



پتانسیل سنجی انرژی باد در شهرستان کارون، جهت نصب توربین باد

مهدی بروایه^{۱*}، امیر عزیزپناه^۲، نورالدین رستمی^۳

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲- استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۳- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

* اهواز، 6138653458، mahdi.borvayeh@gmail.com

چکیده

با توجه به مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با سوخت‌های فسیلی و افزایش نیاز به انرژی، انرژی تجدیدپذیر نیروی باد نقش حیاتی در تغییر ساختار انرژی آینده در ایران و کل جهان ایفا خواهد کرد. بر این اساس ارزیابی منابع بادی نقش مهمی در بهره‌برداری از این منبع انرژی ایفا می‌کند. در این تحقیق از اطلاعات باد منطقه کارون، با بازه‌های زمانی سه‌ساعته، که در دوره یازده ساله (۲۰۱۰-۲۰۲۰) ثبت شده، در سه ایستگاه جنوب، شمال شرق و شمال غرب شهرستان استفاده شده است. جهت انجام این تحقیق، پتانسیل انرژی باد منطقه، با هدف شناسایی مناسب‌ترین نقاط برای استقرار توربین‌های بادی، با استفاده از تابع توزیع ویبول و محاسبه سرعت و چگالی قدرت باد، به صورت متوسط ماهانه و سالانه، مورد ارزیابی قرار گرفت. گلبادهای سالانه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه، با پردازش داده‌های دوره آماری مذکور، با استفاده از نرم‌افزار رسم گلباد نیز رسم شد. نتایج نشان داد که ایستگاه‌های جنوب و شمال غرب شهرستان در ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین، به ترتیب با سرعت متوسط سالانه ۷/۰۴ و ۷/۰۸ متر بر ثانیه و چگالی قدرت باد ۲۱۲ و ۲۱۵ وات بر مترمربع از استعداد و پتانسیل بهتری برخوردار می‌باشند.

کلیدواژه‌گان: انرژی تجدیدپذیر، باد، کارون، تولید برق، توان خروجی.

Wind energy potential measurement in the Karun city, for installing wind turbines

Mahdi Borvayeh^{1*}, Amir Azizpanah², Noredin Rostami³

1- M.Sc., Mechanical Engineering of Renewable Energy Biosystem, Ilam University, Ilam, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanics, Ilam University, Ilam, Iran

3- Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Ilam University, Ilam, Iran

* Ahwaz. 6138653458 khuzestan, Iran, mahdi.borvayeh@gmail.com

Received: 14 May 2022 Accepted: 23 February 2023

Abstract

Due to the environmental problems associated with fossil fuels and the increase in required energy, renewable wind energy will play a vital role in changing the future energy structure in Iran as well as the entire world, therefore the evaluation of wind resources is considered a great contributor in exploiting this resource. In this research, wind information from the Karun region with a three-hour time interval was recorded over eleven years (2010-2020), and has been used in three stations in the south, northeast, and northwest of the city. For this research, the wind energy potential in the region was evaluated to identify the most suitable points for installing wind turbines, use the Weibull distribution function, and calculate the wind speed and density on a monthly and annual average. The annual wind roses of the stations in the study area were also plotted by processing the data of the mentioned statistical period using the WRPLOT software. The results showed that the stations in the south and northwest of the city at an altitude of 100 meters above the ground with an average annual speed of 7.04 and 7.08 meters per second and wind power density of 212 and 215 watts per square meter, respectively, have better potential.

Keywords: Renewable energy, Wind, Karun, Electricity Generation, Output Power

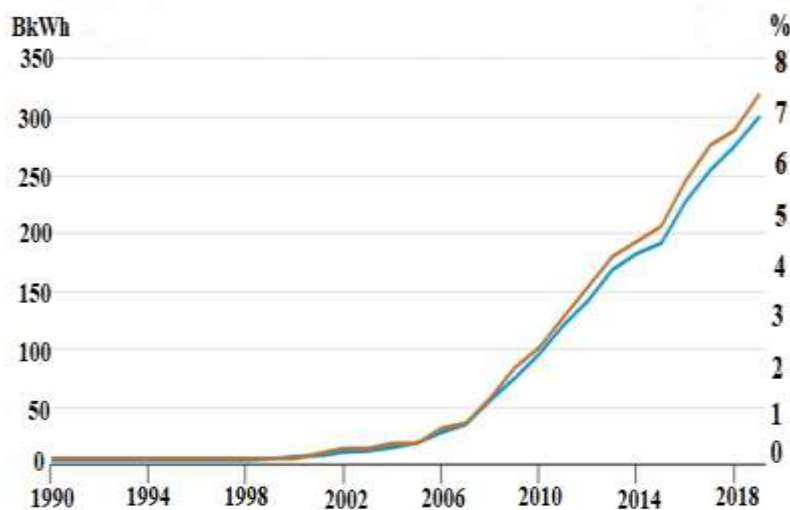
1- مقدمه

پنج کشور برتر، در تولید برق بادی با سهم آنها از کل تولید برق بادی جهان در سال ۲۰۱۹ عبارتند از چین (۲۹٪)، ایالات متحده (۲۱٪)، آلمان (۹٪)، هند (۵٪)، انگلستان (۴٪) [۴].

