

برآورد الگوی پراکنش مکانی سرعت باد برای پتانسیل‌یابی تولید انرژی بادی در ایران

معصومه دلبری* - دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
پرینسپال، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
احسان محمدی - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
تارخ احمدی - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۱۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

چکیده

هدف از انجام این پژوهش بررسی توزیع مکانی سرعت و مدت وزش باد در ایران به منظور تعیین مناطق مستعد و پتانسیل خوب برای احداث توربین‌های بادی است. پارامترهای توزیع ویبول (c و k) میانگین و بیشینه روزانه سرعت باد با استفاده از آمار حدود بیست سال سرعت روزانه باد در ۱۰۴ ایستگاه سینوپتیکی کشور تعیین شد. بررسی تغییرات مکانی میانگین توزیع ویبول ایستگاه‌های مورد مطالعه با محاسبه نیم تغییرنمای تجربی انجام گرفت. نتایج نشان داد میانگین روزانه سرعت باد از همبستگی مکانی متوسط با ساختار نمایی و شعاع تأثیر ۵۴۵ کیلومتر برخوردار است. همچنین، ساختار مکانی سرعت باد همسانگرد و فاقد روند تشخیص داده شد. نتایج اعتبارسنجی متقابل تخمین میانگین سرعت باد با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) حاکی از عملکرد مشابه دو روش بود. بر اساس نقشه پهنه‌بندی شده میانگین سرعت باد، استان‌های واقع در شرق، شمال شرق و شمال غرب کشور دارای سرعت باد بیش از $4-3$ m/s است. در همین نواحی شهرهایی مانند رفسنجان، زابل، خواف، تربت‌جام، الیگودرز، کهنوج و خدابنده بیشترین درصد ساعاتی از سال دارد که سرعت باد در آن‌ها بیش از 4 m/s است. بنابراین، این مناطق برای استفاده از انرژی بادی مناسب به نظر می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: تغییرات مکانی، توزیع ویبول، سرعت باد، میان‌یابی.

مقدمه

انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل در پیشرفت و توسعه جوامع بشری است. افزایش جمعیت از یک‌سو و محدودیت منابع فسیلی و افزایش آلودگی محیط‌زیست ناشی از سوزاندن این منابع از سوی دیگر، موجب توسعه کاوش برای منابع پاک و غیرآلاینده شده است. باد یکی از این منابع پاک، تمام‌ناشدنی و رایگان انرژی است. در پایان سال ۲۰۱۰، میزان ظرفیت نامی تولید برق بادی در سراسر جهان برابر ۱۹۷ گیگاوات بود. امروزه، توان بادی در دنیا ظرفیت تولید سالانه ۴۳۰ تراوات ساعت انرژی الکتریکی را دارد که این میزان ۲/۵٪ مصرف برق دنیاست. بادهای جهان جمعاً حدود ۲۷۰۰ تراوات انرژی در خود نهفته دارد که حدود ۲۵ درصد آن در ۱۰۰ متری از سطح زمین قرار دارد. با این حال، حتی ۱۰٪ این مقدار

* E-mail: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

انرژی از ظرفیت کل انرژی آبی جهان بیشتر است (ثقفی، ۱۳۸۲). متأسفانه در ایران استفاده از انرژی باد توسعه زیادی نیافته است و در جاهای محدودی مانند منجیل و بینالود از آن استفاده می‌شود.

سرعت باد ماهیتی تصادفی دارد که برای مدل‌سازی آن، لازم است تابع توزیع چگالی احتمال یا تابع توزیع تجمعی احتمال مناسبی انتخاب شود. در این زمینه، مطالعات و تحقیقات زیادی انجام شده و توابع چگالی احتمال متفاوتی آزمون شده است که می‌توان به توابع توزیع احتمال ویبول، رابلی، و توزیع نرمال اشاره کرد. در این بین تابع توزیع ویبول^۱، مناسب‌ترین تابع برای نمایش چگالی احتمال متغیر تصادفی سرعت باد است (بایم و همکاران، ۲۰۰۷). صلاحی (۱۳۸۲) پتانسیل انرژی باد در استان اردبیل را بررسی کرد. نتایج نشان داد که چگالی توان باد در ایستگاه‌های اردبیل، خلخال، پارس‌آباد و مشکین‌شهر به ترتیب ۳۴۲، ۶۰، ۷۲ و ۴۳۰ وات در مترمربع است. همچنین، ایستگاه سینوپتیک اردبیل مکانی مناسب برای بهره‌برداری از انرژی باد به حساب می‌آید. کیهانی و همکاران (۲۰۱۰) داده‌های آماری یازده ایستگاه در تهران را برای یافتن پتانسیل باد ارزیابی کردند. بدین منظور از میانگین ساعتی سرعت باد استفاده شد و مقادیر سالانه و ماهانه k و c (پارامتر شکل و پارامتر مقیاس تابع ویبول) به دست آمد. نتایج حاکی از آن بود که بیشترین و کمترین پتانسیل انرژی باد به ترتیب در آوریل و اوت اتفاق می‌افتد و نیز منطقه مورد مطالعه (تهران)، برای تولید برق در مقیاس بزرگ مناسب نیست و تنها برای کاربردهای محلی کوچک و تولید برق برای مزارع دورافتاده مناسب است. باگیورگاس و همکاران (۲۰۱۱) سرعت باد را در ارتفاع ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری سطح زمین و در هفت ایستگاه متفاوت در عربستان سعودی ارزیابی کردند. بدین منظور پارامترهای توزیع ویبول با استفاده از پنج روش مختلف به دست آمد. نتایج آن‌ها نشان داد که رابطه‌ای خطی بین مقدار سرعت باد و پارامتر مقیاس توزیع ویبول وجود دارد. همچنین، مقدار پارامتر شکل توزیع ویبول مستقل از ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد است، ولی پارامتر مقیاس با ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد تغییر می‌کند. مصطفایی‌پور و همکاران (۲۰۱۱) امکان استفاده از انرژی باد را برای شهر بابک در ایران بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با توجه به مقادیر سرعت باد اندازه‌گیری شده، این ناحیه مکانی مناسب برای ایجاد نیروگاه بادی نیست و از نظر اقتصادی فقط می‌توان از توربین‌های بادی کوچک برای بعضی نقاط محلی استفاده کرد. پژوهشگران دیگری نیز به بررسی ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های مختلف کشور پرداختند (مجرد و همتی، ۱۳۹۱؛ جعفری و همکاران، ۱۳۹۰؛ امیدوار و دهقان طزرجانی، ۱۳۹۱).

گندم‌کار (۱۳۸۸)، آمار ۱۲۰ ایستگاه سینوپتیک کشور ایران را برای بررسی پتانسیل انرژی باد به گونه‌ای توصیفی ارزیابی کرد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، ایستگاه‌های سینوپتیک از نظر سرعت وزش باد، در چهار گروه مختلف قرار می‌گیرد. گروه اول، در بیشتر زمان‌های سال بادخیزی زیادی دارند. گروه دوم، در برخی زمان‌های سال در بخش‌هایی از شبانه‌روز توان بادخیزی زیادی دارد. گروه سوم، در زمان‌های محدودی از سال توان بادخیزی دارد. گروه چهارم، در تمام طول سال توان بادخیزی در خور توجهی ندارد. در بسیاری از مناطق ایران، باد منبع بالقوه تولید انرژی الکتریسیته مطرح است که مطالعات عمیق‌تر و مفصل‌تر راجع به مکان‌یابی مناطق با پتانسیل تولید انرژی بادی مفید واقع می‌شود.

از آنجا که وجود باد به موقعیت محل بستگی دارد، به نظر می‌رسد که بتوان بین مقادیر سرعت و مدت وزش باد نقاط مختلف شبکه اندازه‌گیری سرعت باد وابستگی مکانی مشاهده کرد. به بیان دیگر، انتظار می‌رود سرعت باد، در نقاط نزدیک‌تر دارای شباهت بیشتری نسبت به نقاط دورتر از هم باشد. این ارتباط مکانی از طریق ابزارهای زمین‌آماري مانند تابع نیم‌تغییرنما^۱ به‌درستی تشخیص داده می‌شود. همبستگی مکانی بین مقادیر سرعت باد از طریق روش‌های میان‌یابی زمین‌آماري (کریجینگ)^۲ در تخمین بهتر سرعت باد در مناطق فاقد آمار و تهیه نقشه پهنه‌بندی شده آن به کار می‌رود. با این حال، تحقیقات معدودی در ارتباط با بررسی تغییرات مکانی و ارزیابی کارایی روش‌های میان‌یابی در برآورد سرعت باد انجام گرفته است. سلورا و همکاران (۲۰۰۸) از روش‌های میان‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله^۳ (IDW) و کریجینگ عام^۴ (UK) برای برآورد توزیع مکانی سرعت باد در جزیره سیسیل ایتالیا استفاده و اقدام به بررسی نقاط مستعد برای ایجاد توربین بادی کردند. برای این منظور، نمودار سرعت-تداوم باد ساعتی ترسیم شد و با در نظر گرفتن کمینه سرعت ۳ متر بر ثانیه، به عنوان سرعت مناسب باد برای ایجاد توربین بادی، ایستگاه‌های دارای پتانسیل بیشتر برای احداث توربین بادی مشخص شد. همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد که نقشه سرعت باد تولیدشده کاملاً مشابه اطلس باد ایتالیا است. لو و همکاران (۲۰۰۸) نیز به مقایسه چندین روش میان‌یابی معین و زمین‌آماري برای برآورد میانگین روزانه سرعت باد در سرتاسر انگلستان و ولز پرداختند. براساس نتایج حاصل، روش‌های زمین‌آماري نسبت به روش‌های معین در برآورد میانگین روزانه سرعت باد از دقت بیشتری برخوردار است.

