

برآورد و برون‌یابی میانگین چگالی توان باد در راستای قائم

(مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک شرق اصفهان)

مژده پدرام^۱، فاطمه رحیم زاده^۲، عبدا... صداقت کردار^۳

(تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۸۷/۷/۲۱)

آگاهی از چگونگی تغییرات قابل ملاحظه سرعت باد با ارتفاع در لایه مرزی جو در ساخت توربین‌های بادی نقش تعیین کننده‌ای دارد. از آنجا که مرکز چرخنده توربین‌های بادی در ارتفاع بالاتر از ارتفاع استاندارد اندازه‌گیری بردار باد در هواشناسی قرار می‌گیرد، برای برآورد پتانسیل انرژی باد در ترازهای مورد نظر، باید میزان برش باد^۳ محاسبه شود. در این مقاله برخی از روش‌های برآورد و برون‌یابی میانگین چگالی توان باد در راستای قائم، از جمله روش پیشنهادی جاستوس^۴ - میکائیل^۵ (JM) و همچنین قانون توان^۶، از لحاظ نظری و عملی بررسی و مقایسه شده‌اند. در روش JM، پارامترهای توزیع ویبال^۶ سرعت باد، در راستای قائم برون‌یابی می‌شوند. این

چکیده

*

*

*

۱ و ۲- مربی پژوهشکده هواشناسی

۳- استادیار پژوهشکده هواشناسی

3. Wind Shear

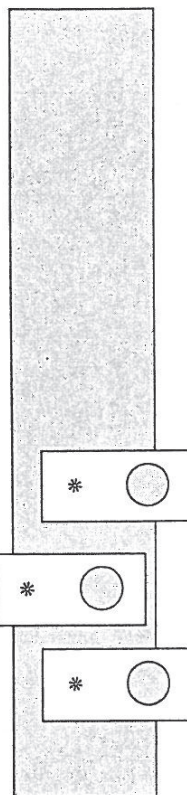
4. Justus

5. Mikhail

6. Weibull

روش فقط برای میانگین‌های مجموعه‌ای مفید بوده و در موارد تک نقطه‌ای با خطای زیادی همراه است. قانون توان $\frac{1}{v}$ ، معمولاً به غیر از مکان‌هایی که طول زبری سطح زیرین آنها در مقایسه با ارتفاع تراز مبنا زیاد است، برآوردهای محافظه کارانه و درعین حال معقولی را از کل انرژی باد، ارائه می‌دهد. به منظور نمایش استفاده عملی از این روش‌ها، داده‌های ساعتی ایستگاه همدیدی شرق اصفهان در دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۲ برای نمونه انتخاب شده‌اند. در این محاسبات ابتدا پارامترهای حاصل از برازش توزیع هیبرید^۱ (پیوند) و بیال به سرعت باد تعیین و سپس میانگین انرژی باد در آن مکان برآورد شده است. متداول‌ترین روش برآورد چگالی باد در راستای قائم، روش قانون توان $\frac{1}{v}$ است. اما این روش همیشه درست عمل نمی‌کند و فقط به عنوان یک راهنما است. در صورت عدم دسترسی به مقادیر واقعی، هنوز هم قانون توان $\frac{1}{v}$ روشی معقول و محافظه کارانه محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: چگالی توان باد، برش باد، هیبرید و بیال، روش جاستوس- میکائیل، قانون توان $\frac{1}{v}$.



مقدمه

در حال حاضر بسیاری از کشورهای جهان از جمله دانمارک و آلمان، درصد قابل توجهی از انرژی الکتریسیته مورد نیاز خود را از طریق نیروگاه‌های بادی تامین می‌کنند. برای مثال در دانمارک حدود ۲۰٪ مصرف الکتریسیته سالانه از انرژی باد تامین می‌شود [۱۷]. تنها در سال ۲۰۰۶، استفاده از انرژی باد موجب صرفه جویی ۱۳ میلیارد یورو در تولید برق اروپا شده است [۱۸]. با این حال هم اکنون سهم نیروگاه‌های بادی در تولید برق جهان تنها ۳٪ است. براساس مطالعه‌ای که دانمارکی‌ها به سفارش انجمن انرژی باد

1. Hybrid

اروپا انجام دادند، در سال ۲۰۱۷ انرژی باد می تواند حدود ۱۰٪ الکتریسیته ی جهان را که معادل نیاز ۵۰۰ میلیون خانوار متوسط اروپایی است، تامین کند [۱۸]. هم اکنون استفاده از توربین های بادی در سراسر دنیا رو به گسترش است. نیاز به تولید انرژی بیشتر، ملاحظات زیست محیطی، کمبود منابع زیرزمینی در اغلب کشورها، از جمله مواردی است که تمایل به استفاده از این فن آوری را افزایش داده است.

امروزه برج های مخصوص انرژی باد با ارتفاع ۷۰ متر توانایی تولید ۱/۵ مگاوات برق را دارند. با نصب چرخنده های قوی تر در این تاسیسات، بهای الکتریسیته حاصل از این منبع غیرفسیلی می تواند تا حد قابل ملاحظه ای کاهش یابد. برای مثال کشور آلمان در صدد است تا با تولید نسل جدیدی از تاسیسات بادی، هزینه این منبع انرژی تجدید پذیر را تا حد الکتریسیته هسته ای کاهش دهد. این برج های جدید با ۹۰ متر ارتفاع، توانایی تولید ۵ مگاوات الکتریسیته را خواهند داشت. ساختار این توربین ها به گونه ای است که بخش محرک آن بسیار سبک تر از نمونه های قبلی است. این ویژگی امکان استفاده از این تاسیسات را در دریا های آزاد که در سطح آنها بادهای قوی تری می وزد، آسان تر می کند [۱۹].

