

محاسبه چگالی و توان باد به منظور استفاده از انرژی آن در اردبیل

دکتر مجید زاهدی* _ دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز

دکتر برومند صلاحی** _ استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی (واحد اردبیل)

دکتر مجید جمیل*** _ استادیار پژوهشگاه مواد و انرژی،

دریافت مقاله: ۸۳/۱/۲۵

تأیید نهایی: ۸۳/۷/۲۷

چکیده

با اتمام انرژی های فسیلی در آینده، استفاده از انرژی های نو و تجدید شونده ضروری است. برخی از نقاط ایران منجمله اردبیل پتانسیل مناسبی جهت استفاده از انرژی باد دارند. در این مقاله سعی شده تا پتانسیل انرژی باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل مورد مطالعه قرار گیرد. با استفاده از آمار بادهای ساعتی و روزانه ده ساله از ایستگاه مذکور، میانگین سرعت باد ۶۳۷ متر در ثانیه، چگالی توان باد ۳۰۲/۶۴ وات در متر مربع، ضریب تغییرات باد ۵۶/۵ درصد و ضریب ثبات باد ۴۶ درصد بدست آمده است. جهت باد غالب در ایستگاه اردبیل، شرقی و درصد فراوانی آن ۲۳/۹۴ می باشد. در این ایستگاه، ۴۴/۷۴ درصد از اوقات سال، بادی وجود ندارد. از کل ساعات سال ۳۶۵۲/۵ ساعت توربین بادی می تواند در این ایستگاه تولید انرژی نماید. قدرت نظری و عملی توربین بادی در این ایستگاه با قطر پره چهار متر به ترتیب ۱۷۵۷/۹ و ۴۶۵/۶ وات در متر مربع است. این ایستگاه می تواند به عنوان یکی از نقاط مناسب به منظور بهره برداری از انرژی باد محسوب شود. واژگان کلیدی: پتانسیل انرژی باد، باد غالب، قدرت باد، میانگین سرعت باد، توربین بادی، ایستگاه سینوپتیک اردبیل.

مقدمه

باد به عنوان یکی از قدیمی ترین منابع انرژی از دیرباز مورد توجه و کاربرد انسان بوده است. استفاده مستقیم از باد به صورت خشک کردن و تهویه و استفاده غیرمستقیم از آن به صورت تبدیل انرژی جریان باد به انواع مختلف انرژی جهت آرد کردن غلات، پمپاژ آب به مزارع و استفاده از آن در شبکه سراسری برق می باشد. طی سالیان دراز ثابت شده است که می توان انرژی باد را به صورت انرژی مکانیکی و یا الکتریکی مورد استفاده قرار داد. شواهد و منابع تاریخی نشان می دهند که در بسیاری از کشورها نظیر ایران، عراق، مصر، چین، ایتالیا، اسپانیا و ... از انرژی باد جهت آسیاب و آبیاری استفاده می شده است.

* E-mail: M_Zahedi@hotmail.com

** E-mail: bromand416@yahoo.com

*** E-mail: Jamil@merc.ac.ir

کلیه منابع انرژی فسیلی نظیر نفت، گاز، زغال سنگ، اورانیوم و غیره روزی به اتمام خواهند رسید. با اتمام انرژی های فسیلی غیر قابل تجدید، چرخ عظیم تمدن بشری که به انرژی وابسته است، مختل خواهد شد. از طرف دیگر، مصرف منابع تولید انرژی فسیلی مشکلات و هزینه های مادی و زیست محیطی خاص خود را در پی دارد. استفاده از انرژی اتمی نیز صرفنظر از پیامدهای شدید زیست محیطی نظیر زباله های اتمی و غیره، هزینه بالا و تکنولوژی پیشرفته ای می طلبد. این مسئله سبب شده است که بشر همواره در پی منابع انرژی نو جهت جایگزینی دو منبع انرژی مذکور باشد؛ منابعی که نه تنها ارزان قیمت و قابل دسترس باشد، بلکه مصرف آنها آلودگی چندانی ببار نیاورد. انرژی های خورشید، هیدروالکتریک^۱، باد، جزر و مد^۲ اقیانوس ها، امواج، گرمای درون زمین^۳، بیوگاز^۴ و انرژی گرمایی اقیانوس ها که به «انرژی های نو» و قابل تجدید موسوم اند، از آن جمله می باشند.

از مجموع انرژی های یاد شده موسوم به انرژی های نو، بنظر می رسد که استفاده از انرژی خورشید و باد در کشور ما اقتصادی تر و مقرون به صرفه تر باشد. هر چند استفاده از انرژی خورشیدی بر سایر روش های تولید انرژی های نو برتری آشکار دارد، ولی نباید از این نکته غافل شد که اولاً بازده استفاده از سلول های فتوولتائیک^۴ در تبدیل انرژی خورشیدی به برق حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد است (ثقفی ۱۳۷۲، ص ۲۰)، ثانیاً مهار انرژی قابل ملاحظه خورشیدی مستلزم دسترسی به تکنولوژی پیشرفته و کاربرد کلکتورهای^۵ بزرگ و سلول های فتوولتائیک است که هزینه گزافی بدنبال دارد. این مسئله سبب شده است که امروزه توجه بسیاری از کشورهای جهان منجمله ایران به انرژی باد معطوف گردد، زیرا: ۱- تجدیدپذیر است ۲- میزان تولید آن وابسته به میزان ذخائر آن در دیگر نقاط دنیا نمی باشد ۳- ایجاد هیچگونه آلودگی نمی نماید ۴- هزینه استفاده از دستگاه های بادی در قیاس با دستگاه های تولید انرژی معمولی فعلی، کمتر و هزینه نگهداری و تعمیرات آن نیز پایین تر است ۵- در مقیاس های محلی مانند روستاهای منفرد می توان بدون انتقال نیرو از نیروگاه های مرکز از آن استفاده نمود ۶- به علت پخش بودن نیروگاه و متمرکز نبودن آن، در مواقع جنگ و سایر بلاهای طبیعی، آسیب پذیری کمتری نسبت به نیروگاه های متمرکز دارد.

ایران با آب و هوایی متنوع، در مسیر جریان های مهم هوایی به خصوص جریان های غربی و شمال غربی قرار دارد. این مسئله به همراه وجود تنوع توپوگرافی و به تبع آن ایجاد مراکز فشار حرارتی محلی سبب شده است که در برخی نقاط کشور در طول سال، بادهایی با شدت های مختلف بوزد. بدیهی است در صورت وجود آستانه های سرعت و دوام باد، می توان از انرژی حاصله از نیروی لایزال آن استفاده نمود. این در حالی است که حدود یک تا دو درصد از انرژی رسیده از خورشید به انرژی باد تبدیل می شود (ویلسینک ۱۹۷۸، ص ۵۵۷).

