

ارزیابی پتانسیل تولید انرژی بادی در ایستگاه‌های منتخب ایران

غلامرضا روشن^۱: استادیار جغرافیای طبیعی و اقلیم‌شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
عبدالعظیم قانقرمه: استادیار جغرافیای طبیعی و اقلیم‌شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
اسماعیل شاهکوئی: استادیار جغرافیای طبیعی و اقلیم‌شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

چکیده

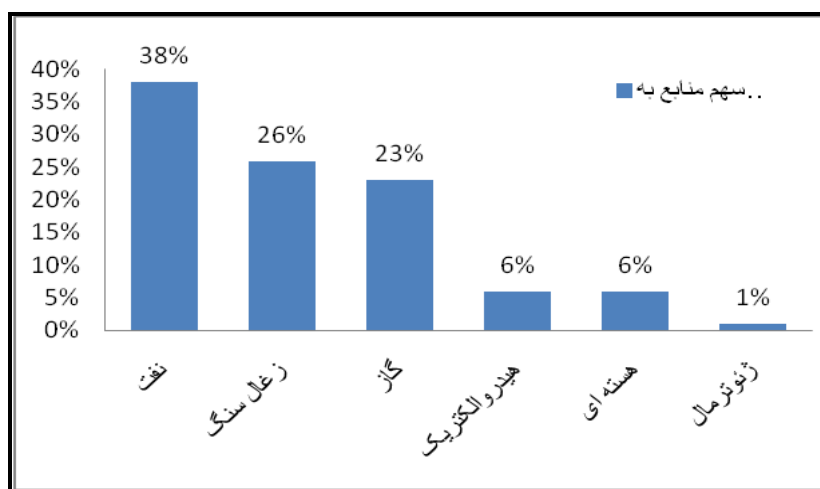
امروزه مهار منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، یکی از راهکارها جهت اتخاذ مدیریت ریسک در حوزه تأمین انرژی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های ساعتی و دوره آماری سالهای ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۴ م، میزان تولید انرژی در مقیاس فصلی و سالانه برای ۳ ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری از سطح زمین برای ۴۲ ایستگاه کشور، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج سرعت باد، نشان دهنده بیشترین میانگین سالانه سرعت باد مؤثر به میزان ۸/۵۹، ۱۱/۳۵ و ۱۲/۲۹ متر بر ثانیه برای ایستگاه زابل و کمترین آن با ۵/۶۷، ۷/۲۵ و ۸/۳۶ متر بر ثانیه، به ترتیب برای سطوح ۱۰، ۳۰ و ۴۰ در گرگان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که در بین فصول مختلف سال، بهار و تابستان مشترکاً با میانگین ۶۹ و ۱۲۹ وات بر متر مربع بترتیب برای تراز ارتفاعی ۱۰ و ۳۰ متر، همچنین بهار با ۱۵۰ وات بر متر مربع برای تراز ارتفاعی ۴۰ متر، بیشترین پتانسیل تولید انرژی بادی را دارا می‌باشند. از طرف دیگر در بررسی انجام شده در میان ایستگاه‌های مختلف کشور، مشخص گردید که بیشترین توان چگالی نیروی باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین بترتیب با مقادیر ۳۰۴۲، ۱۶۷۵ و ۱۰۹۲ وات بر متر مربع در مقیاس سالانه به ایستگاه‌های زابل، اردبیل و کیش اختصاص یافته است. از این‌رو انرژی بادی می‌تواند جایگزین مناسبی نسبت به سوخت‌های فسیلی در برخی از مناطق کشور مطرح باشد.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدید پذیر، توربین‌های بادی، نیمرخ باد، طبقات سرعت، ایران.

^۱. نویسنده مسئول: ghr.roshan@gu.ac.ir ، ۰۹۱۷۱۳۵۰۳۰۵

بیان مسأله:

امروزه جوامع سرعت در حال گسترش می‌باشند، و هر جامعه‌ای جهت تأمین نیازمندی‌های مختلف شهروندان خود منجمله سلامت، آسایش، ایجاد فرصت اشتغال، امنیت سیاسی- نظامی و غیره، باید به منابع انرژی مطمئن و قابل توجهی دسترسی داشته باشد. در دهه‌های گذشته، غالب انرژی مورد استفاده جوامع جهان بر استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی (نفت، زغال سنگ و گاز) استوار بوده است. تقریباً آمار موجود برای سه دهه گذشته از منابع انرژی مورد استفاده جهان نشان می‌دهد که بیشترین سهم استفاده از منابع انرژی با ۳۸ درصد مربوط به نفت بوده این در حالی است که کمترین آن برای منابع تجدیدپذیر (خورشید، باد، ژئوترمال) در حدود یک درصد می‌باشد (Najafi & et al, 2011: 2719). (شکل شماره ۱).



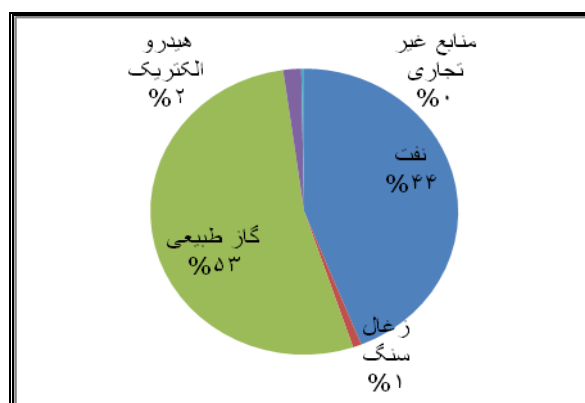
شکل ۱- منابع تولید انرژی در سطح دنیا- منبع: (WET, 2007: ۲۷۲۱)

بنابراین برای دهه‌های گذشته این امر سبب شده مقادیر گازهای گلخانه‌ای از جمله دی اکسید کربن، متان، CFC ها و غیره نیز در جو افزایش یابد که از پیامدهای آن می‌توان به میانگین افزایش ۰.۱۹ درجه سانتیگرادی دما در هر دهه برای ۲۵ سال گذشته اشاره نمود (Roshan & et al, 2012: 1737). مطابق با گزارشات هیئت بین دول تغییر اقلیم، دمای کره زمین به میزان ۰/۶ تا ۲/۵ درجه سانتیگراد تا ۵۰ سال آینده افزایش خواهد یافت (IPCC, 2007). در ادامه از تأثیرات منفی این افزایش دما بر اکوسیستم محیطی می‌توان به ذوب یخچال‌ها، فراوانی در رخداد فرایندهای حدی مثل موج گرمایی، افزایش خشکسالی‌ها و غیره اشاره نمود^۲. در این میان کشور ایران با سهم ۱.۶۹ درصد از انتشار دی اکسید کربن جو در سطح جهان، در جایگاه ده کشور برتر دنیا قرار دارد (روشن و همکاران، ۱۳۹۰: ۸۹). یکی از عوامل مهم در این رتبه‌بندی، دسترسی ایران به منابع فزاینده‌ی سوخت‌های فسیلی همانند گاز و نفت و سرانه استفاده بیش از میانگین جهانی از این سوخت‌ها، توسط جامعه‌ی ایرانی می‌باشد. بر اساس آمار موجود تا سال ۲۰۱۰، ایران در بین ۱۱ کشور برتر جهان در زمینه ذخایر نفت دارای ۱۳۷.۶ بلیون بشکه، بعد از کشورهای عربستان سعودی و کانادا در جایگاه سوم قرار گرفته است. همچنین با توجه به ارزیابی منابع ذخیره گاز جهان، ایران بعد از کشور روسیه با ۱۰۴۵.۷ تریلیون فوت مکعب در جایگاه دوم در بین ۹ کشور برتر دنیا قرار دارد (EIA, WWER, 2009, Najafi & et al, 2013: 2721).

1. World energy intensity

2. Tyson & et al, 2002- Sivakumar & et al, 2005- Stern, 2006.

(OGJ, 2010:2010). بطور کل عمده‌ترین منابع مصرف انرژی در ایران شامل نفت و گاز بوده که مجموع این دو، چیزی بیش از ۹۵ درصد از کل سایر منابع مصرفی انرژی در ایران را شامل می‌شود (Najfi & et al, 2013: 2721). (شکل شماره ۲).