در کشورهای جهان سوم، کاربرد وسیع و منطقی از انرژی باد در گرو بررسی و امکان سنجی مناطق بادخیز و همچنین دسترسی به تکنولوژی ساخت توربین های بادی است. شایان ذکر است، مناسب ترین میانگین سرعت باد برای به صرفه بودن تبدیل انرژی باد به برق حدود ۲۳ کیلومتر در ساعت معادل ۶/۷ متر بر ثانیه است که توجه به آن در تشخیص مناطق بادخیز و مستعد برای استفاده از انرژی آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۲۰]. براساس مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه برآورد پتانسیل انرژی باد در ایران، میزان ظرفیت اسمی سایت ها با در نظر گرفتن بازده کلی ۳۳٪، تنها در ۲۶ منطقه کشور (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) در حدود ۶۵۰۰ مگاوات می باشد. این در شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه های برق کشور، در حال حاضر، ۳۴۰۰۰ مگاوات است [۲۱]. خوشبختانه تاکنون از بین مناطق مختلفی که به عنوان مناطق مستعد برای استفاده از این انرژی ارزیابی شده اند، پروژه هایی در شهرهای رودبار، منجیل و هرزویل در استان گیلان و منطقه بینالود در استان خراسان، در دست اجرا است.

توان باد با مکعب سرعت آن متناسب است [۷]، بنابراین در طراحی دقیق توربین های

بادی باید اطلاعات و ویژگی‌های مربوط به پارامتر برداری باد نظیر سمت و سرعت باد، نوسانات حول میانگین در کوتاه مدت (گاستی‌ها)، نوسانات روزانه، فصلی و سالانه همراه با میزان تغییرات آن با ارتفاع با جزییات کامل در اختیار قرار گیرد. پارامترهای فوق تا حد بسیار زیادی محلی بوده که تنها می‌توانند از طریق اندازه‌گیری‌های دقیق در بلندمدت در آن مکان بدست آیند. به منظور برآورد بهتر مقدار الکتریسیته‌ای که می‌تواند توسط یک توربین بادی تولید شود، باید به جز میانگین سرعت باد که از اطلاعات هواشناسی محاسبه می‌شود، توزیع فراوانی سرعت باد نیز تعیین شود [۱۶].

طبق استانداردهای سازمان هواشناسی جهانی (WMO)^۱ سمت و سرعت باد در ایستگاه‌های هواشناسی در ارتفاع استاندارد ۱۰ متری از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود [۲]. اما فاصله‌ای که مرکز چرخنده توربین بادی (هاب)^۲ از سطح زمین قرار می‌گیرد، بیش از ۱۰ متر است. تا ارتفاع حدود یک تا دو کیلومتری از سطح زمین، نیروی اصطکاک میان لایه هوا و سطح زیرین قابل توجه بوده و سمت و سرعت باد را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل وجود نیروی اصطکاک میان سطح زمین و هوا سرعت باد در سطح زمین صفر است. میزان اثر این نیرو به عناصر زبری سطح زمین مانند صخره‌ها، پوشش گیاهی، درختان و ساختمان‌ها بستگی دارد. برای مثال جنگل‌ها و شهرهای بزرگ بطور قابل ملاحظه‌ای سرعت باد را کاهش می‌دهند. بزرگ راه‌ها و باند فرودگاه‌ها نیز از سرعت باد می‌کاهند، اما این کاهش به نسبت، کمتر از شهرها است. سطوح آبی، هموارتر از سطوح آسفالت هستند و تأثیر کمتری بر سرعت باد دارند. با دور شدن از سطح زمین، اصطکاک کاهش یافته و نیروهای گرادیان فشار سبب زیاد شدن سرعت باد با ارتفاع می‌شود که این افزایش معمولاً بصورت نمایی رخ می‌دهد [۱۳]. برای برآورد مقدار انرژی در دسترس باد، تغییرات باد با ارتفاع یا برش باد نیز، باید مد نظر قرار گیرد. تغییرات قابل ملاحظه سرعت باد با ارتفاع نه تنها بر ساخت توربین‌های بادی بلکه در سایر ابعاد زندگی مانند چگونگی ساخت ساختمان‌ها، پل‌ها، برف‌گیرها، بادشکن‌ها، پخش آلاینده‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.

برای برآورد برش باد و برون‌یابی میانگین چگالی توان باد در راستای قائم، روش‌های

1. World Meteorological Organization (WMO)

2. Hub

مختلفی وجود دارد که هدف این مقاله، بررسی نظری و عملی و مقایسه برخی از آنها است. از این میان، دو روش JM و قانون توان $\frac{1}{\nu}$ انتخاب و برای ایستگاه همدیدی شرق اصفهان، به عنوان نمونه اجرا شده است. از آنجا که اجرای روش‌های مذکور مستلزم محاسبه پارامترهای توزیع برازش داده شده به سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری است، پیش از پرداختن به هدف اصلی مختصری از تئوری توزیع ویبال و نوع خاص آن یعنی هیبرید ویبال که از کاراترین توزیع‌های آماری برای برازش به سرعت باد به شمار می‌رود، ارایه شده است. برای نمایش استفاده عملی از این روش‌ها ابتدا پارامترهای حاصل از برازش توزیع هیبرید ویبال به داده‌های ساعتی ایستگاه شرق اصفهان در دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۲ محاسبه و سپس میانگین انرژی باد در ارتفاع ۱۰ متری ایستگاه تعیین شده است. در انتها نیز میانگین چگالی توان باد در راستای قائم به دو روش فوق برآورد شده است.

