

فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۷، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۱، شماره پیاپی ۱۰۵

K. Omidvar  
M. Dehghanjarani

کمال امیدوار، دانشیار اقلیم شناسی دانشگاه یزد

همدی دهقان طرزجانی، کارشناس ارشد جغرافیای طبیعی و اقلیم شناسی دانشگاه یزد

E-mail: komidvar@yazd.ac.ir

شماره مقاله: ۸۶۲

شماره صفحه پیاپی ۱۸۲۱۷-۱۸۱۹۷

## پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد

### چکیده

در پژوهش حاضر، پتانسیل انرژی باد در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد که دارای اطلاعات باد با دوره‌های آماری ۱۰ ساله و بیشتر بودند، شامل ایستگاه همدیدی یزد (۲۰۰۶-۱۹۷۶)، طبس (۲۰۰۶-۱۹۸۷)، رباط پشت بادام (۲۰۰۶-۱۹۹۲)، بافق (۲۰۰۶-۱۹۹۳) و مروست (۲۰۰۶-۱۹۹۷) مطالعه شده. داده‌های باد مورد استفاده در این مطالعه، با فواصل زمانی سه ساعته و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین برداشت شده‌اند که از دفاتر همدیدی اداره کل هواشناسی استان یزد استخراج گردیده‌اند. داده‌های منفصل باد با استفاده از تابع توزیع پیوسته ویبول جایگزین گردیدند. این کار پس از محاسبه فراسنج‌های C و K تابع ویبول از طریق برازش حداقل مربعات صورت پذیرفته است. سپس با استفاده از قانون یک هفتم نیرو، اطلاعات باد در ارتفاع ۱۰ متری به ارتفاع ۵۰ متری (که ارتفاع محور اکثر توربین‌های بادی است) تبدیل و خصوصیات سرعت و توان باد در هر دو ارتفاع مذکور محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که ایستگاه همدیدی مروست با چگالی توان بادی معادل  $224/223$  و  $444/938$  وات بر متر مربع، به ترتیب در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری، میانگین سرعت بادی معادل  $7/78$  متر بر ثانیه در ارتفاع ۵۰ متری، موجودیت بادی معادل  $4457/1$  ساعت در سال، احتمال وزش باد با سرعت‌های بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه‌ای معادل  $0/94$  در ساعات موجودیت باد، محتمل‌ترین سرعت بادی معادل  $7/25$  متر بر ثانیه و انحراف معیار سرعت‌هایی معادل  $1/95$  متر بر ثانیه، از پتانسیل خوبی در زمینه انرژی بادی برخوردار است و می‌تواند به عنوان مکانی مناسب برای سرمایه‌گذاری و مطالعه بیشتر در خصوص استقرار توربین‌های بادی و بهره‌برداری از

انرژی لایزال باد تعیین گردد. استفاده از انرژی باد در ایستگاه همدیدی یزد به شرط استفاده از توربین‌هایی با سرعت شروع به کار  $2/32$  متر بر ثانیه و کمتر، و با ارتفاع محور  $50$  متر به بالا، برای تولید انرژی مقرون به صرفه ارزیابی گردید. همچنین، استفاده از انرژی باد در ایستگاه همدیدی طبس برای مصارف کشاورزی مناسب تشخیص داده شد. افزون بر این، در این مطالعه رابطه‌ای به دست آمد که محاسبه میزان ساعات موجودیت باد در یک مکان را به گونه‌ای ساده تر و کوتاهتر از روش‌های پیشین امکان پذیر می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** پتانسیل انرژی باد، توربین بادی، تابع توزیع ویبول، چگالی توان باد، قانون یک هفتم نیرو، ایستگاه همدیدی، استان یزد.

#### ۱- مقدمه

ادامه روند رشد جمعیت کره زمین و افزایش روزافزون تقاضای انرژی در جوامع بشری، هشدار کارشناسان مبنی بر رو به زوال بودن منابع متداول انرژی و ضرورت تنوع بخشیدن به منابع انرژی، از جمله مواردی‌اند که ذهن بشر را برای یافتن منابع جایگزین انرژی ترغیب می‌کنند. بهترین گزینه و راه حل برای مسائل فوق، به کارگیری انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر است.

باد یکی از پاکترین و ارزان‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر است که مزایای استفاده از آن در تولید انرژی نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر باعث توسعه سریع بازار انرژی بادی و به تبع آن، ارتقاء فناوری و رشد چشمگیر مطالعه کاربردی این فراسنج اقلیمی در میان جوامع پیشرفته جهان گردیده است.

بادهای جهان جمعاً حدود  $2700$  TW انرژی در خود نهفته‌اند که حدود  $25$  درصد آن در  $100$  متری زمین قرار دارد. با این حال، حتی  $10$  درصد این مقدار انرژی؛ یعنی  $4$  TW، از ظرفیت کل انرژی آبی جهان بیشتر است (ثقفی، ۱۳۸۲: ۶۳).

هرچند ایران از پیشگامان استفاده از انرژی باد بوده است، اما هم اکنون استفاده از این انرژی در ایران بسیار محدود است و این در حالی است که این سرزمین از وجود مناطق

پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۵۱

بادخیز و مستعدی برخوردار است. آسیاب‌های بادی فراوان به جا مانده از روزگاران کهن که تعدادی از آنان هنوز پابرجا و مشغول به کارند، می‌توانند گواهی بر این ادعا باشند. هدف از این تحقیق، بررسی اوضاع کلی باد و ویژگی‌های سمت و سرعت باد در استان یزد، تعیین پتانسیل انرژی بادی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، امکان سنجی استفاده از انرژی باد در ایستگاه‌های همدیدی مورد مطالعه، تعیین مکان یا مکان‌های مناسب سرمایه‌گذاری برای نصب توربین‌های بادی، و ارائه اطلاعات پایه در زمینه انرژی بادی و نحوه محاسبه برخی از فراسنج‌های فیزیکی و آماری باد به علاقه‌مندان مطالعه در این زمینه است.

## ۲- پیشینه تحقیق

برخی از پژوهشگران اروپایی، آمریکایی و آسیایی، پتانسیل سنجی انرژی باد را در برخی از نقاط دنیا انجام داده‌اند. برای نمونه، در آسیا Tsang-Jung Chang و همکاران در سال ۲۰۰۲، مشخصه‌های باد و مشخصه‌های توربین بادی در تایوان را بررسی کرده‌اند؛ که در نتیجه این پژوهش، سرتاسر خط ساحلی تایوان برای استقرار توربین‌های بادی مناسب ارزیابی گردیده است. Wei Zhou و همکاران در سال ۲۰۰۵، پتانسیل انرژی باد را در ناحیه دلتای رود پرل در کشور چین مورد پژوهش قرار داده‌اند؛ که بر اثر این کار، مشخصه‌های باد در این ناحیه برآورد گردیده و نتایج از توان بالای باد در این ناحیه حکایت دارند.