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه انرژی صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به بررسی امکان استفاده از انرژی باد دریایی، به عنوان منبع تغذیه جایگزین، در لاگوس نیجریه [5]، ارائه تصویری جامع از پتانسیل انرژی باد در محیط ساحلی رومانی [6]، مطالعه داده‌های سرعت باد جمع‌آوری شده در زوارا لیبی [7]، بررسی پتانسیل انرژی بادی در جزیره سوکوئرا با تجزیه و تحلیل و ارزیابی خواص باد، تعیین چگالی انرژی موجود، محاسبه انرژی باد استخراج شده در ارتفاعات مختلف و سپس محاسبه ضریب ظرفیت برای تعدادی توربین بادی [8]، بررسی پتانسیل انرژی بادی قزاقستان با استفاده از تابع توزیع ویبول و داده‌های سرعت باد ساعتی، توان و چگالی انرژی سالانه سایت‌ها [9]، ارزیابی منابع بادی با استفاده از برنامه تحلیل و کاربرد اطلس باد به منظور ارزیابی پتانسیل انرژی باد در هات یای، تایلند [10]، تحلیل اثربخشی و امکان‌سنجی پتانسیل انرژی بادی، در خط ساحلی پاکستان، با انتخاب چهار منطقه منحصربه‌فرد (کراچی، اورمارا، پاسنی و گوادر)، از طریق تجزیه و تحلیل و نمایش برای یک مزرعه بادی ۵۰ مگاواتی [11]، تجزیه و تحلیل پتانسیل‌های انرژی باد در نیجریه با استفاده از داده‌های سرعت باد همدیدی ۱۲ ساعته در ارتفاعات مختلف جوی [12]، ارزیابی پتانسیل منابع بادی و تحلیل عملکرد توربین‌های بادی برای شش سایت خشکی و نزدیک ساحل (سه نیروگاه تجاری و سه سایت بالقوه جدید) در پاکستان [13]، نشان دادن در دسترس بودن انرژی باد ایستگاه بندرگاه طرابلس، در سواحل لیبی [14]، ارزیابی پتانسیل انرژی باد پردیس یک دانشگاه در ارتفاع ۱۰۰ متری با استفاده از روش‌های توزیع آماری [15]، مطالعه تطبیقی بر روی پتانسیل انرژی بادی، برای منطقه آرتوین که دارای زمین بسیار ناهموار، در شرق ترکیه و دریای سیاه است [16]، محاسبه چگالی نیروی باد مربوط به یک توربین با وضوح افقی ۳۱ کیلومتر و گام‌های زمانی یک ساعته [17]، بررسی انرژی باد در کشور فلسطین [18]، بررسی پتانسیل انرژی باد در مونت‌نگرو [19]، ارزیابی پتانسیل انرژی باد در مناطق مانند لرستان، همدان و مرکزی [20]، یزد [21]، منجیل در استان گیلان [22]، سراسر ایران [23] و غیره اشاره نمود.

گرمایش کره زمین به دلیل تولید روزافزون دی‌اکسید کربن، بر اثر سوزاندن منابع فسیلی، از یک سو ایجاد آلودگی‌های گوناگون زیستی و از سوی دیگر، افزایش نیاز به انرژی تجدیدپذیر را روز به روز بیشتر کرده است. انرژی باد، یکی از انواع اصلی انرژی‌های پاک می‌باشد، که در این بازه زمانی حساس جهانی، بخاطر دسترسی آسان، قیمت ارزان و سازگاری با محیط‌زیست، از دلایل اصلی توجه به آن می‌باشد. به صورتی که ظرفیت جهانی انرژی باد، در سال ۲۰۱۹، از ۶۰۰ گیگاوات فراتر رفته است [1]. پیش‌بینی می‌شود که ۳۵ درصد از کل تولید انرژی جهانی، تا سال ۲۰۵۰، توسط انرژی باد تأمین شود [2]. دانشمندان و مهندسان، تحقیقات گسترده‌ای بر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بدون آلودگی، انجام می‌دهند. در نتیجه پیشرفت تکنولوژی، هزینه تولید انرژی بادی در ایالات متحده از ۲۵ سنت، به ۵ سنت در هر کیلووات ساعت، طی ۲۰ سال گذشته کاهش یافته است [3]. در سال ۲۰۲۰، همانطور که در شکل ۱ مشخص است، توربین‌های بادی در ایالات متحده، منبع حدود ۴/۸ درصد از کل تولید برق، در مقیاس آب و برق ایالات متحده بودند. میزان برق تولید شده از باد، از سال ۲۰۰۰ به طور قابل توجهی افزایش یافته است. تولید برق از باد در ایالات متحده، از حدود ۶ میلیارد کیلووات ساعت، در سال ۲۰۰۰، به حدود ۳۳۸ میلیارد کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است [4].

مکان‌های خوب برای توربین‌های بادی، جایی است که میانگین سرعت باد سالانه حداقل ۹ مایل بر ساعت (۴ متر بر ثانیه) برای توربین‌های بادی کوچک و ۱۳ مایل بر ساعت (۵/۸ متر بر ثانیه) برای نوع بزرگ آن باشد. مکان‌های مطلوب توربین‌ها شامل بالای تپه‌های صاف و گرد، دشت‌های باز و شکاف‌های کوهستانی است که باد را قیف و تشدید می‌کند. منابع بادی به طور کلی برای تولید برق در ارتفاعات بالاتر سطح زمین مطلوب‌تر هستند. میزان تولید برق جهان از نیروی باد نیز در سال‌های اخیر به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. در سال ۱۹۹۰، ۱۶ کشور در مجموع حدود ۳/۶ میلیارد کیلووات ساعت برق بادی تولید کردند. در سال ۲۰۱۰، ۱۰۵ کشور حدود ۳۴۰ میلیارد کیلووات ساعت و در سال ۲۰۱۹، ۱۲۷ کشور حدود ۱۴۱۹ میلیارد کیلووات ساعت برق بادی تولید کردند.