شکل ۲- منابع مختلف مصرف انرژی در ایران بر مبنای درصد

پس، از یک طرف نقش سوخت‌های فسیلی در آلودگی هوا و تسریع در روند تغییر اقلیم و از طرف دیگر، کاهش منابع انرژی مذکور و دورنمای بحران انرژی برای دهه‌های آینده، ضرورت بررسی و شناخت منابع انرژی تجدیدپذیر را آشکار می‌سازد. یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر که دسترسی به آن برای اکثر کشورهای دنیا امکان‌پذیر می‌باشد، استفاده از انرژی باد است. این امر باعث گردیده که مطالعات مختلفی از جنبه‌های متفاوت بر مهب، استفاده، شناخت پتانسیل‌های انرژی بادی، در مناطق مختلف دنیا انجام پذیرد. در برخی از این مطالعات بر جنبه‌های مختلف ارزیابی سرعت باد تمرکز گردیده^۱، در تعدادی از این پژوهش‌ها در بکارگیری توربین‌های بادی و جنبه‌های متفاوت آن توجه شده است (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۵؛ فدایی، ۲۰۰۷؛ مصطفایی پور، ۲۰۱۰؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۳)، در نمونه‌ای از این مطالعات بر جنبه‌های تأثیر تغییر اقلیم بر پتانسیل‌های انرژی بادی تأکید گردیده (Pryor & et al, 2010). در اینجا می‌توان به تعدادی از تحقیقات که بر جنبه‌های اقتصادی انرژی بادی تأکید داشته‌اند، اشاره نمود (Demiroren & et al, 2010, Asrari & et al, 2012). لازم به توضیح می‌باشد که فقط ۰/۰۴ درصد از انرژی الکتریکی ایران از انرژی باد تولید می‌شود (Fadaya & et al, 2011: 2692). بنابراین این ضرورت ایجاد می‌شود که مطالعات دقیق‌تری بر روی پتانسیل تولید انرژی الکتریکی بوسیله انرژی بادی و توربین‌های بادی در سرتاسر ایران انجام شود. هر چند که در این راستا می‌توان به مطالعاتی که بر روی نواحی مختلف کشور انجام شده، اشاره نمود (Mirhoseini & et al, 2011). بعنوان مثال علمداری و همکاران (۲۰۱۲) با توجه به ۶۰ ایستگاه و صرفاً با استفاده از داده‌های سال ۲۰۰۷، کشور ایران را از لحاظ پتانسیل تولید انرژی بادی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در این مطالعه بر روی سرعت باد در ارتفاعات ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر از سطح زمین تمرکز کردند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که شرق و شمال غرب ایران از پتانسیل بالای تولید انرژی بادی و نواحی مرکز و جنوب ایران کمترین ظرفیت تولید انرژی بادی برخوردار می‌باشند.

در مطالعه‌ای دیگر که توسط بخش انرژی‌های تجدیدپذیر وزارت نیرو انجام پذیرفت، حدود ۱۰۰ شهر از ایران مورد مطالعه قرار گرفت که ۴۵ مورد از این شهرها که حدود ۳۳ درصد از ایستگاه‌های مطالعاتی را شامل می‌شدند، با میانگین ۶۵۰۰ مگاوات، دارای ظرفیت مناسب تولید انرژی بادی بودند (Mostafayi & et al, 2011, Ghoreishi & et

¹. Justus & Mikhail, 1976- Pashardes & Christofides, 1995- Seguro & Lambert, 2008- Kocak, 2008.

(al, 2011). از طرف دیگر نتایج مطالعات ارائه شده توسط انجمن انرژی بادی جهان، در مورد ایران نشان می‌دهد که این کشور با میانگین تولید باد به میزان ۱۳۰ مگاوات در ساعت در رتبه ۳۸ دنیا قرار گرفته است. همچنین کاویانی (۱۳۷۴)، در مقاله‌ای با عنوان توربین‌های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران، ضمن بررسی انواع توربین‌های بادی و میزان باد و سرعت لازم برای تولید برق بادی، با استفاده از آمار پنج ساله باد (۸۵-۱۹۸۱) در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور، به ارزیابی پتانسیل انرژی بادی پرداخته و نتیجه گرفته است که در کل کشور، ایستگاه قابل بهترین شرایط را برای احداث مزارع بادی دارد و پس از آن سواحل و جزایر جنوبی ایران برای این امر مناسب هستند. در تحقیقی که توسط مصطفیایی پور و ابرقویی (۲۰۰۸)، در زمینه‌ی تولید انرژی باد در منجیل انجام پذیرفت آنها با استفاده از سرعت باد برای ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، میزان تولید انرژی را $1609 Wh/m^2$ محاسبه نمودند. شبیه همین مطالعه توسط میرحسینی و همکاران (۲۰۱۱) برای سمنان و سعیدی و همکاران (۲۰۱۱) برای خراسان شمالی و جنوبی انجام پذیرفت. در پژوهش اول از میان ۵ شهر مورد مطالعه در استان سمنان، شهر معلمان با تولید انرژی به میزان $277 W/m^2$ در ارتفاع ۳۰ متری و $329 W/m^2$ در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، بیشترین ظرفیت تولید انرژی بادی در سطح استان را نشان می‌دهد. اما در مطالعه دوم، از جمله نتایج استخراج شده برای خراسان، می‌توان به قرارگیری شهر بجنورد در طبقه دوم جدول مربوط به دسترسی به منابع انرژی بادی اشاره نمود که قبلاً این طبقه‌بندی با تمام جزئیات توسط واحد انرژی‌های نو در وزارت نیرو ارائه شده بود. از طرف دیگر، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شهرهای اسفراین، نهبندان و فدشک در گروه سوم این طبقه‌بندی قرار دارند.

همچنین مطالعات دیگری توسط مصطفیایی پور (۲۰۱۰) برای یزد و کیهانی و همکاران (۲۰۱۰)، برای تهران انجام شده است. بر مبنای پژوهشی که برای نواحی کوهستانی بینالود انجام پذیرفت، مؤلفین به این نتیجه رسیدند که در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، با میانگین سرعت باد به میزان $9/5$ متر بر ثانیه، انرژی به میزان $305 W/m^2$ تولید می‌گردد (مصطفیایی پور و همکاران، ۲۰۱۳). در آخر می‌توان به کار محمدی و مصطفیایی پور (۲۰۱۳)، برای زرینه شهر اشاره نمود. خروجی کار این محققین نشان می‌دهد که با میانگین سرعت باد به میزان $4 m/s$ در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، میزان تولید انرژی $161.44 W/m^2$ محاسبه می‌شود که این میزان کاربرد مناسبی برای طراحی توربین‌های بزرگ ندارد اما این انرژی را می‌توان با توربین‌های کوچک مهار نمود. در مطالعه‌ای دیگر که توسط گندمکار (۱۳۸۸) انجام پذیرفت، ایشان ایستگاه‌های سینوپتیک کشور را از نظر سرعت وزش باد در چهار گروه مختلف قرار داد. بگونه‌ای که گروه اول در بیشتر زمان‌های سال توان بادخیزی بالایی دارند؛ گروه دوم در برخی زمان‌های سال در بخش‌هایی از شبانه روز توان بادخیزی بالایی دارند؛ گروه سوم در زمانهای محدودی از سال دارای توان بادخیزی دارند و گروه چهارم در تمام طول سال توان بادخیزی درخور توجهی ندارند. آنچه باعث تمایز تحقیق حاضر با سایر پژوهش‌های دیگر می‌باشد، استفاده نمودن از داده‌های ساعتی برای یک دوره تقریباً طولانی‌تر (۱۲ ساله) نسبت به کارهای مشابه می‌باشد که این سری زمانی به یک دوره نرمال اقلیمی نسبت به محاسبات قبلی نزدیکتر می‌باشد. که این باعث می‌شود که، انرژی باد محاسبه شده، باعث می‌گردد که دیدگاه جامع‌تری به جهت مدیریت استفاده از منبع انرژی باد فراهم گردد.

