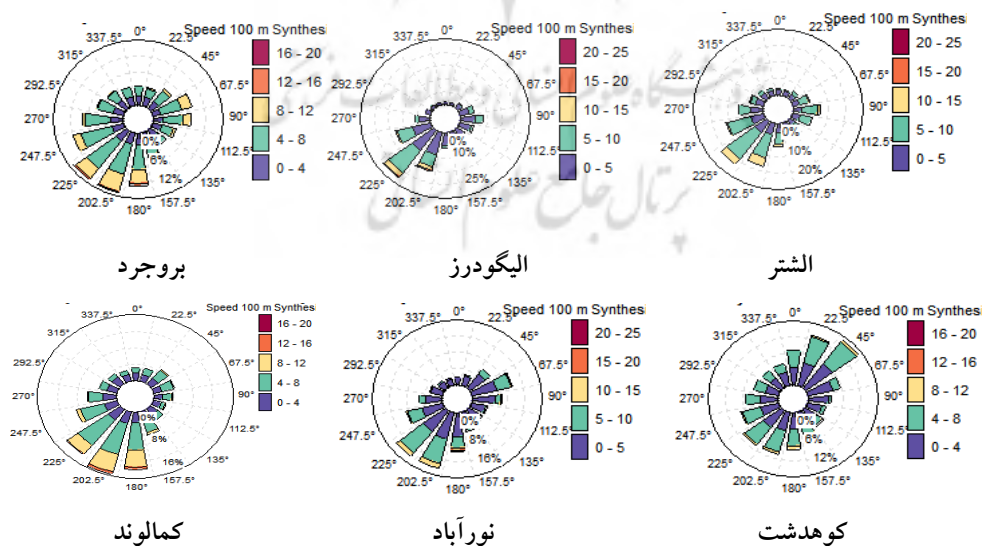
نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول k	ویبول c	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد W/m <sup>2</sup> /h
کوهدشت	حداکثر درست نمایی	۲/۱۹۰	۴/۵۹۷	۴	۷۲
	حداقل مربعات	۲/۳۰۹	۴/۵۸۸	۴	۶۹
نورآباد	حداکثر درست نمایی	۱/۸۶۰	۴/۹۷۸	۴/۴	۱۰۹
	حداقل مربعات	۲/۱۴۰	۴/۹۲۸	۴/۳	۹۵
کمالوند	حداکثر درست نمایی	۲/۱۹۹	۶/۰۱۹	۵/۳	۱۶۲
	حداقل مربعات	۲/۱۸۵	۶/۰۳۲	۵/۳	۱۶۵
دورود	حداکثر درست نمایی	۱/۹۸۰	۴/۶۲۹	۴/۱	۸۲
	حداقل مربعات	۲/۱۶۶	۴/۹۵۳	۴	۸۳
ازنا	حداکثر درست نمایی	۲/۳۹۸	۵/۸۱۹	۵/۱	۱۳۸
	حداقل مربعات	۲/۵۱۰	۵/۸۴۴	۵/۱	۱۴۲

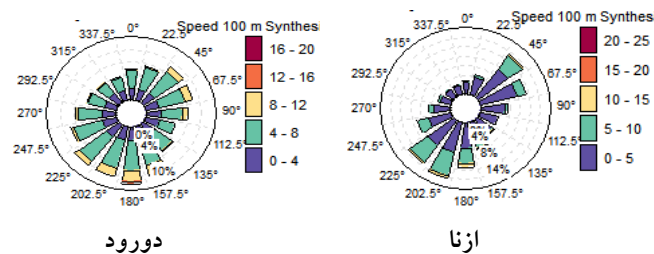
جدول ۵- میزان درصد عدم قطعیت هریک از برآوردها در سطوح مدنظر

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

m/s*۷۵ -+	درصد عدم قطعیت در هریک از ایستگاههای بررسی شده
-----------	--

درصد عدم قطعیت هریک از برآوردها در سطوح مدنظر در این پژوهش، با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه شده است.





