

بررسی پتانسیل استفاده از توان باد در زمینه کشاورزی در استان کرمانشاه

لیلا ندرلو^{۱*}، زهرا ملکشاهی^۲

۱- عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* ایمیل نویسنده مسئول: L.naderloo@razi.ac.ir

چکیده

با توجه به ذخایر محدود انرژی فسیلی، بالارفتن بهای آن، افزایش آلودگی‌های زیست محیطی و مصرف انرژی در جهان، دیگر نمی‌توان به منابع محدود انرژی متکی بود. در این پژوهش به منظور ارزیابی انرژی باد در استان کرمانشاه، داده‌های سرعت باد در پنج ایستگاه استان کرمانشاه بررسی شد. برای برآورد داده‌ها از توزیع احتمال ویبول و برای برآورد سرعت باد در ارتفاع بالاتر از ۱۰ متری از قانون توان یک هفتم استفاده شد. همچنین مقادیر سرعت باد در ارتفاع ۲۰ و ۵۰ متری محاسبه گردید. چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری در ایستگاه‌های اسلام آباد، سرپل ذهاب، کرمانشاه، قصرشیرین و سنقر به ترتیب ۰/۱۲۴۶، ۰/۱۲۴۵، ۰/۱۲۴۰ و ۰/۱۲۳۱ بدست آمد. همچنین بیشترین مقدار چگالی توان باد در ارتفاع‌های ۲۰ و ۵۰ متری متعلق به ایستگاه‌های سنقر و سپس اسلام آباد غرب است. نتایج نشان داد که دو ایستگاه اسلام آباد و سنقر پتانسیل مناسبی برای تولید باد دارند. اما با توجه به تعداد ساعات وزش باد و همچنین درصد موجودیت باد، برای داشتن عملکرد اقتصادی ایستگاه سنقر برای نصب توربین بادی در ارتفاع بالای ۵۰ متری نسبت به سایر ایستگاه‌ها اولویت دارد.

واژه‌گان کلیدی: انرژی، چگالی توان، تابع ویبول، سرعت باد، کرمانشاه.

مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یکی از پایه‌های اصلی رشد و توسعه کشورها در آینده خواهند بود. بهره‌برداری از این منابع انرژی به دلیل ضرورت‌های زیست محیطی و تنوع بخشیدن به منابع انرژی مورد استفاده، در مقیاس‌های کوچک انجام شده و به طور روزافزون در حال گسترش است (صلاحی، ۱۳۸۳). باد به عنوان یکی از قدیمی‌ترین منابع انرژی، برای انسان مطرح بوده است. در استفاده مستقیم از باد از زمانهای قدیم تا امروز نیازی به تبدیل انرژی نبوده و مستقیماً از جریان باد استفاده می‌شود، مانند خشک کردن و تهویه. در روش تبدیل انرژی باد یا استفاده غیر مستقیم می‌توان به کاربرد هایی از قبیل قایق‌های بادی، آرد کردن غلات در آسیاب‌ها اشاره نمود (حق پرست کاشانی و همکاران، ۱۳۸۴). تابش نور خورشید در عرض‌های مختلف کره زمین موجب تغییراتی در فشار و دمای هوا شده و باد را به وجود می‌آورد. باد یکی از مظاهر انرژی خورشیدی و همان هوای متحرک است و پیوسته جزئی کوچک از تابش خورشید که از خارج به اتمسفر می‌رسد، به انرژی باد تبدیل می‌شود. تابش نامساوی خورشید در عرض‌های مختلف جغرافیایی به سطح ناهموار زمین باعث تغییر دما و فشار و سبب تولید جریان‌های همرفت (جابجایی) می‌شود که در نتیجه باد ایجاد می‌شود (عبدلی و همکاران، ۱۳۸۹). بیشترین حرکت باد را می‌توان در سطوح بالای جو پیدا کرد جایی که سرعت مداوم باد به بیش از ۱۶۰ کیلومتر در ساعت می‌رسد و سرانجام باد انرژی خود را در اثر اصطحکاک با سطح زمین جو از دست می‌دهد. انرژی باد اغلب در دسترس بوده و هیچ نوع آلودگی بر جای نمی‌گذارد و می‌تواند از نظر اقتصادی نیز در دراز مدت قابل مقایسه با سایر منابع انرژی شود. به‌وسیله توربین‌های بادی می‌توان از انرژی موجود در باد جهت تولید الکتریسیته و نیز پمپاژ آب از چاه‌ها و رودخانه‌ها و آبکشی برای مزارع و باغات، آرد کردن غلات، کوبیدن گندم، گرمایش خانه و غیره استفاده نمود. انرژی باد از مزایای بالاتری نسبت به سایر منابع انرژی برخوردار است که هم این مزایا عبارتند از: ۱) عدم نیاز توربین‌های بادی به سوخت، که در نتیجه از میزان مصرف سوخت‌های فسیلی می‌کاهد. ۲) رایگان بودن انرژی باد. ۳) توانایی تامین بخشی از تقاضای انرژی برق. ۴) کمتر بودن نسبی قیمت انرژی حاصل از باد نسبت به انرژی‌های فسیلی. ۵) کمتر بودن هزینه‌های جاری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری انرژی باد در بلندمدت. ۶) تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایداری انرژی. ۷) قدرت مانور زیاد، جهت بهره‌برداری در هر ظرفیت و اندازه (از چند وات تا چندین مگاوات). ۸) عدم نیاز به آب. ۹) عدم نیاز به زمین زیاد برای نصب (۱۰) افزایش قابلیت اطمینان در تولید انرژی برق. ۱۱) نداشتن آلودگی محیط زیست نسبت به سوخت‌های فسیلی (قهدریجانی و همکاران، ۱۳۹۲). در سالهای اخیر کوشش فراوانی برای استفاده از انرژی باد به کار رفته و تولید انرژی از باد با استفاده از تکنولوژی پیشرفته در ابعاد بزرگ لازم و ضروری جلوه کرده است. توربین بادی کالای گرانقیمتی است و استفاده اقتصادی از این کالا جهت تولید برق و ایجاد مزرعه بادی، پتانسیل سنجی اولین و اساسی‌ترین قدم محسوب می‌گردد (حق پرست و همکاران، ۱۳۸۴). برخی پژوهشگران اروپایی، آمریکایی و آسیایی (Adekoga & Adewale, 1992; Dundar & Inan, 2001; Peterson & Hennessey, 1978) پتانسیل سنجی باد را در برخی نقاط دنیا انجام داده‌اند. انجمن انرژی باد آمریکا (Awea)، کانادا (Cwea)، دانمارک، آلمان و غیره در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۳، اقدام به سنجش انرژی باد و تهیه اطلس انرژی باد در برخی مکان‌ها نموده‌اند (صلاحی، ۱۳۸۳). ایران