شواهد و قرائن آماری و تجربی حاکی از آن است که منطقه اردبیل از مناطق بادخیز کشور بشمار می رود. شدت و تداوم بادهای در این منطقه قابل ملاحظه است و این امر نشانگر آن است که اگر آستانه های سرعت و تداوم باد به حد

1 - Hydroelectric
2 - Geothermal
3 - Biogas
4 - Photovoltaic
5 - Collectors

مطلوب برسد، امکان استفاده از انرژی باد در این منطقه وجود دارد. لذا در این مقاله سعی شده تا برخی مشخصه‌های انرژی باد در منطقه اردبیل با استفاده از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک اردبیل محاسبه و مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

محاسبه چگالی باد^۱ در یک ناحیه جغرافیایی، اولین و اساسی‌ترین مسئله برای استفاده از انرژی باد و برآورد پتانسیل آن و دیگر مشخصه‌های باد می‌باشد. لذا آگاهی از سرعت میانگین سالانه و نیز چگالی توان باد در انتخاب یک محل برای نیروگاه بادی از اهمیت خاصی برخوردار است. جهت بررسی و تجزیه و تحلیل آمار سرعت و جهات باد منطقه اردبیل از آمار سه ساعته متوالی ایستگاه سینوپتیک اردبیل استفاده شده است. هر چند دوره آماری جهت بررسی اوضاع باد منطقه از سال ۱۹۷۲ تا ۱۹۹۹ موجود است، لیکن با توجه به خلاء قابل ملاحظه آماری موجود در بین این داده‌ها و ضرورت توالی داده‌ها در محاسبه چگالی توان باد، آمار سه ساعته متوالی روزانه (هشت بار در هر شبانه‌روز) ایستگاه مورد بررسی، در یک دوره زمانی ده ساله (۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹) مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. جهت بررسی آماری داده‌ها از نرم‌افزارهای SPSS و Statistica استفاده شده است. با استفاده از روابط موجود، میانگین سرعت عددی، انحراف معیار و چگالی توان باد قابل محاسبه است. مقایسه میانگین‌های عددی و برداری باد تحت عنوان «ضریب تداوم باد» (به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در پتانسیل‌سنجی انرژی باد) انجام گرفته و اندازه و زاویه جهت وزش باد منتج آن محاسبه شده است. قدرت نظری و عملی توربین‌های بادی فرضی در منطقه اردبیل نیز با روابط مربوطه محاسبه شده است. در طبقه‌بندی و محاسبه فراوانی‌های باد و نیز درصدبندی آنها با توجه به طبقات سرعت باد، از نرم‌افزار^۲ WRpLot نسخه (۳) استفاده شده و گلبادهای این ایستگاه توسط این نرم‌افزار ترسیم شده است. لازم به ذکر است که قبل از ترسیم گلباد، هر یک از آمار سه ساعته روزانه باد در سال‌های آماری به صورت کدهای ۲۸ کارا کتری درآمده و سپس در نرم‌افزار مذکور مورد استفاده قرار گرفته است. با انجام این عملیات امکان ترسیم گلباد سالانه، دوسالانه، چندسالانه، ماهانه، دوماهانه، فصلی، نیمسالانه، هفتگی، ساعتی و روزانه در محدوده‌های ساعتی مختلف به صورت رنگی و هاشور با این نرم‌افزار وجود دارد. تعداد آمار پردازش شده در ایستگاه مورد بررسی ۲۹,۲۱۶ مورد برداشت بوده است. جهت تطابق داده‌ها با استانداردهای سازمان هواشناسی، طبقات سرعت در یازده ردیف ارائه شده و جهت سهولت درک آن، واحد «نات» به «متر در ثانیه» تبدیل شده است. لذا وجود برخی ارقام اعشاری در ستون‌های جداول شماره (۱ تا ۳) ناشی از تبدیل نات به متر است.

اوضاع کلی باد

به منظور درک نمای کلی وضعیت باد در ایستگاه مورد مطالعه، جهات و فراوانی‌های سرعت باد در یک دوره آماری ده ساله به صورت سه ساعت به سه ساعت روز به روز، بررسی و ماحصل کار به صورت فراوانی و درصد

1 - Wind density

۲- این نرم‌افزار و کد آن از سایت WWW.Lakesenvironmental.com قابل دریافت است.

وزش باد در جهات مختلف جغرافیایی و طبقات مختلف سرعت در جدول شماره (۱) ارائه شده است^۱.

جدول ۱- فراوانی و درصد وزش باد در طبقات مختلف سرعت و جهات اصلی جغرافیایی در ایستگاه سینوتیک

اردیبهل در دوره آماری (۱۹۹۰-۱۹۹۹)

طبقات سرعت (m/s)		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
۰/۵ - ۱/۵	فراوانی	۴	۶	۲۶	۶	۷	۱۳	۱۱	۷
	درصد	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳۷	۰/۰۲
۲-۳	فراوانی	۲۶۸	۴۸۵	۱۱۹۰	۳۸۵	۳۶۹	۳۸۰	۳۸۶	۴۰۷
	درصد	۰/۹۱	۱/۶۶	۴/۰۷	۱/۳۱۷	۱/۲۶	۱/۳	۱/۳۲	۱/۳۹
۳/۵ - ۵	فراوانی	۱۵۰	۴۱۹	۱۴۸۴	۲۰۸	۲۳۱	۳۶۶	۲۷۰	۲۱۷
	درصد	۰/۵۱	۱/۴۳	۵/۰۷	۰/۷۱	۰/۷۹	۱/۲۵	۰/۹۲	۰/۷۴
۵/۵ - ۸	فراوانی	۴۵	۵۱۹	۲۵۰۲	۲۰۴	۳۸۶	۶۶۳	۲۷۰	۸۰
	درصد	۰/۱۵	۱/۷۷	۸/۵۶	۰/۷۰	۱/۳۲	۲/۲۶۹	۰/۹۲	۰/۲۷
۸/۵ - ۱۰/۵	فراوانی	۳	۲۰۶	۱۲۳۸	۴۳	۲۰۸	۴۸۳	۱۵۰	۲۳
	درصد	۰/۰۱	۰/۷۰	۴/۲۳	۰/۱۴۷	۰/۷۱	۱/۶۵	۰/۵۱	۰/۰۷۸
۱۱ - ۱۳/۵	فراوانی	۱	۶۸	۵۱۴	۱۹	۱۲۹	۳۷۷	۱۰۸	۱۱
	درصد	۰/۰۰۰۱	۰/۲۳	۱/۷۶	۰/۰۶	۰/۴۴	۱/۲۹	۰/۳۶۹	۰/۰۳۷
۱۴ - ۱۶/۵	فراوانی		۱۴	۴۱	۲۱	۸۰	۱۷۹	۷۱	۲
	درصد		۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۲۷	۰/۶۱	۰/۲۴	۰/۰۰۰۶
۱۷ - ۲۰	فراوانی		۲	۱۰	۳	۳۳	۸۶	۱۳۳	
	درصد		۰/۰۰۰۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۲۹	۰/۰۴	
۲۰/۵ - ۲۳/۵	فراوانی						۱۷	۸	
	درصد						۰/۰۵۸	۰/۰۲۷	
۲۴ - ۲۷/۵	فراوانی					۶	۱۰		۱
	درصد					۰/۰۲	۰/۰۳		۰/۰۰۰۱
۲۸ - ۳۱/۵	فراوانی						۴		
	درصد						۰/۰۱		
جمع	فراوانی	۴۷۱	۱۷۱۹	۷۰۰۵	۸۸۹	۱۴۴۹	۲۵۷۸	۱۲۸۷	۷۴۸
	درصد	۱/۶۳	۵/۸۳	۲۳/۹۴	۳/۰۶	۴/۹۷	۸/۸۴	۴/۴۱	۲/۵۸

منبع: داده‌های خام سازمان هواشناسی کشور

از مجموع ۲۹,۲۱۶ مورد برداشت باد، تعداد ۱۳,۰۷۰ مورد یا به عبارتی ۴۴/۷۴ درصد از کل موارد برداشت مربوط به باد آرام بوده است. از ۵۵/۲۶ درصد وزش باد، بیشترین وزش مربوط به جهت شرقی با ۲۳/۹۴ درصد و کمترین آن مربوط به جهت شمالی با ۱/۶۳ درصد می‌باشد. جهت جنوبغربی، پس از جهت شرقی، بیشترین درصد وزش باد (۸/۸۴ درصد) را در دوره آماری داشته است. صرفنظر از درصد باد آرام، طبقات سرعت ۲-۳ و ۳/۵-۵ متر در ثانیه به ترتیب

۱- ارقام جداول شماره (۱ تا ۳) حاصل پردازش تعداد ۲۹,۲۱۶ رکورد خام سمت و سرعت باد که از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده، می‌باشد و از منبع خاصی اقتباس نگردیده است.

