

بررسی پتانسیل انرژی باد در استان لرستان برای مکان‌یابی نصب توربین‌های بادی

راضیه پيله وران^{۱*}، محمد ناصر هاشمی^۲، جهانبخش مرادی^۳، بهمن محمدی مقدم^۴، رامین فرهنگی^۵، حسین مسعودی^۶

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد خرم‌آباد

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی قم

۵- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی خرم‌آباد

۶- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه لرستان

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۱/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۰۵)

چکیده

در عصر حاضر که منابع سوخت‌های فسیلی رو به کاهش است، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد جایگزین مناسبی است که می‌تواند بقای بشر را تضمین کند. در پژوهش حاضر، پتانسیل سنجی انرژی باد در ایستگاه‌های همدید استان لرستان با استفاده از داده‌های سه ساعته سمت و سرعت باد طی دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ بررسی شد. برای برآزش داده‌ها از توزیع احتمال ویبول و برای ترسیم گلبادهای از نرم‌افزار WRplot استفاده شده است. برای برآورد چگالی توان باد در ارتفاع ۲۰ و ۵۰ متری، برون‌یابی سرعت باد با استفاده از قانون توان یک هفتم صورت گرفت. بر اساس جدول طبقه‌بندی تارنماهای انرژی باد در آمریکا، ایستگاه خرم‌آباد در کلاس ۲، الشتر و الیگودرز در کلاس ۳، ازنا در کلاس ۴، بروجرد، کوه‌دشت، پلدختر و نورآباد در کلاس ۵ و دورود در کلاس ۷ قرار گرفتند و مناطق مستعد تولید انرژی باد استان در محیط GIS طبقه‌بندی و ترسیم شدند. نتایج پژوهش گویای این است که بر اساس طبقه‌بندی، در ایستگاه‌های ازنا، بروجرد، کوه‌دشت، پلدختر و نورآباد می‌توان از توربین‌های بادی اندازه کوچک و متوسط استفاده کرد و ایستگاه دورود برای تأسیس مزرعه بادی در مقیاس بزرگ مناسب است.

کلمات کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، توزیع احتمال ویبول، چگالی توان باد، قانون توان، گلباد، استان لرستان

مقدمه

بادی به دلیل عدم آلودگی محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و از بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد بهترین منبع انرژی رو به رشد در جهان و یکی از پر استفاده‌ترین جایگزین‌های منابع انرژی فسیلی است (رمضان و همکاران، ۲۰۰۴). آگاهی از توزیع سرعت باد دارای اهمیت بسیاری، نه تنها برای طراحی محیطی و ساختاری، بلکه برای بررسی پتانسیل انرژی باد و اجرای سامانه‌ی حفاظت از انرژی باد است. توزیع‌های ویبول، رایله و لوگ نرمال به‌طور معمول برای تعیین توزیع احتمال سرعت باد مناسب هستند و توزیع احتمال ویبول دو پارامتره از پرکاربردترین روش‌ها برای توصیف نوسان سرعت باد است. تاکنون مطالعات و پژوهش‌های متنوعی در داخل و خارج از ایران در زمینه پتانسیل‌سنجی انرژی باد و

باد به عنوان یکی از قدیمی‌ترین منابع انرژی از دیرباز مورد توجه و کاربرد انسان بوده است. اولین ماشین‌های بادی در قرن هفتم قبل از میلاد در نقاط مرتفع افغانستان برای خرد کردن غلات به کار می‌رفتند. انرژی باد یکی از انواع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر است که از دیر باز ذهن بشر را به خود معطوف کرده است؛ به‌طوری که همواره بشر به فکر کاربرد این انرژی در صنعت بوده است. رشد روزافزون تقاضای انرژی، افزایش استانداردهای زندگی، گرمایش بیش از حد کره‌ی زمین و در نهایت مشکلات محیط زیستی و اکولوژیکی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی به ویژه نفت و مشتقات آن، نگرانی‌هایی را برای کشورهای مختلف ایجاد کرده است. در این راستا انرژی‌های نو از جمله پتانسیل‌های آبی، انرژی‌های خورشیدی و

ژول بر متر مربع و کمترین انرژی پتانسیل معادل ۳۸۸ ژول بر متر مربع مربوط به ماه دسامبر است. همچنین بیشترین انرژی پتانسیل روزانه (۵۶۶۳ ژول بر مترمربع) بین ساعات ۳ الی ۶ بعد از ظهر و کمترین مقدار (۲۴۴۰) به بازه زمانی ۱۲/۵ الی ۳/۵ شب مربوط می‌شود.

- پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱). در این پژوهش، ارزیابی پتانسیل انرژی باد بر پایه‌ی داده‌های جهت و سرعت سه ساعته‌ی باد ایستگاه‌های همدید کرمانشاه، انجام شده و چگالی توان باد سالانه در ترازهای ارتفاعی ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متر به دست آمده است. بر اساس نتایج این پژوهش، سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور، پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی باد دارند. منطقه اسلام آباد غرب در صورت استفاده از توربین‌های بادی مرتفع، برای بهره‌برداری از انرژی باد مناسب است و کرمانشاه برای استفاده از انرژی باد، پتانسیل مناسبی ندارد.