هدف از انجام این پژوهش تعیین توزیع مکانی سرعت و مدت وزش باد در ایران به‌منزله گام نخست به‌منظور مشخص کردن مناطق مستعد و با پتانسیل خوب برای احداث توربین‌های بادی است. در این راستا، ابتدا به توصیف توزیع مقادیر سرعت باد روزانه با استفاده از مدل ویبول پرداخته شد. تحلیل خودهمبستگی مکانی میانگین سرعت باد به‌دست‌آمده از توزیع ویبول در ایستگاه‌های مورد مطالعه با محاسبه نیم‌تغییرنمای تجربی داده‌ها صورت گرفت. سپس، با استفاده از روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله به میان‌یابی سرعت باد در نقاط فاقد آمار در گستره ایران پرداخته شده و نقشه پهنه‌بندی شده میانگین سرعت باد برای کشور ترسیم شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق براساس اطلاعات ثبت‌شده باد، در ۱۰۴ ایستگاه سینوپتیک کشور، برای دوره آماری حدود بیست سال انجام شد. داده‌های مورد استفاده عبارت بود از: الف) میانگین ساعتی سرعت باد (m/s)، ب) میانگین روزانه سرعت باد (m/s)، ج) بیشینه روزانه سرعت باد (m/s)، در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین که از اداره هواشناسی کشور برای دوره بیست ساله اخذ شد. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

1. Semivariogram function
2. Kriging
3. Inverse distance weighing
4. Universal kriging

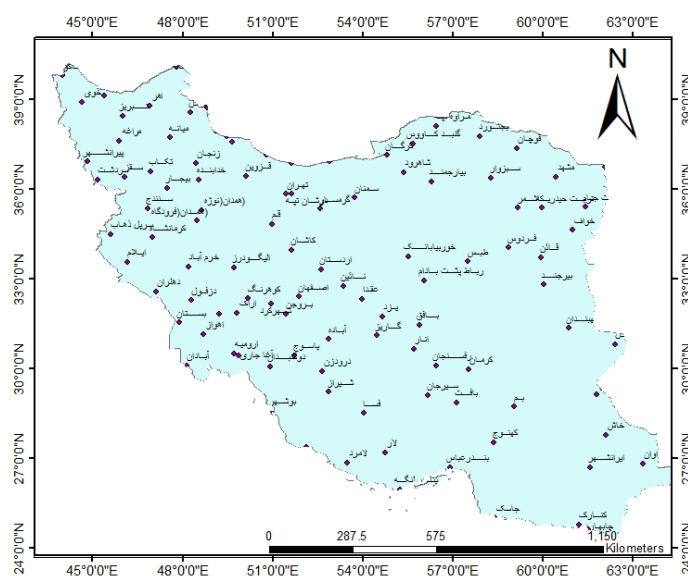
تجزیه و تحلیل آماری سرعت باد

تابع توزیع ویبول

در بیشتر پژوهش‌ها، برای توصیف توزیع سرعت باد، از مدل ویبول دو پارامتری استفاده شده است. چندین روش برای محاسبه پارامترها این مدل (پارامترهای شکل و مقیاس) ارائه شده است (تکل و براون، ۱۹۷۸؛ دانیل و چن، ۱۹۹۱). با این حال تحقیقات نشان داده است که تفاوت معناداری بین روش‌های مختلف برای محاسبه مقادیر پارامترها وجود ندارد (استیونس و اسمودرس، ۱۹۷۹). در این تحقیق برای محاسبه پارامترهای شکل و مقیاس از روش حداکثر درست‌نمایی^۱ استفاده شده است. تابع توزیع احتمال ویبول به شرح زیر است.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right], \quad (k > 0, V > 0, c > 0) \quad (1)$$

که در آن V سرعت باد (m/s)، c و k پارامترهای توزیع ویبول دو پارامتری است که c پارامتر مقیاس و واحد آن متر بر ثانیه (m/s) و k پارامتر شکل (بدون بعد) است.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیکی مورد استفاده در این پژوهش

تابع توزیع تجمعی نیز به صورت زیر است.

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

چنانچه از دو طرف معادله دو مرتبه لگاریتم گرفته شود، معادله (۲) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\text{Ln} \{-\text{Ln}[1-F(V)]\} = k \text{Ln}(V) - k \text{Ln}(c) \quad (۳)$$

معادله (۳) معادله‌ای خطی بین $\text{Ln}(V)$ و $\text{Ln}\{-\text{Ln}[1-F(V)]\}$ است که در آن k شیب و $-k \text{Ln}(c)$ عرض از مبدأ است.

احتمال اینکه سرعت باد بین مقادیر V_1 و V_2 باشد نیز از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$P(V_1 < V < V_2) = \exp\left[-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_2}{c}\right)^k\right] \quad (۴)$$

با داشتن k و c ، مقادیر میانگین (μ_V) یا امید ریاضی $(E(V))$ و واریانس (σ_V^2) با استفاده از معادلات زیر برآورد می‌شود.

$$\mu_V = E(V) = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (۵)$$

$$\sigma_V^2 = \mu_V^2 \left[\frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \right] \quad (۶)$$

که در آن $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$ تابع گاما است.

در روش حداکثر درست‌نمایی، پارامترهای شکل و مقیاس به صورت زیر تعریف می‌شود (سلورا و همکاران، ۲۰۰۸).

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_j^k \right]^{1/k} \quad (۷)$$

$$k = \frac{n}{(\frac{1}{c}) \sum_{j=1}^n V_j^k \ln V_j - \sum_{j=1}^n \ln V_j} \quad (۸)$$

که در آن هر یک از داده‌های سرعت باد در ایستگاه مورد نظر و n تعداد داده‌های مورد بررسی است. معادله (۸) معادله‌ای ضمنی است که برای حل آن باید از روش تکرار استفاده کرد. در حالتی که سرعت باد برابر با صفر است، تابع توزیع ویبول (معادله ۱) حالت واقعی سرعت باد را توصیف نمی‌کند. لذا، برای این منظور، تنها از داده‌های غیر صفر استفاده می‌شود. برای محاسبه تمامی موارد مربوط به تابع ویبول از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

روش‌های میان‌یابی

تولید نقشه‌ای که روند مکانی متغیر را براساس مقادیر معلوم آن متغیر در تعداد مشخصی نقطه نشان می‌دهد، عمل رایجی در مدل کردن پدیده‌های محیطی است. در این تحقیق از روش‌های میان‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله، کریجینگ معمولی و کریجینگ عام برای تخمین میانگین سرعت باد در نقاط شبکه‌ای منظم استفاده شد که بر پهنه کشور گسترده

شده است. در ادامه مختصری از ویژگی‌های اصلی این روش‌ها آمده است. قبل از آن فرض می‌شود که مقدار یک متغیر (برای مثال، میانگین سرعت باد^۱، MWS) در n ایستگاه با مختصات u_i ($i=1, \dots, n$) معلوم باشد $(MWS(u_i))$.

وزن دهی عکس فاصله

در روش وزن دهی عکس فاصله (IDW)، مقدار میانگین سرعت باد در نقطه فاقد آمار $(MWS^*(u_0))$ ، با استفاده از میانگین‌گیری وزنی مقادیر سرعت باد در نقاط مجاورش برآورد می‌شود.

$$MWS^*(u_0) = \sum_{i=1}^{n(u_0)} \lambda_i \cdot MWS(u_i) \quad (9)$$

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\pi}}{\sum_{i=1}^{n(u_0)} D_i^{-\pi}} \quad (10)$$

که در آن λ_i فاکتور وزن، D_i فاصله بین ایستگاه‌های اندازه‌گیری (u_i) و نقطه مورد تخمین (u_0) ، $n(u_0)$ تعداد نقاط همسایگی و π توان وزن دهی فاصله است. در این روش وزن‌ها تنها با توجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مورد تخمین و بدون توجه به نحوه پراکندگی نقاط حول آن نقطه تعیین می‌شود. بدین ترتیب، به نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتر و به نقاط دورتر وزن کمتری اختصاص داده می‌شود. از طرفی، اگر مقدار واقعی متغیر در نقطه فاقد آمار بیشتر از پیشینه یا کمتر از کمینه مقدار متغیر در همسایگی آن باشد، روش IDW به‌طور صحیح آن را برآورد نمی‌کند.

کریجینگ

فرمول اصلی تخمین در روش زمین‌آماری کریجینگ، همان معادله (۹) است. با این تفاوت که اوزان کریجینگ براساس مدل خودهمبستگی^۲ مکانی بین مقادیر متغیر در نقاطی با فواصل مشخص، تعیین می‌شود. به‌لحاظ نظری، شباهت بین مقادیر متغیر در نقاطی به فاصله h از یکدیگر با افزایش h کم می‌شود. این ویژگی در زمین‌آمار با تابع نیم‌تغییرنا معرفی می‌شود. در عمل نیم‌تغییرنمای تجربی^۳ با استفاده از فرمول (۱۱) محاسبه می‌شود. سپس، بهترین مدل نظری برای استفاده در سیستم معادلات کریجینگ بر آن برآزش می‌شود (ایساک و اسریواستاوا، ۱۹۸۹؛ گوارتس، ۱۹۹۷).

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{MWS(u_i) - MWS(u_i + h)\}^2 \quad (11)$$

که در آن $\gamma^*(h)$ نیم‌تغییرنمای تجربی، $MWS(u_i)$ و $MWS(u_i+h)$ به ترتیب مقادیر ثبت‌شده میانگین سرعت باد در نقاط u_i و u_i+h و $N(h)$ تعداد جفت نقاطی است که به فاصله h از یکدیگر قرار گرفته است. رفتار نیم‌تغییرنا در مبدأ مختصات ممکن است سهمی، خطی یا ناپیوسته باشد و برای مقادیر بزرگ‌تر h مقدار نیم‌تغییرنا افزایش و به دو صورت

1. mean wind speed
2. autocorrelation
3. experimental semivariogram

ادامه می‌یابد: یا در فاصله‌ای مشخص، به حد ثابتی می‌رسد یا تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد. در مورد اول به فاصله‌ای که نیم‌تغییرنما به حد ثابت می‌رسد، شعاع تأثیر و به مقدار نیم‌تغییرنما در آن نقطه، آستانه گفته می‌شود (ایساک و اسریواستاوا، ۱۹۸۹). تخمین‌گرهای کریجینگ جزو بهترین تخمین‌گرهای خطی ناریب است، چرا که تخمین‌گرهایی خطی با کمینه واریانس تخمین است و بهینه‌ترین عملکرد آماری را ارائه می‌دهد. فرضیه اصلی تخمین‌گر کریجینگ فقط به دو گشتاور اول و دوم میدان فضایی متغیر مرتبط است. همین موضوع باعث شده است که این روش حتی با تعداد کمی داده اندازه‌گیری در دسترس نیز کاربرد داشته باشد. علاوه بر این، تخمین‌گر کریجینگ همراه با ایجاد تخمین بهینه، واریانس تخمین را نیز در هر نقطه دلخواه ارائه می‌دهد. انواع روش‌های کریجینگ با در نظر گرفتن فرضیه‌های مختلفی از میدان تصادفی متغیر، توسعه یافته است. دو روش معمول و متفاوت، روش‌های کریجینگ معمولی^۱ (OK) و کریجینگ عام (UK) است. روش OK بر فرض میانگین ثابت مقادیر نمونه استوار است، در حالی که این فرض در مورد بسیاری از پدیده‌های محیطی صدق نمی‌کند. در مواردی که میانگین داده‌ها از روند مشخصی در فضا تبعیت می‌کند، روش UK (که به آن کریجینگ تحت شرایط وجود روند نیز می‌گویند) به کار می‌رود (گوارتس، ۱۹۹۷). وجود روند از روی روند نیم‌تغییرنمای تجربی متغیر تشخیص داده می‌شود (نیم‌تغییرنما فاقد آستانه است). در این روش لازم است ابتدا روند براساس توابع چندجمله‌ای درجه اول یا بالاتر از مختصات جغرافیایی نقاط نمونه مدل شود (ایساک و اسریواستاوا، ۱۹۸۹). در این پژوهش، رسم نیم‌تغییرنما و تحلیل خودهمبستگی مکانی داده‌های سرعت باد و ارزیابی متقابل^۲ برآورد سرعت باد با استفاده از نرم‌افزار GS+ (رابرتسون، ۲۰۰۰) انجام گرفت. میان‌یابی و رسم نقشه‌های پهنه‌بندی سرعت باد با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 9.0 (اسری، ۲۰۰۴) انجام گرفت.

