



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر  
مجله علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی

سال نهم، شماره‌ی ۲۸  
زمستان ۱۳۸۸، صفحات ۵۷-۷۴

حبيب عبدلی<sup>۱</sup>  
بهروز ساری صراف<sup>۲</sup>  
عباس حسینی شمعی<sup>۳</sup>

## امکان سنجی پتانسیل انرژی باد و کاربرد آن در طرح‌های توسعه‌ی صنعتی «مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی»

تاریخ دریافت مقاله: ۸۷/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۸/۰۵/۰۷

### چکیده

چرخه کنونی انرژی، به واسطه گسترش روز افزون صنعت، نیاز به استفاده از انرژی را به طور قابل توجهی افزایش داده است. برآوردها نشان می دهد که تقریباً یک چهارم از خشکی‌های جهان در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در معرض وزش بادهایی با سرعت بیش از ۵ متر بر ثانیه قرار دارند که می تواند در دستیابی به منابع انرژی جایگزین (انرژی‌های نو) موثر باشد.

- 
- ۱- کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر. E-mail: habib\_abdoli@yahoo.ca  
۲- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر. E-mail: sarisarraf@tabrizu.ac.ir  
۳- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر. E-mail: hosseini845@yahoo.com

مقاله حاضر مکان‌های مناسب را جهت نصب توربین‌های بادی در استان آذربایجان شرقی از طریق تعیین تغییرات چگالی انرژی باد نسبت به ارتفاع و درجه حرارت، مورد بررسی قرار داده و همچنین با نمایش چگونگی توزیع سرعت باد در ۷ ایستگاه هواشناسی استان از طریق نمودارهای گلباد، نقاط مناسب را برای استفاده از انرژی باد تعیین نموده است. بر اساس نتایج به دست آمده، ایستگاه‌های سهند و جلفا دارای فراوانی قابل ملاحظه‌ای در بادهای با سرعت بالای ۵ متر بر ثانیه بوده و از نواحی پر باد و مناسب برای ایجاد پارک‌های بادی محسوب می‌شوند.

**کلید واژه‌ها:** استان آذربایجان شرقی، چگالی انرژی باد، توربین بادی، فراوانی باد، گلباد.

#### مقدمه

امروزه با گسترش روز افزون صنعت، نیاز به استفاده از انرژی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به طور کلی استفاده از انرژی در تمام شئون زندگی انسان‌ها وارد شده و با رشد روز افزون جمعیت و پیشرفت صنعت و زندگی ماشینی، نیاز فزاینده‌ای به منابع مختلف انرژی احساس می‌شود. از طرفی، ذخایر سوخت‌های فسیلی در روی کره زمین، رو به پایان است. سوخت‌های فسیلی که بیش از هشتاد درصد انرژی جهان را تامین می‌کنند، طی سیصد سال اخیر به طور روز افزون مورد بهره برداری قرار گرفته‌اند. علاوه بر مشکل کاهش ذخایر، ملاحظات زیست محیطی، گرم شدن کره زمین و ذوب یخچال‌ها، نازک شدن لایه ازن، بالا آمدن سطح آب دریاها و آلودگی هوا و غیره، انسان را برآن داشته که در صدد دستیابی به منابع دیگر انرژی باشد (Williams, 1974). آلودگی‌های زیست محیطی و مشکلات اکولوژیکی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی بویژه نفت و مشتقات آن، نگرانی‌ها را تشدید کرده است. یکی از راه‌های چاره اندیشی شده در چند دهه‌ی اخیر، استفاده روز افزون از انرژی‌های هسته‌ای برای تولید انرژی است. اما انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل و حوادث متعاقب آن و همچنین دفن زباله‌های هسته‌ای، موجب اعتراض طرفداران محیط زیست شده است. یک روش عملی برای فایق آمدن بر چنین مشکلاتی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر از جمله انرژی باد است.

در سال ۱۹۹۰، ظرفیت توربین‌های بادی مولد برق متصل به شبکه در جهان در حدود ۲۰۰۰ مگاوات با تولید سالانه ۳۲۰۰ کیگاوات در ساعت رسید که تماما مربوط به آمریکا و دانمارک بوده است. در این زمان کشورهای هلند، آلمان، انگلستان، ایتالیا و هندوستان برنامه ملی خود را برای استفاده از انرژی بادی آغاز کردند. به تدریج با پیشرفت فناوری، هزینه‌ی تولید انرژی با توربین‌های بادی کاهش یافته است، با این همه استفاده همه جانبه از سیستم‌های مولد برق بادی هنوز آغاز نشده است.

تاکنون پژوهش‌های زیادی در رابطه با امکان استفاده از پتانسیل انرژی باد برای مناطق مختلف جغرافیایی با استفاده از آمار اطلاعات باد در ایستگاه‌های هواشناسی در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین انجام گرفته و به نتایج ارزشمندی دست یافته‌اند که از جمله آنها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

ییلماز و چلیک<sup>۱</sup> (۲۰۰۸)، در منطقه گلیبولوی ترکیه با استفاده از داده‌های سرعت باد، تابع چگالی احتمال باد را به صورت مقایسه ۱۰ تابع تعیین نمودند. برای این کار با انجام ۳ آزمون نیکویی برازش و روش گرافیک، مناسب‌ترین تابع را به دست آوردند.

