

پیش‌بینی پتانسیل باد و ارزیابی نتایج در نواحی کوهستانی (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)

سمیه رفعتی^{۱*}، و مصطفی کریمی^۲

^۱ استادیار جغرافیا، دانشگاه سید جمال‌الدین اسدآبادی، همدان، ایران
^۲ استادیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵)

چکیده

در این پژوهش، پتانسیل باد در محدوده چند ایستگاه همدیدی استان کرمانشاه برآورد شد که در نزدیکی آنها ایستگاه‌های بادسنجی سانا تأسیس شده بود. با مقایسه ویژگی‌های باد مشاهده‌شده در ایستگاه‌های بادسنجی سانا و ویژگی‌های برآوردشده در محل این ایستگاه‌ها، دقت برآوردها ارزیابی شده است. برای برآورد ویژگی‌های باد، اطلس باد در هر ایستگاه با به‌کارگیری نرم‌افزار WASP آماده و نقشه‌های میانگین سرعت باد و چگالی توان باد در ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ متری از سطح زمین با استفاده از نرم‌افزارهای WASP و ArcGIS در محدوده مشخصی از هر ایستگاه تهیه شد. سپس ویژگی‌های باد مشاهده‌شده در ایستگاه‌های بادسنجی سانا با ویژگی‌های برآوردشده در محل این ایستگاه‌ها (پارامترهایی مثل میانگین سرعت باد، میانگین چگالی توان باد، احتمال‌ترین سرعت باد و سرعت باد بیشینه تولید انرژی) مقایسه و دقت برآوردها ارزیابی شد.

به‌استثنای ایستگاه ماهیدشت، نتایج قابل‌قبولی در سه ایستگاه دیگر، به‌ویژه با توجه به ناهمواری پیچیده منطقه به‌دست‌آمده است. تفاوت زیاد ویژگی‌های باد در ایستگاه ماهیدشت نیز به‌دلیل فاصله زیاد این ایستگاه از ایستگاه اسلام‌آباد غرب در منطقه‌ای با ناهمواری پیچیده است. همچنین نتایج در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین در ایستگاه سونقور چندان رضایت‌بخش نبود. به‌عبارت‌دیگر، ناهمواری پیچیده منطقه باعث کاهش دقت برآورد نیم‌رخ باد با قانون لگاریتمی و رتمن شده است. نتایج آزمون T برای نمونه‌های زوج‌شده نشان داد در سطح اطمینان ۰/۹۵، تفاوت معنی‌داری به لحاظ آماری بین مقادیر مشاهده‌شده و برآوردشده وجود ندارد؛ بنابراین از مدل خطی ارائه‌شده در نرم‌افزار WASP می‌توان برای پیش‌بینی ویژگی‌های باد در فواصل به‌نسبت نزدیک به ایستگاه اندازه‌گیری در مناطق کوهستانی بهره برد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی پتانسیل باد، اطلس باد، میانگین چگالی توان باد، نرم‌افزار WASP، استان کرمانشاه

۱ مقدمه

افزایش جمعیت و رشد تقاضای انرژی و در پی آن افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، به مشکلات متعدد زیست‌محیطی از جمله گرمایش زمین، انواع آلودگی‌ها، ریزش باران‌های اسیدی و ... منجر شده است که سلامت انسان‌ها و موجودات دیگر کره زمین را به شدت تهدید می‌کند. کشورهای صنعتی حدود ۶۵٪ از انرژی مورد نیاز خود را از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کنند (واوساک و همکاران، ۲۰۱۴). اگر کشورهای در حال توسعه نیز در آینده مشابه کشورهای صنعتی و مدرن امروزی انرژی تولید کنند، به قطع افزایش خطرناک گازهای گلخانه‌ای را در پی خواهد داشت. این شرایط، برنامه‌ریزان را در سطح بین‌المللی به واکنش واداشته است تا با ایجاد پیمان‌ها و تعهدات بین‌المللی مختلف، شرایط بحرانی کنونی را کنترل و اصلاح کنند. از سوی دیگر، کمبود منابع انرژی فسیلی لزوم جایگزینی آن را بر همگان آشکار ساخته است. به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی از انرژی‌های پاک به جای زغال‌سنگ، از انتشار حدود یک کیلوگرم دی‌اکسید کربن جلوگیری خواهد شد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین، کاهش سولفور و اکسید نیترات (عوامل باران اسیدی) یکی دیگر از فواید زیست‌محیطی کاربرد انرژی‌های پاک است؛ بنابراین شرط لازم برای توسعه کشور و راه‌حل رفع مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، به‌کارگیری انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر مثل انرژی باد است. انرژی باد از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر است که به‌علت گستردگی، قدرت بازدهی زیاد، اقتصادی بودن (قیمت پایین توربین‌های بادی در مقایسه با دیگر انرژی‌های نو) از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در اروپا بیشترین میزان تولید الکتریسیته در بین انرژی‌های نو در سال ۲۰۰۸، انرژی باد بوده است که معادل ۴۳ درصد از انرژی مورد نیاز در این قاره است (دبلیو. دبلیو. ای. ای،

۲۰۱۰). در سال‌های اخیر، سهم جهانی تولید انرژی براساس منابع انرژی تجدیدپذیر و ظرفیت تولید انرژی از باد، به‌سرعت در حال رشد بوده است. براساس گزارش هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC)، ۸۰٪ از انرژی جهان تا سال ۲۰۵۰ می‌تواند از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید شود و انرژی باد در تولید برق در ۲۰۵۰ نقش مهمی بازی خواهد کرد (سان و هانگ، ۲۰۱۲) که اغلب به دلایل اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، نگرانی‌های زیست‌محیطی و حمایت مالی دولتی از توسعه انرژی تجدیدپذیر است.

فهم کامل ویژگی‌های باد برای تمامی جنبه‌های بهره‌برداری انرژی باد ضروری است. با توجه به تغییرپذیری فضایی و زمانی زیاد باد و تأثیرپذیری عملکرد سیستم از آن، گام اساسی برای بهره‌وری صحیح و اقتصادی از نیروگاه‌های بادی، بررسی دقیق پتانسیل انرژی بادی در منطقه است. پتانسیل انرژی باد یک مکان و ویژگی‌هایش می‌تواند به‌وسیله تحلیل آماری مشاهدات هواشناسی با کاربرد تابع توزیع احتمال سرعت باد ارزیابی شود. توزیع ویبول (ر.ک. بخش ۳-۲) به‌دلیل سادگی و دقتی که دارد، یکی از پرکاربردترین توابع توزیع احتمال برای تحلیل آماری ویژگی‌های باد و بررسی پتانسیل انرژی باد است (شو و همکاران، ۲۰۱۵). تابع ویبول نه تنها نمایش خوبی برای توزیع فراوانی سرعت باد فراهم می‌کند، بلکه برآورد ساده‌ای از میانگین و انحراف معیار چگالی توان باد ارائه می‌دهد (هنسی، ۱۹۷۷). منابع باد را می‌توان در نقاط اندازه‌گیری‌شده بررسی کرد، اما ایستگاه‌های هواشناسی برای توصیف پتانسیل واقعی باد کافی نیستند. به‌منظور ارائه تخمین قابل‌اعتماد از منابع باد و تولید نیم‌رخ‌های عمودی و افقی سرعت باد در منطقه، مدل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی (مثل مدل میان‌مقیاس و اطلس باد اروپایی) به‌کار گرفته می‌شود. نرم‌افزار WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) (راهنمای نرم‌افزار WASP، ۱۹۸۷) یکی از مقبول‌ترین برنامه‌های تعیین پتانسیل باد

WASP بررسی و مکان‌های مناسب برای تأسیس نیروگاه بادی را معرفی کردند. واوساک و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه میکروسایتینگ منابع باد منطقه‌ای در جنوب تایلند، داده‌های سرعت و جهت باد یک‌ساله از برج هواشناسی ۱۲۰ متری را پردازش کردند. آنها با تولید نقشه‌های خردمقیاس با تفکیک ۲۰ متر، تأسیس مزرعه بادی در دامنه ۱۰ تا ۹۰ مگاواتی را با استفاده از نرم‌افزار WASP بررسی کردند. بودیا و گوئری (۲۰۱۵) داده‌های باد ده‌ساله ایستگاه هواشناسی را با استفاده از نرم‌افزار WASP برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد در شمال‌غرب الجزایر به‌کاربردند.

در ایران، مطالعات بررسی منطقه‌ای پتانسیل باد تنها براساس داده‌های اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه‌های همدیدی صورت گرفته و نتایج به منطقه اطراف آن تعمیم داده شده است. به‌عنوان نمونه می‌توان به مطالعات گندم‌کار (۱۳۸۸)، رحیم‌زاده و همکاران (۱۳۸۸)، محمدی و همکاران (۱۳۹۱)، مجرد و همتی (۱۳۹۲)، جهانبخش و همکاران (۱۳۹۳)، خسروی و همکاران (۱۳۹۵) اشاره کرد. همچنین برخی پژوهشگران از جمله محمدی (۱۳۹۴)، حاجیلو و جلوخانی (۱۳۹۵)، اختصاصی و قایمی‌نیا (۱۳۹۶) و معروفی و همکاران (۱۳۹۶)، بدون در نظر گرفتن اهمیت پارامترهای مهمی مثل زبری زمین و موانع اطراف ایستگاه، به تولید نقشه و پهنه‌بندی سرعت باد با استفاده از روش‌های درونیابی مثل وزن‌دهی عکس فاصله، کریجینگ یا کوکریجینگ پرداخته‌اند. در پژوهشی که سازمان انرژی‌های نو ایران انجام داد، منابع باد (انرژی و سرعت متوسط باد) با استفاده از مدل سه‌بعدی جو (KLIMM) با تفکیک مکانی ۹۰۰ متر و با در نظر گرفتن ساختار ناهمواری و کاربری اراضی محاسبه شد. در این مطالعه، به‌منظور واسنجی نقشه باد و به‌دست آوردن تصویر قابل‌اطمینان از رژیم باد، داده‌های ایستگاه‌های همدیدی و ایستگاه‌های بادسنجی به‌کار گرفته