- ارزیابی پتانسیل تولید انرژی بادی در ایستگاه‌های منتخب ایران (روشن و همکاران، ۱۳۹۳).

- پتانسیل سنجی انرژی باد در استان لرستان (شیراوند، ۱۳۹۲). شواهد و قرائن آماری و تجربی حاکی از آن است که استان لرستان از مناطق بادخیز کشور به شمار می‌رود و شدت و تداوم بادها در برخی از نقاط این منطقه قابل ملاحظه است. لذا امکان استفاده از انرژی باد در این منطقه وجود دارد و بهتر است تلاش‌های جدی و مؤثری برای توسعه بهره‌برداری از پتانسیل انرژی باد در کاربردهای مختلف آغاز شود. در این مقاله سعی شده پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی استفاده از آن در نه ایستگاه همدید استان لرستان ارزیابی شود.

منطقه مورد مطالعه

استان لرستان با مساحت ۲۸۵۵۹ کیلومتر مربع در غرب ایران، ۱/۷ درصد از کل مساحت کشور را در بر می‌گیرد. این استان بین مدارهای ۳۲ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۰ درجه

امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

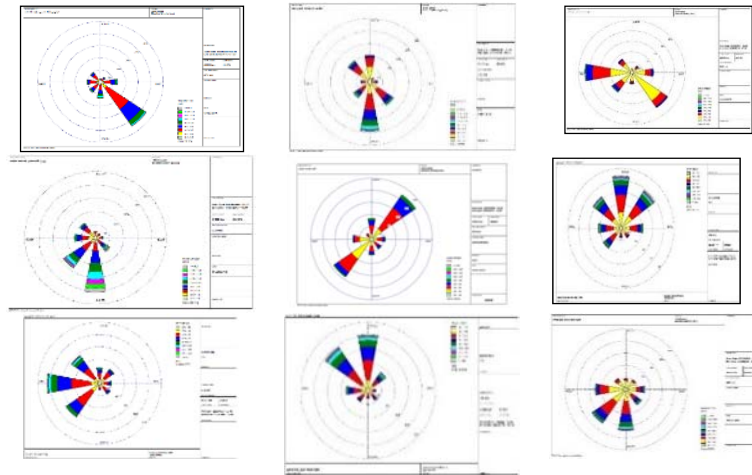
- محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۳)، که در آن پتانسیل انرژی باد در ایستگاه همدید اردبیل با استفاده از آمار بادهای ساعتی و روزانه ده ساله مورد مطالعه قرار گرفت و میانگین سرعت باد ۶/۳۷ متر بر ثانیه، چگالی توان باد ۳۰۲/۶۴ وات بر متر مربع، ضریب تغییرات باد ۵۶/۵ درصد و ضریب ثبات باد ۴۶ درصد به دست آمد.

- بررسی و تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد در استان بوشهر جهت نصب توربین باد توسط مطهر و همکاران (۱۳۸۸).

- پتانسیل سنجی تولید برق از انرژی باد در استان تهران، ایستگاه لثمان (نعمت الهی و همکاران، ۱۳۹۰). در این پژوهش سرعت باد در ارتفاع‌های ۴۰، ۳۰ و ۱۰ متری در ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. از نمودار گلباد سرعت و جهت باد در ارتفاع ۳۰ متری مشاهده شد که جهت غالب باد در راستای جنوب شرقی است و نمی‌توان بیان کرد که در طی سال جهت غالب باد ثابت است. این موضوع در چیدمان توربین‌ها بسیار اهمیت دارد زیرا ثابت بودن جهت باد مزیت عمده‌ای برای نیروگاه محسوب می‌شود.

- تحلیل داده‌های بادی و تعیین پتانسیل انرژی بادی در منطقه فشافویه ایران (ابوحوزه و همکاران، ۱۳۹۰). در این پژوهش از دو روش ویول یک بار از فرمول‌ها و بار دیگر از روش خطی‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که منطقه فشافویه مطابق دسته‌بندی پتانسیل انرژی از نظر احداث نیروگاه‌های بادی در کلاس ۲ و ۳ قرار دارد و برای نصب توربین‌های بادی کوچک مناسب است.