انجمن انرژی ایالات متحده و کانادا در سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۰۳ به سنجش انرژی باد و تهیه اطلس انرژی باد در آمریکا و کانادا اقدام نموده‌اند. آمریکا پس از آلمان و اسپانیا در رده سوم استفاده‌کنندگان از انرژی باد قرار دارد و پس از آن هند و دانمارک قرار دارند. دانمارک ۲۰ درصد انرژی خود را از نیروگاه‌های بادی تأمین می‌کند.<sup>۲</sup>

در ایران نیز پاره‌ای تحقیقات در این خصوص در قالب مقالات، طرح‌های پژوهشی و رساله‌های کارشناسی ارشد انجام گرفته است. مجید جمیل (۱۳۷۴) پتانسیل انرژی باد را در سایت پژوهشگاه مواد و انرژی مشکین دشت کرج بررسی نموده است. جواد نصیری (۱۳۷۶) پتانسیل انرژی باد را در آذربایجان ایران محاسبه کرده است. در چند سال اخیر، نیروگاه بادی منجیل بیش از ۲۵ عدد توربین و با ظرفیت حدود ۱۰۰۰۰ کیلووات، نیروگاه بادی

رودبار با تعداد ۴ واحد جمعاً به ظرفیت ۲۱۵۰ کیلووات و نیروگاه بادی هرزویل با ۳ واحد جمعاً به ظرفیت ۹۰۰ کیلووات نصب و راه اندازی گردیده است. تولید انرژی این نیروگاه‌ها مجموعاً حدود ۱۷۵ میلیون کیلووات ساعت بوده است. شایان ذکر است که این آمار مربوط به سال ۱۳۸۱ است. مرکز توسعه انرژی‌های نو سازمان انرژی اتمی ایران، پروژه‌های پتانسیل سنجی، مکان یابی و نصب توربین‌های برق بادی را در مناطق منجیل، هرزویل، ده سیاهپوش، کلهک، بادرود نطنز، فیروزکوه، تبریز و داماش رودبار را در دست اجرا دارد و یا به اتمام رسانده است. پروژه احداث نیروگاه بادی بینالود و دیزباد در استان خراسان با ظرفیت ۹/۲۸ مگاوات برق و با توربین به ظرفیت ۶۶۰۰ کیلووات در دست اجرا است. سال شروع پروژه، ۱۳۸۰ و سال بهره برداری از آن پایان برنامه سوم توسعه پیش بینی شده است. مبلغ اعتبار پروژه فوق بالغ بر ۷۱ میلیارد و ۳۹۰ میلیون ریال بوده و مدیریت آن تحت نظارت معاونت امور برق است. چهار ایستگاه همدیدی استان اردبیل انجام داده است.

### ۳- مواد و روش‌ها

از آنجایی که باد یک کمیت برداری بوده، و دارای جهت و سرعت است و نیز به شدت تحت تأثیر کوهساری و نحوه استقرار جریانات فوقانی جو است، لذا تخمین سمت و سرعت باد در ساعات فاقد آمار، غیر ممکن بوده و در صورت تخمین نیز با خطا همراه است (صلاحی، ۱۳۸۳: ۸۹). این مسأله باعث شد تا آمار انتخاب شده برای بررسی پتانسیل انرژی باد تا حد امکان فاقد خلأ آماری باشد. لذا داده‌های خام سمت و سرعت باد از اداره کل هواشناسی استان یزد اخذ گردید. سپس داده‌های سرعت باد که در دفاتر همدیدی بر حسب نات<sup>۲</sup> درج شده بودند، به متر بر ثانیه تبدیل شدند (۱ نات = ۰/۵۱۴ متر بر ثانیه). شایان ذکر است که در تمامی منابع داخلی و خارجی، محاسبات انجام شده در زمینه پتانسیل انرژی باد بر مبنای واحد متر بر ثانیه صورت پذیرفته‌اند.

پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۵۳

به منظور ترسیم گراف‌ها و محاسبات آماری و ریاضی، از نرم افزارهای Excel و SPSS۱۵ استفاده شده است.

برای پردازش داده‌ها با توزیع احتمالات، از مدل ریاضی تابع توزیع احتمال ویبول<sup>۳</sup> استفاده شده است. تجارب به دست آمده نشان می‌دهند که این تابع توزیع احتمال، برای بررسی و محاسبات آماری باد در یک محل بیشترین کاربرد را دارد (صلاحی، ۱۳۸۳: ۹۰). پس از محاسبه اجزای تابع مذکور، برخی از فرانسج‌های مربوط به محاسبه انرژی باد قابل تخمین‌اند. با استفاده از آزمون کی دو، صحت برازش منحنی تابع احتمال ویبول بر داده‌های احتمال واقعی باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه، محاسبه و بررسی شده است. ارتفاع ۵۰ متری، ارتفاع محور اکثر توربین‌های بادی است (Eskin, ۲۰۰۸, ۸۳۹). لذا مشخصه‌های باد به دست آمده از ارتفاع ۱۰ متری، با استفاده از قانون یک هفتم نیرو<sup>۴</sup>، به ارتفاع ۵۰ متری تبدیل و ارزیابی شدند.

#### ۴- مبانی تئوری

سرعت باد در محاسبات انرژی باد، به عنوان یک متغیر تصادفی پیوسته مورد نظر است که می‌تواند تمام مقادیر واقع در یک فاصله را اختیار کند (Karsli, ۲۰۰۳: ۸۲۶)، ولی در عمل، برداشت‌های سرعت باد در ایستگاه‌های همدیدی با فواصل زمانی سه ساعته انجام می‌پذیرد که تابع چنین احتمالی، یک تابع گسسته است. به عبارت دیگر، ابتدا باید نمودار توزیع فراوانی سرعت‌های باد مکان مورد مطالعه را با یک تابع پیوسته جایگزین نمود.

#### ۴-۱- تابع توزیع ویبول

تابع ویبول حالت خاصی از توزیع گاما است. این تابع نسبت به توابع دیگر نظیر رایله<sup>۵</sup> از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار بوده، به صورت زیر تعریف می‌شود (Dundar, ۲۰۰۱: ۲۰):

۳- Weibull Probability Distribution Function

۴- One Seventh Power Law

۵- Rayleigh

$$P(V) = \frac{k}{C} \cdot \left[ \frac{V}{C} \right]^{k-1} \exp \left( - \left[ \frac{V}{C} \right]^k \right) \quad (1)$$

در این رابطه،  $V$  سرعت باد،  $k$  یک فراسنج بدون بُعد معروف به «فاکتور شکل» و  $C$  فراسنجی موسوم به «فاکتور مقیاس<sup>v</sup>» است که با واحد متر بر ثانیه محاسبه می‌شود.

#### ۴-۲- محاسبه فراسنجهای تابع توزیع ویبول

روش‌های مختلفی برای محاسبه فراسنجهای شکل و مقیاس تابع ویبول ارائه گردیده است. یکی از رایجترین این روش‌ها، روش «برازش حداقل مربعات» است که به کمک تابع احتمال تجمعی به دست می‌آید. بدین منظور، لازم است با استفاده از معادله رگرسیون، رابطه خطی بین مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع آنها به شکل زیر مشخص شود (صلاحی، ۱۳۸۳: ۹۳):

$$Y = A \cdot X + B \quad (2)$$

جایی که:

$$Y = \ln(-\ln(1 - P(V))) \quad (3)$$

و

$$X = \ln v_i \quad (4)$$

در روابط فوق،  $V_i$  میانه طبقات سرعت باد و  $P(V)$  احتمال فراوانی تجمعی هر طبقه سرعت است. با مشخص شدن مقادیر  $X$  و  $Y$ ، مقادیر  $A$  و  $B$  از طریق نرم افزارهای آماری نظیر SPSS و Excel قابل محاسبه‌اند. در اینجا،  $A$  ضریب زاویه خط  $Y = A \cdot X + B$  و  $B$  عرض نقطه تقاطع خط با محور  $y$ ها خواهد بود. رابطه  $A$  و  $B$  در این معادله، با فراسنجهای  $C$  و  $K$  تابع ویبول به صورت زیر است (جمیل، ۱۳۸۰: ۳۸):

$$C = \exp\left(\frac{-B}{A}\right) \text{ و } K = A \quad (5)$$

۶ - Form Factor

۷ - Scale Factor

پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۵۵

به منظور برآورد مقادیر احتمال بر حسب مدل ویبول، خلاصه طبقه بندی شده مشاهدات و اندازه گیری‌های آماری سرعت باد در ایستگاه همدیدی مروست طی دوره آماری مورد مطالعه، در جدول ۱ ارائه گردیده است. شایان ذکر است به علت محدودیت در تعداد صفحات ارائه مطالب، جداول ۱ تا ۵ فقط برای ایستگاه مروست به عنوان نمونه و آشنایی خوانندگان با روند کار آورده شده است.