است (بودیا و گوئری، ۲۰۱۵). این نرم‌افزار ابزار قدرتمندی است که آزمایشگاه ملی ریسو (Riso National Laboratory) دانمارک آن را توسعه داده است و به‌طور گسترده‌ای برای بررسی اقلیم باد در صنعت انرژی باد استفاده می‌شود. فرض اساسی در نرم‌افزار WASP این است که آمار باد مشاهده‌شده محلی می‌تواند با استفاده از داده‌های ناهمواری، زبری سطح و موانع برای تولید اطلس باد به‌کار رود. مدل پیش‌بینی ویژگی‌های باد در نرم‌افزار WASP یک روش معیار برای پیش‌بینی ویژگی‌های باد در سواحل و قسمت ساحلی دریاها است که برای شرایط خشکی نیز ارزیابی شده است. این مطالعه اعتبارسنجی برای ایستگاه‌های ساحلی انجام شد و انحراف معنی‌داری در برآوردها نشان نداد (برنهارد و جرگن، ۲۰۰۱). در ارزیابی که ارائه‌دهندگان این نرم‌افزار انجام دادند، نشان داده شد که مدل‌سازی جریان باد براساس مدل خطی جکسون-هانت، مثل نرم‌افزار WASP به نتایج قابل‌قبولی در موقعیت‌های جغرافیایی و ناهمواری همسان منجر می‌شود (واوساک و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین در مقایسه نتایج مدل خطی IBZ (linearized flow model) و مدل غیرخطی CFD (Computational Fluid Dynamics) که برای مناطق با ناهمواری بسیار پیچیده صورت گرفت، مشخص شد در ارتفاع پایین‌تر (۱۰ تا ۲۰ متر از سطح زمین) اختلاف خطای برآورد ویژگی‌های باد دو مدل مختلف قابل‌توجه است، اما با افزایش ارتفاع (بالتر از ۳۰ متر از سطح زمین)، میزان خطاهای مدل خطی به خطاهای مدل غیرخطی نزدیک می‌شود (تروان و همکاران، ۲۰۱۴). در مطالعه‌ای دیگر، آمار اندازه‌گیری‌شده و مدل‌سازی‌شده مقایسه شد و نشان داده شد این برنامه توانایی توصیف جریان باد را روی سرزمین‌های مختلف، نزدیک به موانع و در نقاط مشخص دارد (میلجوداتا، ۲۰۰۲). جمای و مرزوک (۲۰۱۱) امکان تأسیس مزرعه بادی ۱۰ مگاواتی را در منطقه‌ای در جنوب الجزایر با استفاده از نرم‌افزار

می‌توان استان کرمانشاه را از نظر اقلیمی به دو بخش مجزای گرمسیری و معتدل کوهستانی تقسیم کرد. نوار مرزی عراق جزء بخش گرمسیری استان است و بخش‌های مرکزی و شرقی استان که نواحی دشت‌های مرتفع و بخش‌های کوهستانی را نیز شامل می‌شود، جزء بخش معتدل استان هستند. با توجه به وضعیت ناهمواری‌های استان و قرارگیری ارتفاعات بلند در مجاورت دشت‌های پست، طبیعی است که در طی شبانه‌روز تغییرات فشار مشاهده شود؛ از این رو در طول سال، وزش بادهای محلی در سطح استان رایج است (ذوالفقاری، ۱۳۸۴).

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های همدیدی و طول دوره آماری مورد بررسی

نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	نوع ایستگاه	دوره آماری مورد بررسی
کرمانشاه	۱۳۱۸/۵	همدیدی	۲۰۰۹/۱/۱ - ۲۰۱۳/۱۲/۱۱
سرپل ذهاب	۵۴۵	همدیدی	۲۰۰۹/۱/۱ - ۲۰۱۳/۱۲/۱۱
اسلام‌آبادغرب	۱۳۴۸/۸	همدیدی	۲۰۰۹/۱/۱ - ۲۰۱۳/۱۲/۱۱
سنقر	۱۷۰۰	تکمیلی	۲۰۰۹/۱/۱ - ۲۰۱۳/۱۲/۱۱

۳ روش تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، برآورد ویژگی‌های باد در محدوده ایستگاه‌های همدیدی و ارزیابی دقت این برآورد است. برای این منظور از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های همدیدی و ایستگاه‌های بادسنجی سانا استفاده شد. در مرحله نخست، اطلس باد ایستگاه‌ها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های همدیدی، مدل رقومی ارتفاع و نقشه کاربری زمین تهیه شد. سپس به کمک اطلس باد، میانگین سرعت باد و میانگین چگالی توان باد در ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰، و ۸۰ متری از سطح زمین

شد (آمری و حسینی، ۲۰۱۶)، اما نتایج نهایی میزان دقت محاسبات ارائه نشده است. با توجه به اینکه در ایران کمتر به برآورد ویژگی‌های باد در نقاط فاقد داده‌های اندازه‌گیری شده باد جهت به‌کارگیری انرژی باد پرداخته شده است و نظر به اهمیت این موضوع، هدف این پژوهش، پیش‌بینی پتانسیل باد در محدوده چند ایستگاه همدیدی استان کرمانشاه به منظور ارزیابی توانایی مدل خطی به‌کاررفته در نرم‌افزار WasP در برآورد پتانسیل باد در نواحی کوهستانی است. گفتنی است در این نرم‌افزار امکان کاربرد مدل غیرخطی (CFD) نیز برای محاسبه پتانسیل باد ارائه شده است، اما چون استفاده از مدل غیرخطی هزینه‌های گزافی جهت اجرا توسط مجموعه سامانه‌های رایانه‌ای با کارایی بالا (Cerebrum) در مرکز توسعه نرم‌افزار دارد، این مطالعه با هدف ارزیابی میزان دقت تخمین پتانسیل باد با کاربرد مدل خطی در یک منطقه کوهستانی انجام شده است.

۲ منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه که با مساحت ۲۴۶۴۰ کیلومتر مربع، ۱/۵ درصد مساحت کشور را دربرمی‌گیرد، در عرض جغرافیایی ۳۳ تا ۳۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵ تا ۴۸ درجه شرقی واقع است. طبق آخرین سرشماری انجام شده، جمعیت این استان حدود دو میلیون نفر است. این استان از نظر توپوگرافی، ناحیه‌ای کوهستانی است که بین فلات ایران و جلگه بین‌النهرین قرار دارد و دشت‌های مرتفع کوهستانی در میان ارتفاعات آن شکل گرفته است. ارتفاع متوسط استان از سطح دریا ۱۲۰۰ متر است. ناهمواری‌های استان کرمانشاه از لحاظ ساختاری و شکل ظاهری زمین به سه دسته کوه، دشت و تپه‌ماهور تقسیم می‌شود. متوسط میزان بارندگی در مناطق مختلف استان بین ۲۷۰ تا بیش از ۷۰۰ میلیمتر در نوسان است (www.kermanshah.maj.ir). در یک تقسیم‌بندی کلی

ویژگی‌های باد در ایستگاه کردند از داده‌های ایستگاه سرپل‌ذهاب، در ایستگاه سونفور از داده‌های ایستگاه سنقر، در ایستگاه ماهیدشت از داده‌های ایستگاه اسلام‌آباد و در ایستگاه حاجی‌آباد از داده‌های ایستگاه کرمانشاه استفاده شد. از آنجا که اندازه‌گیری‌ها برای تمام ایستگاه‌ها در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین موجود است، ویژگی‌های باد در این ارتفاع برآورد شد، اما برای ایستگاه‌های کردند و سونفور چون داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین نیز موجودند، برای مقایسه دقت برآوردها در ارتفاع بالاتر، در این سطح نیز ویژگی‌ها تخمین زده شدند. جهت ارزیابی کلی نتایج، ابتدا درصد تفاوت پارامترهای مشاهده‌شده و برآوردشده (قدر مطلق تفاوت مقدار برآوردشده و مشاهده‌شده تقسیم بر مقدار مشاهده‌شده) محاسبه شد و سپس برای بررسی وجود تفاوت معنادار به لحاظ آماری بین مقادیر برآوردشده و مشاهده‌شده، از آزمون T برای نمونه‌های زوجی در سطح اطمینان ۰/۹۵ بهره گرفته شد (رابطه (۱)):

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) / n}{SE} ; SE = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

که در آن x_i و y_i مقدار مشاهده‌شده و مقدار برآوردشده، s انحراف معیار تفاوت‌ها و n تعداد زوج‌ها است (www.statstutor.ac.uk).

جدول ۲. ایستگاه‌های بادسنجی سانا در استان کرمانشاه و طول دوره آماری موجود

نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	دوره آماری	طول دوره آماری به سال
حاجی‌آباد	۱۳۲۷	۲۰۱۲/۲/۱۷-۲۰۱۵/۱۲/۲۶	۳/۸
کرد غرب	۱۷۲۴	۲۰۱۲/۴/۳۰-۲۰۱۴/۷/۱۴	۲/۲
ماهیدشت	۱۳۳۳	۲۰۰۶/۶/۱۴-۲۰۰۷/۹/۲۱	۱/۲
سونفور	۱۶۸۲	۲۰۱۲/۵/۱-۲۰۱۴/۹/۱۲	۲/۳
ویس	۱۷۶۴	۲۰۱۴/۱۲/۲۹-۲۰۱۵/۸/۱۳	۰/۷

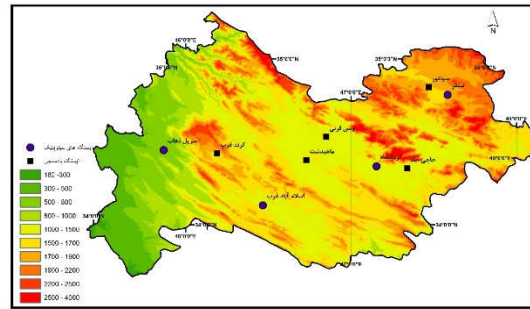
در محدوده مشخصی در اطراف ایستگاه همدیدی براساس یک مدل جریان خطی در نرم‌افزار WASP (تیلور و تونینسن، ۱۹۸۷ و سالمون و همکاران، ۱۹۸۷) با تفکیک مکانی ۳۰۰ متر برآورد شد. با توجه به ناهمواری پیچیده منطقه و کاهش دقت برآورد ویژگی‌های باد با افزایش فاصله و با در نظر گرفتن محدودیت تخمین برای نقاطی با فاصله دست کم ۵ کیلومتر از حاشیه نقشه کاربری و ناهمواری، منطقه به نسبت محدودی (به طول ۱۵ تا ۳۵ کیلومتر) در اطراف ایستگاه مشخص شد و نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد در این محدوده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS آماده شد. در گام بعد، برای ارزیابی دقت داده‌های برآوردشده، از اطلاعات ویژگی‌های باد (پارامترهایی مثل میانگین سرعت باد، میانگین چگالی توان باد، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد بیشینه تولید انرژی) در ایستگاه‌های بادسنجی سانا استفاده شد و با مقایسه ویژگی‌های باد مشاهده‌شده در ایستگاه‌های بادسنجی سانا و ویژگی‌های برآوردشده در محل این ایستگاه‌ها، دقت برآوردها ارزیابی شد.

