

بررسی پتانسیل انرژی باد در استان لرستان جهت احداث توربین‌های بادی

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

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد خرم آباد

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی قم

۵- دانش آموخته کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی خرم آباد

۶- دانش آموخته 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 نماید. در پژوهش حاضر، پتانسیل سنجی انرژی باد در ایستگاه‌های همدیدی استان لرستان با استفاده از داده‌های ۳ ساعته سمت و سرعت باد طی دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ بررسی شد. برای برازش داده‌ها از توزیع احتمال ویبول و برای ترسیم گلبادهای از نرم‌افزار W Rplot استفاده شده است. برای برآورد چگالی توان باد در ارتفاع ۲۰ و ۵۰ متری، برون‌یابی سرعت باد با استفاده از قانون توان^۱ صورت گرفت. بر اساس جدول طبقه‌بندی سایت‌های بادی 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

مقدمه

خورشیدی و بادی به دلیل عدم آلودگی محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، از بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد بهترین منبع انرژی رو به رشد در جهان و یکی از پر استفاده‌ترین جایگزین‌های انرژی می‌باشد رمضان و همکاران (۲۰۰۴). توزیع سرعت باد، یکی از ویژگی‌های باد است که 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، 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 پتانسیل سنجی انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی انجام شده است. از

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 می‌باشد 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، گرم شدن بیش از حد کره‌ی زمین و در نهایت مشکلات زیست محیطی 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

مربوط به ماه دسامبر است. هم‌چنین بیشترین انرژی پتانسیل روزانه (۵۶۶۳) 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 مربوط می‌شود. پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در این پژوهش، ارزیابی پتانسیل مربوط می‌شود. پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در این پژوهش، ارزیابی پتانسیل مربوط می‌شود. پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در این پژوهش، ارزیابی پتانسیل مربوط می‌شود.

بر پایه داده‌های جهت و سرعت سه ساعته‌ی باد ایستگاه‌های همدید کرمانشاه، انجام شد و چگالی توان باد سالانه در ترازهای ارتفاعی ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متر به دست آمد. بر اساس نتایج این پژوهش، سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور، پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی باد داشتند. 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).

منطقه مورد مطالعه

استان لرستان با مساحت ۲۸۵۵۹ کیلومتر مربع در غرب ایران، ۱/۷ درصد از کل مساحت کشور را در بر می‌گیرد.

جمله این مطالعات می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل زاهدی و همکاران (۱۳۸۳)، پتانسیل انرژی باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل آمار بادهای ساعتی و روزانه ده ساله مورد مطالعه قرار گرفت و میانگین سرعت باد ۶/۳۷ متر در ثانیه، چگالی توان باد ۳۰۲/۶۴ وات در متر مربع، ضریب تغییرات باد ۵۶/۵ درصد و ضریب ثبات باد ۴۶ درصد بدست آمد.

بررسی و تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد در استان بوشهر جهت نصب توربین باد مطهر و همکاران (۱۳۸۸)، پتانسیل سنجی تولید برق از انرژی باد در استان تهران ایستگاه لتمان، نعمت الهی و همکاران (۱۳۹۰)، در این پژوهش سرعت باد در ارتفاع‌های ۴۰ متری، ۳۰ متری و ۱۰ متری در ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. از نمودار گلباد سرعت و جهت در ارتفاع ۳۰ متری مشاهده شد که جهت غالب باد در راستای جنوب شرقی می‌باشد و نمی‌توان بیان کرد که در طول سال جهت غالب باد ثابت است. این موضوع در چیدمان توربین‌ها بسیار اهمیت دارد، زیرا ثابت بودن جهت باد مزیت عمده‌ای برای نیروگاه می‌باشد. تحلیل داده‌های بادی و تعیین پتانسیل انرژی بادی در منطقه فشافویه ایران ابوحمزه و همکاران (۱۳۹۰)، در این پژوهش از دو روش ویول یکبار از فرمول‌ها و بار دیگر از روش خطی‌سازی استفاده شد، که نتایج حاصل از این پتانسیل سنجی نشان داد 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 می‌باشد.