سیدکی اویار و مولی<sup>۲</sup> (۱۹۹۸)، ویژگی‌های سرعت باد را با استفاده از ۷ ایستگاه سینوپتیک کشور ترکیه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین مورد بررسی قرار داده و سرعت متوسط ایستگاه‌های مورد مطالعه را تعیین و توان انرژی باد مناطق مورد مطالعه را برآورد نمودند.

مانوئل و نلسون<sup>۳</sup> (۲۰۰۲)، روند روزانه، ماهانه و سالانه سرعت‌های باد یک ناحیه را برای کسب انرژی مطالعه کرده و بادهای با سرعت ۴ الی ۲۵ متر در ثانیه را جهت کسب انرژی مناسب دانسته‌اند. ایشان در توان سنجی چگالی انرژی از توابع توزیع ویبول و رایله استفاده

1- Yilmaz , Celik

2- Sidki Uyar and Molly

3- Manuel , L

نموده و ضرایب X و Y تابع ویبول را با روش حداقل مربعات و معادلات دو مجهولی به دست آورده‌اند.

جمیل (۱۳۸۰)، داده‌های سمت و سرعت باد یک ساله ناحیه آزمایشی پژوهشگاه مواد و انرژی در ناحیه مشکین دشت کرج را با استفاده از بادسنج نوع معمولی (STAP-Italy) اندازه‌گیری نموده و چگالی انرژی بادی این سایت را محاسبه نموده است. ایشان تابع توزیع رایله و ویبول را به عنوان توابعی مناسب جهت برازش داده‌های باد دانسته و در مقاله خود، مقادیر پارامترهای تابع ویبول (K و C) را با روش حداقل مربعات<sup>۱</sup> در توزیع آماری تشریح و اثبات نموده و با محاسبات انجام یافته به این نتیجه رسیده است که ناحیه مورد نظر متوسط سرعت باد حدود ۱/۱ متر در ثانیه و چگالی توان باد حدود ۴۸ وات در متر مربع، مکان مناسبی جهت نصب نیروگاه بادی نیست.

#### مواد و روش‌ها

در محاسبات مربوط به انرژی باد بهتر آن است که داده‌ها پیوسته باشند. زیرا هر چه فاصله زمانی بین قرائت داده‌ها نزدیکتر باشد محاسبات از دقت بیشتری برخوردار خواهند بود. طبق تحقیقات انجام شده (Corotis, ۱۹۹۷) اطلاعات آماری یک سال برای مشخص نمودن سرعت متوسط درازمدت باد با درجه اطمینان ۹۰ درصد و با ۱۰ درصد صحت در ارقام آرایه شده کفایت می‌کند. برای بالا بردن درجه اطمینان و هماهنگی بین ایستگاه‌ها از آمار ۱۲ ساله باد (۱۹۹۶-۲۰۰۷) با فاصله زمانی سه ساعته برحسب ساعت گرینویچ از طریق میانگین‌های برداری استفاده شده است.

از آنجا که باد عاملی است که دارای دو مولفه سرعت و جهت است. لذا تنها با متوسط‌گیری مقدار عددی باد نمی‌توان تصویر واضحی از موقعیت آن نشان داد، بدین منظور باید سرعت متوسط برداری آن را تعیین نمود. از آنجا که در هواشناسی، جهت باد غربی و جنوبی مثبت در

1- Least Squares

نظر گرفته می شود، محور مختصات را طوری در نظر می گیریم که جهت غرب به شرق روی محور X ها و جهت جنوب به شمال بر روی محور Y ها قرار گیرد، در این صورت  $(\bar{u}_x)$  و  $(\bar{u}_y)$  مولفه‌های برداری سرعت باد- طبق روابط زیر محاسبه می گردد (مرکز مطالعات انرژی وزارت نیرو، ۱۳۷۵).

$$\bar{u}_x = \frac{\sum W - \sum E + 0/707 (\sum NW + \sum SW) - 0/707 (\sum NE + \sum SE)}{N} \quad (1)$$

$$\bar{u}_y = \frac{\sum S - \sum N + 0/707 (\sum SW + \sum SE) - 0/707 (\sum NE + \sum NW)}{N} \quad (2)$$

در فرمول‌های بالا، (N) تعداد دیده‌بانی‌های باد، NW، W، SW، S، SE، E، NE، N، به ترتیب سرعت‌های منفرد باد از جهات مختلف بوده و عدد 0/707 کسینوس زوایایی است که بادهای NE، NW، SW، SE با محورهای X و Y می سازد. باید توجه نمود در صورتی که باد همیشه از یک جهت بوزد  $\bar{u}_x$  یا  $\bar{u}_y$  مقدار بزرگی خواهند داشت و از طرف دیگر، اگر باد در جهات مختلف بوزد،  $\bar{u}_x$  و  $\bar{u}_y$  کاهش یافته و ممکن است صفر شوند. با توجه به اینکه فرمول‌های میانگین‌های سرعت برداری  $\bar{u}_x$  و  $\bar{u}_y$  (فرمول‌های شماره‌های (۱) و (۲) برای گلبادهای ۸ جهتی است لازم است جهت کاهش هرگونه خطای احتمالی میزان  $(\bar{u}_x)$  و  $(\bar{u}_y)$  را از فرمول‌های (۳) و (۴) برای گلبادهای ۱۶ جهتی استفاده کرد.