- ارزیابی پتانسیل سنجی انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۱). در این پژوهش به منظور ارزیابی انرژی باد در سبزوار از داده‌های روزانه و ساعتی سمت و سرعت باد طی دوره ۳۰ ساله (۲۰۰۷-۱۹۷۸) استفاده شده است. بر اساس نتایج بیشترین انرژی پتانسیل در ماه ژوئیه برابر ۶۳۲۷



شکل ۲- گلباد سالانه ایستگاه‌های همدید استان به ترتیب از چپ به راست: خرم آباد، بروجرد، الیگودرز، کوهدهشت، پلدختر، دورود، الشتر، نورآباد، ازنا در دوره اقلیمی ۱۳۷۹-۱۳۹۳

روش‌های آماری در برآورد انرژی باد

برای تعیین پتانسیل انرژی باد در مکانی مشخص و تخمین انرژی خروجی از روش‌های آماری استفاده می‌شود. تابع ویبول حالت خاصی از توزیع گاما است. این توزیع معمولاً برای رسم توزیع‌های باد مکان معین از روی دوره‌های زمانی معین، تیپ‌های ماهانه و سالانه به کار می‌رود (ژو و همکاران، ۲۰۰۶). این تابع نسبت به توابع دیگر نظیر رایله^۱ انعطاف بیشتری دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود (Dundar, ۲۰۰۲):

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

در این رابطه، x سرعت باد، (k) یک فرانسج بدون بعد معروف به «فاکتور شکل^۲» و (c) فرانسج موسوم به «فاکتور مقیاس^۳» است که با واحد متر بر ثانیه محاسبه می‌شود.

محاسبه فرانسج‌های تابع توزیع ویبول

برای برآورد فرانسج‌های شکل و مقیاس توزیع ویبول مانند هر توزیع دیگر چندین راه وجود دارد. می‌توان از طریق ترسیمی و استفاده از کاغذ ویبول و روش برازش کمینه مربعات^۴ استفاده کرد (محمدی، ۱۳۹۱). یکی از رایج‌ترین این روش‌ها، روش «برازش کمینه 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):

$$Y = Ax + B \quad (2)$$

در این رابطه A ضریب زاویه خط و B عرض تقاطع خط با محور Y است. مقادیر رابطه خطی بین X_i و Y_i برای تعیین مقادیر A و B با پارامترهای C و K تابع ویبول به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$X = \ln(V_i) \quad (3)$$

$$Y = \ln\{-\ln[1-p(V)]\} \quad (4)$$

در رابطه مذکور، V_i میانه طبقات سرعت باد و P(V) درصد فراوانی تجمعی هر طبقه است. با مشخص شدن مقادیر ستون‌های X و Y، مقادیر $K=A$ و B با استفاده از روابط زیر از طریق نرم‌افزارهای آماری نظیر SPSS و Excel قابل محاسبه‌اند. رابطه A و B با فرانسج‌های C و K تابع ویبول به صورت زیر است (جمیل، ۱۳۸۰):

$$A = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \quad \sum_{i=1}^n x_i} = K \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i - \frac{A}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad (6)$$

$$C = \exp\left(-\frac{B}{A}\right) \quad (7)$$

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده برای پارامترهای C و K یا استفاده از روابط (۵)، (۶) و (۷) بسیار

1- Rayleigh
2- Form Factor
3- Scale Factor
4- Least-square

(اسکین و همکاران، ۲۰۰۸) و ۲۰ متر، به دلیل قرارگیری چرخ توربین‌های بادی کوچک در مصارفی مانند کشاورزی، انتخاب و بررسی شده است. برای سرعت باد از مدل قانون توان یک هفتم استفاده شده است (زاهدی و همکاران، ۱۳۸۳ و شیراوند، ۱۳۹۲) و چگالی توان باد در ارتفاع ۲۰ و ۵۰ متر برآورد شده است:

$$\frac{v(z)}{v(z_0)} = \left[\frac{z}{z_0} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (11)$$

Z ارتفاع سرعت باد مطلوب، $v(z)$ سرعت باد در ارتفاع Z بالای سطح زمین و $v(z_0)$ سرعت مرجع یا سرعت بادی که در ارتفاع z_0 (مثلاً ۱۰ متری) اندازه‌گیری شده است (الناصر، ۲۰۰۵).

توجه به این نکته ضروری است که توان فوق را نباید با انرژی قابل استحصال و توان تولیدی توربین اشتباه کرد. مقدار فوق برای تعیین کیفیت سایت و پتانسیل آن مورد استفاده قرار می‌گیرد (تقوی، ۱۳۷۵).

بحث نتایج

محاسبه فراسنج‌های تابع توزیع ویبول

سرعت باد در محاسبات انرژی باد، به عنوان یک متغیر تصادفی پیوسته مد نظر است. مطالعات آماری نشان می‌دهد که بهترین توزیع برای نشان دادن متغیرهای تصادفی توزیع ویبول است و در اکثر منابع نیز از این توزیع استفاده شده است. در محاسبه توزیع ویبول، ابتدا مقادیر C و K محاسبه شد. مقادیر فاکتور C در ایستگاه‌های خرم‌آباد، الیگودرز، دورود، الشتر، ازنا، کوه‌دشت، نورآباد، بروجرد، پلدختر به ترتیب ۶/۶، ۶/۹، ۹/۵، ۶/۸، ۷/۴، ۷/۷، ۷/۸، ۷/۶، ۸ و مقادیر K به ترتیب در این ایستگاه‌ها ۳/۵، ۳، ۱/۷، ۳/۲، ۲/۳، ۷/۷، ۷/۸، ۷/۲، ۹/۴ می‌باشند. با داشتن پارامترهای شکل و مقیاس (C و K) و سرعت‌های موجود (V_i) و نیز با استفاده از معادله ویبول، مقادیر تابع احتمال پیوسته ویبول (P_w) محاسبه و در جدول (۴) ارائه شده است. از طرفی بیشترین فراوانی سرعت باد سالانه در ایستگاه‌های الیگودرز، دورود، بروجرد و پلدختر بین ۶ تا ۸ متر بر ثانیه، توزیع شده است.

