

جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۱۹، تابستان ۱۳۹۵
صص. ۹۹-۱۱۶

توان سنجی باد برای توسعه پایدار انرژی در استان همدان

آرش آذری - استادیار مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
زهرا زارعی* - کارشناس ارشد فیزیک اتمی مولکولی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، ایران
زهرا حاجی بابایی - کارشناس ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، ایران

وصول: ۱۳۹۴/۱۲/۰۱ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱

چکیده

بررسی جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در جهان رو به گسترش است و بهره‌برداری از این منابع انرژی پایدار، به دلیل ضرورت‌های زیست‌محیطی و تنوع‌بخشیدن به منابع انرژی مورد استفاده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش، تعیین پتانسیل انرژی باد و بررسی موجودیت نقاط بهینه احتمالی، جهت بهره‌برداری از انرژی پایدار باد با استفاده از آمار ایستگاه‌های سینوپتیک استان همدان است. در این تحقیق، ابتدا داده‌های بلندمدت سه ساعته سمت و سرعت باد، در ایستگاه‌های سینوپتیک استان همدان در طی دوره آماری ۵ ساله مورد ارزیابی قرار گرفت و گلباد سالانه در محل ایستگاه‌ها ترسیم شد. سپس توزیع‌های آماری مختلف برای برازش بر داده‌های باد مورد آزمون قرار گرفت و احتمال تجربی داده‌ها با استفاده از توزیع منتخب محاسبه گردید. نتایج نشان داد، در ایستگاه همدان توزیع ویبول و در ایستگاه‌های نوژه، نهاوند و تویسرکان توزیع گوسی معکوس بیشترین دقت را در پیش‌بینی احتمالات وقوع سرعت باد دارد؛ همچنین چگالی توان باد در حداکثر ارتفاع ممکن استفاده از توان باد، در ایستگاه‌های همدان، نوژه، نهاوند و تویسرکان به ترتیب ۱۵/۲۴، ۲۱/۷، ۱۰/۸ و ۶/۳ وات در هر مترمربع محاسبه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، هیچ‌کدام از ارقام به دست آمده در مقایسه با استانداردهای لازم جهت احداث نیروگاه بادی در حد مطلوب نیست. با توجه به تعداد ساعات وزش باد و همچنین درصد موجودیت باد لازم بین سرعت‌های راه‌اندازی و توقف توربین‌های بادی، بهره‌برداری از انرژی باد در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های مورد بررسی مقرون به صرفه نبوده و توصیه نمی‌گردد.

واژگان کلیدی: انرژی باد، توزیع‌های احتمالاتی، سرعت باد، توسعه پایدار، همدان.

مقدمه

توسعه پایدار فرایندی است برای رسیدن به پایداری در هر فعالیتی که نیاز به جایگزینی سریع و یکپارچه آن توسط منابع تجدیدپذیر وجود دارد. در آینده‌ای نزدیک، انرژی‌های نو و تجدیدشونده سهم بیشتری در تأمین انرژی جهان به خود اختصاص خواهند داد. پایداری، عدم آلودگی، گسترش این منابع در تمام جهان و سادگی بهره‌برداری، انرژی‌های تجدیدپذیر را به ویژه برای کشورهای در حال توسعه از جاذبه بیشتری برخوردار کرده است. از این رو، در برنامه‌های توسعه ای و سیاست‌های ملی و بین‌المللی کشورها، منابع تجدیدپذیر انرژی مورد اهمیت قرار گرفته است. از آنجا که اکثر مناطق کشور بر اساس تقسیم‌بندی‌های اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه خشک به حساب می‌آید و افزایش شدت خشکسالی در سال‌های اخیر بر اهمیت موضوع می‌افزاید، در صورت تکیه بر انرژی حاصل از نیروگاه‌های آبی و حرارتی به عنوان منابع تولید برق در این مناطق، ممکن است در سال‌های کم آبی کشور با کمبود تولید برق مواجه شود. کاهش سریع سوخت‌های فسیلی، بحث گرمایش جهانی و اثر پدیده گلخانه‌ای و ریزش باران‌های اسیدی، لزوم بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدشونده، به ویژه انرژی باد را افزایش داده است (رحمان^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). فعالیت‌های عمده‌ای در زمینه پتانسیل‌سنجی انرژی باد در سطح جهان صورت پذیرفته است که در این قسمت، برخی از این موارد ذکر می‌گردد. پیش از سال‌های ۱۹۷۰ از توابع مختلفی برای تخمین توزیع احتمالاتی باد استفاده شده است و پس از تحقیقات متعدد، توزیع ویبول به این منظور ارائه گردید. ویسر^۲ (۲۰۰۳) با مطالعه انرژی تخمینی باد در منطقه غرب هند نشان داد که توزیع ویبول، توزیع مناسبی برای تخمین انرژی باد با استفاده از داده‌های ساعتی است. در این مطالعه، تغییرات سرعت باد در طول شبانه روز، تخمین پارامترهای توزیع ویبول به منظور تخمین انرژی قابل استحصال و نقش آن بر میزان استحصال انرژی، مورد بررسی قرار گرفت. احمد شاتا و هانیچ^۳ (۲۰۰۶) پتانسیل انرژی باد و تولید برق ساحلی دریای مدیترانه در مصر را ارزیابی کرده و چگالی انرژی باد ارتفاع ۳۰ و ۵۰ متری را برآورد کردند.

الاموریا و بن عامر^۴ (۲۰۰۸) با استفاده از داده‌های چهار ساله میانگین ساعتی سرعت و جهت باد در تونس، پارامترهای توزیع ویبول و توزیع رایلی را تخمین زده و انرژی خروجی سالانه برای توربین منتخب را در منطقه مورد مطالعه، محاسبه نمودند. مصطفایی‌پور و ابرقویی (۲۰۰۸) به بررسی انرژی باد در نواحی منتخبی از منجیل در شمال ایران پرداختند. مطابق با تحقیقات صورت گرفته توسط کارت^۵ و همکاران (۲۰۰۹) به کمک توزیع ویبول می‌توان انرژی خروجی توربین، ضریب ظرفیت، تخمین تغییرات سرعت باد با ارتفاع، بررسی خصوصیات سری زمانی سرعت و پیش بینی مقادیر سرعت، آنالیز عملکرد توربین و برازش داده‌های سرعت ماهانه فصلی و سالانه را انجام داد. بیکلی و پالم^۶ (۲۰۰۹) به بررسی پتانسیل انرژی باد در چهار منطقه اتیوپی در ارتفاع ده متری پرداختند. بیلو و کوراسین^۷ (۲۰۰۹) ویژگی‌ها و پتانسیل انرژی باد در نوادای غربی را با استفاده از داده‌های باد، دما و داده‌های فشار در دوره ۴/۵ ساله برای چهار مکان در ارتفاع بالای ۵۰ متر مطالعه کردند. آزاد^۸ و همکاران (۲۰۱۳) و

1- Rehman

2- Weisser

3- Ahmed-Shata & Hanitsch

4- Elamouria & Ben Amara

5- Carta

6- Bekele & Palm

7- Belu & Koracin

8- Azad

ایندهاماتی^۱ و همکاران (۲۰۱۳) نیز در تحقیقات جداگانه‌ای پارامترهای توزیع ویبول را برای برآورد توان باد در ایستگاه‌های مطالعاتی ارزیابی نمودند.

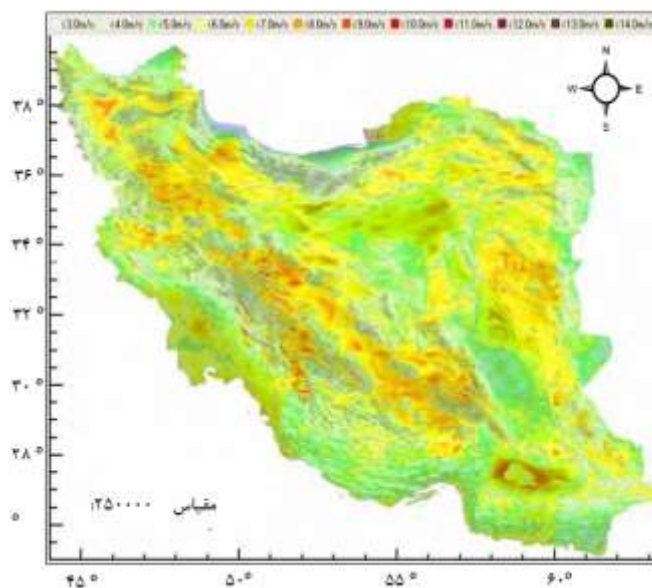
مورگان^۲ و همکاران (۲۰۱۱)، کولا^۳ و همکاران (۲۰۱۲)، مسران^۴ و همکاران (۲۰۱۳) و اوردا^۵ و همکاران (۲۰۱۵) دیگر محققانی هستند که به بررسی قابلیت توزیع‌های مختلف برای پیش‌بینی احتمالات وقوع باد در مناطق مطالعاتی گوناگون پرداختند. نتایج بررسی این محققان نشان داد که توزیع ویبول در برخی از مناطق برازش خوبی بر داده‌های باد ندارد و توزیع‌های دیگر در مقایسه با این توزیع کارایی بهتری دارند.