(۳)

$$\bar{u}_x = \left[ \sum W - \sum E + \cos 22.5 (\sum WNW + \sum WSW - \sum ENE - \sum ESE) + \cos 45 (\sum NW + \sum SW - \sum NE - \sum SE) + \cos 67.5 (\sum NNW + \sum SSW - \sum NNE - \sum SSE) \right] / N$$

(۴)

$$\bar{u}_y = \left[ \sum S - \sum N + \cos 22.5 (\sum SSW + \sum SSE - \sum NNW - \sum NNE) + \cos 45 (\sum SW + \sum SE - \sum NW - \sum NE) + \cos 67.5 (\sum WSW + \sum ESE - \sum WNW - \sum ENE) \right] / N$$

اندازه باد منتج توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$R = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$$

زاویه جهت وزش باد منتج دارای تانژانتی برابر با مقدار زیر است.

$$\tan \beta = \frac{u_x}{u_y}$$

ضریب ثبات باد از طریق زیر محاسبه می‌شود.

$$c.p = \frac{R}{\bar{u}}$$

که در آن  $R$  متوسط سرعت برداری باد و  $\bar{u}$  متوسط سرعت عددی باد است. ضریب ثبات، مقایسه‌ای نسبی بین میانگین‌های عددی و برداری و در نتیجه مقیاسی برای میزان تداوم باد از نظر امتداد یا جهت است. ضریب ثبات غالباً به صورت درصد بیان شده و مقدار حداکثر آن برابر واحد است. این زمانی است که همیشه از یک سمت بوزد و مقدار متوسط عددی و برداری سرعت باد برابر باشند.

از بین ایستگاه‌های موجود منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز، سهند، مراغه، میانه، سراب، اهر و جلفا با دوره آماری بلند مدت ۱۲ ساله و دارای اطلاعات پیوسته آماری انتخاب شده‌اند.

#### یافته‌های تحقیق

##### بررسی‌های آماری

معیارهای پراکندگی و تمایل به مرکز برای سنجش نحوه‌ی توزیع داده‌ها به کار برده شده و در جدول شماره ۱ ارایه شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های آماری عنصر باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه (۲۰۰۷-۱۹۹۶)

شاخص ایستگاه	میانگین	میانه	مد	انحراف معیار	واریانس	ضریب چولگی	ضریب کشیدگی	دامنه	حداقل	حداکثر
تبریز	۴/۱۴	۳	۲	۲/۲۱	۴/۹	۱/۵	۳/۲۱	۲۳	۱	۲۴
سهند	۶/۲۸	۵	۲	۳/۷۷	۱۴/۱۹	۱/۲۳	۱/۵۸	۳۵	۱	۳۶
مراغه	۴/۵۸	۴	۲	۲/۳۶	۵/۵۹	۱/۳۰	۳/۹۵	۲۹	۱	۳۰
میانه	۴/۰۱	۳	۲	۲/۲۵	۵/۲۵	۱/۲۵	۲/۱۶	۱۹	۱	۲۰
سراب	۴/۷۳	۴	۲	۲/۵۵	۶/۵۳	۱/۱۱	۲/۶۷	۳۲	۱	۳۳
اهر	۴/۷۵	۵	۲	۲/۳۸	۵/۶۸	۱/۰۴	۱/۹۵	۲۱	۱	۲۲
جلفا	۵/۲۸	۴	۴	۲/۹۲	۸/۵	۰/۹۸	۰/۷۵	۱۹	۱	۲۰

با توجه به جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود که بالاترین مقدار میانگین سرعت باد ۶/۲۸ متر در ثانیه متعلق به ایستگاه سهند و ایستگاه جلفا با ۵/۲۸ متر در ثانیه در مرتبه دوم قرار دارد. میزان مد در ایستگاه جلفا با سرعت ۴ متر در ثانیه بیشتر از سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. میزان انحراف معیار در ایستگاه سهند بالاتر از سایر ایستگاه‌هاست. حداکثر دامنه تغییرات سرعت باد در ایستگاه سهند و حداقل آن در ایستگاه‌های جلفا و میانه است. ضریب چولگی در کلیه ایستگاه‌های مورد مطالعه، مثبت بوده که بیانگر آن است که سرعت‌های زیاد باد، کمتر اتفاق افتاده است. ضریب کشیدگی در کلیه ایستگاه‌های مثبت بوده به طوری که حداکثر آن ۳/۹۵ در ایستگاه مراغه و حداقل آن ۰/۷۵ در ایستگاه جلفا می‌باشد.

#### ضریب تداوم باد

هرگاه سرعت متوسط باد در یک منطقه در حد نسبتاً مطلوبی بوده و ضریب تغییرات باد کمترین مقدار ضریب ثبات، نسبتاً بزرگ باشد، جریان هوا در منطقه مذکور یکنواخت بوده و می‌توان از انرژی باد در چنین منطقه‌ای به بهترین نحو استفاده نمود. زیرا شرایط فوق بیانگر این مطلب است که تغییرات چندان در سرعت باد وجود ندارد. اگر چه امروزه با استفاده از توربین‌های بادی 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 دادن توربین‌های بادی در یک مجتمع محسوب می‌گردد. ضریب تغییرات، مولفه‌های برداری سرعت، متوسط سرعت برداری باد، اندازه باد منتج، زاویه جهت وزش باد منتج و ضریب تداوم باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول شماره (۲) آورده شده است.