جدول ۱: اندازه گیری‌های آماری سرعت باد در ایستگاه همدیدی مروست، در دوره آماری ۱۹۹۷

تا ۲۰۰۶

ردیف I	رده‌های سرعت بر حسب متر بر ثانیه $v[m/s]$	سرعت میانه رده‌های سرعت $v_i[m/s]$	فراوانی $f_i$	احتمال (بر مبنای یک) $p(v_i)$	احتمال تجمعی (بر مبنای یک) $P(v)$	احتمال بر حسب مدل ویبول (بر مبنای یک) $P_w(v_i)$
۱	۰.۵ - ۱.۵	۱	۱۵	۰.۰۰۱۰۰۹۶۳	۰.۰۰۱۰۱	۰.۰۱۷۱۱۷۶
۲	۱.۵ - ۲.۵	۲	۱۱۰	۰.۰۰۷۴۰۳۹۲	۰.۰۰۸۴۱۴	۰.۰۴۹۵۴۹۴
۳	۲.۵ - ۳.۵	۳	۳۷۵۷	۰.۲۵۲۸۱۷۴۳	۰.۲۶۱۲۹۱	۰.۰۸۷۳۸۵۶
۴	۳.۵ - ۴.۵	۴	۲۸۶۲	۰.۱۹۲۶۳۶۴۷	۰.۴۵۳۹۲۷	۰.۱۲۱۵۰۲۱
۵	۴.۵ - ۵.۵	۵	۴۸۳۸	۰.۳۲۵۶۳۷۵	۰.۷۷۹۵۶۵	۰.۱۴۳۵۲۸۹
۶	۵.۵ - ۶.۵	۶	۱۱۶۴	۰.۰۷۸۳۴۶۹۱	۰.۸۵۷۹۱۲	۰.۱۴۸۲۹۱۲
۷	۶.۵ - ۷.۵	۷	۷۹۵	۰.۰۵۳۵۱۰۱۳	۰.۹۱۱۴۲۲	۰.۱۳۵۶۵۰۳
۸	۷.۵ - ۸.۵	۸	۴۸۳	۰.۰۳۲۵۰۹۹۳	۰.۹۴۳۹۳۲	۰.۱۱۰۳۸۰۹
۹	۸.۵ - ۹.۵	۹	۲۸۸	۰.۰۱۹۳۸۴۸	۰.۹۶۳۳۱۷	۰.۰۷۹۹۶۷۸
۱۰	۹.۵ - ۱۰.۵	۱۰	۲۷۹	۰.۰۱۸۷۷۹۰۳	۰.۹۸۲۰۹۶	۰.۰۵۱۵۱۷۸
۱۱	۱۰.۵ - ۱۱.۵	۱۱	۸۵	۰.۰۰۵۷۲۱۲۱	۰.۹۸۷۸۱۷	۰.۰۲۹۴۴۱۹
۱۲	۱۱.۵ - ۱۲.۵	۱۲	۷۳	۰.۰۰۴۹۱۳۵۱	۰.۹۹۲۷۳۱	۰.۰۱۴۸۷۸۹
۱۳	۱۲.۵ - ۱۳.۵	۱۳	۴۰	۰.۰۰۲۶۹۲۳۳	۰.۹۹۵۴۲۳	۰.۰۰۶۶۲۵۳
۱۴	۱۳.۵ - ۱۴.۵	۱۴	۲۲	۰.۰۰۱۴۸۰۷۸	۰.۹۹۶۹۰۴	۰.۰۰۲۵۸۹۴
۱۵	۱۴.۵ - ۱۵.۵	۱۵	۲۴	۰.۰۰۱۶۱۵۴	۰.۹۹۸۵۱۹	۰.۰۰۰۸۸۴۷
۱۶	۱۵.۵ - ۱۶.۵	۱۶	۱۰	۰.۰۰۰۶۷۳۰۸	۰.۹۹۹۱۹۲	۰.۰۰۰۲۶۳۱
۱۷	۱۶.۵ - ۱۷.۵	۱۷	۵	۰.۰۰۰۳۳۵۵۴	۰.۹۹۹۵۲۹	۰.۰۰۰۰۶۷۹
۱۸	۱۷.۵ - ۱۸.۵	۱۸	۱	۰.۰۰۰۰۶۷۳۱	۰.۹۹۹۵۹۶	۰.۰۰۰۰۱۵۱
۱۹	۱۹.۵ - ۲۰.۵	۲۰	۳	۰.۰۰۰۰۲۰۱۹۳	۰.۹۹۹۷۹۸	۰.۰۰۰۰۰۰۵
۲۰	۲۰.۵ - ۲۱.۵	۲۱	۱	۰.۰۰۰۰۰۶۷۳۱	۰.۹۹۹۸۶۵	۰.۰۰۰۰۰۰۱
۲۱	۲۴.۵ - ۲۵.۵	۲۵	۱	۰.۰۰۰۰۰۶۷۳۱	۰.۹۹۹۹۳۳	۰
۲۲	۲۵.۵ - ۲۶.۵	۲۶	۱	۰.۰۰۰۰۰۶۷۳۱	۱	۰
		مجموع	۱۴۸۵۷	۱		

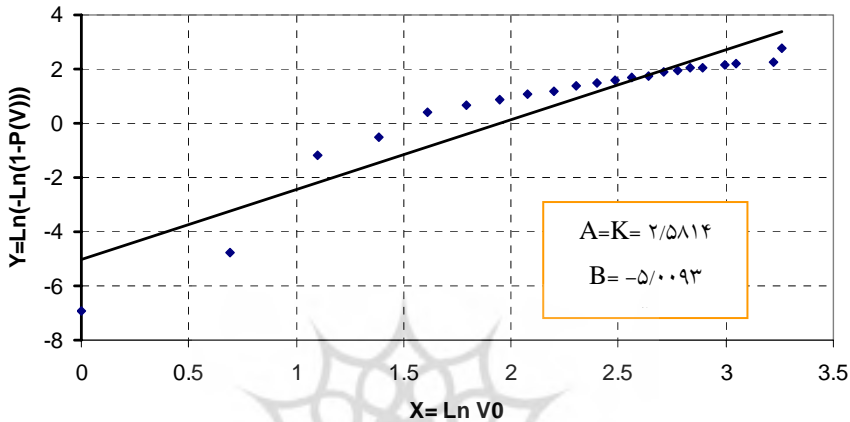
اینک مقادیر  $x_i$  و  $y_i$  را بر طبق روابط (۳) و (۴) برای  $v_i$  و  $P(v)$  مندرج در جدول فوق تعیین می‌کنیم تا بتوانیم از طریق معادله خط رگرسیون یا برازش حداقل مربعات، مقادیر  $A$  و  $B$  را مشخص کنیم. در جدول ۲ این مقادیر برای ایستگاه همدیدی مروسست ارائه گردیده‌اند.