در ایران نیز برخی پژوهش‌ها در رابطه با پتانسیل سنجی باد انجام شده است. جمیل (۱۳۸۰)، داده‌های جهت و سرعت باد در یک منطقه جغرافیایی را تابع ارتفاع، فصل و ساعت اندازه‌گیری دانست و نتیجه گرفت عموماً اندازه‌گیری سرعت و جهت‌های ورزش باد برای یک سال کامل کفایت می‌کند. صلاحی (۱۳۸۲)، به پتانسیل سنجی انرژی باد با استفاده از توزیع احتمال ویبول در استان اردبیل پرداخته و در بین ایستگاه‌های مورد بررسی، ایستگاه اردبیل برای بهره‌برداری از انرژی باد مناسب ارزیابی شد. جهانگیری و همکاران (۱۳۸۴)، به محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع ویبول دو پارامتره و داده‌های سه ساعته باد مناطق سردشت و ماهشهر در یک دوره زمانی ۱۰ ساله پرداختند. حق پرست و همکاران (۱۳۸۴) پتانسیل انرژی باد هفت منطقه در شمال غرب کشور را ارزیابی و منطق مورد نظر را از نظر پتانسیل انرژی باد برای احداث نیروگاه بادی رتبه‌بندی کردند. بافکار و همکاران (۱۳۹۱) پتانسیل بادی انرژی باد و کاربرد آن در مکان بادی نیروگاه بادی را در استان کرمانشاه با استفاده از داده‌های سه ساعته سمت و سرعت باد برای دوره آماری ۱۱ سال، پنج ایستگاه سینوپتیک استان با محاسبه احتمال تجربی داده‌ها با استفاده از توزیع ویبول، مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده، ایستگاه روانسر مکان مناسبی جهت احداث نیروگاه بادی شناخته شد.

از مهم‌ترین تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه، امکان سنجی استفاده از انرژی باد در برخی از نقاط ایران در قالب چند طرح پژوهشی است که به وسیله معاونت انرژی وزارت نیرو اجرا شد و چند طرح دیگر نیز در دست اجرا دارد. مطابق با بررسی‌های سازمان انرژی‌های نو (۱۳۹۱)، در بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های تولید برق بوده که آلودگی محیط‌زیست نداشته و پایان‌ناپذیر است. در مطالعات اولیه صورت‌گرفته توسط این سازمان و بررسی میدانی در ۴۵ سایت در ۲۶ منطقه از کشور، پتانسیل انرژی بادی کشور ۶۵۰۰ مگاوات برآورد گردیده است. شکل ۱، اطلس باد کشور را نشان می‌دهد (سازمان انرژی‌های نو، ۱۳۹۱). بررسی این نقشه نشان می‌دهد اکثر مناطق استان در پهنه‌ای با سرعت کمتر از شش متر بر ثانیه قرار دارد.

با توجه به محرومیت استان از نظر تولید انرژی برق آبی به جهت عدم وجود رودخانه‌های پر آب در سطح استان همدان و به‌ویژه افت شدید آب زیرزمینی دشت‌های استان که در آینده موجب اختلال در تأمین مصرف آب تنها نیروگاه حرارتی استان خواهد گشت، بررسی و امکان سنجی استفاده از منابع انرژی دیگر به‌خصوص انرژی‌های پاک مانند نیروگاه‌های بادی ضروری به نظر می‌رسد. از این رو، با توجه به اهمیت موضوع، هدف اصلی این پژوهش، بررسی پتانسیل انرژی باد در ایستگاه‌های سینوپتیک استان همدان است. با وجودی که در اکثر پژوهش‌های صورت‌گرفته، توزیع ویبول به عنوان توزیع مناسب برای داده‌های باد معرفی شده، بررسی قابلیت توزیع‌های آماری

1- Indhumathy
2- Morgan
3- Kollu
4- Masseran
5- Ouarda

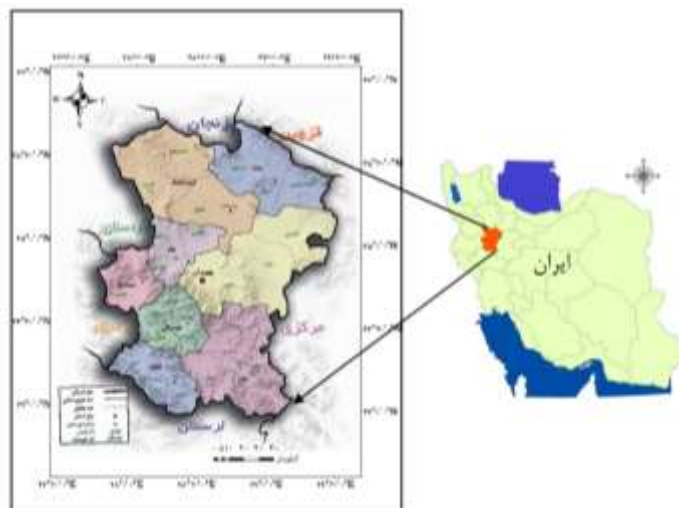


شکل ۱. نقشه اطلس باد ایران (سازمان انرژی‌های نو، ۱۳۹۱)

مختلف در پیش‌بینی احتمالات وقوع سرعت باد در ایستگاه‌های مطالعاتی از دیگر اهداف این تحقیق است. پژوهش حاضر می‌تواند نمایی از وضعیت انرژی باد را در ایستگاه‌های سینوپتیک استان همدان نشان دهد؛ همچنین اعتبار نقشه باد کشور را که بر اساس بررسی‌های اولیه و در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ با دقت کم صورت گرفته در سطح استان ارزیابی نماید.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی این پژوهش، مطابق با شکل ۲، محدوده استان همدان است که در غرب ایران بین عرض‌های جغرافیایی ۲۳ تا ۲۵ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ تا ۴۹ درجه شرقی واقع شده و مساحتی برابر ۱۹۴۹۳ کیلومترمربع را داراست. ابتدا داده‌های جهت و سرعت سه ساعته باد ایستگاه‌های سینوپتیک استان همدان در یک دوره ۵ ساله (۲۰۰۹-۲۰۱۳) از سازمان هواشناسی دریافت شد. با توجه به لزوم وجود داده‌های پیوسته سه ساعته باد به مدت حداقل ۵ سال متوالی، تنها از چهار ایستگاه که داده‌های باد در آنها از تداوم کافی برخوردار بودند و مشخصات آنها در جدول ۱، ارائه شده است استفاده شد.



شکل ۲. موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در این پژوهش

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
همدان	۴۸° ۳۳'	۳۴° ۵۱'	۱۷۴۹
نوزه	۴۸° ۴۱'	۳۵° ۱۲'	۱۶۷۹
نهایوند	۴۸° ۲۴'	۳۴° ۰۹'	۱۶۵۸
تویسرکان	۴۸° ۲۶'	۳۴° ۳۳'	۱۷۸۳

ابتدا جهت بررسی وضعیت سمت و سرعت باد گلیاد سالانه ایستگاه‌های منتخب با استفاده از نرم افزار WRPLOT و برحسب نات ترسیم شد. برای برازش یک توزیع مناسب بر داده‌های باد، توزیع‌های احتمالاتی مختلف مورد آزمون قرار گرفت که روابط و پارامترهای آن در جدول ۲ آورده شده‌اند.

در روابط زیر، M پارامتر محلی و K ، α و λ پارامتر شکل و σ ، C و β پارامتر مقیاس نامیده می‌شوند و سرعت باد برحسب متر بر ثانیه (هر نات معادل ۰/۵۱۴ متر بر ثانیه است) به جای پارامتر x در این معادلات قرار می‌گیرد. بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد، توزیع احتمال ویبول در بررسی‌های آماری باد در مناطق مختلف، به طور گسترده استفاده شده است؛ اما در این تحقیق، جهت بررسی این موضوع، از توزیع‌های مختلف در مقایسه با توزیع احتمال ویبول استفاده شد تا پس از انتخاب توزیع مناسب در هر ایستگاه، توان سنجی سرعت باد مورد

جدول ۲. توزیع‌های احتمالاتی مختلف برازش داده‌شده بر داده‌های باد

پارامترهای توزیع پس از برازش بر داده‌ها								تابع چگالی احتمال	نام توزیع
همدان		نوزه		نهایوند		تویسرکان			
σ	M	σ	M	σ	M	σ	M	$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) - \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$	گامبل تیپ ۱
۰/۹۱	۱/۳۴	۱/۰۴	۱/۶۷	۱/۲۱	۱/۹۶	۱/۰۲	۱/۷۵		
K	C	K	C	K	C	K	C	$f(x) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{x}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^K\right]$	ویبول
۱/۳۹	۱/۷۶	۱/۵	۲/۰۲	۲/۶	۲/۹۵	۱/۴۵	۱/۷۶		
σ	M	σ	M	σ	M	σ	M	$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{x\sigma\sqrt{2\pi}}$	لوگ نرمال ۲ پارامتری
۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۳۹	۰/۹۳	۰/۵۰	۰/۵۵		
α	β	α	β	α	β	α	β	$f(x) = \frac{\exp(-\beta/x)}{\beta\Gamma(\alpha)(x/\beta)^{\alpha+1}}$	پیرسون تیپ ۵
۵/۲۷	۸/۲۷	۴/۹۴	۸/۲۸	۶/۶۹	۱۷۳	۴/۶۳	۷/۲۰		
σ	σ	σ	σ	σ	σ	σ	σ	$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right)$	ریلی
۱/۵۵	۱/۶۹	۲/۰۸	۱/۶۲						
α	β	α	β	α	β	α	β	$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha\Gamma(\alpha)} \exp(-x/\beta)$	گاما
۴/۵۵	۰/۴۳	۴/۲۵	۰/۴۹	۰/۶۷	۱/۸۹	۰/۷۹	۱/۴۷		
M	M	M	M	M	M	M	M	$f(x) = \frac{1}{\mu} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right)$	نمایی
۰/۸۱	۱/۰۷	۱/۲۷	۱/۱۷						
λ	M	λ	M	λ	M	λ	M	$f(x) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left(-\frac{\lambda(x-\mu)^2}{2\mu^2 x}\right)$	گوسی معکوس
۸/۲۲	۱/۹۴	۸/۲۵	۲/۱۰	۱۶/۶۰	۲/۷۴	۷/۱۳	۱/۹۹		
σ	M	σ	M	σ	M	σ	M	$f(x) = (\pi\sigma(1 + (\frac{x-\mu}{\sigma})^2))^{-1}$	کوشی
	غیرقابل برازش	۰/۴۷	۰/۱۵	غیرقابل برازش	۰/۷۸	۰/۷۹			

بررسی قرار گیرد. آمار سرعت ۳ ساعته باد در ایستگاه‌های منتخب پس از کار کارشناسی طبقه‌بندی و درصد فراوانی وقوع هر طبقه محاسبه شد. با توجه به داده‌های باد و جدول درصد فراوانی وقوع، به نظر می‌رسد تابع چنین احتمالی یک تابع گسسته است؛ اما سرعت باد، یک متغیر تصادفی پیوسته است که می‌تواند همه مقادیر واقع در یک فاصله را اختیار کند. به عبارت دیگر، نمودارهای توزیع فراوانی سرعت‌های باد ایستگاه‌های مورد مطالعه را می‌توان به کمک توزیع پیوسته احتمال توزیع منتخب تقریب زد.