۱۳/۲۵ و ۱۱/۴۵ درصد از تعداد وزش های باد در دوره آماری را به خود اختصاص داده اند. طوفان ها یا بادهای بسیار شدید و مخرب در دوره آماری حدود ۰/۱۴ درصد از کل وزش ها را دارا بوده اند. متوسط سرعت باد در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۷/۰۲، ۶/۸۶، ۷ و ۶/۸۵ متر در ثانیه و درصد وزش باد آرام آنها به ترتیب ۴۴/۵۸، ۴۳/۲۲، ۴۱/۷۹ و ۴۷/۷۹ درصد می باشد. جهت باد غالب در کلیه فصول شرقی است. در فصول پاییز و زمستان به دلیل نفوذ سیستم های غربی، وزش باد در جهات جغرافیایی ۱۸۰ تا ۲۷۰ درجه قابل ملاحظه هستند. سرعت متوسط باد در نیمه گرم و سرد سال، برابر بوده و ۶/۹۳ متر در ثانیه گزارش شده است؛ ولی درصد باد آرام در نیمه سرد سال بیشتر از نیمه گرم سال است (۴۶/۲ درصد در مقابل ۴۲/۵ درصد). جهت جلوگیری از اطاله مطلب، بررسی وضعیت ماهانه و ساعتی تعداد و درصد وزش بادهای در ایستگاه مورد مطالعه و نیز ترسیم سایر گلبادهای آن به مجال دیگری موکول می گردد. با این وجود، نمودار شماره (۱) گلباد سالانه و فصلی ایستگاه مورد مطالعه را در دوره آماری به تصویر کشیده است. همان گونه که از نمودار پیداست، جهت وزش باد غالب در این ایستگاه شرقی است.

توان خروجی مبدل های بادی به مگعب سرعت باد وابسته است (لندبرگ ۱۹۹۹، ص ۲۱۲). سرعت باد یک کمیت یا یک متغیر تصادفی است و مقادیری را که می تواند اختیار کند، هر کدام با یک احتمال همراه می باشد. لذا برای شناخت رژیم باد در یک منطقه و نیز برآورد میزان انرژی قابل حصول سالیانه آن لازم است اطلاعات مربوط به سرعت و جهت باد را که از مشاهدات و اندازه گیری های مکرر حاصل می شوند، مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. میانگین سرعت باد در مدت زمان اندازه گیری t (تا t_1 تا t_2) در حالت کلی از رابطه زیر محاسبه می شود:^۲

$$V^- = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad t = t_2 - t_1 \quad (1-1)$$

اما چون اندازه گیری سرعت ها به صورت گسسته و در فواصل زمانی مشخصی (سه ساعته) انجام گرفته است، لذا متوسط سرعت باد از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V^- = \left(\frac{1}{n} V_1 + V_2 + \dots + V_n \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (1-2)$$

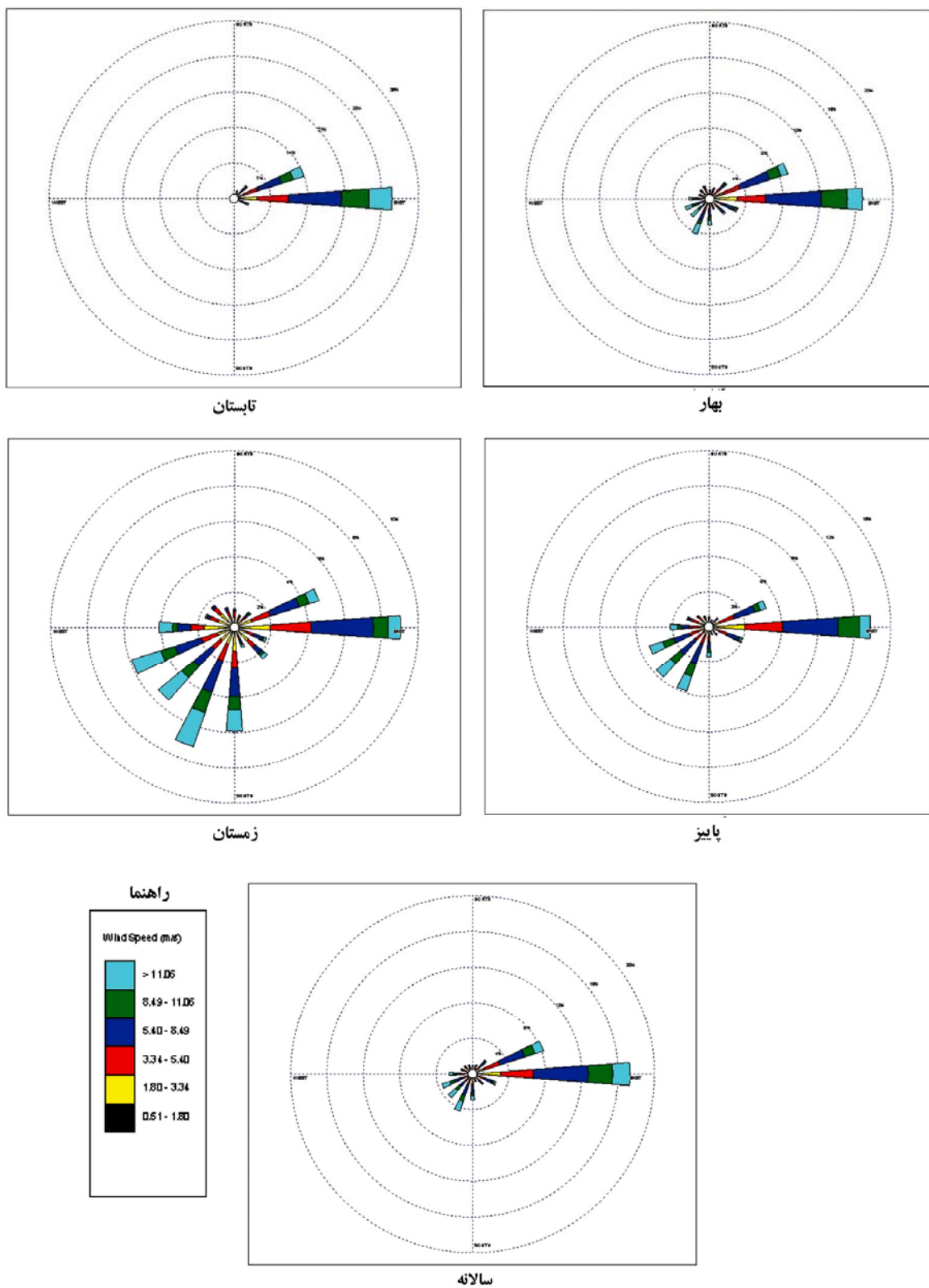
که در رابطه مذکور V_i سرعت باد در مشاهده (i) و n تعداد مشاهداتی است که در دوره مورد مطالعه برای باد غیر آرام گزارش شده است. بدیهی است هر قدر فواصل زمانی برداشت مقادیر سرعت ها کوتاه تر باشد، نتایج، دقیق تر خواهند بود.