شکل ۱ تولید برق از باد در ایالات متحده 1990-2020

2-3- تابع توزیع ویبول

محاسبه و تخمین توزیع فراوانی سرعت باد، نقشی کلیدی، جهت محاسبات پتانسیل باد در هر منطقه، ایفا می‌کند. با مشخص شدن توزیع سرعت باد، هم پتانسیل توان باد، و هم امکان‌سنجی مالی و اقتصادی محل، قابل محاسبه است. تابع توزیع دو پارامتری ویبول، به دلیل سادگی و دقت بسیار خوبی که در آنالیز داده‌ها دارد، بهترین تابع برازش شناخته می‌شود. تابع چگالی توزیع ویبول به صورت رابطه شماره ۱ می‌باشد.

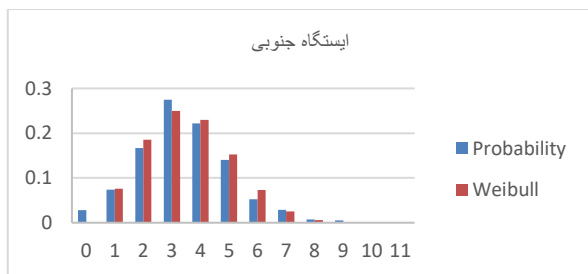
$$f_w(v) = \frac{K}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

$(k > 0, v > 0, c > 1)$

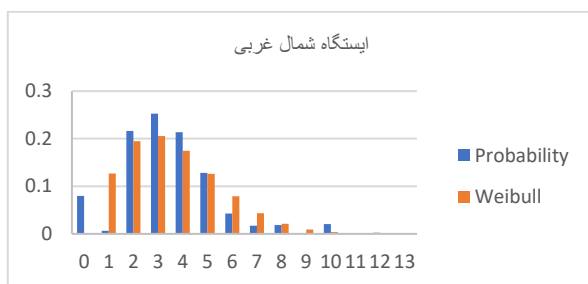
که در آن $f_w(v)$ احتمال سرعت باد برای سرعت v ، پارامتر شکل، c پارامتر مقیاس (m/s) می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت محاسبه پارامترهای مقیاس و شکل تابع ویبول وجود دارد که یکی از این روش‌ها، روش برازش حداقل مربعات است که به کمک تابع احتمال تجمعی به دست می‌آید. در این مطالعه تابع توزیع ویبول برای سه ایستگاه به کمک نرم‌افزار اکسل، با استفاده از قابلیت ویبول دیست، محاسبه و همانطور که در شکل‌های 3، 4 و 5 آمده، رسم شدند. مقادیر α و β ، جهت رسم نمودار ویبول سه ایستگاه، در نرم‌افزار اکسل نیز، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مقادیر α و β ، جهت رسم نمودار ویبول سه ایستگاه

نام ایستگاه	مقدار α	مقدار β
جنوبی	۲/۵	۴
شمال غربی	۱/۳	۲
شمال شرقی	۱/۹	۴



شکل ۳ تابع توزیع ویبول برای ایستگاه جنوبی



شکل ۴ تابع توزیع ویبول برای ایستگاه شمال غربی

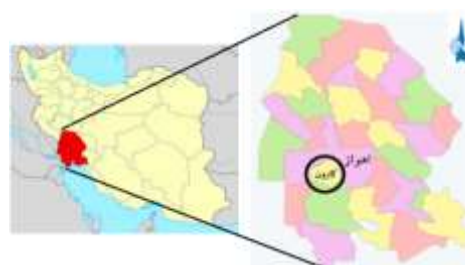
منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر، با در بر داشتن منابع عظیم نفتی و صنعتی از جمله صنایع فولاد، زمین‌های وسیع زراعی نیشکر و پرورش ماهی به عنوان یکی از شاه‌رگ‌های ورودی کلان‌شهر اهواز قلمداد می‌شود که به صورت جدی، خواه‌ناخواه، در مسیر توسعه و پیشرفت، در موازات طرح‌های راهبردی و اقتصادی کلان استان خوزستان قرار گرفته است. طبیعی است که پتانسیل‌سنجی امکان تأمین انرژی رایگان، برای این چنین محدوده جغرافیایی مهمی حائز اهمیت خواهد بود. بنا به این دلیل که مطالعه اختصاصی، بر روی منطقه جغرافیایی شهرستان کارون، به منظور کشف پتانسیل‌ها و استعدادهای منطقه صورت نگرفته است، انگیزه‌ای برای انجام این پژوهش ایجاد شد.