جدول ۲: مقادیر رابطه خطی بین  $x_i$  و  $y_i$  برای تعیین مقادیر  $A$  و  $B$  مرتبط با فراسنج‌های  $K$  و  $C$  تابع ویبول، در ایستگاه همدیدی مروسست.

$i$	$Y = \ln(-\ln(1 - P(V)))$	$X = \ln V_i$
۱	-۶.۸۹۷۶۷۱۱۸۷	.
۲	-۴.۷۷۳۶۹۱۰۸۳	۰.۶۹۳۱۴۷۱۸۱
۳	-۱.۱۹۴۵۱۳۷۶۳	۱.۰۹۸۶۱۲۲۸۹
۴	-۰.۵۰۲۵۲۱۱۶۶	۱.۳۸۶۲۹۴۳۶۱
۵	۰.۴۱۳۵۳۴۶۳۹	۱.۶۰۹۴۳۷۹۱۲
۶	۰.۶۶۸۵۰۰۶۱۷	۱.۷۹۱۷۵۹۴۶۹
۷	۰.۸۸۵۳۶۷۲۱۱	۱.۹۴۵۹۱۰۱۴۹
۸	۱.۰۵۸۲۰۴۳۶۵	۲.۰۷۹۴۴۱۵۴۲
۹	۱.۱۹۵۵۶۹۷۸۳	۲.۱۹۷۲۲۴۵۷۷
۱۰	۱.۳۹۱۹۶۰۸۰۳	۲.۳۰۲۵۸۵۰۹۳
۱۱	۱.۴۸۳۳۵۹۶۷۸	۲.۳۹۷۸۹۵۲۷۳
۱۲	۱.۵۹۴۱۴۰۵۳۹	۲.۴۸۴۹۰۶۶۵
۱۳	۱.۶۸۳۹۳۶۴۲۶	۲.۵۶۴۹۴۹۳۵۷
۱۴	۱.۷۵۳۹۸۵۷۷۸	۲.۶۳۹۰۵۷۳۳
۱۵	۱.۸۷۴۱۳۵۴۴۷	۲.۷۰۸۰۵۰۲۰۱
۱۶	۱.۹۶۳۰۹۳۰۶۸	۲.۷۷۲۵۸۸۷۲۲
۱۷	۲.۰۳۶۰۵۳۲۷۱	۲.۸۳۳۲۱۳۳۴۴
۱۸	۲.۰۵۵۹۷۶۷۵۲	۲.۸۹۰۳۷۱۷۵۸
۱۹	۲.۱۴۰۹۶۱۵۴۲	۲.۹۹۵۷۳۳۲۷۴
۲۰	۲.۱۸۷۵۱۹۷۷۵	۳.۰۴۴۵۲۲۴۳۸
۲۱	۲.۲۶۲۴۱۱۴۷۳	۳.۲۱۸۸۷۵۸۲۵
۲۲	۲.۷۷۹۹۴۲۵۹۴	۳.۲۵۸۰۹۶۵۳۸



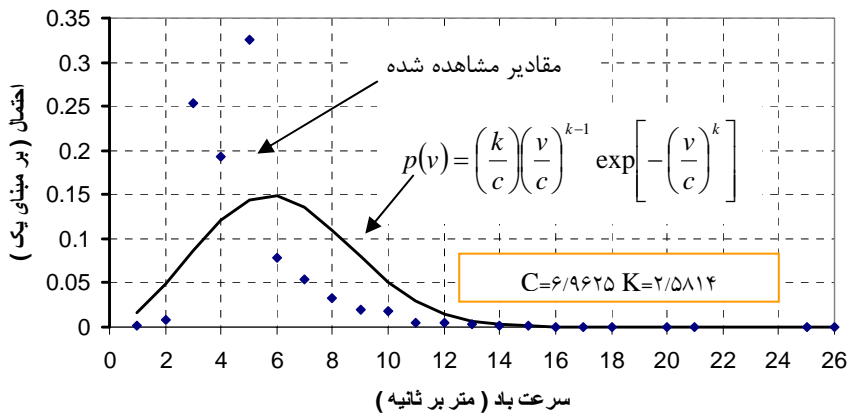
پس از محاسبه مقادیر  $x_i$  و  $y_i$ ، می‌توان خط  $Y = A \cdot X + B$  را که در واقع خطی است با نزدیکترین فاصله نسبت به نقاط  $x_i$  و  $y_i$ ، به منظور تعیین مقادیر  $A$  و  $B$  مرتبط با فراسنج‌های شکل و مقیاس تابع ویبول ترسیم کرد. در شکل ۱ این خط ترسیم گردیده است.



شکل ۱: رابطه خطی بین  $x_i$  و  $y_i$  برای تعیین مقادیر  $A$  و  $B$  مرتبط با فراسنج‌های  $C$  و  $K$  تابع ویبول، در ایستگاه همدیدی مروست.

مقادیر  $A = K = ۲/۵۸۱۴$ ،  $B = -۵/۰۰۹۳$  و  $C = ۶/۹۶۲۵$  محاسبه گردیده است.

پس از محاسبه فراسنج‌های شکل و مقیاس تابع ویبول ( $K$  و  $C$ ) و با استفاده از مقادیر  $v_i$  در جدول شماره ۱ (سرعت میانه رده‌های سرعت) و نیز با استفاده از رابطه (۱)، مقادیر تابع احتمال ویبول ( $P_W$ ) محاسبه و در ستون هفتم همان جدول ارائه گردیده‌اند. در شکل ۲، مقادیر محاسبه شده برای وقوع سرعت‌های باد ایستگاه همدیدی مروست از طریق تابع پیوسته ویبول، و احتمال مشاهده شده (واقعی) رخداد سرعت‌های باد ترسیم گردیده‌اند. با مقایسه این دو می‌توان چگونگی جایگزینی مقادیر گسسته سرعت باد را به صورت یک منحنی پیوسته به کمک تابع ویبول مشاهده نمود.



شکل ۲: برازش مقادیر احتمال مشاهده شده رخداد سرعت‌های باد با استفاده از مدل ریاضی ویبول در ایستگاه همدیدی مروست.

#### ۳-۴- آزمون نیکویی برازش، تست کی دو

در بالا، احتمال تجربی مقادیر سرعت باد، با تابع توزیع ویبول جایگزین گردیدند. صحت این جایگزینی را می‌توان با آزمون‌های مختلفی ارزیابی کرد. آزمون «کی دو» که مجذور خی نیز نامیده می‌شود، یکی از آزمون‌های نیکویی برازش است که با آن می‌توان صحت جایگزینی احتمال تجربی داده‌ها با توزیع داده شده را سنجید (عبدالله زاده، ۱۳۷۹: ۲۵۰). آماره آزمون در تست کی دو به صورت زیر تعریف می‌شود (صلاحی، ۱۳۸۳: ۹۹):

$$X^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (۶)$$

که در آن،  $O_i$  فراوانی مشاهده شده، و  $E_i$  فراوانی مورد انتظار است.