مواد و روش‌ها

توزیع سرعت باد

چگالی توان باد با توان سوم سرعت باد متناسب است و مقدار مورد انتظار یا میانگین آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E(P) = \frac{1}{\nu} E(\rho) E(u^3) \quad (1)$$

در این رابطه $E(P)$ میانگین چگالی توان باد، $E(u^3)$ میانگین توان سوم سرعت باد و $E(\rho)$ میانگین چگالی هوا است. معمولاً در مطالعات چگالی توان باد، توزیع ویبال برای نمایش تابع چگالی احتمال سرعت بادهای مورد نظر باد بکار می‌رود [۷]. این تابع برای برآورد توزیع پیوسته سرعت باد از مقادیر گسسته مشاهده‌ای بسیار مناسب است. بیان ریاضی تابع چگالی ویبال برای متغیر u عبارت است از:

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

در رابطه (۲)، k پارامتر شکل^۱ و c پارامتر مقیاس^۲ است، که در اینجا آنها را k و c

1. Shape
2. Scale

دیدبانی می‌نامیم [۱۶]. در صورتیکه سرعت باد برحسب متر بر ثانیه (m/s) باشد، پارامترهای k و c نیز برحسب متر بر ثانیه بدست می‌آیند. میانگین و انحراف معیار توزیع سرعت باد به ترتیب عبارتند از:

$$U = c\Gamma(1 + 1/k) \quad (۳)$$

$$\sigma = c \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (۴)$$

که در آن Γ تابع شناخته شده گاما $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} dt$ است. معادله (۴) را می‌توان بصورت زیر برآورد کرد [۱۰].

$$\sigma = Uk^{-1/4} \quad (۵)$$

در صورت استفاده از تابع ویبال $E(u^r)$ از رابطه (۶) تعیین می‌شود.

$$E(u^r) = \sigma^r \left[\alpha + rU/\sigma + (U/\sigma)^r \right] \quad (۶)$$

U و σ یعنی میانگین و انحراف معیار از روابط (۳) و (۴) بدست می‌آیند و α نیز چولگی توزیع سرعت باد است. نکته جالب آنکه با در نظر گرفتن تبدیل $y = u^r$ ، تابع توزیع فراوانی تجمعی توان سوم سرعت باد نیز به شکل رابطه (۷) خواهد بود:

$$F(y) = 1 - \exp(-c^{-k} y^{k/r}) \quad (۷)$$

با توجه به وجود داده‌های صفر در داده‌های سرعت باد باید از توزیع هیبرید ویبال که در حقیقت توزیعی با میانگین وزنی از داده‌های صفر و غیر صفر است، استفاده شود [۱۵ و ۱]. البته امکان برآورد مستقیم انرژی باد و محاسبه میانگین توان سوم سرعت باد از رابطه (۸) نیز وجود دارد:

$$E_{\text{direct}}(u^r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^r \quad (۸)$$

که در آن n تعداد مشاهدات، $i = 1, \dots, n$ و u_i مشاهدات سرعت باد در زمان‌های $i = 1$ تا n است. نتیجه این روش به ازای تعداد مشاهده زیاد، مطلوب بوده و می‌تواند برای مقایسه با نتایج حاصل از سایر روش‌ها بکار گرفته شود [۱].

برای محاسبه میانگین چگالی توان باد از رابطه (۱)، به میانگین چگالی هوا $E(\rho)$ نیز نیاز است. اما با توجه به تغییرات ناچیز ρ می توان $E(\rho)$ را مطابق رابطه (۹) برابر ρ در نظر گرفت. در این تحقیق مقدار ρ از یک فرمول تجربی که در ایران نیز مورد استفاده قرار می گیرد، محاسبه شده است [۱].

$$E(\rho) = \rho \quad (9)$$

برآورد و برون یابی میانگین چگالی توان باد در راستای قائم

به دلیل وجود نیروی اصطکاک میان سطح زمین و هوای مجاور آن، سرعت باد در سطح زمین صفر است. در لایه مرزی جو سرعت باد در نزدیکی سطح زمین بسیار سریع و در ارتفاعات بالاتر با سرعت کمتری، با ارتفاع افزایش می یابد. در بالای این لایه (در جو آزاد) تغییر سرعت تقریباً به صفر می رسد [۱۶]. ارتفاع لایه مرزی در گستره وسیعی، از چند ده متر تا دو الی سه کیلومتر، تغییر می کند و به آهنگ گرمایش یا سرمایش سطح زیرین، شدت باد، زبری^۱، ناهمواری، حرکت قائم بزرگ مقیاس، فرارفت افقی گرما و رطوبت و عوامل دیگر بستگی دارد [۳ و ۴].

قانون توان

وردایی قائم سرعت باد در لایه مرزی جو، با استفاده از قانون توان^۲ به شکل ریاضی زیر بیان می شود که در آن P تابعی از زبری و پایداری است [۱۲].

$$u_z = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^P \quad (10)$$

در این رابطه z پارامتر ارتفاع و اندیس های ۱ و ۲ به ترتیب تراز مبنا و تراز مورد نظر را مشخص می کنند. براساس معادله (۱۰)، میانگین چگالی توان باد، یا بطور دقیق تر، میانگین توان سوم سرعت باد طبق رابطه زیر با ارتفاع تغییر می کند:

$$E_z(u^3) = E_1(u^3) \left(\frac{z}{z_1} \right)^{3P} \quad (11)$$

1. Roughness
2. Power Law

به این ترتیب تعیین $E(u^2)$ و در نتیجه میانگین چگالی توان باد، به تعیین P که خود تابعی از زبری و پایداری است، خلاصه می‌شود. شایان ذکر است که این پارامتر در موارد دیگری چون آلودگی هوا و طراحی ساختمان نیز کاربرد دارد. در قسمت‌های بعدی چهار روش محاسبه P معرفی و مورد بحث قرار می‌گیرد [۱۳].