با مطالعه و تسلط نسبی بر کارهای صورت گرفته در منابع ذکر شده، در این پژوهش با استفاده از داده‌های بلندمدت، محاسبات سرعت و چگالی قدرت باد در ارتفاعات مختلف و رسم نمودارهای تابع توزیع ویبول و درصد فراوانی سعی در انجام یک تحقیق پژوهشی کامل شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- معرفی منطقه

محدوده مورد مطالعه، شهرستان کارون یکی از شهرستان‌های استان خوزستان است که با مساحتی بالغ بر ۵ هزار کیلومترمربع و جمعیتی بیش از ۲۰۰ هزار نفر، چهارمین شهرستان استان خوزستان است. این منطقه به صورت تقریبی در میان طول‌های ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۹ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی، واقع شده است. همانطور که در شکل ۲ آمده است از طرف شمال به شهرستان اهواز، از طرف جنوب، به شهرستان شادگان، از طرف غرب، به رودخانه کارون و از طرف شرق، به شهرستان اهواز منتهی شده است. شهرستان کارون در تاریخ ۱۲ بهمن‌ماه سال ۱۳۹۱ با انتزاع از شهرستان اهواز، به شهرستان‌های استان اضافه گردیده است [24].



شکل ۲ موقعیت محدوده شهرستان کارون در کشور و استان خوزستان

2-2- داده‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق از آمار سه ساعته باد، در سه ایستگاه نزدیک به منطقه، که از سازمان هواشناسی کشور در محدوده سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۲۰ اخذ گردیده، استفاده شد.

ارتفاع موردنظر هم بستگی دارد که خود تابعی از فشار و دمای هوا می‌باشد. با توجه به کاهش چگالی هوا با افزایش ارتفاع از سطح دریا و در نتیجه برخورد کمتر مولکول‌های هوا با پره‌های توربین چگالی قدرت باد نسبت به قدرت باد مشخصه دقیق‌تری در معرفی تمام ایستگاه‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر است. برای محاسبه چگالی قدرت باد از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

$$WPD = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \quad (3)$$

ρ دانسیته هوا، V سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است. برای محاسبه ρ از روابط ۴، ۵ و ۶ استفاده می‌کنیم:

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

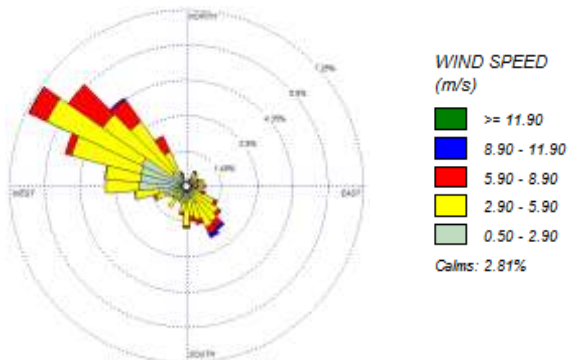
$$\rho = \frac{P}{RT} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (5)$$

$$\rho = \left(\frac{P_0}{RT} \right) \times \exp \left(-g \times \frac{z}{RT} \right) \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (6)$$

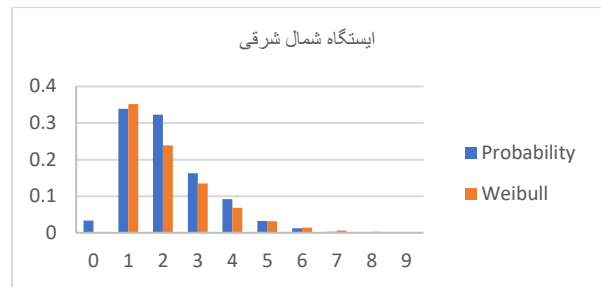
z ارتفاع ایستگاه از سطح دریا برحسب متر، P فشار هوا برحسب پاسکال یا نیوتن بر مترمربع، R ثابت ویژه گاز به میزان ۲۸۷ ژول بر کیلوگرم بر درجه کلونین، T دمای هوا بر حسب درجه کلونین، P_0 فشار استاندارد هوا در سطح دریا به میزان ۱۰۱۳۲۵ پاسکال، g شتاب جاذبه زمین به میزان ۹/۸ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. روابط دیگری برای محاسبه چگالی هوا، علاوه بر روابط ارائه شده در این مقاله، در پژوهش‌های مختلف ذکر شده است. در این پژوهش برای محاسبه چگالی قدرت باد از رابطه ۳ و چگالی هوا از رابطه ۴ استفاده شده است.

8-2- جهت وزش باد

جهت باد در گزینش مکان نصب توربین بادی، پارامتر مهمی نخواهد بود. چراکه امروزه با توجه به فناوری‌های نوین، با تغییر جهت باد پره‌های توربین‌های بادی دائماً در حال تغییر جهت می‌باشد. با این وجود گلبادها کماکان برای چگونگی و نوع آرایش توربین‌های بادی و چیدمان آنها در مزرعه بادی بسیار مؤثر می‌باشند، لذا گلبادهای سالانه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه با پردازش داده‌های دوره آماری مذکور با استفاده از نرم‌افزار رسم گلباد (WRPLOT) طبق شکل‌های ۶، ۷ و ۸ رسم شده‌اند.



شکل ۶ متوسط جهت وزش باد در دوره زمانی ۱۱ ساله ایستگاه جنوب شهرستان



شکل ۵ تابع توزیع ویبول برای ایستگاه شمال شرقی

4-2- فراوانی و تداوم ساعتی وزش باد

داده‌های سه‌ساعته باد به بقیه ساعت‌های فاقد داده توزیع شده و بر اساس این قاعده ارقام میانگین، تداوم ساعتی وزش باد ماهانه و سالانه در بازه‌های مختلف سرعت محاسبه گردید. مجموع ساعات باد در رده‌های مختلف سرعت در هر سال، معادل ۸۷۶۰ ساعت خواهد بود.