سرشار از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است. موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است که منبع انرژی‌های خورشیدی و بادی باشد (گندمکار، ۱۳۸۸). کرد (۱۳۷۹) پتانسیل‌های محلی و ظرفیت‌های بالقوه انرژی باد در مناطق روستایی ایران را بررسی و رژیم باد را با استفاده از آمار هواشناسی سرعت باد مورد مطالعه قرار داد. او شهرها و استان‌هایی را که از پتانسیل مناسبی از سرعت باد در ارتفاع ۱۰ و ۴۰ متری برخوردار بوده‌اند، معرفی کرده است. تحقیقاتی در مورد سرعت، زمان وزش و ضریب تداوم باد و نیز انرژی قابل دریافت از آن در روز، ماه و سال در هر منطقه برای تعیین موقعیت و محل مناسب جهت نصب توربین‌های بادی توسط جعفری (۱۳۷۸) انجام شده و سپس توربین مورد نظر با توجه به آن شرایط طراحی گردیده است. تغییرات سرعت باد شامل دو طبقه-بندی اصلی است. دسته اول تغییرات کوتاه مدت می‌باشد. سرعت باد دائماً در حال نوسان بوده و از این رو میزان انرژی باد متغیر است. این میزان تغییرات به شرایط آب و هوایی و توپوگرافی منطقه بستگی دارد. دسته دوم شامل تغییرات دوره‌ای شب و روز می‌باشد. تغییرات میزان وزش باد تا اندازه زیادی بستگی به تغییرات دما در طول شبانه روز دارد. همچنین تغییرات جهت باد در طول روز دارای اغتشاشات بیشتری نسبت به شب است (حق پرست کاشانی و همکاران، ۱۳۸۴). مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان داده‌اند که تنها در ۲۶ منطقه کشور میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن راندمان ۳۳٪، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات است. در حالیکه ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های کشور ۳۴۰۰۰ مگا وات می‌باشد (شاهیان و همکاران، ۱۳۸۴). ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار توسط انتظاری و همکاران (۱۳۹۱) صورت گرفت. پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه توسط محمدی و همکاران (۱۳۹۱) در پنج ایستگاه کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، روانسر، کنگاور و سرپل ذهاب صورت گرفت و نتایج آنها نشان داد که سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور پتانسیل مناسبی برای تولید باد دارند. در این راستا و جهت اخذ اطلاعات بیشتر در مورد پتانسیل انرژی باد در سایر شهرستان‌های استان کرمانشاه مانند نقاط مرتفع، در این تحقیق توان باد و پتانسیل آن در برخی دیگر از ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفته است و امکان استفاده از آن برای تأمین برق چاه‌های آب کشاورزی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌های میانگین ماهانه سرعت و جهت باد ایستگاه‌های همدید استان کرمانشاه در یک دوره آماری ده ساله (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳) از سازمان هواشناسی دریافت شد. تغییرات دمایی در مناطق مختلف موجب تغییرات فشار هوا و در نتیجه سبب ایجاد باد می‌گردد. تمامی محاسبات انجام شده در زمینه پتانسیل انرژی باد بر مبنای واحد متر بر ثانیه صورت پذیرفته‌اند. عرض‌های جغرافیایی استان بین ۳۳ تا ۳۵ درجه شمالی است و با توجه به قرار گرفتن کرمانشاه در کوهپایه‌های رشته کوه زاگرس، در مسیر بادهای غربی در طول دوره سرد سال و بادهای محلی در دوره گرم سال است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱). ایستگاه‌های مورد بررسی در این پژوهش عبارتند از: کرمانشاه، اسلام‌آباد، سرپل ذهاب، قصرشیرین و سنقر. در بررسی صلاحی (۱۳۸۳)، برای پردازش داده‌ها با



توزیع احتمالات، از مدل ریاضی تابع توزیع احتمال ویبول 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 (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۱). تابع ویبول حالت خاصی از توزیع گاماست که بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right) \quad (1)$$

در این رابطه K پارامتر بی بعد عامل شکل و C عامل مقیاس است که برحسب متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. یکی از روش‌های محاسبه‌ی پارامترهای مقیاس و شکل تابع ویبول، روش برازش حداقل مربعات است که با استفاده از معادله رگرسیون، رابطه خطی بین مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع آن به صورت رابطه (۲) مشخص می‌گردد:

$$Y = AX + b \quad (2)$$

که A ضریب زاویه خط و b عرض تقاطع خط با محور Y است. مقادیر رابطه خطی بین Y_i و X_i برای تعیین مقادیر A و B مرتبط با پارامترهای K و C تابع ویبول از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌گردد.

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

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

در این رابطه‌ها V_i میانگین طبقات سرعت باد و $P(V)$ درصد فراوانی تجمعی هر طبقه است. با مشخص شدن مقادیر ستون‌های X و Y ، مقادیر A و B از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند.

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

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i - \frac{A}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

پس از محاسبه‌ی تابع ویبول، می‌توان چگالی توان باد را با رابطه (۷) و (۸) محاسبه نمود.

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

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

که Γ تابع گاما، K و C پارامترهای تابع ویبول و ρ چگالی هواست. مقدار چگالی هوا در شرایط متعارف دما و فشار (فشار یک اتمسفر و دمای ۲۷۳ درجه کلوین) برابر ۱/۲۵۵ کیلوگرم بر متر مربع است. این مقدار، توان تئوری نامیده می‌شود. بیشتر توربین‌های بادی تجاری در ارتفاع ۳۰ تا ۸۰ متری نصب می‌گردد. با افزایش ارتفاع از سطح زمین و کاهش موانع و ناهمواری‌های سطحی بر مقدار سرعت و قدرت باد افزوده می‌گردد (جهانگیری و همکاران، ۱۳۸۴). یکی از مزایای انتخاب تابع ویبول برای نشان دادن توزیع سرعت باد، امکان تبدیل توزیع سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری به هر ارتفاع دیگری است. این امر با استفاده از قانونی به نام قانون یک هفتم نیرو صورت می‌گیرد (Bagiorgas et al., 2007).

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{1/7} \quad (9)$$



که در این رابطه Z پارامتر ارتفاع و ۱ و ۲ به ترتیب تراز مبنای ۱۰ متری و تراز مورد نظر می‌باشند. مقادیر توزیع ویبول داده‌های سرعت باد سالانه‌ی در ارتفاع ۲۰ متری که مناسب برای نصب چرخ توربین‌های بادی کوچک در مصارفی مانند تأمین برق چاه‌های آب زمین‌های کشاورزی می‌باشد و نیز در ارتفاع ۵۰ متری که مناسب برای نصب چرخ توربین‌های بادی مرتفع و تجاری می‌باشد، محاسبه گردید.

نتایج و بحث

پس از محاسبات لازم مقدار تابع ویبول برای هر ایستگاه بطور جداگانه در سرعت‌های مختلف بدست آمد. جدول ۱ مقادیر مشاهداتی و توزیع ویبول داده‌های سرعت باد سالانه ایستگاه‌های استان کرمانشاه در ارتفاع ۱۰ متری را نشان می‌دهد. در این جدول سرعت باد از ۱/۵ تا ۹/۵ متر بر ساعت در ۸ طبقه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقدار ویبول در تمام ایستگاه‌ها با افزایش سرعت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. زیرا فراوانی سرعت‌های باد بالا کاهش می‌یابد. اما روند این تغییرات غیر خطی بوده و در شکل ۱ می‌توان آن را مشاهده کرد.

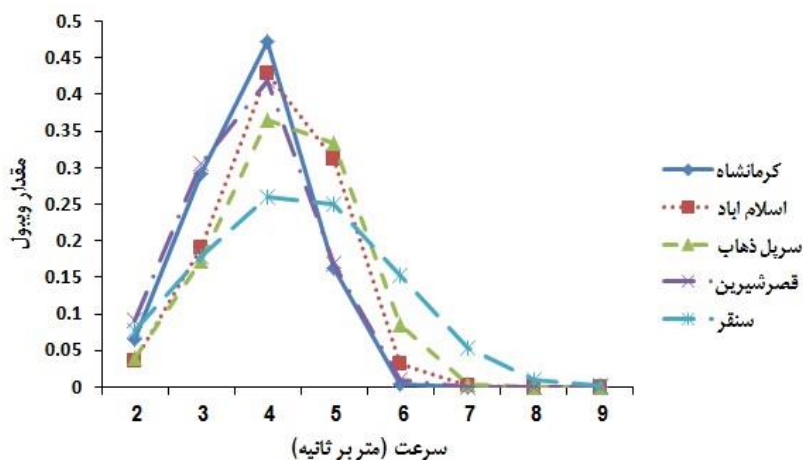
جدول ۱- مقادیر مشاهداتی و توزیع ویبول داده‌های سرعت باد سالانه در ارتفاع ۱۰ متری در دوره (۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲)