(الف) روش جاستوس و میکائیل (JM)

جاستوس و میکائیل با استفاده از برازش حداقل مربعات بر داده‌های دیدبانی به فرمول زیر دست یافتند [۹]:

$$P = \frac{(0.37 - 0.0881 \ln u_1)}{[1 - 0.0881 \ln(z_1/10)]} \quad (12)$$

که در آن u_1 سرعت باد در ارتفاع مبنا (z_1)، یعنی ارتفاع اولین ترازوی که اندازه‌گیری باد در آن انجام می‌شود، است. آنها همچنین با برازش توزیع احتمال ویبال به داده‌های حاصل از دیدبانی، نشان دادند که قانون توان، با تغییرات توزیع ویبال سرعت باد با ارتفاع سازگاری دارد و از آنجا فرمول‌هایی را برای بیان رابطه دو عامل شکل و مقیاس توزیع ویبال (k و c) با ارتفاع، بصورت زیر ارائه دادند:

$$k_r = k_1 \frac{(1 - 0.0881 \ln(z_1/10))}{[1 - 0.0881 \ln(z_r/10)]} \quad (13)$$

$$c_r = c_1 (z_r/z_1)^n \quad (14)$$

که n عبارتست از:

$$n = \frac{(0.37 - 0.0881 \ln C_1)}{[1 - 0.0881 \ln(z_1/10)]} \quad (15)$$

نکته قابل توجه آن است که به دلیل بستگی مقدار پارامتر P به ویژگی‌های محلی، فرمول بندی فوق بطور عام کاربرد ندارد. بطوریکه دوران^۱ و ورهالک^۲ [۵] با استفاده از

1. Doran
2. Verholec

داده‌های ۴۱ نیروگاه هسته‌ای، نشان دادند که روش JM برای برآوردهای تک نقطه‌ای با خطای زیادی همراه است و تنها برای میانگین‌های مجموعه‌ای کاربرد دارد.

(ب) روش قانون توان ($\frac{1}{v}$)

پترسون^۱ و هنسی^۲ در سال ۱۹۷۸ به مغایرت‌های موجود در روش JM پی برده و پیشنهاد در نظر گرفتن P برابر با $\frac{1}{v}$ را ارائه کردند [۱۱]. این پیشنهاد که برپایه نتایج مطالعات آزمایشگاهی ساتن^۳ [۱۴] بنا شده است، تقریب خوبی را از نمایه قائم باد در لایه مرزی جوی خنثی ارائه می‌دهد و به قانون توان $\frac{1}{v}$ معروف است. پترسون و هنسی نشان دادند، استفاده از قانون توان $\frac{1}{v}$ برای نیروگاه‌هایی که زبری سطح زمین آنها زیاد است، خطاهای بزرگی را ایجاد خواهد کرد. آنها همچنین بیان کردند که بستگی P به پایداری نباید خطاهای بزرگی را در برآورد میانگین توان باد ایجاد کند، زیرا پایداری خنثی (زمانیکه قانون توان $\frac{1}{v}$ صادق است) اغلب میانگین سرعت‌های زیاد باد را که برای کارکرد توربین‌های بادی لازم است، در بر می‌گیرد. با این وجود، مشاهدات نشان داده‌اند که در شرایط پایداری جو نیز، سرعت‌های زیاد باد مشاهده می‌شوند. پترسون و هنسی بر این عقیده بودند که به جز جاهایی که طول زبری^۴ سطح زیرین در مقایسه با ارتفاع تراز مبنا زیاد است، قانون توان $\frac{1}{v}$ باید برآوردهای محافظه کارانه و درعین حال معقولی را از کل انرژی باد، ارائه نماید.

شایان ذکر است که در صورت عدم دسترسی به مقادیر واقعی، هنوز هم قانون توان $\frac{1}{v}$ روشی معقول و محافظه کارانه محسوب می‌شود. بطوری که آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده آمریکا نیز با استفاده از این روش، اطلس کامل منابع انرژی باد این کشور را تهیه کرده است و هرچند سال یک بار به روز رسانی می‌شود [۶ و ۲۲].

1. Peterson
2. Hennessey
3. Sutton
4. Roughness Length

(ج) روش برون یابی با در نظر گرفتن بستگی P به زبری

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، عناصر زبری موجود بر روی سطح زمین، سمت و سرعت باد را به شدت تحت تاثیر قرار می دهند. به منظور لحاظ کردن این اثر در محاسبات، از پارامتر طول زبری که جنبه نظری دارد، استفاده می شود. طول زبری، عبارت از ارتفاعی است که سرعت باد در آن ارتفاع برابر صفر است. هرچه طول زبری بیشتر باشد، برش باد نیز بیشتر است. طول زبری یک سطح هموار و یکنواخت با استفاده از میانگین ارتفاع عناصر زبری گوناگون، چگالی ناحیه ای، ویژگی شکل و ویژگی پاسخ دینامیکی آنها (انعطاف پذیری و قابلیت حرکت) مشخص می شود. بدیهی است که عناصر زبری با ارتفاع بیشتر، طول زبری بزرگ تری را دارند. با این وجود، در تمامی موارد، طول زبری تابعی از ارتفاع فیزیکی عناصر زبری است [۱۳].

مهندسی آلمانی به نام جنس-پیتر مولی^۱ در کتاب خود فرمول ساده ای را برای محاسبه P بر حسب زبری مطابق رابطه (۱۶) ارائه کرده است که در آن z طول زبری بر حسب متر است [۶]:

$$P = 1 / \ln(z_1 / z_0) \quad (16)$$

برای مثال، طول زبری سطحی مانند زمین ایستگاه شرق اصفهان که هموار و بدون پوشش گیاهی است، برابر ۰/۰۱ متر در نظر گرفته می شود. با جاگذاری این مقدار در رابطه (۱۶) و قراردادن ارتفاع مبنا برابر ۱۰ متر، P برابر ۰/۱۴۴ یا تقریباً همان مقدار $\frac{1}{7}$ بدست خواهد آمد.

