نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی سال سیزدهم، شماره ۲۹، تابستان ۹۲

ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان

دریافت مقاله:۹۱/۱۰/۲۳ پذیرش نهایی: ۹۱/۱۲/۲۱
صفحات: ۱۵۷-۱۳۷

فیروز مجرد: استادیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای دانشگاه رازی کرمانشاه[1]
Email: f_mojarrad@yahoo.com
شهرام همتی: دانش آموختهٔ کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای دانشگاه رازی کرمانشاه
Email: hematigeo@yahoo.com

چکیده

در سالهای اخیر استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر از جمله انرژی باد به‌دلیل محدودیت‌ها و مشکلات بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی به یکی از استراتژی‌های مهم کشورها تبدیل شده است. در این پژوهش قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان با هدف شناسایی مناسب‌ترین نواحی برای استقرار توربین‌های بادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل‌ها بر مبنای داده‌های باد با فواصل زمانی۳ ساعته در ۱۱ ایستگاه سینوپتیک منطقه در دورهٔ آماری هر ایستگاه انجام شد. با توجه به اینکه حداقل سرعت لازم برای راه‌اندازی یک توربین بادی کوچک، ۳ الی ۴ متر بر ثانیه و توربین‌های تجاری به‌صورت مزرعهٔ بادی ۶ متر بر ثانیه است، مجموع ساعات با سرعت کمتر از m/s ۳، به‌عنوان ساعات سکون و با سرعت برابر یا بیشتر از آن، به‌عنوان ساعات تداوم در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روش‌های موجود، بر اساس سرعت باد ثبت‌شده در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین سرعت‌های باد تا ارتفاع ۱۰۰ متری برآورد گردید. با توجه به جداول، نمودارها و نقشه‌های مختلف تداوم-سرعت، میانگین سرعت و چگالی قدرت باد، ایستگاه بیجار از ارتفاع تقریبی۵۰ متری (ارتفاع معمول دکل یک توربین بادی) و ایستگاه زرینهٔ اوباتو، از ارتفاع ۱۰۰ متری به-بعد برای نصب توربین‌های تجاری به‌صورت مزرعهٔ بادی مناسب تشخیص داده شدند. سایر ایستگاه‌ها به‌جز مریوان و سرپل‌ذهاب در ارتفاعات متفاوت از سطح زمین، قابلیت بهره‌برداری از برق بادی در مقیاس محدود برای مصارفی همچون شارژ باتری، پمپ‌های بادی آبکش و تأمین برق برای مصارف خانگی را دارا هستند.

کلید واژگان: پتانسیل، سرعت باد، چگالی قدرت باد، توربین بادی، غرب ایران

---

[1]. **نویسنده مسؤول**: کرمانشاه، باغ ابریشم، دانشگاه رازی، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و توسعهٔ صنایع و به تبع آن افزایش نیاز به انرژی از یک سو و محدودیت منابع فسیلی و افزایش آلودگی محیط زیست ناشی از سوزاندن این منابع از سوی دیگر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را روز به روز با اهمیت‌تر و گسترده‌تر نموده است. انرژی باد یکی از انواع اصلی انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر است که در شرایط کنونی با توجه به مسایل و مشکلات منابع فسیلی، پرداختن به آن امری حیاتی و ضروری به نظر می‌رسد. "گرچه روی-آوردن به انرژی‌های نو، مستلزم صرف هزینه‌های کلانی است که برای کشورهای در حال توسعه بسیار گران تمام می‌شود، اما به هر حال شکی نیست که در امر توسعه، دیگر نمی‌توان به سیستم‌های موجود انرژی متکی بود" (ثقفی، ۱۳۷۲: ۲-۵). در کشور ما قابلیت‌ها و پتانسیل-های مناسبی برای نصب و راه‌اندازی توربین‌های برق بادی وجود دارد که با توجه به توجیه-پذیری آن و تحقیقات و سرمایه‌گذاری که در این زمینه صورت گرفته است توسعه و کاربرد این تکنولوژی چشم‌انداز روشنی را فراروی سیاست‌گزاران بخش انرژی کشور قرار داده است (سانا[۱]، ۱۳۸۹: ۳). مطالعات و محاسبات انجام‌شده در زمینهٔ تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان داده است که در ۲۶ منطقه از کشور (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۳ درصد، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات می‌باشد و این در شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های برق کشور در حال حاضر ۵۵۰۰۰ مگاوات می‌باشد (سانا، ۱۳۸۸: ۳۵-۳۷). بیشترین سایت‌های نصب توربین‌ها در ایران مربوط به دو استان گیلان و خراسان رضوی است و مطالعات برای بهره‌برداری در استان قزوین در حال انجام است. در حال حاضر چهار مزرعهٔ انرژی بادی در کشور به نامهای منجیل (استان گیلان)، بینالود و دیزآباد (استان خراسان رضوی) و سهند (استان آذربایجان‌شرقی) وجود دارد (باقری مقدم و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۲۰۳) که همهٔ آنها مانند منطقهٔ غرب کشور در ناحیهٔ کوهستانی قرار دارند. این تعداد نیروگاه با توجه به قابلیت‌های مناسب کشور کافی نیست و نیاز به توسعهٔ این سایت‌ها در سایر نقاط کشور بیش از پیش احساس می‌شود. بر این پایه، هدف تحقیق حاضر بررسی قابلیت‌های انرژی باد و شناسایی نقاط مستعد برای نصب توربین‌های بادی در دو استان کرمانشاه و کردستان است. طبیعی است که نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در بررسی‌های بعدی و مطالعات تکمیلی امکان‌سنجی کسب انرژی برق از نیروی باد، مورد توجه قرار گیرد.

---

[۱]- سازمان انرژی‌های نو ایران

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

پیشینه تحقیق

تاکنون پژوهش‌هایی بر روی امکان استفاده از انرژی باد در مناطق مختلف انجام یافته که بسیاری از آنها به نتایج ارزشمند و قابل اعتمادی دست یافته‌اند. در مطالعه‌ای در استان اردبیل با استفاده از آمار ۶ الی ۱۲ سالۀ چهار ایستگاه سینوپتیک، ویژگی‌های باد به منظور کسب انرژی، تحلیل و با محاسبۀ چگالی توان باد و تعداد ساعات با سرعت بیش از ۴ متر در ثانیه، ایستگاه اردبیل مکان مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی باد معرفی گردید (صلاحی، ۱۳۸۳: ۸۷). همچنین در مطالعۀ دیگری در حوضۀ ارس جنوبی، ایستگاه اردبیل برای بهره‌برداری از انرژی باد نسبت به سایر ایستگاه‌ها مناسب‌تر تشخیص داده شد (امانی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲). در استان آذربایجان‌شرقی با در نظر گرفتن آستانۀ سرعت ۵ متر در ثانیه و مقادیر چگالی توان باد، ایستگاه‌های سهند و جلفا به عنوان مناسب‌ترین ایستگاه‌ها برای احداث پارک‌های بادی تعیین شدند (عبدلی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۸). در مطالعه‌ای گسترده‌تر، ایستگاه‌های ایران بر اساس مقادیر میانگین سرعت باد از لحاظ بهره‌برداری از انرژی برق بادی ارزیابی و طبقه‌بندی شدند (گندمکار، ۱۳۸۸: ۹۷). علاوه بر سرعت، چگالی و تداوم باد، معیارهای دیگری نیز در مطالعات دخیل بوده است. به عنوان مثال در تحقیقی در استان‌های لرستان، همدان و مرکزی، با استفاده از معیارهای مختلف فنی، زیست‌محیطی، اقتصادی و جغرافیایی، قابلیت استفاده از انرژی باد برای تولید برق، بررسی و توان تولید برق منطقه قریب به ۱۹۰۰ مگاوات برآورد گردید (نوراللهی وهمکاران، ۱۳۹۰: ۲). به کارگیری توزیع های احتمال در برخی دیگر از مطالعات مد نظر بوده است. از جمله در استان کرمانشاه با استفاده از توزیع احتمال ویبول و نیز محاسبۀ چگالی توان باد سالانه در ترازهای ارتفاعی ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متری، سه ایستگاه روانسر، سرپل‌ذهاب و کنگاور دارای پتانسیل مناسب برای تولید انرژی باد تشخیص داده شدند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۹). به‌منظور تعیین مناطق با پتانسیل بالا و شناسایی نواحی مستعد جهت احداث نیروگاه‌های بادی در ایران، از سوی سازمان انرژی‌های نو ایران پروژه‌ای با عنوان پتانسیل‌سنجی و تهیۀ اطلس باد کشور تعریف شده که در حال حاضر نسخۀ اولیۀ این اطلس تهیه گردیده است (سانا، ۱۳۸۸: ۳۷). در خارج از کشور نیز در جزیرۀ مدیرا[1] واقع در اقیانوس اطلس (پالما و همکاران[2]، ۲۰۰۸ :۲۳۰۸) و در نروژ (رشید و همکاران[3]، ۲۰۱۲: ۱۴۵۸) از طیف وسیعی از مدل‌های ریاضی خطی و غیرخطی و مدل‌های عددی برای مکان‌یابی نصب