محاسبه احتمال سرعت و توان باد در توزیع ویبول

توزیع ویبول حالت خاصی از توزیع گاماست. طبق نظر کوز^۱ و همکاران (۲۰۰۴) این توزیع، نسبت به دیگر توزیع‌های احتمالاتی برای داده‌های نامنفی از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار بوده و تابع چگالی احتمال آن به صورت رابطه ۱ است.

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، (K) یک پارامتر بدون بعد معروف به فاکتور شکل و (C) پارامتری به نام فاکتور مقیاس است که با واحد m/s محاسبه می‌شود (احمد شاتا و هانیتچ، ۲۰۰۶؛ لی^۲ و لی، ۲۰۰۵ و کاواک و آکپینر^۳، ۲۰۰۵). روش‌های مختلفی برای برآورد پارامترهای مقیاس و شکل توزیع ویبول وجود دارد. یکی از این روش‌ها، برازش حداقل مربعات است که به کمک تابع احتمال تجمعی به دست می‌آید. بدین منظور، با استفاده از معادله رگرسیون، رابطه خطی بین مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع آن به شکل رابطه ۲ مشخص شد.

$$Y = Ax + b \quad \text{رابطه ۲}$$

در این معادله، A ضریب زاویه خط و B عرض تقاطع خط با محور Y ها است. مقادیر رابطه خطی بین Xi و Yi برای تعیین مقادیر A و B مرتبط با پارامترهای C و K توزیع ویبول با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه شد.

$$X = \ln(V_i) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$Y = \ln\{-\ln[1 - P(V)]\} \quad \text{رابطه ۴}$$

در روابط مذکور، Vi میانه طبقات سرعت باد و P(V) درصد فراوانی تجمعی هر طبقه است. با مشخص شدن مقادیر X و Y، مقادیر A و B با استفاده از معادلات دو مجهولی و یا روابط ۵ تا ۷ قابل محاسبه شدند.

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i} = K \quad \text{رابطه ۵}$$

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{A}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{رابطه ۶}$$

$$C = \exp\left(-\frac{B}{A}\right) \quad \text{رابطه ۷}$$

1- Kose

2- Li

3- Kavak & Akpinar

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده برای پارامترهای C و K با استفاده از روابط بالا بسیار دقیق تر از نتایج مشابه با استفاده از معادلات دو مجهولی است. با داشتن پارامترهای شکل و مقیاس و با استفاده از V_i های موجود، مقادیر تابع چگالی احتمال توزیع ویبول (PW) محاسبه شد (صلاحی، ۱۳۸۲).
با داشتن مقادیر سرعت متوسط باد و پارامترهای C و K وضعیت ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب از نظر پتانسیل انرژی باد بررسی شد. گام اول جهت بررسی انرژی باد یک منطقه، محاسبه چگالی انرژی باد آن منطقه است. قدرت حاصل از انرژی باد در واحد سطح از رابطه ۸ محاسبه شد.

$$\left\langle \frac{P}{A} \right\rangle = \frac{1}{r} \rho \cdot c^r \cdot \Gamma\left(1 + \frac{r}{k}\right) \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن Γ تابع گاما، C و K پارامترهای توزیع ویبول و p چگالی هوا است. مقدار چگالی هوا در شرایط متعارف دما و فشار برابر ۱/۲۲۵ کیلوگرم در مترمکعب است. که این مقدار، برای ایستگاه‌های سینوپتیک همدان، نوژه، نهاوند و تویسرکان به ترتیب ۱/۰۳۲، ۱/۰۳۸، ۱/۰۳۸ و ۱/۰۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. در مجموع مقدار چگالی انرژی باد یک منطقه، وابستگی کامل به پارامترهای ویبول دارد. با توجه به اینکه ارتفاع توربین‌ها در حدود ۳۰ تا ۸۰ متری از سطح زمین قرار می‌گیرد، لذا چگالی انرژی باد در این ارتفاعات محاسبه شد. سرعت نامی باد که در محاسبات انرژی باد با علامت V_{mec} نشان داده می‌شود، سرعتی است که بیشترین انرژی را در طول سال تولید می‌کند. این سرعت که از پارامترهای مهم در طراحی توربین‌های بادی است، از رابطه ۹ به دست آمد.

$$V_{mec} = C\left(1 + \frac{r}{k}\right)^{\frac{k}{r}} \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن، $\lambda = \frac{1}{k}$ است و C و K پارامترهای توزیع ویبول و V_{mec} سرعت نامی باد در هر ایستگاه برحسب متر بر ثانیه است. محتمل ترین سرعت باد یا سرعت بیشترین احتمال وقوع باد که با علامت (V_{inp}) نشان داده می‌شود از رابطه ۱۰ محاسبه شد.

$$V_{inp} = C(1 - \lambda)^{\frac{k}{r}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که پارامترهای آن در رابطه ۹، توضیح داده شده است. با توجه به مقادیر پارامترهای C و K مقدار (V_{inp}) برحسب متر بر ثانیه به دست آمد. جهت تصمیم‌گیری در طراحی و نصب توربین‌های بادی و با توجه به اینکه توربین‌های بادی در یک سرعت مشخص، راه‌اندازی و در یک سرعت خاص از حرکت بازمی‌ایستند، احتمال وقوع سرعت‌های باد بالاتر از V^* را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۱ تعیین نمود (جمیل، ۱۹۹۴).

$$P(V > V^*) = \exp\left[-\left(\frac{V^*}{V}\right)^k\right] \quad \text{رابطه ۱۱}$$

با توجه به اینکه سرعت راه‌اندازی و توقف اکثر توربین‌های بادی به ترتیب ۴ و ۲۵ متر در ثانیه است؛ لذا احتمال وقوع سرعت‌های باد بین مقادیر مذکور با استفاده از رابطه ۱۲ به دست آمد.

$$P(V_1 < V < V_2) = \exp\left[-\left(\frac{V_1}{C}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_2}{C}\right)^k\right] \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در رابطه بالا، به جای V_1 و V_2 مقادیر ۴ و ۲۵ قرار داده شد. در نهایت تعداد ساعات موجودیت باد در سال با

سرعت بین دو مقدار فوق با توجه به طبقه‌بندی سرعت باد استخراج گردید. با در نظر گرفتن ارتفاع کارگذاری توربین‌های بادی بین ۳۰ تا ۱۰۰ متر، چگالی توان باد با ارتفاع بر اساس رابطه ۸ محاسبه شد و نقاط مختلف از نظر سرعت باد و انرژی تولیدی جهت تعیین نقطه بهینه احتمالی بررسی شد.

محاسبه احتمال سرعت و توان باد در سایر توزیع‌ها

انتخاب توزیع مناسب در توان‌سنجی سرعت باد و تعیین محل‌های مناسب برای نصب توربین‌ها اهمیت فراوانی دارد (مورگان^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). پس از انتخاب توزیع قابل برآزش بر داده‌های باد، میانگین توان تولیدی توربین بادی ($\overline{P_w}$) از رابطه ۱۳ محاسبه می‌گردد. رابطه ۸، برای محاسبه توان باد در توزیع ویبول با استفاده از حل انتگرال زیر و پس از ساده‌سازی روابط به دست آمده است. در سایر توزیع‌ها، باید رابطه ۱۳ پس از جایگذاری تابع چگالی احتمال توزیع در آن حل شود. طبقه‌بندی داده‌های سرعت باد مطابق با آنچه در بخش نتایج ارائه شده است، حل این معادله و محاسبه متوسط توان باد را ساده‌تر می‌کند.

$$\overline{P_w} = \int_0^{\infty} P_w(x) f(x) dx \quad \text{رابطه ۱۳}$$

در این رابطه، $f(x)$ تابع چگالی احتمال توزیع مورد استفاده برای سرعت باد است که معادلات آن در جدول (۳) ارائه شد.

$P_w(x)$ توان تولیدی توربین بر اساس سرعت‌های مختلف باد بوده و بر اساس رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود که در آن A مساحت سطح توربین، ρ چگالی هوا در ارتفاع نصب توربین و x سرعت باد است.

$$P_w(x) = \frac{1}{2} A \rho x^3 \quad \text{رابطه ۱۴}$$

سرعت نامی باد در این حالت با در نظر گرفتن احتمال هرکدام از طبقات باد و حدود سرعت طبقه محاسبه می‌گردد.