(د) روش برون یابی با در نظر گرفتن بستگی P به زبری و پایداری جو

در هیچیک از روش های فوق، بستگی P به زبری و پایداری لحاظ نشده است. تغییرات و تحول لایه مرزی بویژه از نظر ساختار دمایی و نمایه قائم باد در طول شبانه روز، به شدت بر نحوه انتقال کمیت ها و نیز سرعت انتقال آنها اثر می گذارد. بسته به اینکه در چه مرحله ای از این تحولات باشیم، لایه مرزی ممکن است در یکی از شرایط پایدار، ناپایدار یا خنثی باشد. میزان پایداری یا ناپایداری جو و در نتیجه شدت تلاطم، بسته به زمان شب یا روز،

1. Jens-Peter Molly

همچنین مقدار دما و باد و نحوه تغییرات آنها با ارتفاع، متفاوت است. برای تعیین هر وضعیت و بویژه سهولت در تخمین پارامترهای کاربردی وابسته دیگر، روش‌هایی وجود دارد که معروف‌ترین آن، طبقه بندی پاسکویل^۱ است [۳].

روش برون یابی با در نظر گرفتن بستگی P به زبری و پایداری جو، امکان برآورد چگالی‌های انرژی باد میانگین را با استفاده از پارامترهای قابل اندازه گیری، فراهم می‌آورد. هر چند اجرای این روش نتایج مطلوب تری را نسبت به دو روش قبل ارائه می‌دهد، اما از پیچیدگی خاصی برخوردار است. با توجه به هدف مقاله و طولانی بودن روابط ریاضی، جداول و نمودارهای مورد نیاز جهت اجرای این روش، از توضیح مطلب خودداری و برای آگاهی بیشتر خواننده منابع ۱، ۸ و ۱۲ معرفی می‌شوند.

برون یابی لگاریتمی

برون یابی سرعت باد با ارتفاع، با استفاده از رابطه لگاریتمی زیر (۱۷) نیز قابل انجام است [۶]:

$$u_z = \ln(z_p / z_0) / \ln(z_1 / z_0) u_1 \quad (17)$$

این روش که به روش اروپایی معروف است، برای ناحیه خطوط ساحلی جلگه آلمان شمالی، بویژه دانمارک نتایج خوبی را به همراه داشته است. در نواحی باز با تعداد کمی بادشکن، مانند نیروگاه‌های ساحلی، مدل لگاریتمی نظیر قانون توان $\frac{1}{p}$ عمل می‌کند. اما برای نواحی خشک دور از ساحل این دو روش نتایج کاملاً متفاوتی را ارائه خواهند داد. هر چه از خط ساحلی دورتر شویم این تفاوت بارزتر خواهد شد و مدل لگاریتمی انرژی بیشتری را نسبت به روش قانون توان $\frac{1}{p}$ برآورد می‌کند.

داده ها

طبق استانداردهای سازمان هواشناسی جهانی پارامتر برداری باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، در ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی حداقل هر سه ساعت یکبار اندازه گیری می‌شود. در محاسبات مربوط به انرژی باد داده‌های در مقیاس زمانی ساعتی و حتی در

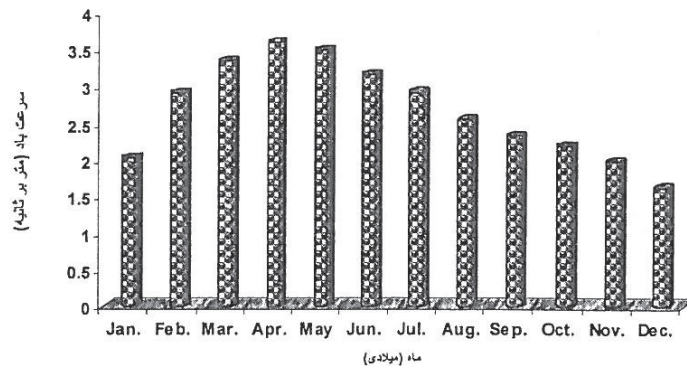
1. Pasquill

فاصله زمانی کمتر مناسب ترند. با توجه به بضاعت موجود و کیفیت مناسب داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک، برای انجام این تحقیق از داده‌های ایستگاه سینوپتیک فرودگاهی شرق اصفهان، به عنوان نمونه استفاده شده است.

ایستگاه شرق اصفهان در موقعیتی با طول جغرافیایی $۵۲^{\circ}۵۱'$ و عرض جغرافیایی $۳۲^{\circ}۴۴'$ در ارتفاع ۱۵۴۳ متری از تراز متوسط دریا قرار گرفته است. سکوی هواشناسی ایستگاه به اندازه کافی از موانع اطراف، فاصله دارد و زمین‌های اطراف آن فاقد پوشش گیاهی می‌باشد. ساختمان فرودگاه نیز در ۲۰۰ متری این ایستگاه واقع شده است. محل ایستگاه شرق اصفهان از ابتدای تاسیس یعنی سال ۱۹۷۶ میلادی (۱۳۵۵ هجری شمسی) تاکنون تغییر نکرده است. در این ایستگاه دیدبانی وضع هوا در ۲۴ ساعت شبانه روز انجام می‌شود و تعداد داده‌های گمشده آن تقریباً برابر صفر است. بنابراین، می‌توان گفت که داده‌های سمت و سرعت باد در این ایستگاه تداوم مناسبی دارد و می‌تواند به عنوان یک نمونه مناسب داده‌ای بکار گرفته شود.