[1] -Madeira
[2] -Palma et al.
[3] -Rasheed et al.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

توربین‌های بادی استفاده شده است. در کشور چین، از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاری بر مبنای AHP (لی و همکاران[1]، ۲۰۰۹: ۱۲۲) و شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک (لی و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۰۲) برای مکان‌یابی استقرار توربین‌ها و مزارع بادی بهره گرفته شده است. برای امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد به‌منظور استقرار توربین‌های بادی در استان یزد از آمار ماهانه و سالانهٔ ۱۳ سالهٔ سرعت باد در ۱۱ ایستگاه در سه ارتفاع ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری استفاده شد (مصطفایی‌پور، ۲۰۱۰: ۹۳). نتیجهٔ این مطالعه نشان داد که اغلب ایستگاه‌های منطقه دارای سرعت باد کمتر از ۴/۵ متر بر ثانیه می‌باشند که سرعت مناسبی برای استقرار توربین‌های بادی نیست و تنها شهر هرات با سرعت باد ۵/۰۵ و ۶/۸۶ متر بر ثانیه به‌ترتیب در ارتفاعات ۱۰ و ۴۰ متری گزینهٔ مناسبی برای این کار به شمار می‌آید. همچنین چند ایستگاه دیگر با سرعت‌های باد کمتر از ۴ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری، برای استقرار توربین‌های کوچک‌تر مناسب تشخیص داده شدند.

در مطالعه‌ای دیگر، روشی جامع برای مکان‌یابی مزارع بادی در ۲۵ شهر ایران مشتمل بر ۵ ناحیه برای هر شهر از طریق تحلیل داده‌های پوششی رتبه‌ای[2] ارائه گردید و به‌منظور اعتبارسنجی روش بکار گرفته شده، از دو روش چندمتغیره به نامهای تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تاکسونومی عددی بر اساس داده‌های مشاهده شدهٔ مزارع بادی استفاده شد (آزاده و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۶۲۱). در الجزایر از طریق تهیهٔ نقشه‌های باد، منطقهٔ ادرر[3] با سرعت باد تقریبی ۹ متر بر ثانیه در ارتفاع ۸۰ متری بهترین ناحیه برای استقرار مزارع بادی تعیین گردید (جامای و مرزوق[4]، ۲۰۱۱: ۱۳۶). با استفاده از توزیع ویبول و آمار میانگین ماهانه و سالانهٔ سرعت باد در یک دورهٔ سه‌ساله در دو ایستگاه کشور مالزی، قابلیت انرژی باد مورد مطالعه قرار گرفت (اسلام و همکاران، ۲۰۱۱: ۹۸۵). نتیجهٔ این مطالعه در مقیاس بزرگ، حکایت از نامناسب بودن دو ایستگاه یادشده با میانگین سرعت باد سالانهٔ بین ۲/۶۷ تا ۳/۸۱ متر در ثانیه برای تولید انرژی باد داشت؛ لیکن در مقیاس کوچک، نشان‌دهندهٔ امکان تولید انرژی توسط توربین‌های بادی در ارتفاع ۱۰۰ متری بود. همچنین در شهر گلف[5] ایالت انتاریوی کانادا برای ارزیابی قابلیت استقرار توربین‌های بادی، از داده‌های سرعت باد با استفاده از روش‌های مختلف آماری

[1] -Lee et al.
[2] -Hierarchical Data Envelopment Analysis
[3] -Adrar
[4] -Djamai and Merzouk
[5] -Guelph

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

(روش حداکثر درست‌نمایی اصلاح‌شده[1]، توزیع ویبول و رگرسیون مکعبی) بهره گرفته شد (مک اینتایر و همکاران[2]، ۲۰۱۱: ۱۴۳۷). جمع‌بندی مطالب ارائه شده در بخش پیشینهٔ تحقیق نشان می‌دهد که در اغلب مطالعات انجام شده، برای ارزیابی قابلیت باد به منظور استقرار توربین‌های بادی، از تداوم سرعت باد در آستانه‌ای مشخص در ارتفاعات متفاوت از سطح زمین بهره گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ مورد مطالعه در این تحقیق، دو استان کرمانشاه و کردستان را در غرب کشور با مساحتی بالغ بر ۵۴۱۳۵ کیلومتر مربع (در حدود ۳/۲۸ درصد از مساحت کشور) شامل می‌شود. این منطقه بین طول‌های جغرافیایی′۲۴ °۴۵ الی ′۱۶ °۴۸ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′۴۲ °۳۳ الی ′۳۰ °۳۶ شمالی واقع شده و از شمال به استان آذربایجان‌غربی، از جنوب به استان های لرستان و ایلام، از شرق به استان های همدان و زنجان و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود (شکل۱).

شکل (۱) موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه (استان‌های کرمانشاه و کردستان) در کشور

آب‌وهوای منطقه تحت تأثیر عوامل متعددی است. از یک سو رشته‌کوه زاگرس که با دشت‌های نسبتاً وسیع و کوه‌های تقریباً پرحجم خود به‌صورت چین‌خوردگی‌های منظم از شمالغرب به جنوبشرق کشیده شده است، منطقهٔ غرب ایران را از قلمرو مرکزی آن جدا می‌کند و از سوی

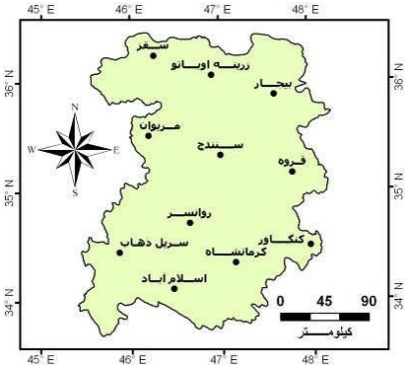
[1] -Modified Maximum Likelihood Method
[2] -McIntyre et al.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

دیگر، قرارگرفتن در معرض وزش بادهای مرطوب غربی و جابجاشدن توده‌هواهای گرم و مرطوب سودانی و نیز شرایط پیچیدهٔ ناهمواری (تغییرات ارتفاعی)، موجب گوناگونی آب‌وهوا در منطقه شده است. "در دورهٔ سرد سال، به‌دنبال پسروی رودباد جنب حاره‌ای به‌طرف جنوب، عوامل آب‌وهوایی برون‌حاره مانند بادهای غربی و سیکلون‌ها به ایران وارد می‌شود و جو باروکلینیک و هوای منقلب ایجاد می‌کند. اما در دورهٔ گرم سال عوامل آب‌وهوایی حاره بر ایران مستولی می‌شود و شرایط جو باروتروپیک و هوای پایدار به‌وجود می‌آید. پرفشار جنب‌حاره‌ای آزور پدیدهٔ غالب دورهٔ گرم ایران است و تمام ایران را در جنوب کوههای البرز تحت استیلای خود در می‌آورد. به دلیل نزول دائمی هوا، هیچ نوع حرکت صعودی انجام نمی‌گیرد" (علیجانی، ۱۳۸۷: ۲۸-۳۰). به همین دلیل در فصل زمستان، الگوی بادهای ایران، متجانس‌تر از تابستان است (علیجانی، ۱۳۸۷: ۹۵).

داده ها و ایستگاه‌های مورد استفاده

با توجه به اینکه توربین‌های بادی باید در مکانی نصب شود که باد به اندازهٔ کافی در اکثر فصول سال وجود داشته باشد (ثقفی، ۱۳۷۲: ۲۴)، لذا به جای استفاده از آمار ماهانه و حتی روزانهٔ باد، از آمار ۳ ساعتهٔ باد ۱۱ ایستگاه منطقه که از ادارات تحقیقات هواشناسی کاربردی استان‌های کرمانشاه و کردستان اخذ گردیده بود، استفاده شد (شکل۲). از آنجا که باد یک متغیر برداری است و جهت و سرعت آن تحت تأثیر عوامل مختلف محلی و جوی است، بازسازی داده‌های آن غیرممکن و یا با خطای زیادی توأم است (صلاحی، ۱۳۸۳: ۸۹)؛ لذا به-دلیل آنکه دورهٔ آماری باد در همهٔ ایستگاه‌های این دو استان مشابه نبود، محدودهٔ سال‌های موجود در هر ایستگاه مد نظر قرار گرفت. این محدوده در ایستگاههای مختلف از ۱۴ تا ۴۰ سال در حد فاصل سالهای ۱۹۵۹ الی ۲۰۰۳ متغیر بود.



