

## پتانسیل سنجی و بررسی خصوصیات و پارامترهای انرژی باد مطالعه موردی: شهرستان دهلران

احمد امیدی<sup>\*۱</sup> - رضا علیمردانی<sup>۲</sup> - مجید خانعلی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۳

### چکیده

تعیین پتانسیل انرژی باد، اولین گام در مسیر مهار انرژی نهفته در آن محسوب می‌شود. در این تحقیق از اطلاعات باد منطقه دهلران با فواصل زمانی سه ساعته، استفاده گردید و برای پیش‌بینی احتمال وقوع سرعت‌های مختلف باد و نیز پتانسیل توان باد، از توابع ویبول و رایلی استفاده شد. بررسی میانگین سالانه سرعت باد طی دوره ده ساله نشان داد که در این مدت تغییرات میانگین سرعت دارای نوسان اندکی بوده و در ارتفاع ۸۰ متری به  $5 \text{ ms}^{-1}$  رسیده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین چگالی انرژی ماهیانه باد مربوط به ماه‌های گرم سال بود و در ارتفاع ۸۰ متری به  $312 \text{ Wm}^{-2}$  در ماه ژوئن رسید. همچنین بیشترین میانگین سرعت ماهانه  $4/62$  و کمترین مقدار آن  $2/241 \text{ ms}^{-1}$  به ترتیب در ماه ژوئن ۲۰۰۵ و نوامبر ۲۰۰۶ بود. به‌طور کلی، ماه‌های گرم سال به‌صورت معنی‌داری میانگین سرعت بیشتر و انحراف استاندارد کمتری نسبت به ماه‌های سرد سال داشته‌اند که می‌تواند بیانگر پتانسیل، ثبات و پایداری بالاتر انرژی در ایام گرم سال باشد. بررسی تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی سرعت و نیز توان باد نشان داد که بیشترین چگالی انرژی هرکدام به ترتیب در ساعات گرم روز، ماه ژوئن و فصل تابستان بوده است. لذا می‌توان گفت که پتانسیل بالای انرژی باد منطقه با اوج مصرف برق کشور که در طول روز، ماه‌های گرم سال و فصل تابستان رخ می‌دهد و گاهی اوقات منجر به خاموشی‌های ناخواسته می‌شود، تقارن زمانی داشته است. لذا با احداث مزارع بادی در این مناطق علاوه بر افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور می‌توان به پایداری و ثبات برق منطقه در ایام گرم سال کمک نمود. همچنین بررسی تغییرات جهت باد نشان داد که بیشترین فراوانی مربوط به جهت جنوب شرقی و سپس غربی و کمترین فراوانی باد در طی سال از سمت شمال شرقی و در مرتبه بعد شمالی بود.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی باد، تابع توزیع ویبول، جهت باد، سرعت باد

### مقدمه

گردید فعالیت‌های گسترده‌ای در سطح جهان به‌ویژه در کشورهای صنعتی به‌منظور استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر صورت گیرد. در بسیاری از کشورها اهداف راهبردی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر تدوین و سیاست‌گذاری‌های لازم انجام شده است (Gabbasa et al., 2013). باد یکی از پاک‌ترین و ارزان‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر است که مزایای استفاده از آن در تولید انرژی نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر باعث توسعه سریع بازار انرژی بادی و به تبع آن، ارتقاء فناوری و رشد چشمگیر مطالعه کاربردی آن در میان جوامع پیشرفته جهان گردیده است. در واقع باد یکی از مظاهر انرژی خورشیدی و همان هوای متحرک است و پیوسته جزء کوچکی از تابش خورشید که از خارج به اتمسفر می‌رسد، به انرژی باد تبدیل می‌شود. در ایران، به‌عنوان اولین تمدنی که ۹۰۰ سال قبل از میلاد از انرژی باد برای پمپ آب و خرد کردن دانه استفاده کرده است، فعالیت‌هایی در راستای تولید توان از منابع بادی در حال انجام است. در ایران، ظرفیت تولید ۱۰ هزار مگاوات برق از نیروگاه‌های بادی

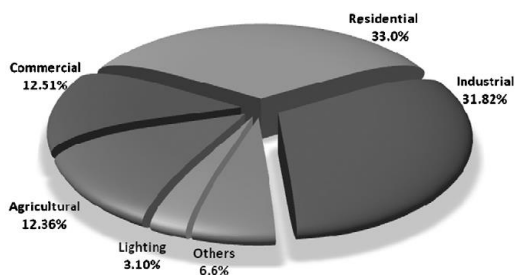
رشد تقاضای انرژی، افزایش استانداردهای زندگی، گرم شدن بیش از حد کره زمین و مشکلات زیست‌محیطی و اکولوژیکی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی به‌ویژه نفت و مشتقات آن، نگرانی‌هایی را در کشورهای مختلف ایجاد کرده است. محدودیت منابع انرژی‌های فسیلی، مشکلات زیست‌محیطی و ضرورت تنوع در سبد انرژی موجب

- ۱- دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
  - ۲- استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
  - ۳- استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
- \*- نویسنده مسئول: (Email: ahmad\_omidi1391@ut.ac.ir)  
DOI: 10.22067/jam.v9i1.64905

بررسی قرار دادند.

### تولید و مصرف برق در ایران

در سال ۱۳۹۵ مصرف برق ایران با رشد ۳ درصدی نسبت به سال قبل آن به ۲۸۳ Twh رسید. همچنین بر مبنای آمار شرکت توانیر گروه‌بندی مصرف‌کننده‌های برق کشور به صورت شکل ۱ می‌باشد و بیشترین میزان مصرف مربوط به بخش خانگی و صنعت بوده است. الگوی اوج مصرف برق کشور به صورتی است که در ماه‌های گرم سال مصرف برق به شدت افزایش می‌یابد و در برخی نقاط پایداری شبکه را کاهش می‌دهد. الگوی اوج مصرف برق کشور در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن بیشترین مصرف برق و ناپایداری شبکه در ماه جولای رخ داده است. همچنین در طول روزهای گرم سال الگوی اوج مصرف به نحوی است که بیشترین مصرف برق و ناپایداری شبکه در میانه روز و اوایل شب به وقوع پیوسته است (شکل ۳). در واقع کمبود منابع آب در سدهای برق‌آبی و خاموشی‌های ناخواسته ناشی از افت تولید، پایداری شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (سالنامه آماری شرکت توانیر، ۱۳۹۵).



شکل ۱- گروه‌های مصرف‌کننده برق در ایران

Fig. 1. Categories of electricity consumption in Iran

برای تأمین انرژی الکتریکی و تعادل در تولید و مصرف کشور نیاز به تأمین انرژی از منابع مختلف وجود دارد. بدین منظور دولت از احداث نیروگاه‌های جدید از منابع مختلف فسیلی و تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی باد حمایت می‌کند. لازم به ذکر است که ظرفیت ذخیره عملیاتی انرژی کشور ناچیز و در حدود ۷ درصد بوده است. دلیل اصلی کم بودن ذخیره عملیاتی، افزایش مصرف برق در فصل تابستان، کمبود منابع آب و محدود بودن سهم انرژی برقی و نیز میزان بالای خاموشی ناخواسته نیروگاه‌های حرارتی ناشی از تطبیق با افزایش مصرف است (Khosroshahi et al., 2009). لذا باید تمام تلاش‌ها برای افزایش سرمایه‌گذاری در زمینه احداث نیروگاه‌های جدید به خصوص از منابع تجدیدپذیر صورت گیرد.

پیش‌بینی شده است. ظرفیت نصب توربین جهت تولید انرژی برق بادی در ایران تا سال ۱۳۸۷ به ۱۲۸ مگاوات رسیده است (Sherbafian, 2008). در سال ۲۰۰۸ ایران با ۲۳ درصد رشد در رده سی و پنجم تولید برق بادی جهان قرار داشت. آمریکا، آلمان، اسپانیا، چین و هند با تولید ۲۰ هزار تا ۱۰ هزار مگاوات در رده‌های اول تا پنجم قرار داشتند (Global Wind Energy, 2009). با توجه به اهمیت استفاده از این منبع پایان‌ناپذیر و مزایای آن باید برنامه‌ریزی دقیقی برای شناخت پتانسیل‌های موجود در کشور جهت گسترش استفاده از این منبع انرژی صورت گیرد. هرچند ایران از پیشگامان استفاده از انرژی باد بوده است، اما هم‌اکنون استفاده از این انرژی در ایران بسیار محدود است و این در حالی است که این سرزمین از وجود مناطق بادخیز و مستعدی برخوردار است. پژوهش‌های متعددی در رابطه با امکان استفاده از پتانسیل انرژی باد در مناطق مختلف جغرافیایی بر اساس آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی انجام و نتایج ارزشمندی به دست آمده است.