با توجه به مشاهدات و ویژگی‌های آزمون، فرض‌های زیر مطرح می‌شوند:

$H=0$  سرعت‌های مشاهده شده باد در ایستگاه‌های مورد بررسی، دارای توزیع ویبول‌اند؛

$H=1$  سرعت‌های مشاهده شده باد در ایستگاه‌های مورد بررسی، دارای توزیع ویبول

نیستند.

آماره آزمون در توزیع ویبول، با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شده و مقادیر آن برای

ایستگاه‌های همدیدی یزد، بافق، رباط پشت بادام، طبس و مروست به ترتیب برابر است با

پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۵۹

۳۰/۵۱، ۱۰/۴۶، ۲۶/۴۹، ۵۲/۳ و ۹۹/۸۹. آزمون کی دو مبتنی بر جدول خاصی است. اگر آماره آزمون از مقدار جدول کوچکتر باشد، فرض صفر پذیرفته و در غیر این صورت، فرض صفر قابل رد است (همان منبع). با توجه به مقادیر آماره آزمون و نیز مقدار بحرانی  $X^2 = 0.095$  ( $a = 0.05$ ) در ایستگاه‌های مورد مطالعه، این نتیجه حاصل می‌شود که سرعت‌های مشاهده شده باد در ایستگاه‌های مورد بررسی، با توزیع ویبول همگون است.

#### ۴-۴- محاسبه فراسنج‌های مؤثر در سنجش پتانسیل انرژی باد در یک مکان

پس از محاسبه مقادیر فراسنج‌های شکل و مقیاس تابع ویبول، می‌توان وضعیت یک مکان را از نظر پتانسیل انرژی باد ارزیابی کرد. یکی از مهمترین محاسباتی که در این رابطه باید صورت گیرد، محاسبه چگالی انرژی باد است. میانگین چگالی انرژی باد در یک مکان بر اساس تابع چگالی احتمال ویبول را می‌توان از طریق رابطه ی زیر به دست آورد (Chang, 2002 & et al: ۱۵۹):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma \left( \frac{K+3}{K} \right) \quad (7)$$

در اینجا  $\rho$  دانسیته هوا برابر با  $1/225 \text{ kg/m}^3$  است. دانسیته هوا تابعی از فشار و درجه حرارت است که تغییرات مربوط به آن در این محاسبات چندان با اهمیت تلقی نمی‌شود (جمیل، ۱۳۸۰: ۴۰). دانسیته هوا بر اثر افزایش میزان بخار آب در آن کاهش می‌یابد، اما تصحیح لازم برای این مورد در تخمین قدرت ناشی از باد، قابل اغماض است (عباس پور، مجید و همکاران، ۱۳۷۵: ۱۶۹).  $\Gamma$  تابع معروف گاما است<sup>۸</sup>.

میانگین چگالی انرژی باد در یک دوره معین (یک ماه یا یک سال) را می‌توان از طریق رابطه زیر به دست آورد (Jaramillo, 2004: 2089):

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma \left( \frac{K+3}{K} \right) T \quad (8)$$

۸- برای یافتن مقادیر دقیق تابع گاما، سایت‌های اینترنتی زیر پیشنهاد می‌گردد:

<http://www.danielsoper.com/statcalc/calculator.aspx>

<http://functions.wolfram.com/webmathematica/functionevaluation.jsp>

در اینجا،  $T$  دوره زمانی به ساعت است. برای مثال،  $T$  برای یک دوره ماهانه ۷۲۰ و برای یک دوره سالانه ۸۷۶۶ ساعت است.

محتمل ترین سرعت باد، یا سرعت بیشترین احتمال وقوع باد که با علامت  $V_{mp}$  نشان داده می‌شود، از رابطه زیر قابل محاسبه است (Chang & et al ۸۵۴: ۲۰۰۲):

$$V_{MP} = C \left( \frac{K-1}{K} \right)^{1/K} \quad (۹)$$

سرعت نامی باد، یا سرعت بادی که حداکثر انرژی الکتریکی را در خروجی ایجاد می‌کند، در واقع سرعتی است که بیشترین انرژی را در طول سال تولید می‌کند. این سرعت که با علامت  $V_{MaxE}$  نشان داده می‌شود، یکی از فراسنج‌های مهم در طراحی توربین‌های بادی است و از رابطه زیر به دست می‌آید (Elamouri, ۲۰۰۷: ۷۶۱):

$$V_{MaxE} = C \left( 1 + \frac{2}{K} \right)^{1/K} \quad (۱۰)$$

میانگین سرعت باد ( $V$ ) و انحراف معیار سرعت‌های باد ( $\sigma$ ) از طریق روابط زیر قابل محاسبه‌اند (Chang & et al, ۲۰۰۲: ۸۵۹):

$$V = C \Gamma \left( \frac{K+1}{K} \right) \quad (۱۱)$$

$$\sigma = C \sqrt{\left[ \Gamma \left( \frac{K+2}{K} \right) - \Gamma^2 \left( \frac{K+1}{K} \right) \right]} \quad (۱۲)$$

احتمال رخداد سرعت‌های باد بین دو مقدار ( $v_1$  و  $v_2$ ) را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد (Wei Zhou & et al, ۲۰۰۵: ۷۴۴):

$$P(v_1 < v < v_2) = \exp \left[ - \left( \frac{v_1}{C} \right)^k \right] - \exp \left[ - \left( \frac{v_2}{C} \right)^k \right] \quad (۱۳)$$

توربین‌های بادی با دو سرعت طراحی شده‌اند: یکی سرعت باد شروع به بازدهی نیرو، و دیگری سرعت بادی که توربین برای جلوگیری از آسیب، پره‌های خود را موازی با باد قرار

پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۶۱

داده و متوقف می‌شود<sup>۱</sup>. سرعت باد شروع به بازدھی و سرعت توقف اکثر توربین‌های بادی به ترتیب، ۳ و ۲۵ متربرثانیه است (Weisser, ۱۸۰۹: ۲۰۰۳).

در جدول ۳، نتایج محاسبات مؤلفه‌های ماهانه و سالانه باد در ایستگاه همدیدی مروست در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (که ارتفاع برداشت و ثبت داده‌های باد در دفاتر همدیدی است) آورده شده‌اند.

جدول ۳: مؤلفه‌های ماهانه و سالانه باد در ایستگاه همدیدی مروست در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶

ماه	C(m/s)	k	$\frac{P}{A}$ (w/m <sup>2</sup> )	$V_{MP}$ (m/s)	$V_{MaxE}$ (m/s)	V (m/s)
ژانویه	۵/۸۶۸۲	۲/۳۴۵۹	۱۴۲/۵۹۹۷	۴/۶۳۰۷	۷/۶۳۲۲	۵/۲۰۰۱
فوریه	۵/۹۹	۲/۳۶۳۵	۱۵۰/۸۲۰۸	۴/۷۴۶۲	۷/۷۶۴۱	۵/۳۰۸۶
مارس	۶/۳۸۶۶	۲/۶۱۶۶	۱۷۰/۸۹۸۱	۵/۳۱۳	۷/۹۳۴۳	۵/۶۷۳۷
آوریل	۶/۳۷۳۴	۲/۲۴۷۹	۱۸۸/۹۴۵۱	۴/۹۰۵۳	۸/۴۵۹۲	۵/۶۴۵۱
می	۵/۸۰۷	۲/۱۶۰۴	۱۴۷/۸۸۷۶	۴/۳۵۵۳	۷/۸۶۴۸	۵/۱۴۲۷
جون	۵/۱۰۴۲	۲/۶۹۸۶	۸۵/۷۲۴۱	۴/۲۹۹۶	۶/۲۶۸۶	۴/۵۳۹
جولای	۵/۰۹۵۳	۳/۲۰۹۸	۷۸/۹۲۶۲	۴/۵۳۵۹	۵/۹۲۵۲	۴/۵۶۴۳
آگوست	۴/۷۰۵۹	۳/۰۸۸۱	۶۳/۰۸۲۷	۴/۱۴۵۸	۵/۵۳۱۸	۴/۲۰۷۸
سپتامبر	۴/۴۴۲۸	۲/۹۱۱۶	۵۴/۴۲۲۷	۳/۸۴۵	۵/۳۱۶۸	۳/۹۶۲۲
اکتبر	۴/۶۶۵۹	۲/۸۶۴۶	۶۳/۵۱۸۴	۴/۰۱۶۴	۵/۶۱۳۳	۴/۱۵۸۴
نوامبر	۵/۱۱۶۵	۲/۹۶۲	۸۲/۴۹۰۳	۴/۴۵۲۲	۶/۰۹۰۱	۴/۵۶۶۴
دسامبر	۵/۲۹۴۱	۲/۳۵۹۶	۱۰۴/۲۵۳۷	۴/۱۹۹	۶/۸۶۷۲	۴/۶۹۱۸
سالانه	۶/۹۶۲۵	۲/۵۸۱۴	۲۲۳/۲۲۴۱	۵/۷۵۸۶	۸/۶۹۵۲	۶/۱۸۲۹

#### ۴-۵- برآورد میزان مؤلفه‌های باد در ارتفاع نصب محور توربین‌های بادی

یکی از مزایای انتخاب تابع ویبول برای نشان دادن توزیع سرعت باد، امکان تبدیل توزیع سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری به هر ارتفاع دیگر است. این امر با استفاده از قانونی به نام قانون یک هفتم نیرو صورت می‌گیرد (Bagiorgas, ۲۰۰۷: ۱۶۴۷):

۱۰ - Cut-out speed

$$\frac{C_2}{C_1} = \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^{1/7} \quad (14)$$

در اینجا  $C_1$  و  $C_2$  فراسنج‌های مقیاس تابع ویبول، به ترتیب در ارتفاع‌های  $Z_1$  و  $Z_2$  هستند. حتی اگر فراسنج فورم (K) با ارتفاع تغییر کند، این تغییر جزئی بوده، در تجزیه و تحلیل پتانسیل انرژی باد، فراسنج فورم مستقل از ارتفاع پنداشته می‌شود (Al-Nassar ۲۰۰۵): (۲۱۵۵).

در جدول ۴، نتایج محاسبات مؤلفه‌های ماهانه و سالانه باد در ایستگاه همدیدی مروست در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین (که ارتفاع محور اکثر توربین‌های بادی است) آورده شده‌اند.

جدول ۴: مؤلفه‌های ماهانه و سالانه باد در ایستگاه همدیدی مروست در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین در دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶

V (m/s)	$V_{MaxE}$ (m/s)	$V_{MP}$ (m/s)	$\frac{P}{A}$ (w/m <sup>2</sup> )	k	C(m/s)	ماه
۶/۵۴۴۳	۹/۶۰۵۱	۵/۸۲۷۷	۲۸۴/۲۳۲۰	۲/۳۴۵۹	۷/۳۸۵۱	ژانویه
۶/۶۸۰۹	۹/۷۷۱۱	۵/۹۷۳۱	۳۰۰/۶۲۰۳	۲/۳۶۳۵	۷/۵۳۸۴	فوریه
۷/۱۴۰۴	۹/۹۸۵۳	۶/۶۸۶۴	۳۴۰/۶۳۶۳	۲/۶۱۶۶	۸/۰۳۷۵	مارس
۷/۱۰۴۳	۱۰/۶۴۵۹	۶/۱۷۳۳	۳۷۶/۶۰۹۵	۲/۲۴۷۹	۸/۰۲۰۹	آوریل
۶/۴۷۲۱	۹/۸۹۷۸	۵/۴۸۱	۲۹۴/۷۷۴۳	۲/۱۶۰۴	۷/۳۰۸۱	می
۵/۷۱۲۳	۷/۸۹۹۰	۵/۴۱۱	۱۷۰/۸۶۵۹	۲/۶۹۸۶	۶/۴۲۳۶	جون
۵/۷۴۴۱	۷/۴۵۶۸	۵/۷۰۸۴	۱۵۷/۳۱۶۳	۳/۲۰۹۸	۶/۴۱۲۴	جولای
۵/۲۹۵۵	۶/۹۶۱۸	۵/۲۱۷۶	۱۲۵/۷۴۰۵	۳/۰۸۸۱	۵/۹۲۲۴	آگوست
۴/۹۸۶۵	۶/۶۹۱۳	۴/۸۳۹	۱۰۸/۴۷۹۶	۲/۹۱۱۶	۵/۵۹۱۳	سپتامبر
۵/۲۳۳۴	۷/۰۶۴۳	۵/۰۵۴۶	۱۲۶/۶۰۵۲	۲/۸۶۴۶	۵/۸۷۲	اکتبر
۵/۷۴۶۸	۷/۶۶۴۳	۵/۶۰۳۱	۱۶۴/۴۲۱۸	۲/۹۶۲	۶/۴۳۹۱	نوامبر
۵/۹۰۴۶	۸/۶۴۲۴	۵/۲۷۴۴	۲۰۷/۸۰۰۳	۲/۳۵۹۶	۶/۶۶۲۶	دسامبر
۷/۷۸۱۱	۱۰/۹۴۲۹	۷/۲۴۷۳	۴۴۴/۹۳۸۳	۲/۵۸۱۴	۸/۷۶۲۳	سالانه

انحراف معیار که معمولترین معیار سنجش پراکندگی داده‌ها محسوب می‌شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۵: ۱۹۴)، در این مطالعه بیان کننده میزان تغییرات سرعت باد است و در واقع،

پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۶۳

ثبات باد را در مکان مورد مطالعه نشان می‌دهد. هر چه مقدار این فراسنج به صفر نزدیکتر باشد، به این معناست که داده‌های سرعت باد همگن ترند و سرعت‌های ناگهانی شدید کمتر اتفاق افتاده است. مقادیر ماهانه و سالانه انحراف معیار سرعت‌های باد در ایستگاه همدیدی مروست برای دو ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری، در جدول ۵ آورده شده است.

**جدول ۵: انحراف معیار ماهانه و سالانه سرعت‌های باد در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین برای ایستگاه همدیدی مروست در دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶**

ماه	انحراف معیار سرعت‌های باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (متربرثانیه)	انحراف معیار سرعت‌های باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین (متربرثانیه)
ژانویه	۲/۳۵۵۵	۲/۹۶۴۴
فوریه	۲/۳۸۸۷	۳/۰۰۶۲
مارس	۲/۳۳۰۶	۲/۹۳۳۱
آوریل	۲/۶۵۶۸	۲/۳۴۳۶
می	۲/۵۰۸۰	۳/۱۵۶۳
جون	۱/۸۱۳۸	۲/۲۸۲۶
جولای	۱/۵۶۱۳	۱/۹۶۴۹
آگوست	۱/۴۹۰۱	۱/۸۷۵۳
سپتامبر	۱/۴۷۶۲	۱/۸۵۷۸
اکتبر	۱/۵۷۵۳	۱/۹۸۲۵
نوامبر	۱/۶۷۸۷	۲/۱۱۲۶
دسامبر	۲/۱۱۴۳	۲/۶۶۰۸
سالانه	۲/۵۷۰۹	۳/۲۳۵۵

##### ۵- محاسبه ساعات موجودیت باد در یک مکان

در مطالعات مورد بررسی پیشین، محققان برای رسیدن به مجموع ساعات موجودیت باد در یک منطقه، روشی بالنسبه وقت گیر را به کار گرفته اند؛ به این صورت که برای به دست آوردن فراسنج مذکور، ابتدا میزان ساعات وزش بادهای واقع در تک تک طبقات سرعت را برای یک سال محاسبه، و سپس مقادیر تجمعی این تعداد ساعات را حساب کرده‌اند.