نتایج

شکل ۱ میانگین ماهانه سرعت باد در ایستگاه شرق اصفهان را که از متوسط سرعت باد در ساعات دیدبانی بدست آمده است نشان می‌دهد. بیشترین میانگین ماهانه مقدار سرعت باد در این ایستگاه در گستره $۳/۳$ تا $۳/۷$ متر بر ثانیه و متعلق به دوره چهار ماهه مارس تا جون است. پس از خاتمه این دوره سرعت باد رو به کاهش گذاشته و در ماه دسامبر به کمترین مقدار خود و به حدود تقریبی $۱/۵$ تا ۲ متر بر ثانیه می‌رسد. با رسم شکل‌های توزیع فراوانی ماهانه سرعت باد برای ۱۲ ماه سال، درمی‌یابیم که توزیع ماهانه سرعت باد در این ایستگاه تقریباً از دو الگوی کلی تبعیت می‌کند [۱]. نمونه‌ای از هر یک از این الگوها در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱- میانگین ماهانه سرعت باد در ایستگاه شرق اصفهان برای دوره (۱۹۹۲-۲۰۰۵)

شکل ۲ توزیع سرعت باد را در ماه آگوست نشان می‌دهد که الگوی تقریبی توزیع سرعت باد در ماه‌های مارس تا آگوست نیز مشابه آن است. در این الگو توزیع باد از دو بخش غیرصفر و صفر تشکیل شده است. بخش غیرصفر آن دارای چولگی مثبت بوده و حالت توزیع ویبال را به خوبی نشان می‌دهد. ستون داده‌های صفر نیز تأییدی بر استفاده از توزیع ویبال هیبرید برای محاسبه انرژی باد در ارتفاع ۱۰ متری است. در ماه‌های سپتامبر تا فوریه الگوی توزیع سرعت باد تقریباً شبیه شکل ۳ است. در این حالت داده‌های غیرصفر توزیعی نمایی دارند، که این نوع توزیع نیز خود حالتی از توزیع ویبال است و در آن k برابر با ۱ می‌باشد.

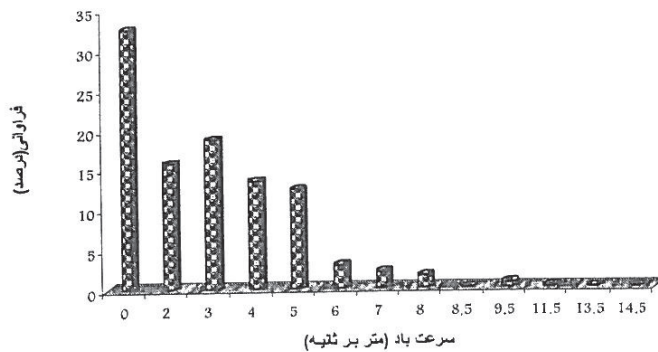
میانگین ماهانه چگالی توان باد، ابتدا با استفاده از داده‌های ساعتی و بکارگیری توزیع هیبرید ویبال مقدار $E(u^3)$ در ارتفاع ۱۰ متری، محاسبه گردید. مقادیر عوامل شکل (ک) و مقیاس (c) از طریق برازش توزیع احتمال ویبال به داده‌های ساعتی غیرصفر سرعت‌های باد و ترکیب آن با داده‌های صفر یعنی استفاده از تابع هیبرید ویبال مشخص شدند. به منظور مقایسه نتایج بدست آمده $E(u^3)$ به روش مستقیم، یعنی رابطه (۸)، نیز محاسبه شد. پس از برآورد $E(u^3)$ به دو روش ذکر شده و محاسبه میانگین ماهانه چگالی هوا، تخمین چگالی توان باد با استفاده از رابطه (۱) صورت پذیرفت [۱]. در شکل ۴ نتایج حاصل از روش ویبال و روش مستقیم مقایسه شده‌اند. بطوری که دیده می‌شود، دامنه تغییرات ماهانه چگالی توان باد براساس روش مستقیم و توزیع ویبال از ۱۶/۲ وات بر متر مربع در ماه

دسامبر تا ۷۵/۸ وات بر متر مربع در ماه آوریل تغییر می‌کند. نتایج محاسبات فوق در جدول ۱، قسمت (الف) نیز بصورت خلاصه آورده شده است.

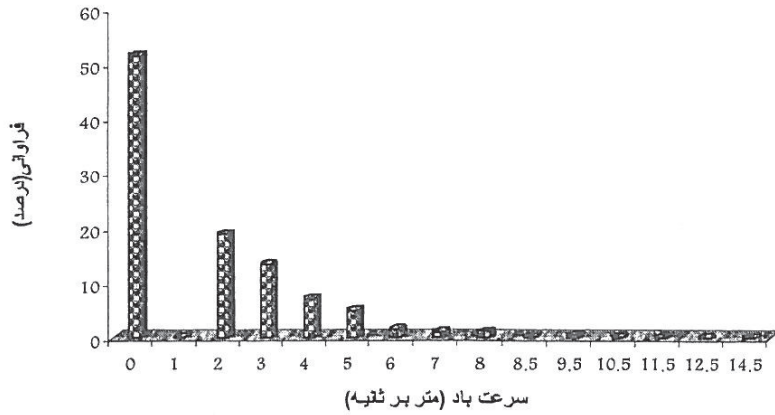
همانطور که در قسمت معرفی روش‌ها نیز گفته شد، بکارگیری روش‌های قانون توان $\frac{1}{v}$ ، لگاریتمی و فرمول مولی برای برآورد میانگین چگالی انرژی باد ایستگاه شرق اصفهان نتایج تقریباً یکسانی را بدست خواهند داد. از این رو در این قسمت نتایج حاصل از دو روش JM و توان $\frac{1}{v}$ با یکدیگر مقایسه می‌شود.