با استفاده از جدول شماره (۱) و برای محاسبات مربوط به تعیین سرعت میانگین (\bar{V})، انحراف معیار سرعت ها (S) و نیز چگالی توان باد (P)، جدول شماره (۲) تنظیم شده و محاسبات مورد لزوم جهت برآورد پارامترهای مذکور (P, S, \bar{V}) ارائه شده است.

۱- ماه های فروردین تا شهریور تحت عنوان ماه های نیمه گرم و ماه های مهر تا اسفند تحت عنوان ماه های نیمه سرد سال در نظر گرفته شده اند.

۲- روابط شماره ۱-۱ تا ۱-۵ از منبع شماره ۲، صفحات ۴۴ و ۴۵ اقتباس شده است.

نمودار شماره ۱. گلباد فصلی و سالانه ایستگاه سینوپتیک اردبیل در دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۹۹



جدول ۲- رده بندی سرعت های باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل سال های آماری (۱۹۹۰-۱۹۹۹) بدون

محاسبه باد آرام

V/ms	V_i	\bar{F}_i	V_i^3	$P(V_i)\%$	$F_i \cdot V_i$	$P \cdot V_i$	Hourly	$(V_i - \bar{V})^2$	$F_i \cdot (V_i - \bar{V})^2$	$P(V_i) \cdot V_i^3$	گروه های باد
۰/۵-۱/۵	۱	۸۰	۱	۰/۴۹	۸۰	۰/۰۰۴۹	۲۴	۳۱/۵۸	۲۵۲۶/۴	۰/۲	نسیم ملایم
۲-۳	۲/۵	۳۸۷۰	۱۵/۶۲	۲۳/۹۷	۹۶۷۵	۰/۲۴۴۶	۱۱۶۱	۱۴/۹۷	۵۷۹۳۳/۹	۳۷۴/۴۱	
۳/۵-۵	۴/۲۵	۳۳۴۵	۷۶/۷۶	۲۰/۷۲	۱۴۲۱۶/۲۵	۰/۴۵۱۸	۱۰۰۳/۵	۴/۴۹	۱۵۰۱۹/۰۵	۱۵۹۰/۴۶	
۵/۵-۸	۶/۷۵	۴۶۶۹	۳۰۷/۵۴	۲۸/۹۲	۳۱۵۱۵/۷۵	۰/۷۴۱	۱۴۰۰/۷	۰/۱۴	۶۵۳/۶۶	۸۸۹۴/۰۵	باد متوسط
۸/۵-۱۰/۵	۹/۵	۲۳۵۴	۸۵۷/۳۷	۱۴/۵۸	۲۲۳۶۳	۰/۸۸۶۸	۷۰۶/۲	۹/۷۹	۲۳۰۴۵/۶۶	۱۲۴۳۱/۸۶	باد تند
۱۱-۱۳/۵	۱۲/۲۵	۱۲۲۷	۱۸۳۸/۲۶	۷/۶	۱۵۰۳۰/۷۵	۰/۹۶۲۸	۳۶۸/۱	۳۴/۵۷	۴۲۴۱۷/۳۹	۱۳۹۷۰/۷۷	باد شدید
۱۴-۱۶/۵	۱۵/۲۵	۴۰۸	۳۵۶۶/۵۷	۲/۵۳	۶۳۲۲	۰/۹۸۸۱	۱۲۲/۴	۷۸/۸۵	۳۲۱۷۰/۸	۸۹۷۲/۸۲	تندباد
۱۷-۲۰	۱۸/۵	۱۴۷	۶۳۳۱/۶۲	۰/۹۲	۲۷۱۹/۵	۰/۹۹۷۳	۴۴/۱	۱۴۷/۱۳	۲۱۶۲۸/۱۱	۵۸۲۵/۰۹	
۲۰/۵-۲۳/۵	۲۲	۲۵	۱۰۶۴۸	۰/۱۵	۵۵۰	۰/۹۹۸۸	۷/۵	۲۴۴/۲۹	۶۱۰۷/۲۵	۱۵۹۷/۲	طوفان
۲۴-۲۷/۵	۲۵/۷۵	۱۷	۱۷۰۷۳/۸۵	۰/۱	۴۳۷/۷۵	۰/۹۹۹۸	۵/۱	۳۷۵/۵۸	۶۳۸۴/۸۶	۱۷۰۷/۳۸	
۲۸-۳۱/۵	۲۹/۷۵	۴	۲۶۳۳۰/۶	۰/۰۲	۱۱۹	۱/۰۰۰۰	۱/۲	۵۴۶/۶۲	۲۱۸۶/۴۸	۵۲۶/۶۱	
		N=۱۶۱۴۶		۱۰۰٪	۱۰۲۹۰۹		۴۸۴۳/۸		۲۱۰۰۷۳/۵۶	۵۵۸۹۰/۸۵	

منبع: داده های خام سازمان هواشناسی کشور

میانگین سرعت عددی باد با توجه به مندرجات و محاسبات موجود در جدول شماره (۲) برای ایستگاه اردبیل به

شرح زیر قابل محاسبه است:

$$V^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \bar{V}_i \quad (۱-۳)$$

انحراف معیار سرعت های باد با توجه به آمار طبقه بندی شده از رابطه زیر بدست می آید:

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n F_i \bar{V}_i^2 - (V^-)^2 \right]^{1/2} \quad (۱-۴)$$

چگالی توان باد در منطقه مورد بررسی از رابطه زیر بدست می آید:

$$P = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^n P(V_i) V_i^3 \div 100 \quad (۱-۵)$$

که در آن ρ چگالی هوا در شرایط متعارف است که معمولاً برابر با $۱/۲۲۵$ کیلوگرم در مترمکعب است ولی در ایستگاه اردبیل، این مقدار برابر با $۱/۰۸۳ \text{ Kg/m}^3$ محاسبه شده است. علامت A واحد سطح است که در بررسی های محاسبه چگالی توان باد معمولاً به صورت واحد (۱ m^2) در نظر گرفته می شود. با این توضیحات، چگالی توان باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل $۳۰۲/۶۴$ وات در مترمربع خواهد بود.

لازم به ذکر است که در محاسبات فوق تعداد بادهای آرام (سرعت کمتر از یک نات) در نظر گرفته نشده است. چنانچه مقدار باد آرام نیز در محاسبات مذکور دخالت داده شود، در این صورت، متوسط سرعت باد، انحراف معیار و چگالی توان باد با ارقام محاسبه شده مذکور مغایرت خواهند داشت. نتایج محاسبات پارامترهای مذکور با در نظر گرفتن باد آرام در جدول شماره (۳) آمده است.