با توجه به جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود که اکثر ایستگاه‌ها دارای بیشترین درصد بادی یعنی بیش از ۵۰ درصد می‌باشند که در بین آنها ایستگاه‌های سهند و تبریز به ترتیب با ۸۵/۶ و ۸۴/۲ درصد بیش از سایر ایستگاه‌ها وزش باد اتفاق افتاده است.

درصد تغییرات باد در ایستگاه اهر کمتر از سایر ایستگاه‌ها بوده و ضریب تداوم آن بیشتر از سایر ایستگاه‌های استان می‌باشد.

ایستگاه هواشناسی میانه با ۰/۱۱ کمترین ضریب تداوم باد را بین ایستگاه‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داده است.

جدول ۲: برخی مشخصه‌های باد ایستگاه‌های مورد مطالعه (۲۰۰۷-۱۹۹۶)

پارامتر ایستگاه	درصد هوای آرام	درصد هوای بادی	متوسط سرعت باد	C.V درصد	C.P	$\tan\beta$	R	$\overline{u}_y$	$\overline{u}_x$
تبریز	۱۵/۸	۸۴/۲	۴/۱۴	۵۳	۰/۷۰	۱/۴۸	۲/۹۰	۱/۶۲	۲/۴۰
سهند	۱۴/۴	۸۵/۶	۵/۸۳	۶۰	۰/۷۱	-۱/۲۴	۴/۱۷	۲/۶۲	-۳/۲۴
مراغه	۴۵	۵۵	۴/۵۸	۵۲	۰/۸۳	-۰/۵۸	۳/۸۲	۳/۳۰	-۱/۹۱
میانه	۵۲/۳	۴۷/۷	۴/۰۱	۵۶	۰/۱۱	-۱/۵۰	۰/۴۵	-۰/۲۵	۰/۳۷
سراب	۴۷/۴	۵۲/۶	۴/۷۳	۵۴	۰/۹۲	-۰/۳۴	۴/۳۵	۴/۱۱	-۱/۴۱
اهر	۳۶	۶۴	۴/۷۵	۵۰	۱/۲۰	۱/۷۷	۵/۶۹	۲/۸۰	۴/۹۵
جلفا	۵۴	۴۶	۵/۲۸	۵۵	۰/۸۴	۲۴/۶	۴/۴۴	-۰/۱۸	-۴/۴۳

$\overline{u}_x$  = میانگین مولفه‌های برداری روی محور X ها

$\overline{u}_y$  = میانگین مولفه‌های برداری روی محور Y ها



$R =$  اندازه باد منتج

$\tan \beta =$  زاویه جهت وزش باد منتج

C.P = ضریب ثبات باد

C.V = ضریب درصد تغییرات باد

روند سرعت‌های باد

از بررسی بادهای ایستگاه‌های مورد مطالعه میانگین بیشترین بادهای تابستان مخصوصاً در تیر ماه اتفاق افتاده و فقط در شهر اهر حداکثر باد در بهمن ماه رخ داده و آن هم به علت وجود موانع در شرق اهر است که باعث عدم وقوع بادهای شرقی در تابستان شده است (جدول ۳).

جدول ۳: میانگین حداکثر بادهای اتفاق افتاده ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقه مورد مطالعه (۱۹۹۶-۲۰۰۷)

میانگین حداکثر باد		ایستگاه
ماه	میانگین سرعت	
تیر	۵/۱۵	تبریز
تیر	۷/۹۸	سهند
تیر	۵/۵۳	مراغه
تیر	۴/۷۵	میانه
تیر	۵/۰۱	سراب
بهمن	۵/۴۷	اهر
تیر	۶/۹۰	جلفا

### چگالی هوا

چگالی هوا با تغییرات ارتفاع و نیز با تغییرات درجه حرارت تغییر می‌کند. شرایط جوی مثل فشار و درجه حرارت متغیر می‌باشد. چگالی هوا در شرایط متعارف (۶۰ درجه فارنهایت برابر ۱۵/۵ درجه سانتی گراد در کنار دریا)  $۰/۰۷۶۳$  پوند برای یک فوت مکعب (۱/۲۱ کیلوگرم برای یک متر مکعب) است (ثقفی ۱۳۷۲).

### تغییرات چگالی هوا نسبت به ارتفاع

قدرت خروجی توربین بادی متناسب با جرم حجمی هوای عبوری می‌باشد و متقابلاً جرم هوا متناسب با فشار آن است. با افزایش ارتفاع از سطح آزاد دریا، فشار هوا کاهش می‌یابد. با کاهش فشار هوا در اثر افزایش ارتفاع از سطح دریا جرم حجمی هوا کاهش یافته و در نتیجه در سرعت‌های مشابه در ارتفاع پایین و بالا، قدرت خروجی در مناطق مرتفع‌تر کمتر خواهد بود. نسبت چگالی هوا در ارتفاعات مختلف به چگالی هوا در ارتفاع سطح دریا را «نسبت چگالی در ارتفاع»<sup>۱</sup> (DRA) می‌نامند (ثقفی، ۱۳۸۲). جدول شماره ۴ تعدادی از آنها را نشان می‌دهد که برای تعیین مقدار DRA ایستگاه‌های مورد مطالعه که دارای ارتفاعات مختلف نسبت به سطح آزاد دارند استفاده شده است.