همچنین محتمل‌ترین سرعت باد با استفاده از تابع چگالی احتمال و با در نظر گرفتن سرعتی که دارای بیشترین احتمال وزش است محاسبه می‌گردد. احتمال وقوع سرعت‌های باد بین سرعت راه اندازی (V_1) و سرعت توقف (V_2) توربین‌های بادی با استفاده از روابط ارائه‌شده در جدول ۳ محاسبه می‌شود.

نتایج

بررسی گلباد ایستگاه‌ها

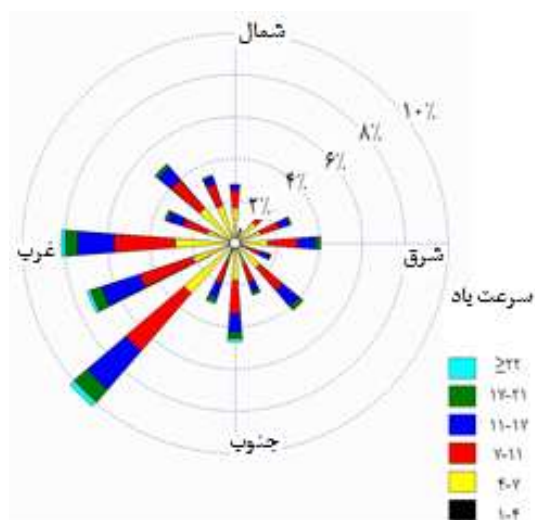
گلباد هر ایستگاه، وضعیت سمت و سرعت باد را در جهات و رده‌های سرعت مختلف به طور کامل نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۴ گلباد سالانه ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه را به تصویر کشیده است.

گلبادهای ترسیم‌شده ایستگاه‌ها نشان می‌دهد باد غالب در ایستگاه همدان جنوب غربی بوده و بیشترین فراوانی سرعت باد در این ایستگاه به ترتیب مربوط به کلاس‌های سرعت (۴-۷) نات و (۷-۱۱) است. در ایستگاه نوژه باد غالب جنوب شرقی و کلاس سرعت (۷-۱۱) و (۱۱-۱۷) نات بیشترین فراوانی سرعت باد در این ایستگاه است باد غالب در ایستگاه نهاوند شمال غربی و بیشترین فراوانی سرعت مربوط به طبقه سرعت باد (۴-۷) نات است و در ایستگاه توپسرکان باد غالب غرب و جنوب غربی است. بیشترین فراوانی سرعت باد در این ایستگاه به ترتیب مربوط

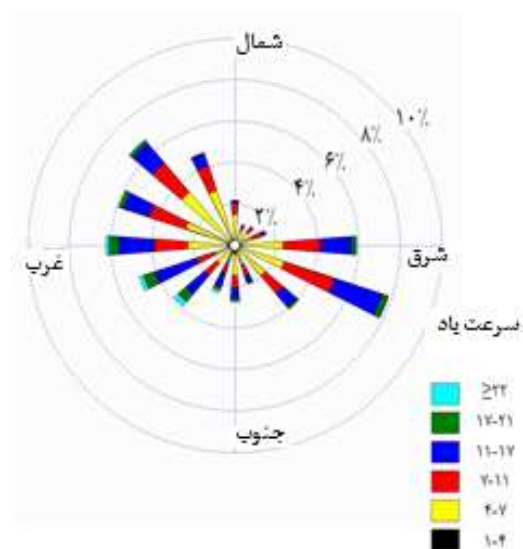
به کلاس‌های سرعت (۷-۴) نات و (۱۱-۷) نات است. به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی توربین‌ها (جمیل و همکاران، ۱۳۸۳)، جهت باد غالب در این شکل‌ها، جهت مناسب برای نصب توربین‌های بادی در این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. جهت باد غالب در این شکل‌ها جهت مناسب نصب توربین‌های باد را در صورت امکان بهره‌برداری از توان باد در این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۳. احتمال وقوع سرعت‌های باد بین سرعت راه‌اندازی و توقف توربین‌های بادی

نام توزیع	رابطه احتمال وقوع بین دو سرعت باد
گامبل تیپ ۱	$P(V_1 < V(V_2)) = \exp(-\exp(\frac{V_1 - \mu}{\sigma})) - \exp(-\exp(\frac{V_2 - \mu}{\sigma}))$
ویبول	$P(V_1 < V(V_2)) = \exp\left[-\left(\frac{V_1}{C}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_2}{C}\right)^k\right]$
لوگ نرمال ۲ پارامتری	$P(V_1 < V(V_2)) = \exp(-\frac{V_1}{\mu}) - \exp(-\frac{V_2}{\mu})$
پیرسون تیپ ۵	$P(V_1 < V(V_2)) = \frac{\Gamma_{\beta/V_1}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} - \frac{\Gamma_{\beta/V_2}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$
ریلی	$P(V_1 < V(V_2)) = \exp(-\frac{1}{2}(\frac{V_1}{\alpha})^2) - \exp(-\frac{1}{2}(\frac{V_2}{\alpha})^2)$
گاما	$P(V_1 < V(V_2)) = \frac{\Gamma_{V_2/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)} - \frac{\Gamma_{V_1/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$
نمایی	$P(V_1 < V(V_2)) = \exp(-\frac{V_1}{\mu}) - \exp(-\frac{V_2}{\mu})$
گوسی معکوس	$P(V_1 < V(V_2)) = \left[\Phi\left(\sqrt{\frac{\lambda}{V_2}}\left(\frac{V_2}{\mu} - 1\right)\right) + \Phi\left(-\sqrt{\frac{\lambda}{V_2}}\left(\frac{V_2}{\mu} + 1\right)\right) \exp\left(\frac{2\lambda}{\mu}\right) \right] - \left[\Phi\left(\sqrt{\frac{\lambda}{V_1}}\left(\frac{V_1}{\mu} - 1\right)\right) + \Phi\left(-\sqrt{\frac{\lambda}{V_1}}\left(\frac{V_1}{\mu} + 1\right)\right) \exp\left(\frac{2\lambda}{\mu}\right) \right]$
	$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, Where Φ is the Laplace Integral
کوشی	$P(V_1 < V(V_2)) = \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{V_2 - \mu}{\sigma}\right) - \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{V_1 - \mu}{\sigma}\right)$

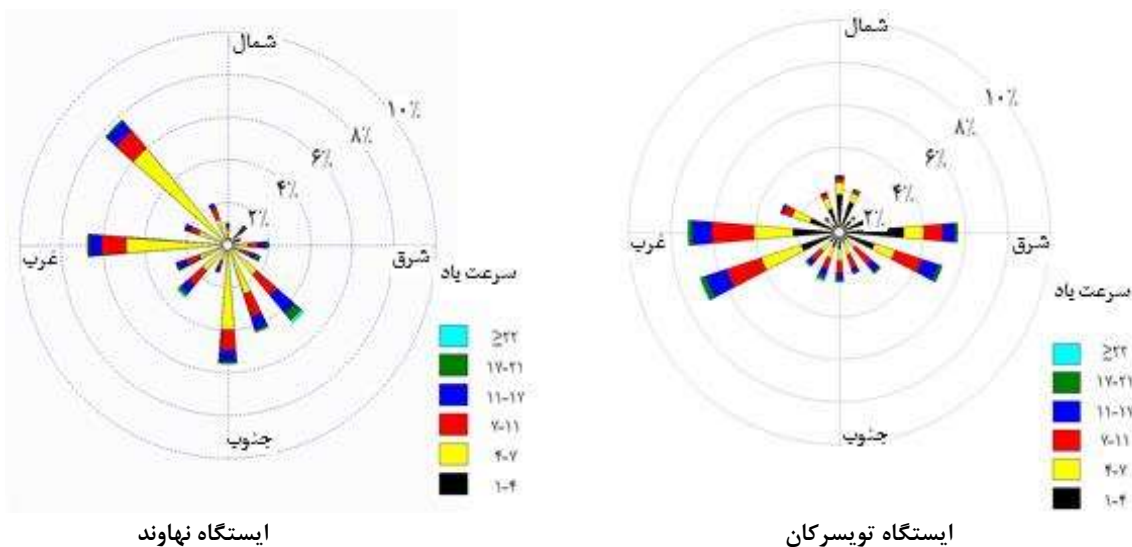


ایستگاه همدان



ایستگاه نوزه

شکل ۳. گلباد سالانه ایستگاه‌های نوزه و همدان



شکل ۴. گلباد سالانه ایستگاه‌های توپسرکان و نهاوند

انتخاب توزیع مناسب

نتایج حاصل از رتبه‌بندی توزیع‌های مناسب در هر ایستگاه طبق آزمون نیکویی برازش کای دو در جدول ۴، ارائه شده است. همچنین مقادیر آماره آزمون کای دو (توزیع‌های برتر) در هر ایستگاه در جدول ۵، نشان داده شده است. در تمامی ایستگاه‌ها، مقادیر آماره آزمون توزیع منتخب از مقادیر بحرانی متناظر در سطح اطمینان ۹۹٪ کمتر است. لذا بر اساس این نتایج، سرعت‌های مشاهده شده باد در ایستگاه همدان با توزیع ویبول و ایستگاه‌های نوزه، نهاوند و توپسرکان با توزیع گوسی معکوس همگن است.

محاسبه احتمال بر اساس تابع توزیع منتخب

ابتدا مقادیر احتمالات تجربی و مقادیر پیش‌بینی با توزیع مناسب، بر اساس روابط جدول ۲، پس از دسته‌بندی اطلاعات در هریک از ایستگاه‌های منتخب، محاسبه شد که در جدول‌های ۶ تا ۹ آمده است.