یافته‌های پژوهش

در این تحقیق پارامترهای تابع ویبول میانگین و بیشینه سرعت روزانه باد برای هر کدام از ایستگاه‌های مورد بررسی، با روش حداکثر درست‌نمایی تخمین زده شد (جدول‌های ۱ و ۲). در جدول ۱ و ۲، پارامتر شکل (k) دارای تغییرات کمی از ایستگاهی به ایستگاه دیگر است. تغییرات پارامتر مقیاس (c) بیشتر و از نظر عددی مقدار آن نزدیک به مقدار میانگین توزیع ویبول است. بیشینه سرعت دارای واریانس بیشتری نسبت به میانگین سرعت در شرایط نرمال است (سلورا و همکاران، ۲۰۰۸).

شکل ۲ الف و ب به ترتیب توزیع فراوانی بیشینه روزانه سرعت باد را در ایستگاه سمنان (دارای کوچک‌ترین پارامتر شکل) و در ایستگاه بندرعباس (دارای بزرگ‌ترین پارامتر شکل) نشان می‌دهد. فراوانی به‌دست‌آمده از توزیع چگالی احتمال ویبول (رابطه ۴)، که با به‌کاربردن پارامترهای شکل و مقیاس از روش حداکثر درست‌نمایی محاسبه شده (جدول ۱)، با فراوانی مشاهده‌شده سرعت باد مقایسه می‌شود.

1. ordinary kriging
2. cross validation

جدول ۱. پارامترهای تابع ویبول برای سرعت باد بیشینه در ۱۰ متری از سطح زمین

ایستگاه	c(m/s)	k	E(V)	واریانس	ایستگاه	c(m/s)	K	E(u)	واریانس
آبادان	۷/۷۹۰	۲/۶۸۵	۶/۹۲۶	۷/۷۲۸	رباط پشت بادام	۵/۹۷۰	۲/۶۵۱	۵/۳۰۶	۴/۶۴۲
آباده	۸/۶۵۵	۲/۳۹۹	۷/۶۷۳	۱۱/۶۰۶	رشت	۴/۵۷۸	۱/۹۸۴	۴/۰۵۸	۴/۵۶۳
آستارا	۴/۸۱۵	۲/۱۱۶	۴/۲۶۴	۴/۴۸۹	رفسنجان	۹/۱۴۲	۲/۴۱۶	۸/۱۰۶	۱۲/۷۹۰
آغا جاری	۶/۸۲۹	۲/۵۱۲	۶/۰۶۰	۶/۶۶۵	زابل	۱۱/۷۵۶	۲/۲۲۱	۱۰/۴۱۲	۲۴/۵۳۹
اراک	۶/۴۰۲	۲/۳۸۷	۵/۶۷۴	۶/۴۰۷	زاهدان	۸/۵۲۳	۲/۸۳۹	۷/۵۹۴	۸/۴۰۹
اردبیل	۱۰/۸۶۶	۲/۶۳۱	۹/۶۷۳	۱۵/۶۳۵	زنجان	۶/۹۲۳	۲/۵۵۱	۶/۱۴۶	۶/۶۷۲
اردستان	۸/۲۳۲	۲/۷۴۶	۷/۳۲۵	۸/۳۰۵	سبزوار	۷/۸۳۰	۲/۸۹۰	۶/۹۸۱	۶/۸۸۴
ارومیه	۵/۹۴۱	۲/۲۶۰	۵/۲۶۲	۶/۰۷۶	سراوان	۷/۱۸۸	۲/۷۰۴	۶/۳۹۳	۶/۵۰۲
اصفهان	۶/۱۸۱	۱/۹۳۳	۵/۴۸۲	۸/۷۳۲	سرپل ذهاب	۶/۵۸۰	۱/۸۳۵	۵/۸۴۶	۱۰/۹۰۸
الیگودرز	۷/۸۰۷	۲/۸۲۸	۶/۹۵۵	۷/۱۰۳	سرخس	۶/۰۶۳	۱/۹۲۴	۵/۳۷۸	۸/۴۷۹
انار	۷/۵۷۰	۱/۹۶۰	۶/۷۱۲	۱۲/۷۶۶	سردشت	۷/۴۸۱	۱/۹۶۰	۶/۶۳۳	۱۲/۴۶۱
انزلی	۶/۳۵۶	۱/۹۲۲	۵/۶۴۶	۹/۳۶۱	سقز	۸/۴۷۹	۲/۵۵۰	۷/۵۲۷	۱۰/۰۱۴
اهر	۷/۵۳۰	۲/۵۲۰	۶/۶۸۲	۸/۰۶۱	سمنان	۶/۱۸۳	۱/۸۰۱	۵/۴۹۸	۹/۹۸۲
اهواز	۶/۳۸۸	۲/۳۵۰	۵/۶۶۱	۶/۵۵۸	سنندج	۷/۱۵۲	۲/۳۱۰	۶/۳۳۶	۸/۴۷۱
ایرانشهر	۷/۶۳۰	۲/۳۶۰	۵/۷۶۲	۹/۲۸۳	سیرجان	۷/۶۱۹	۲/۶۷۱	۶/۷۷۳	۷/۴۶۴
ایلام	۶/۹۸۵	۲/۵۱۱	۶/۱۹۸	۹/۹۷۹	شاهرود	۵/۸۹۳	۲/۱۳۲	۵/۲۱۹	۶/۶۳۵
بابلسر	۵/۶۷۳	۲/۰۷۲	۵/۰۲۵	۶/۴۷۷	شهرکرد	۶/۳۰۱	۲/۰۰۲	۵/۵۸۴	۸/۵۰۶
بافت	۷/۸۴۶	۲/۴۶۱	۶/۹۵۹	۹/۱۲۲	شیراز	۶/۸۴۲	۲/۳۰۰	۶/۰۶۲	۷/۸۱۳
بافق	۶/۲۵۹	۲/۴۵۸	۵/۵۵۱	۵/۸۱۶	طیس	۵/۹۹۳	۲/۱۱۵	۵/۳۰۸	۶/۹۶۳
بجنورد	۹/۷۶۵	۲/۱۳۱	۸/۶۴۸	۱۸/۲۳۶	عقدا	۶/۹۹۳	۲/۴۰۳	۶/۱۹۹	۷/۵۵۱
بروجن	۶/۱۶۲	۲/۵۷۵	۵/۴۷۲	۵/۲۰۰	فردوس	۵/۵۲۱	۲/۸۹۵	۴/۹۲۳	۳/۴۱۲
بستان	۷/۲۷۴	۲/۵۳۰	۶/۴۵۶	۷/۴۶۷	فسا	۶/۴۱۷	۲/۲۷۷	۵/۶۸۴	۶/۹۹۶
بم	۸/۲۷۴	۲/۷۰۷	۷/۳۵۸	۸/۵۹۸	قائن	۶/۲۲۳	۲/۵۴۰	۵/۵۲۳	۵/۴۲۹
بندر دیر	۷/۷۷۹	۲/۴۹۵	۶/۹۰۱	۸/۷۵۳	قزوین	۶/۱۱۰	۲/۰۶۱	۵/۴۱۲	۷/۵۸۷
بندرعباس	۶/۹۴۸	۳/۱۶۴	۶/۲۲۰	۴/۶۴۴	قم	۷/۲۲۸	۲/۲۱۲	۶/۴۰۱	۹/۳۴۴
بندر لنگه	۶/۶۶۳	۲/۵۸۵	۵/۹۱۷	۶/۰۳۹	قوچان	۵/۴۲۴	۲/۰۹۳	۴/۸۰۵	۵/۸۱۳
بوشهر	۷/۷۲۶	۲/۷۷۹	۶/۸۷۸	۷/۱۶۹	کاشان	۴/۵۳۴	۱/۸۲۲	۴/۰۳۰	۵/۲۵۱
بیارجمند	۶/۶۳۳	۲/۲۷۶	۵/۸۷۶	۷/۴۷۷	کاشمر	۴/۸۳۲	۲/۳۴۳	۴/۲۸۲	۳/۷۷۰
بیجار	۸/۷۲۶	۲/۲۳۶	۷/۷۲۹	۱۳/۳۵۴	کرمان	۹/۳۲۷	۲/۴۸۷	۸/۲۷۴	۱۲/۶۵۷
بیرجند	۷/۴۱۳	۲/۹۲۹	۶/۶۱۲	۶/۰۳۰	کرمانشاه	۷/۴۰۶	۲/۸۱۷	۶/۵۹۶	۶/۴۳۲
پارس‌آباد	۵/۸۹۵	۲/۱۹۸	۵/۲۲۱	۶/۲۸۵	کنارک	۷/۲۲۳	۳/۱۵۳	۶/۴۶۵	۵/۰۴۹
پیرانشهر	۶/۹۶	۲/۲۲۱	۶/۱۶۴	۸/۶۰۴	کوهرنگ	۶/۲۱۹	۲/۵۴۹	۵/۵۲۰	۵/۳۹۰
تبریز	۸/۰۲۳	۲/۲۳۷	۷/۱۰۶	۱۱/۲۸۵	کهنوج	۸/۹۶۱	۲/۴۶۷	۷/۹۴۸	۱۱/۸۴۷