دقیق‌تر از نتایج مشابه با استفاده از معادلات دو مجهولی است (صلاحی، ۱۳۸۳).

چگالی توان باد

پس از محاسبه مقادیر فراسنج‌های شکل و مقیاس تابع ویبول، می‌توان وضعیت یک مکان را از نظر پتانسیل انرژی باد ارزیابی کرد. برای محاسبه چگالی توان باد در واحد سطح از معادله زیر استفاده شده است:

$$P_{aw} = \frac{1}{2} \rho C^3 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{3}{K} \right) \quad (8)$$

که در آن Γ تابع گاما، C و K پارامترهای تابع ویبول و P چگالی هواست. چگالی هوا تابعی از فشار و دماست که تغییرات مربوط به آن در این محاسبات چندان با اهمیت تلقی نمی‌شود (جمیل، ۱۳۸۰).

هرگاه بخواهیم در برآورد انرژی باد یک منطقه بیشترین مقدار انرژی در طول سال را به دست آوریم، از سرعت نامی باد، به عنوان سرعتی که بیشترین انرژی را در طول سال تولید می‌کند. استفاده می‌کنیم که در محاسبات انرژی باد با علامت V_{mec} نشان داده می‌شود. این سرعت که از پارامترهای مهم در طراحی توربین‌های بادی می‌باشد، از رابطه زیر به دست می‌آید (الاموریا و همکاران، ۲۰۰۸):

$$V_{mec} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (9)$$

همچنین محتمل‌ترین یا بیشترین احتمال وقوع سرعت باد که با علامت (V_{mp}) نشان داده می‌شود از رابطه زیر قابل محاسبه است (چانگ و همکاران، ۲۰۰۲):

$$V_{mp} = C(1 - \lambda) \lambda \quad (10)$$

برون‌یابی سرعت باد در ۲۰ و ۵۰ متر از سطح زمین

سرعت باد، بسته به شرایط جوی و زیری سطح، با ارتفاع تغییر می‌کند. 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, 2007). در اینجا دو ارتفاع ۵۰ متر که ارتفاع منتخب برای استفاده از چرخ توربین‌های بادی مرتفع است