جدول ۴. رتبه‌بندی توزیع‌های برازش داده شده در هر ایستگاه بر اساس آزمون کای دو

نام ایستگاه				رتبه توزیع
توپسرکان	نهاوند	نوزه	همدان	
گوسی معکوس	گوسی معکوس	گوسی معکوس	ویبول	۱
لوگ نرمال ۲ پارامتری	لوگ نرمال ۲ پارامتری	لوگ نرمال ۲ پارامتری	گوسی معکوس	۲
پیرسون تیپ ۵	پیرسون تیپ ۵	پیرسون تیپ ۵	لوگ نرمال ۲ پارامتری	۳
گاما	گاما	ویبول	پیرسون تیپ ۵	۴
ریلی	ویبول	ریلی	ریلی	۵
ویبول	ریلی	نمایی	نمایی	۶
نمایی	نمایی	گاما	گاما	۷
گامبل تیپ ۱	کوشی	گامبل تیپ ۱	کوشی	۸
کوشی	گامبل تیپ ۱	کوشی	گامبل تیپ ۱	۹

جدول ۵. آماره آزمون، درجه آزادی و مقدار بحرانی آزمون نیکویی برازش کای دو برای توزیع مناسب در هر ایستگاه

پارامتر	همدان	نوژه	نهاوند	تویسرکان
توزیع مناسب	ویبول	گوسی معکوس	گوسی معکوس	گوسی معکوس
درجه آزادی	۸	۸	۱۰	۱۰
آماره آزمون	۱۲/۴۲	۱۰/۰۵	۳/۵۶	۴/۱۹
مقدار بحرانی ۹۹٪	۲۰/۰۹	۲۰/۰۹	۲۳/۲۱	۲۳/۲۱

جدول ۶. مقادیر احتمالات تجربی و توزیع ویبول در ایستگاه سینوپتیک همدان (۲۰۰۹-۲۰۱۳)

ردیف	طبقات سرعت	میانۀ طبقات	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی تجربی	ساعت در سال	ساعت در سال تجربی	Xi	Yi	مقادیر تابع توزیع
۱	۰/۵-۱/۵	۱	۳۱۴۵	۳۶/۶۸۵	۳۶/۶۸	۱۸۸۷/۰	۱۸۸۷/۰	۰/۰۰	-۰/۷۸	۴۱/۰۸۱
۲	۱/۵-۲/۵	۲	۲۹۲۴	۳۴/۱۰۷	۷۰/۷۹	۱۷۵۴/۴	۳۶۴۱/۴	۰/۶۹	-۰/۲۱	۲۶/۰۹۸
۳	۲/۵-۳/۵	۳	۱۴۹۲	۱۷/۴۰۳	۸۸/۲۰	۸۹۵/۲	۴۵۳۶/۶	۱/۱۰	-۰/۷۶	۱۱/۹۷۰
۴	۳/۵-۴/۵	۴	۶۱۰	۷/۱۱۵	۹۵/۳۱	۳۶۶/۰	۴۹۰۲/۶	۱/۳۹	۱/۱۲	۴/۴۵۷
۵	۴/۵-۵/۵	۵	۳۱۲	۳/۶۳۹	۹۸/۹۵	۱۸۷/۲۰	۵۰۸۹/۸	۱/۶۱	۱/۵۲	۱/۴۱۲
۶	۵/۵-۶/۵	۶	۵۸	۰/۶۷۷	۹۹/۶۳	۳۴/۸۰	۵۱۲۴/۶	۱/۷۹	۱/۷۲	۰/۳۹۱
۷	۶/۵-۷/۵	۷	۱۴	-۰/۱۶۳	۹۹/۷۹	۸/۴۰	۵۱۳۳/۰	۱/۹۵	۱/۸۲	۰/۰۹۶
۸	۷/۵-۸/۵	۸	۱۸	-۰/۲۱۰	۹۹/۹۹۹	۱۰/۸۰	۵۱۴۳/۸	۲/۰۸	۲/۴۴	۰/۰۲۱

جدول ۷. مقادیر احتمالات تجربی و توزیع گوسی معکوس در ایستگاه سینوپتیک نوژه (۲۰۰۹-۲۰۱۳)

ردیف	طبقات سرعت	میانۀ طبقات	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی تجربی	ساعت در سال	ساعت در سال تجربی	مقادیر تابع توزیع
۱	۰/۵-۱/۵	۱	۲۶۹	۱/۳۱۷	۱/۳۲	۵۳/۴۰	۵۳/۴۰	۹/۰۳۹
۲	۱/۵-۲/۵	۲	۲۶۲۳	۳۸/۸۲۵	۴۰/۱۴	۱۵۷۳/۸۰	۱۶۲۷/۲۰	۳۹/۶۸۸
۳	۲/۵-۳/۵	۳	۲۰۰۵	۲۹/۶۷۷	۶۹/۸۲	۱۲۰۳/۰۰	۲۸۳۰/۲۰	۳۰/۴۸۵
۴	۳/۵-۴/۵	۴	۱۵۱۹	۲۲/۴۸۴	۹۲/۳۰	۹۱۱/۴۰	۳۷۴۱/۶۰	۱۳/۴۹۰
۵	۴/۵-۵/۵	۵	۴۶۵	۶/۸۸۳	۹۹/۱۹	۲۷۹/۰۰	۴۰۲۰/۶۰	۴/۸۹۹
۶	۵/۵-۶/۵	۶	۳۹	-۰/۵۷۷	۹۹/۷۶	۲۳/۴۰	۴۰۴۴/۰۰	۱/۶۳۵
۷	۶/۵-۷/۵	۷	۹	-۰/۱۳۳	۹۹/۹۰	۵/۴۰	۴۰۴۹/۴۰	۰/۵۲۵
۸	۷/۵-۸/۵	۸	۷	-۰/۱۰۴	۹۹/۹۹۹	۴/۲۰	۴۰۵۳/۶۰	۰/۱۶۵

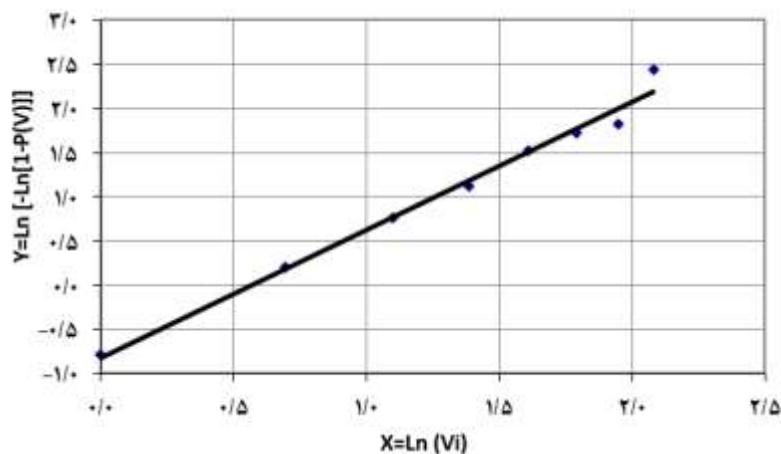
جدول ۸. مقادیر احتمالات تجربی و توزیع گوسی معکوس در ایستگاه سینوپتیک نهاوند (۲۰۰۹-۲۰۱۳)

ردیف	طبقات سرعت	میانۀ طبقات	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی تجربی	ساعت در سال	ساعت در سال تجربی	مقادیر تابع توزیع
۱	۰/۵-۱/۵	۱	۱۸۵۲	۲۴/۹۴	۲۴/۹۴	۱۱۱۱/۲	۱۱۱۱/۲	۳۲/۴۴۵
۲	۱/۵-۲/۵	۲	۳۲۹۱	۴۴/۳۱	۶۹/۲۵	۱۹۷۴/۶	۳۰۸۵/۸	۳۹/۸۱۵
۳	۲/۵-۳/۵	۳	۱۳۲۶	۱۷/۸۵۴	۸۷/۱۰	۷۹۵/۶	۳۸۸۱/۴	۱۷/۷۲۴
۴	۳/۵-۴/۵	۴	۵۷۳	۷/۷۱۵	۹۴/۸۲	۳۴۳/۸	۴۲۲۵/۲	۶/۴۴۹
۵	۴/۵-۵/۵	۵	۲۴۰	۳/۲۳۱	۹۸/۰۵	۱۴۴/۰	۴۳۶۹/۲	۲/۲۳۵
۶	۵/۵-۶/۵	۶	۱۰۳	۱/۳۸۷	۹۹/۴۳	۶۱/۸۰	۴۴۳۱/۰	۰/۷۶۷
۷	۶/۵-۷/۵	۷	۲۷	۰/۳۶۴	۹۹/۸۰	۱۶/۲۰	۴۴۴۷/۲	۰/۲۶۴
۸	۷/۵-۸/۵	۸	۸	-۰/۱۰۸	۹۹/۹۱	۴/۸۰	۴۴۵۲/۰	۰/۰۹۱
۹	۸/۵-۹/۵	۹	۶	-۰/۰۸۱	۹۹/۹۹	۳/۶۰	۴۴۵۵/۶۰	۰/۰۳۲
۱۰	۹/۵-۱۰/۵	۱۰	۱	-۰/۰۱۳	۹۹/۹۹۹	۰/۶۰	۴۴۵۶/۲۰	۰/۰۱۱

جدول ۹. مقادیر احتمالات تجربی و توزیع گوسی معکوس در ایستگاه سینوپتیک تویسرکان (۲۰۰۹-۲۰۱۳)