در ایستگاه‌های بادسنجی سانا، داده‌های باد توسط بادسنج‌های خودکار یا بادنگارها به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌شوند و سرعت باد افقی در دوره‌های ده دقیقه‌ای میانگین‌گیری می‌شود و از طریق سایت این سازمان به طور رایگان در دسترس کاربران قرار می‌گیرد. سانا پنج ایستگاه بادسنجی در استان کرمانشاه نصب کرده است که مشخصات و موقعیت آنها به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۱ ارائه شده است. از بین پنج ایستگاه بادسنجی سانا، ایستگاه ویس قرنی به دلیل اندازه‌گیری سرعت و جهت باد در دوره آماری کمتر از یک سال، کنار گذاشته شد و از داده‌های چهار ایستگاه کردند، سونفور، ماهیدشت و حاجی‌آباد استفاده شد. برای برآورد ویژگی‌های باد در این ایستگاه‌ها سعی شد نزدیک‌ترین ایستگاه همدیدی اصلی یا تکمیلی انتخاب شود؛ بنابراین برای برآورد

زبری سطح به وسیله اندازه و توزیع عناصر ناهموار آن تعیین می‌شود. برای سطوح خشکی این عناصر اغلب شامل گیاهان، ساخت و سازها و سطوح خاک هستند. تروان و پترسون (۱۹۸۹) نواحی مختلف را به چهار کلاس زبری تقسیم کردند. کلاس صفر، شامل نواحی آبی مثل دریا و دریاچه است. ناهمواری این کلاس (\bar{z}_0) برابر 0.002 m است و اغلب صفر فرض می‌شود. کلاس یک زبری، شامل نواحی باز با بادشکن‌های اندک است. مزارع هموار با شیب کم در این گروه هستند. ناهمواری در این کلاس برابر 0.03 m است. کلاس دو شامل مزارع با بادشکن‌هایی با میانگین فاصله بیش از 1000 m و ساختمان‌های پراکنده است. ناهمواری در این کلاس برابر 0.1 m است. کلاس سه شامل نواحی شهری، جنگل‌ها و مزارع با بادشکن‌های زیاد است. ناهمواری در این کلاس برابر 0.4 m است. برای تعیین زبری سطح در منطقه مورد مطالعه، نقشه کاربری اراضی از سازمان جهاد کشاورزی استان کرمانشاه با مقیاس $1:2000000$ دریافت شد. سپس نقشه کاربری زمین در نرم‌افزار ArcGIS بازطبقه‌بندی شد: جنگل‌ها، باغات و مناطق شهری در کلاس سه، اراضی کشاورزی در کلاس دو و مراتع و زمین‌های بایر در کلاس یک بازطبقه‌بندی شدند. در مرحله بعد، با فراخوانی نقشه ناهمواری به WasP Map Editor، نقشه بازطبقه‌بندی‌شده در این نرم‌افزار روی نقشه ناهمواری راقومی شد و مقادیر ناهمواری آنها مشخص شد.

از آنجا که موانع می‌توانند باعث کاهش سرعت باد شوند، داشتن اطلاعاتی درباره موانع اطراف هر ایستگاه بادسنجی جهت تهیه اطلس باد لازم و ضروری است. موانع مؤثر در کاهش سرعت یا پناهگاه باید دو شرط زیر را داشته باشند:

الف. فاصله مانع تا ایستگاه سنجش باد کمتر از 50 برابر ارتفاع مانع باشد؛



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های همبندی (دایره آبی‌رنگ) و ایستگاه‌های بادسنجی (مربع سیاه‌رنگ) در منطقه مورد مطالعه

۳-۱ داده‌های مورد استفاده برای تولید اطلس باد
 نرم‌افزار WASP برای محاسبه اثرهای ناهمواری بر باد در مکانی مشخص به توصیف سامانمند ویژگی‌های محیطی نیاز دارد. برای یک موقعیت مشخص، سه اثر عمده از ناهمواری بر باد وجود دارد: اثرهای زبری، اروگرافی و موانع. در مجموعه داده‌های اطلس باد، اثرهای مربوط به شرایط ویژه مکان (مثل زبری سطح و موانع اطراف ایستگاه‌های اندازه‌گیری) از مشاهدات باد حذف می‌شود؛ بنابراین مجموعه داده‌های اطلس باد مستقل از مکان هستند و ویژگی‌های توزیع داده‌های باد مختص شرایط استاندارد مشخص است. با کاربرد اطلس باد محاسبه‌شده می‌توان اقلیم باد را در هر نقطه و ارتفاع ویژه با اجرای محاسبات معکوس و تعیین ویژگی‌های زمین در اطراف مکان مورد پیش‌بینی تخمین زد. داده‌های ارتفاع مأموریت مکان‌نگاری رادار شاتل (Shuttle Radar Topography Mission) در حال حاضر برای تمامی مناطق خشکی بین 57 درجه جنوبی و 60 درجه شمالی موجود است. این داده‌های شبکه‌ای می‌تواند جهت تولید نقشه منحنی میزان ارتفاع برای کاربرد در نرم‌افزار WASP به کار رود (راهنمای نرم‌افزار WASP، ۱۹۸۷)؛ بنابراین مدل راقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک 30 متر از وبگاه NASA SRTM (<https://earthdata.nasa.gov>) اخذ و نقشه ناهمواری منطقه با استفاده از آن با فواصل منحنی میزان 10 متر در نرم‌افزار ArcGIS تولید شد.

برای محاسبه k و c روش‌های تحلیلی و تجربی مثل روش انحراف معیار به کار می‌رود (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶):

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U - \bar{U})^2}{N-1}}, \quad (3)$$

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1.086}, \quad (4)$$

$$\frac{c}{\bar{U}} = \frac{k^{2.6674}}{0.184 + 0.816k^{2.73855}}, \quad (5)$$

که σ_U ، انحراف معیار باد و \bar{U} ، میانگین سرعت باد است.

۳-۳ نیم‌رخ باد

نیم‌رخ باد با استفاده از قانون لگاریتمی و رتمن (رابطه ۶) به دست می‌آید (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶):

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (6)$$

که در آن $U(z)$ سرعت باد در ارتفاع دلخواه، $U(z_r)$ سرعت باد مرجع در ارتفاع مرجع و z_0 زبری سطح زمین است.

۴-۳ میانگین چگالی توان باد

یکی از مفیدترین معیارها برای برآورد پتانسیل انرژی باد، چگالی توان باد است که مقدار انرژی موجود در یک مکان را برای تولید الکتریسیته با یک توربین بادی نشان می‌دهد. براساس تابع توزیع احتمال ویبول، چگالی تراکم باد به شکل زیر بیان می‌شود (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty U^3 p(U) dU = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right), \quad (7)$$

که در آن ρ ، چگالی هوا ($1/225 \text{ kg/m}^3$) در شرایط استاندارد فشار جوی میانگین در سطح دریا و دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد؛ A ، مساحت عمود بر بردار سرعت باد؛ U ،

ب. ارتفاع مانع بیشتر از یک سوم ارتفاع بادسنج (برای ایستگاه همدیدی ۱۰ متر) باشد. به عبارت دیگر، برای ایستگاه همدیدی، ارتفاع مانع بیشتر از حدود ۳/۳۳ متر باشد.

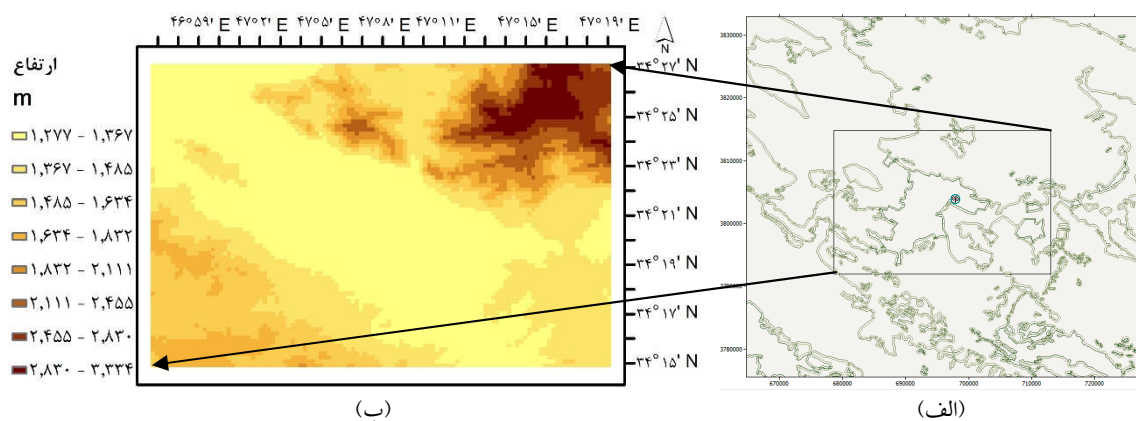
نقشه موانع می‌تواند به وسیله عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای یا اندازه‌گیری در محل فراهم شود. در این بررسی، موقعیت دقیق هر ایستگاه در نقشه گوگل (Google Earth) مشخص و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، موقعیت و ویژگی موانع مؤثر در کاهش سرعت باد مشخص و اطلاعات آن وارد نرم‌افزار WASP شد (رفعتی و همکاران، ۱۳۹۷).