شکل(۲) موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقهٔ مورد مطالعه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

فراوانی و تداوم ساعتی وزش باد

فراوانی داده‌های سه ساعتهٔ باد، به بقیهٔ ساعات تعمیم یافته و بر آن اساس ارقام میانگین تداوم ساعتی وزش باد ماهانه و سالانه در رده‌های مختلف سرعت محاسبه گردید. بدیهی است که مجموع ساعات تداوم باد در رده‌های مختلف سرعت در هر سال و نیز به طور میانگین در دورهٔ آماری، معادل ۸۷۶۰ =۲۴ × ۳۶۵ ساعت خواهد بود. منحنی‌ها و هیستوگرام‌های توزیع فراوانی سرعت باد که بدین‌ترتیب رسم می‌شوند مربوط به ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین هستند.

تداوم و سکون باد درآستانه های سرعت مورد نیاز برای تولید نیروی الکتریکی

آستانهٔ لازم سرعت باد برای تولید نیروی الکتریکی، بسته به نوع توربین، فناوری ساخت و کاربرد آن متفاوت است. به طور کلی توربین‌ها را با توجه به سرعت متوسط سالانهٔ باد می‌توان به دو شکل توربین‌های منفرد و مزرعهٔ بادی احداث نمود. امروزه بهره‌گیری از انرژی بادی به شکل مزرعهٔ بادی مطلوبیت بیشتری دارد و در صورت عدم وجود مناطق مناسب برای استقرار مزرعهٔ بادی، امکان بهره‌گیری از توربین‌های منفرد مد نظر قرار می‌گیرد. شروع تولید الکتریسیته توسط توربین‌های کوچکِ غیرمتصل به شبکه، در منابع مختلف بین ۳ الی ۴ متر بر ثانیه عنوان گردیده است. "بادی که بتواند توربین را به حرکت درآورد، نباید کمتر از ۳ متر بر ثانیه سرعت داشته باشد" (کاویانی، ۱۳۷۴: ۱۲۹). عموماً ژنراتورهای بادی در جاهایی که میانگین سرعت باد ۵ الی ۲۵ متر بر ثانیه است، قابلیت استقرار دارند (سانا، ۱۳۸۸: ۳۵). در پژوهش حاضر با توجه به تنوع امکان بهره‌گیری از انرژی باد در اَشکال الکتریکی (و حتی مکانیکی)، سرعت آستانه‌ای لازم باد برای راه‌اندازی یک توربین بادی، معادل ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد که در واقع آستانهٔ لازم برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک غیرمتصل به شبکه سراسری برق است. تعداد ساعات وزش باد با سرعت معادل یا بیشتر از این آستانه به‌عنوان ساعات تداوم سرعت، و تعداد ساعات کمتر از این آستانه به‌عنوان ساعات تداوم سکون برای دستگاه مبدل بادی منظور شد.

روند تغییر سرعت متوسط سالانهٔ باد ایستگاه‌ها با افزایش ارتفاع

سرعت باد با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد. روند این افزایش بسته به زبری سطح زمین متفاوت است؛ به طوری که این روند بر روی سطوح زبر، بیشتر و بر روی سطوح صاف، کمتر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

است. برای محاسبهٔ سرعت باد در ارتفاعات بالاتر از ۱۰ متری سطح زمین از روابط زیر استفاده می‌شود (گیپه[1]، ۲۰۰۴: ۴۱):

$$V/V_0 = (H/H_0)^{\alpha} \quad (۱)$$

$$V = (H/H_0)^{\alpha} V_0 \quad (۲)$$

که در آن V سرعت باد در ارتفاع جدید بر حسب متر بر ثانیه، H ارتفاع جدید (از سطح زمین) بر حسب متر، H_0 ارتفاع اصلی (از سطح زمین) بر حسب متر، α عامل معرف سرعت باد[2] و V_0 سرعت باد در ارتفاع اصلی بر حسب متر بر ثانیه است. مقدار α با توجه به پوشش سطح زمین با استفاده از جداول مخصوص تعیین می‌شود. با توجه به موقعیت حومه‌ای ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه، مقدارα معادل وضعیت حومهٔ شهری (۰/۳۱) در نظر گرفته شد.

در منابع علمی ارقام متفاوتی برای ارتفاع دکل توربین‌های بادی ذکر شده است. معمولاً ارتفاع محور بیشتر توربین‌های بادی تجاری، در حدود ۳۰ الی۸۰ متری (محمدی و همکاران، ۲۳: ۱۳۹۱) و اغلب ۵۰ متری از سطح زمین است؛ لیکن از ارتفاع‌های۱۲۰، ۱۵۰ و حتی۲۰۰ متری هم صحبت به میان آمده است. با توجه به رابطهٔ ۲، مقادیر سرعت متوسط سالانهٔ ایستگاه‌های منطقه تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین محاسبه و بصورت جدول ارائه گردید. بر مبنای مقادیر بدست‌آمده می‌توان مناطق پرتوان و کم‌توان را با دقت بیشتری از یکدیگر متمایز کرد.

چگالی قدرت باد در ایستگاه ها

مقدار کمّی انرژی باد قابل دسترس در هر نقطه ای، چگالی قدرت باد (WPD)[3] نامیده می شود. چگالی قدرت باد علاوه بر سرعت آن، به چگالی هوا در ارتفاع مورد نظر نسبت به سطح دریا نیز بستگی دارد که خود تابعی از فشار و دمای هواست. با توجه به کاهش چگالی هوا با افزایش ارتفاع از سطح دریا و در نتیجه برخورد کمتر مولکول‌های هوا با پره‌های توربین، چگالی قدرت باد نسبت به قدرت باد مشخصهٔ دقیق‌تری در معرفی توان ایستگاه‌ها و مقایسهٔ آنها با یکدیگر است. برای محاسبهٔ چگالی قدرت باد (WPD) از رابطهٔ ۳ استفاده می‌شود (هیوجز[4]، ۲۰۰۰: ۲-۱):

$$WPD = {}^{1}/_{2} \times \rho \times v^{3} \quad (۳)$$

[1] -Gipe
[2] -Wind shear exponent
[3] -Wind Power Density (WPD)
[4] -Hughes

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

که در آن ρ چگالی (دانسیته) هوا و V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است. برای محاسبهٔ چگالی هوا (ρ) از روابط ۴ الی ۶ استفاده می‌شود:

$$\rho = 1.225 - (1.194 \times 10^{-4}) \times Z \quad (۴)$$

$$\rho = P/RT \quad (kg/m^3) \quad (۵)$$

$$\rho = (P_0/RT) \times \exp(-g \times Z/RT) \quad (kg/m^3) \quad (۶)$$

که در آنها Z ارتفاع ایستگاه از سطح دریا به متر، P فشار هوا بر حسب پاسکال یا نیوتن بر متر مربع، R ثابت ویژهٔ گاز به میزان ۲۸۷ ژول بر کیلوگرم بر درجهٔ کلوین، T دمای هوا بر حسب درجهٔ کلوین، P_0 فشار استاندارد هوا در سطح دریا به میزان ۱۰۱۳۲۵ پاسکال و g شتاب جاذبه به میزان ۹/۸ متر بر مجذور ثانیه است. از رابطهٔ ۵ موقعی که فشار هوا و دما موجود باشد و از رابطهٔ ۶ موقعی که فقط دما موجود باشد، استفاده می‌شود. برای محاسبهٔ چگالی هوا (ρ) علاوه بر روابط ارائه شده در این مقاله (روابط ۴ الی ۶)، جهانگیری و همکاران (۱۳۸۴: ۱۶۲) یک رابطهٔ تجربی برای ایران و ثقفی (۱۳۷۲: ۸۹-۹۶) چند رابطهٔ دیگر نیز ارائه نموده‌اند.