جدول ۳- رده بندی سرعت های باد و احتمالات آن در ایستگاه سینوپتیک اردبیل سال های آماری (۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹) با محاسبه باد آرام

V / ms	V_i	\bar{F}_i	V_i^3	$P(V_i)\%$	$F_i V_i$	$P V_i$	Hourly (ساعت در سال)	Hourly تجمعی	$(V_i - \bar{V})^2$	$F_i \cdot (V_i - \bar{V})^2$	$P(V_i) V_i^3$	گروه های باد
-۱/۵	-۰/۷۵	۱۳۱۵۰	-۰/۴۲	۴۵	۹۸۶۲/۵	-۰/۴۵	۳۹۴۵	۳۹۴۵	۹/۶۱	۱۲۶۳۷۱/۵	۱۸/۹	نسیم ملایم و باد آهسته
۲-۳	۲/۵	۳۸۷۰	۱۵/۶۲	۱۳/۲۵	۹۶۷۵	-۰/۵۸۲۵	۱۱۶۱	۵۱۰۶	۱/۸۲	۷۰۴۳/۴	۲۰۶/۹۶	
۳/۵-۵	۴/۲۵	۳۳۴۵	۷۶/۷۶	۱۱/۴۵	۱۴۲۱۶/۲۵	-۰/۶۹۷	۱۰۰۳/۷	۶۱۰۹/۵	-۰/۱۶	۵۳۵/۲	۱۷۸/۹	
۵/۵-۸	۶/۷۵	۴۶۶۹	۳۰۷/۵۴	۱۶	۳۱۵۱۵/۷۵	-۰/۸۵۷	۱۴۰۰/۹	۷۵۱۰/۲	۸/۴۱	۳۹۳۶/۲۹	۴۹۲۰/۶۴	باد متوسط
۸/۵-۱۰/۵	۹/۵	۲۳۵۴	۸۵۷/۳۷	۸/۰۶	۲۲۳۶۳	-۰/۹۳۷	۷۰۶/۳	۸۲۱۶/۴	۳۱/۹۲	۷۵۱۳۹/۶۸	۶۹۱۰/۴	باد تند
۱۱-۱۳/۵	۱۲/۳۵	۱۲۲۷	۱۸۳۸/۲۶	۴/۳	۱۵۰۳۰/۷۵	-۰/۹۷۹	۳۸۸/۳	۸۵۸۴/۵	۷۰/۵۶	۸۶۵۷۷/۱۲	۷۷۲۰/۶۹	باد شدید
۱۴-۱۶/۵	۱۵/۲۵	۴۰۸	۳۵۴۶/۵۷	۱/۴	۶۲۲۲	-۰/۹۹۳	۱۲۲/۵	۸۷۰۶/۹	۱۲۹/۹۶	۵۳۰۲۳/۶۸	۴۹۶۵/۱۹	تندباد
۱۷-۲۰	۱۸/۵	۱۴۷	۶۳۳۱/۶۲	-/۵	۲۷۱۹/۵	-۰/۹۸۶	۴۴/۲	۸۷۵۱	۲۱۴/۶۲	۳۱۵۴۹/۱۴	۳۱۶۵/۸۱	
۲۰/۵-۲۳/۵	۲۲	۲۵	۱۰۶۴۸	-/۰۸	۵۵۰	-۰/۹۹۴	۷/۶	۸۷۵۸/۵	۳۲۹/۴۲	۸۲۳۵/۵	۸۵۱/۸۴	طوفان
۲۴-۲۷/۵	۲۵/۷۵	۱۷	۸۵ ۱۷۰۷۳	-/۰۵	۴۳۷/۵	-۰/۹۹۹	۵/۲	۸۷۶۳/۶	۴۷۹/۶۱	۸۱۵۳/۳۷	۸۵۳/۶۹	
۲۸-۳۱/۵	۲۹/۷۵	۴	۶۱۳۰/۶	-/۰۱	۱۱۹	۱/۰۰۰	۱/۳	۸۷۶۴/۸	۶۷۰/۸۱	۲۸۸۳/۲۴	۲۶۳/۳۰۶	
		N=۲۹۲۱۶			۱۱۲۷۱/۵		۸۷۶۶ ساعت			۴۳۸۵۸/۱۲	۳۰۷۵۶/۳۲۵	

منبع: داده های خام سازمان هواشناسی کشور

مقادیر پارامترهای P, S, \bar{V} با توجه به جدول شماره (۳) و با محاسبه باد آرام به ترتیب $۳/۸۷m/s$ ، $۳/۸۵m/s$ و $۱۶۴/۵۴W/m^2$ می باشد با این توضیح که در پتانسیل سنجی انرژی باد و محاسبه مشخصه های آن، مداخله باد آرام در محاسبات سرعت تحت عنوان «سرعت متوسط جریان هوا» و عدم مداخله آن در محاسبات، به عنوان «سرعت متوسط باد» موسوم است که در این بررسی مورد دوّم حائز اهمیت می باشد.

رقم $۲۹۵/۳۸$ وات در متر مربع به عنوان چگالی توان باد در ارتفاع ده متری از سطح زمین و برای سرعت متوسط باد بدون احتساب باد آرام بدست آمده است. بدیهی است در صورت نصب توربین بادی، ارتفاع پره های توربین و سطح دایره ای که ایجاد می کنند بین ۱۰ تا ۵۰ متر بالاتر از سطح زمین خواهد بود. لذا محاسبه سرعت باد در ارتفاعات بالاتر از سطح بادسنج (تا ۵۰ متری) لازم می باشد. سرعت باد با افزایش ارتفاع زیاد می شود و این ناشی از کاهش اصطکاک زمین و شرایط ترمودینامیکی جو است (کاویانی ۱۳۷۴، ص ۱۳۵).

سرعت باد در ارتفاعات بالاتر، از فرمول تجربی زیر بدست می آید (مرکز تحقیقات نیرو ۱۳۷۲، ص ۱۶۳):

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{H}{H_r} \right)^{0.2} \tag{۱-۶}$$

که در آن V سرعت باد در ارتفاع H (موردنظر) و V_r سرعت باد در ارتفاع H_r (مبنا) می باشد. با توجه به فرمول مذکور می توان دریافت که در ایستگاه اردبیل سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین تا حدود ۸ متر در ثانیه افزایش و نیز قدرت قابل حصول از توربین های بادی حدود ۶۵ درصد افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر برای محاسبه قدرت، توان سوّم سرعت باد محاسبه می شود. لذا افزایش ارتفاع و به تبع آن افزایش سرعت باد باعث افزایش چشمگیر انرژی حاصله از باد خواهد بود.

ضریب تغییرات باد (C.V)

این ضریب که به صورت درصد بیان شده و شدت آشفتگی نیز نام دارد به صورت حاصل تقسیم انحراف معیار بر میانگین تعریف می‌شود.^۱

$$C.V = \frac{S}{V} \times 100 \quad (1-7)$$

ضریب تداوم باد (C.P)

این ضریب که ضریب ثبات باد نیز نامیده می‌شود، در بررسی انرژی باد یک منطقه حائز اهمیت است. این ضریب، مقایسه‌ای نسبی بین میانگین‌های عددی و برداری باد و در نتیجه مقیاسی برای میزان تداوم باد از نظر امتداد یا جهت است (آی. اس. ای. تی ۲۰۰۰، ص ۱۰۲). به منظور محاسبه سرعت متوسط برداری باد، با توجه به این که در هواشناسی، جهت باد از غرب به شرق و از جنوب به شمال مثبت در نظر گرفته می‌شود، چنانچه جهت غرب به شرق، محور (X) و جهت جنوب به شمال، محور (Y) قرار داده شود و تصاویر سرعت متوسط برداری باد روی محور (X) با (\bar{U}_X) و روی محور (y) با (\bar{U}_y) نشان داده شوند، برای محاسبه این مقدار از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{U}_x = \frac{\sum W - \sum E + 0.707(\sum NW + \sum SW) - 0.707(\sum NE + \sum SE)}{n} \quad (1-8)$$

$$\bar{U}_y = \frac{\sum S - \sum N + 0.707(\sum SW + \sum SE) - 0.707(\sum NE + \sum NW)}{n}$$