جدول ۴: مقادیر DRA ۶۰ درجه فارنهایت در ارتفاعات مختلف بر حسب فوت

۱۰۰۰۰	۷۵۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰۰	۰	ارتفاع به فوت
۰/۶۸۷	۰/۷۵۶	۰/۸۳۲	۰/۹۱۲	۱	DRA در 60° F

ماخذ: ثقفی ۱۳۷۲

### تغییرات چگالی هوا نسبت به درجه حرارت

چگالی هوا با درجات مختلف دما نیز تغییر می‌یابد. نسبت چگالی هوا در درجات مختلف حرارت به چگالی هوا در ۶۰ درجه فارنهایت (۱۵/۵ درجه سانتی گراد) تحت عنوان «نسبت چگالی در درجه حرارت»<sup>۲</sup> (DRT) موسوم است (جداول شماره ۵) (ثقفی، ۱۳۸۲).

جدول ۵: مقادیر DRT در درجه حرارت های مختلف

۱۲۰	۱۰۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۰	درجه حرارت به F°
۰/۸۹۷	۰/۹۲۹	۰/۹۶۳	۱	۱/۰۴۰	۱/۰۸۳	۱/۳۰	DRT

ماخذ: ثقفی ۱۳۷۲

1-Density Ratio at Altitude

2- Density Ratio at Temperature

مقدار DRA با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. مقدار DRT نیز در کمتر از ۶۰ درجه فارنهایت افزایش و بالاتر از آن روند کاهشی دارد. جهت تعیین چگالی هوا در یک ایستگاه خاص که دارای ارتفاع معین و درجه حرارت مشخص است، لازم است مقادیر DRA و DRT ایستگاه مورد نظر را با چگالی متعارف هوا در هم ضرب کرد تا چگالی مورد نظر به دست آید. در جدول ۶ چگالی ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از جداول ۴ و ۵ محاسبه شده است.

جدول ۶: تغییرات چگالی هوا در ایستگاه‌های مورد مطالعه (۲۰۰۷-۱۹۹۶)

ایستگاه	تبریز	سهند	مراغه	میانه	سراب	اهر	جلفا
ارتفاع از سطح دریا (m)	۱۳۶۱	۱۶۴۱	۱۳۴۴	۱۱۱۰	۱۶۸۲	۱۳۹۰	۷۳۶
ارتفاع از سطح دریا (ft)	۴۴۶۵	۵۳۸۴	۴۴۰۹	۳۶۴۲	۵۵۲۲	۴۵۶۰	۲۴۱۵
میانگین دما $C^{\circ}$	۱۲	۱۲	۱۲/۵	۱۴/۲	۸/۷	۱۰/۶	۱۴/۸
میانگین دما $F^{\circ}$	۵۳/۶	۵۳/۶	۵۴/۵	۵۷/۶	۴۷/۷	۵۱/۱	۵۸/۶
DRA	۰/۸۴۹	۰/۸۲۱	۰/۸۵۱	۰/۸۷۵	۰/۸۱۶	۰/۸۴۶	۰/۹۱۵
DRT	۱/۰۱۳	۱/۰۱۳	۱/۰۱۱	۱/۰۰۵	۱/۰۲۵	۱/۰۱۸	۱/۰۰۳

بنابراین، قدرت عملی توربین بادی از طریق فرمول  $P = K \cdot e \cdot DRA \cdot DRT \cdot A \cdot V^3$  محاسبه می‌شود (تقفی ۱۳۸۲). از آنجا که  $\frac{P}{A}$  همان چگالی توان باد بوده و واحد آن بر حسب وات بر متر مربع می‌باشد، فرمول نهایی ذیر برای محاسبه چگالی باد به کار رفته و نتایج در جدول شماره ۷ آورده شده است.

$$\frac{P}{A} = K \cdot e \cdot DRA \cdot DRT \cdot V^3$$

$$\frac{P}{A} = \text{چگالی توان باد بر حسب وات بر متر مربع}$$

$K =$  ضریب و مقدار آن بر حسب واحدهای دستگاه متریک ۰/۶۱۲۵ در نظر گرفته می‌شود (تقفی ۱۳۷۲).

$e =$  بازده توربین بادی که ۳۰ درصد در نظر می‌گیرند.

DRA = تغییرات چگالی هوا نسبت به ارتفاع

DRT = تغییرات چگالی هوا نسبت به درجه حرارت

V = سرعت باد

جدول ۷: چگالی توان باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ارتفاع ۱۰ متری

بر حسب وات بر متر مربع (۱۹۹۶-۲۰۰۷)