برای محاسبهٔ چگالی قدرت باد (WPD) با استفاده از رابطهٔ ۳ فرض بر این است که باد بطور مداوم در تمام مدت مورد نظر با سرعت ثابت V در حال وزیدن است. در حالیکه در عمل چنین نیست و سرعت و قدرت باد در مقاطع زمانی مختلف تغییر می‌کند. بنابراین رابطهٔ دیگری که بر اساس آن می‌توان مقادیر چگالی قدرت باد (WPD) را محاسبه نمود عبارتست از:

$$WPD = 0.5 \times {}^{1}/_{n} \times \sum_{j=1}^{n} (\rho_j \times v_j^3) \quad (۷)$$

که در آن n تعداد قرائت‌های سرعت باد و ρ_j و v_j به‌ترتیب عبارتند از j امین قرائت (اولین، دومین، سومین و ...) مربوط به چگالی هوا و سرعت باد. از آنجا که چگالی هوا و سرعت باد به‌ازاء هر قرائت تغییر می‌کند، به دست آوردن دقیق‌ترین نتایج نیازمند انجام محاسبات در مقاطع زمانی کوتاه است که خود مستلزم انجام محاسبات متعدد و بهره‌گیری از برنامه‌ها و محاسبات طولانی کامپیوتری است. دو راه حل برای برآورد مقادیر قابل قبول بدون انجام محاسبات طولانی یادشده وجود دارد:

راه حل اول: بهترین راه برای تخمین مقادیر چگالی قدرت باد (WPD) استفاده از نتایج توزیع فراوانی سرعت باد با رابطهٔ ۸ است:

$$WPD = 0.5 \times \sum_{j=1}^{n} (\rho \times \tilde{x}_{v_j^3} \times f_j) \quad (۸)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

که در آن $\tilde{x}_{v_j^3}$ توان سوم میانهٔ سرعت در ردهٔ j و f_j فراوانی ردهٔ j است. اگر مقدار چگالی هوا در طول زمان تغییر نکند (مانند رابطهٔ ۳)، استفاده از رابطهٔ ۹ پیشنهاد می‌شود:

$$WPD = 0.5 \times \rho \times \sum_{j=1}^{n} (\tilde{x}_{v_j^3} \times f_j) \qquad (۹)$$

راه حل دوم:که ساده‌تر است و محاسبات با توجه به شکل توزیع فراوانی سرعت‌ها انجام می‌شود:

$$WPD = 0.5 \times K \times \rho \times v^3 \qquad (۱۰)$$

که در آن K مقداری است که با توجه به شکل توزیع محاسبه می‌شود. به‌عنوان مثال برخی از الگوهای توزیع فراوانی سرعت، از توزیع ریلی[1] تبعیت می‌کنند. در این صورت مقدار K معمولاً معادل ۱/۹۱ است. در این پژوهش برای محاسبهٔ چگالی قدرت باد (WPD) از رابطهٔ ۳ و چگالی هوا (ρ) از رابطهٔ ۴ استفاده شده است.

جهت یا سمت وزش باد در انتخاب مکان نصب توربین‌های بادی و طراحی آنها عامل مهمی محسوب نمی‌شود. چرا که امروزه با وجود سیستم‌های کنترل کامپیوتری، با تغییر جهت وزش باد، پره‌های توربین‌های بادی همواره در جهت وزش باد قرار می‌گیرند. با این وجود گلبادها برای چگونگی آرایش توربین‌های بادی و چیدمان آنها در مزرعهٔ بادی بسیار مؤثر می‌باشند (عامری و لاری، ۱۳۷۴: ۹۴). گلبادهای سالانهٔ باد ایستگاه‌های منطقهٔ مورد مطالعه با پردازش داده‌های باد سالنامه‌های هواشناسی در دورهٔ آماری ۲۰۰۰–۱۹۹۰ رسم شده‌اند.

تغییرات سرعت شبانه روزی و ماهانهٔ باد

به منظور بررسی دقیق‌تر وضعیت سرعت باد، مقادیر میانگین سرعت باد در ساعات شبانه‌روز در دو ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین و نیز در طول ماههای مختلف محاسبه گردید. یادآوری می‌شود که سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری، بر مبنای مقادیر سرعت ارتفاع ۱۰ متری، از طریق رابطه ۲ محاسبه شده است.

نتایج

تداوم سرعت باد

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، خصوصیات فراوانی- سرعت وزش باد در ایستگاه‌های منطقه، محاسبه و در جدول ۱ ذکر شده است. ویژگی اغلب هیستوگرام‌های

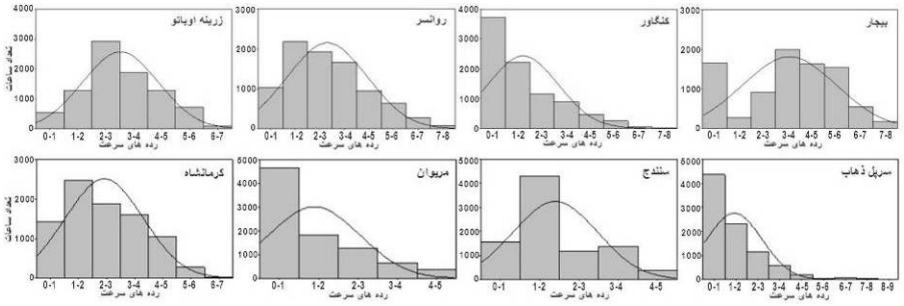
[1] -Rayleigh distribution

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

فراوانی- سرعت، که بر مبنای ارقام جدول ۱ رسم شده و تعدادی از آنها در شکل ۳ نمایش داده شده است، چولگی مثبت آنهاست. چولگی‌های مثبت (جدول ۱ ، شکل ۳) (حداکثر در ایستگاه سرپل‌ذهاب به میزان ۱/۸۸) حاکی از فراوانی اندک بادهای با سرعت بالا و فراوانی زیاد بادهای با سرعت پایین در ایستگاه‌هاست که وضعیت مناسبی را از نظر بهره‌برداری از انرژی باد ترسیم نمی‌نماید. بدیهی است هرچه چولگی‌ها، از مقادیر مثبت به صفر نزدیک‌تر و مانند ایستگاه بیجار منفی (۰/۲۳-) شوند، فراوانی وزش بادهای قوی‌تر بیشتر است که خود می‌تواند نشانه‌ای از قابلیت مناسب‌تر برای بهره‌برداری از انرژی باد به شمار رود.

جدول(۱) خصوصیات سرعت باد ایستگاه‌های منطقه به‌تفکیک ردهٔ سرعت در ارتفاع ۱۰ متری

رده سرعت / ایستگاه	تعداد ساعات تداوم- سرعت باد به تفکیک رده های سرعت									ضریب چولگی	ساعات تداوم- سرعت مفید (بیش از ۳ m/s)	
	۰-۱ (m/s)	۱-۲ (m/s)	۲-۳ (m/s)	۳-۴ (m/s)	۴-۵ (m/s)	۵-۶ (m/s)	۶-۷ (m/s)	۷-۸ (m/s)	۸-۹ (m/s)		جمع	درصد نسبت به سال
کرمانشاه	۱۴۳۵	۲۴۷۸	۱۸۸۹	۱۶۰۰	۱۰۵۷	۲۷۵	۲۶	۰	۰	۰/۴۰	۲۹۵۸	۳۴
کنگاور	۳۷۲۶	۲۲۱۳	۱۱۵۱	۸۹۴	۴۵۸	۲۴۵	۵۵	۱۸	۰	۱/۲۰	۱۶۷۰	۱۹
روانسر	۱۰۴۳	۲۱۷۳	۱۹۳۶	۱۶۶۵	۹۴۹	۶۳۴	۲۸۲	۷۰	۸	۰/۵۸	۳۶۰۸	۴۱
اسلام‌آبادغرب	۳۹۰۹	۲۲۳۶	۱۰۸۷	۶۹۳	۴۵۷	۳۰۶	۷۲	۰	۰	۱/۲۹	۱۵۲۸	۱۷
سرپل‌ذهاب	۴۳۴۹	۲۳۲۹	۱۱۴۳	۵۶۹	۱۹۹	۳۹	۹۳	۳۱	۸	۱/۸۸	۹۳۹	۱۱
سنندج	۱۵۵۴	۴۲۸۷	۱۱۸۲	۱۳۷۱	۳۶۶	۰	۰	۰	۰	۰/۷۲	۱۷۳۷	۲۰
سقز	۳۳۰۰	۲۹۹۷	۹۹۶	۱۱۹۴	۲۷۳	۰	۰	۰	۰	۰/۸۲	۱۴۶۷	۱۷
زرینهٔ اوباتو	۵۵۲	۱۲۸۷	۲۹۳۴	۱۸۸۴	۱۲۸۴	۷۲۹	۹۰	۰	۰	۰/۲۴	۳۹۸۷	۴۶
مریوان	۴۶۵۹	۱۸۰۶	۱۲۹۰	۶۳۹	۳۶۶	۰	۰	۰	۰	۱/۱۶	۱۰۰۵	۱۱
قروه	۳۰۹۹	۱۱۹۴	۱۱۸۵	۱۱۷۰	۷۳۵	۱۱۰۱	۱۸۶	۹۰	۰	۰/۵۸	۳۲۸۲	۳۷
بیجار	۱۶۵۶	۲۷۶	۹۲۴	۲۰۰۴	۱۶۲۹	۱۵۴۲	۵۴۹	۱۸۰	۰	-۰/۲۳	۵۹۰۴	۶۷