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 در طی دوره ۳۰ ساله (۲۰۰۷-۱۹۷۸) استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، بیشترین انرژی پتانسیل در ماه جولای ۶۳۲۷ و کمترین انرژی (۳۸۸ ژول بر متر مربع)

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور درک نمای کلی وضعیت باد، رژیم باد ۹ ایستگاه سینوپتیک استان لرستان، در دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است و پارامترهای مهمی در مطالعه وزش باد نظیر: ماکزیمم سرعت وزش باد، رژیم باد ماهانه، فصلی و سالانه و گلبادهای فصلی و سالانه بررسی شدند. در اینجا به دلیل محدود بودن صفحات به طور موردی رژیم باد ایستگاه سینوپتیک دورود مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت جداول (۲، ۳ و ۴) و گلبادهای سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان در شکل ۲ در دوره آماری ۱۵ ساله به تصویر کشیده شده است. مشخصات باد ماکزیمم روزانه، ماهانه و سالانه، رژیم باد ماهانه، فصلی و گلبادهای فصلی نیز در این مقاله استفاده نشده است.

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 و ۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. شکل شماره (۱) موقعیت استان لرستان به تفکیک شهرستان در ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت استان لرستان به تفکیک شهرستان در ایران

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش در دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲

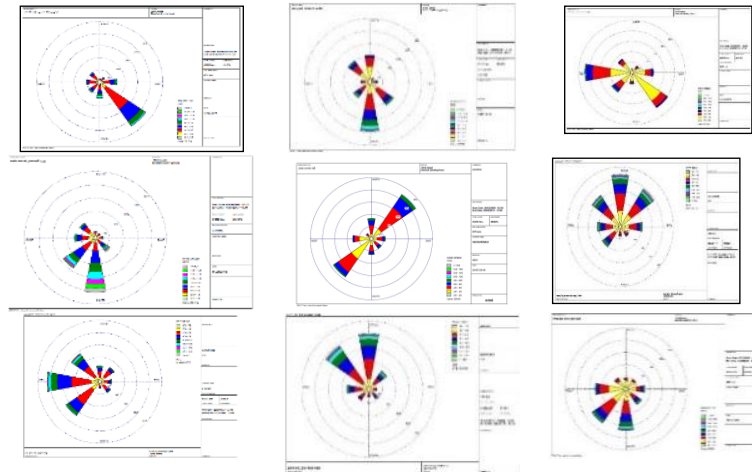
ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع	طول جغرافیایی		نوع ایستگاه
			درجه	دقیقه	
۱	خرم آباد	۱۱۴۸	۴۸	۲۸	سینوپتیک
۲	بروجرد	۱۶۲۹	۴۸	۷۵	سینوپتیک
۳	الیگودرز	۲۰۲۲	۴۹	۷۰	سینوپتیک
۴	کوهدشت	۱۱۹۷/۸۵	۴۷	۳۹	سینوپتیک
۵	پلدختر	۷۱۳/۴۵	۴۷	۴۳	سینوپتیک
۶	دورود	۱۵۲۲	۴۹	۰۰	سینوپتیک
۷	الشتر	۱۵۶۷/۱۵	۴۸	۱۵	سینوپتیک
۸	نورآباد	۱۸۵۹/۵	۴۸	۰۰	سینوپتیک
۹	ازنا	۱۸۷۱/۸۵	۴۹	۲۵	سینوپتیک

جدول ۲- مشخصات بادهای ماکزیمم روزانه، ماهانه و سالانه ایستگاه دورود طی دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۹۳

جهت غالب	فراوانی	سرعت غالب باد	ماکزیمم سرعت	میانگین سرعت باد	فراوانی باد آرام
درجه	درصد	متر بر ثانیه	متر بر ثانیه	متر بر ثانیه	درصد
جنوبی	۳۹	۶-۸	۳۱	۸/۲۵	۹/۰۹