Yaniktepe و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده سرعت باد پارامترهای توزیع سرعت باد، توزیع ماهانه و نیز پتانسیل باد را در عثمانیه ترکیه مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که منطقه مذکور برای سرمایه‌گذاری انرژی باد مناسب است. Carrillo و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی پارامترهای توزیع باد و پتانسیل انرژی باد را برای منطقه گالیسیا اسپانیا به دست آوردند. Jalalvand و همکاران (۲۰۱۴) امکان استفاده از انرژی باد برای پمپ‌های کشاورزی برقی در منطقه‌ی بروجرد را مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که با استفاده از حداقل ۳۹ توربین ۲۳۰۰ کیلوواتی در ارتفاع ۹۹ متری برق پمپ‌های کشاورزی تأمین شده و در طول سال نیز انرژی مازاد وجود داشته و قابل تزریق به شبکه‌ی سراسری برق خواهد بود. Sefeedpari و همکاران (۲۰۱۶) پتانسیل انرژی باد در شهرستان اقلید فارس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که منطقه مورد مطالعه از منظر تولید انرژی الکتریسیته در ابعاد وسیع توجیه‌پذیر نیست. Dabbaghiyan و همکاران (۲۰۱۶) پتانسیل انرژی باد در استان بوشهر را مورد بررسی قرار دادند. داده‌های سرعت باد با استفاده از تابع توزیع ویبول مورد تحلیل قرار گرفت. در این تحقیق بهترین نقطه استان از نظر پتانسیل انرژی باد مشخص گردید. Mostafaeipour و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پتانسیل انرژی باد در منطقه بینالود جهت تولید برق پرداختند و بیان داشتند که پتانسیل انرژی منطقه بسیار مناسب است. Pishgar و همکاران (۲۰۱۶) پتانسیل انرژی باد در شهرستان فیروزکوه را با استفاده از توابع توزیع ویبول و رایلی مورد بررسی قرار دادند و جهت بهره‌برداری از انرژی باد توصیه نمودند. Mohammadi و همکاران (۲۰۱۶) چگالی توان باد را با استفاده از چندین روش تخمین پارامترهای توزیع ویبول مورد محاسبه قرار دادند. Watts و همکاران (۲۰۱۶) پتانسیل انرژی باد در شیلی را مورد

گرم به طور خاص و سایر فصول به صورت عام جهت کمک به تأمین انرژی برق منطقه، جلوگیری از خاموشی های ناخواسته، توسعه استفاده از انرژی باد به عنوان یکی از منابع مهم تجدیدپذیر و نیز جلب توجه سرمایه گذاران و سیاست گذاران انرژی جهت احداث مزارع بادی در منطقه مورد مطالعه است. لازم به ذکر است که پارامترهای مد نظر برای بررسی در این مطالعه عبارتند از میانگین سالانه، فصلی، ماهانه و ساعتی سرعت باد و چگالی انرژی باد در ارتفاع ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متر و پارامترهای توابع توزیع ویبول و رایلی. علاوه بر موارد ذکر شده مقادیر سرعت باد با بیشترین احتمال، سرعت باد با بیشترین انرژی، فاکتور الگوی انرژی و گلباد نیز مد نظر قرار گرفت.

### مواد و روش ها

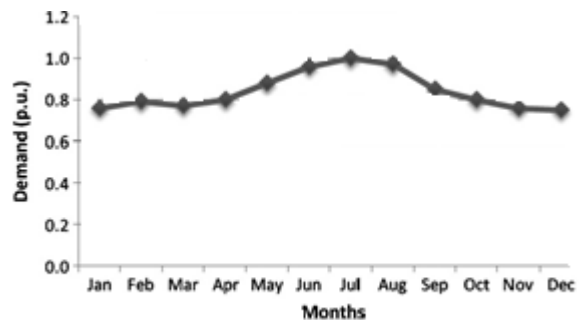
**ویژگی های منطقه مورد مطالعه و روش جمع آوری اطلاعات**  
 دهلران، یکی از شهرهای استان ایلام است که در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۱ دقیقه و در بلندی ۲۱۳ متری از سطح دریا قرار دارد. فاصله آن از ایلام و اندیمشک به ترتیب ۲۳۰ و ۱۲۰ کیلومتر است. از شمال به شهرستان آبادان و ملکشاهی، از جنوب به کشور عراق، از شرق به استان خوزستان و از غرب به شهرستان مهران محدود می شود (شکل ۴). شهرستان دهلران جزء مناطق جلگه ای و کم ارتفاع ایران به شمار می رود. این منطقه دارای زمستان های معتدل و تابستان های بسیار گرم و خشک است. متوسط بارندگی سالیانه در این شهر ۲۷۰ میلی متر است. لازم به ذکر است این شهر یکی از نواحی بادخیز استان بوده و در اکثر مواقع سال، سرعت باد آن قابل ملاحظه است.



شکل ۴ - موقعیت جغرافیایی شهرستان دهلران

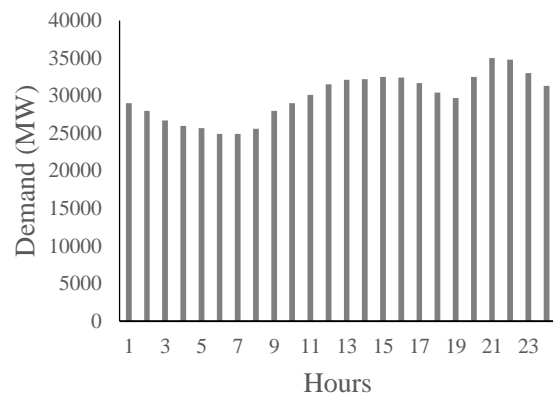
Fig. 4. Geographical location of Dehloran County

یکی از معیارهای مهم در احداث مکان هایی جهت استحصال انرژی باد همچون نیروگاه های بادی، اندازه گیری سرعت میانگین سالانه و نیز چگالی توان باد است. برای این منظور و انجام تجزیه و تحلیل های آماری، داده های سه ساعته شامل جهت و سرعت باد از سازمان هواشناسی اخذ گردید. دوره بررسی تغییرات باد وزیده شده در منطقه در طول سال های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۳ بود. به منظور ترسیم گرافها



شکل ۲- الگوی اوج مصرف ماهانه برق ایران

Fig. 2. Monthly peak load pattern in Iran (Khosroshahi et al., 2009)



شکل ۳- نمودار بار روزانه در یک روز اوج بار تابستانی

Fig. 3. Daily load curve during a peak summer day (Khosroshahi et al., 2009)

موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی از عوامل مهم و مؤثر بر پتانسیل انرژی باد هر منطقه محسوب می شود. ایران به عنوان کشوری پهناور دارای اقلیم های مختلف آب و هوایی است و برای بهره برداری از انرژی باد مناطق مختلف آن نیاز به مطالعه و تحقیق بر روی داده های هواشناسی وجود دارد. در این راستا تحقیقات زیادی در مناطق مختلف کشور انجام گرفته است. متأسفانه در این زمینه در مناطق غربی کشور و خصوصاً استان ایلام تحقیقاتی صورت نگرفته است. نوار مرزی استان دارای آب و هوایی گرم و خشک است، در این منطقه در ایام گرم سال دمای هوا از ۵۰ درجه سلسیوس نیز فراتر می رود که به تبع آن مصرف برق به شدت بالا است. در منطقه مورد مطالعه در فصل گرم سال و نیز ساعات گرم روز و هم زمان با اوج مصرف برق منطقه و کشور، وزش باد به صورت پیوسته صورت می گیرد. از طرفی پیشی گرفتن مصرف از تولید برق در تابستان و عکس آن در زمستان یکی از مشکلات کشور محسوب می گردد. با توجه به موارد فوق هدف از این تحقیق بررسی پارامترهای انرژی باد و نیز امکان سنجی استفاده از پتانسیل باد منطقه مورد مطالعه در فصل