ردیف	طبقات سرعت	میانۀ طبقات	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی	ساعت در سال	ساعت در سال	مقادیر تابع توزیع
۱	۰/۵-۱/۵	۱	۱۹۹۴	۳۲/۵۶	۳۲/۵۶	۱۱۹۶/۴	۱۱۹۶/۴	۳۷/۵۱۱
۲	۱/۵-۲/۵	۲	۲۳۱۴	۳۷/۷۸	۷۰/۳۳	۱۳۸۸/۴	۲۵۸۴/۸	۴۰/۲۳۱
۳	۲/۵-۳/۵	۳	۱۳۰۷	۲۱/۳۴	۹۱/۶۷	۷۸۴/۲	۳۳۶۹/۰	۱۵/۳۰۹
۴	۳/۵-۴/۵	۴	۳۳۶	۵/۴۸۶	۹۷/۱۶	۲۰/۱/۶	۳۵۷۰/۶	۴/۷۵۱
۵	۴/۵-۵/۵	۵	۱۰۶	۱/۷۳۱	۹۸/۸۹	۶۳/۶۰	۳۶۳۴/۲	۱/۴۰۴
۶	۵/۵-۶/۵	۶	۴۷	۰/۷۶۷	۹۹/۶۶	۲۸/۲۰	۳۶۶۲/۴	۰/۴۱۱
۷	۶/۵-۷/۵	۷	۱۲	۰/۱۹۶	۹۹/۸۵	۷/۲۰	۳۶۶۹/۶	۰/۱۲۰
۸	۷/۵-۸/۵	۸	۷	۰/۱۱۴	۹۹/۹۷	۴/۲۰	۳۶۷۳/۸	۰/۰۳۶
۹	۸/۵-۹/۵	۹	۰	۰/۰۰	۹۹/۹۷	۰/۰۰	۳۶۷۳/۸	۰/۰۱۱
۱۰	۹/۵-۱۰/۵	۱۰	۲	۰/۰۳۳	۹۹/۹۹۹	۱/۲۰	۳۶۷۵/۰	۰/۰۰۳

شکل ۵، رابطه بین پارامترهای Y_i و X_i و خط $y = Ax + b$ که بر داده‌ها برازش داده شده را در ایستگاه همدان نشان می‌دهد. بر اساس این رابطه، پارامترهای توزیع ویبول در این ایستگاه محاسبه شدند. برای تخمین پارامتر در سایر توزیع‌های استفاده‌شده در این پژوهش، به جای روش فوق از یکی از روش‌های حداکثر درست‌نمایی^۱ یا گشتاورها^۲ استفاده شد. جدول ۱۰، پارامترهای توزیع منتخب را در هر کدام از ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در نهایت بر اساس این نتایج، برازش احتمالات محاسباتی در هر توزیع بر داده‌های مشاهداتی، تغییرات چگالی توان باد با ارتفاع و ساعات موجودیت باد در سال در بخش بعد مورد بحث قرار می‌گیرد.

شکل ۵ رابطه خطی بین Y_i و X_i برای تعیین مقادیر A و B در ایستگاه همدان

جدول ۱۰. پارامترهای توزیع منتخب در هر کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	همدان	نوزه	نهماوند	تویسرکان
توزیع منتخب	ویبول	گوسی معکوس	گوسی معکوس	گوسی معکوس
پارامترهای توزیع	C K	λ M	λ M	λ M
	۱/۴۵ ۱/۷۶	۱۶/۶۰ ۲/۷۴	۸/۲۵ ۲/۱۰	۸/۲۲ ۱/۹۴

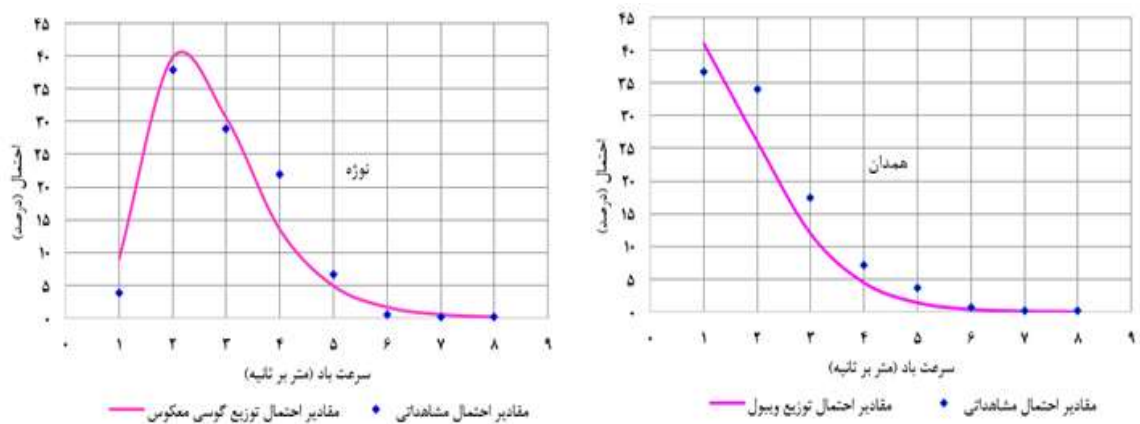
1- Maximum Likelihood Method

2- Method of Moments

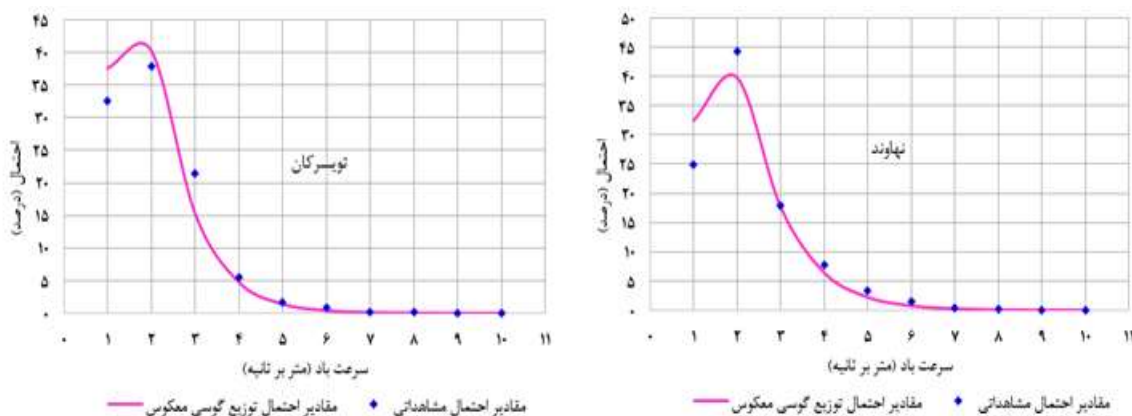
مقادیر پیش‌بینی‌شده احتمال وقوع سرعت‌های باد از طریق توزیع منتخب (خط ممتد) و مقادیر احتمال مشاهداتی بر اساس داده‌های ثبت‌شده سرعت باد در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. این منحنی‌ها، پس از آزمون توزیع‌های مختلف برای توزیع مناسب در هر ایستگاه ترسیم گردید. نتایج نشان داد بهترین برازش در ایستگاه همدان مربوط به توزیع وایبول و در سه ایستگاه دیگر مربوط به توزیع گوسی معکوس است.

روند تغییرات چگالی انرژی باد با ارتفاع با توجه به تغییرات سرعت باد و چگالی هوا با ارتفاع بر اساس توزیع‌های منتخب محاسبه شد که نتایج آن در هر ایستگاه در شکل ۸ آورده شده است. بر اساس این شکل‌ها، انرژی قابل تولید ناشی از باد در تمام ایستگاه‌ها حتی با نصب محور توربین‌ها در ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین قابل توجه نبوده و بیشترین مقدار آن در این ارتفاع در ایستگاه نوزه و به میزان ۲۴ وات بر مترمربع است. ایستگاه‌های دیگر از این نظر در رده‌های بعدی قرار دارند.

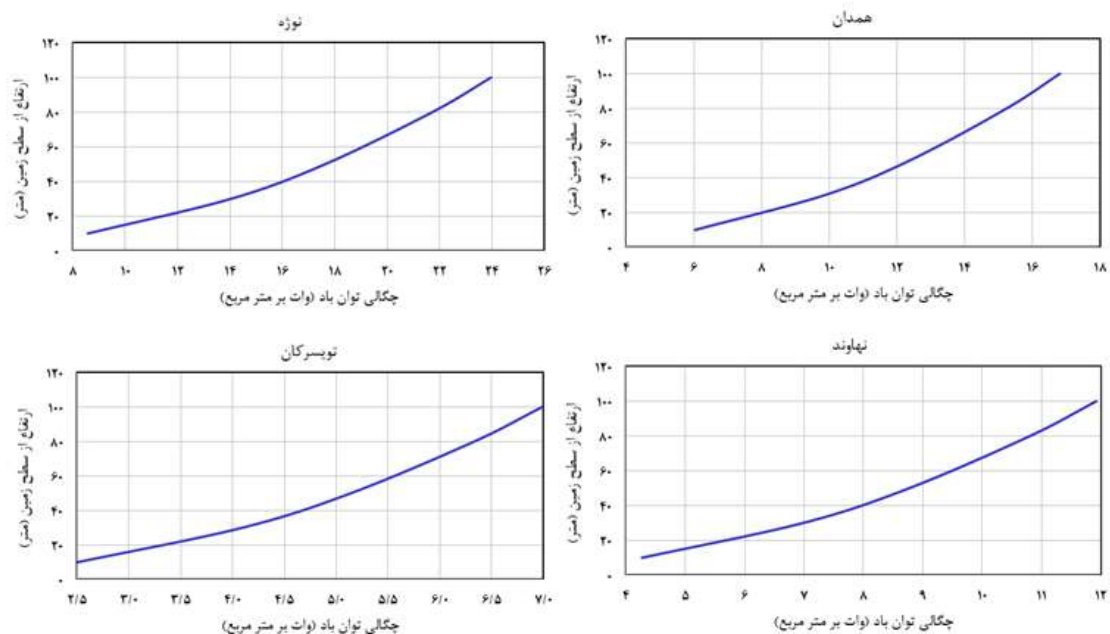
بر اساس ساعات موجودیت باد در سال به ازای دامنه سرعت‌های متفاوت که در جدول‌های ۶ تا ۹ ارائه شده است، منحنی‌های سرعت - تداوم باد در تمامی ایستگاه‌ها ترسیم شد که در شکل ۹ آورده شده است. بررسی این منحنی‌ها نشان می‌دهد بیشترین موجودیت سالانه باد با در نظر گرفتن تمام سرعت‌ها مربوط به ایستگاه همدان به میزان $5143/80$ ساعت در سال و پس از آن به ترتیب در ایستگاه‌های نهاوند، نوزه و تویسرکان به مقدار $4456/20$ ، $3675/00$ و $4053/60$ است.