ادامه جدول ۱. پارامترهای تابع ویبول برای سرعت باد بیشینه در ۱۰ متری از سطح زمین

ایستگاه	c(m/s)	k	E(V)	واریانس	ایستگاه	c(m/s)	K	E(u)	واریانس
تربت جام	۸/۱۳۰	۳/۱۳۷	۷/۲۷۵	۶/۴۵۴	گاریز	۶/۸۷۴	۳/۰۴۰	۶/۱۴۲	۴/۸۶۶
تربت حیدریه	۶/۸۱۷	۲/۵۱۲	۶/۰۴۹	۶/۶۴۵	گرگان	۵/۲۳۲	۱/۸۷۵	۴/۶۴۵	۶/۶۲۰
تکاب	۷/۸۹۲	۲/۵۴۵	۷/۰۰۶	۸/۷۰۵	گرمسار	۶/۹۱۵	۲/۱۰۲	۶/۱۲۵	۹/۳۷۴
تهران	۷/۵۲۳	۲/۱۹۱	۶/۶۶۲	۱۰/۲۹۳	گنبد کاووس	۴/۰۸۳	۲/۲۷۳	۳/۶۱۷	۲/۸۴۰
جاسک	۷/۶۶۹	۲/۹۱۹	۶/۸۴۰	۶/۴۹۲	لار	۶/۲۸۸	۲/۵۲۲	۵/۵۸۰	۵/۶۱۴
جلفا	۷/۳۳۹	۲/۰۱۸	۶/۵۰۳	۱۱/۳۶۸	لامرد	۵/۹۲۳	۲/۲۹۱	۵/۲۴۷	۵/۸۹۴
چابهار	۶/۳۴۳	۳/۱۴۴	۵/۶۷۶	۳/۹۱۲	ماکو	۶/۸۳۲	۱/۹۸۵	۶/۰۵۶	۱۰/۱۵۳
خاش	۶/۹۱۸	۲/۵۰۲	۶/۱۳۸	۶/۸۹۱	مراغه	۷/۰۸۰	۲/۳۱۷	۶/۲۷۳	۸/۲۵۸
خدابنده	۸/۸۵۱	۲/۵۹۱	۷/۸۶۰	۱/۶۱۴	مراوه تپه	۷/۷۱۳	۲/۱۶۲	۶/۸۳۱	۱۱/۰۸۵
خرم آباد	۶/۷۵۶	۲/۶۹۴	۶/۰۰۷	۵/۷۸۲	مسجد سلیمان	۶/۱۵۰	۲/۴۵۱	۵/۴۵۴	۵/۶۴۴
خواف	۹/۴۵۷	۲/۳۴۹	۸/۳۸۰	۱۴/۳۸۱	مشهد	۶/۶۵۷	۲/۵۶۶	۵/۹۱۱	۶/۱۰۶
خورر بیابانک	۴/۸۱۲	۱/۸۴۱	۴/۲۷۵	۵/۸۰۱	میانه	۶/۲۰۱	۲/۰۶۰	۵/۴۹۳	۷/۸۲۰
خوی	۶/۸۲۵	۱/۸۷۰	۶/۰۵۹	۱۱/۳۲۵	نائین	۷/۲۸۶	۲/۷۰۹	۶/۴۸۰	۶/۶۶۰
درودزن	۵/۶۵۹	۲/۳۶۱	۵/۰۱۵	۵/۱۰۱	نوشهر	۶/۳۶۵	۱/۸۷۱	۵/۶۵۱	۹/۸۴۱
دزفول	۶/۲۱۵	۲/۰۹۸	۵/۵۰۴	۷/۵۹۹	نهبندان	۷/۰۷۶	۲/۱۳۸	۶/۲۶۶	۹/۵۱۸
دوشان تپه	۵/۸۵۸	۱/۸۰۳	۵/۲۰۹	۸/۹۳۵	همدان(فرودگاه)	۷/۲۷۷	۲/۳۰۰	۶/۴۴۶	۸/۸۳۶
دوگنبدان	۶/۲۳۶	۲/۵۸۳	۵/۵۳۸	۵/۲۹۶	همدان(نوژه)	۹/۱۹۳	۲/۴۲۴	۸/۱۵۱	۱۲/۸۵۴
دهلران	۶/۶۹۷	۱/۹۹۷	۵/۹۳۵	۹/۶۴۷	یاسوج	۵/۸۳۰	۲/۴۱۱	۵/۱۶۹	۵/۲۲۰
رامسر	۶/۱۰۹	۱/۹۴۸	۵/۴۱۷	۸/۴۰۷	یزد	۶/۶۳۹	۲/۳۷۹	۵/۸۸۴	۶/۹۳۰

جدول ۲. پارامترهای تابع ویبول برای سرعت باد متوسط در ۱۰ متری از سطح زمین

ایستگاه	c(m/s)	K	E(V)	واریانس	ایستگاه	c(m/s)	K	E(u)	واریانس
آبادان	۴/۱۴۳	۲/۰۶۷	۳/۶۷۰	۳/۴۶۷	رباط پشت بادام	۳/۸۲۳	۲/۴۷۹	۳/۳۹۱	۲/۱۳۸
آباده	۳/۲۶۱	۱/۸۶۷	۲/۸۹۵	۲/۵۹۴	رشت	۲/۳۱۱	۱/۸۹۷	۲/۰۵۱	۱/۲۶۴
آستارا	۲/۲۷۴	۲/۳۰۸	۲/۰۱۵	۰/۸۵۸	رفسنجان	۵/۱۴۷	۲/۶۸۱	۴/۵۷۶	۳/۳۸۲
آغا جاری	۳/۹۲۲	۲/۲۵۳	۳/۴۷۴	۲/۶۶۲	زابل	۷/۴۸۶	۱/۶۶۹	۶/۶۸۸	۱۶/۹۵۸
اراک	۲/۶۴۶	۲/۰۹۰	۲/۳۴۳	۱/۳۸۷	زاهدان	۳/۱۷۲	۱/۹۶۰	۳/۳۴۲	۳/۱۶۴
اردبیل	۴/۸۳۷	۱/۷۷۳	۴/۳۰۵	۶/۲۹۰	زنجان	۳/۹۰۹	۲/۴۶۸	۲/۸۱۴	۱/۴۸۴
اردستان	۴/۸۷۵	۲/۲۹۲	۴/۳۱۹	۳/۹۸۹	سبزوار	۲/۹۰۹	۲/۲۴۶	۳/۴۶۲	۲/۶۵۹
ارومیه	۲/۶۲۱	۲/۴۴۰	۲/۳۲۴	۱/۰۳۳	سراوان	۳/۵۹۲	۲/۱۰۰	۳/۱۸۲	۲/۵۳۳
اصفهان	۲/۶۴۹	۲/۰۴۷	۲/۳۴۷	۱/۴۴۳	سرپل ذهاب	۳/۰۶۷	۱/۷۱۹	۲/۷۳۴	۲/۶۸۶
الیگودرز	۴/۵۷۱	۲/۶۳۹	۴/۰۶۲	۲/۷۴۲	سرخس	۳/۴۷۲	۱/۸۷۷	۳/۰۸۲	۲/۹۱۲
انار	۲/۷۷۸	۱/۹۴۹	۲/۴۶۳	۱/۷۳۶	سردشت	۴/۵۰۵	۱/۶۴۰	۴/۰۳۰	۶/۳۵۸

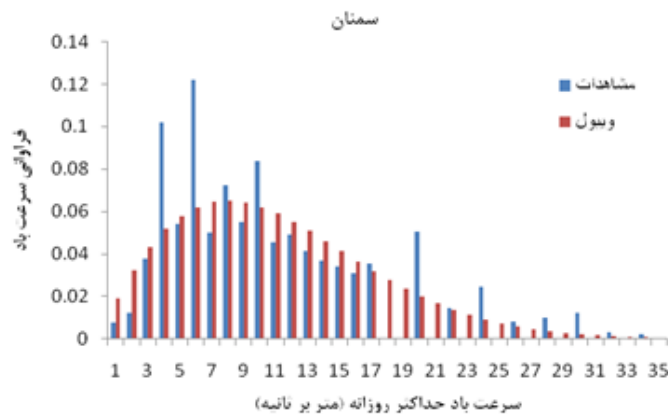
ادامه جدول ۲. پارامترهای تابع ویبول برای سرعت باد متوسط در ۱۰ متری از سطح زمین