که در آن (n) تعداد دیدبانی‌های باد است که در محاسبه بکار رفته، N، NE، E، SE، S، SW، W و NW سرعت‌های منفرد باد از جهات مختلف و عدد $0.707 \cos$ (کسینوس) زوایایی است که بادهای جهات SE، SW، NW و NE با محورهای x و y می‌سازند. تعداد دیدبانی‌ها و سرعت‌های منفرد باد از اطلاعات مندرج در جدول شماره ۱ (فراوانی‌ها و نماینده طبقات) قابل استخراج است. اندازه باد منتج توسط رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$R = \sqrt{\bar{U}_x^2 + \bar{U}_y^2} \quad (1-9)$$

زاویه جهت وزش باد منتج در ایستگاه مورد مطالعه دارای \tan (تانژانتی) برابر با مقدار زیر است:

$$\tan \beta = \frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_y} \quad (1-10)$$

ضریب ثبات باد با توجه به مقادیر \bar{U}_y ، \bar{U}_x ، R و \bar{V} و طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C.P = \frac{R}{\bar{V}} \quad (1-11)$$

قدرت نظری و عملی

قدرت نظری توربین بادی در صورت محاسبه دقیق سرعت متوسط باد و دانسیته هوا در محل خاص قابل استخراج است. قدرت نظری توربین بادی توسط رابطه زیر بدست می‌آید^۱:

۱- روابط شماره ۱-۷ الی ۱-۱۰ از منبع شماره ۶، صفحات ۱۸۲ الی ۱۸۴ اقتباس شده است.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1-12)$$

که در آن P قدرت نظری توربین بر حسب (W)، ρ دانسیته هوا بر حسب (Kg/m^3)، A سطح بر حسب (m^2)، و V متوسط سرعت باد بر حسب (m/s) می باشد. قدرت عملی توربین بادی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P = \frac{1}{2} e \cdot K \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1-13)$$

که در آن:

e = بازده واقعی پره های توربین بادی

K = ضریب مربوط به واحدهای انتخاب شده است. چنانچه در محاسبه قدرت عملی توربین های بادی، سرعت و

سطح جارو شده توسط پره های توربین بادی بر حسب مترمربع بیان شود، مقدار K معادل $\frac{1}{2} \rho$ در نظر گرفته می شود (کاویانی ۱۳۷۴، ص ۱۴۰).

بازده پره های توربین بادی عبارت است از نسبت انرژی جنبشی که پره ها از باد می گیرند به انرژی جنبشی کل باد که از مقابل پره ها عبور می کند. پره های توربین بادی کلیه انرژی جنبشی باد را نمی گیرند؛ زیرا در این صورت باد پس از برخورد با پره ها سرعتش به صفر رسیده و متوقف می شود. بنابر تئوری بتز^۲ و طبق نظر مارکس^۳ (به نقل از ثقفی، ۱۳۷۲)، به طور نظری حداکثر قدرت باد در یک توربین بادی که ممکن است تبدیل به انرژی مکانیکی شود $59/3$ درصد انرژی جنبشی باد است که تحت عنوان «ضریب توان ماکزیمم» مطرح است. البته به سبب پارامترهایی چون درگ^۴ پره ها، راندمان آئرو دینامیکی روتور، تلفات برقی و تلفات ناشی از بخش های مکانیکی هر سیستم عملی، این ضریب کمتر از مقدار مذکور است. معمولاً بازده واقعی توربین های بادی را معادل ۳۰ درصد بحساب می آورند (کاویانی ۱۳۷۴، ص ۱۳۹).

دانسیته هوا بسته به ارتفاع و شرایط آتمسفری مانند فشار و درجه حرارت متغیر می باشد. قدرت خروجی توربین بادی متناسب با جرم حجمی هوای عبوری بوده و متقابلاً جرم هوا متناسب با فشار آن است. با افزایش ارتفاع از سطح آزاد دریا، فشار هوا کاهش می یابد. با کاهش فشار با ارتفاع از سطح دریا، جرم حجمی هوا کاهش یافته و در نتیجه در سرعت های مشابه در ارتفاع پایین و بالا، قدرت خروجی در مناطق مرتفع تر کمتر خواهد بود. دانسیته هوا در شرایط متعارف جوئی (۱۵/۵ درجه سانتی گراد و ارتفاع سطح دریا) برابر با $1/225$ کیلوگرم در مترمکعب است (ثقفی ۱۳۷۲، ص ۹۰). نسبت دانسیته هوا در ارتفاعات مختلف به دانسیته هوا در ارتفاع سطح دریا تحت عنوان «نسبت دانسیته در ارتفاع» (DRA)^۵ موسوم است. دانسیته هوا با درجات مختلف دما نیز تغییر می یابد. نسبت دانسیته هوا در

۱- روابط شماره ۱۲-۱ الی ۱۴-۱ از منبع شماره (۱)، صفحات ۸۹ تا ۹۲ اقتباس شده است.

2 - Betz law

3 - Marks

4 - Drag

5 - Density Ratio At Altitude

درجات مختلف حرارت به دانسیته هوا در دمای ۶۰ درجه فارنهایت (۱۵/۵ درجه سانتی گراد) را «نسبت دانسیته در درجه حرارت» (DRT)^۱ می نامند.

مقدار DRA در دمای ۶۰ درجه فارنهایت در ارتفاعات صفر، ۲۵۰۰، ۵۰۰۰، ۷۵۰۰ و ۱۰,۰۰۰ فوتی برابر با ۰/۹۱۲، ۰/۸۳۲، ۰/۷۵۶ و ۰/۶۸۷ است. مقادیر DRT نیز در دماهای صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه فارنهایت برابر ۱/۳، ۱/۰۸۳، ۱/۰۴، ۱، ۰/۹۶۳، ۰/۹۲۹ و ۰/۸۹۷ می باشد (همان، ص ۱۶۵). مقدار DRA با افزایش ارتفاع کاهش می یابد. مقدار DRT نیز در کمتر از دمای ۶۰ درجه فارنهایت افزایش و بالاتر از آن روند کاهشی دارد. جهت تعیین دانسیته هوا در یک ایستگاه خاص که دارای ارتفاع معین و درجه حرارت مشخص است، لازم است DRA و DRT ایستگاه موردنظر را با دانسیته متعارف هوا در هم ضرب کرد تا دانسیته موردنظر بدست آید. مقدار DRA، DRT، ρ و K در ایستگاه سینوپتیک اردبیل به ترتیب ۰/۸۴۹، ۱/۰۴۰، ۱/۰۸۳ و ۰/۵۴۱۵ است. بنابراین، قدرت عملی توربین بادی می تواند به صورت زیر و به شکل دقیق تری محاسبه گردد.

$$P = K.e.DAR.DRT.A.V^3 \quad (1-14)$$

با در نظر گرفتن $e = 30\%$ و با توجه به رابطه فوق، قدرت بدست آمده از توربین های بادی با قطر پره های مختلف برای ایستگاه اردبیل قابل محاسبه خواهد بود. چنانچه قطر توربین مورد نظر در این ایستگاه ۴ متر باشد، با توجه به سرعت متوسط باد، مقادیر DRA، DRT و ضریب K، قدرت حاصله از این توربین برابر با ۴۶۵/۶ وات خواهد بود:

$$P = 0.5285 \times 0.30 \times 0.849 \times 1.040 \times 12.56 \times 258/47 = 454/47 \text{ W}$$

در حالی که قدرت نظری توربین طبق رابطه (۱-۱۲) برای قطر توربین ۴ متر برابر با ۱۷۵۷/۹ وات است.