۲-۳ تابع توزیع ویبول

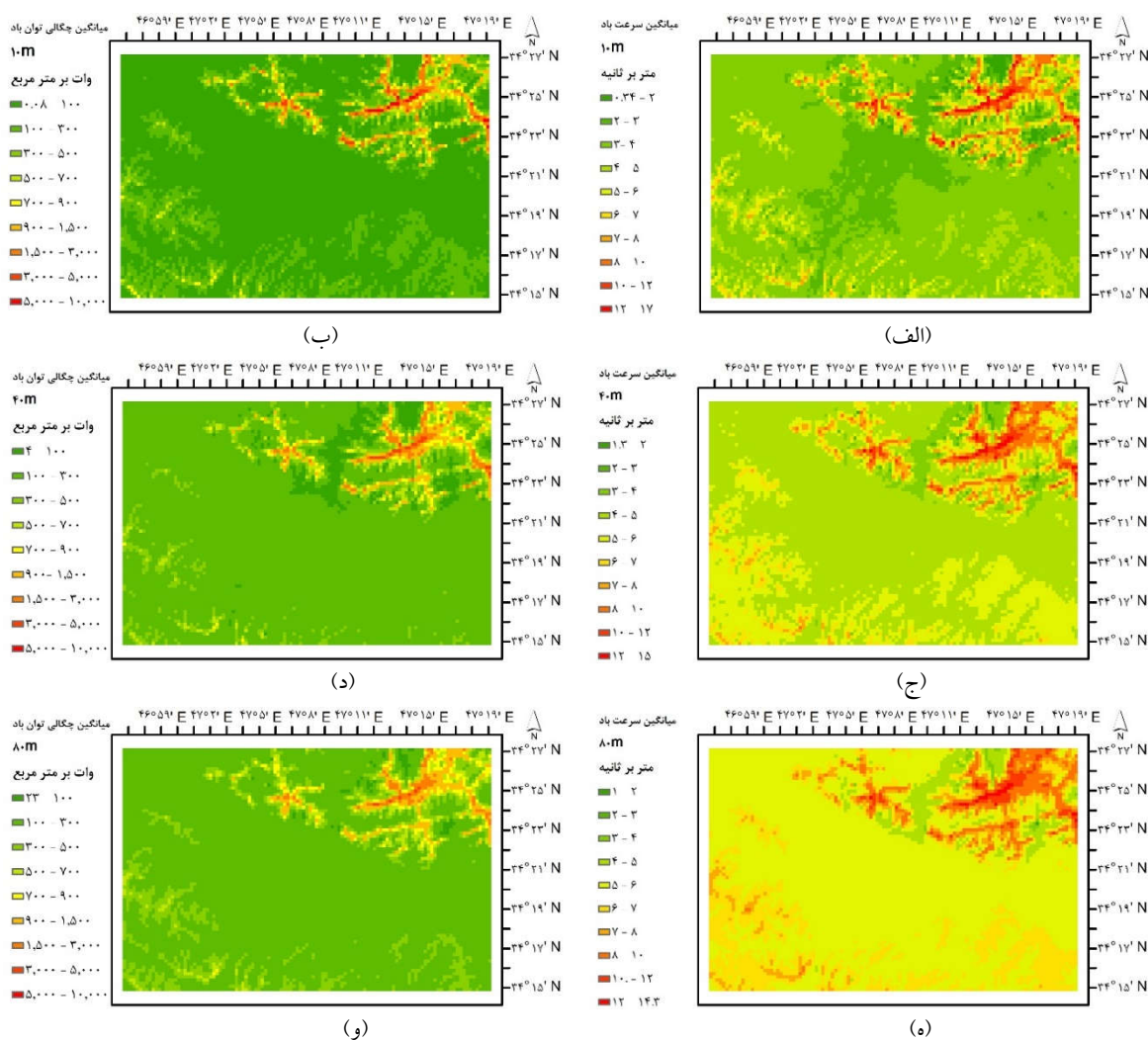
پتانسیل انرژی باد و ویژگی‌های آن می‌تواند با کاربرد تحلیل آماری مشاهدات بلندمدت هواشناسی ارزیابی شود. مهم‌ترین گام در تعیین پتانسیل باد یک مکان، تخمین تابع توزیع احتمال سرعت باد است. توابع احتمال مختلفی همانند توزیع‌های ویبول، ریلی، لگ نرمال، گاما و بتا با سه پارامتر می‌توانند برای توصیف توزیع فراوانی سرعت باد در یک دوره زمانی به کار روند. در بین توابع توزیع احتمال، تابع توزیع ویبول به دلیل سادگی و دقت آن بیشتر استفاده می‌شود (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶). این تابع بدون شک یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای تحلیل آماری بررسی خصوصیات باد و پتانسیل انرژی باد است (شو و همکاران، ۲۰۱۵) و با رابطه زیر بیان می‌شود (دباغیان و همکاران، ۲۰۱۶):

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right], \quad (2)$$

که $p(U)$ احتمال باد با سرعت U است. k ، پارامتر شکل (بدون بعد) و c ، فاکتور مقیاس بر حسب متر بر ثانیه است.



شکل ۲. (الف) نقشه زبری و محدوده برآورد نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد (ب) ارتفاع در محدوده ایستگاه کرمانشاه



شکل ۳. (الف) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ب) چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ج) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (د) چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (ه) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری؛ (و) چگالی توان باد در ارتفاع ۸۰ متری، از سطح زمین در محدوده ایستگاه کرمانشاه

جدول ۳. میانگین سرعت و چگالی توان باد در ایستگاه کرمانشاه

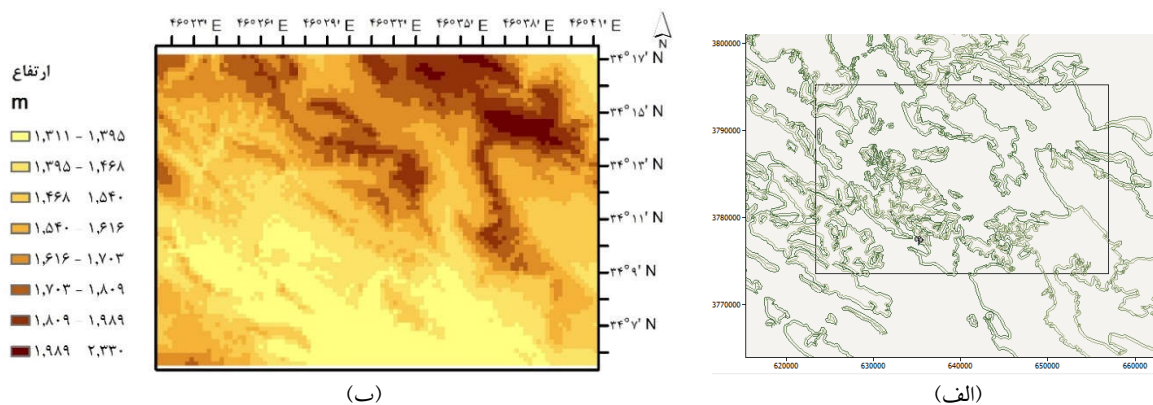
ارتفاع (m)	زبری کلاس ۱ (۰/۰۳ m)	زبری کلاس ۲ (۰/۱ m)	زبری کلاس ۳ (۰/۴ m)
سرعت باد (m/s)	۴/۱۵	۳/۶۳	۲/۸۶
چگالی توان باد (w/m ²)	۱۱۹	۷۸	۳۸
سرعت باد (m/s)	۵/۴۱	۴/۹۵	۴/۲۵
چگالی توان باد (w/m ²)	۲۲۲	۱۷۰	۱۰۹
سرعت باد (m/s)	۶/۲۸	۵/۷۹	۵/۱
چگالی توان باد (w/m ²)	۳۰۱	۲۳۶	۱۶۴

جدول ۴. میانگین سرعت و چگالی توان باد در ایستگاه اسلام‌آباد غرب

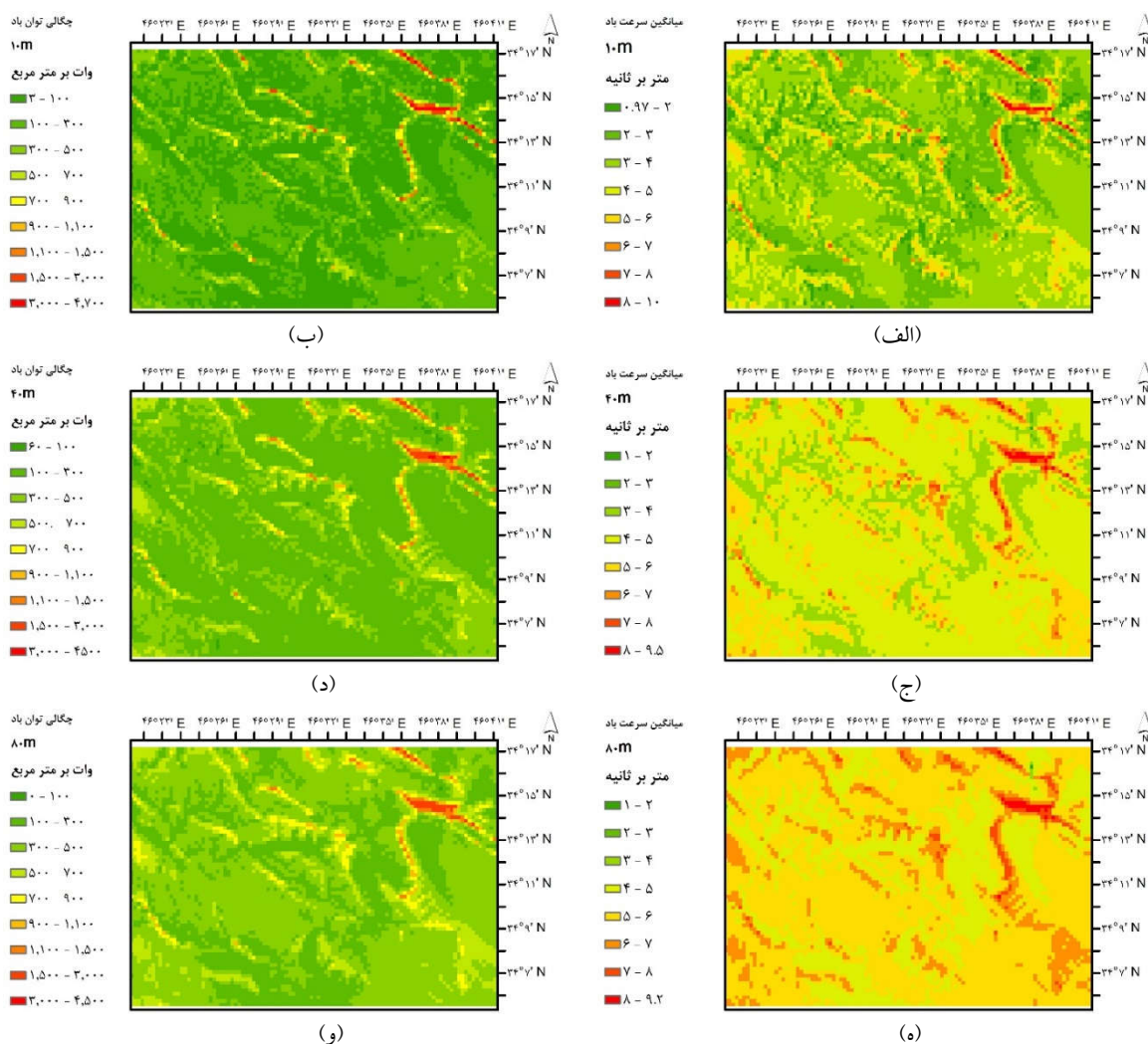
ارتفاع (m)	زبری کلاس ۱ (۰/۰۳ m)	زبری کلاس ۲ (۰/۱ m)	زبری کلاس ۳ (۰/۴ m)
سرعت باد (m/s)	۴/۲۶	۳/۷	۲/۸۹
چگالی توان باد (w/m ²)	۲۱۸	۱۴۳	۶۸
سرعت باد (m/s)	۵/۴۱	۴/۹۲	۴/۲۲
چگالی توان باد (w/m ²)	۴۰۴	۳۰۷	۱۹۵
سرعت باد (m/s)	۶/۱	۵/۶۳	۴/۹۶
چگالی توان باد (w/m ²)	۵۲۱	۴۲۰	۲۹۱