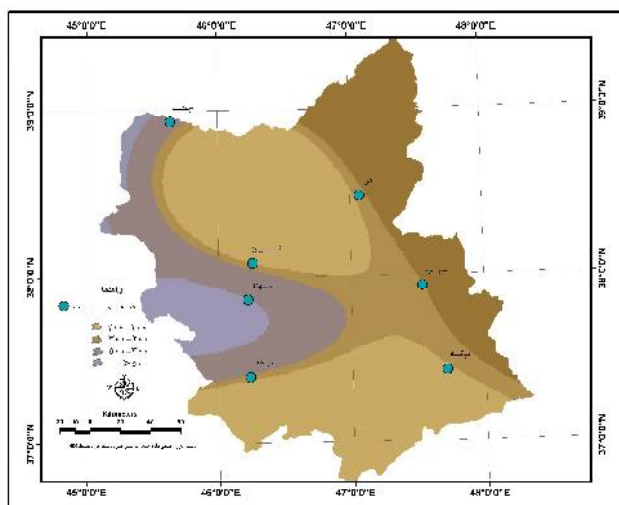
ماهها ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	میانگین سالانه
تیریز	۲۰۹	۲۰۲/۳	۲۱۲/۹	۲۳۸/۶	۲۰۸/۱	۱۶۵/۸	۱۳۸/۲	۷۹	۷۰/۹	۸۸/۶	۱۴۴/۷	۱۹۲/۵	۱۶۲/۶
سهند	۶۴۴/۳	۴۶۷/۴	۶۵۱/۳	۱۰۱۰	۷۴۸	۴۳۷/۸	۳۹۴/۷	۳۶۱/۸	۲۶۶/۹	۴۰۴/۶	۵۳۲/۵	۷۰۳/۸	۵۵۱/۹
مراغه	۱۸۲/۲	۱۸۶/۵	۲۳۵/۱	۳۱۹/۵	۳۰۴/۹	۲۴۷/۵	۱۶۰/۲	۱۲۹	۲۳۲/۲	۱۲۴/۸	۱۸۱/۹	۲۱۱/۲	۲۰۹/۶
میانه	۱۷۸/۱	۱۶۰/۳	۱۷۸/۱	۲۲۱/۵	۱۸۳/۱	۱۳۶/۵	۱۱۸/۸	۹۱/۴	۶۵/۷	۸۴/۵	۱۸۲/۱	۱۸۵/۷	۱۴۸/۸
سراب	۳۲۰/۱	۲۱۵/۴	212	۲۲۹/۵	۲۲۷/۵	۲۱۴/۱	۲۰۹/۷	۱۹۴/۳	۱۹۴/۲	۲۵۶	۲۹۸/۲	۳۱۸/۳	۲۴۰/۸
اهر	۳۰۴/۸	۲۰۲/۵	۱۴۷/۸	۱۵۶/۷	۱۵۳/۸	۱۲۶	۱۱۱/۷	۲۵۵/۱	۳۴/۸	۳۰۷/۸	۳۱۳/۵	۳۱۹/۹	۲۰۲/۸
جلفا	۳۱۶/۹	۲۹۰/۶	۴۶۵/۹	۶۲۳/۱	۵۵۰	۳۴۷/۷	۲۱۱	۱۷۰	۹۳/۵	۱۳۰/۷	۲۰۳/۸	۲۸۱	۳۰۶/۹

درجه بندی نواحی مختلف از نظر قدرت باد موجود در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین و کاربرد چگالی توان حاصل از انرژی باد در جدول شماره ۸ ارایه شده است (Guzziand, Justus, 1988).

جدول ۸: درجه بندی نواحی مختلف بنا بر قدرت باد موجود در ارتفاع ۱۰ متری زمین

ملاحظات	قدرت باد بر حسب وات بر متر مربع	قدرت باد نواحی مختلف
ناحیه باد خیز محسوب نمی شود	از صفر تا ۱۰۰	درجه I
از انرژی باد این نواحی می توان جهت مصارف کشاورزی نظیر پمپاژ آب استفاده نمود	از ۱۰۰ تا ۱۵۰	II
	از ۱۵۰ تا ۲۰۰	III
این نواحی برای نصب نیروگاه های بادی مناسب است	از ۲۰۰ تا ۲۵۰	IV
	از ۲۵۰ تا ۳۰۰	V
از نواحی پر باد و مناسب پارک های بادی محسوب می شود	از ۳۰۰ تا ۴۰۰	VI
	از ۴۰۰ تا ۱۰۰۰	VII

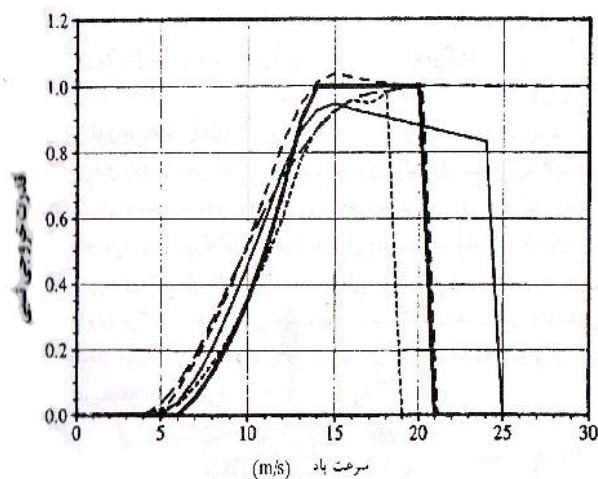
توضیح اینکه در تحلیل‌ها، کلاس‌های VI، IV، II مناسب و کلاس‌های III، V، IV بسیار مناسب در نظر گرفته شده است (جمیل ۱۳۸۲). با توجه به چگالی توان‌های به دست آمده در ایستگاه‌های مورد مطالعه (جدول شماره ۷) و درجه بندی مختلف نواحی از نظر قدرت باد (جدول شماره ۸) بهترین ایستگاه برای نصب توربین بادی جهت ایجاد پارک‌های بادی برای تولید انرژی الکتریسیته ایستگاه سهند و در درجه دوم ایستگاه جلفا مناسب می‌باشند. در شکل ۱ پهنه بندی ایستگاه‌های هم چگالی آورده شده که در آن ایستگاه‌های سهند و جلفا در یک پهنه قرار دارند.