ایستگاه	c(m/s)	K	E(V)	واریانس	ایستگاه	c(m/s)	K	E(V)	واریانس
انزلی	۳/۱۷۵	۱/۷۳۶	۲/۸۲۹	۲/۸۲۵	سقر	۳/۳۰۳	۲/۰۳۴	۲/۹۲۶	۲/۲۷۰
اهر	۳/۸۴۳	۲/۰۹۸	۳/۴۰۴	۲/۹۰۶	سمنان	۳/۱۵۴	۱/۸۳۸	۲/۸۰۳	۲/۵۰۰
اهواز	۳/۳۶۱	۲/۲۲۴	۲/۹۷۷	۲/۰۰۱	سنندج	۲/۸۵۱	۲/۰۴۴	۲/۵۲۶	۱/۶۷۷
ایرانشهر	۳/۳۴۵	۲/۷۲۰	۲/۹۷۵	۱/۳۹۴	سیرجان	۳/۵۲۵	۱/۸۲۱	۳/۱۳۳	۳/۱۷۶
ایلام	۲/۸۸۷	۲/۲۱۲	۲/۵۵۶	۱/۴۹۰	شاهرود	۲/۶۹۴	۲/۱۴۱	۲/۳۸۶	۱/۳۷۵
بابلسر	۲/۶۰۴	۲/۱۶۲	۲/۳۰۶	۱/۲۶۴	شهرکرد	۲/۶۵۴	۱/۸۳۸	۲/۳۵۸	۱/۷۶۹
بافت	۳/۶۷۹	۲/۰۰۴	۳/۲۶۰	۲/۸۹۵	شیراز	۲/۵۹۵	۲/۳۷۸	۲/۳۰۰	۱/۰۶۰
بافق	۳/۵۰۷	۲/۰۶۶	۳/۱۰۷	۲/۴۸۶	طیس	۲/۸۳۱	۲/۲۳۷	۲/۵۰۷	۱/۴۰۵
بجنورد	۴/۰۸۱	۱/۸۶۷	۳/۶۲۳	۴/۰۵۹	عقدا	۴/۱۷۲	۲/۳۶۹	۳/۶۹۷	۲/۷۵۷
بروجن	۳/۳۲۲	۲/۰۸۱	۲/۹۴۳	۲/۲۰۳	فردوس	۳/۰۱۵	۲/۵۹۳	۲/۶۷۸	۱/۲۳۰
بستان	۴/۱۳۲	۲/۳۷۱	۳/۶۶۲	۲/۷۰۱	فسا	۲/۳۴۹	۲/۳۰۸	۲/۰۸۱	-/۹۱۵
بم	۴/۰۹۱	۲/۲۱۴	۳/۶۲۳	۲/۹۸۹	قائن	۳/۳۰۲	۲/۱۳۲	۲/۹۲۴	۲/۰۸۳
بندر دیر	۴/۴۱۶	۱/۷۰۷	۳/۹۳۹	۵/۶۴۶	قزوین	۲/۴۱۶	۲/۱۶۷	۲/۱۴۰	۱/۰۸۳
بندرعباس	۳/۲۴۶	۲/۸۳۵	۲/۸۹۲	۱/۲۲۳	قم	۳/۲۶۴	۲/۱۴۷	۲/۸۹۱	۲/۰۰۹
بندر لنگه	۳/۸۰۴	۲/۳۱۷	۳/۳۷۰	۲/۳۸۳	قوچان	۳/۰۹	۲/۱۳۷	۲/۷۳۷	۱/۸۱۷
بوشهر	۳/۶۴۰	۱/۹۷۸	۳/۲۲۷	۲/۹۰۲	کاشان	۲/۲۰۰	۲/۱۴۹	۱/۹۴۸	-/۹۱۲
بیارجمند	۳/۹۲۷	۱/۹۲۲	۳/۴۸۳	۳/۵۶۱	کاشمر	۲/۶۹۱	۲/۳۱۸	۲/۳۸۴	۱/۱۹۲
بیجار	۵/۱۰۸	۱/۹۲۹	۴/۵۳۱	۵/۹۸۵	کرمان	۳/۵۱۸	۲/۰۴۹	۳/۱۱۷	۲/۵۴۳
بیرجند	۳/۰۵۸	۲/۱۹۹	۲/۷۰۸	۱/۶۹۱	کرمانشاه	۳/۰۹۲	۲/۳۴۳	۲/۷۴۰	۱/۵۴۴
پارس‌آباد	۳/۲۹۳	۱/۹۰۷	۲/۹۲۲	۲/۵۴۰	کنارک	۳/۶۳۶	۲/۲۱۹	۳/۲۲۰	۲/۳۵۱
پیرانشهر	۳/۷۱۱	۱/۹۱۸	۳/۲۹۲	۳/۱۹۳	کوهرنگ	۲/۷۶۶	۲/۰۴۰	۲/۴۵۱	۱/۵۸۴
تبریز	۳/۸۴۲	۲/۳۷۱	۳/۴۰۵	۲/۳۳۴	کهنوج	۵/۰۳۵	۲/۰۵۸	۴/۴۶۱	۵/۱۶۵
تربت جام	۴/۹۹۵	۲/۳۴۸	۴/۴۲۶	۴/۰۱۵	گاریز	۴/۱۰۳	۲/۶۶۸	۳/۶۴۷	۲/۱۶۸
تربت حیدریه	۳/۴۴۷	۲/۰۲۳	۳/۰۵۴	۲/۴۹۸	گرگان	۲/۶۷۹	۲/۲۲۶	۲/۳۷۳	۱/۲۶۹
تکاب	۳/۳۹۵	۱/۹۵۰	۳/۰۱۰	۲/۵۹۳	گرمسار	۳/۷۱۲	۲/۰۲۶	۳/۲۸۹	۲/۸۸۷
تهران	۳/۲۹۸	۲/۰۱۳	۲/۹۲۲	۲/۳۰۶	گنبد کاووس	۲/۵۰۷	۲/۴۴۰	۲/۲۲۳	-/۹۴۵
جاسک	۴/۷۹۰	۲/۳۲	۴/۲۴۴	۳/۷۷۱	لار	۲/۹۸۲	۲/۱۷۴	۲/۶۴۱	۱/۶۴۱
جلفا	۴/۰۲۷	۱/۷۴۴	۳/۵۸۷	۴/۵۰۱	لامرد	۳/۱۲۹	۲/۱۶۷	۲/۷۷۱	۱/۸۱۷
چابهار	۳/۶۸۰	۲/۴۴۸	۳/۲۶۴	۲/۰۲۶	ماکو	۳/۲۳۶	۱/۸۷۵	۲/۸۷۳	۲/۵۳۴
خاش	۳/۵۷۹	۲/۱۲۸	۳/۱۶۹	۲/۴۶۵	مراغه	۳/۸۸۹	۲/۱۰۰	۳/۴۴۴	۲/۹۷۰
خدابنده	۴/۹۴۵	۲/۱۲۰	۴/۳۸۰	۴/۷۲۰	مراوه تپه	۳/۸۴۴	۱/۹۶۶	۳/۴۰۸	۳/۲۷۴
خرم‌آباد	۲/۷۶۵	۲/۵۳۴	۲/۴۵۵	۱/۰۷۷	مسجد سلیمان	۲/۷۴۳	۲/۱۶۱	۲/۴۲۹	۱/۴۰۲
خواف	۶/۲۸۷	۱/۸۳۹	۵/۵۸۵	۹/۹۱۶	مشهد	۳/۰۱۵	۲/۵۵۴	۲/۶۷۷	۱/۲۶۳

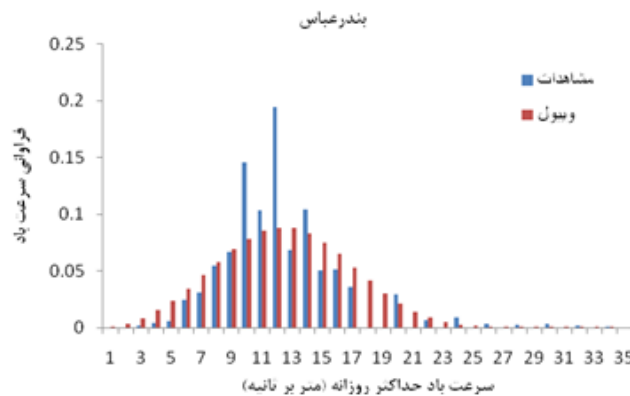
ادامه جدول ۲. پارامترهای تابع ویبول برای سرعت باد متوسط در ۱۰ متری از سطح زمین

ایستگاه	c(m/s)	K	E(V)	واریانس	ایستگاه	c(m/s)	K	E(u)	واریانس
خوریابانک	۲/۸۵۶	۱/۹۳۸	۲/۵۳۳	۱/۸۵۶	میانه	۳/۲۵۴	۲/۱۴۳	۲/۸۸۲	۲/۰۰۴
خوی	۲/۸۴۲	۱/۸۹۱	۲/۵۲۲	۱/۹۲۳	نائین	۴/۶۵۵	۲/۳۱۶	۴/۱۲۴	۳/۵۷۲
درودزن	۲/۹۴۲	۲/۳۳۲	۲/۶۰۷	۱/۴۱۰	نوشهر	۲/۹۴۲	۲/۲۴۵	۲/۶۰۶	۱/۵۰۸
دزفول	۲/۵۷۶	۲/۰۷۵	۲/۲۸۱	۱/۳۳۱	نهبندان	۴/۰۵۰	۱/۶۰۶	۳/۶۲۹	۵/۳۵۵
دوشان تپه	۲/۴۴۷	۲/۲۹۶	۲/۱۶۸	۱/۰۰۲	همدان(فرودگاه)	۲/۹۲۵	۲/۰۰۲	۲/۵۹۲	۱/۸۳۳
دوگنبدان	۲/۷۱۴	۲/۲۹۷	۲/۴۰۵	۱/۲۳۳	همدان(نوژه)	۳/۷۷۹	۲/۴۱۴	۳/۳۵۰	۲/۱۸۹
دهلران	۳/۶۴۳	۱/۸۴۸	۳/۲۳۶	۳/۳۰۱	یاسوج	۲/۲۱۸	۲/۵۵۰	۱/۹۶۹	۰/۶۸۵
رامسر	۲/۶۰۱	۲/۳۲۸	۲/۳۰۴	۱/۱۰۴	یزد	۳/۱۲۷	۲/۵۴۸	۲/۷۷۶	۱/۳۶۴

شکل ۳ الف و ۳ ب توزیع فراوانی میانگین روزانه سرعت باد مشاهده شده و به دست آمده از توزیع چگالی احتمال ویبول را برای دو ایستگاه نهبندان و بندرعباس (به ترتیب دارای کوچکترین و بزرگترین مقدار پارامتر شکل) نشان می‌دهد. نتایج شکل ۲ الف و ۲ ب و شکل ۳ الف و ۳ ب نشان می‌دهد که تابع توزیع ویبول توانسته است به طریق مناسبی توزیع فراوانی سرعت باد را شبیه‌سازی کند.

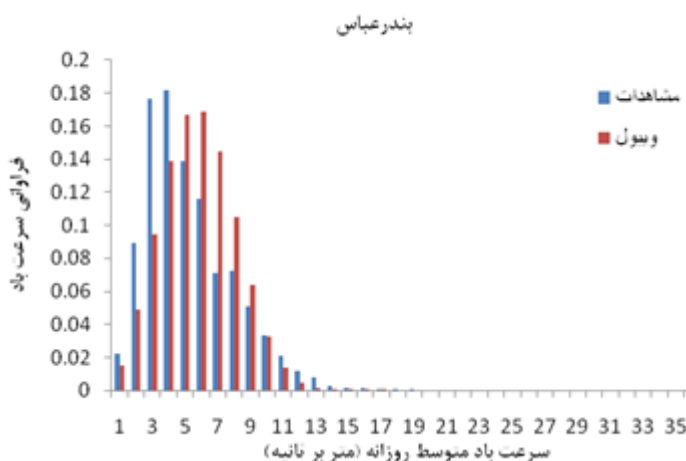
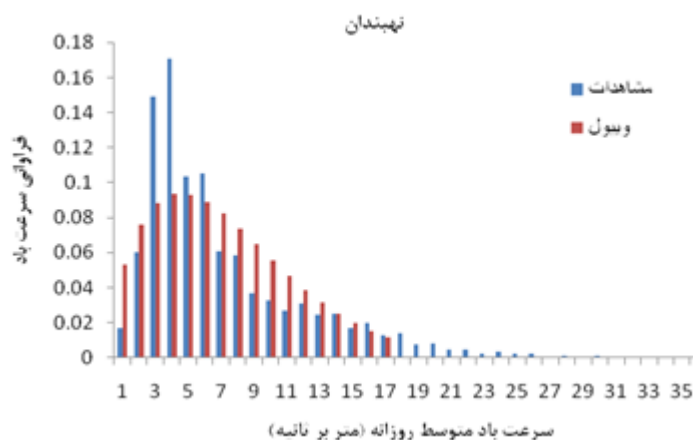


الف



ب

شکل ۲. فراوانی سرعت باد بیشینه روزانه مشاهده شده و محاسبه شده با استفاده از تابع ویبول برای دوره آماری مورد استفاده در ایستگاه سمنان (الف) و بندرعباس (ب)



شکل ۳. فراوانی سرعت باد متوسط روزانه مشاهده شده و محاسبه شده با استفاده از تابع ویبول برای ایستگاه سمنان (الف) و بندرعباس (ب)