در طی پژوهش حاضر، رابطه‌ای به دست آمد که برآورد میزان ساعات موجودیت باد در یک مکان را به گونه‌ای ساده امکان پذیر ساخته، روند دست یابی به این فراسنج مهم در پتانسیل سنجی انرژی باد در یک منطقه را کوتاهتر می‌سازد. رابطه به دست آمده به صورت زیر است:

$$WE_{(h/y)} = \left( \frac{\sum f_i}{N} \right) \cdot t \quad (15)$$

در رابطه فوق، WE به عنوان مخفف عبارت Wind Existence به معنای موجودیت باد، قرار داده شد.  $(h/y)$  واحد اندازه گیری فراسنج مورد بحث، و به معنای ساعت در سال است. نحوه برآورد این رابطه به این صورت است که ابتدا مقادیر فراوانی رده‌های سرعت باد  $(f_i)$ ، یا همان ستون چهارم جدول ۱، به طول دوره آماری مورد مطالعه به سال (N) تقسیم می‌گردد. سپس نتیجه این تقسیم که در حقیقت بر مبنای مبحث علمی فراوانی نسبی در آمار و احتمالات است، در فاصله زمانی بین برداشت داده‌های باد به ساعت (t) ضرب می‌گردد. برای نمونه، مقادیر فراسنج‌های فوق برای ایستگاه همدیدی مروست به ترتیب، ۱۴۸۵۷، ۱۰ و ۳ هستند، و بدین ترتیب، میزان کل ساعات موجودیت باد در این ایستگاه معادل ۴۴۵۷/۱ ساعت در سال برآورد گردید.

#### ۶- مقایسه فراسنج‌های مؤثر در جهت پتانسیل سنجی انرژی باد، در ایستگاه‌های مورد مطالعه

به منظور مقایسه بهتر نتایج محاسبه فراسنج‌های مؤثر در تعیین مکان مناسب برای نصب توربین‌های بادی و بهره برداری از انرژی باد، مقادیر فراسنج‌های مذکور در ارتفاع ۱۰ متری ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۶، و در ارتفاع ۵۰ متری که ارتفاع نصب محور اکثر توربین‌های بادی است، در جدول ۷ ارائه شده است. در ادامه، به تجزیه و تحلیل و مقایسه این مقادیر پرداخته می‌شود.



پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۶۵

جدول ۶: نتایج محاسبات فراسنج‌های مؤثر در تعیین مکان مناسب برای نصب توربین بادی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین.

نام ایستگاه	میانگین سرعت باد (m/s)	انحراف معیار سرعت‌ها (m/s)	مختل ترین سرعت باد (m/s)	سرعت نامی باد (m/s)	احتمال وزش باد با سرعت‌های بین ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه (به درصد)	ساعات موجودیت باد در سال	قدرت باد (w/m <sup>2</sup> )
یزد	۴/۰۷	۱/۹۱۵	۲/۵۹۳۱	۷/۰۲۲۶	۴۴	۵۰۲۰/۹	۹۶/۶۱
طیس	۳/۶۷	۱/۹۶۶	۳/۱۶۱۶	۷/۱۹۲۱	۴۹	۴۰۹۴/۰۵	۱۰۰/۶۴
ریاط پشت بادام	۳/۷۴	۳/۰۵۵	۳/۲۸۷۱	۶/۰۸۴۵	۴۵	۴۰۲۶/۴۳	۶۷/۵۵
بافق	۳/۸۶	۲/۱۲۵	۲/۲۳	۶/۵۵	۳۷	۳۰۰۴/۳۸	۶۸/۳۶
مروست	۴/۸۷	۱/۹۵	۵/۷۵۸۶	۸/۷	۷۹	۴۴۵۷/۱	۲۲۳/۲۲۴

جدول ۷: نتایج محاسبات فراسنج‌های مؤثر در تعیین مکان مناسب برای نصب توربین بادی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین.

نام ایستگاه	میانگین سرعت باد (m/s)	انحراف معیار سرعت‌ها (m/s)	مختل ترین سرعت باد (m/s)	سرعت نامی باد (m/s)	احتمال وزش باد با سرعت‌های بین ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه (به درصد)	ساعات موجودیت باد در سال	قدرت باد (w/m <sup>2</sup> )
یزد	۵/۱۰۱	۳/۱۶	۳/۲۶۳۶	۹/۲۰۳۲	۵۷	۵۰۲۰/۹	۱۹۲/۵۷۲۲
طیس	۵/۳۹۱۹	۳/۰۵	۳/۹۷۸۶	۹/۰۵۱۵	۶۳	۴۰۹۴/۰۵	۲۰۰/۶۱۱۶
ریاط پشت بادام	۴/۹۵۴۲	۲/۴۶	۴/۱۳۶۷	۷/۶۵۷۵	۶۱	۴۰۲۶/۴۳	۱۳۴/۶۴۱۱
بافق	۴/۵۱۱۹	۲/۸۴	۲/۸۰۹۵	۸/۲۴۴۷	۵۰	۳۰۰۴/۳۸	۱۳۶/۲۵۶۶
مروست	۷/۷۸۱۱	۳/۲۳	۷/۲۴۷۳	۱۰/۹۴۲۹	۸۸	۴۴۵۷/۱	۴۴۴/۹۳۸۱

#### ۷- بررسی نتایج به دست آمده

قدرت حاصل از انرژی باد در واحد سطح، یا همان چگالی انرژی باد، از فاکتورهای تعیین کننده در پتانسیل سنجی انرژی باد و مکان یابی مناطق مناسب برای نصب توربین‌های بادی است. این فاکتور برای ایستگاه مورد مطالعه، ۲۲۳/۲۲۴۱ و ۴۴۴/۹۳۸۳ وات بر متر مربع به ترتیب در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین محاسبه گردیده است. در درجه‌بندی نواحی مختلف بر اساس قدرت باد موجود در ارتفاع ۱۰ متری زمین، نواحی با قدرت باد از ۲۰۰ تا ۲۵۰ وات بر متر مربع برای نصب نیروگاه‌های بادی مناسب ذکر گردیده‌اند (جمیل، ۱۳۸۰: ۴۶).

همان گونه که ذکر گردید، اکثر توربین‌های بادی برای شروع به بازدهی با سرعت باد ۳ متر بر ثانیه طراحی شده‌اند. این در حالی است که کمترین مقدارِ محتمل ترین سرعت‌های بادِ ماهانه برای ایستگاه مورد مطالعه در ارتفاع ۵۰ متری (که ارتفاع نصب اکثر توربین‌های بادی است)،  $4/839$  متر بر ثانیه مربوط به ماه سپتامبر، و محتمل ترین سرعت باد سالانه در ارتفاع مذکور طی دوره مورد بررسی،  $7/2473$  متر بر ثانیه محاسبه گردیده است.