برای تعیین  $k$  و  $c$  از روابط زیر استفاده شد (Manwell, 2002).

$$k = \frac{\sigma_v^{-1.086}}{v_m} \quad (5)$$

$$\frac{c}{v_m} = \frac{k^{2.6674}}{0.184 + 0.816k^{2.73855}}$$

که در آن  $\sigma_v$  و  $v_m$  به ترتیب انحراف استاندارد و میانگین سرعت باد بوده و  $N$  تعداد داده‌های سرعت است. سرعت باد با بیشترین احتمال، از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$V_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad (6)$$

سرعت بادی که در یک دوره زمانی بیشترین انرژی را تولید می‌کند نیز عاملی مهم در احداث مزرعه بادی محسوب می‌شود. این پارامتر بیشترین انرژی باد در یک‌زمان مشخص را نشان داده و از رابطه (۷) به دست می‌آید (Gabbasa, 2013; Cook, 2001):

$$V_{me} = c \left(1 + \frac{2}{k}\right)^{1/k} \quad (7)$$

#### تابع توزیع رایلی

تابع توزیع دیگری که برای بررسی پتانسیل سرعت باد به کار می‌رود، تابع توزیع رایلی است. تابع توزیع رایلی حالتی خاص از تابع ویبول است که توزیع فرکانس سرعت باد را نشان می‌دهد. در توزیع رایلی، مقدار  $k$  برابر ۲ در نظر گرفته شد.

$$f(V) = \frac{2V}{c^2} e^{-(V/c)^2} \quad 0 \leq V \leq \infty \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $f(V)$  احتمال وقوع مقادیر مختلف سرعت باد،  $c$  ( $c > 1$ ) پارامتر مقیاس توزیع برحسب متر بر ثانیه و  $V$  سرعت باد (برای  $V < 0$  مقدار  $f(V) = 0$  است) برحسب متر بر ثانیه است. چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی رایلی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$F_R(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (9)$$

$$f_R(v) = \frac{\pi v}{2 v_m^2} \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right] \quad (10)$$

که در آن  $f_R(v)$  تابع چگالی احتمال و  $F_R(v)$  تابع توزیع تجمعی رایلی است (Celik, 2004).

#### توان باد

توان باد، حاصل انرژی جنبشی به ازای واحد جرم باد و دبی جرمی جریان باد در بین تیغه‌های توربین است. لذا هرچه سرعت وزش باد در منطقه بیشتر باشد، پتانسیل انرژی باد برای تولید انرژی الکتریسیته بالاتر خواهد بود. عوامل دیگری نظیر اندازه توربین نیز بر توان خروجی توربین مؤثر است. افزایش اندازه توربین به همراه افزایش اندازه طول پرها موجب افزایش سطح تماس باد با توربین شده و در نتیجه سرعت چرخش پرها نیز افزایش می‌یابد:

و محاسبات آماری و ریاضی، از نرم‌افزار Excel استفاده شد. ایستگاه سینوپتیک دهلران در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۶ دقیقه، عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۶۱ دقیقه و در ارتفاع ۲۳۲ متری از سطح دریا قرار دارد.

#### سرعت باد میانگین

میانگین سرعت سالانه، ماهانه، روزانه و نیز انحراف استاندارد سرعت باد با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید:

$$v_m = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N v_i \right] \quad (1)$$

$$\sigma_v = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v_m)^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

که در آن  $N$  تعداد سرعت‌های باد،  $\sigma_v$  انحراف استاندارد،  $v_i$  سرعت باد و  $v_m$  سرعت میانگین است.

تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که سرعت باد در ارتفاعات بالاتر، از رابطه (۳) که رابطه تجربی است به دست می‌آید (Mostafaeipour, et al, 2013):

$$v = v_{mes} \left(\frac{H}{H_{mes}}\right)^\alpha \quad (3)$$

که در آن  $V$  سرعت باد در ارتفاع  $H$  (ارتفاع موردنظر)،  $v_{mes}$  سرعت باد در ارتفاع  $H_{mes}$  (ارتفاع مبنا برابر ۱۰ متر) و  $\alpha$  ضریب زبری سطح است. ضریب زبری سطح به شرایط عوارض سطحی، زمان روز و فصل، سرعت باد و دما بستگی دارد (Al-Mohamad and Karmeh, 2003). در این تحقیق ضریب زبری سطح ۰/۱۴۳ در نظر گرفته شد.

#### تابع توزیع ویبول

پتانسیل انرژی باد یک منطقه و ویژگی‌های آن را می‌توان با استفاده از تحلیل آماری داده‌های هواشناسی بلندمدت مورد ارزیابی قرار داد. برآورد تابع توزیع احتمال گامی مهم و اساسی در تعیین پتانسیل توان باد و امکان سنجی اقتصادی آن محسوب می‌گردد. توابع توزیع مختلفی از جمله ویبول، رایلی، لگاریتمی و گاما را می‌توان برای توصیف توزیع فراوانی سرعت باد مورد استفاده قرار داد. ولی توابع توزیع ویبول و رایلی ساده بوده و دقت مناسبی دارند (Diaf and Notton, 2013). در مطالعات پیشین نیز، اغلب از تابع توزیع احتمال ویبول و رایلی استفاده شده است (Salahi, 2004). تابع توزیع ویبول مطابق رابطه (۴)، با دو پارامتر  $k$  (ضریب شکل) و  $c$  (ضریب مقیاس) مشخص شده است.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], 0 \leq v \leq \infty \quad (4)$$

فاکتور مهم دیگر در تحلیل پتانسیل انرژی باد، فاکتور الگوی انرژی است که می‌توان از آن برای کمک به طرحی آئرو دینامیکی توربین استفاده کرد. فاکتور الگوی انرژی عبارت است از مجموع توان در دسترس باد تقسیم بر توان محاسبه شده از مکعب سرعت میانگین. (Alamdari et al., 2012; Fazelpour et al., 2015)

$$k_e = \frac{1}{N V_m^3} \sum_{i=1}^N V_i^3 = \frac{\overline{V^3}}{V_m^3} \quad (16)$$

### نتایج و بحث

#### میانگین سالانه سرعت باد

معمولاً داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی کشور در ارتفاع ۱۰ متر اندازه‌گیری می‌شوند. از طرفی با توجه به اینکه بنا به ظرفیت توربین‌های تجاری موجود در کشور، روتور و پره‌ها می‌توانند در ارتفاعی تا حدود ۸۰ متر قرار گیرند، با استفاده از رابطه (۳) سرعت در ارتفاع ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متر نیز محاسبه گردید. میانگین سرعت سالانه در چهار ارتفاع مذکور طی دوره ۲۰۰۴-۲۰۱۳ در شکل ۵ نشان داده شده است که بیانگر میانگین سرعت مناسب در ارتفاع‌های مذکور است. با توجه به شکل ۵ تغییرات میانگین ده ساله دارای نوسان نسبتاً کمی بود، که خود می‌تواند بیانگر ثبات انرژی باد ایستگاه مورد مطالعه باشد، لازم به ذکر است که بیشترین و کمترین سرعت،  $3/6$  و  $3/25 \text{ ms}^{-1}$  و به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ به وقوع پیوسته است. در ارتفاع ۸۰ متری میانگین سرعت سالانه حدود  $5 \text{ ms}^{-1}$  بود که مناسب به نظر می‌رسد.

بنابراین، توان توربین با در نظر گرفتن دو پارامتر سرعت باد و سطح تماس آن با پره از رابطه (۱۱) قابل محاسبه خواهد بود (Hennessey, 1977):

$$P_v = \frac{1}{2} A \rho V^3 \quad (11)$$

که در آن  $A$  سطح جاروب شده (مترمربع)،  $\rho$  چگالی هوا ( $1/225$  کیلوگرم بر مترمکعب در فشار ۱ اتمسفر و دمای ۱۵ درجه سلسیوس)  $P_v$ ، متوسط ظرفیت توان باد (وات) و  $V$  سرعت باد (متر بر ثانیه) است (Celik, 2004).