سرعت راه انداز، توقف و نامی باد

با توجه به رابطه قدرت در توربین های بادی، قدرت خروجی با توان سوّم سرعت و با سطح روتور متناسب است و لذا تغییرات کوچک در سرعت باد باعث تغییرات بزرگی در قدرت خروجی می شود که این تغییرات قدرت با توجه به تغییرات ناگهانی سرعت باد، برای شبکه سراسری مناسب نمی باشد. به علت افت شدید راندمان و قدرت در سرعت های پایین باد توسط توربین های بادی، این توربین ها جهت کارکرد از یک حداقل سرعت به بعد طراحی می گردند. این سرعت حداقل، «سرعت راه انداز»^۲ نام دارد. جهت محافظت توربین از خرابی در مقابل بادهای شدید، توربین ها طوری طراحی می شوند که در سرعتی زیاد به نام «سرعت توقف»^۳ از عملکرد باز بایستند. جهت تعیین سرعت راه انداز و سرعت توقف در توربین های بادی، ویژگی های بیش از ۵۰ نوع محصول ۷ کارخانه عظیم سازنده توربین های بادی جهان نظیر Vergent, Bornay, Bonus, Nordex, Enercon, Vestas و غیره از سایت های اینترنتی مربوطه اخذ، بررسی و محدوده های سرعت راه انداز و توقف آنها که عموماً بین ۳/۵ تا ۲۵ متر در ثانیه بود، مشخص گردید. مهم ترین

1 - Density Ratio At Temperature

2 - Cut - in - speed

3 - Cut - out - speed

عامل در طراحی توربین های بادی، «سرعت نامی^۱» باد است؛ یعنی کمترین سرعتی که در آن سرعت، حداکثر بار خروجی تولید می شود. سرعت نامی باد از رابطه زیر محاسبه می شود (جمیل ۱۹۹۴، ص ۲۳۶):

$$V_{mec} = C \left(1 + \frac{2}{K}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (1-15)$$

در این رابطه، C و K پارامترهای مقیاس و شکل در تابع ویبول^۲ هستند.

این مقادیر با استفاده از رابطه خطی بین X و Y (Y=Ax+B) که در آن X=Ln(V) و Y=Ln{-Ln[1-P(v)]} است، بدست می آیند به نحوی که:

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2} = K \quad (1-16)$$

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i - \frac{A}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1-17)$$

$$C = \exp\left(\frac{-B}{A}\right) \quad (1-18)$$

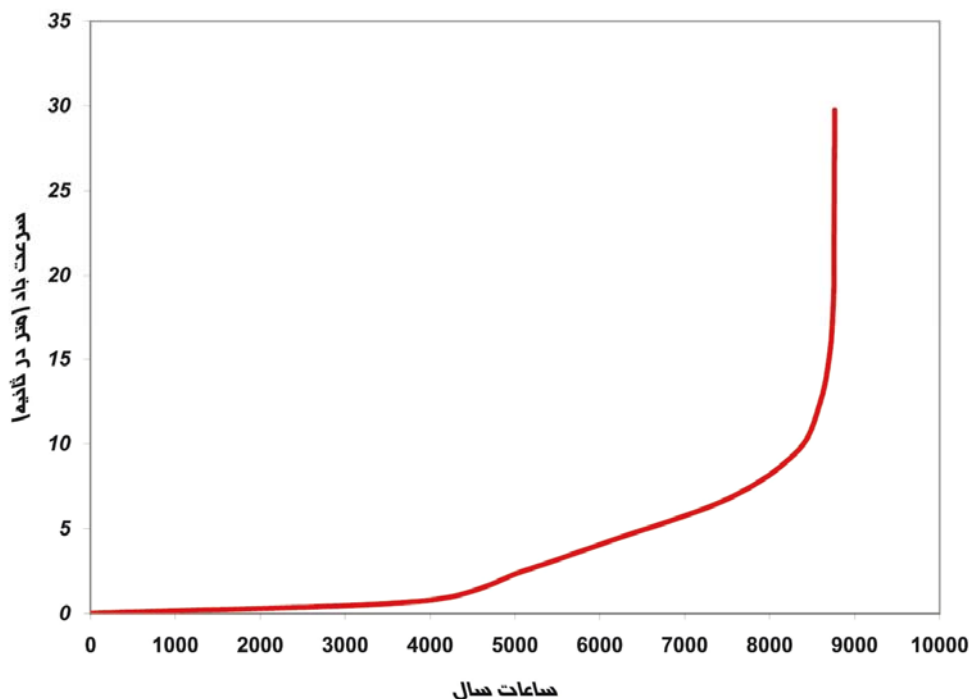
پارامترهای C و K در ایستگاه اردبیل به ترتیب برابر با ۷/۹ و ۱/۹۶ است. با توجه به مقادیر پارامترهای C و K، سرعت نامی باد در ایستگاه مورد مطالعه ۱۱/۳ متر در ثانیه است. این رقم بدین معناست که چنانچه در این ایستگاه استفاده از انرژی بادی مدنظر باشد، بهتر است به سازندگان توربین های بادی سفارش شود که حداکثر بار خروجی توربین بادی در این سرعت بدست آید؛ زیرا اغلب سرعت های بالا در این ایستگاه، در این محدوده سرعت مشاهده می گردند.

منحنی سرعت - تداوم

این حقیقت که قدرت با توان سوم سرعت متناسب است، باد را به عنوان اولین عامل مورد نظر جهت طراحی توربین بادی معرفی می کند. از اینرو، سرعت متوسط و توزیع سالیانه باد و یا تغییرات و تداوم وزش آن حائز اهمیت است. جهت نیل به این مقصود، ترسیم منحنی سرعت - تداوم باد ضروری است. این منحنی نشان دهنده محدوده سرعت باد در محور قائم و تعداد ساعاتی که باد با سرعت مساوی یا بیشتر از مقدار مشخصی که از روی محور قائم وزیده است در محور افقی می باشد. نمودار شماره (۲) منحنی سرعت - تداوم باد در ایستگاه اردبیل را نشان می دهد.

جهت رسم این منحنی از ستون hour/y تجمعی جدول شماره (۳) و ستون V_i همان جدول استفاده شده است. با توجه به این منحنی می توان دریافت که عملاً ۵,۱۰۶ ساعت از ساعات سال توربین های بادی مفروض در این ایستگاه یا در حال سکون بوده و یا در صورت چرخش و تولید انرژی نخواهد کرد.

نمودار ۲- منحنی سرعت - تداوم باد در ایستگاه اردبیل



یافته‌ها، نتیجه‌گیری و بحث

طبقات سرعت، جهات، فراوانی‌ها و درصد وزش بادهای ایستگاه مورد مطالعه در دوره آماری ده ساله استخراج و در جدول شماره (۱) ارائه شده است. باد شرقی بیشترین و باد شمالی کمترین درصد وزش را در طول سال داشته است. باد آرام نیز درصد قابل توجهی از آمار مورد بررسی را به خود اختصاص داده است. میانگین سرعت جریان هوا و میانگین سرعت باد در این ایستگاه به ترتیب $3/85$ و $6/37$ متر در ثانیه بدست آمده است. چگالی توان باد که در استفاده از انرژی باد و برآورد پتانسیل آن در مناطق جغرافیایی از اهمیت خاصی برخوردار است، برابر با $295/38$ وات در یک متر مربع برآورد شده است. سرعت مورد انتظار باد در ارتفاع 50 متری از سطح زمین حدود 8 متر در ثانیه بدست آمده و با توجه به این نکته که قدرت خروجی بدست آمده از یک توربین بادی با توان سوّم سرعت متناسب است، افزایش قدرت در این ایستگاه چشمگیر است. ضریب تغییرات یا شدت آشفتگی باد $56/5$ درصد است. با توجه به این که حدود $44/74$ درصد از برداشت های باد، رقم صفر و بدون جهت (آرام) بوده است؛ لذا ضریب تغییرات باد نیز بالا خواهد بود. ضریب تداوم یا ضریب ثبات باد که در امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد یک منطقه مهم است، برای ایستگاه مورد مطالعه $0/46$ درصد می‌باشد. مقادیر \bar{U}_x ، \bar{U}_y و R و $\tan \beta$ برای ایستگاه مورد مطالعه به ترتیب $1/92$ ، $2/247$ ، $2/955$ و $0/85$ است.