شده را برای ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ مشخص می‌شود میانگین سرعت باد و میانگین چگالی توان باد در ستیغ ارتفاعات بسیار زیاد است به طوری که میانگین چگالی توان باد تا حدود ۵۰۰۰ وات بر متر مربع می‌رسد، درحالی‌که در دیگر نقاط منطقه، مقادیر آن بسیار کمتر برآورد شده است. میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در بیشتر نقاط حدود ۲ تا ۴ متر بر ثانیه و در بخش محدودی از آن تا حدود ۵ متر بر ثانیه است. در ارتفاع ۴۰ متری، میانگین سرعت باد در بیشتر نقاط ۴ تا ۶ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۸۰ متری نیز در حدود ۵ تا ۷ متر بر ثانیه برآورد شده است. میانگین چگالی توان باد در بیشتر نقاط منطقه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین کمتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع است. میانگین چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری، حدود ۲۰۰ وات بر متر مربع و در برخی مناطق محدودتر حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ وات بر متر مربع و در ارتفاع ۸۰ متری نیز حدود ۴۰۰ وات بر متر مربع و در برخی نقاط محدودتر حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ وات بر متر مربع تخمین زده شد.

میانگین سرعت باد و چگالی توان برآوردشده در ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ متری از سطح زمین و زبری سطح ۰/۰۳، ۰/۱ و ۰/۴ در ایستگاه اسلام‌آباد غرب در جدول ۴ ارائه شده است. در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، در کلاس‌های زبری مختلف، میانگین سرعت باد ۲/۸۹ تا ۴/۲۶ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد ۶۸ تا ۲۱۸ وات بر متر مربع است. در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، میانگین سرعت باد ۴/۲۲ تا ۵/۴۱ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد ۱۹۵ تا ۴۰۴ وات بر متر مربع و در نهایت در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین، میانگین سرعت باد ۴/۹۶ تا ۶/۱ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد ۲۹۱ تا ۵۲۱ وات بر متر مربع برآورد شده است. نقشه زبری محدوده ایستگاه اسلام‌آباد غرب، موقعیت بادسنج و محدوده برآورد نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد و همچنین ارتفاع آن در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود (شکل ۴-ب)، ارتفاع این منطقه از حدود ۱۳۰۰ متر تا ۲۳۰۰ متر از سطح دریا متغیر است و از سمت جنوب به سمت شمال افزایش یافته است. شکل ۵ میانگین سرعت و چگالی توان باد در محدوده مشخص -



شکل ۴. (الف) نقشه زبری و محدوده برآورد نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد (ب) ارتفاع در محدوده ایستگاه اسلام‌آباد غرب



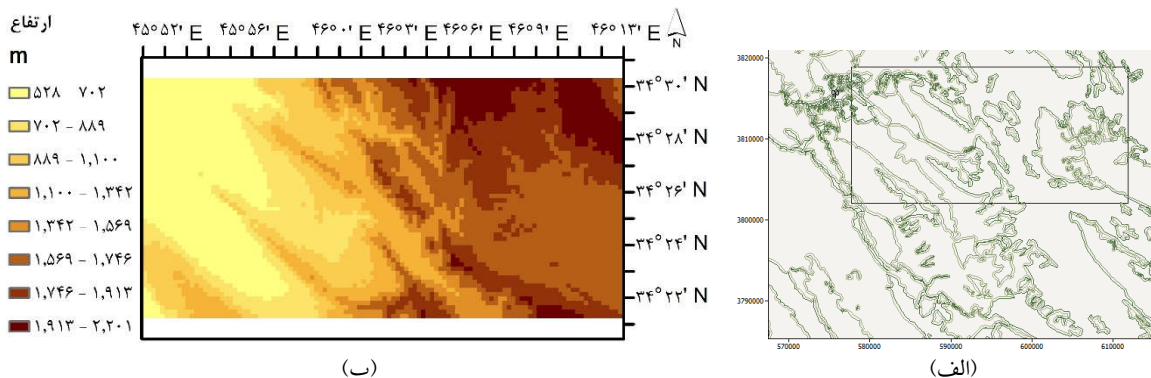
شکل ۵. (الف) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ب) چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ج) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (د) چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (ه) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری؛ (و) چگالی توان باد در ارتفاع ۸۰ متری، از سطح زمین در محدوده ایستگاه اسلام‌آباد غرب

سطح زمین نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، ارتفاع منطقه مشخص شده از حدود ۵۰۰ تا ۲۲۰۰ متر متغیر است. بخش غربی منطقه کم‌ارتفاع است (۵۰۰ تا ۷۰۰ متر از سطح دریا) و به سمت شرق، ارتفاع افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، در ستیج ارتفاعات، میانگین سرعت باد و چگالی توان باد زیاد است. در دیگر نقاط منطقه، در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، میانگین سرعت باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه و در برخی نقاط هم نزدیک به ۴ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد برای بیشتر نقاط کمتر از ۱۵۰ وات بر متر مربع برآورد شده است. در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین نیز میانگین سرعت باد در بیشتر نقاط منطقه بین ۲ تا حدود ۳/۵ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۸۰ متری بین ۳ تا حدود ۵ متر بر ثانیه برآورد شده است. میانگین چگالی توان باد نیز در ارتفاع ۴۰ متری برای بیشتر نقاط منطقه کمتر از ۲۰۰ و در ارتفاع ۸۰ متری کمتر از ۲۵۰ وات بر متر مربع تخمین زده شده است.

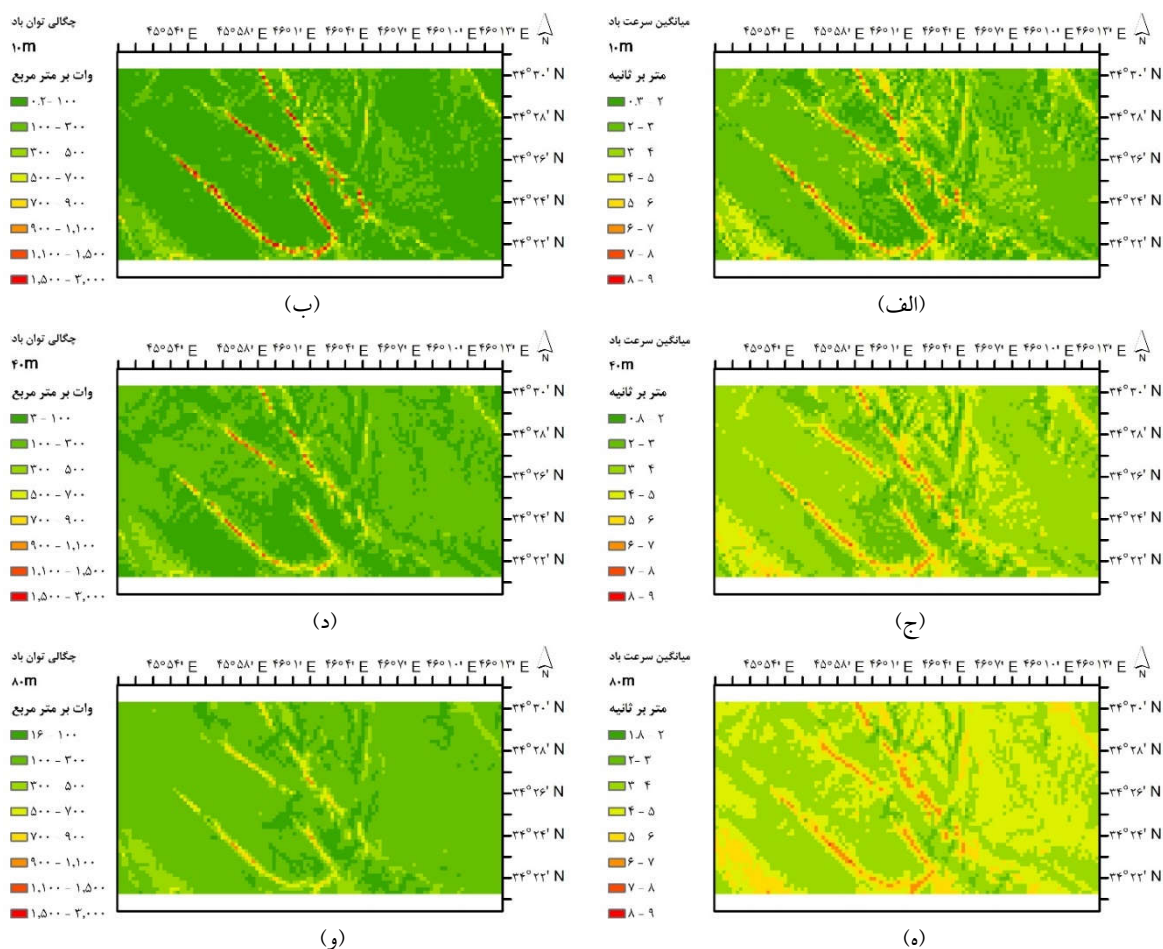
جدول ۵ میانگین سرعت و چگالی توان باد برآورد شده برای زبری سطحی ۰/۳، ۰/۱، ۰/۴ و ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ متری از سطح زمین را در ایستگاه سریپل ذهاب نشان می‌دهد. در ارتفاع ۱۰ تا ۸۰ متری از سطح زمین در کلاس یک زبری سطح ($\tau_0=0/03$)، میانگین سرعت باد از ۳/۰۲ تا ۴/۵۲ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد از ۹۳ تا ۲۱۳ وات بر متر مربع، در کلاس دو زبری سطح ($\tau_0=0/1$)، میانگین سرعت باد از ۲/۶۲ تا ۴/۱۵ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد از ۶۱ تا ۱۶۹ و در نهایت، در کلاس سه زبری سطح ($\tau_0=0/4$)، میانگین سرعت باد از ۲/۰۵ تا ۳/۶۳ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد از ۲۹ تا ۱۱۹ وات بر متر مربع متغیر است. نقشه زبری محدوده ایستگاه سریپل ذهاب، موقعیت بادسنج و محدوده برآورد نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد و همچنین ارتفاع آن در شکل ۶ ارائه شده است. شکل ۷ میانگین سرعت و چگالی توان باد در محدوده مشخص شده را برای ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ متری از