چگالی توان باد یکی از مفیدترین ابزارهای تخمین پتانسیل باد محسوب می‌شود که بیانگر میزان توان باد در دسترس در یک منطقه است که توسط توربین بادی قابلیت تبدیل به برق را دارد. توان باد بر واحد سطح و یا چگالی توان به صورت زیر بیان می‌گردد (Akpınar and Kavak, 2006):

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

بر اساس داده‌های هواشناسی، چگالی توان باد میانگین را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد (Manwell, 2002):

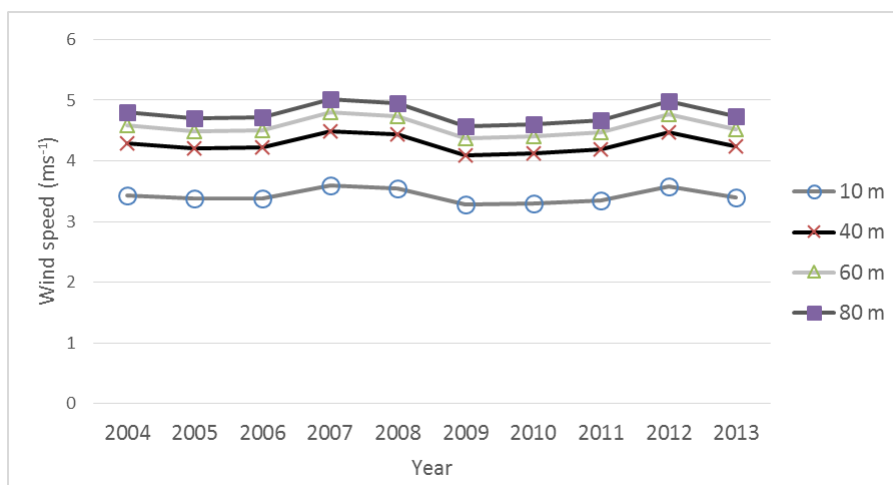
$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N \frac{V_i^3}{N} \quad (13)$$

بر اساس تابع توزیع رایلی، چگالی توان باد از رابطه (۱۴) به دست می‌آید (Manwell JF, 2002):

$$P_R = \frac{3}{\pi} \rho A v_m^3 \quad (14)$$

بر اساس تابع توزیع ویبول، چگالی توان باد از رابطه (۱۵) به دست می‌آید (Manwell, 2002):

$$P_W = \frac{1}{2} \rho c^3 \left( \frac{k+3}{k} \right) \quad (15)$$



شکل ۵ - میانگین سرعت سالانه در ارتفاع ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متر  
 Fig. 5. The annual average of wind speed rate at 10, 40, 60 and 80 m

### تغییرات ماهانه و فصلی سرعت باد

برای تعیین پتانسیل باد ایستگاه مذکور، داده‌ها جمع‌آوری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به دلیل تغییر شرایط آب و هوایی در طول ماه‌های سال، تغییرات زیاد انرژی مصرفی بخش‌های مختلف به‌ویژه خانگی و کشاورزی و به تبع آن اهمیت بررسی روند سرعت ماهانه و فصلی و مشخص نمودن روند تغییرات مذکور در طول سال، میانگین ماهانه و فصلی سرعت باد محاسبه گردید. تغییرات سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری طی ماه‌های مختلف سال و میانگین سرعت و انحراف معیار سرعت باد به‌ترتیب در شکل ۶ و جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱، بیشترین میانگین سرعت ماهانه ۴/۶۲ و کمترین مقدار آن  $2/241 \text{ ms}^{-1}$  به‌ترتیب در ماه ژوئن ۲۰۰۵ و نوامبر ۲۰۰۶ بود. به‌طور کلی، ماه‌های گرم سال به‌صورت معنی‌داری میانگین سرعت بیشتر و انحراف استاندارد کمتری نسبت به ماه‌های سرد سال داشتند که می‌تواند بیانگر پتانسیل، ثبات و پایداری بالاتر انرژی در ایام گرم سال باشد. از طرفی با توجه به تحقیقات پیشین (Khosroshahi et al., 2009) و بررسی الگوی اوج مصرف ماهیانه کشور در شکل‌های ۳ و ۶، می‌توان چنین استنباط کرد که میانگین سرعت ماهیانه باد منطقه مورد مطالعه دارای الگوی مناسبی برای بهبود پایداری شبکه برق از طریق احداث مزارع بادی، واحدهای پراکنده تولید انرژی جهت تأمین برق واحدهای کشاورزی، صنعتی و یا خانگی در طول سال و به‌ویژه در فصول گرم می‌باشد.

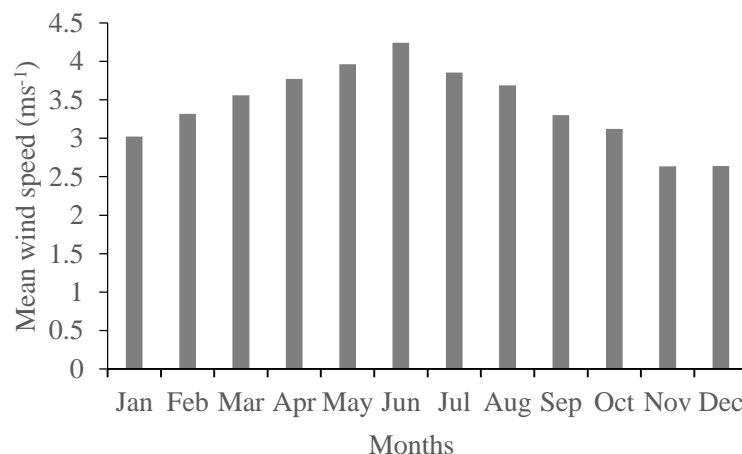
### تغییرات ساعتی سرعت باد

مناطق گرم و بیابانی دارای نوسانات دمایی زیادی در طول

شبانروز هستند که می‌تواند بر روند و الگوی وزش باد تأثیرگذار باشد. بررسی میانگین سرعت باد در طول شبانه‌روز به‌صورت سالیانه و فصلی، بیانگر تغییر معنی‌دار سرعت در طی شبانه‌روز در کل فصول سال بود. روند این تغییرات در شکل ۷ نشان داده شد. با توجه به شکل مذکور، کمترین سرعت در ساعت ۳ بامداد بوده است. از ساعت ۳، سرعت باد افزایش یافته و در ساعت ۱۵ به بیشینه مقدار خود رسید و پس از آن تا ۳ بامداد دارای روند نزولی گردید. این روند در میانگین فصلی و ماهانه نیز صادق بود. از مقایسه نمودار بار روزانه اوج بار تابستانی کشور در شکل ۳ با شکل ۷ چنین استنباط می‌شود که توزیع روزانه سرعت باد ایستگاه مورد مطالعه مناسب بوده و سرعت بیشتر که منجر به توان بادی بیشتری می‌شود با اوج مصرف تقارن زمانی دارد. لذا با توجه به مصرف بسیار زیاد برق کشور و خصوصاً مناطق گرمسیری در فصل تابستان و خاموشی‌های ناخواسته ناشی از آن، بالا بودن سرعت باد و در نتیجه پتانسیل تولید انرژی باد می‌تواند احداث نیروگاه‌های بادی را در این مناطق توجیه‌پذیر نماید.

### پارامترهای تابع توزیع ویبول

تغییرات تابع توزیع ویبول شامل پارامتر  $k$  و  $c$  طی مدت ۱۰ سال و در ارتفاع ۱۰ متر در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. پارامتر  $k$  بدون بعد و  $c$  بر حسب  $\text{m s}^{-1}$  است. کمترین و بیشترین مقدار  $k$ ، ۱ و  $1/828$ ، به‌ترتیب در دسامبر ۲۰۰۶ و می ۲۰۱۱ بود. همچنین کمترین و بیشترین مقدار  $c$  برابر با  $2/37$  و  $5/269$ ، به‌ترتیب در نوامبر ۲۰۰۴ و ژوئن ۲۰۱۳ مشاهده گردید.