جدول ۴- مقادیر تابع احتمال پیوسته ویبول (PW) محاسبه شده

۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰/۲-۰	طبقات سرعت	خرم آباد
۵/۱	۷/۶۷	۶/۳	۰/۰۴۹	۰/۰۶	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۰۰۷	مقادیر ویبول	
۲/۲	۲/۰۳	۱/۸	۱/۷	۱/۳	۰/۹۸	۰/۲	-۱/۸	-۶/۶	YI	
۲/۸۳	۲/۷۰	۲/۵۶	۲/۳۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶	۱/۰۹	۰/۲۲	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰/۲-۰	طبقات سرعت	بروجرد
۱/۰۷	۱/۲۴	۹/۷	۷/۶۸	۰/۱	۰/۲۲	۰/۰۶	۰	۰	مقادیر ویبول	
۲/۲۲	۱/۶۸	۱/۴۹	۱/۳۴	۱/۰۱	۰/۶۸	۰/۲	-۰/۸	۰/۱	YI	
۲/۸۳	۲/۷۰	۲/۵۶	۲/۳۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶	۱/۰۹	۰/۳	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰/۲-۰	طبقات سرعت	الیگودرز
۸/۱۴	۶/۸	۰/۰۰۱	۰/۰۱۸	۰/۰۷۹	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۷۶	۰/۰۱۴	مقادیر ویبول	
۲/۲۲	۱/۸۳	۱/۵۸	۱/۳۶	۱/۰۶۹	۰/۶۹۸	۰/۰۳۳	-۱/۴۶	۰/۶۴	YI	
۲/۸۳	۲/۷۰	۲/۵۶	۲/۳۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶	۱/۰۹۸	۰/۲۲	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰/۲-۰	طبقات سرعت	کوه‌دشت
۱/۱۵	۶/۲۷	۱/۰۰۰۵	۰/۰۱۲	۰/۰۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۰۱	مقادیر ویبول	
۲/۲۲	۱/۷۸	۱/۵۸	۱/۳۹	۱/۱۲	۰/۸۰	۰/۳۶	-۰/۴۴	-۷/۹۴	YI	
۲/۸۳	۲/۷۰	۲/۵۶	۲/۳۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶	۱/۰۹۸	۰/۲۲	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰/۲-۰	طبقات سرعت	پلدختر
۰	۰	۲E-۲۵۹	۱/۰۱	۱/۹۷	۰/۰۳۶	۰/۳۹	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰۵	مقادیر ویبول	
۲/۲	۲/۲۲	۲/۰۰۰۰۱۲	۱/۸۲	۱/۶۸	۱/۴۶	۱/۱	۰/۶۳	-۰/۲۴	YI	
۲/۷	۲/۸۳	۲/۷۰	۲/۵۶	۲/۳۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶۰۹	۱/۰۹۸	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰/۲-۰	طبقات سرعت	دورود
۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳۹	۰/۰۵۳	۰/۰۶۷	۰/۰۷۸	۰/۰۸۱	۰/۰۷۰	۰/۰۴۴	مقادیر ویبول	
۲/۲۲	۱/۲۱	۰/۹۶	۰/۷۴	۰/۴۵	۰/۱۱	-۰/۴۴	-۱/۳۸	-۸/۲۷	YI	
۲/۸۳	۲/۷۰	۲/۵۶	۲/۳۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶	۱/۰۹	۰/۲۲	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰/۲-۰	طبقات سرعت	الشر
۱/۱۵	۶/۲۷	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۰۱	مقادیر ویبول	
۲/۲۲	۱/۷۸	۱/۵۸	۱/۳۹	۱/۱۲	۰/۸	۰/۳۶	-۰/۴۴	-۷/۹۴	YI	
۲/۷۰	۲/۵۶	۳/۳۹	۲/۱۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶	۱/۰۹	۰/۲۲	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰-۲/۵	طبقات سرعت	نورآباد
۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۲	مقادیر ویبول	
۲/۲۲	۱/۵۶	۱/۳۶	۱/۱۶	۰/۸۶	۰/۴۷	-۰/۱	-۱/۲۳	-۸/۲۹	YI	
۲/۸۳	۲/۷۰	۲/۵۶	۲/۳۹	۲/۱۹	۱/۹۴	۱/۶	۱/۰۹	۰/۲۲	XI	
۱۸-۱۶	۱۶-۱۴	۱۴-۱۲	۱۲-۱۰	۱۰-۸	۸-۶	۶-۴	۴-۲	۰-۲/۵	طبقات سرعت	ازنا
۴/۴۵	۵/۷۶	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱۸	۰/۱۰۱	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۰۴۷	۰/۰۰۵	مقادیر ویبول	
۰/۲۲	۱/۷۷۹	۱/۵۰	۱/۳۳	۱/۰۵۰	۰/۶۵۸	۰/۰۱۷	-۱/۳۲	-۸/۳۸	YI	
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۶۳۸	۰/۲۳	۰/۰۰۰۲	XI	

(۵) ارائه شده است و نشان می‌دهد که سرعت باد در هر طبقه با یک مقدار ثابت بیشتر می‌شود. با توجه به جدول (۷)، کمترین مقدار چگالی توان باد مربوط به ایستگاه خرم‌آباد و بیشترین آن، در ایستگاه دورود است. مقادیر سالانه سرعت نامی، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد در ارتفاعات ۲۰ و ۵۰ متری که در رابطه با کاربرد توربین‌های بادی مهم هستند، به ترتیب در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده‌اند.

گام اول برای بررسی انرژی باد یک منطقه، محاسبه چگالی انرژی باد آن منطقه است. محاسبه فراسنج‌های موثر در سنجش پتانسیل باد در یک مکان با توجه به رابطه چگالی توان باد وابستگی کامل به پارامترهای تابع ویبول دارد. مقدار چگالی توان باد به صورت سالانه در ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متری در جدول (۵) ارائه شده است. برای برآورد توان باد در ارتفاع‌های ۲۰ و ۵۰ متری، ابتدا برون‌یابی سرعت باد با استفاده از قانون توان پُ صورت گرفت که نتایج آن در جدول

جدول ۵- مقدار چگالی توان باد به صورت سالانه

پارامتر	متوسط سرعت باد (m/s)	سرعت نامی	متحمل‌ترین سرعت باد	چگالی انرژی باد (w/m^2)		
				10 متر	20 متر	50 متر
ایستگاه	V_{mec}	V_{mp}				
خرم‌آباد	۶/۵	۴/۱۸	۱۴۸	۲۰۳	۳۰۳	
بروجرد	۴/۱۸	۵/۹۵	۲۷۵	۳۷۶	۶۸۶	
الیگودرز	۸/۱۵	۶/۰۷	۱۹۸	۲۶۷	۳۹۸	
کوه‌دشت	۷/۶۸	۲/۹۹	۲۷۹	۲۷۶	۵۵۴	
پلدختر	۷/۹۲	۵/۹۵	۲۷۰	۳۶۹	۵۵۸	
دورود	۱۰/۲	۳/۹۳	۵۰۳	۷۰۹	۱۱۱۹	
الشتر	۷/۴۵	۲/۱۷	۱۹۶	۲۶۵	۳۹۳	
نورآباد	۸/۵۸	۶/۰۳	۲۷۷	۲۷۶	۵۶۰	
ازنا	۷/۷۳	۴/۸۳	۲۴۴	۳۳۰	۴۸۹	