شکل شماره ۱: پهنه بندی نقشه هم چگالی توان باد استان آذربایجان شرقی (۱۹۹۶-۲۰۰۷)

ایستگاه‌های سراب، مراغه و اهر از نوع کلاس IV بوده تنها برای نصب توربین‌های بادی مناسب می‌باشد، اینگونه مکان‌ها برای ایجاد مزرعه زیاد مناسب نمی‌باشند، ایستگاه‌های تبریز و میانه به علت پایین بودن چگالی توان باد و قرار گرفتن در کلاس II، از انرژی باد این نواحی می‌توان جهت مصارف کشاورزی نظیر پمپاژ آب استفاده نمود.

بررسی امکان بهترین محل جهت نصب توربین‌های بادی در استان آذربایجان شرقی طبق نمودار شکل شماره (۲) حداقل سرعت مجاز باد جهت بازدهی توربین بادی ۴ متر بر ثانیه است، بنابراین معیار انتخاب نقطه مناسب جهت تاسیس توربین‌های بادی همین سرعت است. در این بررسی مهم‌ترین عامل انتخاب محل مناسب جهت نصب توربین بادی سرعت باد در نظر گرفته شده است.



ماخذ: صلاحی ۱۳۸۳

شکل ۲: نمودار توان خروجی نسبی به سرعت باد برای توربین‌های جدید

نمودارهای گلباد ماهانه هر ایستگاه طی ۱۲ سال اخیر ترسیم و مورد بررسی قرار گرفته است. جهت جمع بندی بهتر برای هر ایستگاه به طور ماهانه جداولی طراحی شده که در آن فراوانی سرعت باد در طبقات مختلف سرعت آورده شده است. این جداول از نمودارهای گلباد حاصل شده است.

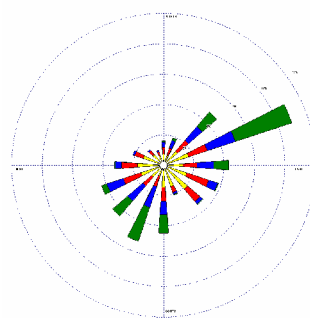
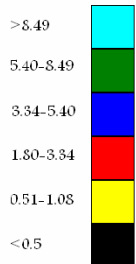
نمودار ستونی مقایسه فراوانی سالانه سرعت باد را در طبقات مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود ایستگاه‌های سهند و جلفا دارای فراوانی قابل ملاحظه در سرعت‌های

بالای ۵ متر بر ثانیه هستند و در بقیه ایستگاه‌ها سرعت باد حول مقادیر ۳ تا ۴ متر بر ثانیه است شکل (۴)، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ایستگاه‌های سهند و جلفا برای تاسیس توربین‌های بادی مناسب هستند. جدول شماره ۹ و شکل شماره ۳ (ایستگاه سهند) نمونه‌ای از گلبادها و جداول فراوانی است که برای تمام ایستگاه‌ها ترسیم و تنظیم شده است.

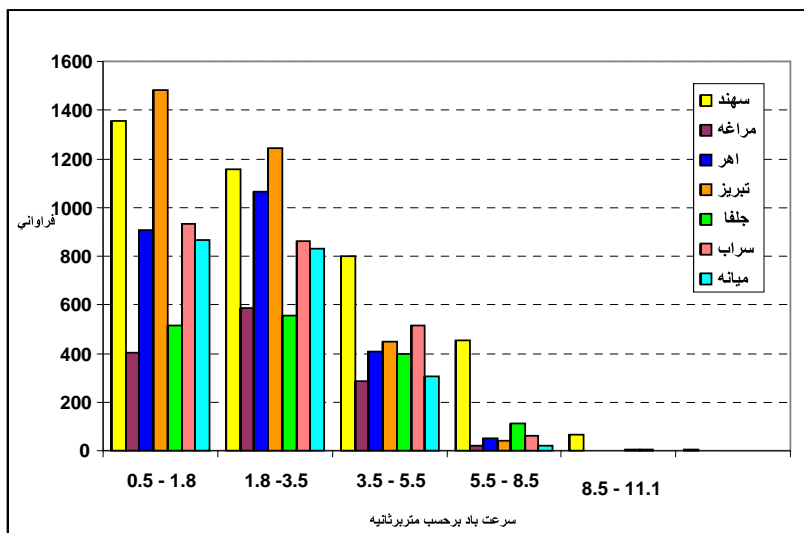
جدول ۹: توزیع فراوانی سرعت باد ایستگاه سهند

سرعت	-۰/۵۱	-۱/۸۰	-۳/۳۴	-۵/۴۰	>	مجموع
فروردین	۲۷	۳۸۲	۳۱۱	۳۱۳	۲۷۸	۱۳۱۱
اردیبهشت	۳۶	۷۲۹	۶۱۲	۶۶۴	۴۲۳	۲۴۶۴
خرداد	۲۶	۵۴۱	۶۲۱	۷۶۵	۷۵۹	۲۷۱۲
تیر	۱۸	۳۶۵	۴۲۹	۵۳۷	۱۰۲	۲۳۷۸
مرداد	۱۷	۵۶۷	۵۴۲	۶۱۴	۷۸۶	۲۵۲۶
شهریور	۲۱	۸۱۳	۶۳۳	۵۹۸	۴۴۵	۲۵۱۰
مهر	۲۱	۹۹۶	۶۹۶	۴۶۲	۳۱۷	۲۴۹۲
آبان	۲۹	۱۰۳۷	۴۸۷	۲۸۸	۲۴۸	۲۰۸۹
آذر	۲۹	۱۱۲۵	۴۰۰	۲۰۶	۱۸۸	۱۹۴۸
دی	۵۸	۱۰۴۹	۳۹۰	۱۸۸	۲۳۷	۱۹۲۲
بهمن	۶۴	۹۳۷	۴۹۲	۳۵۲	۳۹۶	۲۲۴۱
اسفند	۵۵	۸۰۴	۵۳۲	۴۸۴	۵۳۷	۲۴۱۲
مجموع	۴۰۱	۹۳۴۵	۶۱۴۵	۵۴۷۱	۵۶۴	۲۷۰۰۵

wind speed (m/sec)