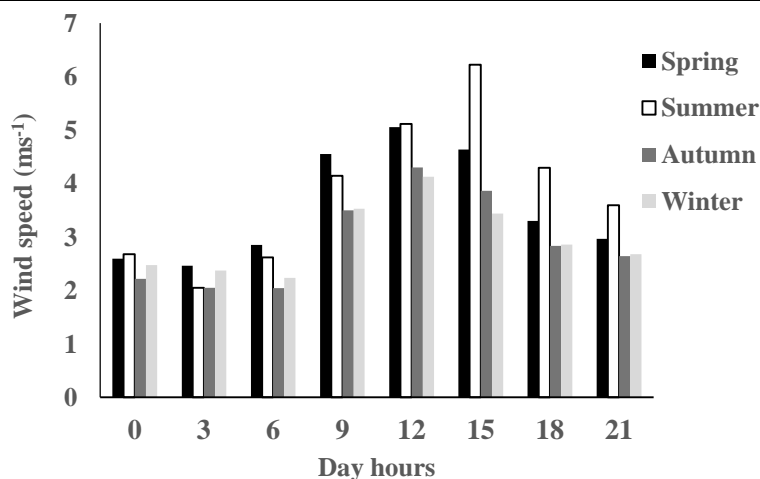


شکل ۶- میانگین سرعت ماهانه باد در ارتفاع ۱۰ متری  
**Fig. 6.** Monthly average of wind speed at 10 m height

جدول ۱- انحراف استاندارد و میانگین سرعت باد طی دوره ده ساله در ارتفاع ۱۰ متری

Table 1- Standard deviation and wind speed average over ten years period at 10 m height

ماه Month	پارامتر Parameter	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
ژانویه	$\bar{v}$	3.289	3.027	3.374	2.894	2.874	2.62	3.475	2.817	3.16	2.668
Jan	$\sigma$	2.96	2.966	3.601	2.847	2.288	1.924	2.412	2.399	2.368	2.546
فوریه	$\bar{v}$	3.354	2.268	3.14	3.166	4.315	3.479	3.122	3.073	3.759	2.979
Feb	$\sigma$	3.039	2.460	2.788	2.540	3.386	2.382	2.159	2.146	2.416	2.661
مارس	$\bar{v}$	3.188	2.279	3.636	3.358	4.640	3.091	3.366	3.737	4.027	3.373
Mar	$\sigma$	2.501	2.439	3.099	3.835	2.999	2.343	2.200	2.531	2.895	2.649
آوریل	$\bar{v}$	4.187	3.799	3.575	4.245	3.950	3.325	3.570	3.887	3.741	3.454
Apr	$\sigma$	3.213	3.959	2.848	2.986	2.811	1.942	2.182	2.638	2.422	2.607
می	$\bar{v}$	3.890	4.091	3.353	3.700	4.414	3.329	3.801	4.254	4.341	4.257
May	$\sigma$	2.695	2.723	2.502	2.282	2.718	2.008	2.320	2.441	2.607	2.959
ژوئن	$\bar{v}$	4.554	4.620	3.591	4.450	3.983	3.925	4.237	3.966	4.354	4.720
Jun	$\sigma$	3.023	3.347	2.506	2.672	2.654	2.271	2.465	2.421	2.847	3.050
جولای	$\bar{v}$	3.470	4.212	4.132	4.402	3.458	4.003	3.595	3.438	4.011	3.821
July	$\sigma$	2.705	2.707	2.535	3.039	2.356	2.383	2.326	2.332	2.522	2.653
آگوست	$\bar{v}$	4.055	3.587	3.458	4.362	3.422	3.934	3.164	3.583	3.797	3.527
Aug	$\sigma$	3.154	2.810	2.274	2.561	2.087	2.457	1.887	2.358	2.400	2.408
سپتامبر	$\bar{v}$	3.254	3.287	3.158	3.504	3.600	3.320	2.795	3.233	2.795	3.345
Sep	$\sigma$	2.696	2.643	2.400	2.398	2.275	2.089	1.919	2.104	1.919	2.501
اکتبر	$\bar{v}$	2.591	3.216	4.176	2.737	2.769	3.071	3.067	3.664	3.196	2.708
Oct	$\sigma$	2.333	2.271	2.934	1.954	1.837	2.227	2.005	2.292	1.973	2.206
نوامبر	$\bar{v}$	3.116	2.291	2.241	3.066	2.495	2.491	2.408	2.666	2.795	2.791
Nov	$\sigma$	2.471	1.961	1.873	2.322	2.097	1.871	1.612	2.318	2.599	2.700
دسامبر	$\bar{v}$	2.741	2.487	2.531	3.313	2.813	2.527	2.491	2.325	2.507	2.660
Dec	$\sigma$	2.727	2.615	2.838	2.823	2.111	2.186	2.041	2.784	2.207	2.867



شکل ۷- تغییرات ساعتی سرعت باد در فصول مختلف سال در ارتفاع ۱۰ متر

Fig. 7. Daily variation in wind speed of different seasons of the year at 10 m height

پیش‌بینی توان باد با استفاده از توابع ویبول و رایلی نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل تابع ویبول نسبت به تابع رایلی برآورد بهتری از توان باد داشته است و هر دو تابع بهترین پیش‌بینی توان را در فصل تابستان و بدترین آن را در فصل زمستان داشته‌اند. شکل ۹ چگالی

### چگالی توان باد

تعیین توان باد در واحد سطح معیاری مهم در بررسی پتانسیل انرژی باد و قابلیت یک منطقه برای احداث مزرعه بادی محسوب می‌گردد. در شکل ۸ چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری و نیز

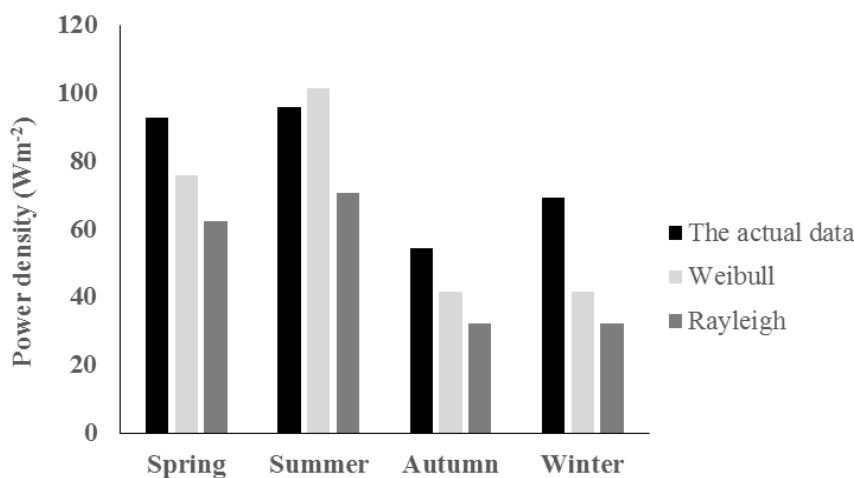
گفت که پتانسیل بالای انرژی باد منطقه با اوج مصرف برق کشور که در ماه‌های گرم سال رخ می‌دهد تقارن زمانی دارد و از بررسی شکل‌های ۳ و ۹ می‌توان به خوبی به این نتیجه دست یافت.