جدول ۶- سرعت باد در ارتفاعات ۲۰ و ۵۰ متر

میان‌طبقات (vi)	۱،۲۵	۳	۵	۷	۹	۱۱	۱۳	۱۵	۱۷
V(20)	۱/۳۸	۳/۳۱	۵/۵۲	۷/۷۳	۹/۹۴	۱۲/۱۴	۱۴/۳۵	۱۶/۵۶	۱۸/۷۷
V(50)	۱/۵۷	۳/۷۸	۶/۲۹	۸/۸۱	۱۱/۳۳	۱۳/۸۴	۱۶/۳۶	۱۸/۸۸	۲۱/۳۹

گرفته می‌شود و مناطق طبقه ۱ برای استفاده از انرژی باد نامناسب هستند. بر طبق نظر الیوت این طبقه‌بندی، برای برآورد قدرت باد در مناطق آزاد و بدون مانع محلی کاربرد دارد و برآورد قدرت باد، با توجه به ویژگی‌های زمین در مناطق از قبیل دشت‌های باز، تپه‌ها، در نواحی کوهستانی و خط‌الراس ارتفاعات با هم متفاوت می‌باشند (آی لینکا و همکاران، ۲۰۰۳). در این تحقیق نیز برای تعیین وضعیت منطقه از نظر مناسب بودن بر اساس جدول طبقه‌بندی سایت‌های بادی آمریکا، ایستگاه خرم آباد در طبقه ۲، الشتر و الیگودرز در طبقه ۳، ازنا در طبقه ۴، بروجرد، کوهدشت، پلدختر، نورآباد در طبقه ۵، دورود در طبقه ۷ قرار گرفتند. بر طبق نتایج به دست آمده در جدول (۷)، ازنا، کوهدشت، بروجرد، پلدختر و نورآباد، برای به کارگیری اکثر توربین‌های بادی مناسب هستند. اما ایستگاه خرم آباد طبق جدول ۷ به عنوان یک منطقه مرزی برای توسعه قدرت باد در نظر گرفته می‌شود.

نتایج طبقه‌بندی پتانسیل انرژی باد در مناطق مختلف استان لرستان

آزمایشگاه ملی انرژی باد زیر نظر وزارت نیروی ایالات متحده برنامه‌ای را برای طبقه‌بندی قدرت باد ارائه داده است و این برنامه را در اطلس انرژی باد آمریکا به کار برده است. در این طبقه‌بندی، مناطق مختلف بر اساس توان باد در ۷ کلاس (کلاس ۱ (پایین‌ترین) و کلاس ۷ (به عنوان بالاترین رده) قرار می‌گیرند. هر طبقه یا کلاس نمایانگر گستره‌ای از چگالی قدرت باد (وات بر مترمربع) یا محدوده‌ای از سرعت باد (متر بر ثانیه) در یک ارتفاع مشخص بالاتر از سطح زمین است (کامیو و همکاران، ۲۰۱۰؛ جیویر و همکاران، ۲۰۰۵). به‌طور معمول، در این پهنه‌بندی، طبقه ۴ و بالاتر برای به کارگیری اکثر توربین‌های بادی مناسب در نظر گرفته می‌شوند. مناطق طبقه ۳، در صورت استفاده از توربین‌های بادی مرتفع، برای توسعه انرژی باد مناسب هستند. مناطق طبقه ۲، به عنوان یک منطقه مرزی برای توسعه قدرت باد در نظر

جدول ۷- چگالی توان باد سالانه و طبقه‌بندی‌های آن در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متر ایستگاه‌های همید استان لرستان

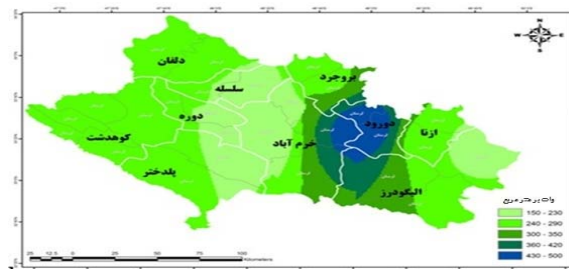
طبقه بندی قدرت باد	چگالی توان باد (w/m^2)		ایستگاه
	ارتفاع ۱۰ متر	چگالی توان باد	
۱	۱۰۰-۰		خرم آباد الشتر - ازنا الیگودرز پلدختر - بروجرد - کوهدشت - نورآباد ----- دورود
۲	۱۵۰-۱۰۰	۱۴۸	
۳	۱۵۰-۲۰۰	۱۹۸-۱۹۶	
۴	۲۰۰-۲۵۰	۲۴۴-۲۷۰-۲۷۷	
۵	۲۵۰-۳۰۰	۲۷۵-۲۷۰-۲۷۷-۲۷۹	
۶	۳۰۰-۴۰۰		
۷	۴۰۰-۱۰۰۰	۵۰۳	
طبقه بندی قدرت باد	ارتفاع ۵۰ متر	چگالی توان باد	ایستگاه
۱	۰-۲۰۰		خرم آباد-الشتر-ازنا الیگودرز کوهدشت-پلدختر-بروجرد-نورآباد ----- دورود
۲	۲۰۰-۳۰۰	۳۰۳-۳۹۳-۳۹۸	
۳	۳۰۰-۴۰۰	۴۸۹	
۴	۴۰۰-۵۰۰	۵۵۴-۵۵۸-۵۶۶-۵۷۷	
۵	۵۰۰-۶۰۰		
۶	۶۰۰-۸۰۰	۱۱۱۹	
۷	۸۰۰-۲۰۰۰		