جدول ۳- رژیم باد فصلی در ایستگاه همدیدی دورود (سرعت بر حسب متر بر ثانیه) در طول دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۹۳

سالیانه	زمستان	پاییز	تابستان	بهار	پارامتر
۳/۴۳	۴/۱۸	۳/۰۴	۲/۷۵	۳/۷۵	میانگین سرعت باد
جنوبی	جنوبی	جنوبی	جنوبی	جنوبی	جهت باد غالب
۴-۶	۴-۶	۴-۶	۴-۶	۴-۶	سرعت باد غالب
۱۴/۶	۱۹/۹	۱۴/۸	۱۳	۱۷/۸	درصد باد غالب
۵۵/۱۰	۴۸/۷۲	۵۴/۵۲	۵۲/۱۱	۴۵/۲۵	درصد هوای آرام



شکل ۲- گلباد سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک 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 یک سایت مورد نظر و تخمین انرژی خروجی از این سایت از روش‌های آماری استفاده می‌شود. تابع ویبول حالت خاصی از توزیع گاماست. 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، (K) یک پارامتر بدون بعد معروف به "عامل شکل" و (C) پارامتر به نام "عامل مقیاس" است که به واحد متر بر ثانیه محاسبه می‌شود.

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 حداقل مربعات^۴ استفاده نمود. محمدی (۱۳۹۱). یکی از رایج‌ترین

این روش‌ها، روش «بrazش 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).

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

در این رابطه A ضریب زاویه خط و B عرض تقاطع خط با محور Y هاست. 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:

$$X = \text{Ln}(V_i) \quad (3)$$

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

در رابطه مذکور، V_i میانگین 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 در این معادله، با فرانسج‌های C و K تابع ویبول به صورت زیر است جمیل (۱۳۸۰).

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

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

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

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

Eskin و همکاران (2008) 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 $\frac{1}{3}$ استفاده شده است (زاهدی و همکاران (۱۳۸۳)، شیراوند (۱۳۹۲)) و چگالی توان باد در ارتفاع ۲۰ و ۵۰ متر برآورد گردیده است.

$$= \left[\frac{z}{z_0} \frac{v(z)}{v(z_0)} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (10)$$

Z ارتفاع سرعت باد مطلوب است، v(z) سرعت باد در ارتفاع z بالای سطح زمین (سرعت باد در ارتفاع مورد نظر) است. v(z₀) سرعت مرجع یا سرعت بادی که در ارتفاع z₀ اندازه‌گیری شده (سرعت در ارتفاع ۱۰ متری) است (AI-Nassar، ۲۰۰۵).

توجه به این نکته ضروری است که توان فوق، مقدار انرژی موجود در توده‌ی هوا را از دست می‌دهد و نباید آن را 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 بر روی 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.

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

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

که در آن Γ تابع گاما، C و K پارامترهای تابع ویبول و P چگالی هواست. چگالی هوا تابعی از فشار و درجه حرارت است 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 بدست می‌آید (Elamouria، 2008).

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

همچنین محتمل‌ترین یا بیشترین احتمال وقوع سرعت باد که با علامت (V_{mp}) نشان داده می‌شود از رابطه زیر قابل محاسبه است. (Chang و همکاران (2002)).

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

برون‌یابی سرعت باد در ۲۰ و ۵۰ متر از سطح زمین

سرعت باد، بسته به شرایط جوی و زبری 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، ارتفاع منتخب برای استفاده از چرخ توربین‌های بادی مرتفع