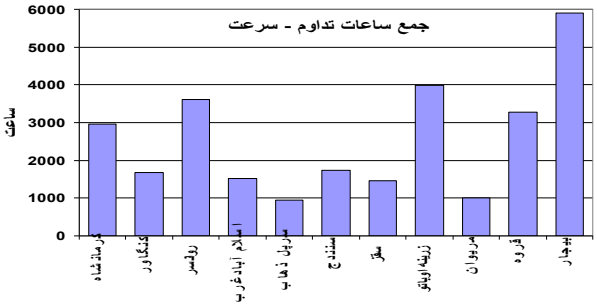


شکل(۳) هیستوگرام‌های نمونهٔ فراوانی- سرعت وزش باد ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰ متری

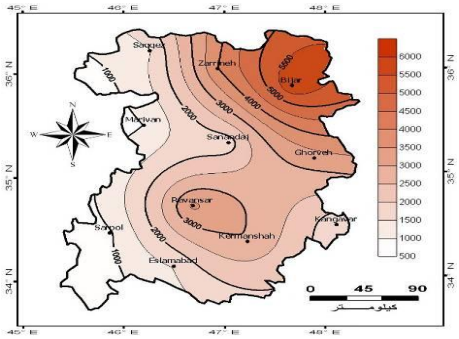
با استفاده از ارقام مجموع ساعات تداوم وزش باد با سرعت برابر یا بیش از ۳ متر بر ثانیه، به‌عنوان سرعت آستانهٔ حداقل برای احداث توربین‌های بادی (جدول ۱)، نمودار شکل ۴ و نقشهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

شکل ۵ رسم شدند. بر این اساس، ایستگاه بیجار در شمالشرق منطقه با تداوم وزش ۵۹۰۴ ساعت (۶۷٪ اوقات سال) برابر یا بیشتر از آستانهٔ مذکور در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، بهترین وضعیت را از لحاظ احداث توربین‌های بادی داراست؛ در حالیکه رو به جنوب و غرب منطقه، از تداوم وزش بادهای با سرعت مفید کاسته می‌شود تا اینکه در ایستگاه سرپل‌ذهاب در جنوبغرب منطقه به کمترین حد خود، یعنی ۹۳۹ ساعت (۱۰٪ اوقات سال) می‌رسد. این تداوم برای ایستگاه‌های بیجار، زرینهٔ اوباتو و روانسر در ارتفاع ۵۰ متری، به‌ترتیب ۷۸٪ ، ۷۹٪ و ۶۳٪ اوقات سال می‌باشد. بدون شک، ارتفاع زیاد بخش‌های شمالی و شرقی منطقه و بادخور بودن آنها نقش اساسی در افزایش سرعت بادها داشته است؛ به نحوی که ضریب همبستگی بین ارقام ارتفاع ایستگاه‌ها (جدول ۳) و تعداد ساعات تداوم- سرعت مفید (جدول ۱)، ۰/۶۸ و در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بود.



شکل(۴) فراوانی ساعات وزش باد با سرعت برابر یا بیش از ۳ متر بر ثانیه



شکل(۵) هم‌تداوم سالانهٔ باد با سرعت برابر یا بیش از ۳ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

(ارقام بر حسب ساعت)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

میانگین‌های سرعت ماهانه و شبانه روزی باد و برآورد سرعت تا ارتفاع ۱۰۰ متری

میانگین‌های ماهانهٔ سرعت باد ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰ متری که با استفاده از آمار سه ساعتهٔ ایستگاه‌ها به‌صورت وزنی محاسبه شده‌اند در جدول ۲ ذکر شده است. همانطور که مشخص است ایستگاه‌ها در اغلب ماه‌های سال فاقد بادهایی با سرعت مورد لزوم می‌باشند. سرعت‌های باد بیش از ۳ متر بر ثانیه، به‌عنوان سرعت مورد لزوم، تنها در برخی از ماه‌های سال در ایستگاه‌های قروه، روانسر، زرینهٔ اوباتو و بیجار (به‌ترتیب ۲ ، ۳ ، ۶ و ۷ ماه از سال) مشاهده می‌شود. بیشترین ماه‌ها و بالاترین سرعت‌ها مربوط به ایستگاه بیجار است.

جدول(۲) سرعت‌های متوسط ماهانهٔ باد در ایستگاه‌های سینوپتیک در ارتفاع ۱۰ متری (m/s)

سرعت‌های بیش از ۳ m/s به رنگ خاکستری نشان داده شده‌اند.

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
کرمانشاه	۲/۱۲	۲/۵۳	۲/۹۳	۲/۹۳	۲/۷۳	۲/۸۳	۲/۷۳	۲/۵۳	۲/۲۳	۱/۸۲	۱/۸۲	۱/۸۲
کنگاور	۱/۳۴	۱/۹۴	۲/۲۷	۲/۲۷	۱/۹۶	۲/۰۶	۱/۷۵	۱/۳۴	۱/۵۵	۱/۶۵	۱/۲۴	۱/۲۴
روانسر	۲/۲۴	۲/۴۴	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۸۵	۳/۶۷	۳/۸۷	۳/۷۷	۲/۹۵	۲/۶۵	۲/۲۴	۱/۵۳
اسلام‌آبادغرب	۱/۰۴	۱/۴۶	۱/۸۸	۱/۹۸	۱/۸۸	۱/۹۸	۲/۱۹	۲/۳۰	۱/۸۸	۱/۴۶	۱/۰۴	۰/۹۴
سرپل‌ذهاب	۱/۲۱	۱/۵۱	۱/۶۲	۱/۵۱	۱/۷۲	۱/۶۲	۱/۶۲	۱/۴۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۰۱
سنندج	۱/۴۵	۱/۷۶	۲/۲۸	۲/۳۸	۲/۱۸	۲/۰۷	۲/۱۸	۲/۰۷	۱/۷۶	۱/۷۶	۱/۴۵	۱/۴۵
سقز	۱/۲۳	۱/۶۳	۲/۰۴	۲/۳۵	۱/۷۴	۱/۶۳	۱/۵۳	۱/۵۳	۱/۵۳	۱/۵۳	۱/۳۳	۱/۱۲
زرینهٔ اوباتو	۲/۴۴	۳/۴۵	۳/۰۵	۴/۰۶	۳/۸۶	۳/۰۵	۲/۶۴	۲/۷۴	۳/۱۵	۲/۸۴	۲/۶۴	۲/۴۴
مریوان	۱/۱	۱/۲	۱/۴	۱/۷	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۴	۱/۷	۱/۶	۱/۱	۰/۸
قروه	۱/۶۱	۲/۱۵	۲/۴۷	۳/۲۲	۲/۷۹	۲/۵۸	۲/۳۶	۴/۴۰	۲/۲۶	۲/۱۵	۱/۹۳	۱/۷۲
بیجار	۳/۲۵	۴/۵۰	۵/۰۳	۶/۱۸	۳/۳۵	۲/۹۳	۲/۵۱	۲/۴۱	۲/۵۱	۲/۵۱	۳/۷۷	۳/۸۸

همچنین سرعت‌های میانگین سالانهٔ باد ایستگاه‌ها تا ارتفاع ۱۰۰ متری با استفاده از رابطهٔ ۲ محاسبه و در جدول ۳ ذکر شده است. به‌طور طبیعی با افزایش ارتفاع، سرعت نیز افزایش می‌یابد. معمولاً حداقل سرعت باد برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک، بین ۳ تا ۴ متر بر ثانیه بسته به نوع و طراحی توربین متغیر است. بر این اساس تمام ایستگاه‌ها به‌جز مریوان و سرپل‌ذهاب در ارتفاعات متفاوت از سطح زمین، قابلیت بهره‌برداری از برق بادی را در مقیاس محدود دارا هستند (جدول ۳).