مواد و روش تحقیق:

از آنجا که باد یک متغیر برداری است و جهت و سرعت آن تحت تأثیر عوامل مختلف محلی و جوی است، لذا بازسازی داده‌های آن غیرممکن و یا با خطای زیادی توأم است (صلاحی، ۱۳۸۳: ۸۹). لذا این موضوع باعث گردید که بر روی یک دوره‌ی ۱۲ ساله که نیاز به بازسازی نباشد تمرکز گردد. بنابراین در این پژوهش از داده‌های ۳ ساعتی (۲۱، ۱۸،

۱۵، ۱۲، ۹، ۶، ۳، ۰) سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، برای یک دوره آماری ۱۲ ساله از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۴ استفاده گردیده است. تعداد ایستگاه‌های استفاده شده شامل ۴۲ مورد بوده که این ایستگاهها کامل‌ترین آمار ساعتی را در بر می‌گیرند و بنحو مناسبی در پهنه‌ی ایران گسترده شده‌اند. در جدول شماره ۱، مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های موردنظر آورده شده است. در این تحقیق برای محاسبه‌ی عددی باد از نرم‌افزار *Macro Lake Environment* در نرم‌افزار *Excel* و همچنین *Arc GIS* برای تولید نقشه‌ها استفاده گردید. نحوه‌ی تجزیه و تحلیل داده‌های آماری یا تلخیص داده‌های ساعتی در این پژوهش به این صورت می‌باشد که بر اساس الگوی طبقه‌بندی باد به روش بیفورت، فراوانی باد در هر ایستگاه به صورت ساعتی - فصلی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله بعد، مقادیر Z_0 جهت محاسبه‌ی نیمرخ سرعت باد، تهیه گردید که در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. همچنین برای محاسبات مربوط به چگالی هوا و سپس قدرت نظری توربین بادی برای طبقات مختلف انجام پذیرفت.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی به همراه مقادیر Z_0 یا طول زبری و چگالی هوا برای ایستگاههای مورد مطالعه

ایستگاه	طول	عرض	ارتفاع	Z_0	چگالی هوا	ایستگاه	طول	عرض	ارتفاع	Z_0	چگالی هوا
آبادان	۴۸.۳	۳۰.۴	۶۶	۰.۰۹	۱.۲۲۴	خوی	۴۵.۰	۳۸.۶	۱۱۰.۳	۰.۱۱	۱.۱۰۰
اهواز	۴۸.۷	۳۱.۳	۲۲.۵	۱	۱.۲۲۲	مشهد	۵۹.۶	۳۶.۳	۹۹۹.۲	۰.۲۵	۱.۱۱۲
اردبیل	۴۸.۳	۳۸.۳	۱۳۳۲	۰.۰۷	۱.۰۷۶	ارومیه	۴۵.۱	۳۷.۵	۱۳۱۵.۹	۰.۱۹	۱.۰۷۷
بابلسر	۵۲.۷	۳۶.۷	-۲۱	۰.۰۶	۱.۲۲۷	رامسر	۵۰.۷	۳۶.۹	-۲۰	۰.۷۹	۱.۲۲۷
بم	۵۸.۴	۲۹.۱	۱۰۶۶.۹	۰.۰۷	۱.۱۰۴	رشت	۴۹.۷	۳۷.۲	۳۶.۷	۰.۱۶	۱.۲۲۱
بندرعباس	۵۶.۴	۲۷.۲	۹.۸	۰.۰۵	۱.۲۱۳	سبزوار	۵۷.۷	۳۶.۲	۹۷۷.۶	۰.۰۹	۱.۱۱۴
بندر انزلی	۴۹.۵	۳۷.۵	-۲۶.۲	۰.۵۲	۱.۲۲۸	سقز	۴۶.۳	۳۶.۳	۱۵۲۲.۸	۰.۳۳	۱.۰۵۵
چابهار	۶۰.۶	۲۵.۳	۸	۰.۰۵	۱.۲۲۴	سنندج	۴۷.۰	۳۵.۳	۱۳۷۳.۲	۰.۲۲	۱.۰۷۱
دزفول	۴۸.۴	۳۲.۴	۱۴۳	۰.۰۹	۱.۲۰۸	سمنان	۵۳.۶	۳۵.۶	۱۱۳۰.۸	۰.۳۶	۱.۰۹۷
دوشان تپه	۵۱.۳	۳۵.۷	۱۲۰۹.۲	۱.۰۲	۱.۰۸۹	شهرکرد	۵۰.۹	۳۲.۳	۲۰۴۸.۹	۰.۱۱	۱.۰۰۱
اصفهان	۵۱.۷	۳۲.۶	۱۵۵۰.۴	۰.۱۴	۱.۰۵۳	شاهرود	۵۵.۰	۳۶.۴	۱۳۴۵.۳	۰.۳۵	۱.۰۷۴
فسا	۵۳.۷	۲۹.۰	۱۲۸۸.۳	۰.۰۶	۱.۰۸۰	شیراز	۵۲.۶	۲۹.۵	۱۴۸۱	۰.۱۱	۱.۰۰۶
قزوین	۵۰.۱	۳۶.۳	۱۲۷۹.۲	۰.۰۸	۱.۰۸۱	طیس	۵۶.۹	۳۳.۶	۷۱۱	۰.۰۶	۱.۱۴۳
گرگان	۵۴.۳	۳۶.۹	۱۳.۳	۰.۵۴	۱.۲۲۳	تبریز	۴۶.۳	۳۸.۱	۱۳۶۱	۰.۱۳	۱.۰۷۳
همدان نوزه	۴۸.۵	۳۴.۹	۱۷۴۱.۵	۰.۰۷	۱.۰۳۳	تهران	۵۱.۳	۳۵.۷	۱۱۹۰.۸	۱.۰۲	۱.۰۹۱
همدان	۴۸.۷	۳۵.۲	۱۶۷۹.۶	۰.۰۶	۱.۱۶۶	تربت حیدریه	۵۹.۲	۳۵.۳	۱۴۵۰.۸	۰.۱۵	۱.۰۶۳
کیش	۵۴.۰	۲۶.۵	۳۰	۰.۰۵	۱.۲۲۱	تربت جام	۶۰.۶	۳۵.۳	۹۵۰.۴	۰.۰۴	۱.۱۹۱
کاشان	۵۱.۵	۳۴.۰	۹۸۲.۳	۰.۱	۱.۱۱۴	یزد	۵۴.۳	۳۱.۹	۱۲۳۷.۲	۰.۰۵	۱.۰۶۸
کرمان	۵۷.۰	۳۰.۳	۱۷۵۳.۸	۰.۰۶	۱.۰۳۲	زاهدان	۶۰.۹	۲۹.۵	۱۳۷۰	۰.۵	۱.۰۷۱
کرمانشاه	۴۷.۲	۳۴.۴	۱۳۱۸.۶	۰.۶۱	۱.۰۷۷	زنجان	۴۸.۵	۳۶.۷	۱۶۶۳	۰.۱۴	۱.۰۴۱
خرم آباد	۴۸.۳	۳۳.۴	۱۱۴۷.۸	۰.۰۷	۱.۰۹۶	زابل	۶۱.۴	۳۱.۳	۴۸۹	۰.۴	۱.۱۶۸

منبع: یافته های تحقیق، ۱۳۹۲.

چگالی قدرت باد:

انرژی جنبشی باد می‌تواند به انرژی مکانیکی تبدیل شود و سپس الکتریسیته ژنراتور بادی یا توربین بادی مورد استفاده قرار بگیرد. جهت بکارگیری نیروی کامل باد، توربین باید، در یک ناحیه با سرعت وزش بالا و بصورت مداوم قرار داده شود. استفاده کنندگان از انرژی بادی، لازم است تا به ارزیابی میزان تولید انرژی آینده یک مزرعه بادی بپردازند.

قدرت نظری (تئوریک) توربین بادی با استفاده از سرعت باد و چگالی هوا (دانسیته)، بصورت رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود (Al yahya & et al, 2010):

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3 \quad \text{رابطه (۱)}$$

بر اساس این رابطه، P قدرت نظری توربین بر حسب وات (W)، ρ چگالی هوا بر حسب (kg/m^3)، U سرعت باد بر حسب متر مربع، شامل مساحت دایره پره‌های چرخان توربین می‌باشد. جهت استفاده از نیروی باد، توربین بادی باید تا آنجا که ممکن است نیرو را از باد بگیرد. اگر در برآورد میزان قدرت نظری توربین، میزان A برای توربین خاصی مد نظر نباشد، می‌توان مقدار آن را معادل عدد یک در نظر گرفت. در ادامه برای محاسبه چگالی نیروی باد از همان معادله شماره یک بدون در نظر گرفتن شعاع پروانه توربین استفاده گردید. بگونه‌ای که در این معادله، از توزیع فراوانی سرعت باد در محل ایستگاه و وابستگی چگالی هوا و سرعت باد استفاده می‌شود. (رابطه ۲):

$$WPD = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho u^3 \quad \text{رابطه (۲)}$$

لازم به توضیح است که بازده پره‌های توربین بادی عبارت است از نسبت انرژی جنبشی که پره‌ها از باد می‌گیرند به انرژی جنبشی کل باد که از مقابل پره‌ها عبور می‌کند. پره‌های توربین بادی کل، انرژی جنبشی باد را نمی‌گیرند؛ زیرا در این صورت باد پس از برخورد با پره‌ها سرعتش به صفر رسیده و متوقف می‌شود. بنا بر تئوری فیزیکدان آلمانی آلبرت بتر، به طور نظری حداکثر قدرت باد در یک توربین بادی که ممکن است تبدیل به انرژی مکانیکی شود ۵۹۳/۰ درصد انرژی باد است که تحت عنوان "ضریب توان ماکزیمم" مطرح می‌شود.

چگالی هوا:

چگالی هوا، بسته به ارتفاع و شرایط اتمسفری مانند فشار و درجه حرارت متغیر می‌باشد. 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 می‌یابد. با کاهش فشار با ارتفاع از سطح دریا، جرم حجمی هوا کاهش یافته و در نتیجه در سرعت‌های مشابه در ارتفاع پایین و بالا، قدرت خروجی در مناطق مرتفع تر کمتر خواهد بود. چگالی نیروی باد، بستگی به دمای هوا و فشار دارد. اگر فشار ناحیه مشخص باشد چگالی هوای ساعت به ساعت، با توجه به دمای هوا بصورت رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌گردد:

$$\rho = \frac{P}{R} \quad (kg/m^3) \quad \text{رابطه (۳)}$$

اینجا P یا (Pa) فشار هوا، R ثابت ویژه گاز برای هوا ($287 J/kgK$) و T دمای هوا در مقیاس کلوین ($C+273.15$) می‌باشد. برای اتمسفر استاندارد یعنی در فشار ۱۰۱۳ هکتوپاسکال در سطح دریا با دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، چگالی هوا مساوی با $\rho = 1.226 kg/m^3$ می‌باشد. یک فاکتور اساسی جهت تغییر در چگالی، تغییر در فشار همراه با ارتفاع می‌باشد. برای مثال، ۱۵۵۵ متر افزایش در میزان ارتفاع، می‌تواند فشار را تا ۱۵ هکتوپاسکال کاهش دهد و بنابراین، موجب کاهش نیرو تا ۱۰ درصد گردد. اگر فقط ارتفاع مشخص باشد، چگالی هوا می‌تواند توسط معادله (۴) ارزیابی گردد:

$$\rho = \rho_0 (-1.194 \times 10^{-4}) z \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در اینجا ρ_0 چگالی هوا در سطح دریا می‌باشد. بنابراین در این تحقیق جهت محاسبه‌ی چگالی هوا از رابطه‌ی ۳ استفاده گردید. قابل ذکر است که برای محاسبه‌ی چگالی هوا، علاوه بر روابط ارائه شده در این مقاله، جهانگیری و همکاران (۱۳۸۴: ۱۶۲) یک رابطه‌ی تجربی برای ایران نیز ارائه نموده‌اند.

نیمرخ عمودی سرعت باد:

تضمین درستی داده‌ها در سطح پرهی توربین، بسیار مهم است. اکثر ابزارهای اندازه‌گیری سرعت باد، از سطح ایستگاه‌های هواشناسی، معمولاً در ارتفاع ۱۰ متری بالای سطح زمین نصب می‌شوند، اما توربین‌های بادی باید بسیار بالاتر قرار بگیرند. بنابراین، می‌توان سرعت باد را در ارتفاع‌های مختلف بررسی کرد تا بتوان به بهترین ارتفاع جهت نصب توربین باد پی برد. جهت محاسبه‌ی سرعت باد برای سطوح مختلف، روش‌های متعددی وجود دارد. بعنوان مثال، رابطه‌ی ۵ یکی از این نمونه‌ها را نشان می‌دهد:

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{H}{H_r}\right)^{0.2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن V سرعت باد در ارتفاع H (مورد نظر)، و V_r سرعت باد در ارتفاع H_r (مبنای) می‌باشد. اما چون در این معادله تأثیر اصطکاک به صورت یک ضریب تجربی محض معرفی شده است بنابراین نمی‌توان این معادله را برای نواحی مختلف تعمیم داد پس در این تحقیق جهت محاسبه‌ی سرعت باد برای سطوح بالاتر از رابطه ۶ استفاده گردیده، که از روند لگاریتمی پیروی می‌کند (Al yahya & et al, 2010):

$$V_2 = V_1 \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \quad \text{رابطه (۶)}$$

بر اساس رابطه ۵، V_2 ، سرعت باد قابل پیش بینی، V_1 سرعت باد در ارتفاع مبنا، Z_2 ارتفاع مورد نظر جهت پیش بینی سرعت، Z_1 ، ارتفاع سرعت باد در ایستگاه که معادل ۱۰ متر می‌باشد. Z_0 طول زبری در مکان مورد نظر بوده که برای محاسبه‌ی آن روش‌های مختلفی پیشنهاد می‌گردد. از جمله بر مبنای جدول شماره ۲، مقادیر Z_0 برای نواحی با ویژگی‌های مختلف توپوگرافی ارائه گردیده است. اما در مقاله‌ی حاضر مقادیر Z_0 با همکاری مرکز عددی پیش بینی هواشناسی کشور عمان، که قبلاً برای نواحی وسیعی با تکنیک‌های مختلف و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با ریزمقیاسی مناسب، مقادیر Z_0 تهیه گردیده و آرشیو شده بود، استفاده گردید. بطور کلی این ضریب از حداقل ۰.۰۰۰۲ متر برای نواحی بسیار هموار سطح آنها تا ۱/۶ متر برای نواحی همجوار با ساختمان‌های بلند متغییر می‌باشد. خروجی مقادیر Z_0 برای ایستگاه‌های مختلف مطالعاتی در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر طول زبری برای مناطق مختلف (ویبرینگا، ۱۹۹۲)

طول سختی یا زبر (m)	نوع منطقه
۰/۰۰۰۲	سطح آب
۰/۰۰۲۴	منطقه کاملاً باز با سطح صاف مثلاً "باند‌ها در فرودگاه ها، اراضی که چمن های آن کوتاه شده
۰/۰۵۵	اراضی کشاورزی با تعداد محدودی سکونتگاهها و بوته زارهایی به ارتفاع ۸ متر و فاصله ی تقریبی ۱۲۵۰ متر از سایت
۰/۱	اراضی کشاورزی با تعدادی سکونتگاهها، وجود بوته زارهایی به ارتفاع ۸ متر با فاصله تقریبی ۵۰۰ متری از سایت
۰/۲	اراضی کشاورزی با خانه های بیشمار، پوش گیاهی، یا بوته زارهایی با ارتفاع ۸ متر که در فاصله ی تقریبی ۲۵۰ متری سایت قرار دارند
۰/۴	روستاها، شهرستانهای کوچک، اراضی کشاورزی با بوته زارهای بلند، جنگلها و اراضی و عوارض ناهموار
۰/۸	شهر بزرگ با ساختمانهای بلند
۱/۶	یک شهر بزرگ با ساختمانهای بلند و آسمان خراشها

لازم به ذکر است که در اکثر کارهای مشابه، ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری برای تعبیه توربینهای بادی انتخاب می‌شود. این عامل باعث شد تا این سطوح ارتفاعی ملاک کار قرار گیرند.

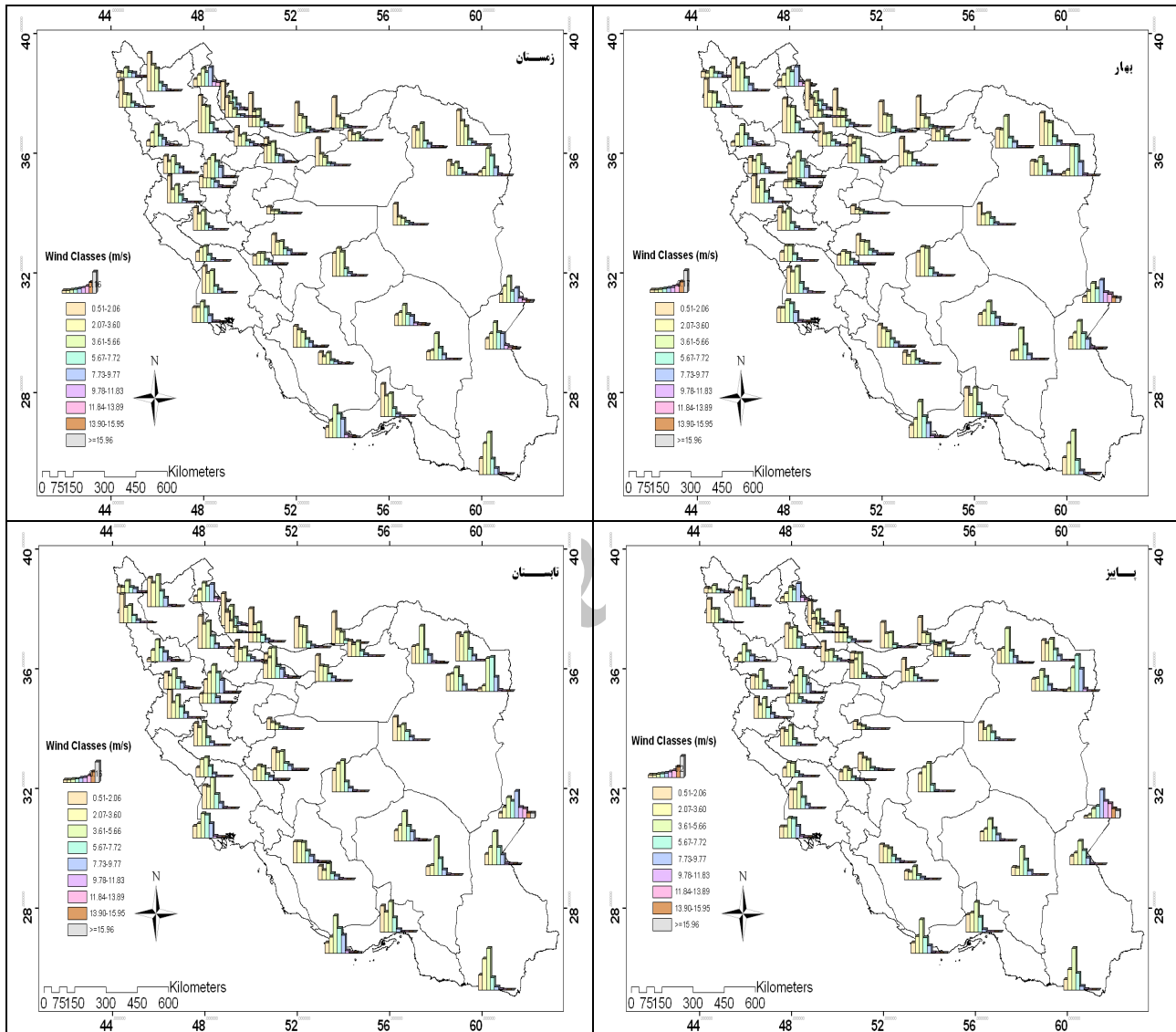
یافته‌های تحقیق:

درصد فراوانی طبقات مختلف سرعت باد:

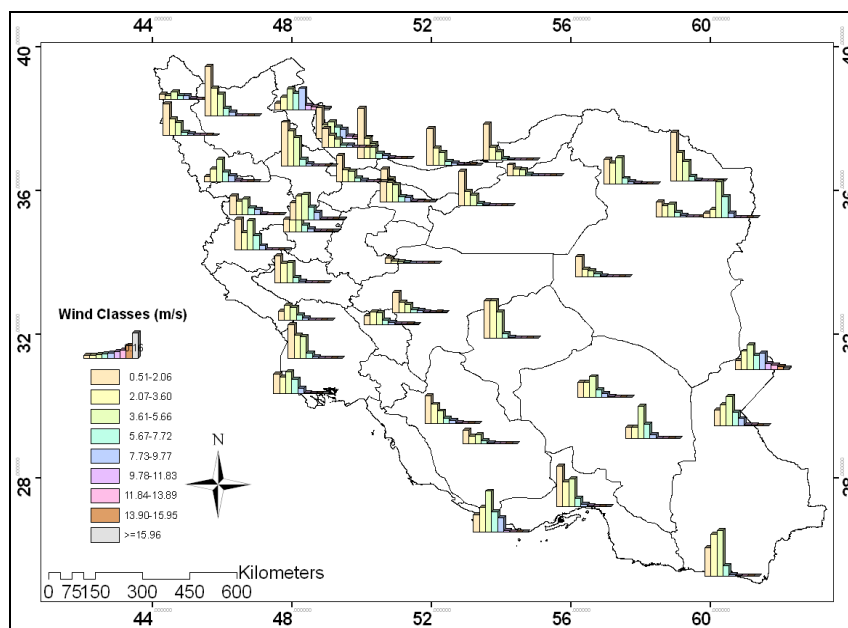
همانگونه که پیش‌تر توضیح داده شد، در این پژوهش جهت طبقه‌بندی سرعت بادها و در نهایت ارزیابی فراوانی تعداد رخدادهای باد برای هر طبقه سرعت، از جدول بیفورت استفاده شده است. در این طبقه‌بندی ۱۰ محدوده در نظر گرفته شده که محدوده کمتر از ۰.۵۱ متر بر ثانیه بعنوان وضعیت آرام در نظر گرفته می‌شود که در شکل ۳، فراوانی آن با کل دوره بادی (سرعت باد، بیش از ۰.۵۱ متر بر ثانیه) مورد مقایسه قرار گرفته است. در ادامه مجموع فراوانی رخداد باد برای هر طبقه از سرعت برای محدوده‌های $0.5-2.05$ ، $2.06-3.60$ ، $3.61-5.66$ ، $5.67-7.72$ ، $7.73-9.77$ ، $9.78-11.84$ ، $11.84-13.89$ ، $13.90-15.95$ ، $15.96 \geq$ ، متر بر ثانیه، در قالب مجموع سالانه، و فصلی در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است. در این پژوهش منظور از فصل زمستان شامل ماه‌های (ژانویه، فوریه، مارس)، بهار (آوریل، می و ژوئن)، تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) و در نهایت پاییز شامل ماه‌های (اکتبر، نوامبر و دسامبر) می‌باشد.



زمستان است، میانگین بیشترین فراوانی به طبقه اول با ۰.۱۴ درصد و طبقه دوم با ۰.۱۳ درصد، در فصل بهار طبقه سوم با ۰.۱۷ درصد و طبقه اول با ۰.۱۴ درصد، در تابستان نیز طبقه سوم با ۰.۱۷ درصد و طبقه اول با ۰.۱۳ درصد و در نهایت در پاییز طبقه اول با ۰.۱۵ و طبقه سوم با ۰.۱۲ درصد، بیشترین درصد فراوانی سرعت‌های باد را به خود اختصاص داده‌اند. (شکل‌های ۴ و ۵). از طرف دیگر، محدوده‌های سرعت برای طبقات هشتم (13.90-15.95m/s) و نهم (≥ 15.96) در تمام دوره‌ها و فصول مطالعاتی، پایین‌ترین درصد فراوانی رخداد باد را در بر می‌گیرند.



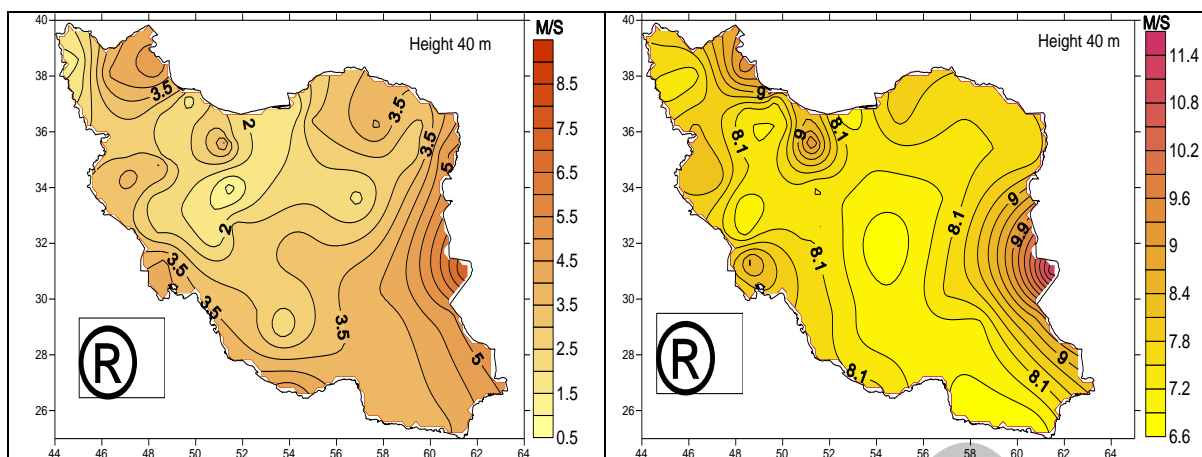
شکل ۴- درصد فراوانی طبقات مختلف سرعت باد برای فصول چهارگانه



شکل ۵- درصد فراوانی طبقات مختلف سرعت باد برای مقیاس سالانه

پهنه‌بندی و نیمرخ سرعت باد:

ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد در ایستگاههای مورد مطالعه، بطور استاندارد در ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین انجام می‌شود. اما از آنجا که برای توربین‌ها با ارتفاعهای مختلف، لازم می‌باشد که تغییرات و نیمرخ سرعت باد در ترازهای مختلف را نیز مورد ارزیابی قرار داد، پس برای این منظور با استفاده از رابطه (۶)، نیمرخ تغییرات سرعت باد برای سطوح ارتفاعی ۳۰ و ۴۰ متر نیز محاسبه گردید که نتایج میانگین تغییرات سرعت باد برای این سطوح در شکل‌های (۶ و ۷)، نشان داده شده است. اهمیت ارزیابی سرعت سالانه باد بدین منظور می‌باشد که شرکتها و کمپانیهای فعال در زمینه ی تولید انرژی بادی، ابتدا به میانگین سالانه سرعت باد و تولید انرژی در مقیاس سالانه توجه می‌نمایند و در گام بعدی به جزئیات در قالب فصل و ماه توجه می‌کنند. از طرف دیگر لازم به توضیح می‌باشد که حداقل سرعت باد، جهت مهار و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، باید بالاتر از ۴/۵ متر بر ثانیه باشد. لذا برای این منظور فقط نیمرخ میانگین سرعت بادهای بالاتر از ۴/۵ متر بر ثانیه برای سطوح مختلف مطالعاتی تهیه گردیده که در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس شکل ۶، میانگین سالانه سرعت باد، در ترازهای مختلف ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری برای کل کشور، بترتیب شامل ۶/۲۰، ۷/۶۱، ۸/۳۷، متر بر ثانیه می‌باشد. در میان ایستگاههای مورد مطالعه، زابل بیشترین سرعت باد را بترتیب با میانگین سالانه ۸/۵۹، ۱۱/۳۵ و ۱۲/۲۹ متر بر ثانیه برای سطوح ارتفاعی ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متر نشان می‌دهد. در رتبه‌های بعدی می‌توان به اردبیل، کیش، آبادان و زاهدان اشاره نمود. اما کمترین مقادیر سرعت باد به میزان ۵/۶۷، ۷/۲۵، ۸/۳۶ متر بر ثانیه، بترتیب برای سطوح ۱۰، ۳۰ و ۴۰ در گرگان مشاهده می‌شود. بعد از گرگان ایستگاههای چابهار، یزد، بابلسر و رامسر، با توجه به کمترین مقادیر سرعت باد، در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در همین راستا شکل ۷، مقایسه‌ی بین پهنه‌بندی کشور بر مبنای میانگین سالانه سرعت باد بیش از ۴/۵ متر بر ثانیه و میانگین کلی سالانه بدون در نظر گرفتن حداقل سرعت مطلوب ($4.5m/s$) در طبقات مختلف ارتفاعی را نشان می‌دهد. بر مبنای شکل ۸، میانگین کلی سالانه سرعت باد کشور، برای طبقات ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری نسبت به میانگین سالانه سرعت باد بیش از ۴/۵ متر بر ثانیه، بترتیب ۳/۹۰، ۴/۱۱، ۵/۰۵ متر بر ثانیه کاهش



شکل ۷- پهنه بندی کشور بر مبنای میانگین سالانه تغییرات سرعت باد بیش از ۴/۵ متر بر ثانیه و میانگین کلی سالانه بدون در نظر گرفتن حداقل سرعت مطلوب (4.5m/s) در طبقات مختلف ارتفاعی (نقشه‌های سمت چپ میانگین کلی سالانه و نقشه‌های سمت راست فقط میانگین سرعت بالاتر از 4.5m/s را نشان می‌دهد).

محاسبه چگالی نیروی باد:

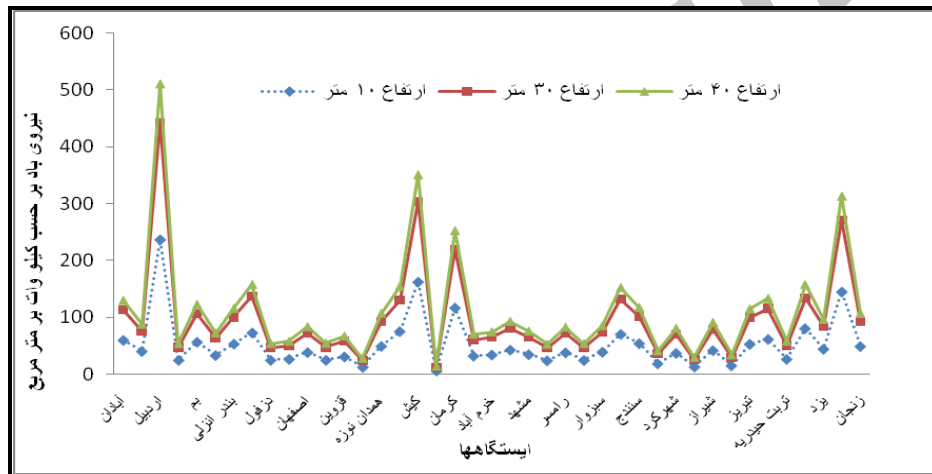
ابتدا لازم به توضیح می‌باشد که پس از محاسبه مقادیر چگالی هوا برای ایستگاههای مختلف، این مقادیر در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. بر اساس این داده‌ها، میانگین کلی چگالی هوا برای ایستگاه‌های مورد مطالعه عدد ۱/۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد که حداقل چگالی هوا بترتیب برای ایستگاههای شهرکرد، کرمان، همدان (ایستگاه نوژه) و زنجان شامل ۱/۰۰۱، ۱/۰۳۲، ۱/۰۳۳ و ۱/۰۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه گردیده و حداکثر آن در ایستگاه‌های بندر انزلی با ۱/۲۲۸، در ایستگاههای رامسر و بابلسر با ۱/۲۲۷ و در چابهار ۱/۲۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه شده است. در ادامه در این قسمت بر مبنای رابطه (۲)، مقادیر چگالی نیروی باد بر حسب وات بر متر مربع، برای فصول چهارگانه و مقیاس سالانه محاسبه گردیده که نتایج در قالب شکل‌های (۸ تا ۱۲) ارائه گردیده‌اند. بطور کلی آنچه از میانگین چگالی نیروی باد بر حسب وات بر متر مربع برای فصول مذکور استخراج می‌شود، نشان دهنده این موضوع بوده که بترتیب برای ارتفاع ۱۰ متری، فصول بهار و تابستان بطور مشترک با میانگین $69 w/m^2$ ، زمستان با $54 w/m^2$ و پاییز با میانگین $38 w/m^2$ بترتیب در جایگاه اول تا سوم تولید باد قرار گرفته‌اند. اما برای توربین‌هایی که برای ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین طراحی می‌شوند، مجدداً بهار و تابستان مشترکاً با میانگین $129 w/m^2$ در رتبه اول، زمستان با $101 w/m^2$ در رتبه دوم، و پاییز با $70 w/m^2$ در جایگاه سوم قرار دارد. در این بین، میانگین کلی چگالی نیروی باد برای ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، نشان دهنده این موضوع بوده که بهار با میانگین $150 w/m^2$ ، تابستان با میانگین $148 w/m^2$ ، زمستان با $117 w/m^2$ و پاییز با $81 w/m^2$ ، بترتیب بیشترین و کمترین ظرفیت تولید انرژی بادی را برای فصول مختلف سال نشان می‌دهند. میانگین چگالی نیروی بادی در مقیاس سالانه برای ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری از سطح ایستگاه، بترتیب شامل ۲۳۱، ۴۲۹ و ۴۹۷ وات بر متر مربع می‌باشد. لازم به توضیح بوده که نقش ایستگاه زابل در این میانگین خیلی تاثیرگذار است و پتانسیل تولید انرژی بادی در این ایستگاه بالاخص در تابستان و بهار و مقیاس سالانه، با هیچکدام از ایستگاههای دیگر قابل مقایسه نمی‌باشد. بنابراین این تفاوت عددی بگونه‌ای می‌باشد که با گنجاندن ایستگاه زابل در شکلهای ۹ تا ۱۳ باعث می‌شود که نتوان نوسانات ایستگاههای مختلف را نسبت به هم مقایسه نمود. پس ظرفیت تولید انرژی باد در ایستگاه زابل برای ترازهای مختلف ارتفاعی در قالب جدول شماره ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- توان چگالی نیروی بادی برای ترازها و فصول مختلف در ایستگاه زابل

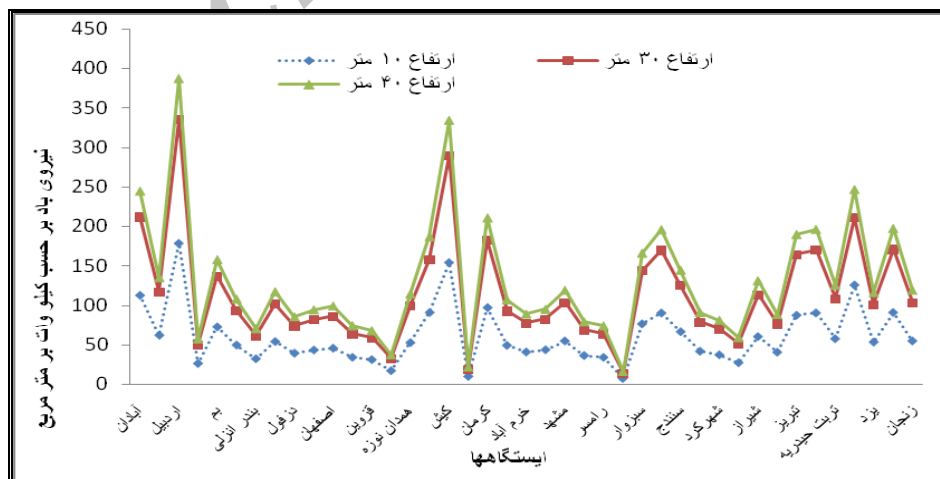
فصول	۱۰ متر	۳۰ متر	۴۰ متر
زمستان	۱۶۱.۵۳	۳۰۲.۹۵	۳۵۰.۲۲
بهار	۴۳۲.۵۳	۸۱۱.۲۳	۹۳۷.۸۲
تابستان	۷۸۶.۲۶	۱۴۷۴.۶۷	۱۷۰۴.۷۸
پاییز	۱۸۸.۹۸	۳۵۴.۴۴	۴۰۹.۷۵
سالانه	۱۵۶۹.۳۰	۲۹۴۳.۲۸	۳۴۰۲.۵۷

منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۲.

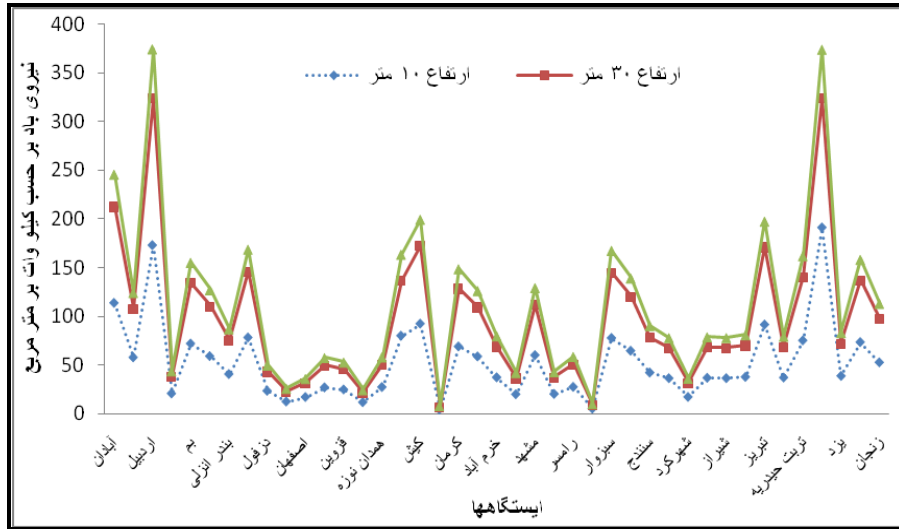
بنابراین بر مبنای خروجیها ملاحظه می‌گردد که بترتیب، شهرهای زابل، اردبیل، کیش، تربت جام، زاهدان و کرمان در مقیاس سالانه بیشترین ظرفیت تولید انرژی بادی را نشان می‌دهند. اما میانگین سالانه تولید انرژی بادی در سطح ایستگاه‌های کشور، بیان‌کننده این موضوع بوده که شهرهای کاشان، گرگان، رشت، شاهرود و دوشان تپه کمترین توانایی در تولید انرژی بادی در سطح کشور را نشان می‌دهند. (شکل شماره ۱۲).



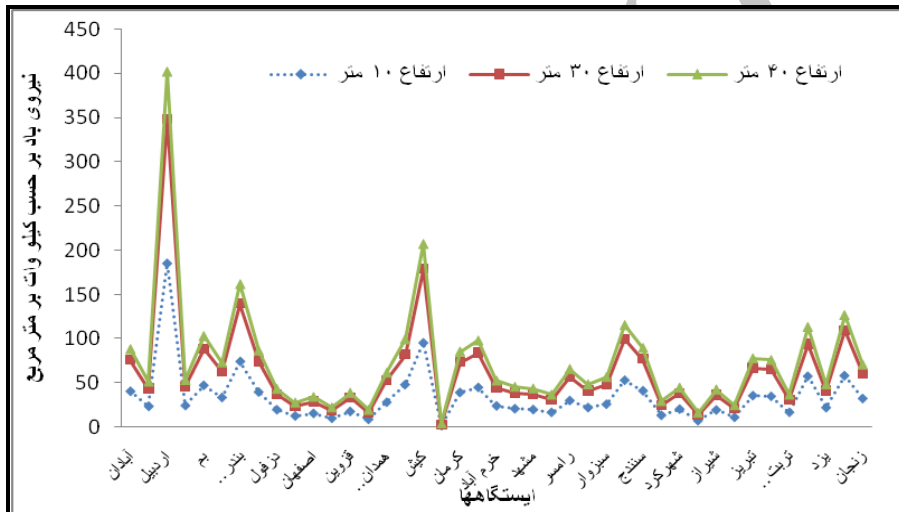
شکل ۸- توان چگالی نیروی باد بر حسب وات بر متر مربع در فصل زمستان



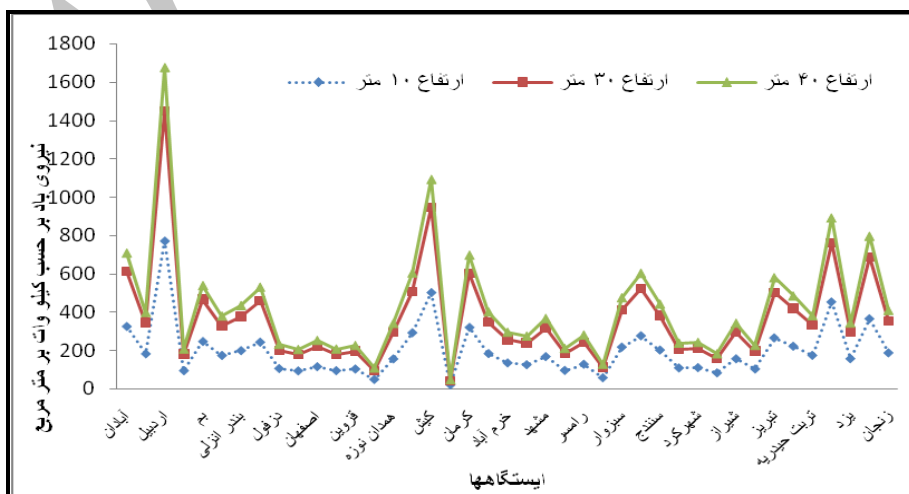
شکل ۹- توان چگالی نیروی باد بر حسب وات بر متر مربع در فصل بهار



شکل ۱۰- توان چگالی باد بر حسب وات بر متر مربع در فصل تابستان



شکل ۱۱- توان چگالی نیروی باد بر حسب وات بر متر مربع در فصل پاییز



شکل ۱۲- توان چگالی نیروی باد بر حسب وات بر متر مربع در مقیاس سالانه

نتیجه‌گیری:

با توجه به اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر در مدیریت ریسک در حوزه انرژی، این تحقیق بر روی ظرفیت تولید انرژی بادی در کشور، تمرکز نموده است. در این تحقیق بر روی پارامترهای مختلف منجمله، درصد فراوانی باد و شرایط آرامش، همچنین فراوانی رخداد بادهای برای طبقات مختلف سرعت، تهیه نیمرخ سرعت باد برای ترازهای ارتفاعی مختلف و همچنین ظرفیت چگالی نیروی باد در مقیاس فصلی و سالانه تمرکز شد. نتایج این تحقیق در زمینه‌ی مقایسه بین فراوانی دوره‌های بادی (همراه با باد) و آرام، بطور کلی بیان کننده این موضوع است که بر اساس داده‌های مجموع فراوانی سالانه، بیشترین فراوانی سرعت بادهای به طبقات سرعت سه (3.61-5.66m/s) با ۰.۱۵ درصد، طبقه یک (0.5-2.05m/s) با ۰.۱۴ و دوم (2.06-3.60m/s) با ۰.۱۱ اختصاص دارد. این نکته حائز اهمیت می‌باشد که در پروژه‌های بادی معمولاً حداقل سرعت باد مطلوب در زمینه‌ی تولید انرژی را ۴ یا ۴.۵ متر بر ثانیه در نظر می‌گیرند. بنابراین طبقه سه از این لحاظ دارای اهمیت ویژه‌ای نسبت به دو طبقه‌ی یکم و دوم می‌باشد. در ادامه میانگین تغییرات نیمرخ سرعت سالانه‌ی باد بالاتر از ۴/۵ متر بر ثانیه، برای ترازهای ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری برای کل کشور، بترتیب شامل مقادیر ۶/۲۰، ۷/۶۱ و ۸/۳۷ متر بر ثانیه می‌باشد که در این میان، ایستگاه زابل، اردبیل و کیش بیشترین و ایستگاه‌های گرگان، چابهار و یزد کمترین سرعت باد را برای ترازهای ارتفاعی مختلف نشان می‌دهند. همچنین از جمله نتایج این تحقیق می‌توان به ظرفیت تولید انرژی بادی در قالب چگالی نیروی باد کشور، در فصول مختلف سال اشاره نمود. بگونه‌ای که بطور میانگین، دو فصل بهار و تابستان بیشترین توان چگالی نیروی باد را در کشور دارا بوده و کمترین توان چگالی نیروی باد برای پاییز مشاهده می‌گردد و در این بین زابل بیشترین ظرفیت تولید سالانه انرژی بادی را نسبت به دیگر شهرها نشان می‌دهد. نکته مهم و حائز اهمیت این است که با توجه به گرمایش جهانی که در حال رخ دادن می‌باشد و کشور ما نیز مستثنی از این فرایند نیست، لذا انتظار می‌رود که با گرم شدن فصول مختلف سال بالاخص دوره گرم سال، انرژی بیشتری برای تهویه و خنک‌کنندگی ساختمانها و منازل مورد نیاز باشد. از طرف دیگر بیشترین ظرفیت تولید انرژی بادی برای دوره گرم سال کشور که شامل بهار و تابستان می‌باشد؛ مشاهده می‌گردد. پس امید است با مهار و تولید انرژی الکتریکی بوسیله توربینهای بادی، بتوان از بحران انرژی برای دهه‌های آینده کاست. در آخر پیشنهاد می‌گردد با توجه به تنوع اقلیمی، مکانی و زمانی تقاضای انرژی، برای نواحی مختلف، کشور را بر اساس پارامترهای آب و هوایی طبقه‌بندی نمود، و رژیم تغییرات روزانه باد و ظرفیت تولید انرژی برای هر طبقه اقلیمی را، با توجه به تقاضای انرژی آن ناحیه، بر اساس مقیاس ساعتی و روزانه، مورد مطالعه و واکاوی قرار داد.

منابع و مأخذ:

۱. ثقفی، محمود (۱۳۷۲): انرژی بادی و کاربرد آن در کشاورزی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، تهران.
۲. جهانگیری، زهره، رحیم زاده، فاطمه و غلامعلی کمالی (۱۳۸۴): «محاسبه انرژی باد با استفاده از توزیع ویبول دوپارامتره»، مجله تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۶، مشهد، صص ۱۷۰-۱۵۱.
۳. روشن، غلامرضا و محمد سعید نجفی (۱۳۹۰): «بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده کشور با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو»، مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، شماره ۶، سبزوار، صص ۱۰۷-۸۷.

۴. صلاحی، برومند (۱۳۸۳): «پتانسیل سنجی انرژی باد و برآزش احتمالات واقعی وقوع باد با استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال ویبول در ایستگاه های سینوپتیک استان اردبیل»، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۲، مشهد، صص ۱۰۴-۸۷.
۵. کاویانی، محمدرضا (۱۳۷۴): «توربین های بادی و ارزیابی پتانسیل انرژی باد در ایران»، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۳۶، مشهد.
6. Alamdari, P., Nematollahi, O., Mirhosseini, M., (2012): *Assessment of wind energy in Iran: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, PP.836–860.
7. Asrari, A., Ghasemi, A., Javidi, MH., (2012): *Economic evaluation of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Iran—A case study*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, PP. 3123–3130.
8. Akpinar, E.K., Akpinar, S., (2005): *An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics*. *Energy Convers Manage*, Vol. 46, PP.1848–67.
9. AL-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., Al-Alawi, S., (2010): *Assessment of wind energy potential locations in Oman using data from existing weather stations*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, PP.1428–1436.
10. Demiroren, A., Yilmaz, U., (2010): *Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy Sources in Gökceada, Turkey: an island example*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, PP.323L 333.
11. Energy Information Administration (EIA) website www.eia.doe.gov/iea.
12. Energy Information Administration (Content source). Clough LD (Topic Editor). *Energy profile of Iran*. In: Cleveland CJ, editor. *Encyclopedia of earth*; 2010. Washington, DC: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment [First published in the *Encyclopedia of Earth* June 29, 2007; last revised March 1, 2010; retrieved June 30, 2010, <http://www.eoearth.org/article/EnergyprofileofIran>].
13. Fadaia, D., Esfandabadia, Z., Abbasic, A., (2011): *Analyzing the causes of non-development of renewable energy-related industries in Iran*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, PP.2690–2695.
14. Fadaia, D., (2007): *The feasibility of manufacturing wind turbines in Iran*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.11, PP.536–542
15. Ghorashi, A., Rahimi, A., (2011): *Renewable and non-renewable energy status in Iran: Art of know-how and technology-gaps*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, PP.729–736
16. IPCC, (2007): *Summary for Policy Makers. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge.

17. Justus, C.G., Mikhail, A., (1976): *Height variation of wind speed and wind distributions statistics*, *Geophys Res Lett*, Vol.3, PP.261–4.
18. Kocak, K., (2008): *Practical ways of evaluating wind speed persistence*, *Energy*, Vol.33, PP. 65–70.
19. Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M., Abbaszadeh, R., (2010): *An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.35, PP.188–201.
20. Mohammadi, K., Mostafaeipour, A., (2013): *Using different methods for comprehensive study of wind turbine utilization in Zarrineh, Iran*, *Energy Conversion and Management*, Vol.65, PP. 463–470.
21. Mostafaeipour, A., (2010): *Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran*, *J Renew Sustain Energy Rev*, Vol.14, PP.93–111
22. Mostafaeipoura, A., Sedaghatb, A., Dehghan-Niric, A., Kalantarc, V., (2011): *Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, PP.2545–2556
23. Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Ghalishooyan, M., Mirhosseini, Y., Sefid, M., Pour-Rezaei, M., (2013): *Evaluation of wind energy potential as a power generation source for electricity production in Binalood, Iran*, *Renewable Energy*, Vol. 52, PP.222-229
24. Mirhosseini, M., Sharifi, F., Sedaghat, A., (2011): *Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, PP. 449–459
25. Moghaddam, N.B., Mousavi, M., Nasiric, M., Enayat, A., Moallemic, E., Yousefdehid, H., (2011): *Wind energy status of Iran: Evaluating Iran's technological capability in manufacturing wind turbines*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, PP. 4200–4211
26. Najafi, Gh., Ghobadian, B., (2011): *LLK1694-wind energy resources and development in Iran*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, PP.2719–2728.
27. *Oil and Gas Journal*, as of January (2010): <http://www.ogj.com/index.html>.
28. Pashardes, S., Christofides, C., 1995, *Statistical analysis of wind speed and direction in Cyprus*. *Sol Energ*, Vol.5, PP.405–14.
29. Pryor, SC., Barthelmie, R.J., (2010): *Climate change impacts on wind energy: a review*, *Renew Sustain Energy Rev*, Vol.14, PP.430–7.
30. Roshan, Gh.R., Grab, S.W., (2012): *Regional climate change scenarios and their impacts on water requirements for wheat production in Iran*, *International Journal of Plant Production*, Vol. 6, PP. 1735-8043
31. Sivakumar, M., Das, H., Brunini, O., (2005): *Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics*, *Climatic Change*, Vol. 70, PP.31–72.

32. Seguro, J.V., Lambert, T.W., (2008): *Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis*, *J Wind Eng Ind Aerodyn*, Vol.85, PP.75–84.
33. Stern, N., (2006): *Review on the Economics of Climate Change*, HM Treasury, London.
34. Saeidia, D., Mirhosseinia, M., Sedaghata, A., Mostafaeipourb, A., (2011): *Feasibility study of wind energy potential in two provinces of Iran: North and South Khorasan*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, PP.3558–3569.
35. Tyson, P., Odada, E., Schulze, R., Vogel, C., (2002): *Regional–global change linkages: Southern Africa*. In: Tyson, P., Fuchs, R., Fu, C., Lebel, L., Mitra, A.P., Odada, E., Perry, J., Steffen, W., Virji, H. (Eds.), *Global– regional Linkages in the Earth System*. START/IHDP/IGBP/WCRP. Springer, Berlin, London.
36. *World Wind Energy Report (2009)*: (WWEA). Date of publication: March 2010.06.30, <http://www.wwindea.org/home/index.php>, www.wwec2010.com.
37. *World energy intensity: total primary energy consumption per dollar of gross domestic product using purchasing power parities; 1980–2004 (XLS)*. <http://www.eia.doe.gov/pub/international/iealf/tablee1p.xls> [retrieved 2007-04-03].
38. Wieringa, J., (1992): *Updating the Davenport roughness classification*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.41, PP. 357-368.

Archive of SID