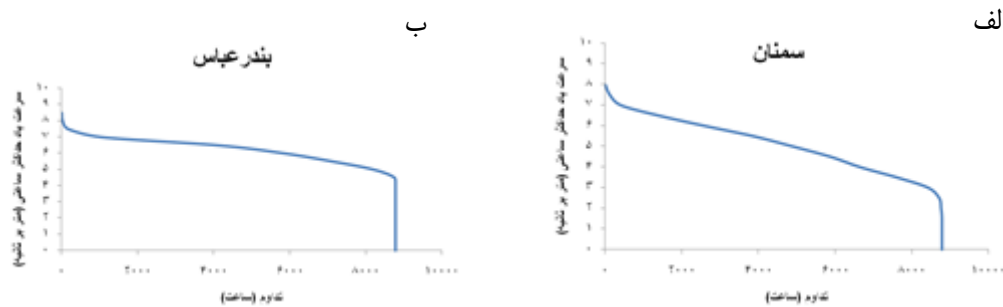
در ادامه منحنی‌های تداوم-سرعت باد بیشینه و متوسط روزانه، به ترتیب برای ایستگاه‌های سمنان و بندرعباس (شکل ۴الف و ۴ب)، و نهپندان و بندرعباس (شکل ۵الف و ۵ب) ترسیم شد. در این منحنی‌ها، محور افقی بیانگر تعداد روزهای سال و محور عمودی نشان‌دهنده سرعت باد است. این منحنی‌ها برای به دست آوردن مدت بهره‌برداری از توربین بادی در طول سال استفاده شده است. منحنی‌های با شیب تند نشان‌دهنده سرعت باد بی‌قاعده و نامرتب و منحنی‌های پهن و هموار نشان‌دهنده سرعت باد منظم‌تر است. منحنی‌های تداوم رسم شده برای ایستگاه‌های مورد نظر اطلاعات به دست آمده از پارامتر شکل را نیز تصدیق می‌کند. در واقع، هرچه مقدار k افزایش یابد، مطابق آن نقطه اوج توزیع ویبول تیزتر می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات کمتر سرعت باد است. در پژوهشی دیگر، در تعیین توزیع باد، سلورا و همکاران (۲۰۰۸) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

در جدول ۳، برای هر ایستگاه، درصد ساعتی از سال ارائه شده است که در آن میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین بیش از 4 m/s (آستانه سرعت باد معمول برای بسیاری از توربین‌های بادی تجارتي؛ صلاحی،

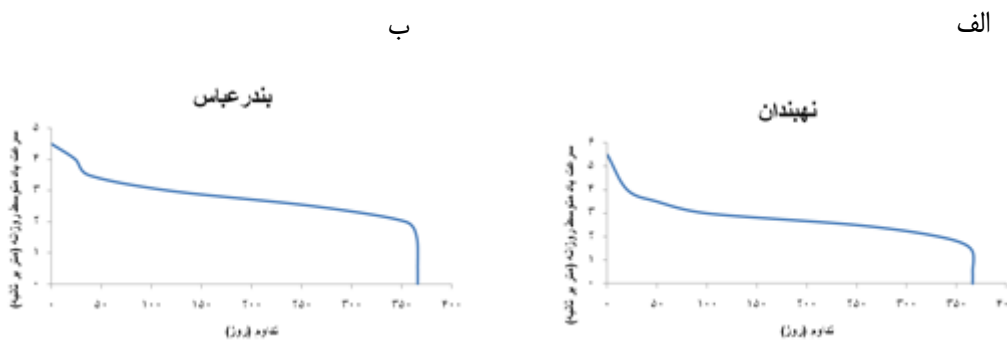
۱۳۸۲) است. با مشاهده این جدول، می‌توان استدلال کرد که بهترین و مستعدترین محل‌ها برای بهره‌برداری از انرژی باد شهرهایی مانند رفسنجان، زابل، تربت‌جام، الیگودرز، خدابنده، اردبیل و کهنوج است.

گندم‌کار (۱۳۸۸) نیز نشان داد که بسیاری از نواحی ایران از جمله نواحی شرقی کشور، نواحی ساحلی دریای عمان، همچنین نقاط پراکنده‌ای همچون رفسنجان، اردبیل، بیجار و منجیل پتانسیل ایجاد توربین بادی را داراست. توربین بادی آزمایشی نصب‌شده در لوتک (زابل) توربینی ۶۶۰ کیلوواتی است که تاکنون بیش از ۴ میلیون کیلووات ساعت برق پاک تولید کرده و نشان‌دهنده شرایط مناسب منطقه برای احداث نیروگاه بادی است (سایت تابناک، ۱۳۹۲). همدیدی یزد، دشت اردبیل و کوه‌های سبلان نیز مکان‌های مناسبی برای بهره‌گیری از انرژی باد شناخته شده است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۲؛ صلاحی، ۱۳۸۲؛ امیدوار و دهقان طرزجانی، ۱۳۹۱).

شایان ذکر است که عواملی مانند اغتشاش، یخبندان، موانع، ذرات شن و نمک در هوا، نامسطح بودن و شیب زمین که سبب افزایش قیمت نگهداری توربین، کوتاهی عمر و افت انرژی تولیدی خواهد شد نیز از مسائلی است که باید در استقرار توربین‌های بادی در منطقه ارزیابی کرد.



شکل ۴. نمودار تداوم - سرعت باد بیشینه روزانه برای ایستگاه‌های سمنان (الف) و بندرعباس (ب)



شکل ۵. نمودار تداوم - سرعت باد متوسط روزانه برای ایستگاه‌های نه‌بندان (الف) و بندرعباس (ب)

جدول ۳. تعداد و درصد ساعات سال که سرعت باد متوسط در ۱۰ متری از سطح زمین بیش از ۴ m/s است

ایستگاه	تعداد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است	درصد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است	ایستگاه	تعداد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است	درصد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است
آبادان	۳۳۱۶/۲۹	۳۷/۹	رباط پشت بادام	۲۴۸۴/۵۵	۲۸/۴
آباده	۲۳۴۴/۴۳	۲۶/۸	رشت	۷۴۷	۸/۵
آستارا	۱۱۷۸/۸۴	۱۳/۵	رفسنجان	۵۷۶۶/۲۷	۶۵/۸
آغا جاری	۲۴۳۷/۵	۲۷/۸	زابل	۵۴۸۲/۶۵	۶۲/۶
اراک	۱۷۰۱/۹۹	۱۹/۴	زاهدان	۳۵۹۷/۱۵	۴۱/۱
اردبیل	۳۹۶۴/۱۴	۴۵/۳	زنجان	۲۵۴۳/۷۱	۲۹
اردستان	۲۹۴۶/۴۶	۳۳/۶	سبزوار	۳۸۷۵/۱۴	۴۴/۲
ارومیه	۱۴۵۹/۴۳	۱۶/۷	سراوان	۳۲۸۵	۳۷/۵
اصفهان	۱۴۷۶/۴۴	۱۶/۹	سرپل ذهاب	۱۷۹۲/۱۵	۲۰/۵
الیگودرز	۴۵۹۵/۹۳	۵۲/۵	سرخس	۱۸۹۴/۳۵	۲۱/۶
انار	۲۰۵۱/۳	۲۳/۴	سردشت	۲۷۶۱/۹۵	۳۱/۵
انزلی	۲۱۸۹/۱۴	۲۵	سقز	۲۶۹۱/۱	۳۰/۷
اهر	۳۴۲۲/۹۷	۳۹/۱	سمنان	۱۷۱۰/۱۴	۱۹/۵
اهواز	۲۵۱۳/۸۶	۲۸/۷	سنندج	۲۰۸۹	۲۳/۸
ایرانشهر	۲۷۹۴/۲	۳۱/۹	سیرجان	۳۳۴۶/۳۲	۳۸/۲
ایلام	۲۲۷۵/۸۶	۲۶	شاهرود	۱۴۷۳/۷۵	۱۶/۸
بابلسر	۱۶۳۶/۱۷	۱۸/۷	شهرکرد	۱۶۱۱/۸۶	۱۸/۴
بافت	۳۳۵۳/۲۵	۳۸/۳	شیراز	۱۷۱۲/۴	۱۹/۵
بافقی	۲۳۳۳/۰۸	۲۶/۶	طیس	۱۶۸۸/۷۱	۱۹/۳
بجنورد	۲۹۱۶/۱۴	۳۳/۳	عقدا	۲۶۰۴/۶۴	۲۹/۷
بروجن	۱۹۶۴/۷۹	۲۲/۴	فردوس	۱۹۶۲/۶۰	۲۲/۴
بستان	۳۵۳۲/۱۰	۴۰/۳	فسا	۱۴۶۲/۴۳	۱۶/۷
بم	۳۵۹۱/۵۷	۴۱	قائن	۱۹۸۹/۸۷	۲۲/۷
بندر دیر	۳۶۱۰	۴۱/۲	قزوین	۱۳۲۷/۵	۱۵/۲
بندرعباس	۲۹۱۱/۵۷	۳۳/۲	قم	۲۵۳۲/۵۷	۲۸/۹
بندر لنگه	۲۴۳۳/۹۵	۲۷/۸	قوچان	۱۷۸۶/۳۱	۲۰/۴
بوشهر	۳۳۵۷/۳	۳۸/۳	کاشان	۵۳۴	۶/۱
بیارجمند	۲۷۸۷/۴۸	۳۱/۸	کاشمر	۱۲۹۴/۶۵	۱۴/۸
بیجار	۳۵۹۰/۹۶	۴۱	کرمان	۲۹۷۰/۱۵	۳۳/۹
بیرجند	۲۵۷۲/۱۴	۲۹/۴	کرمانشاه	۲۶۳۸/۸۶	۳۰/۱
پارس آباد	۱۹۳۰/۲۲	۲۲	کنارک	۲۹۲۴/۰۱	۳۳/۴

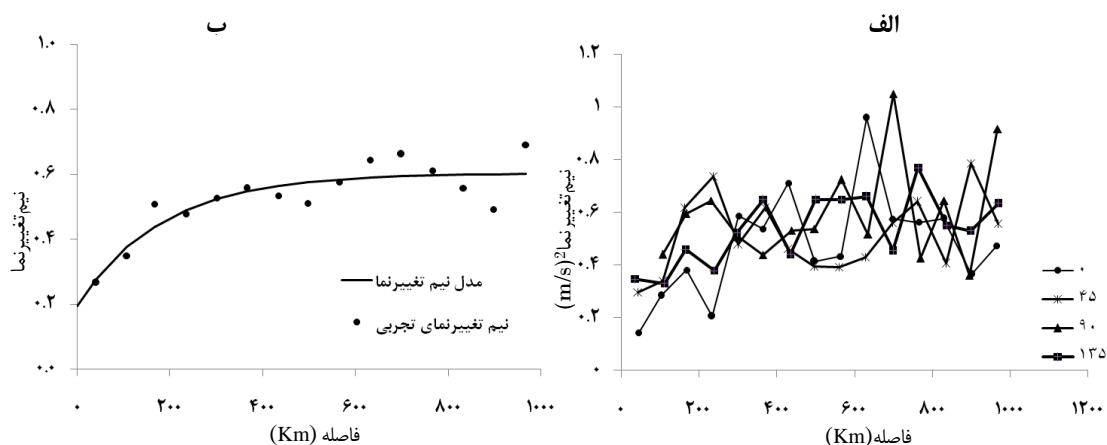
ادامه جدول ۳. تعداد و درصد ساعات سال که سرعت باد متوسط در ۱۰ متری از سطح زمین بیش از ۴ m/s است