توان باد ماهیانه را در ارتفاع ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متری نشان می‌دهد. بیشترین چگالی انرژی ماهیانه مربوط به ماه‌های گرم سال بوده و از ۲۳۰ تا  $312 \text{ Wm}^{-2}$  متغیر بود. کمترین و بیشترین مقدار چگالی توان به ترتیب مربوط به ماه‌های نوامبر و ژوئن مشاهده گردید. لذا می‌توان

جدول ۲ - پارامترهای تابع توزیع ویبول

Table 2- Parameters of Weibull distribution function

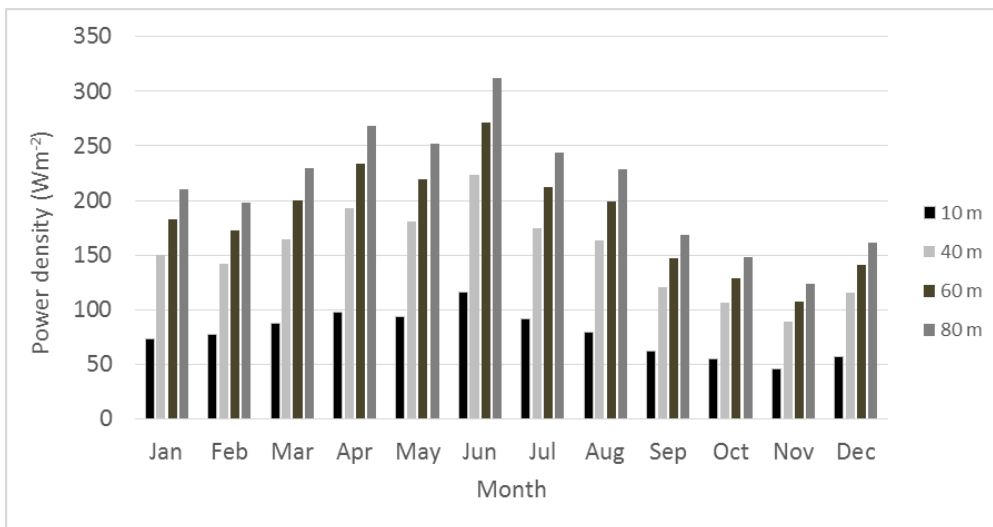
ماه Month	پارامتر Parameter	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
ژانویه	k	1.121	1.022	1.012	1.017	1.280	1.397	1.468	1.190	1.367	1.052
Jan	c	3.432	3.055	3.262	2.915	3.115	3.876	2.847	3.992	3.457	2.724
فوریه	k	1.113	1.136	1.137	1.270	1.301	1.508	1.492	1.476	1.615	1.130
Feb	c	3.492	2.900	3.291	3.415	4.677	3.859	3.458	3.399	4.198	3.117
مارس	k	1.301	1.160	1.189	1.201	1.606	1.351	1.586	1.526	1.431	1.452
Mar	c	3.456	2.949	3.860	3.574	5.179	3.375	3.752	3.150	4.436	3.125
آوریل	k	1.333	1.304	1.279	1.456	1.446	1.792	1.706	1.523	1.603	1.356
Apr	c	4.560	4.098	3.861	4.692	4.357	3.738	4.003	4.316	4.175	3.773
می	k	1.489	1.556	1.455	1.690	1.692	1.731	1.709	1.828	1.739	1.484
May	c	4.307	4.553	3.903	4.146	4.947	3.736	4.263	4.787	4.874	4.712
ژوئن	k	1.560	1.419	1.477	1.739	1.554	1.811	1.800	1.708	1.585	1.436
Jun	c	5.069	5.084	3.973	4.995	4.432	4.415	4.765	4.448	4.854	5.269
جولای	k	1.310	1.553	1.699	1.495	1.516	1.775	1.604	1.524	1.654	1.486
July	c	3.767	4.687	4.632	4.877	3.838	4.496	4.013	3.818	4.487	4.231
آگوست	k	1.313	1.303	1.576	1.782	1.710	1.667	1.652	1.575	1.645	1.513
Aug	c	4.404	3.890	3.853	4.903	3.838	4.404	3.555	3.992	4.247	3.913
سپتامبر	k	1.226	1.267	1.346	1.509	1.645	1.653	1.504	1.593	1.504	1.371
Sep	c	3.481	3.543	3.445	3.886	4.026	3.715	3.099	3.606	3.099	3.661
اکتبر	k	1.120	1.459	1.467	1.441	1.561	1.417	1.586	1.664	1.688	1.249
Oct	c	2.704	3.553	4.616	3.018	3.082	3.379	3.420	4.101	3.581	2.910
نوامبر	k	1.286	1.184	1.215	1.352	1.208	1.364	1.546	1.164	1.082	1.036
Nov	c	3.370	2.429	2.392	3.347	2.660	2.724	2.678	2.814	2.883	2.833
دسامبر	k	1.005	1.001	1.000	1.190	1.366	1.170	1.241	1.332	1.148	1.009
Dec	c	2.747	2.424	2.376	3.518	3.077	2.671	2.672	2.532	2.635	2.558



شکل ۸- چگالی توان باد در ارتفاع ۱۰ متری و پیش‌بینی توان باد با استفاده از توابع ویبول و رایلی

Fig. 8. Wind power density at 10 m height and wind power prediction using the Rayleigh and Weibull functions





شکل ۹- چگالی توان باد ماهانه ایستگاه دهلران در ارتفاع ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متر

Fig. 9. Monthly wind power density of Dehloran station at 10, 40, 60 and 80 m heights

گرم سال بود. البته این امر در جدول ۱ نیز قابل استنباط است، بدین صورت که مقدار عددی انحراف استاندارد در ماه‌های سرد تقریباً برابر و نزدیک به میانگین مشاهده گردید و این رویه برای ماه‌های گرم صدق نمی‌کند. بیشترین و کمترین مقدار  $V_{me}$ ، به ترتیب در ماه‌های ژوئن و نوامبر مشاهده شد. همچنین بیشترین و کمترین مقدار  $V_{mp}$ ، به ترتیب در ماه‌های ژوئن و ژانویه بوده است.

همچنین در جدول ۳ فاکتور الگوی انرژی  $K_e$ ، سرعت باد با بیشترین انرژی  $V_{me}$  و سرعت باد با بیشترین احتمال آمده است. با توجه به رابطه (۱۶)، بالا بودن فاکتور الگوی انرژی در فصول سرد سال که میانگین سرعت کمتری دارند، می‌تواند مؤید این امر باشد که در این فصول، طی زمان‌هایی که وزش باد صورت گرفته است، سهم سرعت‌هایی با مقدار عددی بیش از میانگین ماهانه بیشتر از فصول

جدول ۳- مقادیر سرعت باد با بیشترین احتمال ( $V_{mp}$ )، سرعت باد با بیشترین انرژی ( $V_{me}$ ) و فاکتور الگوی انرژی ( $K_e$ ) در ماه‌های مختلف سال  
Table 3- Maximum probability wind speed ( $V_{mp}$ ), maximum energy wind speed ( $V_{me}$ ) and energy pattern factor ( $K_e$ ) values in different months

پارامتر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
$V_{mp}$	3	3.25	3.54	3.78	4.06	4.11	3.76	3.52	3.17	3.13	3.63	3.61
$V_{me}$	3.91	4.41	4.61	4.84	4.88	5.7	5.14	5.05	4.48	3.98	3.39	3.45
$K_e$	4.5	3.14	3.18	1.04	0.6	2.4	2.58	2.59	2.75	2.99	3.92	5.18

خسارت‌زا و غیرقابل استفاده به جز فصل زمستان (۰/۰۱۴ درصد) در سایر فصول سال صفر بوده است. با در نظر گرفتن اینکه منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای گرم بوده و دارای مصرف انرژی بالایی در ایام گرم سال است و نیز وقوع خاموشی ناخواسته در فصول گرم سال، ساعات طولانی وزش باد در این فصل می‌تواند احداث مزرعه بادی در این مناطق را توجیه‌پذیر نماید.

#### گلباد انرژی باد

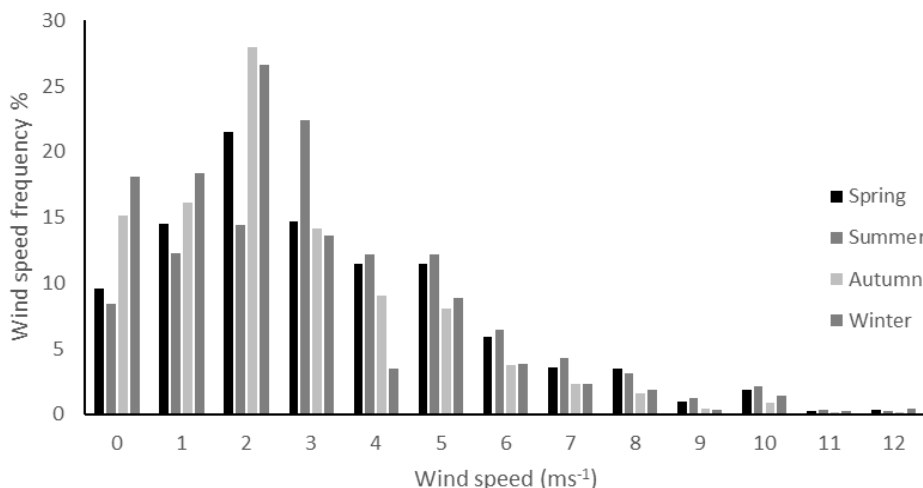
تعیین جهت باد برای پژوهشگران مهم بوده و بیانگر اثر خصوصیات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بر خصوصیات باد می‌باشد. لذا در تجزیه و تحلیل داده‌های باد به‌ویژه برای مکان‌یابی توربین‌های

#### توزیع فراوانی سرعت باد

فراوانی سرعت باد طی فصول مختلف سال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل فراوانی سرعت‌های  $4\text{ms}^{-1}$  و بیشتر، در فصول گرم سال به‌صورت معنی‌داری بیش از سایر فصول بوده است. همچنین در جدول ۴ فراوانی فصلی سرعت باد در چهار گروه باد آرام (کمتر از  $2\text{ms}^{-1}$ )، ملایم، مطلوب و طوفانی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، در فصل تابستان ۶۴/۹۲ درصد از طول شبانه‌روز، وزش باد با سرعت مطلوب (سرعت باد در محدوده کارکرد توربین بادی) صورت گرفته است. این عدد برای فصل بهار ۵۴/۴۶ بود. کمترین میزان سرعت باد مطلوب مربوط به فصل زمستان با ۳۶/۹۹ درصد مشاهده گردید. میزان بادهای شدید،

باد و احداث مزرعه بادی و سایر کاربردهای انرژی باد از جمله پمپاژ آب، روشنایی و غیره ضروری به نظر می‌رسد. به منظور نمایش جهت وزش باد در منطقه از نمودارهای گلباد ۱۶ جهته در ماه‌های مختلف

برای ۱۰ سال رسم شد. هدف از رسم این گونه نمودارها، انتخاب مناسب‌ترین توربین با توجه به وضعیت بادهای منطقه است.



شکل ۱۰ - توزیع فراوانی سرعت باد در فصول مختلف سال و ارتفاع ۱۰ متر

Fig. 10. The frequency distribution of wind speed at different seasons of the year in 10 m height

جدول ۴ - مقایسه فراوانی سرعت‌های باد فصول مختلف سال در ارتفاع ۱۰ متر

Fig. 4. Comparison of wind speeds frequency in different seasons at 10 m height

جمع	فراوانی سرعت باد غیرمفید و طوفانی - بیش از $22ms^{-1}$	فراوانی سرعت باد مطلوب $3$ تا $22ms^{-1}$	فراوانی سرعت باد ملایم $2$ تا $2.99ms^{-1}$	فراوانی سرعت باد آرام - کمتر از $2ms^{-1}$	
Total	Frequency of Stormy wind ( $>22ms^{-1}$ )	Frequency of desired wind ( $3 < v < 22ms^{-1}$ )	Frequency of gentle wind ( $2 < v < 2.99ms^{-1}$ )	Frequency of calm wind ( $< 2ms^{-1}$ )	
100	·	54.46	21.51	24.03	بهار/Spring
100	·	64.92	14.45	20.63	تابستان/Summer
100	·	40.75	27.97	31.28	پاییز/Autumn
100	0.014	36.99	26.60	36.45	زمستان/Winter

هدف کلی این تحقیق کسب اطلاعات در مورد پتانسیل انرژی باد در منطقه مورد مطالعه و بهبود و ایجاد چشم‌اندازی برای استفاده از آن می‌باشد. در این تحقیق، تحلیل آماری پتانسیل انرژی باد با رسم توابع توزیع ویبول طی دوره ده ساله و در ارتفاع‌های ۱۰ الی ۸۰ متری در ایستگاه دهلران انجام شد. به صورت خلاصه نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

۱- سرعت میانگین سالانه در چهار ارتفاع ۱۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متر محاسبه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده میانگین سرعت ده ساله دارای نوسان نسبتاً کمی بود که بیشترین و کمترین سرعت،  $3/6$  و  $3/25ms^{-1}$  و به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۰ بوده است. در ارتفاع ۸۰ متری میانگین سرعت سالانه حدود  $5ms^{-1}$  بود که مناسب به نظر می‌رسد. همچنین، ماه‌های گرم سال به صورت

به همین دلیل از داده‌های جهت باد غالب در منطقه برای ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین که از ایستگاه هواشناسی اخذ شد، استفاده گردید. نمودار گلباد سالانه درصد و جهت باد را در جهات ۱۶ گانه نشان می‌دهد. بدین منظور با استفاده از داده‌های ساعتی باد ایستگاه سینوپتیک دهلران در طی دوره‌ی ده ساله، گلباد جهت این ایستگاه تهیه و ترسیم شد. با توجه شکل ۱۱، باد غالب در کلیه‌ی ماه‌های سال جنوب شرقی و جنوب غربی بود که بیش از ۳۰ درصد بادهای را شامل می‌شود. بیشترین فراوانی باد جنوب شرقی و سپس غربی و کمترین فراوانی باد در طی سال از سمت شمال شرقی و در مرتبه بعد شمالی مشاهده گردید.

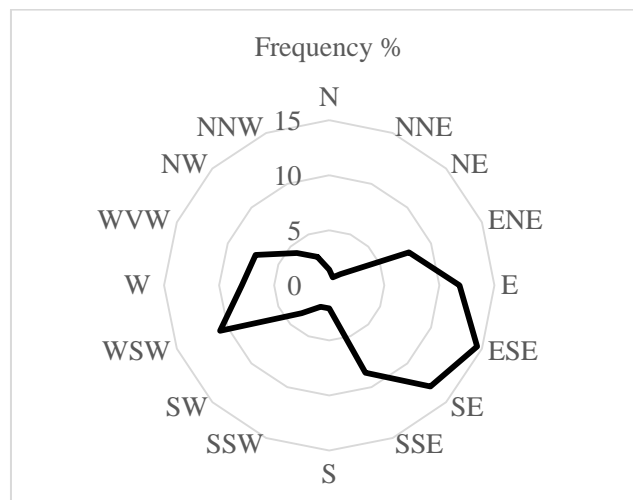
### نتیجه گیری

تطابق مناسبی بین اوج مصرف برق و سرعت بیشینه باد وجود داشت.

۳- فاکتورهای تابع توزیع ویبول  $k$  و  $c$  محاسبه گردید که برای محاسبه چگالی انرژی باد ضروری هستند. کمترین و بیشترین مقدار  $k$ ، ۱ و  $۱/۸۲۸$ ، به ترتیب در دسامبر ۲۰۰۶ و می ۲۰۱۱ بود. همچنین کمترین و بیشترین مقدار  $c$  برابر با  $۲/۳۷$  و  $۵/۲۶۹$ ، به ترتیب در نوامبر ۲۰۰۴ و ژوئن ۲۰۱۳ بوده است.

معنی داری میانگین سرعت بیشتری نسبت به ماههای سرد سال داشتند.

۲- بررسی میانگین سرعت باد در طول شبانه روز به صورت سالیانه و فصلی، بیانگر تغییر معنی دار سرعت در طی شبانه روز در کل فصول سال بود. کمترین سرعت در ساعت ۳ بامداد بوده است. از ساعت ۳ سرعت باد افزایش یافته و در ساعت ۱۵ به بیشینه مقدار خود رسید و پس از آن تا ۳ بامداد نزولی گردید. در روند مذکور



شکل ۱۱- گلباد و جهت باد در ایستگاه دهلران  
**Fig. 11.** Wind rose and wind direction at the Dehloran station

انرژی باد، محتمل ترین سرعت و بیشینه توان نیز محاسبه گردید.  
 ۵- بیشترین فراوانی جهت باد جنوب شرقی و سپس غربی و کمترین فراوانی باد در طی سال از سمت شمال شرقی و در مرتبه بعد شمالی بود.