از دیگر نکاتی که در انتخاب حداقل سرعت باد باید مد نظر قرار گیرد، حداقل سرعتی است که در رده‌بندی‌های توربین‌های بادی مطابق با استاندارد بین‌المللی IEC۶۱۴۰۰-۱ برای توربین‌های بادی در نظر گرفته شده است. این سرعت مربوط به ردهٔ IV بوده و برابر ۶ متر بر ثانیه می‌باشد (نوراللهی، ۱۳۹۰: ۸). از این نظر ایستگاه بیجار از ارتفاع تقریبی ۵۰ متری به بعد و ایستگاه زرینهٔ اوباتو از ارتفاع ۱۰۰ متری به بعد از شرایط مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

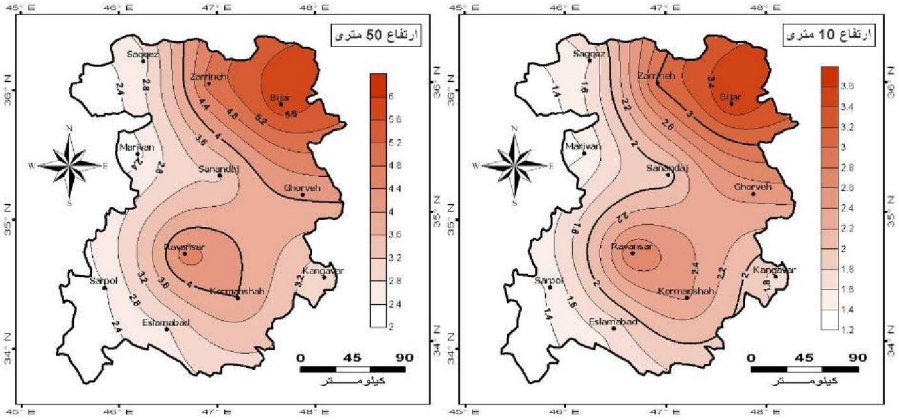
باد برخوردارند. به‌خصوص ایستگاه بیجار موقعیت ممتازی نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارد. در این ایستگاه، در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین در تمام ماه‌های سال سرعت متوسط باد، معادل یا بیشتر از آستانهٔ لازم می‌باشد (نشان داده نشده است).

جدول(۳) سرعت‌های متوسط سالانهٔ باد ایستگاه‌ها تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین (m/s)

ارتفاع(متر) / ایستگاه	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	ارتفاع ایستگاه (متر)
کرمانشاه	۲/۴۲	۳/۰۰	۳/۴۰	۳/۷۲	۳/۹۹	۴/۱۸	۴/۴۲	۴/۶۱	۴/۷۸	۴/۹۴	۱۳۱۸/۶
کنگاور	۱/۷۲	۲/۱۶	۲/۴۲	۲/۶۴	۲/۸۳	۳/۰۰	۳/۱۴	۳/۲۸	۳/۴۰	۳/۵۱	۱۴۶۸
روانسر	۲/۸۱	۳/۴۸	۳/۹۵	۴/۳۲	۴/۶۳	۴/۹۰	۵/۱۴	۵/۳۵	۵/۵۵	۵/۷۴	۱۳۷۹/۷
اسلام‌آبادغرب	۱/۶۷	۲/۰۷	۲/۳۵	۲/۵۷	۲/۷۵	۲/۹۱	۳/۰۵	۳/۱۸	۳/۳۰	۳/۴۱	۱۳۴۸/۸
سرپل‌ذهاب	۱/۴۳	۱/۷۷	۲/۰۱	۲/۲۰	۲/۳۶	۲/۴۹	۲/۶۱	۲/۷۲	۲/۸۳	۲/۹۲	۵۴۵
سنندج	۱/۹۰	۲/۳۶	۲/۶۷	۲/۹۲	۳/۱۳	۳/۳۱	۳/۴۷	۳/۶۲	۳/۷۵	۳/۸۸	۱۳۷۳/۴
سقز	۱/۶۰	۱/۹۸	۲/۲۵	۲/۴۶	۲/۶۴	۲/۷۹	۲/۹۲	۳/۰۵	۳/۱۶	۳/۲۷	۱۵۲۲/۸
زرینهٔ اوباتو	۳/۰۳	۳/۷۶	۴/۲۶	۴/۶۶	۴/۹۹	۵/۲۸	۵/۵۴	۵/۷۷	۵/۹۹	۶/۱۹	۲۱۴۲/۶
مریوان	۱/۳۹	۱/۷۲	۱/۹۵	۲/۱۴	۲/۲۹	۲/۴۲	۲/۵۴	۲/۶۵	۲/۷۵	۲/۸۴	۱۲۸۶/۸
قروه	۲/۴۷	۳/۰۶	۳/۴۷	۳/۸۰	۴/۰۷	۴/۳۰	۴/۵۲	۴/۷۱	۴/۸۸	۵/۰۴	۱۹۶۰
بیجار	۳/۵۷	۴/۴۳	۵/۰۲	۵/۴۹	۵/۸۸	۶/۲۲	۶/۵۳	۶/۸۰	۷/۰۵	۷/۲۹	۱۹۰۰/۴

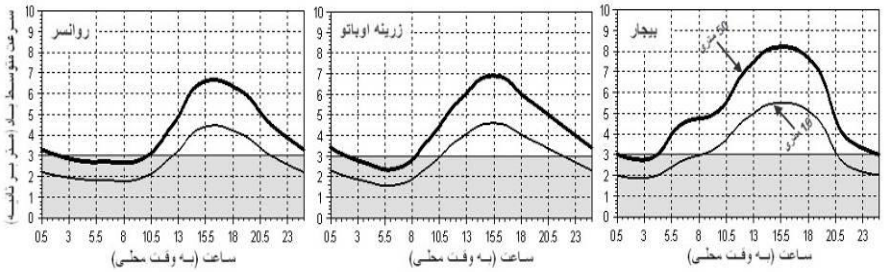
به‌عنوان نمونه، نقشه‌های هم‌سرعت متوسط سالانهٔ باد منطقهٔ مورد مطالعه برای ارتفاعات ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین در شکل ۶ نشان داده شده است. بر این اساس حداکثر سرعت باد در شمال‌شرق منطقه در حوالی ایستگاه‌های بیجار و زرینهٔ اوباتو و در مرکز منطقه در حوالی ایستگاه روانسر رخ می‌دهد. حداقل سرعت نیز با مناطق پست غربی منطقه مطابقت دارد. همانند وضعیت تداوم باد که در فوق گفته شد، عامل ارتفاع ایستگاه نقش مهمی در افزایش سرعت بادها ایفاء می‌نماید. ضریب همبستگی بین ارقام ارتفاع ایستگاه‌ها و میانگین سرعت وزش باد ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (جدول ۳)، ۰/۶۹ و در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل (۶) هم‌سرعت متوسط سالانهٔ باد در ارتفاعات ۱۰ و ۵۰ متری (ارقام بر حسب متر بر ثانیه)

با توجه به سرعت‌های بالاتر در سه ایستگاه بیجار، زرینهٔ اوباتو و روانسر، در ادامه، وضعیت تغییرات شبانه‌روزی سرعت باد در این سه ایستگاه در دو ارتفاع ۱۰ و۵۰ متری بررسی می‌شود. بر اساس نمودارهای شکل ۷، حداکثر سرعت باد در دو ارتفاع یادشده، در ساعات بعدازظهر (ساعت ۱۵/۳۰ محلی) رخ می‌دهد که دلیل آن شدت‌گرفتن اختلافات فشار در این ساعات است. میانگین سرعت در این ساعت در ایستگاه بیجار در ارتفاع ۵۰ متری به بیش از ۸ متر بر ثانیه نیز رسیده است که سرعت بسیار مناسبی برای چرخاندن پره‌های توربین‌های بادی است. در این شکل، محدودهٔ سرعت زیر ۳ متر بر ثانیه به رنگ خاکستری نشان داده شده است.