5-2- تعداد ساعات تداوم و سکون باد

حداقل سرعت باد برای به حرکت درآوردن پره توربین‌ها و تولید نیروی الکتریکی با توجه به نوع فناوری تولید و کاربرد توربین، متفاوت است. به طور کلی توربین‌ها را با توجه به سرعت متوسط سالانه باد، می‌توان به دو شکل توربین‌های منفرد و مزرعه‌های بادی احداث نمود [25]. شروع تولید الکتریسیته توسط توربین‌های کوچک غیر متصل به شبکه در منابع مختلف بین ۳ الی ۴ متر در ثانیه تعیین شده است و سرعت بادی که بتواند توربین را به حرکت درآورد نباید کمتر از ۳ متر بر ثانیه سرعت داشته باشد [26]. در پژوهش حاضر سرعت راه‌اندازی توربین، 3 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است؛ بنابراین تعداد ساعات وزش باد با سرعت ۳ متر بر ثانیه یا بیشتر را به عنوان ساعات تداوم سرعت و کمتر از این سرعت به عنوان ساعات تداوم سکون منظور شد.

6-2- افزایش ارتفاع و تغییر سرعت

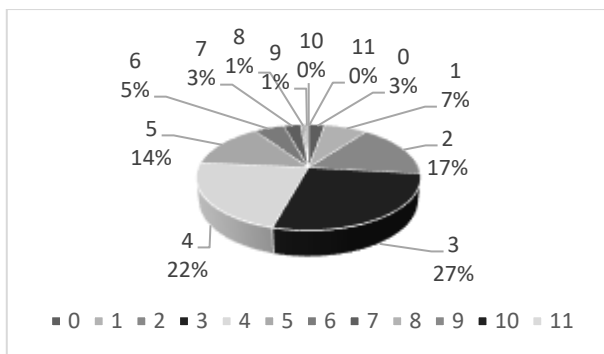
با توجه به اینکه سرعت باد در ارتفاعات مختلف از سطح زمین متفاوت می‌باشد، سرعت برای ارتفاع‌های مختلف بر اساس رابطه شماره ۲ محاسبه گردید [27]:

$$V/V_0 = (H/H_0)^\alpha \quad (2)$$

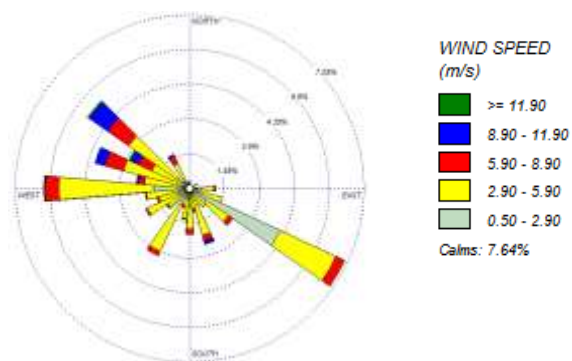
V سرعت باد در ارتفاع جدید بر حسب متر بر ثانیه، V_0 سرعت باد در ارتفاع اصلی بر حسب متر بر ثانیه، H ارتفاع جدید از سطح زمین بر حسب متر، H_0 ارتفاع اصلی بر حسب متر، α عامل معرف سرعت باد است که این ضریب، تابعی از زبری سطح است که اغلب برای زمین باز یک هفتم فرض می‌شود. با این حال، این پارامتر می‌تواند به صورت روزانه، فصلی و مکانی متفاوت باشد [28]. مقدار α با توجه به پوشش سطح زمین با استفاده از جداول مخصوص تعیین می‌شود. با توجه به موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک اطراف منطقه مقدار α بر اساس نوع وضعیت حومه شهری ۰/۳۱ در نظر گرفته شد.

7-2- چگالی قدرت باد در ایستگاه‌ها

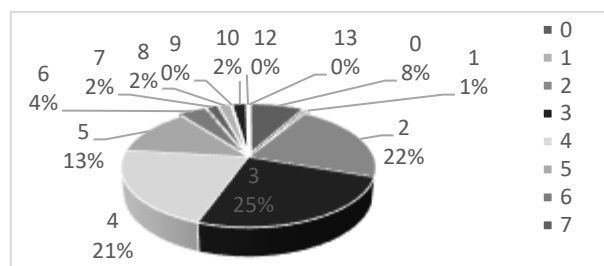
چگالی توان باد یک روش مفید برای ارزیابی منبع باد در هر مکانی است و مقدار انرژی موجود در یک مکان مناسب برای تبدیل توسط یک توربین بادی را نشان می‌دهد [29]. قدرت باد علاوه بر سرعت آن به چگالی هوا در



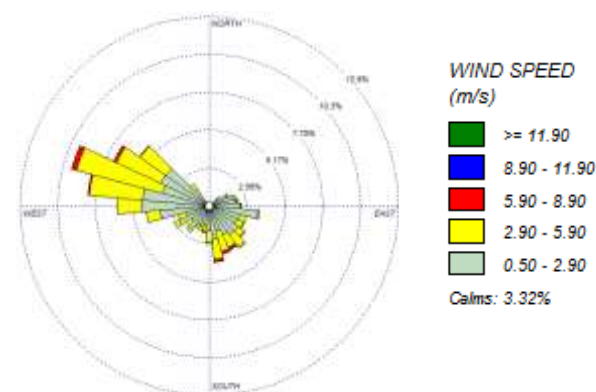
شکل 9 نمودار درصد وزش باد ایستگاه جنوبی در ارتفاع ۱۰ متری