جدول ۵. میانگین سرعت و چگالی توان باد در ایستگاه سریپل ذهاب

ارتفاع (m)	زبری کلاس ۱ (۰/۰۳ m)	زبری کلاس ۲ (۰/۱ m)	زبری کلاس ۳ (۰/۴ m)
۱۰	سرعت باد (m/s)	۳/۰۲	۲/۰۵
	چگالی توان باد (w/m^2)	۹۳	۲۹
۴۰	سرعت باد (m/s)	۳/۹۲	۳/۰۴
	چگالی توان باد (w/m^2)	۱۶۶	۸۲
۸۰	سرعت باد (m/s)	۴/۵۲	۳/۶۳
	چگالی توان باد (w/m^2)	۲۱۳	۱۱۹



شکل ۶. (الف) نقشه زبری و محدوده برآورد نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد (ب) ارتفاع در محدوده ایستگاه سریپل ذهاب



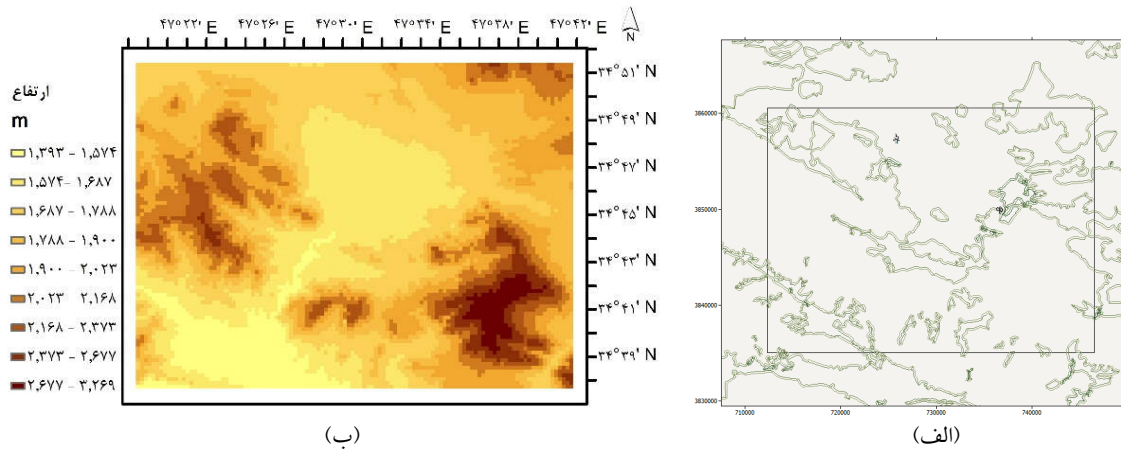
شکل ۷. (الف) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ب) چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ج) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (د) چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (ه) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری؛ (و) چگالی توان باد در ارتفاع ۸۰ متری، از سطح زمین در محدوده ایستگاه سرپل ذهاب

تخمین زده شد. نقشه زبری محدوده ایستگاه سنقر، موقعیت بادسنج و محدوده برآورد نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد و همچنین ارتفاع آن در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارتفاع این منطقه از حدود ۱۴۰۰ تا ۳۲۷۰ متر از سطح دریا متغیر است. بخش‌های جنوب‌شرقی، غربی و بخش کوچکی از شمال‌شرق منطقه، ارتفاعی بیش از ۱۸۰۰ متر دارند. شکل ۹ میانگین سرعت و چگالی توان باد در محدوده مشخص شده را برای ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰، ۸۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، میانگین سرعت باد به‌استثنای ستیغ کوه‌ها و بخش‌های مرتفع، اغلب بین ۳ تا ۴ متر بر ثانیه و در بخش

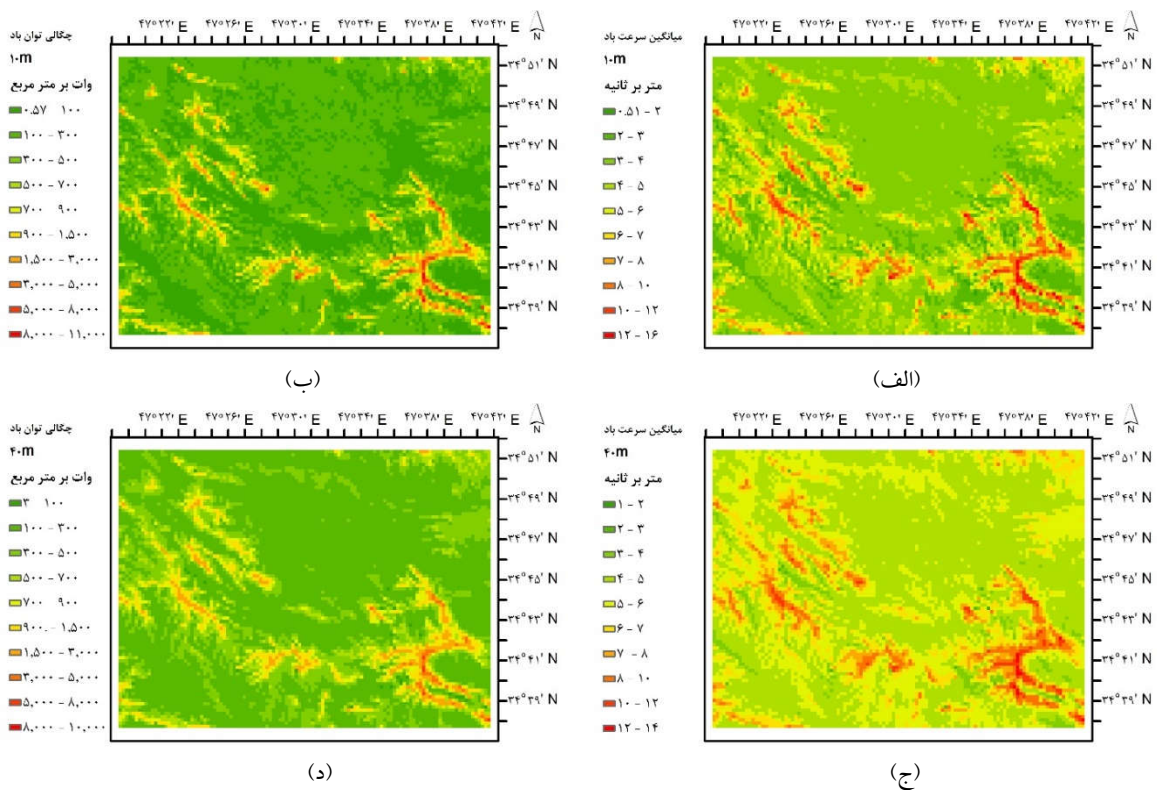
میانگین سرعت و چگالی توان باد برآورد شده برای زبری سطحی ۰/۰۳، ۰/۱ و ۰/۴ متر و ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ متری از سطح زمین در ایستگاه سنقر، در جدول ۶ ارائه شده است. بنا بر اطلس باد تولید شده، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ تا ۸۰ متری از سطح زمین در بخش‌هایی با زبری سطحی ۰/۰۳ m بین ۴/۳۱ تا ۶/۱۷ متر بر ثانیه، در زبری سطحی ۰/۱ m بین ۳/۷۴ تا ۵/۶۸ متر بر ثانیه و در زبری سطحی ۰/۴ m بین ۲/۹۱ تا ۴/۹۸ متر بر ثانیه برآورد شده است. همچنین میانگین چگالی توان باد نیز در زبری سطحی ۰/۰۳ m از ۱۸۲ تا ۴۵۳ وات بر متر مربع، در زبری سطحی ۰/۱ m از ۱۱۹ تا ۳۶۰ وات بر متر مربع و در زبری سطحی ۰/۴ m از ۵۷ تا ۲۵۱ وات بر متر مربع

ارتفاع ۸۰ متری نیز میانگین سرعت باد اغلب بین ۵/۵ تا ۶/۵ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ وات بر متر مربع برآورد شده است.

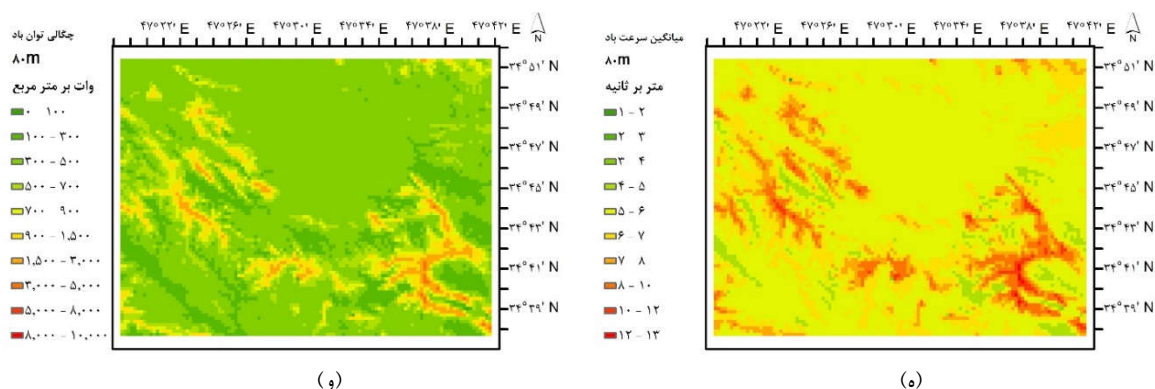
محدودتری بین ۴ تا ۵ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد بین ۶۰ تا ۱۸۰ وات بر متر مربع تخمین زده شد. در ارتفاع ۴۰ متری، میانگین سرعت باد در حدود ۴ تا ۵/۵ متر بر ثانیه و میانگین چگالی توان باد بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ وات بر متر مربع و در



شکل ۸. (الف) نقشه زبری و محدوده برآورد نقشه‌های میانگین سرعت و چگالی توان باد (ب) ارتفاع در محدوده ایستگاه سنقر



شکل ۹. (الف) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ب) چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری؛ (ج) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (د) چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری؛ (ه) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری؛ (و) چگالی توان باد در ارتفاع ۸۰ متری، از سطح زمین در محدوده ایستگاه سنقر



ادامه شکل ۹.