شکل(۷) میانگین‌های سرعت شبانه‌روزی باد در ایستگاه‌های پرتوان منطقه در ارتفاع‌های ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین

چگالی قدرت باد (WPD)

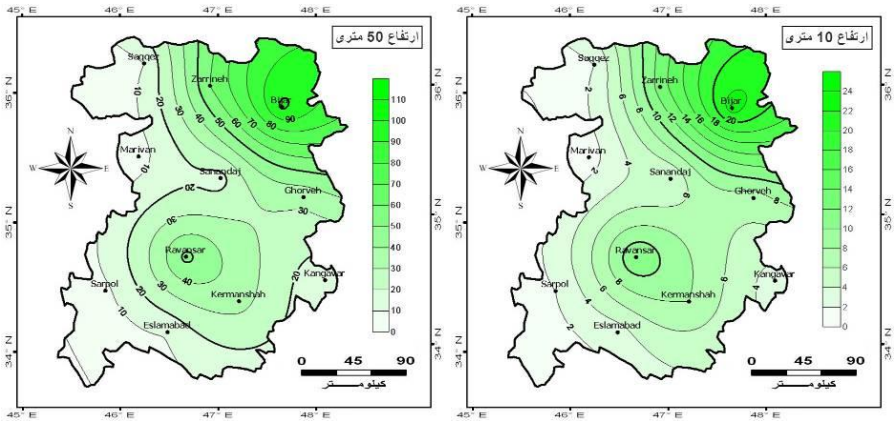
ارقام چگالی قدرت باد ایستگاه‌ها به‌عنوان یکی از عوامل تعیین‌کنندهٔ درجهٔ تناسب برای بهره‌برداری از انرژی باد، با استفاده از رابطهٔ ۳ محاسبه و در جدول ۴ ذکر شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول(۴) مقادیر چگالی قدرت باد ایستگاه‌های منطقه تا ارتفاع۱۰۰ متری از سطح زمین (W/m^2)

ارتفاع(متر) / ایستگاه	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
کرمانشاه	۸	۱۴	۲۱	۲۸	۳۴	۳۹	۴۶	۵۲	۵۸	۶۴
کنگاور	۳	۵	۷	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۹	۲۱	۲۳
روانسر	۱۲	۲۲	۳۳	۴۳	۵۳	۶۲	۷۲	۸۱	۹۱	۱۰۰
اسلام‌آبادغرب	۳	۵	۷	۹	۱۱	۱۳	۱۵	۱۷	۱۹	۲۱
سرپل‌ذهاب	۲	۳	۵	۶	۸	۹	۱۰	۱۲	۱۳	۱۴
سنندج	۴	۷	۱۰	۱۳	۱۶	۱۹	۲۲	۲۵	۲۸	۳۱
سقز	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۱	۱۳	۱۵	۱۷	۱۸
زرینه اوباتو	۱۳	۲۶	۳۸	۴۹	۶۰	۷۱	۸۲	۹۳	۱۰۴	۱۱۵
مریوان	۱	۳	۴	۵	۶	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
قروه	۸	۱۴	۲۱	۲۷	۳۳	۳۹	۴۶	۵۲	۵۸	۶۳
بیجار	۲۳	۴۳	۶۳	۸۳	۱۰۲	۱۲۰	۱۳۹	۱۵۷	۱۷۵	۱۹۳

با توجه به مؤلفه‌های رابطهٔ ۳ و نیز مقایسهٔ نقشه‌های نمونهٔ هم‌چگالی قدرت باد سالانهٔ منطقه در ارتفاعات ۱۰ و ۵۰ متری از سطح زمین (شکل ۸) با پهنه‌های نقشه‌های سرعت (شکل ۶) می‌توان دریافت که چگالی قدرت باد به‌طور مستقیم از سرعت باد تأثیر می‌پذیرد. بنابراین وضعیت مشابهی همانند سرعت باد در اینجا ملاحظه می‌شود. بدین‌ترتیب که ایستگاه‌های بیجار، زرینهٔ اوباتو و روانسر در شمالشرق و مرکز منطقه بیشترین مقادیر و ایستگاه‌های مریوان و سرپل‌ذهاب در نوار غربی منطقه کمترین مقادیر چگالی قدرت باد را دارا هستند.



شکل (۸) هم‌چگالی قدرت باد سالانه در ارتفاعات ۱۰ و ۵۰ متری(ارقام بر حسب وات بر مترمربع)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

بر پایهٔ تقسیم‌بندی ۷ رده‌ای آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحدهٔ آمریکا (NREL)[1] منطقهٔ مورد مطالعه از نظر توان باد در پایین‌ترین رده، یعنی ردهٔ ۱، قرار می‌گیرد. در این رده در ارتفاع ۱۰ متری، میانگین سرعت سالانه، کمتر از ۴/۴ متر بر ثانیه و چگالی قدرت باد، کمتر از ۱۰۰ وات بر متر مربع و در ارتفاع ۵۰ متری، میانگین سرعت سالانه، کمتر از ۵/۶ متر بر ثانیه و چگالی قدرت باد، کمتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع می‌باشد. با مرور ارقام جداول ۴ و ۵ معلوم می‌شود که تمام ایستگاه‌های منطقه در این رده قرار می‌گیرند.

گرچه همانطورکه قبلاً نیز گفته شد با وجود تکنولوژی‌های نوین در ساخت توربین‌ها، جهت وزش باد عامل مهمی به‌شمار نمی‌رود، لیکن با استناد به گلبادهای ایستگاه‌های منطقه (نشان داده نشده‌اند) مشخص می‌شود که جهت باد غالب در ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب و زرینهٔ اوباتو، غربی؛ ایستگاه‌های کنگاور، سقز، مریوان و قروه، جنوبغربی؛ ایستگاه-های بیجار و سنندج، جنوبی و ایستگاه روانسر، شمالغربی است. پس مطابق با انتظار، اغلب ایستگاه‌ها جهت باد غالب غربی تا جنوبغربی دارند. البته وضعیت توپوگرافی نیز نقش مهمی در تعیین جهت باد غالب بازی می‌کند. به‌همین دلیل شاید استقرار ایستگاه سنندج در موقعیت دره‌ای با امتداد شمالی-جنوبی، موجب کانالیزه‌شدن باد به‌طرف شمال و رخداد وضعیت باد غالب جنوبی شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

کشورهای در حال توسعه به‌دلیل محدودیت‌های مختلف بهره‌برداری از منابع سوخت فسیلی، در میان‌مدت یا درازمدت چاره‌ای جز حرکت به‌طرف استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر ندارند. تعداد نیروگاه‌های بادی در کشور با توجه به قابلیت‌های مناسب نقاط مختلف کافی نیست و نیاز به توسعهٔ این سایت‌ها در سایر نقاط بیش از پیش احساس می‌شود. از اینرو این مطالعه با هدف امکان‌سنجی اقلیمی بهره‌برداری از انرژی باد در دو استان کرمانشاه و کردستان با اولویت مشخص‌نمودن بهترین مناطق برای نصب توربین‌های بادی به‌انجام رسیده است. برای انجام این کار از متغیرهایی نظیر تداوم وزش باد، سرعت باد و به‌خصوص چگالی قدرت باد (WPD) در ارتفاعات متفاوت استفاده شده است. مقایسهٔ ارقام چگالی قدرت باد (WPD) حاصل از این تحقیق در ایستگاه‌های استان کرمانشاه تا ارتفاع ۵۰ متری، که معادل۲ تا ۵۳ وات بر متر مربع محاسبه شده است (جدول ۴)، با مقادیر به‌دست آمده از تحقیق محمدی و همکاران (۱۳۹۱:

[1] - National Renewable Energy Laboratory; http://www.nrel.gov/wind/ pubs /atlas / tables/A-8T.html