ایستگاه	تعداد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است	درصد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است	ایستگاه	تعداد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است	درصد ساعاتی از سال که میانگین سرعت باد بیش از ۴ m/s است
پیرانشهر	۲۲۱۱/۶۴	۲۵/۲	کوه‌رنگ	۱۸۶۵/۱۸	۲۱/۳
تبریز	۳۱۹۸/۸۶	۳۶/۵	کهنوج	۴۰۰۷/۳۳	۴۵/۷
تربت جام	۵۱۲۴/۹۶	۵۸/۵	گاریز	۲۷۹۵/۹	۳۱/۹
تربت حیدریه	۲۵۸۶	۲۹/۵	گرگان	۱۲۸۹/۸	۱۴/۷
تکاب	۲۲۲۶/۳۵	۲۵/۴	گرمسار	۱۹۶۱/۸۷	۲۲/۴
تهران	۲۵۹۳/۵۷	۲۹/۶	گنبد کاووس	۶۷۴/۸۸	۷/۷
جاسک	۳۵۵۶/۶۵	۴۰/۶	لار	۱۵۳۹/۹۷	۱۷/۶
جلفا	۲۴۷۲/۲۱	۲۸/۲	لامرد	۱۳۹۵/۳۹	۱۵/۹
چابهار	۳۴۷۴/۵۷	۳۹/۷	ماکو	۲۰۰۷/۱۳	۲۲/۹
خاش	۲۶۴۱/۱۴	۳۰/۲	مراغه	۳۰۰۸/۳۳	۳۴/۳
خدابنده	۴۱۴۳/۱۱	۴۷/۳	مراوه تپه	۳۰۶۸/۹۲	۳۵
خرم‌آباد	۲۰۲۳/۴۳	۲۳/۱	مسجد سلیمان	۱۸۸۰/۱۱	۲۱/۵
خواف	۳۳۱۷/۶۶	۳۸/۱	مشهد	۲۱۹۳/۱۴	۲۵
خوربیبانک	۱۰۳۹/۹۵	۱۱/۹	میانه	۱۶۲۷/۰۲۴	۱۸/۶
خوی	۱۲۷۳/۳	۱۴/۵	نائین	۲۹۹۴/۶۷	۳۴/۲
درودزن	۱۵۲۴/۹۷	۱۷/۴	نوشهر	۱۶۵۱/۲۹	۱۸/۹
دزفول	۱۴۸۴/۶۵	۱۶/۹	نهندان	۲۵۴۶/۳۵	۲۹/۱
دوشان تپه	۱۱۹۴/۸۶	۱۳/۶	همدان (فرودگاه)	۲۰۱۰/۴۳	۲۳
دوگنبدان	۱۸۹۸	۲۱/۷	همدان (نوزه)	۳۳۴۷/۱۴	۳۸/۲
دهلران	۲۱۹۷/۸۶	۲۵/۱	یاسوج	۱۳۳۱/۱۵	۱۵/۲
رامسر	۱۴۶۹/۵۷	۱۶/۸	یزد	۲۶۷۴/۹۵	۳۰/۵

تحلیل خودهمبستگی مکانی سرعت باد

برای میان‌یابی کریجینگ نیاز به ایجاد نیم‌تغییرنمای تجربی میانگین توزیع ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیکی کشور است. در شکل ۶الف، نیم‌تغییرنمای تجربی جهت‌دار میانگین توزیع ویبول سرعت روزانه باد (مستخرج از جدول ۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ساختار مکانی میانگین روزانه سرعت باد در چهار جهت ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه (رسم‌شده براساس انحراف زاویه ۲۲/۵ درجه) مشابه یکدیگر و همگی در فاصله تقریبی ۵۰۰ کیلومتر به حد ثابتی رسیده است. بنابراین، میانگین روزانه سرعت باد فاقد روند و همسانگرد فرض شده و نیم‌تغییرنمای همه‌جهته آن ترسیم شده است و بهترین مدل نظری براساس حصول کمترین خطای برآورد در روش اعتبارسنجی متقابل، بر آن برآزش شد (شکل ۶ب). مدل منتخب، مدل نمایی با اثر قطعه‌ای $(m/s)^2$ ۰/۱۹۴، آستانه $(m/s)^2$ ۰/۶۰۲ و شعاع تأثیر ۵۴۵ کیلومتر

است. لو و همکاران (۲۰۰۸) در تحلیل تغییرات مکانی میانگین روزانه سرعت باد، بهترین مدل نظری را مدل کروی با شعاع تأثیر کمتر از ۱۰۰ کیلومتر گزارش کردند. از طرفی، در تحقیق فیلیپس و مارکس (۱۹۹۶)، ساختار مکانی سرعت باد در فصول زمستان، بهار و تابستان، نمایی با شعاع تأثیر به ترتیب ۱۳۰، ۹۱ و ۴۵ کیلومتر گزارش شد.



شکل ۶. نیم تغییرنمای جهت‌دار (الف) و همه‌جهته (ب) میانگین توزیع ویبول سرعت روزانه باد

میان‌یابی مکانی سرعت باد

با استفاده از روش OK و مشخصات مدل نیم‌تغییرنمای همه‌جهته، میانگین سرعت باد برای گره‌های شبکه‌ای منظم تعریف و بر گستره ایران میان‌یابی شد. نقشه پهنه‌بندی‌شده و نقشه خطای تخمین مرتبط با آن در شکل ۷ نشان داده شده است. از طرفی، نقشه سرعت باد تولیدشده به روش IDW (با توان ۲) نیز در شکل ۸ ارائه شده است. توان ۲ براساس نتایج اعتبارسنجی متقابل تخمین میانگین روزانه سرعت باد انتخاب شد. بین توان‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ که در این پژوهش ارزیابی شد، توان ۲ کمترین میزان RMSE و MBE را موجب می‌شود. بررسی اجمالی نقشه‌های تولیدشده حاکی از آن است که مناطق کوهستانی در شمال و غرب کشور دارای سرعت باد کمتری نسبت به سایر مناطق است. در بیشتر مناطق شرقی و استان‌های شمال‌غربی (استان‌های آذربایجان غربی و شرقی، اردبیل و زنجان) کشور، سرعت باد به بیش از ۳ m/s و حتی در برخی مناطق (محدوده مرزهای شرق و شمال شرقی کشور) به بیش از ۴ m/s می‌رسد. بنابراین، این مناطق در اولویت طراحی توربین‌های بادی برای استفاده از انرژی باد است. این در حالی است که در نیمه غربی کشور (به جز استان‌های واقع در شمال غربی کشور)، میانگین سرعت باد کمتر از ۳ m/s است و در بخش‌هایی از شمال کشور (حاشیه دریای خزر) و جنوب کشور، سرعت به زیر ۲/۵ m/s می‌رسد.

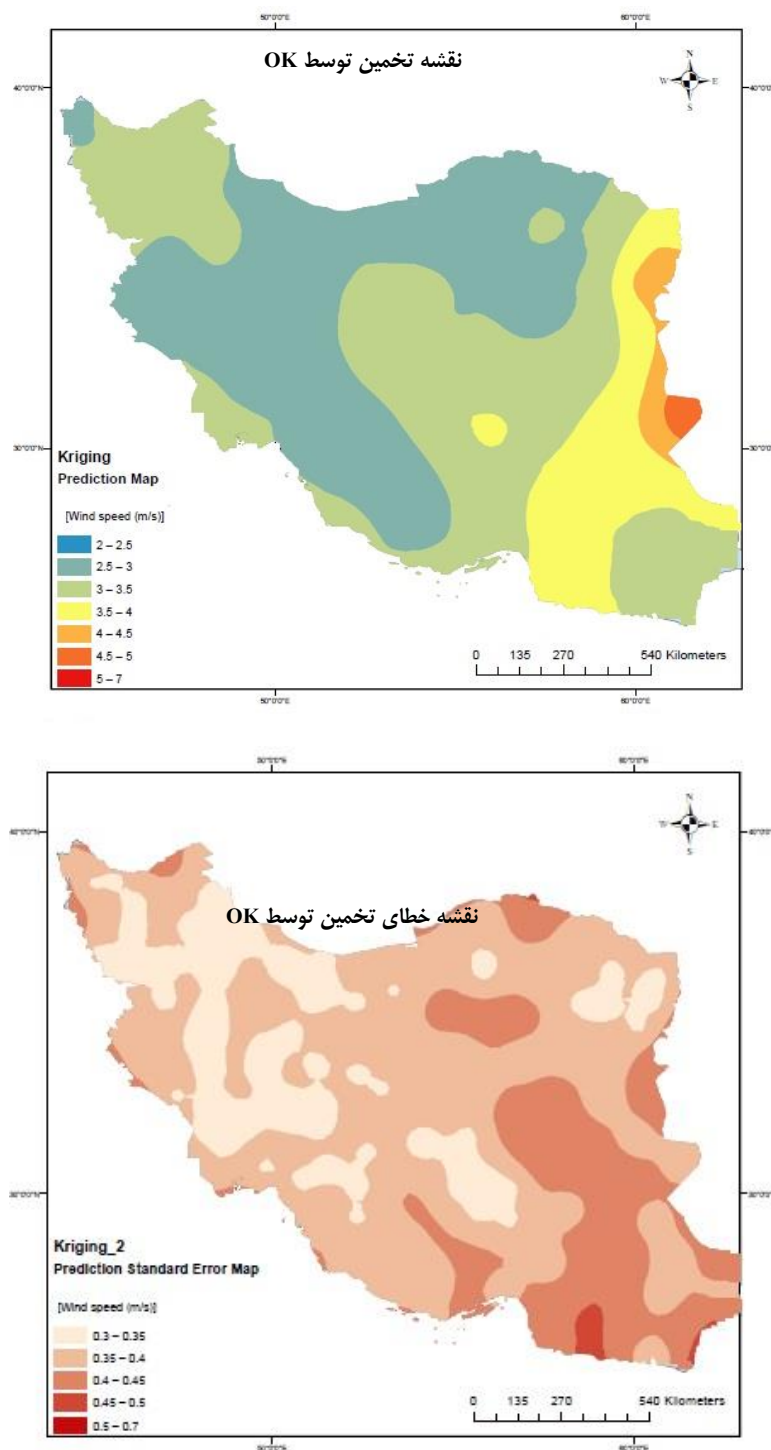
همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بین نقشه‌های تولیدشده به روش کریجینگ و روش وزن‌دهی عکس فاصله تفاوت‌هایی وجود دارد که به ساختار و فرضیه‌های حاکم بر هر روش بستگی دارد. نقشه تولیدشده به روش OK (شکل ۷) میانگین تغییرات مقادیر برآورده شده میانگین سرعت باد را کمی کمتر از روش IDW-2 (شکل ۸) نشان می‌دهد.