| ردیف | طبقات سرعت | میان‌ه طبقه | کرمانشاه | | اسلام آباد | | سرپل ذهاب | |
|------|------------|-------------|--------------|-------------|----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | | | فراوانی | مقدار ویبول | فراوانی | مقدار ویبول | فراوانی | مقدار ویبول |
| ۱ | ۲/۵-۱/۵ | ۲ | ۰/۰۶۵ | ۱ | ۰/۰۳۶ | ۲ | ۰/۰۳۹ | ۱ |
| ۲ | ۳/۵-۲/۵ | ۳ | ۰/۲۹۱ | ۱۵ | ۰/۱۹۰ | ۲ | ۰/۱۷۲ | ۱۸ |
| ۳ | ۴/۵-۳/۵ | ۴ | ۰/۴۷۳ | ۹۶ | ۰/۴۲۸ | ۵۷ | ۰/۳۶۹ | ۶۰ |
| ۴ | ۵/۵-۴/۵ | ۵ | ۰/۱۶۳ | ۸ | ۰/۳۱۱ | ۵۵ | ۰/۳۳۳ | ۱۳ |
| ۵ | ۶/۵-۵/۵ | ۶ | ۰۰۳۷۰ | ۰ | ۰/۰۳۲ | ۴ | ۰/۰۸۵ | ۱۵ |
| ۶ | ۷/۵-۶/۵ | ۷ | $۸/۰۸e^{-۷}$ | ۰ | ۰/۰۰۱۱ | ۰ | ۰/۰۰۳ | ۱۳ |
| ۷ | ۸/۵-۷/۵ | ۸ | $۱/۱e^{-۱۳}$ | ۰ | $۱/۶۸ e^{-۹}$ | ۰ | $۵/۱۹۵ e^{-۶}$ | ۰ |
| ۸ | ۹/۵-۸/۵ | ۹ | $۱/۹e^{-۳۵}$ | ۰ | $۴/۹۵ e^{-۱۸}$ | ۰ | $۸/۲۰۹ e^{-۱۱}$ | ۰ |

ادامه جدول ۱- مقادیر مشاهداتی و توزیع ویبول داده‌های سرعت باد سالانه در ارتفاع ۱۰ متری در دوره (۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲)

| ردیف | طبقات سرعت | میان‌ه طبقات | قصر شیرین | | سنقر | |
|------|------------|--------------|----------------|---------|-------------|---------|
| | | | مقدار ویبول | فراوانی | مقدار ویبول | فراوانی |
| ۱ | ۲/۵-۱/۵ | ۲ | ۰/۰۹۰ | ۲ | ۰/۰۷۷ | ۵ |
| ۲ | ۳/۵-۲/۵ | ۳ | ۰/۳۰۵ | ۲۳ | ۰/۱۷۸ | ۲۹ |
| ۳ | ۴/۵-۳/۵ | ۴ | ۰/۴۱۸ | ۸۷ | ۰/۲۶۱ | ۱۴ |
| ۴ | ۵/۵-۴/۵ | ۵ | ۰/۱۶۸ | ۷ | ۰/۲۵۱ | ۱۳ |
| ۵ | ۶/۵-۵/۵ | ۶ | ۰/۰۱۰۲ | ۱ | ۰/۱۵۲ | ۳۱ |
| ۶ | ۷/۵-۶/۵ | ۷ | $۳/۵۳ e^{-۵}$ | ۰ | ۰/۰۵۴ | ۱۹ |
| ۷ | ۸/۵-۷/۵ | ۸ | $۱/۸۹ e^{-۹}$ | ۰ | ۰/۰۱۰۳ | ۸ |
| ۸ | ۹/۵-۸/۵ | ۹ | $۳/۰۸ e^{-۱۶}$ | ۰ | ۰/۰۰۰۹ | ۱ |