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

۲۷)، که معادل ۸۲ تا ۵۳۳ وات بر متر مربع محاسبه شده است، اختلاف بسیار فاحشی را نشان می‌دهد. ضمن آنکه ایستگاه سرپل‌ذهاب که در تحقیق حاضر ضعیف‌ترین موقعیت را از لحاظ توان باد داراست، در تحقیق آنان جزء ایستگاه‌های باقابلیت قلمداد شده است. همچنین از نظر رده‌بندی استاندارد NREL، بر پایهٔ تلفیق ارقام سرعت باد (جدول ۳) و چگالی قدرت باد در این تحقیق (جدول ۴) و مقایسهٔ آن با رده‌بندی یادشده، هیچ‌کدام از ایستگاه‌های منطقه از توان کافی برای نصب توربین‌های بادی برخوردار نیستند. شاید یکی از دلایل بروز اختلاف در پژوهش‌های مختلف، استفاده از روابط متفاوت برای محاسبه باشد. انتخاب رابطهٔ مناسب، بیشتر بستگی به این دارد که در ایستگاه‌های مورد نظر کدامیک از عناصر مورد نیاز رابطه ثبت می-شود. به هر صورت مقایسهٔ نقشه‌های سرعت و چگالی قدرت باد حاصل از این تحقیق (شکل های ۶ و ۸) با نقشه‌های اطلس سرعت و چگالی قدرت ارائه‌شده از سوی سانا[1] نشانگر صحت نسبی محاسبات در این تحقیق است. لذا به‌دلیل آنکه روابط ارائه شده برای محاسبهٔ چگالی قدرت باد، برحسب تبعیت از فرض‌های هر رابطه یا در دسترس‌بودن یا نبودن متغیرهای مورد نیاز هر رابطه، به نتایج متفاوتی ختم می‌شود و نیز اینکه تمامی این روابط، سرعت باد را مبنای محاسبهٔ خود قرار می‌دهد، به‌نظر می‌رسد طبقه‌بندی قابلیت مناطق بر مبنای سرعت باد و تدوام سالانهٔ باد به نتایج بهتری ختم می‌شود. بنابراین بر اساس نتایج این تحقیق و بر پایهٔ حداقل سرعت مورد نیاز باد برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک (۳ تا ۴ متر بر ثانیه)، تمام ایستگاه‌ها به‌جز مریوان و سرپل‌ذهاب، که قابلیت مناسبی برای هیچکدام از صور تولید انرژی بادی ندارند، در ارتفاعات متفاوت از سطح زمین قابلیت بهره‌برداری از برق بادی را در مقیاس محدود دارا هستند. همچنین از نظر حداقل سرعت مورد برای استقرار توربین‌های تجاری (۶ متر بر ثانیه)، ایستگاه‌های بیجار و زرینهٔ اوباتو به‌ترتیب در ارتفاع‌های ۵۰ و ۱۰۰ متری از شرایط مناسبی برای استقرار توربین‌ها برخوردارند (جدول۳). حتی ایستگاه بیجار در برخی از ساعات بعدازظهر در ارتفاع ۵۰ متری شاهد سرعت بیش از ۸ متر در ثانیه نیز می‌باشد که سرعت بسیار مناسبی برای تولید انرژی است. از دیدگاه تداوم وزش باد با سرعت بیش از ۳ متر بر ثانیه نیز ایستگاه‌های بیجار، زرینهٔ اوباتو و روانسر در ارتفاع‌های ۱۰ و ۵۰ متری در وضعیت مناسبی قرار دارند (جدول ۱ و شکل ۵). در مجموع از دیدگاه تمام متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق، ایستگاه بیجار از موقعیت ممتاز و دو ایستگاه زرینهٔ اوباتو و روانسر از موقعیت مناسبی برای تولید انرژی برق بادی برخوردارند. طبیعتاً استفاده از روابطی که از داده‌های با

[1] - http://www.suna.org.ir/fa/ationoffice/windenergyoffice/windatlasmap

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

مقاطع زمانی کوتاه‌تر مانند داده‌های ساعتی بهره می‌گیرند و نیز روابطی که از تعداد بیشتری از متغیرها استفاده می‌نمایند در اولویت قرار دارد. به‌خصوص در مطالعات آتی برای محاسبهٔ چگالی قدرت باد، استفاده از رابطهٔ ۷ که از تمام دیده‌بانی‌های طول دورهٔ آماری بهره می‌گیرد، پیشنهاد می‌گردد. در خاتمه، توضیح این نکته ضروری به‌نظر می‌رسد که در مطالعات امکان-سنجی بهره‌برداری از انرژی باد، علاوه بر معیارهای اقلیمی و جغرافیایی، که این تحقیق نیز سعی بر بررسی آنها نمود، مدنظر قرار دادن سایر معیارهای مهم، از جمله معیارهای فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی کاملاً ضروری است.

منابع و مآخذ

۱. امانی، ابوالفضل، عباس حسینی شمع‌چی (۱۳۸۹) **بررسی پتانسیل انرژی باد در ایستگاه‌های حوضهٔ آبریز رودخانهٔ ارس جنوبی**، فضای جغرافیایی، ۲۹: ۱-۲۶.

۲. ثقفی، محمود (۱۳۷۲) **انرژی بادی و کاربرد آن در کشاورزی**، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۲۵۲.

۳. جهانگیری، زهره، فاطمه رحیم‌زاده و غلامعلی کمالی (۱۳۸۴) **محاسبهٔ انرژی باد با استفاده از توزیع ویبال دوپارامتره**، تحقیقات جغرافیایی، ۷۶: ۱۵۱-۱۷۰.

۴. سانا "سازمان انرژی‌های نو ایران" (۱۳۸۸) **انرژی باد ۱**، گزارش سوم، ص ۳۸.

۵. سانا "سازمان انرژی‌های نو ایران" (۱۳۸۹) **انرژی باد ۲** ، گزارش هشتم، ص ۲۶.

۶. صلاحی، برومند (۱۳۸۳) **پتانسیل‌سنجی انرژی باد و برازش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل**، تحقیقات جغرافیایی، ۷۲: ۸۷-۱۰۴.

۷. عامری، محمد و حمیدرضا لاری (۱۳۷۴) **روش پتانسیل‌سنجی انرژی باد برای احداث نیروگاه‌های بادی**، مجلهٔ برق، ۱۵: ۹۴-۱۰۱.

۸. عبدلی، حبیب، بهروز ساری صراف، عباس حسینی شمع‌چی (۱۳۸۸) **امکان‌سنجی پتانسیل انرژی باد و کاربرد آن در طرح‌های توسعهٔ صنعتی «مطالعهٔ موردی: استان آذربایجان‌شرقی»**، فضای جغرافیایی، ۲۸: ۵۷-۷۴.

۹. علیجانی، بهلول (۱۳۸۷) **آب‌وهوای ایران**، چاپ هشتم، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، ص ۲۲۱.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

۱۰.کاویانی، محمدرضا (۱۳۷۴) **توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران،** تحقیقات جغرافیایی، ۳۶: ۱۲۷-۱۴۴.

۱۱.گندمکار، امیر (۱۳۸۸) **ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران،** جغرافیا و برنامه-ریزی محیطی، ۳۶: ۸۵-۱۰۰.

۱۲.محمدی، حسین، شیما رستمی جلیلیان، فرحناز تقوی و علی اکبر شمسی‌پور (۱۳۹۱) **پتانسیل‌سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه،** پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۸۰: ۱۹-۳۲.

۱۳.نوراللهی، یونس، سید محمد علی اشرف و محسن زمانی (۱۳۹۰) **پتانسیل‌سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی،** نشریهٔ انرژی ایران، ۱۴(۱): ۲-۲۲.

Azadeh, A., Ghaderi, S. F., Nasrollahi, M. R. (2011) ***Location Optimization of Wind Plants in Iran by an Integrated Hierarchical Data Envelopment Analysis***, Renewable Energy, 36: 1621- 1631.

Bagheri Moghaddam, N., Mousavi, S. M., Nasiri, M., Moallemi, E. A., Yousefdehi, H. (2011) ***Wind Energy Status of Iran: Evaluating Iran's Technological Capability in Manufacturing Wind Turbines***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 4200- 4211.

Djamai, M., Merzouk, N. K. (2011) ***Wind Farm Feasibility Study and Site Selection in Adrar, Algeria***, Energy Procedia, 6: 136- 142.

Gipe, P., (2004), ***Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business***, Chelsea Green Publishing, 496 p.

Hughes, T. (2000) ***Lesson Number 3. in an Oklahoma Windpower Tutorial Series***, Environmental Verification and Analysis Center, The University of Oklahoma, 4 p., http://www. Seic. Okstate. Edu/ owpi_old/ about/ Library/ Lesson3_ WPD_ windclass.pdf, Last Accessed 21 December 2012.

Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A. (2011) ***Assessment of Wind Energy Potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia Using Weibull Distribution Function***, Energy, 36: 985- 992.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

Lee, Amy H. I.; Chen, Hsing Hung; Kang, He-Yau (2009) ***Multi-criteria Decision Making on Strategic Selection of Wind Farms***, Renewable Energy, 34 (1): 120- 126.

Lee, Ki-Hak, Sang-Ook Jun, Kyung-Hyun Pak, Dong-Ho Lee, Kyeong-Woo Lee, Jong-Po Park (2010) ***Numerical Optimization of Site Selection for Offshore Wind Turbine Installation Using Genetic Algorithm***, Current Applied Physics, 10(2): 302- 306.

McIntyre, J. H., Lubitz, W. D., Stiver, W. H. (2011) ***Local Wind-Energy Potential for the City of Guelph, Ontario (Canada)***, Renewable Energy, 36: 1437- 1446.

Mostafaeipour, A. (2010) ***Feasibility Study of Harnessing Wind Energy for Turbine Installation in Province of Yazd in Iran***. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1): 93- 111.

Palma, J. M. L. M., Castro, F. A., Ribeiro, L. F., Rodrigues, A. H., Pinto, A. P. (2008) ***Linear and Nonlinear Models in Wind Resource Assessment and Wind Turbine Micro-siting in Complex Terrain***, J. Wind Eng. Ind. Aerod., 96: 2308- 2326.

Rasheed, A., Sorli, K., Holdahl, R., Kvamsdal, T. (2012) ***A Multiscale Approach to Micrositing of Wind Turbines***, Energy Procedia 14: 1458- 1463

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]