جدول ۴- مقادیر تابع احتمال پیوسته ویبول (Pw) محاسبه

طبقات سرعت	۰/۲-۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴	۱۸-۱۶
خرم‌آباد	مقادیر ویبول	۰/۰۰۷	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۰۴۹	۷/۶۷	۵/۱
	YI	-۶/۶	-۱/۸	۰/۲	۰/۹۸	۱/۳	۱/۷	۲/۰۳	۲/۲
	XI	۰/۲۲	۱/۰۹	۱/۶	۱/۹۴	۲/۱۹	۲/۳۹	۲/۵۶	۲/۸۳
بروجرد	طبقات سرعت	۰/۲-۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰	۰	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۱	۷/۶۸	۹/۷	۱/۲۴
	YI	۰/۱	-۰/۸	۰/۲	۰/۶۸	۱/۰۱	۱/۳۴	۱/۴۹	۱/۶۸
ایگودرز	طبقات سرعت	۰/۲-۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰/۰۱۴	۰/۰۷۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۷۹	۰/۰۱۸	۰/۰۰۱	۶/۸
	YI	۰/۶۴	-۱/۴۶	۰/۰۳۳	۰/۶۹۸	۱/۰۶۹	۱/۳۶	۱/۵۸	۱/۸۳
کوه‌دشت	طبقات سرعت	۰/۲-۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۱۲	۱/۰۰۰۵	۶/۲۷
	YI	-۷/۹۴	-۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۸۰	۱/۱۲	۱/۳۹	۱/۵۸	۱/۷۸
پلدختر	طبقات سرعت	۰/۲-۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰/۰۰۰۵	۰/۰۳۶	۰/۳۹	۰/۰۳۶	۱/۹۷	۱/۰۱	۲۵۹-۲۵	۰
	YI	-۰/۲۴	۰/۶۳	۱/۱	۱/۴۶	۱/۶۸	۱/۸۲	۲/۰۰۰۱۲	۲/۲۲
دورود	طبقات سرعت	۰/۲-۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰/۰۴۴	۰/۰۷۰	۰/۰۸۱	۰/۰۷۸	۰/۰۶۷	۰/۰۵۳	۰/۰۳۹	۰/۰۲
	YI	-۸/۲۷	-۱/۳۸	-۰/۴۴	۰/۱۱	۰/۴۵	۰/۷۴	۰/۹۶	۱/۲۱
الشت	طبقات سرعت	۰/۲-۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۸	۶/۲۷
	YI	-۷/۹۴	-۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۸	۱/۱۲	۱/۳۹	۱/۵۸	۱/۷۸
نورآباد	طبقات سرعت	۰-۲/۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۴
	YI	-۸/۲۹	-۱/۲۳	-۰/۱	۰/۴۷	۰/۸۶	۱/۱۶	۱/۳۶	۱/۵۶
ازنا	طبقات سرعت	۰-۲/۵	۴-۲	۶-۴	۸-۶	۱۰-۸	۱۲-۱۰	۱۴-۱۲	۱۶-۱۴
	مقادیر ویبول	۰/۰۰۵	۰/۰۴۷	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۱۰۱	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۸	۵/۷۶
	YI	-۸/۳۸	-۱/۳۲	۰/۱۷	۰/۶۵۸	۱/۰۵۰	۱/۳۳	۱/۵۰	۱/۷۷۹
XI	۰/۰۰۰۲	۰/۲۳	۰/۶۳۸	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۹	

(۵) ارائه شده است و نشان می‌دهد که سرعت باد در هر طبقه با یک مقدار ثابت بیشتر می‌شود. با توجه به جدول (۷)، پایین‌ترین مقدار چگالی توان باد مربوط به ایستگاه خرم‌آباد و بالاترین 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 جداول (۵ و ۶) ارائه شده‌اند.

گام اول جهت 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 (۸) 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	۲/۴	۶/۵	۴/۱۸	۱۴۸	۲۰۳	۳۰۳
بروجرد	۳/۴	۴/۱۸	۵/۹۵	۲۷۵	۳۷۶	۶۸۶
الیگودرز	۴/۷	۸/۱۵	۶/۰۷	۱۹۸	۲۶۷	۳۹۸
کوه‌دشت	۲/۰۸	۷/۶۸	۲/۹۹	۲۷۹	۲۷۶	۵۵۴
پلدختر	۲/۸	۷/۹۲	۵/۹۵	۲۷۰	۳۶۹	۵۵۸
دورود	۳/۴	۱۰/۲	۳/۹۳	۵۰۳	۷۰۹	۱۱۱۹
الشتر	۲/۰۷	۷/۴۵	۲/۱۷	۱۹۶	۲۶۵	۳۹۳
نورآباد	۱/۶۴	۸/۵۸	۶/۰۳	۲۷۷	۲۷۶	۵۶۰
ازنا	۲/۵۵	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