پس از محاسبه P به روش پیشنهادی JM از رابطه (۱۲)، $E_p(u^2)$ برای ارتفاع ۴۰ متری (z_p) به روش JM از معادله (۱۱) برآورد شد. در واقع در این محاسبات ارتفاع هاب (z_0) برابر ۴۰ متر فرض شده است. خلاصه‌ای از نتایج حاصل در قسمت (ب) از جدول ۱ ارائه شده است. براساس روش JM، کمترین مقدار چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری ایستگاه شرق اصفهان برابر ۴۶/۱ وات بر متر مربع در ماه دسامبر و بیشترین آن برابر ۲۱۴/۳ وات بر متر مربع در ماه آوریل است. به منظور تعیین چگونگی توزیع سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری پارامترهای c و k توزیع ویبال در ارتفاع مورد نظر نیز با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) تعیین شدند که مقادیر آنها در قسمت (ب) از جدول ۱ درج شده است.

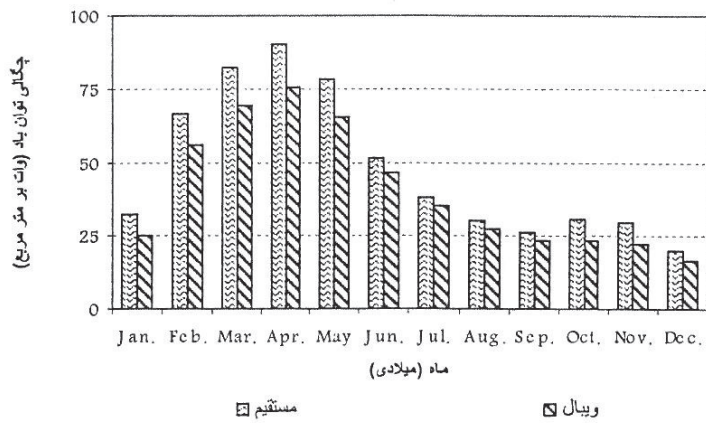
برای محاسبه میانگین چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری به روش قانون توان $\frac{1}{v}$ ، مقدار P در رابطه (۱۱) برابر $\frac{1}{v}$ قرار داده شد. نتایج حاصل از این برآورد در قسمت (ج) از جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- توزیع فراوانی سرعت باد در ماه آگوست در ایستگاه شرق اصفهان برای دوره (۲۰۰۵-۱۹۹۲)



شکل ۳- توزیع فراوانی سرعت باد در ماه دسامبر در ایستگاه شرق اصفهان برای دوره (۱۹۹۲-۲۰۰۵)



شکل ۴- برآورد چگالی ماهانه انرژی باد با استفاده از دو روش مستقیم و وینال در ایستگاه شرق اصفهان برای دوره (۱۹۹۲-۲۰۰۵)

جدول ۱- برآورد میانگین چگالی تون باد در راستای قائم در ایستگاه شرق اصفهان (الف) مقادیر دینامی، (ب) روش JM (ج) روش قانون تون^۱

ماه	زمانویه	فوره	مارس	آوریل	م	جون	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	عنوان
الف: مقادیر دینامی													
ارتفاع مینا (m)	۱۰/۱۰	۱۰/۱۰	۴/۷	۴/۹	۴/۷	۴/۴	۴/۱	۲/۸	۲/۶	۲/۶	۲/۵	۲/۳	ارتفاع مینا (m)
میانگین سرعت باد در ارتفاع مینا (m/s)	۲/۷	۴/۴	۴/۷	۴/۹	۴/۷	۴/۴	۴/۱	۲/۸	۲/۶	۲/۶	۲/۵	۲/۳	میانگین سرعت باد در ارتفاع مینا (m/s)
وزنایس سرعت باد در ارتفاع مینا ^۲ (m/s) ^۲	۶/۹	۱۰/۳	۱۷/۵	۱۲/۱	۱۱/۳	۹/۳	۷/۹	۶/۸	۶/۳	۶/۳	۲/۵	۲/۳	وزنایس سرعت باد در ارتفاع مینا ^۲ (m/s) ^۲
انحراف معیار سرعت باد در ارتفاع مینا (m/s)	۲/۶	۳/۲	۳/۴	۲/۵	۲/۳	۲/۰	۲/۸	۲/۶	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۴	انحراف معیار سرعت باد در ارتفاع مینا (m/s)
پارامتر مقیاس (C)	۴/۲	۵/۰	۵/۳	۵/۵	۵/۳	۴/۹	۴/۶	۴/۲	۴/۱	۴/۰	۴/۰	۳/۸	پارامتر مقیاس (C)
پارامتر شکل (K)	۷/۳	۲/۱	۲/۱	۲/۲	۲/۳	۲/۵	۲/۷	۲/۶	۲/۶	۲/۴	۲/۲	۲/۲	پارامتر شکل (K)
میانگین چگالی تون باد (W/m ^۳)	۲۵/۰	۵۶/۰	۶۹/۴	۷۵/۸	۶۵/۴	۴۶/۳	۳۴/۸	۲۷/۰	۲۳/۲	۲۳/۳	۲۲/۱	۱۶/۳	میانگین چگالی تون باد (W/m ^۳)
جه: روش JM													
ارتفاع هاب (m)	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	۴۰/۰	ارتفاع هاب (m)
n	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳۰	n
p	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	p
پارامتر مقیاس (C)	۴/۸	۵/۷	۶/۱	۶/۳	۶/۱	۵/۶	۵/۲	۴/۸	۴/۶	۴/۶	۴/۵	۴/۳	پارامتر مقیاس (C)
پارامتر شکل (K)	۲/۵	۲/۱	۲/۲	۲/۳	۲/۳	۲/۷	۲/۹	۲/۸	۲/۸	۲/۵	۲/۳	۲/۴	پارامتر شکل (K)
میانگین چگالی تون باد (W/m ^۳)	۷۰/۸	۱۵۸/۵	۱۹۶/۲	۲۱۴/۳	۱۸۴/۹	۱۳۰/۸	۹۸/۶	۷۶/۴	۵۶/۶	۶۵/۸	۶۷/۴	۴۶/۱	میانگین چگالی تون باد (W/m ^۳)
ج- روش قانون تون ^۱													
میانگین چگالی تون باد (W/m ^۳)	۴۵/۴	۱۰۰/۵	۱۲۵/۶	۱۳۷/۲	۱۱۸/۴	۸۳/۸	۶۳/۱	۴۹/۰	۴۲/۰	۴۲/۱	۴۰/۰	۲۹/۵	میانگین چگالی تون باد (W/m ^۳)