۴- بیشترین چگالی انرژی ماهیانه مربوط به ماههای گرم سال بوده و از  $۲۳۰$  تا  $۳۱۲ \text{ w m}^{-2}$  متغیر است. کمترین و بیشترین مقدار چگالی توان به ترتیب مربوط نوامبر و ژوئن بود. لذا می توان گفت که پتانسیل بالای انرژی باد منطقه با اوج مصرف برق کشور که در ماههای گرم سال رخ می دهد تقارن زمانی دارد. علاوه بر آن، مقدار

**References**

1. Akpinar, E. K. 2006. A statistical investigation of wind energy potential. *Energy Sources* 28 (9): 807-820.
2. Alamdari, P., O. Nematollahi, and M. Mirhosseini. 2012. Assessment of wind energy in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (1): 836-860.
3. Al-Mohamad, A., and H. Karmeh. 2003. Wind energy potential in Syria. *Renewable Energy* 28 (7): 1039-1046.
4. Carrillo, C., J. Cidrás, E. Díaz-Dorado, and A. F. Obando-Montaño. 2014. An approach to determine the Weibull parameters for wind energy analysis: the case of Galicia (Spain). *Energies* 7 (4): 2676-2700.
5. Celik, A. N. 2004. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. *Renewable Energy* 29 (4): 593-604.
6. Cook, N. J. 2001. Discussion on modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind speed energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 89 (10): 867-869.
7. Council, G. W. E. 2009. Global wind 2008 report. Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium, and Greenpeace, Amsterdam, The Netherlands.

8. Dabbaghiyan, A., F. Fazelpour, M. D. Abnavi, and M. A. Rosen. 2016. Evaluation of wind energy potential in province of Bushehr, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 455-466.
9. Diaf, S., and G. Notton. 2013. Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in southern Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23: 379-390.
10. Electric Power Industry Statistics, Available at <http://amar.tavanir.org.ir>.
11. Fazelpour, F., N. Soltani, S. Soltani, and M. A. Rosen. 2015. Assessment of wind energy potential and economics in the north-western Iranian cities of Tabriz and Ardabil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 87-99.
12. Gabbasa, M., K. Sopian, Z. Yaakob, M. R. F. Zonooz, A. Fudholi, and N. Asim. 2013. Review of the energy supply status for sustainable development in the Organization of Islamic Conference. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28: 18-28.
13. Hennessey, J. P. 1977. Some Aspects of Wind Power Statistics. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 16: 119-128.
14. Jalilvand, M., H. Bakhoda, and M. Almasi. 2014. Evaluation and feasibility of wind power for supplying of agricultural electric pumps in Boroujerd area. *Journal of Agricultural Machinery* 4 (2): 368-377. (In Farsi).
15. Keyhani, A., M. Ghasemi-Varnamkhashti, M. Khanali, and R. Abbaszadeh. 2010. An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy* 35 (1): 188-201.
16. Khosroshahi, K. A., S. Jadid, and M. Shahidehpour. 2009. Electric power restructuring in Iran: achievements and challenges. *The Electricity Journal* 22 (2): 74-83.
17. Manwell, J. F., J. G. McGowan, and A. L. 2002. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons. Amherst, USA.
18. Mohammadi, K., O. Alavi, A. Mostafaeipour, N. Goudarzi, and M. Jalilvand. 2016. Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density. *Energy Conversion and Management* 108: 322-335.
19. Mostafaeipour, A., A. Sedaghat, M. Ghalishooyan, Y. Dinpashoh, M. Mirhosseini, M. Sefid, and M. Pour-Rezaei. 2013. Evaluation of wind energy potential as a power generation source for electricity production in Binalood, Iran. *Renewable Energy* 52: 222-229.
20. Pishgar-Komleh, S. H., A. Keyhani, and P. Sefeedpari. 2015. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooh county of Iran). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 313-322.
21. Salahi, B. 2004. A potential survey on wind energy and real probability fitting of wind incidence using Weibull distribution function in isometropia stations of Ardabil province. *Geographical Researches* 72. (In Farsi).
22. Sefeedpari, P., A. Keyhani, Sh. Pishgar-Komleh, M. Khanali, and A. Akram. 2016. Assessment of wind energy production with statistical analysis of wind characteristics. *Iranian Journal of Biosystem Engineering* 47 (3): 469-483. (In Farsi).
23. Sherbafian, N. 2008. Evaluating wind power potential and its effect on economy. *Quarterly Energy Economics Review* 5 (17): 113-140. (In Farsi).
24. Watts, D., N. Oses, and R. Pérez. 2016. Assessment of wind energy potential in Chile: A project-based regional wind supply function approach. *Renewable Energy* 96: 738-755.
25. Yaniktepe, B., T. Koroglu, and M. M. Savrun. 2013. Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21: 703-711.
26. Yue, C. D. and S. S. Wang. 2006. GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan. *Energy Policy* 34 (6): 730-742.

## Study of Potential, Characteristics and Parameters of the Wind Energy Case study: Dehloran County

A. Omidi<sup>1\*</sup> - R. Alimardani<sup>2</sup> - M. Khanali<sup>3</sup>

Received: 05-06-2017

Accepted: 15-10-2017

### Introduction

Geographical location and climatic conditions are the important factors affecting the wind energy potential of each region. Iran is a vast country with different climates and the exploitation of its wind energy needs to study and research on the meteorological data. In the study area during the warm season and the hottest hours of the day, coinciding with peak electricity consumption in the region and the country, wind blowing continuously carried out. The surpassed consumption over production of electricity in summer and vice versa in winter is considered as one of the country's problems. The aim of this study was to investigate the parameters of the wind energy and the feasibility of wind potential (in study area) in the warm season in particular and other seasons to supply the needed electrical power of area, avoid of unwanted blackouts, development of wind energy as an important renewable energy, attraction of investors, and policymakers to build wind farms in the study area.

### Materials and Methods

This study was conducted in the Dehloran city, located in the southern part of Ilam province. The region has a temperate winter and very hot and dry summer. The important criteria for construction of wind power plants and using of its energy are wind power density and the annual wind speed average. For this reason and analysis, and statistical analyzes, wind data includes three-hour direction and speed were obtained from the meteorological organization and during 2004 to 2013. The average of annual, monthly and daily wind speed and their standard deviation were calculated. Based on the commercial turbines in the country, and the rotor blades are at altitudes up to about 80 meters, the wind speed at altitudes of 40, 60 and 80 meters was calculated. To evaluate the potential of wind speed the Rayleigh and Weibull distribution functions were used and their parameters were calculated. The wind energy potential using the available data and the Weibull and Rayleigh functions were calculated.

### Results and Discussion

Based on the results of the ten-year data, average of wind speed had relatively slight variation, with the highest and the lowest value of 3.6 and 3.25 m/s in 2007 and 2010, respectively. The annual average was about 6 m/s in height of 50 meters that seems appropriate. The highest and the lowest monthly average values were 4.62 m/s and 2.24 m s<sup>-1</sup> in June 2005 and November 2006, respectively. Generally, the warm months had significantly higher wind speed than that of cold months. The Weibull distribution function parameters, k and c were calculated. Minimum and maximum amount of k were 1 and 1.828, in December 2006 and May 2011, respectively. The minimum and maximum amount of c was 2.37 and 5.69 in November 2004 and June 2013, respectively. The highest value of wind power density was 312 w m<sup>-2</sup> in June. The lowest power density was observed in November. Therefore, we can say that the wind energy potential of the region has coincident with peak electricity consumption in the warm months. The most frequent and the least frequent wind direction were the southeast and northeast, respectively.

1- Ph.D. Candidate of Mechanics of farm machinery, Department of Faculty of College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Professor, Department of Faculty of College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Assistant Professor, Department of Faculty of College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(\*- Corresponding Author Email: ahmad\_omidi1391@ut.ac.ir)

## Conclusions

Daily evaluation of wind speed during different months, seasons and years showed a significant change during the day that represented the high value of the wind speed in noon and afternoon. The highest value of monthly wind energy density was for the warm season. The lowest and highest power density was in November and June, respectively. Therefore, we can say that the peak of wind energy potential of the region has a coincident with the country's peak power consumption in warm months. With considering that the study area has a warm climate and high consumption of energy in the hot days of a year and the probability of unwanted blackout of electricity in warm months, and the long hours of the wind blowing in the mentioned times, construction of wind farm in these areas can be reasonable.

**Keywords:** Weibull distribution function, Wind direction, Wind energy, Wind speed