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 گستره‌ایی از تراکم قدرت باد (وات بر مترمربع) و یا محدوده‌ای از سرعت باد (متر بر ثانیه) در یک ارتفاع مشخص بالاتر از سطح زمین می‌باشد (کامیو و همکاران ۲۰۱۰) و (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 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 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 گرفتند. بر طبق نتایج به دست آمده در جدول (۷)، ازنا، کوه‌دشت، بروجرد، پلدختر و نورآباد، برای به کارگیری اکثر توربین‌های بادی مناسب می‌باشند. اما ایستگاه خرم‌آباد طبق جدول ۷ به عنوان یک منطقه مرزی برای توسعه قدرت باد در نظر گرفته می‌شود.

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

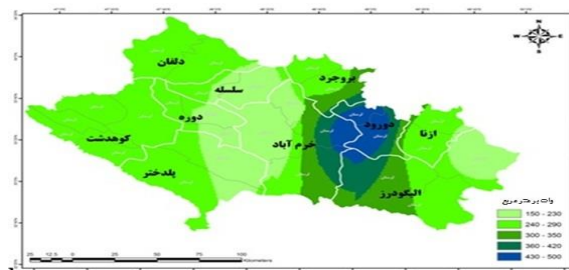
طبقه بندی قدرت باد	چگالی توان باد (w/m^2)		ایستگاه
	ارتفاع ۱۰ متر	چگالی توان باد	
۱	۱۰۰-۰		
۲	۱۵۰-۱۰۰	۱۴۸	خرم‌آباد
۳	۱۵۰-۲۰۰	۱۹۸-۱۹۶	الشتر - ازنا
۴	۲۰۰-۲۵۰	۲۴۴-۲۷۰-۲۷۷	الیگودرز
۵	۲۵۰-۳۰۰	۲۷۵-۲۷۰-۲۷۷-۲۷۹	پلدختر - بروجرد - کوه‌دشت - نورآباد
۶	۳۰۰-۴۰۰		
۷	۴۰۰-۱۰۰۰	۵۰۳	دورود
طبقه بندی قدرت باد	چگالی توان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

وجود بادهای غالب و همیشگی و نبود مانع در طول مسیر از مهمترین فاکتورها به شمار می آید. جهت باد غالب سالانه ایستگاه‌های مذکور به ترتیب جنوب شرقی، جنوب، جنوب غرب، جنوب غرب، غرب، غرب، جنوب و جنوب غرب می باشد. 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 سینوپتیک استان جهت 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.، عباسپور، ک.، توفیق، ع.، (۱۳۹۰)، تحلیل داده‌های بادی و تعیین پتانسیل انرژی بادی در منطقه فشافویه ایران، نخستین همایش ملی انرژی باد و خورشید، تهران.
- ۲- انتظاری، ع.، امیر احمدی، ا.، عرفانی، ع.، برزویی، ا.، (۱۳۹۱)، ارزیابی پتانسیل سنجی انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه نیروگاه بادی در سبزوار، 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 (بین دو مقدار کمینه و بیشینه سرعت باد (سرعت راه‌اندازی و توقف توربین با توجه به طبقه‌بندی سرعت باد استخراج می‌شود) زیادی می‌باشد. 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 کلاس‌بندی 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. در مرحله بعد ایستگاه‌های بروجرد، کوه‌دشت، پلدختر و نورآباد دارای پتانسیل متوسط برای تولید انرژی می‌باشند و ایستگاه‌های خرم‌آباد و الشتر در مرکز استان، نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارای پتانسیل انرژی کمتری هستند.