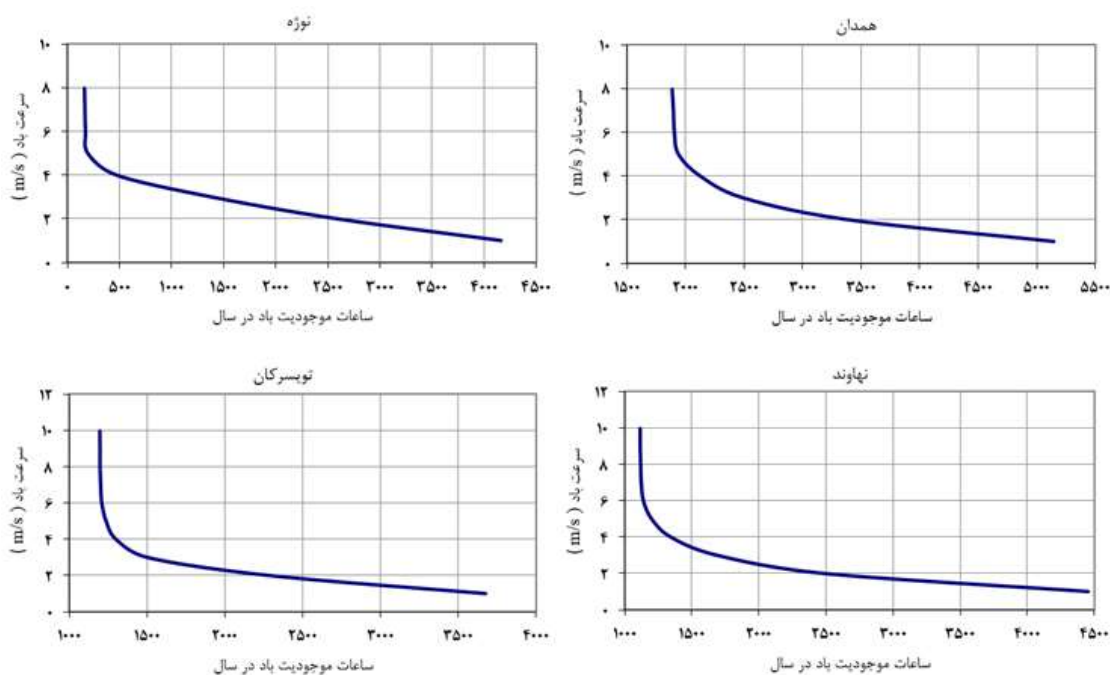
شکل ۶. برازش مقادیر احتمال سرعت مشاهده‌شده با استفاده از توزیع منتخب در ایستگاه‌های همدان و نوزه



شکل ۷. برازش مقادیر احتمال سرعت مشاهده‌شده با استفاده از توزیع منتخب در ایستگاه‌های نهاوند و تویسرکان



شکل ۸. چگالی توان باد (وات در مترمربع) در ارتفاعات مختلف از سطح زمین در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۹. منحنی سرعت - تداوم باد در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری

بحث

بررسی توزیع‌های منتخب برای انتخاب توزیع مناسب در هر ایستگاه نشان داد که توزیع ویبول به تنهایی قابل توصیه برای تمامی ایستگاه‌ها و مناطق نیست و به جز ایستگاه همدان، در سایر ایستگاه‌ها این توزیع از نظر دقت در پیش بینی احتمالات وقوع باد در رده‌های چهارم تا ششم قرار می‌گیرد. امری که در تحقیقات بسیاری از محققان مانند ویسر (۲۰۰۳)، الاموریا و بن عامر (۲۰۰۸)، کارتا و همکاران (۲۰۰۹)، آزاد و همکاران (۲۰۱۳)، ایندهاماتی^۱ و

همکاران (۲۰۱۳)، صلاحی (۱۳۸۲)، جهانگیری و همکاران (۱۳۸۴) و بافکار و همکاران (۱۳۹۱) نادیده گرفته شده و تنها از توزیع ویبول استفاده شده است.

در این پژوهش، پس از مشخص شدن توزیع مناسب در هر ایستگاه، معادلات توان باد با استفاده از دسته بندی احتمالات و روش‌های انتگرال گیری در هر ایستگاه حل شده و مقدار چگالی توان باد به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها در توان سنجی باد در ایستگاه‌های مختلف محاسبه شد. در حالی که در تحقیقات مورگان و همکاران (۲۰۱۱)، کولا و همکاران (۲۰۱۲)، مسران و همکاران (۲۰۱۳) و اوردا و همکاران (۲۰۱۵) محاسباتی در خصوص این پارامتر صورت نگرفته و تنها به بررسی قابلیت توزیع‌های مختلف آمار در پیش بینی احتمالات وقوع باد پرداخته شده و در هر محل توزیع‌های مناسب در این زمینه معرفی شده است.

بررسی شکل‌های ۶ و ۷ نشان داد توزیع‌های منتخب در محدوده کلاس سرعت پایین به‌ویژه کمتر از ۲ متر بر ثانیه، دقت کمتری دارد. جمیل نیز در مطالعات خود دریافت که برای داده‌های بلندمدت باد و مشاهدات و اندازه‌گیری‌های سرعت، توزیع احتمال پیوسته ویبول نتایج خوبی ارائه می‌کند ولی بادهای آرام و کم‌سرعت را توجیه نمی‌کند (جمیل، ۱۹۹۴).

با توجه به رابطه انرژی باد در واحد سطح، مقدار چگالی انرژی باد در ایستگاه‌های همدان، نوژه، نهاوند و توپسرکان به ترتیب $6/1$ ، $8/6$ ، $4/3$ و $2/5$ وات در هر مترمربع در زمان موجودیت باد محاسبه شد. لذا بیشترین چگالی توان باد در سطح زمین مربوط به ایستگاه نوژه است. مقادیر چگالی انرژی محاسبه شده، مربوط به اطلاعات ثبت شده در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین است. بررسی منابع نشان داد که ارتفاع محور اغلب توربین‌های بادی تجاری حدود ۳۰ الی ۸۰ متر از سطح زمین است (بافکار و همکاران، ۱۳۹۱؛ جمیل، ۱۳۸۰). لذا انرژی باد در ارتفاع ۸۰ متر از سطح زمین در این ایستگاه‌ها به ترتیب به میزان $15/24$ ، $21/7$ ، $10/8$ و $6/3$ وات در هر مترمربع محاسبه شد. آمبروسینی^۱ و همکاران (۱۹۹۲) چگالی توان بیش از ۶۰۰ وات در هر مترمربع در نیمی از ساعات سال را جهت استحصال انرژی باد مناسب می‌دانند؛ بنابراین مقدار انرژی قابل استحصال در ایستگاه‌های مطالعاتی استان همدان در مقایسه با این رقم قابل توجه نبوده و رضایت‌بخش نیست.

سرعت اسمی باد یعنی سرعتی که بیشترین انرژی را در طول سال ایجاد می‌کند با توجه به روابط ۱۳ و ۱۴، در ایستگاه‌های همدان، نوژه، نهاوند و توپسرکان به ترتیب $3/24$ ، $3/45$ ، $3/05$ و $2/75$ متر بر ثانیه است. محتمل‌ترین سرعت باد بر اساس روابط ارائه شده در جدول ۲، در این ایستگاه‌ها به ترتیب $0/78$ ، $2/15$ ، $1/45$ و $1/35$ متر بر ثانیه محاسبه شد. بر اساس این نتایج، سرعت اسمی باد و محتمل‌ترین سرعت باد در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی خارج از محدوده سرعت راه‌اندازی و توقف توربین‌های بادی است. مقدار این پارامترها نشان می‌دهد استفاده از انرژی باد در این ایستگاه‌ها مقرون به صرفه نیست. همچنین بر اساس تحقیقات سازمان انرژی‌های نو (۱۳۹۱) اکثر مناطق استان همدان در پهنه ای با سرعت کمتر از شش متر بر ثانیه قرار دارد که با نتایج این پژوهش که بر اساس آمار باد سه ساعته انجام گرفته است، مطابقت دارد. در ضمن در ایستگاه‌های ذکر شده به ترتیب در ۳، ۴، ۳ و ۲ درصد از ساعات موجودیت باد، سرعت باد بین ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه بود؛ لذا ساعات موجودیت باد بین این دو که سرعت‌های راه‌اندازی و توقف اکثر توربین‌های بادی هستند، به ترتیب در این ایستگاه‌ها $193/41$ ، $567/1$ ، $315/41$ و $222/6$ ساعت در سال محاسبه شد.