ضرایب تغییرات و ثبات باد هر دو تغییرات سرعت باد را مشخص می‌کنند؛ ولی باید توجه داشت که ضریب تغییرات فقط معیاری از تغییرات سرعت عددی باد است، ولی ضریب ثبات مقایسه‌ای نسبی بین میانگین های عددی و برداری باد می‌باشد (آی.اس.ای. تی. ۲۰۰۰، ص ۱۰۲). ضریب ثبات باد غالباً به صورت درصد بیان می‌شود؛ ولی در اینجا برای این که از ضریب تغییرات متمایز باشد، به شکل نسبی یا اعشاری که مفهوم کسری از واحد را دارد، ارائه شده است.

این زمانی است که مقدار متوسط عددی و برداری سرعت باد برابر باشد و به عبارت دیگر باد همیشه از یک جهت بوزد. چنانچه ضریب ثبات باد صفر باشد، در واقع می‌بایستی مقدار سرعت منتج (R) صفر شود و این بیان کننده حالتی است که باد از جهات مختلف بوزد و کاملاً در تمام جهات توزیع شده باشد. هر گاه سرعت متوسط باد در یک منطقه در حد نسبتاً مطلوبی بوده و ضریب تغییرات باد کمترین مقدار را داشته باشد و نیز ضریب ثبات نسبتاً بزرگ باشد، جریان هوا در منطقه مذکور یکنواخت بوده و می‌توان از انرژی باد این منطقه به بهترین نحو استفاده نمود؛ زیرا شرایط فوق بیانگر این مطلب است که تغییرات چندانی در سرعت باد وجود ندارد. در ایستگاه سینوپتیک اردبیل سرعت متوسط باد در حد مطلوبی قرار دارد، ولی ضریب تغییرات باد، نسبتاً زیاد و ضریب ثبات آن متوسط است؛ به طوری که هر دو ضریب تقریباً حدود نیمی از واحد را دارا می‌باشند. امروزه با استفاده از توربین هایی که خود را با جهت باد تنظیم می‌نمایند، می‌توان از انرژی باد در کلیه جهات استفاده نمود؛ ولی ثابت بودن جهت باد کمک بزرگی جهت آرایش توربین های بادی در یک مجتمع منسوب به مزرعه بادی محسوب می‌گردد. قدرت نظری و عملی توربین بادی مفروض با قطر پره ۴ متر در اردبیل به ترتیب ۱۷۵۷/۹ و ۴۶۵/۶ وات محاسبه شده است.

تعداد ساعات بین سرعت راه‌انداز و سرعت توقف توربین های بادی در ایستگاه مورد مطالعه (تعداد ساعاتی که توربین در سال می‌تواند کار کرده و تولید انرژی نماید) ۳,۶۵۲/۵ ساعت است (۴۱/۷ درصد). تعداد ساعاتی که وزش باد سبب توقف دستگاه خواهد شد، ناچیز بوده و حدود ۶/۳ ساعت است. با توجه به نتایج بدست آمده برای ایستگاه مورد بررسی و برآورد ویندهایم^۱ که عملکرد اقتصادی توربین های بادی را مستلزم کارکرد حداقل ۴۰۰۰ ساعت در سال می‌داند (کاویانی ۱۳۷۴، ص ۱۳۶)، می‌توان با نصب توربین بادی مناسب از انرژی باد در این ایستگاه استفاده نمود. ناگفته نماند جهت تکمیل مطالعه و افزایش ضریب صحت اطلاعات و تحلیل ها، ترسیم و تحلیل منحنی های قدرت - تداوم، سرعت - تناوب، تداوم - سکون، تداوم - سکون کل و توابع پیوسته و گسسته توزیع احتمال باد و غیره لازم و ضروری است؛ ولی در این مقاله به علت جلوگیری از اطاله مطلب و محدودیت تعداد صفحات، این بحث به آینده موکول می‌شود. ضمن این که چنانچه در تعیین پتانسیل انرژی باد یک مکان از اطلاعات سمت و سرعت باد با فواصل ۱۰ و حتی ۵ دقیقه‌ای استفاده شود، نتایج مطالعه بسیار دقیق خواهد بود و لذا پیشنهاد می‌شود که با تخصیص اعتبارات لازم از سوی دولت محترم جمهوری اسلامی ایران، سنسورهای لازم و به تعداد زیاد در کلیه نقاط استان نصب و اطلاعات لحظه‌ای سرعتهای باد ثبت گردد و نهایتاً با تهیه اطلس انرژی باد استان و محاسبات دقیق تر انرژی، از این نیروی لایزال الهی استفاده بهینه بعمل آید.

سپاسگزاری

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر هوشنگ قائمی مشاور علمی سازمان هواشناسی کشور که علیرغم مشغله های کاری اینجانب را راهنمایی نمودند، کمال تشکر و امتنان را دارد.

^۱ - Windheim

منابع و مأخذ:

- ۱- ثقفی، محمود (۱۳۷۲)، انرژی بادی و کاربرد آن در کشاورزی، دانشگاه تهران.
 - ۲- جمیل مجید (تابستان ۱۳۷۵)، مطالعه چگونگی توزیع آماری سرعت‌های باد ناحیه سایت خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی، مجله نیوار، شماره ۳۰، (صفحات ۴۱ تا ۵۰).
 - ۳- کاویانی، محمدرضا (بهار ۱۳۷۴)، توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۳۶، (صفحات ۱۲۷ تا ۱۴۴).
 - ۴- سازمان هواشناسی کشور (۱۳۸۲)، آمار خام داده‌های سه‌ساعته باد ایستگاه سینوپتیک اردبیل، تهران.
 - ۵- مرکز تحقیقات نیرو (آبان ۱۳۷۲)، بررسی و تحقیق در نیروگاه‌های بادی، گزارش اول - بخش اول، تهران.
 - ۶- مرکز مطالعات انرژی وزارت نیرو (بهمن ۱۳۷۵)، تخمین پتانسیل انرژی باد در جمهوری اسلامی ایران، گزارش نهایی، جلد اول، تهران.
- 8- ISET. 2000. Wind Energy Report Germany 1999-2000 Annual Evaluation of WMEP, Kassel.
 - 9- Jamil, Majid. 1994. Wind power statistics and Evaluation of wind Energy Density, Wind Engineering. Vol 18. No. 5, pp. 227- 240.
 - 10- Landberg. L . 1999. Short - Term Prediction of the power production from wind farms, J.wind Energy .Ind.Aerodyn.80.pp. 207-220.
 - 11- United Nation. 1996. Committee on new and Renewable Sources of Energy and on Energy for Development Report on the second session.
 - 12- Wilsink. MI. 1978. Note on the use of weibull statistics to characterize wind - speed data. J. App .Meteor, 17. pp. 556-559