شکل ۱ مقایسه برازش توزیع ویبول بر داده‌های مشاهداتی سرعت باد سالانه ایستگاه‌های استان کرمانشاه را در ارتفاع ۱۰ متری نشان می‌دهد. این شکل چگونگی توزیع مقادیر ویبول را در محدوده‌های مختلف سرعت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد ایستگاه کرمانشاه بیشترین مقدار توزیع ویبول را در محدوده سرعت ۴، اسلام آباد در سرعت ۴ تا ۵، سرپل ذهاب در سرعت ۴ تا ۵، قصر شیرین در سرعت ۳ تا ۴ و سنقر در سرعت ۳ تا ۶ متر بر ثانیه دارند. با توجه به اینکه مقدار ویبول متناسب با فراوانی سرعت هاست و هر چه توزیع فراوانی باد در سرعت‌های بالاتر قرار گیرد، مقدار انرژی بدست آمده از باد بیشتر خواهد شد.



شکل ۱- مقایسه برازش توزیع ویبول در برخی ایستگاه‌های استان کرمانشاه



جدول ۲ مقادیر توزیع ویبول داده‌های سرعت باد سالانه در ارتفاع ۲۰ متری را در شهرستان‌های مورد بررسی استان کرمانشاه نشان می‌دهد که در آن مقادیر سرعت باد در ارتفاع ۲۰ متری از رابطه (۹) بدست آمده است. در نهایت میانگین چگالی توان باد سالانه در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متری برای ایستگاه‌های مختلف از روی رابط (۸) در جدول ۳ محاسبه شده است.

جدول ۲- مقادیر توزیع ویبول داده‌های سرعت باد سالانه در ارتفاع ۲۰ متری

| ردیف | طبقات سرعت | میان‌ه طبقات | کرمانشاه مقدار ویبول | اسلام آباد مقدار ویبول | سرپل ذهاب مقدار ویبول | قصرشیرین مقدار ویبول | سنقر مقدار ویبول |
|------|------------|-----------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| ۱ | ۲/۷۶-۱/۶۶ | ۲/۲۱ | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۸۲ | ۰/۰۷۰ |
| ۲ | ۳/۸۶-۲/۷۶ | ۳/۳۱ | ۰/۲۶۴ | ۰/۱۷۲ | ۰/۱۵۶ | ۰/۲۷۶ | ۰/۱۶۲ |
| ۳ | ۴/۹۷-۳/۸۶ | ۴/۴۲ | ۰/۴۲۸ | ۰/۳۸۸ | ۰/۳۳۰ | ۰/۳۷۹ | ۰/۲۳۶ |
| ۴ | ۵/۴۹-۴/۹۷ | ۵/۵۲ | ۰/۱۴۸ | ۰/۲۸۲ | ۰/۳۰۱ | ۰/۱۵۲ | ۰/۲۲۷ |
| ۵ | ۷/۱۷-۵/۴۹ | ۶/۶۳ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۰۹۲ | ۰/۱۳۸ |
| ۶ | ۸/۲۸-۷/۱۷ | ۷/۷۳ | $۷/۲۶e^{-۷}$ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۰۹۹ | ۰/۰۴۹ |
| ۷ | ۹/۳۹-۸/۲۸ | ۸/۸۳ | $۹/۵۱۶e^{-۱۴}$ | $۱/۵۰۶e^{-۹}$ | $۴/۶۷۳e^{-۶}$ | $۱/۶۹۶e^{-۹}$ | ۰/۰۰۹۳ |
| ۸ | ۱۰/۴۹-۹/۳۹ | ۹/۹۴ | $۱/۶۷۸e^{-۲۵}$ | $۴/۳۸۱e^{-۱۸}$ | $۱/۰۵۹e^{-۱۰}$ | $۲/۷۴۲e^{-۱۶}$ | ۰/۰۰۰۸ |