ایستگاه نوژه دارای بیشترین ساعات موجودیت باد بین ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه که مربوط به سرعت‌های راه‌اندازی

و توقف اکثر توربین‌های بادی است به مقدار ۵۶۷/۱ ساعت در سال می‌باشد و ایستگاه‌های نهبوند، تویسرکان و همدان به ترتیب با مقدارهای ۳۱۵/۴۱، ۲۲۲/۶ و ۱۹۳/۴۱ ساعت در سال در رتبه‌های بعدی قرار دارند. کاویانی (۱۳۷۴) عملکرد اقتصادی توربین‌های بادی را کارکرد حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال می‌داند؛ بنابراین، بر اساس این پارامتر نیز استفاده از توان باد در ایستگاه‌های مطالعاتی قابل توصیه نیست.

لذا نتایج نشان داد مطابق با دو معیار اصلی توان‌سنجی باد یعنی ساعات موجودیت باد بین سرعت‌های راه‌اندازی و توقف توربین و انرژی قابل استحصال در سال، در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه شرایط مناسبی برای استحصال انرژی باد جهت تولید برق وجود ندارد. بافکار و همکاران (۱۳۹۱) نیز با بررسی انرژی باد در شش ایستگاه مختلف در استان کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که تنها در یک ایستگاه شرایط برای بهره‌برداری از انرژی باد مناسب است و در بقیه ایستگاه‌ها شرایط مطلوب نیست.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج، توان‌سنجی باد تنها با استفاده از توزیع ویبول درست نیست و در هر ایستگاه باید توزیع‌های گوناگون مورد آزمون قرار گرفته و بهترین توزیع از نظر دقت پیش‌بینی احتمالات باد انتخاب شود.

نتایج نشان داد هیچ‌کدام از ارقام به دست آمده در مقایسه با استانداردهای لازم جهت احداث نیروگاه بادی در حد مطلوب نیست؛ همچنین با توجه به تعداد ساعات وزش باد و درصد موجودیت باد لازم بین سرعت‌های راه‌اندازی و توقف توربین‌های بادی، بهره‌برداری از انرژی باد در هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد بررسی مقرون به صرفه نبوده و توصیه نمی‌گردد. نتایج به دست آمده با بررسی‌های اولیه صورت‌گرفته توسط کارشناسان اداره کل هواشناسی استان مطابقت دارد.

همین‌طور نقشه اطلس باد ایران که در آن پهنه‌های مختلف میانگین سرعت باد بر اساس بررسی‌های اولیه نشان داده شده است و گلباد سالانه ترسیم شده برای هر کدام از ایستگاه‌ها بیانگر این نکته است که اکثر نقاط استان همدان به جز ارتفاعات استان در پهنه باد با سرعت کمتر از ۶ متر بر ثانیه قرار دارد. با توجه به مکان احداث ایستگاه‌های سینوپتیک استان که معمولاً در نواحی اطراف شهرها و با ارتفاع نسبی کمتر است، نتایج به دست آمده در خصوص پتانسیل سرعت باد قابل توجیه است. با این حال، جهت بررسی بیشتر موضوع پس از انجام بازدیدهای میدانی و بر اساس دید کارشناسی و مذاکره با کارشناسان محلی و با توجه به محدودیت تعداد نقاط ثبت داده‌های ساعتی سرعت و جهت باد در سطح استان، راه‌اندازی ایستگاه ثبت داده‌های سرعت و جهت باد به صورت خودکار و لحظه‌ای در نزدیکی فامنین و ارتفاعات اسداباد در نزدیکی شهر همدان پیشنهاد می‌گردد. بدیهی است در این مکان‌ها، نیاز به ثبت داده‌های لحظه‌ای یا ساعتی باد به مدت حداقل ۳ سال بوده تا بتوان با قطعیت در خصوص امکان بهره‌برداری از توان باد در این ایستگاه‌ها نظر داد.

منابع

بافکار، علی؛ آذری، آرش؛ احمدی، مریم (۱۳۹۱) برآورد انرژی باد و کاربرد آن در مکان‌یابی نیروگاه بادی در استان کرمانشاه، *مجله علمی و فنی نیوار*، ۷۸، صص. ۲۴-۱۱.

جمیل، مجید (۱۳۸۰) چگالی انرژی باد، *مجله علمی و فنی نیوار*، ۴۲، صص. ۳۴-۲۲.

جمیل، مجید؛ عباسپورثانی، کمال؛ خراسانی، اسماعیل (۱۳۸۳) فاصله بهینه بین توربین‌های بادی در یک نیروگاه بادی، *نشریه انرژی ایران*، ۱۹، صص. ۶۳-۵۵.

جهانگیری، زهره؛ رحیم‌زاده، فاطمه؛ کمالی، غلامعلی (۱۳۸۴) محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع دو پارامتری ویبول،

تحقیقات جغرافیایی، ۷۶، صص. ۱۷۰-۱۵۱.

حق پرست کاشانی، آرش؛ کعبی نژادیان، فواد؛ فغفوری، ناصر؛ لاری، حمیدرضا (۱۳۸۴) تحلیل پتانسیل انرژی باد در شمال غرب ایران، بیستمین کنفرانس بین‌المللی شرکت برق تهران، صص. ۹-۱.

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) (۱۳۹۱)، www.sun.org.ir.

صلاحی، برومند (۱۳۸۲) پتانسیل سنجی انرژی باد و برازش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه‌های سینوپتیک استان اردبیل، **تحقیقات جغرافیایی**، ۷۲، صص. ۸۷-۱۰۴.

کویانی، محمد رضا (۱۳۷۴) توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران، **تحقیقات جغرافیایی**، ۳۶، صص. ۱۴۴-۱۲۷.

Ahmed-Shata, A. S., Hanitsch, R. (2006) Evaluation of Wind Energy Potential and Electricity Generation on the Coast of Mediterranean Sea in Egypt, **Renewable Energy**, 31, pp. 1183-1202.

Ambrosini, G., Benato, B., Garavaso, C., Botta, G., Cenerini, M., Comand, D., Stork, C. (1992) Wind Energy Potential in Emilia Romagna. Italy, **Wind Engineering and Industrial Aerodynamic**, 39, pp. 211-220.

Azad, A. K., Rasul, M. G., Alam, M. M., S. M., Uddin, A., Mondal, S. K. (2013) Analysis of Wind Energy Conversion System Using Weibull Distribution, **Procedia Engineering**, 90, 725-732.

Bekel, G., Palm, B. (2009) Wind Energy Potential Assessment at Four Typical Locations in Ethiopia, **Applied energy**, 86, pp. 388-396.

Belu, R., Koracin, D. (2009) Wind characteristics and Wind Energy Potential in Western Nevada, **Renewable energy**, 34, pp. 2246-2251.

Carta, J. A., Ramirez, P., Velazquez, S. (2009) A Review of Wind Speed Probability Distributions Used in Wind Energy Analysis, Case studies in Ganalslands, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13, pp. 933-955.

Elamouria, M., Ben-Amara, F. (2008) Wind Energy Potential in Tunisia, **Renewable Energy**, 33, pp. 758-768.

Indhumathy, D., Seshaiyah. C. V., Sukkiramathi. K. (2013) Estimation of Weibull Parameters for Wind Speed Calculation at Kanyakumari in India, **Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 3(1), pp. 8340-8345.

Jamil, Majid. (1994) Wind Power Statistics and Evaluation of Wind Energy, **Wind Engineering**, 18 (5), pp. 278-287.

Kavak, A. E., Akpınar, S. (2005) An Assessment on Seasonal Analysis of Wind Energy Characteristics and Wind Turbine Characteristics, **Energy conversion and Management**, 46, pp. 1848-1867.

Kollu, R., Rayapudi, S. R., Narasimham, S. V. L., Pakkurthi, K. M. (2012) Mixture Probability Distribution Functions to Model Wind Speed Distributions, **Energy and Environmental Engineering**, 3 (27), pp. 1-10.

Kose, R., Ozgur, M. A., Erbas, O., Tugcu, A. (2004) The Analysis of Wind Data and Wind Energy Potential in Kutahya, Turkey, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 8 (3), pp. 277-288.

Li, M., Li, X. (2005) Investigation of Wind Characteristics and Assessment of Wind Energy Potential for Waterloo Region, Canada. **Energy Conversion and Management**, 46, pp. 3014-3033.

Masseran, N., Razali, A. M., Ibrahim, K., Zaharim, A., Sopian, K. (2013) The Probability Distribution Model of Wind Speed Over East Malaysia, **Applied Sciences, Engineering and Technology**, 6 (10), pp. 1774-1779.

Morgan, E. C., Lackner, M., Vogel, R. M., Baise, L. G. (2011) Probability Distributions for Offshore Wind Speeds, **Energy Convers Manage**, 52, pp. 15-26.

Mostafaeipoura, A., Abarghoeei, H. (2008) Harnessing Wind Energy at Manjil Area Located in

- North of Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 12 (6), pp. 1758-1755.
- Ouarda, T. B. M. J., Charron, C., Shin, J. Y., Marpu, P. R., Al-Mandoos, A. H., Al-Tamimi, M. H., Ghedira, H., Al Hosary, T. N. (2015) Probability Distributions of Wind Speed in the UAE. **Energy Conversion and Management**, 93, pp. 414-434.
- Rehman, S., Halawani, T. O., Mohandes, M. (2003) Wind Power Cost Assessment at Twenty Locations in the Kingdom of Saudi Arabia. **Renewable Energy**, 28, pp. 573-583.
- Weisser, D. (2003) A Wind Energy Analysis of Grenada: an Estimation Using the Weibull Density Function, **Renewable Energy**, 28 (11), pp. 1803-1812.