مسیر از مهمترین فاکتورها به شمار می‌آید. جهت باد غالب سالانه ایستگاه‌های مذکور به ترتیب جنوب شرقی، جنوب، جنوب، جنوب غرب، غرب، غرب، جنوب و جنوب غرب است. از نظر پتانسیل انرژی باد به ترتیب ایستگاه‌های دورود، کوهدشت، نورآباد، بروجرد، پلدختر، ازنا، الیگودرز، الشتر و خرم‌آباد قرار دارند. از نظر مناسب بودن ایستگاه‌های همید استان برای بهره‌برداری از انرژی باد با توجه به طبقه‌بندی انجام شده در سایت‌های بادی امریکا، ایستگاه‌های خرم‌آباد در طبقه ۲، الشتر و الیگودرز در طبقه ۳، ازنا در طبقه ۴، بروجرد، کوهدشت، پلدختر، نورآباد در طبقه ۵، دورود در طبقه ۷ قرار دارند. از آنجا که در این طبقه‌بندی، لزوم استفاده از توربین‌های بادی را در طبقه ۴ و بالاتر قرار داده است، در ایستگاه‌های ازنا، بروجرد، کوهدشت، پلدختر و نورآباد می‌توان از توربین‌های بادی اندازه کوچک و متوسط برای بهره‌گیری از انرژی باد استفاده کرد. این توربین‌ها قابلیت نصب جهت پمپاژ آب برای مصارف کشاورزی، دامپروری، پمپ‌های بادی آبکش و... را دارند. گفتنی است که لزوم استفاده از انرژی باد در کاربردهای بزرگ مقیاس مانند ایجاد مزرعه بادی، قرارگیری ایستگاه در طبقه ۷ است که با توجه به محاسبات انجام شده، ایستگاه دورود برای تأسیس مزرعه بادی یا استفاده از انرژی باد در مقیاس بزرگ مناسب است.

منابع

- ۱- ابوحمزه، ا.، ک. عباسپور و ع. توفیق، ۱۳۹۰، تحلیل داده‌های بادی و تعیین پتانسیل انرژی بادی در منطقه فشافویه ایران، نخستین همایش ملی انرژی باد و خورشید، تهران.
- ۲- انتظاری، ع.، ا. امیر احمدی، ع. عرفانی و ا. برزویی، ۱۳۹۱، ارزیابی پتانسیل سنجی انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه نیروگاه بادی در سوزوار، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال سوم، شماره نهم و دهم.
- ۳- تقوی، ف.، ۱۳۷۵، محاسبه عددی سرعت باد برای ساخت پانل انرژی باد در دیزباد نیشابور، نهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.

اگرچه ایستگاه خرم‌آباد دارای ساعت موجودیت باد زیادی است اما از لحاظ سایر پارامترهای دیگر نظیر سرعت نامی باد و محتمل‌ترین سرعت باد مقادیر کمی دارد. در شکل (۳) نتایج محاسبات پتانسیل انرژی باد سالانه در استان لرستان با توجه به طبقه‌بندی چگالی توان باد در محیط نرم‌افزار Arc Gis ترسیم و به نمایش گذاشته شده است. با توجه به نقشه و مباحث گفته شده ایستگاه دورود در شمال شرق استان بیشترین چگالی توان باد را داراست. در مرتبه بعد الیگودرز نیز دارای پتانسیل تولید انرژی باد است. پس از آن ایستگاه‌های بروجرد، کوهدشت، پلدختر و نورآباد دارای پتانسیل متوسط برای تولید انرژی بادی هستند و ایستگاه‌های خرم‌آباد و الشتر در مرکز استان، نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارای پتانسیل کمتری هستند.