جدول ۳- میانگین چگالی توان باد سالانه در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متری برای ایستگاه‌های مختلف

| ایستگاه | ارتفاع ۱۰ متری | ارتفاع ۲۰ متری | ارتفاع ۵۰ متری |
|------------|----------------|----------------|----------------|
| کرمانشاه | ۳۶/۶۷۵ | ۴۹/۳۶۱ | ۷۳/۱۰۲ |
| اسلام آباد | ۴۲/۲۴۲ | ۶۴/۹۲۹ | ۹۶/۱۵۸ |
| سرپل ذهاب | ۵۴/۶۸۵ | ۷۳/۶۰۷ | ۱۰۹/۰۰۰۴ |
| قصر شیرین | ۳۶/۱۲۸ | ۴۸/۶۲۵ | ۷۲/۰۱۲ |
| سنقر | ۶۸/۰۰۳۶ | ۹۱/۵۲۶ | ۱۳۵/۵۴۷ |

بر اساس این جدول می‌توان گفت در ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متری ایستگاه سنقر، بیشترین و ایستگاه قصر شیرین کمترین مقدار چگالی توان باد را داراست. نتایج تحقیقات محمدی و همکاران (۱۳۹۱) نشان داد که سه ایستگاه روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور پتانسل مناسبی برای تولید انرژی باد دارند. همچنین در صورت استفاده از توربین‌های بادی مرتفع منطقه اسلام آباد غرب برای بهره‌برداری از انرژی باد مناسب است، اما ایستگاه کرمانشاه برای استفاده از انرژی باد پتانسیل مناسبی ندارد. نتایج تحقیق آنها با نتایج این تحقیق تقریباً هماهنگی دارد. ضمن اینکه در تحقیق حاضر دو ایستگاه سنقر و قصر شیرین نیز بررسی شده است. نتایج تحقیق حاضر با توجه به تعداد ساعات وزش باد و همچنین درصد موجودیت باد لازم حاکی از آن است که دو ایستگاه سنقر و اسلام آباد پتانسیل مناسبتری برای تولید باد دارند و ایستگاه‌های کرمانشاه و قصر شیرین چنین پتانسیلی ندارند. برای آبیاری زمین‌هایی که آب به آنها نمی‌رسد، می‌توان تلمبه‌ای را که بادی است در چاه گذاشته و با استفاده از این تلمبه زمین‌های کشاورزی را آبیاری کرد.

نتیجه گیری

توزیع مقادیر ویبول در محدوده‌های مختلف سرعت نشان داد که ایستگاه کرمانشاه بیشترین مقدار توزیع ویبول را در محدوده سرعت ۴، اسلام آباد و سرپل ذهاب در سرعت ۴ تا ۵، قصر شیرین در سرعت ۳ تا ۴ و سنقر در سرعت ۳ تا ۶ متر بر ثانیه دارند. مقدار سرعت و قدرت باد با افزایش ارتفاع از سطح زمین و کاهش ناهمواری‌ها، افزایش می‌یابد. با توجه به مقادیر چگالی توان باد در ارتفاع ۲۰ متری، اولویت نصب توربین‌های بادی کوچک جهت تأمین برق چاه‌های آب زمین‌های کشاورزی به ترتیب ایستگاه‌های سنقر، سرپل ذهاب، اسلام آباد، کرمانشاه و قصر شیرین می‌باشد. چگالی باد در ارتفاع ۵۰ نسبت به ۲۰ متری افزایش یافته است و ترتیب آن نیز به همان ترتیب ارتفاع ۲۰ متری می‌باشد. توربین‌های بادی تجاری در ارتفاع ۳۰ تا ۸۰ متری نصب می‌گردد اما با توجه به تعداد ساعات وزش باد و همچنین درصد موجودیت باد، برای داشتن عملکرد اقتصادی ایستگاه سنقر برای نصب توربین بادی در ارتفاع بالای ۵۰ متری نسبت به سایر ایستگاه‌ها اولویت دارد.