شکل ۵- نمودار گلباد میانگین سالانه هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

شکل ۵ گلباد هریک از ایستگاه‌های مدنظر را در ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. در ایستگاه‌های بروجرد، الیگودرز، الشتر، نورآباد و کمالوند جهت باد غالب جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوه‌دشت، دورود و ازنا جهت باد غالب شمال شرقی است. در این پژوهش با استفاده از گلبادها می‌توان بازه سرعت باد هریک از ایستگاه‌ها را مشاهده کرد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

طبیعت منطقه درواقع بهترین راهنمای انتخاب سایت توربین‌های بادی است. همچنین، تهیه گلباد منطقه، راهنمای اولیه مناسبی برای امکان استفاده از انرژی بادی است. درواقع گلبادها نمودارهای ترسیمی هستند که توزیع فراوانی جهت و سرعت باد را نشان می‌دهند. براساس توضیحات ذکر شده، در مکان‌یابی سایت توربین‌های بادی باید از وجود بادهای غالب و همیشگی آگاهی وجود داشته باشد و در طول مسیر جهت این بادهای کمترین موانع باشد. به‌علاوه، جهت، سرعت باد غالب و تداوم آن نیز عامل بسیار مهمی است و در صورت مناسب بودن پتانسیل سرعت باد برای تولید انرژی باید شرایط دیگری از قبیل زمین مناسب، بودجه کافی، نیروی انسانی متخصص و غیره به‌منظور تولید انرژی از نیروی چگالی باد وجود داشته باشد. با وجود این‌ها، تپه‌های وسیع، مسطح و تقریباً گرد، مناسب‌ترین محل نصب توربین هادی هستند. براساس نتایج پژوهش، در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین، بیشترین سرعت باد در ایستگاه بروجرد ۴/۹ متر بر ثانیه با توان چگالی ۱۲۷ وات بر متر مربع در ساعت و کمترین سرعت باد در ایستگاه کوه‌دشت با سرعت ۳/۴ متر بر ثانیه و توان چگالی آن ۴۳

وات بر متر مربع در ساعت محاسبه شد. در سطح ۵۰ متری از سطح زمین، بیشترین سرعت باد در ایستگاه بروجرد ۵/۳ متر ثانیه و توان چگالی باد ۱۵۷ وات بر متر مربع در ساعت و کمترین سرعت باد در این سطح در ایستگاه کوهدشت ۳/۶ متر بر ثانیه با توان چگالی ۵۱ وات بر متر مربع در ساعت برآورد شد. در سطح ۱۰۰ متری از سطح زمین، بیشترین سرعت باد در ایستگاه بروجرد ۶/۳ متر بر ثانیه و توان چگالی باد ۲۱۰ وات بر متر مربع در ساعت و کمترین سرعت باد در ایستگاه کوهدشت ۴ متر ثانیه با توان چگالی باد ۷۲ وات بر متر مربع در ساعت برآورد شد. براساس گلبادهای ترسیم‌شده جهت باد غالب در همه سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین در ایستگاه‌های بروجرد، الیگودرز، الشتر، نورآباد و کمالوند، جهت باد غالب سمت جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوهدشت، دورود و ازنا جهت باد غالب سمت شمال شرقی است. نتایج یاد شده حاکی از مناسب بودن انرژی پتانسیل باد و امکان احداث توربین بادی در بروجرد، الشتر، نورآباد، ازنا و کمالوند در همه سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین است. همچنین، از مناسب بودن انرژی پتانسیل باد و امکان احداث توربین فقط در سطح ۱۰۰ متری از سطح زمین در الیگودرز، کوهدشت و دورود، کافی نبودن انرژی پتانسیل باد در ارتفاع‌های ۳۰ و ۵۰ متری است. با توجه به اینکه از نظر کمی، متوسط سرعت باد منطقه مدنظر برابر با استانداردهای مورد نیاز برای نصب توربین‌های بادی است، هم‌اکنون امکان تولید نیرو با متوسط سرعت باد موجود از طریق تکنولوژی توربین‌های امروزی وجود دارد.