به عبارت دیگر، مقادیر بسیار بزرگ، کم‌برآورد و مقادیر خیلی کوچک بیش‌برآورد شده است. این ویژگی از مشخصات اصلی روش OK است که تمایل به پیرایش سطح برآوردشده دارد (گوارتس، ۱۹۹۷). در روش IDW، در مناطقی که ایستگاه‌ها غیریکنواخت و تنگ توزیع شده است (مانند نواحی شرقی کشور)، چنانچه در جهاتی ایستگاه‌ها به صورت خوشه‌خوشه قرار گرفته باشد، وزن‌های اختصاص‌یافته به این نقاط بیشتر است. بنابراین، مقادیر برآوردشده بیشتر تحت تأثیر مناطق با تراکم بیشتر قرار خواهد گرفت. با وجود این، نقاطی که به صورت ایزوله قرار گرفته است، در همه جهات اثرگذار خواهد بود که این اثر به طور یکنواخت با دورشدن از محل ایستگاه کاهش می‌یابد، لذا منجر به تولید الگوی چشم‌گاو^۱ در سطح میان‌یابی شده می‌شود. این الگو معمولاً در نقشه‌های تولیدشده به روش وزن‌دهی عکس فاصله قابل مشاهده است (لو و همکاران، ۲۰۰۸؛ دلبری و همکاران، ۲۰۱۳). از طرفی، برخلاف روش OK، در روش IDW-2، همبستگی مکانی بین ایستگاه‌ها در فرایند تخمین در نظر گرفته نشده و وزن‌ها تنها براساس فاصله از نقطه مورد تخمین تعیین می‌شود.

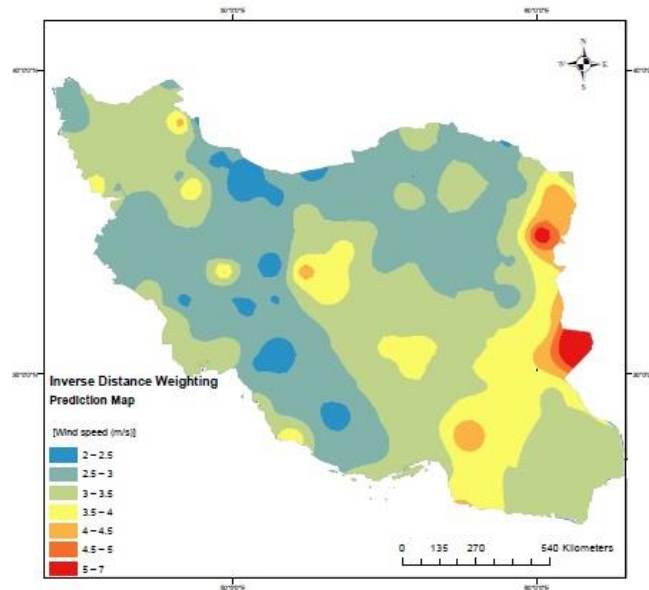
برای مقایسه دقیق‌تر روش‌های مورد استفاده، عملکرد آن‌ها از طریق فن اعتبارسنجی متقابل بررسی شد (جدول ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچند که روش OK دارای RMSE کمتر و r (ضریب همبستگی) بیشتری نسبت به روش IDW است، این اختلاف چندان قابل توجه نیست. بنابراین، می‌توان گفت هر دو روش دارای عملکرد مشابهی در تخمین میانگین سرعت باد روزانه در گستره کشور است. در تحقیق سلورا و همکاران (۲۰۰۸) روش IDW عملکرد بهتری در تهیه نقشه سرعت باد نسبت به روش UK داشت. این در حالی است که در پژوهش لو و همکاران (۲۰۰۸) روش‌های زمین‌آماری از دقت بیشتری نسبت به روش IDW برخوردار بود. قابل ذکر است که روش OK برخلاف روش IDW قادر به ارائه نقشه عدم قطعیت تخمین نیز است. در شکل ۷، نقشه انحراف معیار تخمین کریجینگ نشان داده شده است. با توجه به این نقشه، قسمت‌هایی از غرب، شمال‌غربی و شمال‌شرقی کشور دارای کمترین میزان عدم قطعیت تخمین است. بنابراین، برآوردهای انجام‌شده در این نواحی اطمینان بالایی دارد. از طرف دیگر، بیشترین عدم قطعیت تخمین در بخش‌هایی از شرق و جنوب‌شرقی کشور مشاهده می‌شود. با توجه به نقشه موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه (شکل ۱) می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین میزان عدم قطعیت در نواحی با تراکم کم ایستگاه‌ها رخ داده است.

جدول ۴. نتایج اعتبارسنجی متقابل برآورد میانگین سرعت باد توسط روش‌های میان‌یابی به کاررفته

روش میان‌یابی	R	RMSE (m/s)	MBE (m/s)
OK	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۰۰
IDW-2	۰/۵۶	۰/۶۹	۰/۰۰



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و خطای تخمین تولیدشده توسط روش OK



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری تولیدشده توسط IDW-2

نتیجه‌گیری

در این تحقیق توزیع فراوانی میانگین و بیشینه سرعت باد روزانه در تعدادی از ایستگاه‌های سینوپتیکی کشور با استفاده از مدل ویبول به‌طور رضایت‌بخشی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که ایستگاه‌های زابل و کاشان به‌ترتیب دارای بیشترین (بیش از ۶m/s) و کمترین (کمتر از ۲m/s) میانگین ویبول سرعت باد متوسط روزانه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا است. از طرفی، براساس مقادیر پارامتر شکل (k) توزیع ویبول، ایستگاه‌های نهبندان و بندرعباس به‌ترتیب با دارا بودن کمترین و بیشترین k، از بیشترین و کمترین تغییرات متوسط روزانه سرعت باد برخوردار است. این در حالی است که کمترین و بیشترین تغییرات بیشینه روزانه سرعت باد به‌ترتیب در ایستگاه‌های بندرعباس و سمنان مشاهده شد.

براساس نتایج تحلیل خودهمبستگی مکانی، میانگین سرعت باد دارای ساختار مکانی متوسط و شعاع تأثیر ۵۴۵ کیلومتر است. براساس نتایج اعتبارسنجی متقابل، روش‌های OK و IDW از عملکرد مشابهی برای تخمین میانگین سرعت باد برخوردار بود. در این پژوهش، نقشه میانگین سرعت باد متوسط روزانه به هر دو روش تولید شد. نقشه‌های تولی شده در شناسایی مناطق دارای سرعت باد مناسب برای تولید انرژی بادی، اولین قدم در پتانسیل‌یابی تولید انرژی بادی در ایران است. بر این اساس، مناطق شرقی و شمال‌غربی ایران مانند شهرهای رفسنجان، زابل، تربت‌جام و اردبیل از سرعت باد مناسب و مدت وزش باد قابل توجهی برای استفاده از انرژی باد برخوردار است.

در مجموع نقشه‌های مربوط به هر دو روش OK و IDW تا حدودی هموار به نظر می‌رسد. این موضوع لزوم بررسی استفاده از متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر سرعت باد از طریق روش‌های چندمتغیره زمین‌آماري را مطرح می‌کند تا بتوان به الگوی واقع‌بینانه‌تری از پراکنش مکانی سرعت باد در سطح کشور دست‌یافت. از طرفی، نقشه خطای تخمین تولیدشده به روش زمین‌آماري OK ابزار مفیدی در تعیین محل ایجاد ایستگاه‌های جدید (در صورت امکان) برای پایش پارامترهای هواشناسی به‌کار می‌رود.

منابع

- امیدوار، ک. و دهقان طرزجانی، م. (۱۳۹۱). پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۲(۲): ۱۴۹-۱۶۸.
- ثقفی، م. (۱۳۸۲). انرژی‌های تجدیدپذیر نوین. مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ دوم.
- جعفری، ح.; عزیزی، ع.; نصیری، ح. و عابدی، س. (۱۳۹۲). تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل با استفاده از مدل SAW و AHP در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۱۵(۲): ۲۳-۴۱.
- سایت تابناک. (۱۳۹۲). <http://www.tabnak.ir/fa/mobile/news/367357>.
- صلاحی، ب. (۱۳۸۲). پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۷۲: ۷۸-۱۰۴.
- گندم‌کار، ا. (۱۳۸۸). ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۶(۴): ۸۵-۱۰۰.
- مجرد، ف. و همتی، ش. (۱۳۹۲). ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان، *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۹: ۱۳۷-۱۵۷.
- Bagiorgas, H.S.; Giouli, M.; Rehman, S. and Al-Hadhrani, L.M. (2011). Weibull Parameters Estimation Using Four Different Methods and Most Energy Carrying Wind Speed Analysis, *International Journal of Green Energy*, 8: 529-554.
- Bayem, H.; Petit, M.; Dessante, Ph.; Dufourd F. and Belhomme, R. (2007). Probabilistic Characterization of Wind Farms for Grid Connection Studies, *EWECE "European Wind Energy Conference & Exhibition"*, 7-10, Milan.
- Celluraa, M.; Cirrincioneb, G.; Marvugliaa, A. and Miraouic, A. (2008). Wind speed spatial estimation for energy planning in Sicily: Introduction and statistical analysis, *Renewable Energy*, 33: 1237-1250.
- Daniel, A.R.; Chen, A.A. (1991). Stochastic simulation and forecasting of hourly average wind speed sequences in Jamaica. *Sol Energy*, 46: 1-11.
- Delbari, M.; Afrasiab, P. and Jahani, S. (2013). Spatial interpolation of monthly and annual rainfall in northeast of Iran, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 122(1-2): 103-113.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc) (2004). ArcGIS 9. Getting Started with ArcGIS. ESRI, Redlands.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*, New York: Oxford University Press.
- Keyhani, A.; Ghasemi-Varnamkhasti, M.; Khanali, M. and Abbaszadeh, R. (2010). An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, *Tehran. J. Energy*, 35: 188-201.
- Luo, W.; Taylor, M.C. and Parker, S.R. (2008). A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales, *Int. J. Climatol*, 28: 947-959.
- Mojarrad, F. and Hemmati, Sh. (2013). Evaluation of wind energy potentials in Kermanshah and Kurdistan, *Applied research in geographical science*, 13(29): 137-157.
- Mostafaeipour, A.; Sedaghat, A.; Dehghan-Niri, A.A. and Kalantar, V. (2011). Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2545- 2556.
- Phillips, D.L. and Marks, D.G. (1996). Spatial uncertainty analysis: propagation of interpolation errors in spatially distributed models, *Ecological Modelling*, 91: 213-229.
- Robertson, G.P. (2000). *GS+: Geostatistics for the environment sciences. GS+ User's Guide Version 5*, Plainwell, Gamma design software, 200 p.
- Saghafi, M. (2003). *The new renewable energies*, 2nd ed., Tehran university press.
- Salahi, B. (2004). Evaluation of Wind Energy and Fitting of Actual Probabilities of Wind Occurrence with Using

Weibull Probability distribution Function at Synoptic Station of Ardebil Province, *Journal of Geographical Research*, 72: 87-104.

Stevens, M.J.M. and Smulders, P.T. (1979). The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Eng.*, 3(2):132-45.

Tackle, E.S. and Brown, J.M. (1978). Note on the use of Weibull statistics to characterize wind speed data, *J Appl Meteorol*, 17: 556-9.