شکل ۳- نقشه پتانسیل انرژی باد سالانه استان لرستان

نتیجه‌گیری

ما در این پژوهش به بررسی وضعیت باد استان لرستان و پتانسیل انرژی حاصل از آن پرداخته‌ایم 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 سایت توربین‌های بادی

- ۱۵- Chang Tsang-Jung and et al. (2002): Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, September, vol 28.
- ۱۶- Dr. Gary, & Johnson, L, (2001), wind energy systems, December 10.
- ۱۷- Dundar, C. and Inan.D.(1997): Wind energy potential of Cesme.Turkey.Ises.Solar World congress, August 1997,Teajon.Korea.
- ۱۸- Ilinca, A., McCarthy, E., Chaumel, J.L. and Retiveau, J.L., 2003, Wind Potential Assessment of Quebec Province, *Renewable* vol. 28,pp,1881.
- ۱۹- Jewer, P., Iqbal, M.T., Khan, M.J. , 2005, Wind Energy Resource Map of Labrador, *Renewable Energy*, Vol. 30, PP. 989 -1004.
- ۲۰- Eskin, N. Artar, H. Tolun S. (2008): Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol , 839-851.
- ۲۱- 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.
- ۲۲- Elamouria, M. & Ben- Amara, F., 2008, Wind Energy Potential in Tunisia, *Renewable Energy*, Vol. 33, PP. 758-768.
- ۲۳- Eskina, N., Artar, H., Tolun, S., 2008, Wind Energy Potential of Gokceada Island in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, PP. 839-851.
- ۲۴- Chang, T., & et al. (2003).Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in taiwan, *Renewable energy* 28 (851- 871).
- ۲۵- Jamil, Majid (1994); wind power stalisties and evaluation of wind energy density. *Wind Engineering*, vol 18, No. 5.
- ۲۶- Li, M., & Li, X., 2005, Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Energy Potential for Waterloo Region, Canada, *Energy Conversion and Management*, No. 46, PP. 3014-3033.
- ۲۷- Taghavi, F., 1996, Numerical Calculation of Wind Speed for Wind Power Plant Construction of DizbadNeyshaboor, 9th Iranian Geophysical Conference, Oct. 29-31, Tehran-Iran.
- ۲۸- Zhou, W., Yang, H., Fang, ZH., 2006, Wind Power Potential and Characteristics Analysis of the Pearl River Delta Region, China, *Renewable Energy*, No. 31, PP. 739 -753.
- ۲۹- 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).
- ۴- جمیل، م.، (۱۳۸۰)، چگالی انرژی باد، مجله‌ی نیوار، شماره ۴۲ و ۴۳.
- ۵- روشن، غ.، قانقرمه، ع.، شاهکویی، ا.، (۱۳۹۳)، ارزیابی پتانسیل تولید انرژی بادی در ایستگاه‌های منتخب ایران، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال چهارم، شماره ۱۴.
- ۶- زاهدی، م.، صلاحی، ب.، جمیل، م.، (۱۳۸۳)، محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳، ۴۱-۵۵.
- ۷- شیراوند، پ.، پتانسیل سنجی انرژی باد در استان لرستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- 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، مجله‌ی تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۲، صص. ۸۷-۱۰۴.
- ۹- علمداری، پ.، نعمت الهی، ا.، میرحسینی، م.، عالم رجبی، ع.، (۱۳۹۰)، اولین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۱۰- محمدی، ح.، رستمی جلیلیان، ش.، تقوی، ف.، شمسی پور، ع.، ۱۳۹۱، پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره ۲ (پیاپی ۸۰) تابستان ۱۳۹۱؛ صص ۱۹-۳۲.
- ۱۱- مطهر، ص.، صداقت، ا.، عالم رجبی، ع.، (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., Alhajraf, S., Al-Enizi, A., Al-Awadhi, L., 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 pumoing in jordan, *wind engineering and industrial aerodynamics* 10 (1203 – 1214).
- 14- Bagiorgas, H.S. and et al. (2007): Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece. *Energy Conversion and Management*, vol 48.