#### کتاب‌نامه

۱. انتظاری، ع؛ امیراحمدی، ا؛ عرفانی، ع. و برزویی، ا. (۱۳۹۱). ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۳ (۹)، ۴۶-۳۳.
۲. بختیاری، ب؛ بذرافشان، ب. و خانجانی، م. (۱۳۹۲). ارزیابی پتانسیل انرژی باد بر مبنای داده‌های کوتاه‌مدت دقیقه‌ای در مناطق کرمان، جیرفت و بم. *نشریه پژوهش‌های آبخیزداری*، (۱۰۰)، ۸۴-۷۶.
۳. تقفی، م. (۱۳۷۲). *انرژی بادی و کاربرد آن در کشاورزی*. چاپ اول. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۴. رضایی بنفشه، ج؛ جهانبخش، س؛ دین پژوه، ی. و اسمعیل پور، م. (۱۳۹۳). امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان های اردبیل و زنجان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۶ (۳)، ۲۷۴-۲۶۱.
۵. صلاحی، ب. (۱۳۸۳). پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمالی ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل. نشریه تحقیقات جغرافیایی، (۹۹)، ۸۷-۱۰۴.
۶. عباس‌زاده مزوجی، ز. (۱۳۹۰). ارزیابی دقت روش‌های معمول برآورد داده‌های اقلیمی، مطالعه موردی: دما و بارش در حوضه آبریز کشف رود مشهد. (پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا). دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
7. Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761-1766.
8. Asakereh, H., Beyranvand, A., & Doustkamian, M. (2018). Assessment of wind power in the synoptic station of Ardebil. *Spatial Planning*, 8(30), 65-82.
9. Betz, A. (1966). Introduction to the Theory of Flow Machines. Oxford: Oxford University Press.
10. Bilal, B. O., Ndongo, M., Kebe, C. M. F., Sambou, V., & Ndiaye, P. A. (2013). Feasibility study of wind energy potential for electricity generation in the northwestern coast of Senegal. *Energy Procedia*, 36, 1119-1129.
11. Billinton, R., Chen, H., & Ghajar, R. (1996). Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy. *Microelectronics Reliability*, 36(9), 1253-1261.
12. Emna, M. E., Adel, K., & Mimouni, M. F. (2013). The wind energy conversion system using PMSG controlled by vector control and SMC strategies. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 3(1), 41-50.
13. Eskin, N., Artar, H., & Tolun, S. (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 839-851.
14. Kunz, T. H., Arnett, E. B., Erickson, W. P., Hoar, A. R., Johnson, G. D., Larkin, R. P., ... & Tuttle, M. D. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(6), 315-324.
15. Mirhosseini, M., Sharifi, F., & Sedaghat, A. (2011). Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 449-459.
16. Mohammadi, H., Rostami Jalilian, Sh., & Taghavi, F., Shamsipour, A. A. (2012). Evaluation of wind energy potential in Kermanshah province. *Physical Geography Research*, 44(2), 19-32.



17. Moorthy, C. B., Balasubramanian, C., & Deshmukh, M. K. (2017). Wind turbine output estimation using Windographer software. *International Journal on Future Revolution in Computer Science and Communication Engineering*, 24(3), 33-65.
18. Mpholo, M., Mathaba, T., & Letuma, M. (2012). Wind profile assessment at Masitise and Sani in Lesotho for potential off-grid electricity generation. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 118-127.
19. Rocha, P. A. C., de Sousa, R. C., de Andrade, C. F., & da Silva, M. E. V. (2012). Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Applied Energy*, 89(1), 395-400.