منابع:

- انتظاری، ع.، ا. امیراحمدی، ع. عرفانی، و ا. برزویی. ۱۳۹۱. ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۳ (۹ و ۱۰): ۳۳-۴۶.
- امیدوار، ک.، و م. دهقان طرزجانی. ۱۳۹۱. پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۷ (۲): ۱۶۸-۱۴۹.
- جعفری، ع. ۱۳۸۷. طراحی، ساخت و آزمایش توربین بادی مولد الکتریسیته. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، گروه مکانیک.

جهانگیری، ز، ف. رحیم زاده، و غ. کمالی. ۱۳۸۴. محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع دو پارامتری ویبول. فصل نامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۷۵: ۱۵۱-۱۷۰.

حق پرست کاشانی، ا.، ف. کعبی نژادیان، ن. فغفوری، و ح.ر. لاری. ۱۳۸۴. تحلیل پتانسیل انرژی باد در شمال غرب ایران. بیستمین کنفرانس بین المللی شرکت برق، ۲۳-۲۵ آبان، تهران.

شاهیان، ر.، ر. مستمند، م. حقیقت، ع.ح. بهمنی، ه. محمدی، م. خسروی، و ح.ر. فولادوند. ۱۳۸۴. بررسی نقاط بادخیز و محاسبه انرژی باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول جهت استفاده از انرژی‌های پاک در استان فارس. وزارت راه و شهرسازی، سازمان هواشناسی کشور.

صلاحی، ب. ۱۳۸۳. پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه سینوپتیک استان اردبیل. مجله تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۹(۱): ۸۷-۱۰۴.

عبدلی، ح.، ا.ش. حسنعلیزاده، و م. اصلاحی. ۱۳۸۹. بررسی سینوپتیکی و آماری جهت باد غالب در استان آذربایجان شرقی. سومین همایش ملی جغرافیا و رویکرد علمی به توسعه پایدار، ۱۹-۲۰ آبان، پیرانشهر.

قهدریجانی، م.، م. الماسی، م. امامی، و ه. تاج‌الدین خوزانی. ۱۳۹۲. بررسی امکان به کارگیری انرژی باد جهت استفاده بهینه در روستاها (مصارف خانگی و کشاورزی). هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم و مکانیزاسیون)، دانشگاه فردوسی مشهد. ۹-۱۱ بهمن.

کرد، ب. ۱۳۷۹. نقش انرژی‌های نو در تامین انرژی روستایی در ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

گندمکار، ا. ۱۳۸۸. ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران. مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۰، دوره ۳۶(۴): ۸۵-۱۰۰. محمدی، ح.، ش. رستمی جلیلیان، ف. تقوی، و ع.ا. شمسی پور. ۱۳۹۱. پتانسیل سنجی باد در استان کرمانشاه. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، دوره ۲(۸۰): ۱۹-۳۲.

Adekoya, L.O., and A.A. Adewale. 1992. Wind energy potential of Nigeria. *Renewable Energy* 2(1): 35-39.

Bagiorgas, H., M. Assimakopoulos, D. Theoharopoulos, and G. Mihalakakou. 2007. Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of western Greece, *Energy conversion management* 48(5): 1640-1655.

Dundar, C., and D. Inan. 1997. Wind energy potential of cesme, Turkey. In: *ISES 1997 Solar World Congress*, Taejon, Korea.

Peterson, E.W. & Hennessey, J.P. 1978. On the use of power laws for estimates of power potential. *J. Appl. Meteorology* 17(3): 390-394.