محمد رضا کاویانی به نقل از ویندهایم<sup>۱۱</sup>، عملکرد اقتصادی توربین‌های بادی را مستلزم کارکرد حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال می‌داند (کاویانی، ۱۳۷۴: ۱۳۶). لذا از آنجایی که سرعت‌های شروع به کار و توقف اکثر توربین‌های بادی به ترتیب ۳ و ۲۵ متر بر ثانیه است؛ و بر اساس رابطه (۱۲)، احتمال وزش بادهایی با سرعت بین این دو سرعت در ارتفاع ۵۰ متری برای ایستگاه همدیدی مروسست ۹۴ درصد از کل ساعت موجودیت باد ( $4457/1$  ساعت در سال) برآورد گردید. بنابراین، کارکرد اقتصادی توربین‌های بادی در این مکان چیزی معادل ۴۱۹۰ ساعت در سال برآورد می‌گردد.

میانگین ماهانه سرعت بادها در ارتفاع ۵۰ متری برای تمامی ماه‌های سال به جز ماه سپتامبر با  $4/9865$  متر بر ثانیه، رقمی بالاتر از ۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است که بالاترین آنها مربوط به ماه‌های مارس و آوریل به ترتیب با  $7/1404$  و  $7/1043$  متر بر ثانیه است. میانگین سالانه سرعت‌های باد نیز رقمی معادل  $7/7811$  متر بر ثانیه را به خود اختصاص داده است که تمامی این سرعت‌ها از سرعت‌های شروع به کار توربین‌های بادی بالاترند.

اختلاف سالانه محتمل ترین سرعت باد و سرعت نامی باد در ایستگاه مورد مطالعه، چیزی کمتر از  $3/7$  متر بر ثانیه است که در واقع نشان دهنده اختلاف ناچیز بین بیشترین احتمال رخداد سرعت باد با سرعت بادی است که بیشترین انرژی را در خروجی به دست می‌دهد. میزان انحراف معیار سرعت‌های باد در ارتفاع ۱۰ متری که مبتنی بر سرعت‌های مشاهده شده باد و به واقعیت نزدیکتراند، در تمامی ماه‌های سال و حتی در محاسبه سالانه، کمتر از  $2/66$  بوده است. این بدان معناست که سرعت‌های مشاهده شده باد در مکان مورد مطالعه از همگنی بالا و ثبات قابل قبولی برخوردارند.

پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد / ۱۶۷

بنابراین، با توجه به چگالی بالای توان باد در ارتفاع ۵۰ متری و تمامی مؤلفه‌های محاسبه شده باد در ایستگاه همدیدی مروست، این ایستگاه از پتانسیل خوبی در جهت استفاده از انرژی باد این فراسنج اقلیمی برخوردار است.

ایستگاه همدیدی یزد از موجودیت بادی معادل ۵۰۲۰/۹ ساعت در سال برخوردار است که رقم بسیار بالایی است. لذا استفاده از نیروی باد در این ایستگاه نیز به شرط استفاده از توربین‌هایی افقی محور، با سرعت شروع به کار ۲/۳۲ متر بر ثانیه، با ارتفاع محور از ۵۰ متر به بالا و پایه گردان که به صورت اتوماتیک در جهت باد قرار می‌گیرند، مقرون به صرفه اقتصادی است. توانایی کارکرد مفید توربین‌هایی با سرعت شروع به کار مذکور در ایستگاه همدیدی یزد در ارتفاع ۵۰ متری، رقمی معادل ۴۰۰۸/۵ ساعت در سال برآورد گردید؛ که بر اساس گفته ویندهایم، دارای توجیه اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در جهت تولید انرژی بادی است.

بر اساس جدول مذکور، انرژی باد در ایستگاه همدیدی طبرس برای مصارف کشاورزی مناسب ارزیابی گردید.

#### منابع

- ۱- تقفی، محمود. (۱۳۸۲). انرژی‌های تجدیدپذیر نوین، تهران: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ دوم.
- ۲- جمیل، مجید. (۱۳۸۰). «چگالی انرژی باد»، مجله نیوار، ش ۴۲ و ۴۳.
- ۳- صلاحی، برومند. (۱۳۸۳). «پتانسیل سنجی انرژی باد و برازش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های همدیدی استان اردبیل»، پژوهش‌های جغرافیایی، ش ۷۲.
- ۴- عباس پور، مجید و همکاران. (۱۳۷۵). «بررسی و مقایسه اقتصادی و امکان سنجی ساخت نیروگاه‌های بادی در ایران»، مجموعه مقالات سمینار توسعه کاربرد انرژی‌های نو، تهران: انتشارات آبیژ.
- ۵- عزیزاده، امین و همکاران. (۱۳۸۵). هوا و اقلیم‌شناسی، مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی، چاپ نهم.
- ۶- کاویانی، محمد رضا. (۱۳۷۴). «توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران»، پژوهش‌های جغرافیایی، ش ۳۶.
- ۷- عبدالله زاده، کاوه، عبدالله زاده، یحیی. (۱۳۷۹). «مفاهیم کاربردی آمار و احتمالات»، تهران: نشر آبیژ.
- ۸- Al-Nassar, w. and et al. (۲۰۰۵): Potential wind power generation in the State of Kuwait. Renewable Energy, February, vol ۳۰, ۲۱۴۹-۲۱۶۱.

- ۹- Bagiorgas, H.S. and et al. (۲۰۰۷): Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece. Energy Conversion and Management, vol ۴۸.
- ۱۰- Chang Tsang-Jung and et al. (۲۰۰۲): Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. Renewable Energy, September, vol ۲۸.
- ۱۱- Dunder, C. Inan, D. (۲۰۰۱): Wind energy potential of Cesme, Turkey. Solar world congress, August, Taejon, Korea.
- ۱۲- Elamouri, M. Ben Amar, F. (۲۰۰۷): Wind energy potential in Tunisia, Renewable Energy, June, vol ۳۳, ۷۵۸-۷۶۸.
- ۱۳- Eskin, N. Artar, H. Tolun S. (۲۰۰۸): Wind energy potential of Go' kc-eada Island in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol ۱۲, ۸۳۹-۸۵۱.
- ۱۴- Jaramillo, O.A. Saldana, R and Miranda, U. (۲۰۰۴): Wind power potential of Baja California Sur, Mexico. Renewable Energy, March, vol ۲۹.
- ۱۵- Kararli, V.M. Gecit, C. (۲۰۰۳): An investigation on wind power potential of Nurdag-Gaziantep, Turkey. Renewable Energy, vol ۲۸, ۸۲۳-۸۳۰.
- ۱۶- Wei Zhou and et al. (۲۰۰۵): Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China. Renewable Energy, July, vol ۳۱.
- ۱۷- Weisser, D. (۲۰۰۳): A wind energy analysis of Granada: an estimation using the Weibull density function, Renewable Energy, vol, ۲۸, ۱۸۰۳-۱۸۱۲.
- ۱۸- [http://www.aftab.ir/articles/science\\_education/ecology/c3c1187796146p1.php](http://www.aftab.ir/articles/science_education/ecology/c3c1187796146p1.php)
- ۱۹- <http://www.danielsoper.com/statcalc/cal30.aspx>
- ۲۰- <http://functions.wolfram.com/webmathematica/functionevaluation.jsp>