مقایسه نتایج حاصل از روش JM و توان $\frac{1}{v}$ نشان می‌دهد که در کلیه ماه‌ها روش JM مقادیر چگالی توان باد را بیش از قانون توان $\frac{1}{v}$ برآورد نموده است. به دلایلی که در قسمت معرفی این روش‌ها بیان شد، نتایج حاصل از روش توان $\frac{1}{v}$ از اعتبار بیشتری نسبت به روش JM برخوردار است.

بحث

آسان‌ترین روش برای محاسبه افزایش سرعت باد با ارتفاع استفاده از روش قانون توان است. روش دیگر، برون یابی لگاریتمی است که در اروپا متداول است. برون یابی لگاریتمی برداشتی ریاضی از شناخت چگونگی وزش باد بر روی سطح زمین است. در صورتیکه معادله قانون توان برداشتی تجربی از مقادیر واقعی است. هرچند که ممکن است معادله قانون توان اعتبار علمی کمی داشته باشد، اما نتایج خوبی را ارائه می‌دهد و محافظه کارانه تر از روش لگاریتمی عمل می‌کند. هر دو این روش‌ها به برآورد طول زبری سطح زیرین نیز نیاز دارند. در جاییکه آهنگ افزایش سرعت باد با ارتفاع مشخص نیست، معمولاً از روش قانون توان $\frac{1}{v}$ استفاده می‌شود. در این صورت، چنانچه ارتفاع برج توربین بادی دو برابر شود، سرعت باد با ۱۰٪ افزایش برآورد می‌شود. همچنین ۵ برابر شدن ارتفاع برج سبب افزایش سرعتی معادل ۲۵٪ مقدار اولیه خواهد شد. روش قانون توان $\frac{1}{v}$ یکی از روش‌های متداول برآورد انرژی باد در راستای قائم است. البته باید توجه داشت که این روش همیشه درست عمل نمی‌کند و فقط به عنوان یک راهنما است.

منابع

- ۱- پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۵، پهنه بندی اقلیمی استان اصفهان در راستای استفاده از انرژی‌های نو.
- ۲- ریتالاک، بی. جی.، ۱۳۷۳، هواشناسی عمومی، ترجمه احمد نوحی، سازمان هواشناسی کشور، ۱۹۸۴.
- ۳- وکیلی، غ.، ۱۳۷۸، مشاهده ساختار تلاطمی لایه سطحی جو در شرایط پایدار و کاربرد آن در مسئله پخش آلودگی هوا، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- 4- Arya, S. pal, 1988, Introduction to Micrometeorology, Academic Press.

- 5- Doran, J. C., M. G. Verholek, 1978, a Note on the Vertical Extrapolation Formulas for Weibull Velocity Distribution Parameters. *J. Appl. Meteor.*, 17, 410-412.
- 6- Gipe, P., 2004, *Wind Power*, James & James, London, UK.
- 7- Hennessy, J. P., 1977, Some Aspects of Wind Power Statistics, *J. Appl. Meteor.*, 16, 119-128.
- 8- Jensen, N. O., E. L., Petersen, I., Troen, 1984, Extrapolation of Mean Wind Statistics with Special Regard to Wind Energy Applications, WMO/TD-No.15, Geneva.
- 9- Justus, C. G., Mikhail, 1976, Height Variation of Wind Speed and Wind Speed Distribution Statistics, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 261-264.
- 10- Justus, C. G., W. R. Hargraves, A. Milhai, and D. Garber, 1978, Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions, *J. Appl. Meteor.*, 17, 350-353.
- 11- Peterson, E. W., and J. P. Hennessey, 1978, On The Use of Power Laws for Estimates of Wind Power Potential, *J. Appl. Meteor.*, 17, 390-394.
- 12- Sedefian, L., 1980, On the Vertical Extrapolation of Mean Wind Power Density, *J. Appl. Meteor.*, 19, 488-493.
- 13- Stull, R. B., 1989, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers.
- 14- Sutton, O. G., 1953, *Micrometeorology*, McGraw Hill.
- 15- Takle, E. S., Brown, J. M., 1977, Note on the Use of Weibull Statistics to Characterize Wind- Speed Data, *J. Appl. Meteor.*, 17, 556-559.
- 16- Tiwari, G. N., M. K. Ghosal, 2005, *Renewable Energy Resources*, Alpha Science International Ltd., Harrow, UK.
- 17- URL1: <http://www.smhm490.parsiblog.com>
- 18- URL2: <http://www.gozaresh.com>
- 19- URL3: <http://www.farabiphysic.blogfa.com>
- 20- URL4: <http://www.roshd.ir>
- 21- URL5: <http://www.suna.org.ir>
- 22- URL6: http://www.nrel.gov/wind/wind_map.html