شکل ۳: نمونه‌ی از گلباد ایستگاه سهند



شکل ۴: نمودار مقایسه‌ی ای فرآوانی سرعت باد ۷ ایستگاه سینوپتیک استان آذربایجان شرقی

### نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته، جهت اصلی بادهای در استان آذربایجان شرقی به تبعیت از جهت حرکت جریان هوا در پرفشارها و کم فشارها، از شرق به غرب بوده و شدت آن در فصل تابستان بیشتر از فصول دیگر سال می باشد. با وجود این به دلیل وجود موانع و ناهمواری‌ها در شرق ایستگاه اهر که مانع تشدید وزش باد در فصل تابستان می شود، لذا بیشترین وزش باد در این ایستگاه هم جهت با سیستم بادهای غربی در فصل زمستان رخ می دهد.

ایستگاه سهند در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، به علت بالا بودن درصد موجودیت باد، میانگین سرعت و بیشترین چگالی (۵۵۱/۹ وات بر مترمربع) سبب شده است تا این ایستگاه پتانسیل انرژی بسیار مناسبی برای ایجاد پارک‌های بادی داشته باشند. بعد از ایستگاه سهند،



ایستگاه جلفا به علت بالا بودن چگالی توان انرژی (۳۰۶/۹ وات بر متر مربع) مخصوصاً در فصل گرم سال از نواحی مناسب محسوب می شود. ایستگاه‌های سراب، مراغه، اهر در اولویت سوم قرار گرفته و برای نصب توربین‌های بادی مناسب، ولی برای ایجاد پارک بادی مناسب نمی باشد. در ایستگاه تبریز از انرژی باد می توان برای مصارف کشاورزی و یا پمپاژ آب استفاده کرد و در نهایت ایستگاه میانه به علت پایین بودن درصد وزش و چگالی توان باد برای نصب توربین بادی برای استحصال برق مناسب نمی باشد.

منابع

- ۱- ثقفی، م، (۱۳۸۲)، «انرژی‌های تجدید پذیر نوین»، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۲- ثقفی، م، (۱۳۷۲)، «انرژی باد و کاربرد آن در کشاورزی»، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۳- جمیل، م، (۱۳۸۰)، «چگالی انرژی باد»، *ماهنامه صنعت برق*، شماره ۴۲ و ۴۳، صفحات ۳۵-۴۳ و ۲۸-۳۹.
- ۴- جمیل، م، (۱۳۸۲)، «سهم انرژی‌های تجدید پذیر در تولید برق آلمان»، *ماهنامه صنعت برق*، سال هشتم، شماره ۹۰، صفحات ۲۱-۱۳.
- ۵- بی نام، (۲۰۰۷)، *آمار سمت و سرعت بادهای سه ساعته ایستگاه‌های سینوپتیک استان آذربایجان شرقی دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۷ میلادی*، اداره کل هواشناسی کشور.
- ۶- بی نام، (۱۳۷۵)، *برآورد پتانسیل انرژی باد در جمهوری اسلامی ایران*، گزارش نهایی، جلد اول، انتشارات امور انرژی وزارت نیرو، مرکز مطالعات انرژی وزارت نیرو، تهران.

- 7- Corotis, R.B, (1997), “*Stochastic Modeling of Site Wind Characteristic*”. RLO/2342  
[http://vbn.aau.dk/fbspretrieve/17533240/Benefit\\_Evaluation\\_of\\_Wind\\_Turbine\\_Generators.pdf](http://vbn.aau.dk/fbspretrieve/17533240/Benefit_Evaluation_of_Wind_Turbine_Generators.pdf)
- 8-Guzzi, R, and C. G. Justus (1997), “*Physical Climatology for Solar and Wind Energy*”,  
[http://www.amazon.com/Physical\\_Climatology\\_Solar\\_Wind\\_Energy/dp/9971505517](http://www.amazon.com/Physical_Climatology_Solar_Wind_Energy/dp/9971505517)
- 9-Manuel , L, and L. Nelson, (2002), “*Analysis of Time Series Data on Wind Turbine Loads*”  
[http://www.ce.utexas.edu/Prof/Manuel/Papers/TREXReport\\_AaronSterns.pdf](http://www.ce.utexas.edu/Prof/Manuel/Papers/TREXReport_AaronSterns.pdf).
- 10- Williams, R.J (1974), “*Solar Energy–Technology and Application*”. ANN Arbor Science Publisher, Inc.  
<http://dspace.mit.edu/bitstream>.
- 11- Sidki Uyar, T. and, J. Molly, (1998), “*Wind Energy in Turkey*”,  
<http://www.dewi.de>.
- 12- Yilmaz, V. , and H. E. Celik.( 2008), “*A Statistical Approach to Estimate the Wind Speed Distribution*”. Doğuş Üniversitesi Dergisi,  
<http://journal.dogus.edu.tr>.