شکل ۷ متوسط جهت وزش باد در دوره زمانی ۱۱ ساله ایستگاه شمالغرب شهرستان

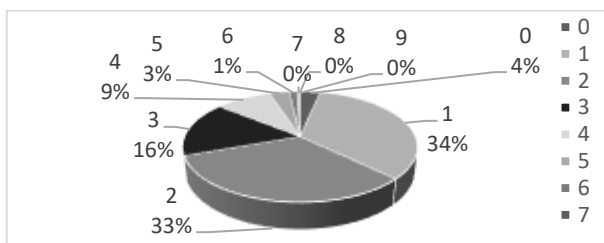


شکل 10 نمودار درصد وزش باد ایستگاه شمال شرقی در ارتفاع ۱۰ متری



شکل ۸ متوسط جهت وزش باد در دوره زمانی ۱۱ ساله ایستگاه شمال شرق شهرستان

ملاحظه می‌شود که، غالب بادهای سه ایستگاه، از سمت غرب و شمال غرب به منطقه می‌وزند.



شکل 11 نمودار درصد وزش باد ایستگاه شمال غربی در ارتفاع ۱۰ متری

2-3- میانگین سرعت ماهانه و سالانه باد و برآورد سرعت تا ارتفاع ۱۰۰ متری

میانگین سرعت ماهانه باد در ارتفاع ۱۰ متری محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به جدول ۳، بیشترین ماه با سرعت بیش از ۳ متر بر ثانیه مربوط به ایستگاه جنوبی (۱۱ ماه از سال) و ایستگاه شمال غربی (۸ ماه از سال) می‌باشند (سرعت معادل و بیش از ۳ متر بر ثانیه با رنگ خاکستری مشخص شده است). سرعت میانگین سالانه باد ایستگاه‌ها تا ارتفاع ۱۰۰ متری نیز با استفاده از رابطه ۳ محاسبه و در جدول ۴ ذکر شده است. طبیعتاً با افزایش ارتفاع افزایش سرعت خواهیم داشت بدین ترتیب دو ایستگاه جنوبی و شمال غربی در ارتفاعات متفاوتی از سطح زمین قابلیت بهره‌برداری از برق بادی را در مقیاس‌های محدود دارا هستند. در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، برای تمامی ایستگاه‌ها سرعت بیش از آستانه به دست آمد که نشان دهنده پتانسیل بسیار بالای شهرستان، جهت بهره‌برداری از انرژی باد می‌باشد.

3-3- چگالی قدرت باد

چگالی قدرت باد با استفاده از رابطه ۴ محاسبه و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. در ارتفاع بالاتر، مناطق اغلب با رتبه‌بندی «کلاس باد» توصیف می‌شوند، نه محدوده چگالی توان باد یا میانگین سرعت باد [30]. جدول ۶

2-9- تغییرات سرعت ماهانه و سالانه باد

به منظور بررسی دقیق‌تر وضعیت سرعت باد، مقادیر میانگین سرعت باد در ساعات شبانه‌روز، ماهانه و سالانه در ۵۰ متری سطح زمین و نیز در طول ماه‌های مختلف محاسبه گردید. بادآوری می‌شود که سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری بر مبنای مقادیر سرعت ارتفاع ۱۰ متری از طریق رابطه 2 محاسبه شده است. بر اساس مطالب ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها، نتایج فراوانی سرعت وزش باد در سه ایستگاه منطقه محاسبه و در جدول ۲ ذکر شده است.

3- نتایج

3-1- تداوم سرعت باد

ساعات تداوم سرعت مطلوب و درصد آنها نسبت به کل سال، حاکی از قابلیت بسیار خوب انرژی باد به منظور نصب توربین بادی مناسب در این نقاط می‌باشد. نمودارهای درصد وزش باد ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰ متری در شکل‌های 9، 10 و 11 محاسبه شده است.

باد در مقیاس کلان و صنعتی و بزرگ مناسب نخواهند بود. از نظر پارامترهای مؤثر در این پژوهش ایستگاه‌های شمال غرب و جنوب از موقعیت خوبی برای تولید انرژی الکتریسیته از باد برخوردارند؛ بنابراین جهت مطالعه دقیق‌تر منطقه، استفاده از بازه‌های زمانی کوتاه‌تر و پیوسته مانند داده‌های ۱۰ دقیقه‌ای یا یک ساعته پیشنهاد می‌شود.

در مقام مقایسه با پژوهش امانوئل اوگولو و همکاران (2020) که به صورت تجربی در ارتفاعات مختلف جوی (۱۰ متر، ۳۰ متر، ۶۰ متر و ۱۰۰ متر) این نتیجه حاصل شده که "در ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین چگالی قدرت باد بیشتری نسبت به ارتفاع ۱۰ متری خواهیم داشت" در تحقیق حاضر نیز همین نتایج حاصل شده‌اند. حامد پوراصل و همکاران (2021)، از طریق بررسی دقیق و سیستماتیک، پتانسیل انرژی بادی قزاقستان را برای اولین بار ارزیابی می‌کند. با استفاده از تابع توزیع ویبول و داده‌های سرعت باد ساعتی، توان و چگالی انرژی سالانه سایت‌ها محاسبه گردید. برای ۵۰ سایت در نظر گرفته شده در این مطالعه و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، میانگین سالانه سرعت باد، چگالی نیرو و تولید انرژی محاسبه شد [۹]. که در تحقیق حاضر از بازه‌های زمانی سه‌ساعته که در دوره یازده‌ساله (۲۰۱۰-۲۰۲۰) ثبت شده، در سه ایستگاه جنوب، شمال شرق و شمال غرب شهرستان، استفاده شده است. در این پژوهش، پتانسیل انرژی باد در منطقه با هدف شناسایی مناسب‌ترین نقاط برای استقرار توربین‌های بادی، با استفاده از تابع توزیع ویبول و محاسبه سرعت و چگالی قدرت باد به صورت متوسط ماهانه و سالانه، مورد ارزیابی قرار گرفت، برای ایستگاه‌های جنوب و شمال غرب شهرستان تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین محاسبه گردید. توصیه پایانی این است که علاوه بر پارامترهای جغرافیایی و منطقه‌ای، مدنظر قرار دادن پارامترهای فنی و اقتصادی نیز، کاملاً ضروری است.