جدول ۶. میانگین سرعت و چگالی توان باد در ایستگاه سنقر

ارتفاع (m)	زبری کلاس ۱ (۰/۰۳ m)	زبری کلاس ۲ (۰/۱ m)	زبری کلاس ۳ (۰/۴ m)
سرعت باد (m/s)	۴/۳۱	۳/۷۴	۲/۹۱
چگالی توان باد (w/m ²)	۱۸۲	۱۱۹	۵۷
سرعت باد (m/s)	۵/۴۷	۴/۹۸	۴/۲۵
چگالی توان باد (w/m ²)	۳۴۳	۲۶۰	۱۶۵
سرعت باد (m/s)	۶/۱۷	۵/۶۸	۴/۹۸
چگالی توان باد (w/m ²)	۴۵۳	۳۶۰	۲۵۱

۲-۴ ارزیابی دقت برآوردها

در این بخش، با مقایسه ویژگی‌های باد مشاهده‌شده در ایستگاه‌های بادسنجی سانا و ویژگی‌های برآوردشده در محل این ایستگاه‌ها، دقت برآوردها ارزیابی می‌شود. نتایج مقایسه برآوردها و مقادیر مشاهده‌شده در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان اختلاف میانگین سرعت باد مشاهده‌شده و برآوردشده (قدر مطلق تفاوت مقدار برآوردشده و مشاهده‌شده تقسیم بر مقدار مشاهده‌شده) در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین در ایستگاه‌های سونقور (۰/۱) و حاجی‌آباد (۰/۳/۸) بسیار کم و در ایستگاه ماهیدشت (۰/۳۳/۶) به نسبت زیاد است. در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین، درصد تفاوت در ایستگاه سونقور افزایش (۰/۱۴/۹) و در ایستگاه کرند (۰/۱۰/۷) کاهش یافته است. اختلاف بین میانگین چگالی توان باد مشاهده‌شده و برآوردشده نیز در ایستگاه‌های ماهیدشت

در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین و سونقور در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین (به ترتیب ۰/۱۹۴٪ و ۰/۶۸٪) زیاد و در دیگر ایستگاه‌ها کم است. همچنین اختلاف بین سرعت باد پیشینه تولید انرژی مشاهده‌شده و برآوردشده در ایستگاه‌های ماهیدشت در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین و سونقور در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین به ترتیب ۰/۶۳/۶٪ و ۰/۳۲/۴٪ بیشتر است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، محتمل‌ترین سرعت باد مشاهده‌شده در بیشتر ایستگاه‌ها از مقادیر برآوردشده بیشتر است که به دلیل دقت بهتر ابزارهای سنجش سرعت باد در ایستگاه‌های سانا نسبت به ایستگاه‌های همدیدی در ثبت سرعت‌های کم باد است؛ بنابراین به‌استثنای ایستگاه ماهیدشت، نتایج قابل‌قبولی در سه ایستگاه دیگر، به‌ویژه با توجه به ناهمواری پیچیده منطقه به‌دست آمده است. تفاوت زیاد ویژگی‌های باد در ایستگاه ماهیدشت نیز به دلیل فاصله زیاد این ایستگاه

جهت ارزیابی کلی نتایج و بررسی وجود تفاوت معنادار به لحاظ آماری بین مقادیر برآوردشده و مشاهده‌شده، از آزمون T برای نمونه‌های زوجی بهره گرفته شد. جدول ۸ نتایج این آزمون را برای پارامترهای مورد بررسی در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با توجه به اینکه احتمال صحت فرض صفر (نبود تفاوت) بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است ($\text{sig} > 0/05$) برای هیچ‌یک از پارامترها در سطح اطمینان ۹۵٪ تفاوت معناداری وجود ندارد.

از ایستگاه اسلام‌آباد غرب در منطقه‌ای با ناهمواری پیچیده است. همچنین نتایج در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین در ایستگاه سونفور هم چندان رضایت‌بخش نبوده است. به عبارت دیگر، ناهمواری پیچیده منطقه باعث کاهش دقت برآورد نیم‌رخ باد با قانون لگاریتمی و رتمن شده است. لازم به یادآوری است که بخشی از تفاوت‌های موجود ناشی از تشابه نداشتن دوره آماری داده‌ها است و از آنجاکه انتخاب دوره مشترک ممکن نبود، با وجود تفاوت در دوره آماری، به همین داده‌ها اکتفا شد.

جدول ۷. مقایسه نتایج برآوردها و مقادیر مشاهده‌شده در ایستگاه‌های سانا

ایستگاه	ارتفاع از سطح زمین	میانگین سرعت باد (m/s)	پارامتر C ویبول (m/s)	پارامتر k ویبول	میانگین چگالی توان باد (w/m^2)	محتمل‌ترین سرعت باد (m/s)	سرعت باد بیشینه تولید انرژی (m/s)
حاجی‌آباد	۴۰m	مشاهده‌شده	۴/۶۷	۵/۲	۱/۴	۲/۱۲	۹/۸
	۴۰m	برآوردشده	۴/۸۵	۵/۴	۱/۴۸	۲/۵۲	۹/۶۲
	۴۰m	مشاهده‌شده	۳/۶	۳/۹	۱/۲۹	۱/۲۳	۸/۰۶
ماهیدشت	۴۰m	برآوردشده	۴/۸۱	۵	۱/۰۸	۰/۴۵	۱۳/۱۹
	۴۰m	مشاهده‌شده	۴/۴۲	۴/۸	۱/۴۲	۲/۰۴	۸/۹۱
	۴۰m	برآوردشده	۳/۶۸	۳/۸	۱/۰۹	۰/۳۹	۹/۸۸
سونفور	۴۰m	مشاهده‌شده	۴/۷۵	۵/۳	۱/۵۱	۲/۵۸	۹/۲۷
	۴۰m	برآوردشده	۴/۷	۵/۰۶	۱/۲	۱/۱۴	۱۱/۴۶
	۴۰m	مشاهده‌شده	۴/۳۹	۵/۳	۱/۴۶	۲/۴	۹/۵۷
کرنند	۸۰m	برآوردشده	۴/۸۶	۴/۶	۱/۱۶	۰/۸۳	۱۰/۹۱
	۸۰m	مشاهده‌شده	۴/۸۳	۵/۵	۱/۵۱	۲/۶۸	۹/۶۲
	۸۰m	برآوردشده	۵/۵۵	۶/۰۷	۱/۲۶	۱/۷۳	۱۲/۹۱

جدول ۸. نتایج آزمون T برای نمونه‌های زوجی

میانگین تفاوت‌ها	انحراف معیار تفاوت‌ها	میانگین خطای استاندارد	آماره t	sig
میانگین سرعت باد	۰/۸۱	۰/۴۰	-۰/۳۷	۰/۸۳
پارامتر C ویبول	۰/۸۸	۰/۴۴	-۰/۰۳۴	۰/۹۷
پارامتر k ویبول	۰/۱۹	۰/۰۹	۲/۰۳	۰/۱۳
میانگین چگالی توان باد	۹۹	۵۰	-۰/۹۵	۰/۴۱
محتمل‌ترین سرعت باد	۰/۹۲	۰/۴۶	۱/۸۸	۰/۱۶
سرعت باد بیشینه تولید انرژی	۲/۲۸	۱/۱۴	-۱/۷۸	۰/۱۷

۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پتانسیل باد در محدوده چند ایستگاه همدیدی استان کرمانشاه برآورد شد. در نزدیکی این ایستگاه‌ها، ایستگاه‌های بادسنجی سانا تأسیس شده بود. با مقایسه ویژگی‌های باد مشاهده‌شده در ایستگاه‌های بادسنجی سانا با ویژگی‌های برآوردشده در محل این ایستگاه‌ها، دقت برآوردها ارزیابی شده است. از بین پنج ایستگاه بادسنجی سانا، ایستگاه ویس‌قرنی به دلیل اندازه‌گیری سرعت باد در دوره آماری کمتر از یک‌سال، کنار گذاشته شد و از داده‌های چهار ایستگاه کردند، سونقور، ماهیدشت و حاجی‌آباد استفاده شد. برای برآورد ویژگی‌های باد در ایستگاه کردند از داده‌های ایستگاه سرپل‌ذهاب، در ایستگاه سونقور از داده‌های ایستگاه سنقر، در ایستگاه ماهیدشت از داده‌های ایستگاه اسلام‌آباد و در ایستگاه حاجی‌آباد از داده‌های ایستگاه کرمانشاه استفاده شد. از آنجا که اندازه‌گیری‌ها برای تمام ایستگاه‌ها در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین موجود است، ویژگی‌های باد در این ارتفاع برآورد شد، اما برای ایستگاه‌های کردند و سونقور چون داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین نیز موجودند، برای مقایسه دقت برآوردها در ارتفاع بالاتر، در این سطح نیز ویژگی‌ها تخمین زده شدند. اطلس باد در هر ایستگاه با کاربرد نرم‌افزار WASP و نقشه‌های میانگین سرعت باد و چگالی توان باد در ارتفاع‌های ۱۰، ۴۰، و ۸۰ متری از سطح زمین با استفاده از نرم‌افزارهای WASP و ArcGIS در محدوده مشخصی تهیه شد. سپس میزان دقت برآوردها با استفاده از داده‌های بادسنجی ایستگاه‌های سانا و پارامترهایی مثل میانگین سرعت باد، میانگین چگالی توان باد، محتمل‌ترین سرعت باد و سرعت باد بیشینه تولید انرژی بررسی شد. نتایج نشان داد به‌استثنای ایستگاه ماهیدشت، نتایج قابل‌قبولی در سه ایستگاه دیگر، به‌ویژه با توجه به

ناهمواری پیچیده منطقه به‌دست‌آمده است. تفاوت زیاد ویژگی‌های باد در ایستگاه ماهیدشت نیز به دلیل فاصله زیاد این ایستگاه از ایستگاه اسلام‌آباد غرب در منطقه‌ای با ناهمواری پیچیده است. همچنین نتایج در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین در ایستگاه سونقور هم چندان رضایت‌بخش نبود. به‌عبارت‌دیگر، ناهمواری پیچیده منطقه باعث کاهش دقت برآورد نیم‌رخ باد با قانون لگاریتمی و رتمن شده است. نتایج آزمون T برای نمونه‌های زوج شده نشان داد تفاوت معنی‌داری به لحاظ آماری در سطح اطمینان ۰/۹۵ بین مقادیر مشاهده‌شده و برآوردشده وجود ندارد؛ بنابراین می‌توان از مدل خطی ارائه‌شده در نرم‌افزار WASP برای پیش‌بینی ویژگی‌های باد در فواصل به‌نسبت نزدیک به ایستگاه اندازه‌گیری در مناطق کوهستانی نیز بهره برد.