شکل ۳- نقشه پتانسیل انرژی باد سالانه‌ی استان لرستان

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی وضعیت باد استان لرستان و پتانسیل انرژی حاصل از آن پرداخته شد که در اینجا به نتایج آن به طور خلاصه اشاره می‌شود:
از لحاظ میانگین سرعت باد سالانه در ایستگاه‌های استان لرستان به ترتیب الیگودرز، بروجرد، دورود، پلدختر، ازنا، خرم‌آباد، کوهدشت و الشتر قرار دارند. بر اساس توزیع احتمال ویبول بیشترین فراوانی سرعت باد در ایستگاه‌های استان لرستان، به ترتیب: الیگودرز و ازنا و دورود و بروجرد و کوهدشت و نورآباد بین ۶ تا ۸، پلدختر ۶ تا ۸، خرم‌آباد ۴ تا ۶، ازنا ۴ تا ۶ و الشتر ۲ تا ۴ متر بر ثانیه است. هرچه این توزیع در سرعت‌های بالاتر قرار گیرد، مقدار انرژی به دست آمده از باد بیشتر خواهد شد. در مکان‌یابی محل نصب توربین‌های بادی وجود بادهای غالب و همیشگی و نبود مانع در طول

- 15- Chang, T. J., et al., 2002, Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan, *Renewable Energy*, September, Vol 28.
- 16- Dr. Gary & L. Johnson 2001, wind energy systems, December 10.
- 17- Dundar, C. & D. Inan, 1997, Wind energy potential of Cesme Turkey, *Ises Solar World congress*, Aug. 1997, Teajon Korea.
- 18- Elamouria, M. & F. Ben- Amara, 2008, Wind Energy Potential in Tunisia, *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 758-768.
- 19- Eskin, N., H. Artar & S. Tolun, 2008, Wind energy potential of Gokceada Island in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 839-851.
- 20- Ilinca, A., E. McCarthy, J. L. Chaumel & J. Retiveau, 2003, Wind Potential Assessment of Quebec Province, *Renewable Energy*, Vol. 28.
- 21- Jewer, P., M. T. Iqbal & M. J. Khan, 2005, Wind Energy Resource Map of Labrador, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 989 -1004.
- 22- Jamil, M., 1994, wind power statistics and evaluation of wind energy density, *Wind Engineering*, Vol. 18, No. 5.
- 23- Kamau, J. N., et al., 2010, 6 years of wind data for marsabit, Kenya average over 14 m/s at 100 m hub height; An analysis of the wind energy potential, *Renewable Energy*, 35: 1298- 1302.
- 24- Li, M., & X. Li, 2005, Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Energy Potential for Waterloo Region, Canada, *Energy Conversion and Management*, No. 46, pp. 3014-3033.
- 25- Ramazan, K., et al., 2004, The Analysis of Wind Data and Wind Energy Potential in Kutahya, Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 8, pp. 277-288.
- 26- Taghavi, F., 1996, Numerical Calculation of Wind Speed for Wind Power Plant Construction of Dizbad Neyshaboer, 9th Iranian Geophysical Conference, Tehran-Iran.
- 27- Zhou, W., H. Yang & Z. H. Fang, 2006, Wind Power Potential and Characteristics Analysis of the Pearl River Delta Region, China, *Renewable Energy*, No. 31, pp. 739 -753.
- ۴- جمیل، م.، ۱۳۸۰، چگالی انرژی باد، نیوار، شماره ۴۲ و ۴۳.
- ۵- روشن، غ.، ع. قانقرمه و ا. شاهکویی، ۱۳۹۳، ارزیابی پتانسیل تولید انرژی بادی در ایستگاه‌های منتخب ایران، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال چهارم، شماره ۱۴.
- ۶- زاهدی، م.، ب. صلاحی و م. جمیل، ۱۳۸۳، محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳، صص. ۴۱-۵۵.
- ۷- شیراوند، پ.، ۱۳۹۲، پتانسیل سنجی انرژی باد در استان لرستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران.
- ۸- صلاحی، ب.، ۱۳۸۳، پتانسیل سنجی انرژی باد و برازش احتمالات واقعی باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل، مجله تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۲، صص. ۸۷ تا ۱۰۴.
- ۹- علمداری، پ.، ا. نعمت الهی، م. میرحسینی و ع. عالم رجی، ۱۳۹۰، اولین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۱۰- محمدی، ح.، ش. رستمی جلیلیان، ف. تقوی و ع. شمسی پور، ۱۳۹۱، پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره ۲ (پیاپی ۸۰)، صص. ۱۹ تا ۳۲.
- ۱۱- مطهر، ص.، ا. صداقت و ع. عالم رجی، ۱۳۸۸، بررسی و تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد در استان بوشهر جهت نصب توربین باد، اولین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران.
- 12- Al-Nassar, W., S. Alhajraf, A. Al-Enizi & L. Al-Awadhi, 2005, Potential Wind Power Generation in the State of Kuwait, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 2149-2161.
- 13- Badran, O., 2003, Wind turbine utilization for water pumping in Jordan, *wind engineering and industrial aerodynamics*, 10, pp. 1203 – 1214.
- 14- Bagiorgas, H. S., et al., 2007, Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48.