محدوده چگالی توان باد و کلاس‌های مرتبط را در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد [31].

جدول ۶ چگالی توان باد و طبقات مرتبط در ارتفاع ۱۰ متری

Wind Power Class at 10 (m)	Wind Power Density (W/m^2)	Mean Speed range (m/s)
1	< 100	< 4.4 (9.8)
2	100-150	4.4 (9.8)/5.1(11.5)
3	150-200	5.1 (11.5)/5.6(12.5)
4	200-250	5.6(12.5)/6.0(13.4)
5	250-300	6.0 (13.4)/6.4(14.3)
6	300-400	6.4 (14.3)/7.0(15.7)
7	> 400	> 7.0(15.7)

4- بحث و نتیجه‌گیری

سرعت متوسط سالانه باد سه ایستگاه تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین، به ترتیب شمال شرق بین ۲/۱۲ تا ۴/۳۳، شمال غرب بین ۳/۴۷ تا ۷/۰۸ و جنوب بین ۳/۴۵ تا ۷/۰۴ متر بر ثانیه و مقدار چگالی قدرت باد سالانه برای ۳ ایستگاه، به ترتیب شمال شرق بین ۵/۸ تا ۴۹، شمال غرب بین ۲۵/۵ تا ۲۱۵ و جنوب بین ۲۵/۱ تا ۲۱۲ وات بر مترمربع حاصل شد. بنابراین هرچه ارتفاع بالاتر باشد، سرعت بیشتر و به تبع آن چگالی قدرت باد بیشتری خواهیم داشت. لذا با توجه به طبقه‌بندی انجام شده در آمریکا به ترتیب ایستگاه‌های شمال غرب و جنوب شهرستان در اولویت قرار دارند. حداقل توربین‌های پیشنهادی جهت نصب در این منطقه توربین‌های با کاربرد خانگی و کشاورزی با اندازه‌های کوچک و متوسط برای بهره‌گیری از انرژی باد را می‌توان پیشنهاد کرد. به دلیل اینکه هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها در طبقه ۷ رده‌بندی، قرار نمی‌گیرند، جهت تأسیس مزارع بادی یا استفاده از انرژی

جدول ۳ سرعت متوسط ماهانه باد در ایستگاه‌های سینوپتیک شهرستان در ارتفاع ۱۰۰ متری (متر بر ثانیه)

ایستگاه	ماه	ژانویه	فوریه	مارچ	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
جنوبی	۳/۱۴	۳/۶۴	۳/۵۴	۳/۸۳	۳/۷۱	۴/۴۳	۳/۵۵	۳/۷۹	۳/۰۳	۲/۳۹	۳/۳۷	۳/۰۴	
شمال شرقی	۱/۶۸	۲/۱۴	۲/۰۷	۲/۳۶	۲/۴۶	۲/۹۶	۲/۲۵	۲/۶۵	۱/۸۵	۱/۳۳	۱/۸۷	۱/۷۹	
شمال غربی	۲/۷۰	۳/۵	۲/۶۷	۳/۶۲	۴/۰۹	۵/۲۶	۳/۶۰	۴/۵۰	۳/۰۸	۲/۷۲	۲/۸۵	۳	

جدول ۴ سرعت‌های متوسط سالانه باد ایستگاه‌ها تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)

ایستگاه	ارتفاع (متر)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
جنوبی	۳/۴۵	۴/۲۸	۴/۸۵	۵/۳۰	۵/۶۸	۶/۰۱	۶/۳۱	۶/۵۷	۶/۸۲	۷/۰۴	
شمال شرقی	۲/۱۲	۲/۶۳	۲/۹۸	۳/۲۶	۳/۴۹	۳/۶۹	۳/۸۸	۴/۰۴	۴/۱۹	۴/۳۳	
شمال غربی	۳/۴۷	۴/۳۰	۴/۸۸	۵/۳۳	۵/۷۱	۶/۰۵	۶/۳۴	۶/۶۱	۶/۸۶	۷/۰۸	

جدول ۵ مقادیر چگالی قدرت باد ایستگاه‌های منطقه تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین بر حسب وات بر مترمربع

ایستگاه	ارتفاع (متر)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
جنوبی	۲۵/۱	۴۷/۹	۶۹/۶	۹۰/۸	۱۱۱/۷	۱۳۲/۲	۱۵۲/۸	۱۷۲	۱۹۳	۲۱۲	
شمال شرقی	۵/۸	۱۱/۱	۱۶/۱	۲۱/۱	۲۵/۹	۳۰/۶	۳۵/۵	۴۰	۴۴/۶	۴۹	

5- مراجع

- [17] G. Ibarra-Berastegi, A. Ulazia, J. Saénz, and S. J. González-Roji, Evaluation of Lebanon's Offshore-Wind Energy Potential, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 361, 2019.
- [18] H. Albisher and H. Alsamamra, An Overview of Wind Energy Potentials in Palestine, *Journal of Energy and Natural Resources*, Vol. 8, No. 3, pp. 98–108, 2019.
- [19] D. Đurđević, Comutilisation of Wind Energy Potential in Montenegro, *Researches Reviews of the Department of Geography, Tourism and Hotel Management*, Vol. 46, No. 1, 2017.
- [20] Y. Noorollahi, A. Ashraf, and M. Zamani, Wind Energy Resources Assessment Using Geographical Information Systems (GIS), (Case Study: West Iran), *IJE*, Vol. 14, No. 1, pp. 104–126. (in Persian)
- [21] A. Mostafaeipour, Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 93–111, 2010.
- [22] A. Mostafaeipour and H. Abarghoeei, Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran, *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 12, pp. 1758–1766, 2008.
- [23] P. Alamdari, O. Nematollahi, and M. Mirhosseini, Assessment of wind energy in Iran: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 836–860, 2012.
- [24] No Title. [Online]. Available: <https://karoon.ostan-khz.ir>. [Accessed: 03-Feb-2020].
- [25] F. Mojarad and S. Hemmati, Evaluation of wind energy capabilities in the provinces of Kurdistan and Kermanshah, *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, Vol. 13, No. 29, p. 137, 2013. (in Persian)
- [26] A. A. Felix, T. O. Akinbulire, A. Abdulkareem, and C. O. A. Awosope, Wind Energy Potential in Nigeria, *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, Vol. 3, No. 1, pp. 595–601, 2012.
- [27] Y. El Khchine, M. Sriti, N. Eddine, and E. K. Elyamani, *Evaluation of wind energy potential and trends in Morocco*, Elsevier Ltd, Heliyon 5, 2019.
- [28] R. Belu, *Assessment and Analysis of Offshore Wind Energy Potential*, 2020.
- [29] M. Adaramola, O. Oyewola, O. Ohunakin, and O. Akinnawonu, Performance evaluation of wind turbines for energy generation in Niger Delta, Nigeria, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 6, pp. 75–85, 2014.
- [30] K. S. Heni, A. B. Khamees, and O. H. Raja, Wind Power Density Estimation in the Middle of Iraq "Karbala Site", *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, Vol. 4, No. 4, 2015.
- [31] T. Hughes, Lesson Number 1. In an Oklahoma Wind Power Tutorial Series, 2000.
- [1] A. S. Dar and F. Porté-Agel, Wind turbine wakes on escarpments: A wind-tunnel study, *Renewable Energy*, 2021.
- [2] M. A. Mokhtari, Wind Energy Vision to Horizon 2050 - Evolution and Future of Wind Energy Markets, in *10th National Conference on Environment*, 2020. (in Persian)
- [3] Renewable Power Generation Costs in 2014, in *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, 2015.
- [4] U. S. E. information Administration, *Monthly Energy Review and Electric Power Monthly*, February, 2021.
- [5] A. R. Attah, J. Abubakar, and J. Badejo, Assessing the Technical Offshore Wind Energy Potential in Lagos, Nigeria, *Earth and Environmental Science*, Vol. 730, 2021.
- [6] A. Girleanu, F. ;Rus. Onea, and E., *Assessment of the Wind Energy Potential along the Romanian Coastal Zone*, Inventions, 2021.
- [7] A. A. Teyabeen, F. R. Akkari, A. E. Jwaid, A. Zaghwan, and R. Abodelah, Assessment of Wind Energy Potential in Zwara, Libya, Refereed, *biannual scientific journal Issued by Center for Solar Energy Research and Studies*, 2021.
- [8] M. A. Almekhlafi et al., *Analysis and Assessment of Wind Energy Potential of Socotra Archipelago in Yemen*, Computers, Materials & Continua, 2021.
- [9] H. H. P. V. M. Khojastehnezhad, No Title, *Journals of Power and Energy*, 2021.
- [10] I. Kamdar and J. Taweekun, Assessment of wind energy potential of Hat Yai (Songkhla), Thailand, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*, 2021.
- [11] S. S. Ahmad and A. Al Rashid, Feasibility analysis of wind energy potential along the coastline of Pakistan, *Ain Shams Engineering Journal*, 2021.
- [12] E. O. Ogolo, J. O. Apata, and O. S. Ojo, Harnessing Wind Energy Potential for Power Generation in Nigeria, *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2020.
- [13] Z. U. R. Tahir, A. Kanwal, S. Afzal, S. Ali, M. A. NasirHayat, and U. Bin Saeed, Wind Energy Potential and Economic Assessment of Southeast of Pakistan, *International Journal of Green Energy*, Vol. 18, No. 1, pp. 1–16, 2020.
- [14] A. A. Mohamed and A. M. Elmabrouk, Assessment of the wind Energy Potential on the Coast of Tripoli, Vol. 2020.
- [15] B. A. Çakmakçı and E. Hüner, Evaluation of wind energy potential: a case study, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020.
- [16] M. Ç. Enes Halit Aydın1, Comparative study on wind energy potential for Artvin, nternational, *Journal of Energy Applications and Technologies*, 2019.