برآورد پتانسیل باد در محدوده‌های مورد بررسی نشان داد که به‌طور کلی نواحی با میانگین سرعت باد زیاد و چگالی توان باد بسیار خوب (بیش از ۷۰۰ وات بر متر مربع)، در بخش‌های مرتفع منطقه و ستیغ کوه‌ها (ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر) قرار گرفته است. در بخش‌هایی با ارتفاع کمتر که در آن امکان بیشتری برای تأسیس نیروگاه بادی فراهم است، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین در محدوده ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد و سنقر در حدود ۴ تا ۶ متر بر ثانیه و چگالی توان باد در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ وات بر متر مربع برآورد شده است، اما در محدوده ایستگاه سرپل‌ذهاب این مقادیر کمتر و میانگین سرعت باد اغلب در این ارتفاع در حدود ۲ تا ۴ متر بر ثانیه و چگالی توان باد کمتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع برآورد شده که ناچیز است.

سپاسگزاری

از حمایت مالی شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه در این تحقیق (در قالب طرح پژوهشی) تقدیر می‌شود.

منابع

- برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، ۱(۲)، ۹۳-۱۱۰.
- گندم‌کار، ا.، ۱۳۸۸، ارزیابی پتانسیل باد در کشور ایران: مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۰(۴)، ۸۵-۱۰۰.
- محمدی، ح.، رستمی، ش.، تقوی، ف. و شمسی‌پور، ع.، ۱۳۹۱، پتانسیل سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه: پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴(۲)، ۱۹-۳۲.
- محمدی، ب.، ۱۳۹۴، ارزیابی توان باد در استان کردستان: فیزیک زمین و فضا، ۴۱(۲)، ۳۲۳-۳۳۵.
- مجرد، ف. و همتی، ش.، ۱۳۹۲، ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان: نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۳(۲۹)، ۱۳۷-۱۵۷.
- معروفی، ص.، سقایی، ص. و ارشاد فتح، ف.، ۱۳۹۶، بررسی توزیع مکانی سرعت باد با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و کلاسه‌بندی آن براساس روش تحلیل خوشه‌ای: مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۴۰(۱/۱)، ۴۹-۵۹.
- Ameri, M., Ghadiri, M., and Hosseini, M., 2006, Recent advances in the implementation of wind energy in Iran: The 2nd joint international conference on "Sustainable energy and environment (SEE 2006), Bangkok, Thailand.
- Bernhard, L, and Jorgen, H., 2001, Evaluation of the wind-resource estimation program WAsP for offshore applications: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **89**, 271-291.
- Boudia, M., and Guerri, o., 2015, Investigation of wind power potential at Oran, northwest of Algeria: Energy Conversion and Management, **105**, 81-92.
- Dabbaghiyan, A., Fazelpour, F., Dehghan Abnavi, M., and Rosen, M. A., 2016, Evaluation of wind energy potential in province of Bushehr, Iran: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **55**, 455-466.
- Djamai, M., and Merzouk, N. K., 2011, Wind farm feasibility study and site selection in اختصاصی، م. و قایمی‌نیا، ع.، ۱۳۹۶، پهنه‌بندی سرعت وزش باد بیشینه احتمالی در دوره بازگشت‌های مختلف در بخشی از مرکز ایران: مجله مهندسی اکوسیستم بیابان، ۶(۱۵)، ۴۹-۵۸.
- جهانبخش، س.، رضایی بنفشه، م.، دین‌پژوه، ی. و اسمعیل‌پور، م.، ۱۳۹۳، امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان: پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۶(۳)، ۲۶۱-۲۷۴.
- حاجیلو، ف. و جلوخانی نیارکی، م.، ۱۳۹۵، مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل ANP-OWA (مطالعه موردی: استان زنجان): نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، ۶(۱)، ۷۳-۸۶.
- خسروی، م.، ابراهیمی، م. و بهروزی، م.، ۱۳۹۵، بررسی وضعیت انرژی باد در استان خوزستان به‌منظور استفاده از توربین‌های بادی: فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ۶(۲۲)، ۲۹-۴۲.
- ذوالفقاری، ح.، ۱۳۸۴، بررسی فصول طبیعی در استان کرمانشاه: تحقیقات جغرافیایی، ۲۰(۷۶)، ۹۰-۱۰۶.
- رحیم‌زاده، ف.، پدرام، م.، صداقت‌کردار، ع. و کمالی، غ.، ۱۳۸۸، برآورد انرژی باد در ایستگاه‌های همدیدی استان اصفهان: مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۰(۳)، ۱۵۵-۱۷۲.
- رفعتی، س.، کریمی، م. و سام‌دلیری، ا.، ۱۳۹۷، پتانسیل‌یابی انرژی باد و ارزیابی اقتصادی تأسیس نیروگاه بادی در استان کرمانشاه: طرح پژوهشی شرکت توزیع نیروی برق کرمانشاه.
- صادقی، ز.، دلال‌باشی، ز. و حری، ح.، ۱۳۹۲، الویت‌بندی عوامل مؤثر بر مکان‌یابی نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی و باد) استان کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره: پژوهش‌های

- Troen, I., Bechmann, A., Kelly, M. C., Sørensen, N. N., Réthoré, P. E., Cavar, D., and Ejsing Jørgensen, H., 2014, Complex terrain wind resource estimation with the wind-atlas method: Prediction errors using linearized and nonlinear CFD micro-scale models: Proceedings of EWEA 2014., European Wind Energy Association.
- Troen, I., and Lundtang Petersen, E., 1989, European Wind Atlas, Roskilde: Risø National Laboratory.
- Taylor, P. A., and Teunissen, H. W., 1987, The Askervein Hill project: overview and background data: *Boundary-Layer Meteorology*, **39**, 15-39.
- Waewsak, J., Chaichana, T., Chancham, C., Landry, M., and Gagnon, Y., 2014, Micro-siting wind resource assessment and near shore wind farm analysis in Pakpanang district, Nakhon Si Thammarat province, Thailand: *Energy Procedia*, **52**, 204-215.
- WASP, 1987, Wind Atlas Analysis and Application Program: Risø National Laboratory, <http://www.wasp.dk/>.
- WWEA, 2010, World Wind Energy Report 2009, www.wwindea.org.
- Adrar, Algeria: *Energy Procedia*, **6**, 136-142.
- Hennessey, Jr., 1977, Some aspects of wind power statistics: *Journal of Applied Meteorology*, **16**(2), 119-128.
- Miljødata, E. o., 2002, Case studies calculating wind farm production-Main Report. Denmark: Energi-og Miljødata.
- Salmon, J. R., Bowen, A. J., Hoff, A. M., Johnson, R., Mickle, R. E., Taylor, P. A., Tetzlaff, G., and Walmsley, J. L., 1987, The Askervein Hill Project: Mean wind variations at fixed heights above ground: *Boundary-Layer Meteorology*, **43**, 247-271.
- Shaahid, S. M., Al-Hadhrami, L. M., and Rahman, M. K., 2014, Potential of Establishment of Wind Farms in Western Province of Saudi Arabia: *Energy Procedia*, **52**, 497-505.
- Shu, Z. R., Li, Q. S., and Chan, P. W., 2015, Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential: Hong Kong: *Energy Conversion and Management*, **101**, 644-657.
- Sun, X., Huang, D., and Wu, G., 2012, The current state of offshore wind energy technology development: *Energy*, **41**, 298-312.

Prediction of wind potential and assessment of accuracy in mountainous areas (Case study: Kermanshah province)

Somayeh Rafati^{1*}, and Mostafa Karimi²

¹Assistant Professor of Geography, Sayyed Jamaledin Asadabadi University, Hamedan, Iran

²Assistant Professor of climatology, Tehran University, Tehran, Iran

(Received: 15 August 2018, Accepted: 04 February 2019)

Summary

The harvesting of renewable energy sources has become increasingly important to take account of the gradual decline of fossil fuel reserves and the environment degradation associated with the use of fossil fuels. Wind energy, as one of the most well-known renewable energy sources, has been extensively harnessed across the world (Shu et al., 2015). Utilization of energy from wind has gained appreciable momentum and is being widely disseminated for displacement of oil-produced energy, and eventually to reduce the catastrophic effects of fossil fuel energy on environment (Shaahid et al., 2014). Using of wind energy depends on precise prediction of wind properties in areas with no measurement; thus, this paper aimed to evaluate wind potential predictions presented by WAsP software in mountainous areas such as Kermanshah province.

In this study, wind potential was estimated around four synoptic stations where there are SANA wind stations and then predicted and observed wind properties were compared for evaluation of accuracy. Wind data of synoptic stations in Sarpolzahab, Sonqor, Eslamabad, and Kermanshah was used for prediction of wind properties in SANA stations in Kerend, Sounqour, Mahidasht, and Hajiabad sites, respectively. The measurements were used in 40 m AGL (for all cases) and 80 m AGL (for Kerend and Sounqour sites). Using WAsP and ArcGIS software, wind atlas and then mean wind speed and mean wind power density maps were prepared in 10, 40 and 80 m AGL and a relatively limited area (15 to 35 km long) around each station. Then, using measurements in SANA stations and parameters such as mean wind speed, mean wind power density, most probable and maximum energy-carrying wind speed, the accuracy of estimates was assessed.

The results showed that predicted wind properties were acceptable in Kerend, Hajiabad and Sounqour at 40 m AGL, but they were somewhat different in Mahidasht which is due to the long distance in complex terrain. As well, estimates were not so good at 80 m AGL in Sounqour. In other words, the log law of Wortman was not able to predict wind properties precisely at high height in complex terrain. However, paired sample T test result revealed there is no significant difference between predicted and observed values.

Wind potential assessment showed that highlands and ridge mountains (with more than 2000 m height) are areas with high wind power density ($>700 \text{ W/m}^2$). Mean wind speed in lower regions was calculated 4 to 6 m/s and wind power density was calculated 100 to 300 W/m^2 around Kermanshah, Eslamabad and Sonqor stations. The calculated wind speed and wind power density for Sarpolzahab area were 2 to 4 m/s and less than 200 W/m^2 , respectively. These values in this area are lower than other stations.

Keywords: wind potential prediction, wind atlas, mean wind power density, WAsP software, Kermanshah province

*Corresponding author: