

پتانسیل سنجی انرژی باد جهت تعیین مکان بهینه برای احداث توربین‌های بادی در استان مازندران

غلامرضا جانباز قبادی^{*۱}

استادیار اقلیم شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۲۲

چکیده

امروزه به‌کارگیری انرژی‌های نو، به‌جهت فراوانی و تجدید پذیری، پاک بودن، قدرت بازدهی بالا و اقتصادی بودن، مورد توجه کشورهای مختلف جهان قرار گرفته است. انرژی باد، به دلیل جایگاه ویژه‌اش در بین انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی و حفظ آن برای نسل آینده خواهد بود. هدف از این پژوهش، تحلیل انرژی باد و برآورد پتانسیل آن و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های سرعت و تولید انرژی، جهت تعیین مکان مناسب برای احداث نیروگاه‌ها در مناطق مستعد و بادخیز استان مازندران است. برای این منظور با جمع‌آوری داده‌های سرعت و جهت وزش باد، ۵ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی استان، در طی سال‌های آماری (۲۰۰۶-۲۰۰۹) میلادی که در فاصله‌های زمانی ۳ ساعته در ارتفاع ۱۰ متری ثبت شده‌اند استفاده گردید. مشخصات سرعت و جهت باد و پارامترهای تابع توزیع احتمال ویبول آن تعیین گردید و سپس پتانسیل و چگالی توان باد ایستگاه‌های استان محاسبه گردیدند. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار ویندوگراف (windographer) به تجزیه و تحلیل انرژی باد و ترسیم گراف و نمودارها پرداخته شد و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار GIS، نقشه‌های رقومی و پهنه‌بندی شاخص‌های سرعت و انرژی باد ترسیم گردید. نتایج نشان می‌دهد، ایستگاه بلده نور با دارا بودن سرعت و چگالی قدرت باد تقریباً بالا، از توانی بالغ بر ۳۰۰ وات بر متر مربع برخوردار است، لذا مکان مناسبی برای نصب توربین‌های بادی جهت استحصال انرژی، به‌خصوص در فصول گرم سال در استان به‌شمار می‌رود.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های نو، پتانسیل انرژی باد، توربین‌های برق بادی، استان مازندران

مقدمه

توجه بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران به اهمیت انرژی در زمان اخیر و به‌خصوص در دهه‌های آینده به قدری است که با اتمام انرژی‌های فسیلی غیرقابل تجدید، چرخ عظیم تمدن بشری که به انرژی وابسته است، مختل خواهد شد (سازمان انرژی‌های نو ایران، ۱۳۸۶: ۱۹). از مجموع انرژی‌های یادشده موسوم به انرژی‌های نو، به نظر می‌رسد که استفاده از انرژی خورشید و باد در کشور ما اقتصادی‌تر و مقرون به صرفه‌تر باشد، اما به جهت هزینه گزاف تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی امروزه

توجه بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران به اهمیت انرژی در زمان اخیر و به‌خصوص در دهه‌های آینده به قدری است که با اتمام انرژی‌های فسیلی غیرقابل تجدید، چرخ عظیم تمدن بشری که به انرژی وابسته است، مختل خواهد شد (سازمان انرژی‌های نو ایران، ۱۳۸۶: ۱۹). از مجموع انرژی‌های یادشده موسوم به انرژی‌های نو، به نظر می‌رسد که استفاده از انرژی خورشید و باد در کشور ما اقتصادی‌تر و مقرون به صرفه‌تر باشد، اما به جهت هزینه گزاف تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی امروزه

*نویسنده مسئول: gghobadi@yahoo.com

برای احداث نیروگاههای بادی در مقیاس وسیع مناسب نیستند. مصطفایی پور^۲ (۲۰۱۰) در مطالعه قدرت انرژی باد برای نصب توربین در استان یزد به منظور پتانسیل یابی انرژی باد به این نتیجه رسید، که نوسانات باد به دو صورت فصلی و روزانه بوده، به این صورت که در فصل بهار و تابستان به اوج رسیده و در فصل زمستان به حداقل مقدار خود می رسد. پروین (۱۳۸۹) در بررسی انرژی های نو در ایران با تأکید بر ارزیابی پتانسیل انرژی باد در استان قم، به این نتیجه رسید که شرایط کمی و کیفی بادهای حاکم بر پهنه های استان قم برای تولید انرژی بادی، نامطلوب است. شریفی و همکاران (۱۳۸۵) در امکان سنجی احداث نیروگاه برق بادی در جرنندق تاکستان در پتانسیل یابی انرژی باد واقع در استان قزوین نشان داد که سایت مورد نظر برای تولید برق از انرژی باد بسیار مناسب تشخیص داده شده است و از نظر کلاس بندی در کلاس ۶ قرار دارد. مجرد (۱۳۹۲) در ارزیابی قابلیت های انرژی باد در استان های کرمانشاه و کردستان به این نتیجه رسید، ایستگاه بیجار از ارتفاع تقریبی ۵۰ متری و ایستگاه زرینه اوباتو، از ارتفاع ۱۰۰ متری به بعد برای نصب توربین های تجاری به صورت مزرعه بادی مناسب تشخیص داده شدند. تکیندا و همکاران (۲۰۰۳) در کشور کامرون مطالعاتی در زمینه انرژی باد صورت دادند، فدار (۲۰۱۰) در بررسی انرژی سرعت باد در نیجریه با استفاده از تکنیک شبکه عصبی - مصنوعی، نشان داد پروفیل باد در نیجریه را به خوبی تبیین نموده است. الی اوت (۲۰۰۳) در تهیه نقشه اطلس باد ارمنستان و الی اوت (۲۰۰۰) در تهیه نقشه اطلس باد فیلیپین نیز مطالعاتی داشته است. که طی آن نقشه پتانسیل انرژی باد در ارتفاع ۳۰ و ۵۰ متری به دست آمد. شفیوزمان خان (۲۰۰۶) در مطالعه انرژی باد منطقه کوتابیا ساحلی بنگلادش با استفاده از آمار سرعت باد به این نتیجه رسید که کناره های شرقی و جنوبی برای تولید انرژی الکتریکی با استفاده از توربین های بزرگ، جایی که چگالی انرژی باد در

در بین انرژی های تجدیدپذیر انرژی باد یکی از اقتصادی ترین انرژی های تجدیدپذیر در تولید برق است که علاوه بر عدم آلودگی محیط زیستی و فراوان و دائمی بودن، کمترین نوسانات قیمتی را نیز دارد (شریفی و همکاران، ۱۳۸۵). حداقل سرعت باد برای راه اندازی این توربین ها ۳ متر بر ثانیه و حداکثر قدرت آن ها در سرعت های ۱۲ الی ۱۵ متر بر ثانیه حاصل می شود (جمیل و همکاران، ۱۳۸۳: ۵۷). اگر کل مصرف ساکنان کره زمین را ۱۰ تراوات به حساب آوریم، حدود ۰/۶ درصد آن می تواند جوابگوی ساکنان کره زمین باشد (العابدی و همکاران^۱، ۲۰۰۵: ۱۴۹۱). در مناطقی که بیش از ۵۰ درصد اوقات سال هوا آرام است احداث توربین های بادی توصیه نمی شود (لندبرگ^۲، ۱۹۹۷: ۳۶۱). مازندران با آب و هوایی متنوع، همراه وجود تنوع توپوگرافی و به تبع آن ایجاد مراکز فشار حرارتی محلی، سبب شده است که در برخی نقاط استان در طول سال، بادهایی با شدت های مختلف بوزد. با توجه به گسترش استفاده از انرژی باد جهت تولید برق، مکان یابی مناطق مستعد جهت تأسیس مزارع باد در مناطق شمالی و حفظ محیط زیست منطقه، امری ضروری به نظر می رسد (مصطفایی پور^۳، ۲۰۰۸: ۹۴).

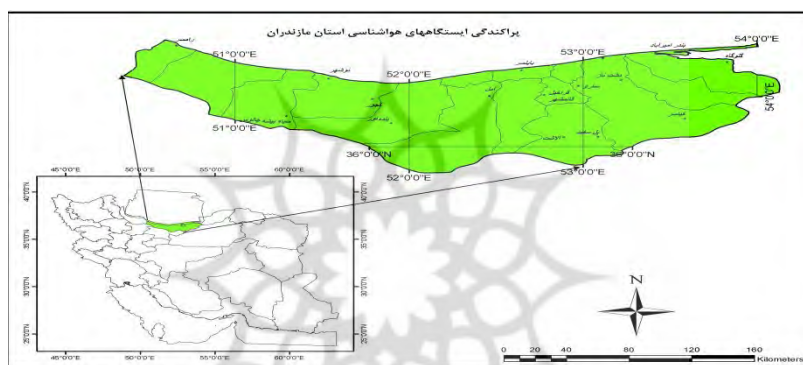
بر اساس ماده ۶۲ قانون برنامه سوم، دولت باید برق تولید شده از منابع تجدیدپذیر را به صورت تضمینی خریداری کند. از این رو اصلاح قیمت پایه خرید برق از نیروگاه های تجدید پذیر در جلب سرمایه گذاران بخش خصوصی بسیار مؤثر است (ثقفی، ۱۳۸۲: ۷۹). رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی امکان سنجی استفاده از انرژی باد در استان های اردبیل و زنجان با بررسی پتانسیل انرژی باد به این نتیجه رسیدند، ایستگاه اردبیل پتانسیل بالایی برای بهره برداری از انرژی باد دارد. کیهانی و همکاران^۱ (۲۰۱۰) در ارزیابی پتانسیل یابی انرژی باد در شهر تهران، به این نتیجه رسیدند، مکان مورد مطالعه با توجه به داشتن سرعت باد کمتر از ۵ الی ۶ متر بر ثانیه

1. Al-Abbad, et al
2. Landberg
3. Mostafaipoura

محدوده و قلمرو پژوهش

استان مازندران با وسعتی معادل ۲۳۷۵۶/۴ کیلومترمربع حدود ۱/۴۶ درصد از مساحت کشور را در برداشته و از لحاظ مساحت خاکی هیجدهمین استان کشور است. این استان بین ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی و بین ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی از نصفالنهار گرینویچ قرار گرفته است. کلیه اطلاعات مربوط به داده‌های باد از واحد آمار ۵ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی استان مازندران تهیه شده است. شکل ۱ و جدول ۱ موقعیت ایستگاههای هواشناسی استان مازندران را نشان می‌دهد.

ارتفاع ۵۰ متر یا بالاتر حدود ۲۰۰ وات بر متر مربع است امیدوارکننده باشد. استان مازندران در سالهای اخیر نیاز بیشتری به مصرف انرژی پیدا کرده است. لذا با توجه به قابلیت های این استان در تولید انرژی‌های نوین، شناخت پتانسیل های تولید انرژی پاک و مصرف آن، به خصوص انرژی بادی، بایستی در اولویت برنامه‌های مسئولان و محققان قرار گیرد. به همین منظور در این تحقیق با هدف شناخت پتانسیل باد استان و تعیین مکان بهینه و مستعد و بادخیز جهت نصب توربین‌های بادی و یا احداث مزارع بادی به جمع‌آوری داده‌های سرعت و جهت وزش باد، ۵ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی استان، پرداخته است.



شکل ۱: موقعیت و پراکندگی ایستگاههای هواشناسی استان مازندران

جدول ۱: موقعیت ایستگاههای هواشناسی استان مازندران

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریای آزاد به متر	حداکثر سرعت باد سالانه دوره آماری متر بر ثانیه
بندرامیرآباد	۳۶،۵۱	۵۳،۲۲	-۲۰	۲۵
بلده	۳۶،۱۲	۵۱،۴۸	۲۱۲۰	۲۸
سیاه بیسه	۳۶،۱۵	۵۱،۱۸	۱۸۵۵،۴	۳۰
بایلسر	۳۶،۴۳	۵۲،۳۹	-۲۱	۲۲
رامسر	۳۶،۵۴	۵۰،۴۰	-۲۰	۲۸

فاصله‌های زمانی ۳ ساعته در ارتفاع ۱۰ متری ثبت شده‌اند استفاده گردید. مشخصات سرعت و جهت باد و پارامترهای تابع توزیع احتمال ویبول آن تعیین گردید و سپس پتانسیل و چگالی توان باد ایستگاههای استان محاسبه گردیدند. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار ویندوگرافر (Windographer) به تجزیه و تحلیل انرژی باد و ترسیم گراف و نمودارها پرداخته

مواد و روش‌ها

به منظور برآورد اولیه انرژی قابل حصول از جریان باد در استان مازندران، محاسبات لازم بر روی اطلاعات سمت و سرعت باد در یک بازه زمانی ۴ ساله انجام شد. با جمع‌آوری داده‌های سرعت و جهت وزش باد، ۵ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی استان، در طی سال‌های آماری (۲۰۰۶-۲۰۰۹) میلادی که در

شد و در نهایت با استفاده از نرم افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه های پهنه بندی شاخص های سرعت و انرژی باد ترسیم گردیده اند.

تابع توزیع احتمال ویبول: با توجه به ماهیت تصادفی باد با اندازه گیری های طولانی در بازه زمانی مختلف از تابع توزیع چگالی احتمال سرعت باد ویبول برای محاسبه انرژی باد استفاده می شود.

$$\text{رابطه (۷)} \quad a = \frac{[0.37 - 0.088 \ln V_{10}]}{[1 - 0.088 \ln (z_{10} / 10)]}$$

متوسط شدت قدرت باد: در دوره ای که باد می وزد به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{رابطه (۸)} \quad WPD = \frac{\sum_{i=1}^N 1/2 \rho v_i^3}{N}$$

جایی که i سرعت باد ۳ ساعته اندازه گیری شده، و N کل نمونه داده ها برای هر سال، علاوه بر آن محاسبه شدت قدرت باد بر مبنای سرعت باد اندازه گیری شده می تواند به وسیله آنالیز توزیع ویبول با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

رابطه (۹)

$$\frac{P}{A} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho V^3 f(V) dV = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right)$$

چگالی انرژی باد: میزان چگالی انرژی باد در یک مکان می تواند از این رابطه به دست آید:

$$\text{رابطه (۱۰)} \quad \frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right)$$

یافته های تحقیق

جهت برآورد اولیه انرژی قابل حصول از جریان باد در ایستگاه های استان مازندران با محاسبه لازم بر روی اطلاعات سمت و سرعت باد در یک بازه زمانی ۴ ساله با توجه به جدول شماره (۲) ایستگاه بلده در بین ایستگاه های استان از بیشترین سرعت باد (۴/۶ متر بر ثانیه) در ماه های گرم سال (ماه جولای) و از حداقل سرعت باد در ماه های سرد (ژانویه) برخوردار است که بیانگر وجود شرایط بادخیزی این منطقه در استحصال انرژی برق است. ایستگاه های امیر آباد (۳,۶ متر بر ثانیه) در ماه جولای و سیاه بیشه (۳,۶ متر بر ثانیه) در ماه فوریه در مرحله بعدی قرار می گیرند و مابقی ایستگاهها، سرعت باد پایین تری دارند.

رابطه (۱)

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

که در آن V سرعت باد c و k به ترتیب پارامترهای مقیاس و شکل هستند. این پارامترها را می توان با استفاده از روش (Maximum likelihood) از معادلات زیر محاسبه نمود (اکپینار و همکاران^۲، ۲۰۰۵: ۵۱۷).

$$\text{رابطه (۲)} \quad k = \left(\frac{\delta}{v}\right)^{-1.086} \quad (1 \leq k \leq 10)$$

رابطه (۳)

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

جایی که سرعت متوسط باد عبارتند از:

$$\text{رابطه (۴)} \quad \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

محاسبه پتانسیل انرژی باد: قدرت انرژی باد با مکعب سرعت باد رابطه مستقیم دارد:

$$\text{رابطه (۵)} \quad p(v) = \frac{1}{2} \rho v^3$$

که در آن ρ چگالی هوای استاندارد در سطح دریا با دمای متوسط ۱۵ درجه سانتیگراد و فشار یک اتمسفر $\left(\frac{kg}{m^3}, 1.225\right)$ و \bar{v} متوسط سرعت باد است (سلیک^۳، ۲۰۰۳: ۵۹۷).

قدرت انرژی باد محاسبه شده در ارتفاع ۱۰ متری از رابطه زیر است.

$$\text{رابطه (۶)} \quad P_{10} = \frac{1}{2} \overline{\rho v^3} (W / m^2)$$

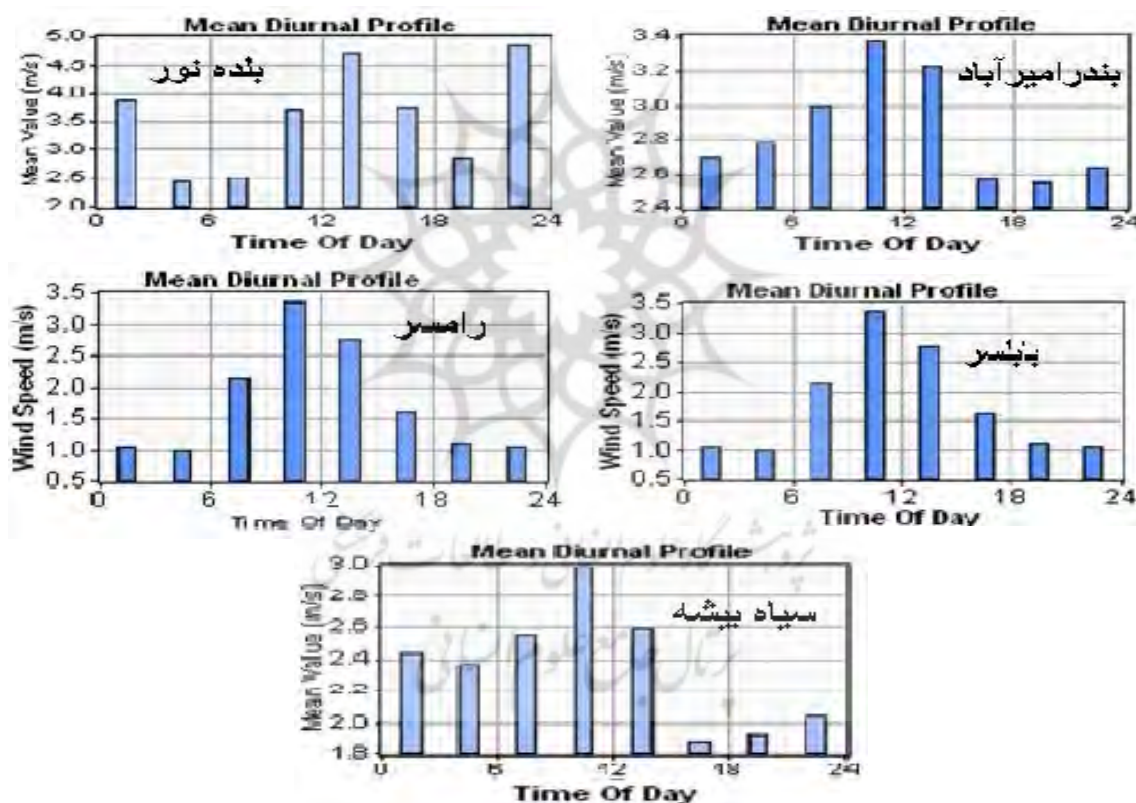
برای تخمین سرعت باد در ارتفاعات بالاتر از رابطه

1. Weibull Probability Density Function
2. Akpinar et al
3. Selic

جدول ۲: متوسط سرعت حداکثر و حداقل باد ایستگاههای استان مازندران (۲۰۰۹-۲۰۰۶)

ایستگاه	متوسط سرعت باد	
	حداقل	حداکثر
امیرآباد	۲/۴ ژانویه	۳/۶ جولای
بلده	۲/۳ ژانویه	۴/۶ جولای
بابلسر	۱/۵ نوامبر	۲/۷ آوریل
رامسر	۱/۵ ژانویه	۲/۱ مارس
سیاه بیشه	۱/۵ جولای	۳/۶ فوریه

منبع: اداره کل هواشناسی استان مازندران



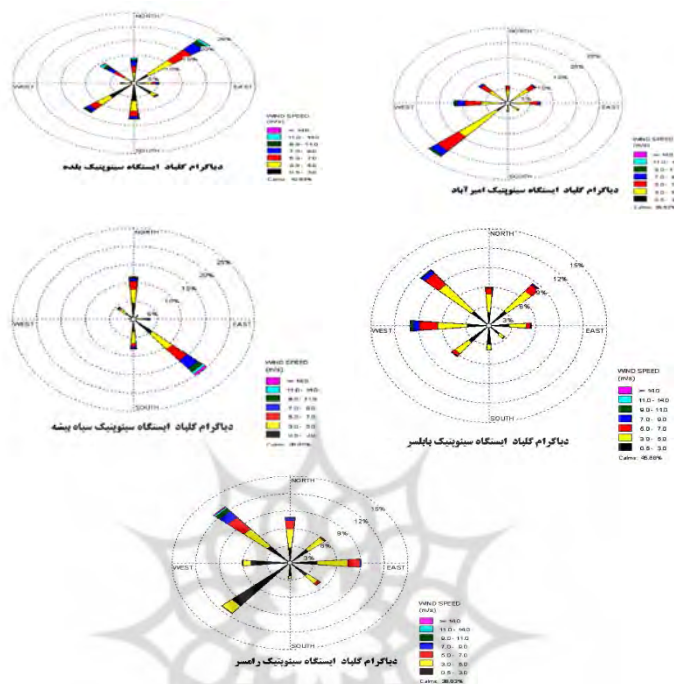
شکل ۲: نمودار روزانه سرعت باد ایستگاههای استان مازندران

و به طور طبیعی در اواسط روز این مقدار بیشتر است. تندبادهایی با سرعت ۲۳ متر بر ثانیه در ماههای نوامبر و آوریل از خصوصیات خاص این منطقه ساحلی مازندران است. در منطقه سیاه بیشه حداکثر وزش باد در اواسط روز از ساعات ۱۰ صبح تا ۱۶ عصر به وقوع پیوسته است و این امر بیانگر آن است که در

بررسی روند روزانه سرعت باد: در تجزیه و تحلیل داده‌های روزانه باد، بر اساس شکل ۲ نمودار روزانه سرعت باد ایستگاههای استان، ایستگاه بلده در طول شبانه‌روز از وزش باد برخوردار است. متوسط سرعت باد در ماههای تابستانی بیشتر است. در بندر امیرآباد در اکثر ساعات شبانه‌روز به طور یکنواخت باد می‌وزد

سیاه‌بیشه است. ایستگاه رامسر و بابلسر به علت شرایط ساحلی بودن منطقه و نزدیکی به دریا در طول روز میزان باد وزیده از ساعت ۹ الی ۱۶ محلی بیشتر از سایر زمان‌های شبانه روز می‌باشد.

اواسط روز بیشتر می‌توان از این انرژی بهره‌مند شد؛ همچنین حداکثر سرعت‌های روزانه بالاتر از ۵ متر بر ثانیه نشان‌دهنده غنی بودن منطقه از نظر ورزش بادهای نسبتاً شدید در اکثر ماههای سال در منطقه



شکل ۳: نمودار مربوط به جهت باد و فراوانی آن (گل‌باد)

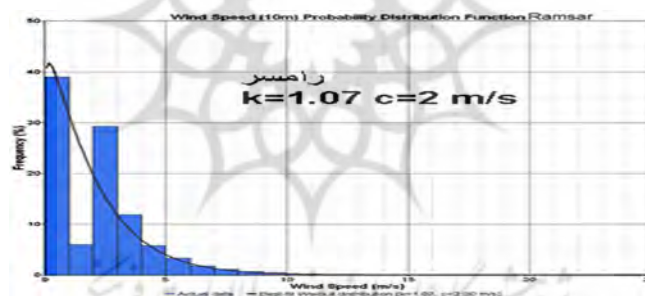
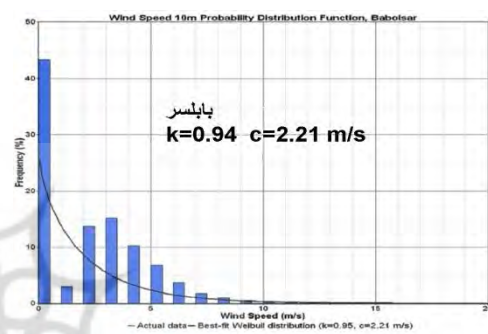
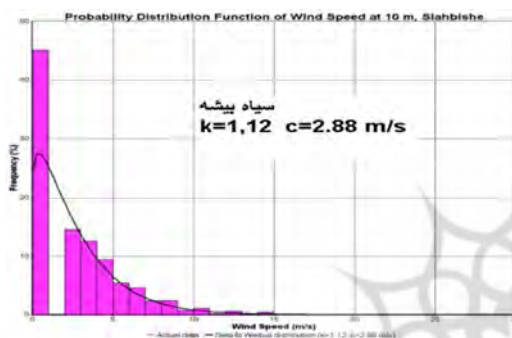
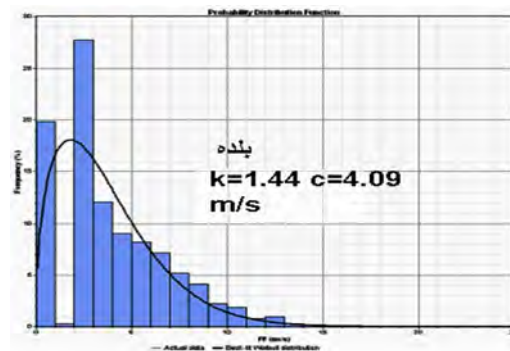
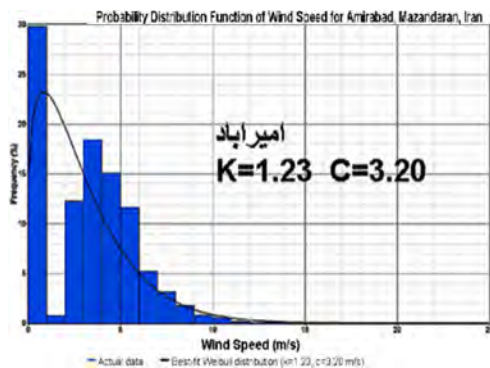
قرارگیری در طول سواحل، با جهت باد شمال‌غربی (۳۶۰-۲۷۰ درجه) دارای وزش باد در جهات مختلف هستند.

برآورد فراوانی مقادیر سرعت باد: شکل (۴) هیستوگرام فراوانی و نمودار منحنی توزیع ویبول با مقادیر پارامتر k و c ، ایستگاههای استان مازندران را نشان می‌دهد. ایستگاه بلده در بین ایستگاههای استان از بیشترین فراوانی مقادیر سرعت باد در محدوده ۳ تا ۵ متر بر ثانیه با مقدار حداکثر پارامترهای k و c برخوردار است که در محدوده سرعت راه‌اندازی توربین‌ها قرار دارد و مکان مناسبی جهت احداث نیروگاه برق بادی است. ایستگاههای امیرآباد و سیاه‌بیشه با فراوانی مقادیر سرعت باد در محدوده ۲ تا ۵ متر بر ثانیه از دیگر مکان‌های مستعد جهت احداث نیروگاههای کوچک بادی برای

شکل (۳) جهت باد غالب ایستگاههای هواشناسی استان را نشان می‌دهد. در بین این ایستگاهها، ایستگاه بلده با جهت باد غالب شمال شرقی (۹۰-۰) درجه، از لحاظ حداکثر انرژی قابل استحصال که ۲۸ درصد باد وزیده را به خود اختصاص داده است، اهمیت چشمگیری دارد. در این ایستگاه ۱۹/۸۳ درصد از طول سال هوا آرام است و بادی نمی‌وزد و در واقع حدوداً ۸۰ درصد از سال وزش باد وجود دارد که از ویژگی‌های مثبت این منطقه به شمار می‌آید. ایستگاه امیرآباد با جهت باد غالب جنوب‌غربی و با ۲۹.۸ درصد از طول سال با هوای آرام در مرحله بعدی و ایستگاه سیاه‌بیشه با جهت باد غالب جنوب‌شرقی (۱۸۰-۹۰ درجه) با بیش از ۵۰ درصد از اوقات سال دارای وزش باد است که برای استقرار توربین‌های بادی مناسب هستند. ایستگاه بابلسر و رامسر با

پایین سرعت باد و عدم شرایط بادخیزی بهینه جهت احداث نیروگاهها در اولویت قرار نمی‌گیرند.

فعالیت‌های بخصوص به شمار می‌آیند. اما ایستگاههای بابلسر و رامسر به جهت فراوانی مقادیر



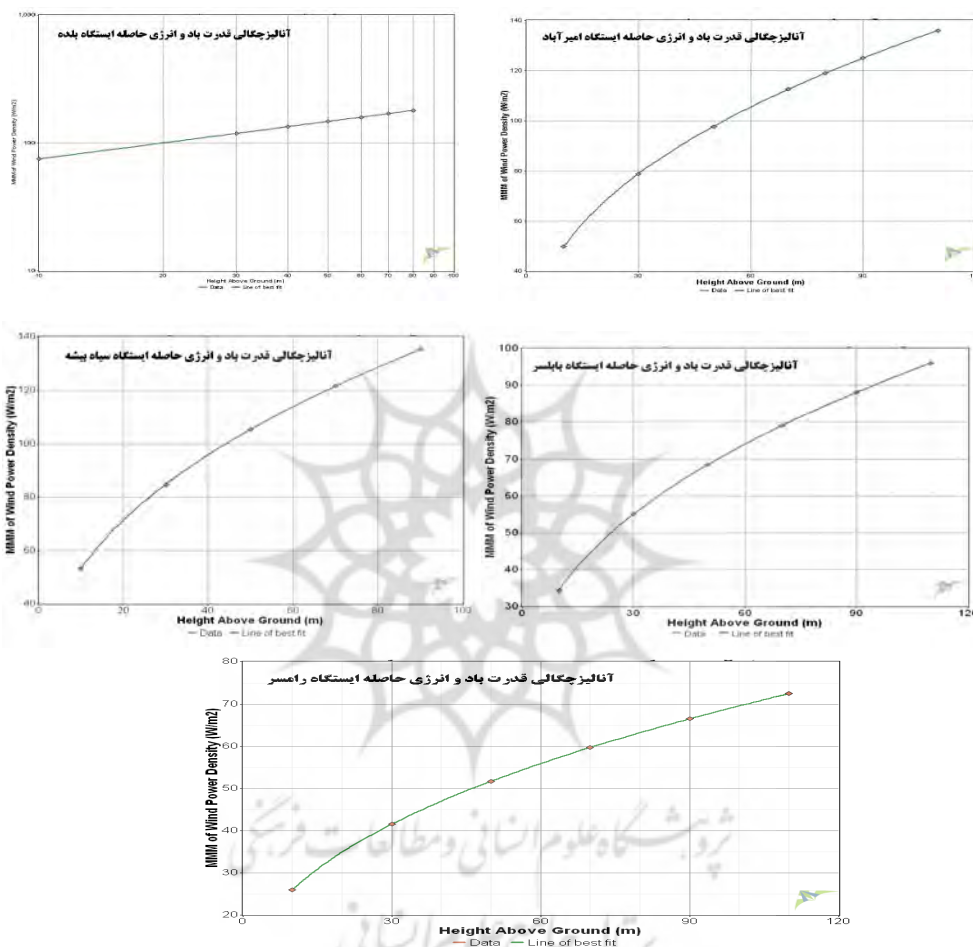
شکل ۴: هیستوگرام فراوانی و نمودار منحنی توزیع ویبول ایستگاههای استان مازندران

وات و در ارتفاع ۵۰ متری حدوداً دارای ۱۴۷ وات بر متر مربع بیشترین چگالی قدرت باد را دارد و در کلاس‌بندی توان باد (جدول ۳) در کلاس (۱) قرار می‌گیرد. بیشترین چگالی قدرت باد آن مربوط به ماههای گرم سال به خصوص در ماههای ژوئن و جولای به میزان ۶۶/۹ کیلو وات بوده و حداقل آن در ماههای سرد سال (ماه ژانویه) به مقدار ۱۵ کیلو وات است. بیشترین چگالی قدرت باد در امیرآباد مربوط به ماههای گرم سال به خصوص در ماه جولای به میزان ۴۵ کیلو وات و حداقل آن در ماه اکتبر به مقدار ۱۹/۵ کیلو وات است. بیشترین چگالی قدرت باد در سیاه-

بررسی روند چگالی قدرت باد: چگالی نیروی باد توسط دو عامل یعنی سرعت باد و ارتفاع تعیین و دسته‌بندی می‌گردد. میزان چگالی انرژی در ارتفاع ۵۰ متری تقریباً دو برابر چگالی انرژی در ارتفاع ۱۰ متری است. باتوجه به این که سرعت باد با تغییرات ارتفاع متناسب است و خروجی انرژی توربین باد با توان سوم سرعت باد متناسب می‌باشد، لذا براساس شکل (۵) و جدول (۴) ایستگاه بلده در بین سایر ایستگاههای استان با توجه به موقعیت منطقه در طی دوره آماری دارای چگالی انرژی باد در ارتفاع ۱۰ متری حدوداً ۱۰۰ وات متر مربع و در ارتفاع ۳۰ متری تقریباً ۱۲۰

مقدار ۱۱ کیلو وات است. ایستگاه رامسر کمترین چگالی قدرت باد را نسبت به مابقی ایستگاهها دارد. بیشترین چگالی قدرت باد در رامسر در ماههای گرم سال به خصوص در ماه جولای به میزان ۱۷/۲ کیلو وات بوده و حداقل آن در ماه سپتامبر به مقدار ۹/۶ کیلو وات است.

بیشه مربوط به ماههای سرد سال به خصوص در ماه فوریه به میزان ۴۷/۶ کیلو وات بوده و حداقل آن در ماههای گرم سال (ماه جولای) به مقدار ۱۰/۱ کیلو وات است. بیشترین چگالی قدرت باد در بابلسر در ماههای گرم سال خصوصا در ماه جولای به میزان ۳۲ کیلو وات بوده و حداقل آن در ماه سپتامبر به



شکل ۵: نمودار منحنی چگالی قدرت باد و انرژی حاصله بر حسب ارتفاع از سطح زمین

جدول ۳: کلاس بندی سایت های مدنظر جهت احداث نیروگاه برق بادی بر اساس چگالی توان باد (سایت rredc)

Wind Power Class01	Height= 50 m	
	Wind Power Density (W/m ²)	Speed (m/s)
۱	۰-۲۰۰	۰-۵/۶
۲	۲۰۰-۳۰۰	۵/۶-۶/۴
۳	۳۰۰-۴۰۰	۶/۴-۷/۰
۴	۴۰۰-۵۰۰	۷/۰-۷/۵
۵	۵۰۰-۶۰۰	۷/۵-۸/۰
۶	۶۰۰-۸۰۰	۸/۰-۸/۸
۷	۸۰۰-۲۰۰۰	۸/۸-۱۱/۹

جدول ۴: میانگین سرعت و چگالی قدرت باد در ارتفاعات مختلف ایستگاههای استان مازندران (۲۰۰۶ الی ۲۰۰۹)

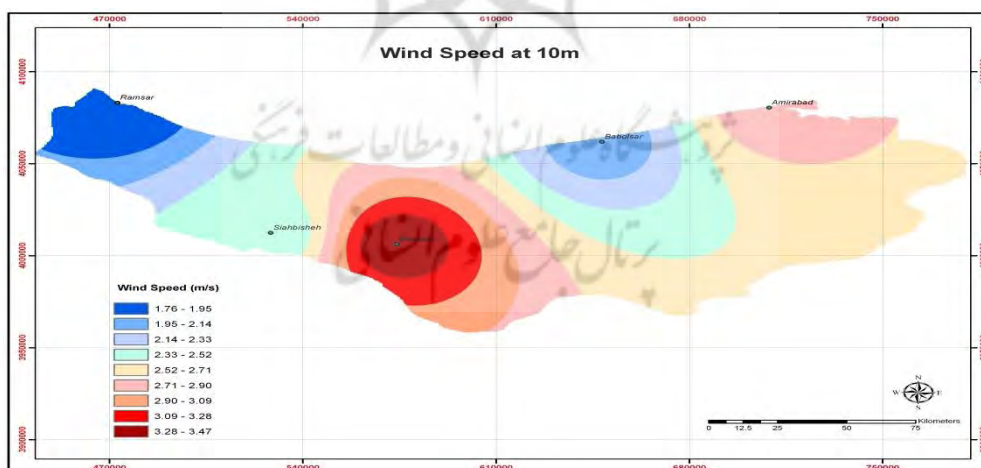
ارتفاع ۵۰ متری		ارتفاع ۳۰ متری		ارتفاع ۱۰ متری		ایستگاه
چگالی قدرت باد w/m ²	سرعت متوسط باد m/s	چگالی قدرت باد w/m ²	سرعت متوسط باد m/s	چگالی قدرت باد w/m ²	سرعت متوسط m/s	
۱۲۷	۳,۵۷	۹۹	۳,۳۲	۶۵	۲,۸۳	امیرآباد
۱۴۷	۴,۳۶	۱۲۰	۴,۰۶	۱۰۰	۳,۴۸	بلده
۱۰۵,۵	۲,۹۴	۸۴	۲,۷۳	۵۳	۲,۳۶	سیاه بیشه
۵۳	۲,۲۲	۴۳	۲,۰۶	۲۵	۱,۷۷	رامسر
۶۸	۲,۶۱	۵۵	۲,۴۲	۳۴	۲,۰۶	بابلسر

مرحله بعدی قرار می گیرند. به طوری که ایستگاه امیرآباد حدود ۶ ماه از سال با سرعت باد بالای ۳ متر بر ثانیه را داشته است،

همچنین با توجه به شکل ۶: نقشه پهنه بندی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین استان مازندران این شکل ایستگاه بابلسر (۲,۷ متر بر ثانیه) در ماه آوریل و ایستگاه رامسر (۲,۵ متر بر ثانیه) در ماه مارس، کمترین متوسط سرعت باد ماهانه را در طول سال دارند. به طوری که ایستگاه بابلسر حدود ۲ ماه از سال سرعت بالای ۲/۵ متر بر ثانیه را تجربه می کند و ایستگاه رامسر حدود یک ماه از سال سرعت بالای ۲ متر بر ثانیه در آن رخ داده است.

پهنه بندی سرعت باد

پهنه بندی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین: با توجه به شکل (۶) ایستگاه بلده با میانگین سرعت باد (۳,۴۷ متر بر ثانیه) در ارتفاع ۱۰ متری در ماه جولای حداکثر میانگین سرعت باد را (۴,۶ متر بر ثانیه) نسبت به ایستگاههای دیگر استان دارد. به طوری که حدود ۵ ماه از سال سرعت باد بیش از ۴ متر بر ثانیه را در ارتفاع ۱۰ متری تجربه کرده است و نشانگر محدوده مناسب در نصب توربینها برای استحصال انرژی بادی است. به دنبال آن ایستگاههای امیرآباد و سیاه بیشه با حداکثر میانگین سرعت باد (۳/۶ متر بر ثانیه) به ترتیب در ماه جولای و ماه فوریه در



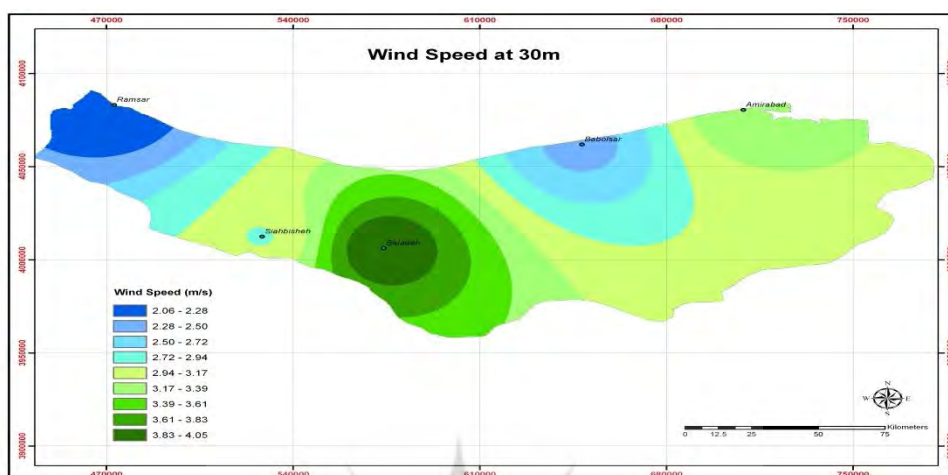
شکل ۶: نقشه پهنه بندی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین استان مازندران

ماه جولای برخوردار است که می تواند دلیل خوبی برای بادخیز بودن منطقه و نصب توربینها باشد. در این ایستگاه حدود ۳ ماه از سال سرعت باد بالای ۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۳۰ متری به خصوص در ماههای

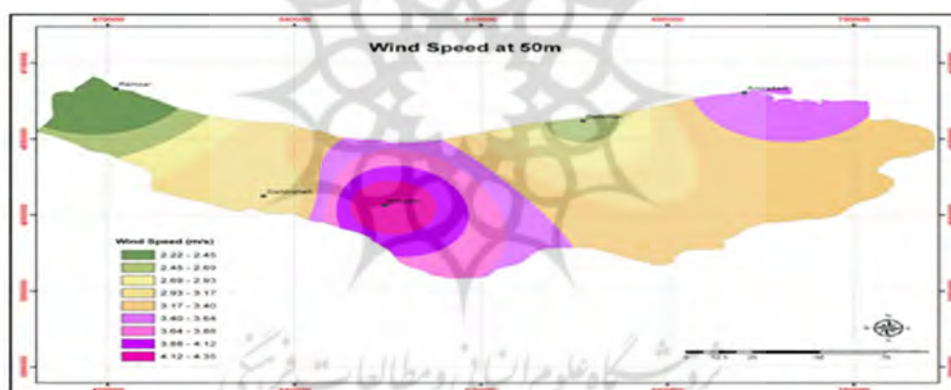
پهنه بندی سرعت باد در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین: با توجه به شکل (۷) ایستگاه بلده با میانگین سرعت باد (۴,۰۶ متر بر ثانیه) در ارتفاع ۳۰ متری دارای حداکثر میانگین سرعت باد (۵,۳ متر بر ثانیه) در

تجربه می‌کنند. متوسط سرعت باد در ایستگاه بابلسر و رامسر در اکثر ماههای سال در محدوده کمتر از ۳ متر بر ثانیه بوده است.

گرم سال (از ژوئن تا جولای) را تجربه می‌کند. ایستگاههای امیرآباد و سیاه‌بیشه به ترتیب حدود ۸ ماه (از فوریه تا سپتامبر) و ۵ ماه از سال (ماههای سپتامبر تا آوریل) با سرعت باد بالای ۳ متر بر ثانیه را



شکل ۷: نقشه پهنه‌بندی سرعت باد در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین استان مازندران



شکل ۸: نقشه پهنه‌بندی سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین استان مازندران

و شرایط مناسبی جهت راه‌اندازی توربین‌ها و استحصال انرژی را ترغیب می‌کند. ایستگاه امیرآباد با سرعت متوسط باد ۳/۵۷ متر بر ثانیه در ۲ ماه از سال با سرعتی متوسط بیش از ۴ متر بر ثانیه را در ماه ژوئن و جولای داشته است. به طوری که بیشترین مقادیر سرعت باد در محدوده ۲ تا ۵ متر بر ثانیه در این ایستگاه دیده می‌شود، لذا می‌توان با نصب توربین‌های کوچک و بزرگ تولید انرژی باد در این ایستگاه امکان‌پذیر خواهد بود. ایستگاه سیاه‌بیشه در ارتفاع ۵۰ متری در ماههای فوریه و مارس از مرز ۴

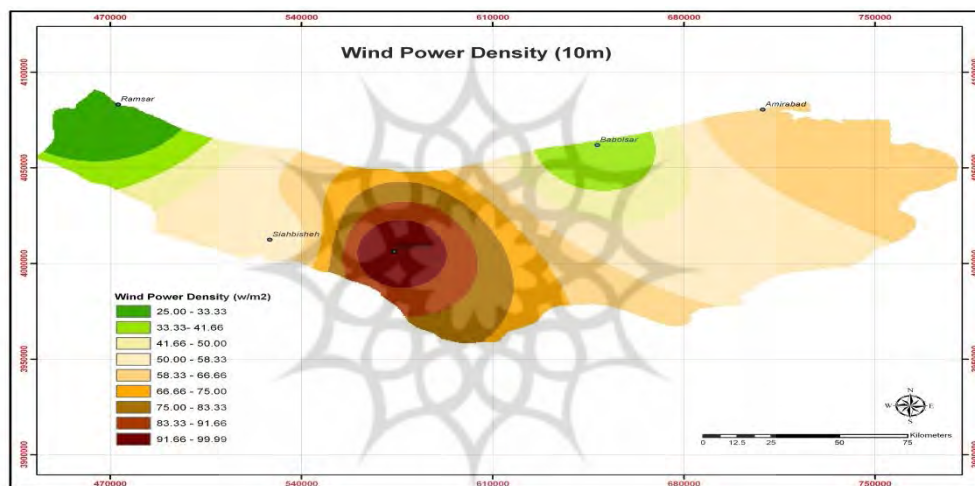
پهنه‌بندی متوسط سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین: با توجه به شکل (۸) در بین ایستگاههای مازندران، ایستگاه بلده با میانگین سرعت باد (۴,۳۶ متر بر ثانیه) در ارتفاع ۵۰ متری از حداکثر سرعت باد (۵,۷ متر بر ثانیه) در ماه جولای برخوردار است. به‌طوریکه حدوداً ۵ ماه از سال خصوصاً در ماه‌های گرم سال (از ماه می تا سپتامبر) سرعت باد در محدوده بیش از ۵ متر بر ثانیه را تجربه کرده است به‌عبارتی در طول سال بیشترین مقادیر سرعت باد در محدوده ۳ تا ۵ متر بر ثانیه در این منطقه رخ می‌دهد

استان مازندران ایستگاه بلده با توجه به موقعیت منطقه و با داشتن سرعت بادی بیش از ۴ متر بر ثانیه در ۵ ماه سال در ماههای گرم سال به خصوص در ماههای ژوئن و جولای، حداکثر چگالی انرژی باد را که حدود ۱۰۰ وات بر متر مربع است، دارد. میزان چگالی انرژی باد در ایستگاههای امیرآباد و سیاهبیشه در ارتفاع مذکور به ترتیب ۶۵ وات بر مترمربع مربوط به ماههای گرم سال و طی ماههای ژوئن و جولای بوده و ۵۳ وات بر متر مربع مربوط به ماههای سرد سال به خصوص در ماه فوریه است. ایستگاههای بابلسر و رامسر به ترتیب با ۳۴ و ۲۵ وات بر متر مربع از حداقل چگالی انرژی باد در ارتفاع ۱۰ متری برخوردارند.

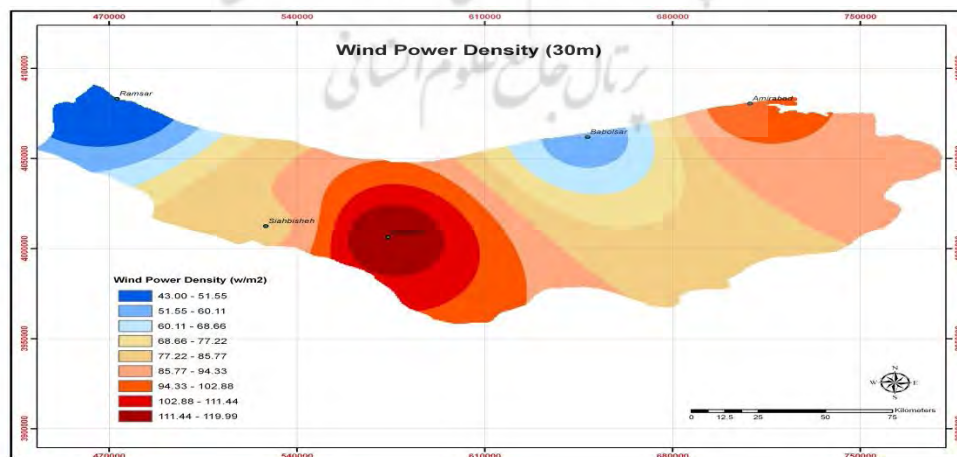
متر بر ثانیه نیز فراتر رفته است. فراوانی سرعت باد بالای ۳ متر بر ثانیه در ۵ ماه از سال (ماه های سرد سال) از مشخصه های خوب یک سایت جهت احداث نیروگاه برق بادی است. ایستگاههای بابلسر و رامسر در ارتفاع ۵۰ متری دارای بیشترین مقادیر سرعت باد در محدوده ۲ تا ۴ متر بر ثانیه را تجربه می کنند که سهم کمی از میزان باد وزیده در منطقه را شامل می شوند و بیانگر عدم شرایط مساعد برای بادخیزی و نصب توربین های بادی است.

پهنه بندی چگالی قدرت باد

پهنه بندی چگالی قدرت باد در ارتفاع ۱۰ متری: با توجه به شکل (۹) و جدول (۴) در بین ایستگاههای



شکل ۹: پهنه بندی چگالی قدرت باد در ارتفاع ۱۰ متری

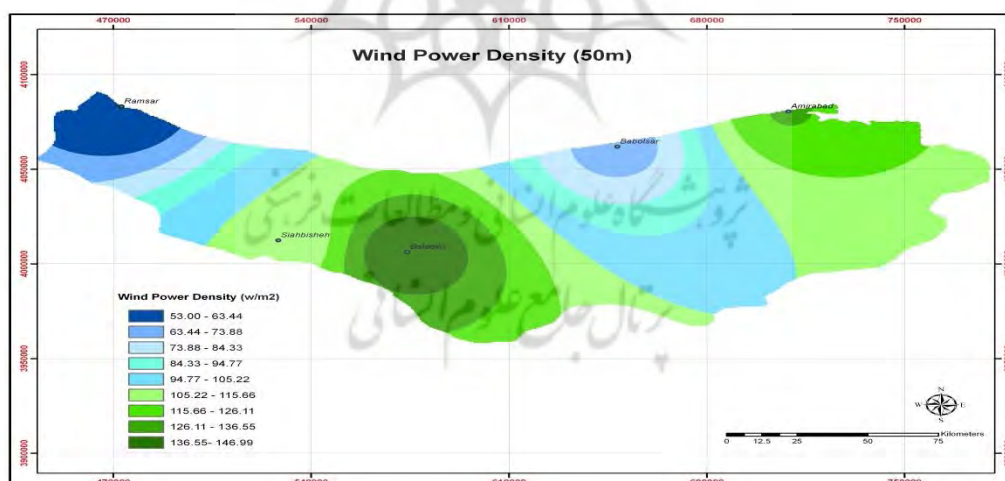


شکل ۱۰: پهنه بندی چگالی قدرت باد در ارتفاع ۳۰ متری

متر بر ثانیه از میزان چگالی قدرت باد حدود ۱۴۷ وات بر متر مربع بوده که با توجه به ارتفاع توربین به کار رفته در منطقه و بهره گیری از اطلس باد اتحادیه انرژی آمریکا (جدول ۳) از نظر کلاس بندی در کلاس ۲ (متوسط) قرار می گیرد؛ همچنین بیشترین چگالی قدرت باد مربوط به ماههای گرم سال بود که توانی بالغ بر ۳۰۰ وات بر متر مربع داشته است. که شرایط مساعدی برای نصب توربین ها جهت استحصال انرژی است. ایستگاههای امیرآباد و سیاهبیشه با سرعت بادی در حدود ۲ تا ۵ متر بر ثانیه به ترتیب دارای چگالی انرژی باد حدود ۱۲۸ و ۱۰۵ وات بر متر مربع می باشند که بیشترین چگالی قدرت باد (وات بر متر مربع) در ایستگاه امیرآباد با توانی بالغ بر ۲۰۰ وات بر مترمربع است. ایستگاه سیاهبیشه با با توانی بین ۱۰۰ الی ۱۵۰ وات بر متر مربع در ماههای سرد سال در مرحله بعدی قرار می گیرند. ایستگاههای بابلسر و رامسر به ترتیب با ۶۸ و ۵۳ وات بر متر مربع دارای حداکثر چگالی قدرت باد در فصل زمستان هستند ولی در فصل پاییز، کمترین چگالی قدرت باد را جهت استحصال انرژی دارند.

پهنه بندی چگالی قدرت باد در ارتفاع ۳۰ متری:
با توجه به شکل (۱۰) و جدول (۴) در بین ایستگاههای استان مازندران ایستگاه بلده با داشتن سرعت بادی بیش از ۵ متر بر ثانیه در طی ۳ ماه از سال تقریباً با ۱۲۰ وات بر متر مربع از حداکثر چگالی انرژی باد نسبت به دیگر ایستگاههای استان برخوردار است که در کلاس بندی توان باد در کلاس (۱) قرار می گیرد. ایستگاههای امیرآباد و سیاهبیشه با سرعت بادی بیش از ۳ متر بر ثانیه به ترتیب ۸ ماه و ۵ ماه از سال دارای چگالی انرژی باد به ترتیب ۹۹ وات و ۸۴ وات بر متر مربع را دارند. ایستگاههای بابلسر و رامسر به جهت این که در اکثر ماههای سال سرعت بادی کمتر از ۳ متر بر ثانیه دارند به ترتیب میزان چگالی انرژی باد آن ها ۵۵ وات و ۴۳ وات بر متر مربع بوده است که در بین ایستگاههای استان در استحصال انرژی بادی سهم کمتری دارند

پهنه بندی چگالی قدرت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین: با توجه به شکل (۱۱) ایستگاه بلده با سرعت بادی بیش از ۵ متر بر ثانیه و دارا بودن بیشترین فراوانی مقادیر سرعت باد در محدوده ۳ تا ۵



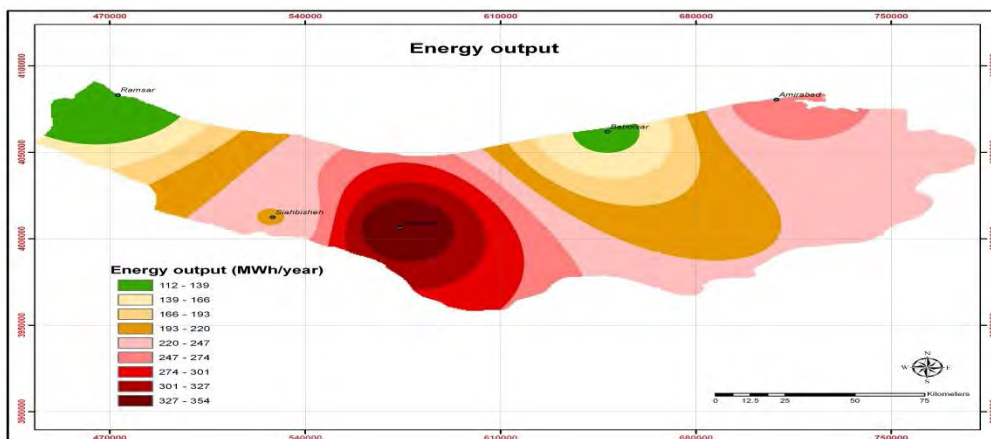
شکل ۱۱: نقشه پهنه بندی چگالی قدرت باد در ارتفاع ۵۰ متری

وات ساعت و ظرفیت شبکه ۱۲/۳ درصد، بالاترین مقدار انرژی الکتریکی خروجی را در استان دارد، لذا این منطقه جهت نصب توربین های بادی و احداث مزرعه باد برای تولید انرژی برق مکان مناسبی در استان است؛ همچنین برآورد تولید انرژی خروجی و

پهنه بندی انرژی الکتریکی خروجی سالانه در ارتفاع ۵۰ متری: با توجه به جدول ۵ و شکل (۱۲) ایستگاه بلده در بین ایستگاههای مختلف استان، با دارا بودن میانگین سالانه قدرت شبکه ۴۰/۶ کیلووات و میزان متوسط انرژی الکتریکی تولیدی سالانه حدود ۳۵۵

بابلسر و رامسر به جهت سرعت باد کمتر، مکان‌های مناسب جهت استحصال انرژی بادی محسوب نمی‌شوند.

حداکثر قدرت باد در ارتفاع ۵۰ متری مابقی ایستگاهها بر اساس جدول ۵ آمده است. به‌طوری‌که ایستگاه امیرآباد و ایستگاه سیاه‌بیشه در مرحله بعدی استحصال انرژی بادی قرار می‌گیرند. ولی ایستگاههای



شکل ۱۲: نقشه پهنه‌بندی انرژی الکتریکی خروجی سالانه در ارتفاع ۵۰ متری استان مازندران

جدول ۵: برآورد تولید انرژی خروجی و حداکثر قدرت باد در ارتفاع ۵۰ متری توسط توربین انکرون E33

ایستگاه		سرعت باد (m/s)	چگالی قدرت باد (kW) power output	متوسط انرژی تولیدی (MWh)/yr Energy output	ظرفیت شبکه (%)
امیرآباد	حداکثر	۴,۵۷ جولای	۴۵	۳۶	۱۳,۷
	حداقل	۰,۳۳ اکتبر	۱۹,۵	۱۵	۵,۹
	سالانه	۳,۵۷	۲۹,۸	۲۶۱	۹
بلده	حداکثر	۵,۷۱ جولای	۶۶,۹	۴۹,۸	۲۰,۳
	حداقل	۲,۸۶ ژانویه	۱۵	۱۱,۳	۴,۵
	سالانه	۴,۳۷	۴۰,۶	۳۵۵,۲	۱۲,۳
سیاه بیشه	حداکثر	۴,۵۲ فوریه	۴۷,۶	۳۲	۱۴,۴
	حداقل	۱,۷۳ جولای	۱۰,۱	۸	۳,۱
	سالانه	۲,۹۴	۲۵	۲۱۹	۷,۶
بابلسر	حداکثر	۲,۶۵ آوریل	۳۲	۱۷	۵,۲
	حداقل	۲,۳۵ اکتبر	۱۱	۱۴	۲,۹
	سالانه	۲,۵۰	۲۳,۹	۱۳۰	۳,۸
رامسر	حداکثر	۲,۶۵ مارس	۱۸,۷	۱۴	۵,۷
	حداقل	۱,۹۲ اکتبر	۹,۹	۷	۳
	سالانه	۲,۲۲	۱۲,۸	۱۱۲	۳,۹

منبع: یافته های تحقیق

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های انجام‌گرفته، با توجه به تنوع مکانی ایستگاههای مورد بررسی و دوری و نزدیکی آن‌ها به دریای خزر و رشته کوههای البرز، جهت جریان هوا در فصول مختلف برای کلیه ایستگاههای ساحلی، جلگه‌ای و کوهپایه‌ای متنوع بوده است و همین عوامل سبب تنوع در جهت باد غالب ایستگاههای استان مازندران گردیده است. بررسی‌ها نشان داد، ایستگاه بلده نور در مجموع در بین دیگر ایستگاههای استان، به دلیل درصد موجودیت باد، میانگین سرعت و چگالی قدرت باد (۱۵۰ وات بر مترمربع) در ماههای گرم سال (ژوئن و جولای) برخوردار بوده است که توانی بالغ بر ۳۰۰ وات بر متر مربع را شامل می‌شود که این مقدار تا میزان ۲۰۰ وات بر متر مربع در اوایل بهار می‌رسد و در کلاس‌بندی توان باد در کلاس (۲) متوسط قرار می‌گیرد. به بیانی دیگر منطقه بلده از اوایل بهار تا اوایل پاییز، شرایط متوسط تا نسبتاً خوبی را برای بهره‌وری در تأمین انرژی مجتمع‌های گلخانه‌ای، پمپاژ آب چاهها و تأمین انرژی منازل را از طریق انرژی باد خواهد داشت. انرژی سالانه تولیدی آن به ۳۵۵ مگاوات ساعت می‌رسد، به طوری که این موارد در مقایسه با نتایج یافته‌های سلطانی و همکاران (۱۳۸۹) در بررسی پتانسیل انرژی باد ایستگاه هواشناسی سینوپتیکی بلده مطابقت دارد. ایستگاه ساحلی امیرآباد واقع در شرق مازندران هم با چگالی انرژی

(۱۲۷ وات بر مترمربع) در ارتفاع ۵۰ متری در فصل گرم سال که این میزان حتی به بالاتر از ۲۰۰ وات بر متر مربع می‌رسد از نواحی پر باد این استان بعد از ایستگاه بلده قلمداد می‌گردد که با نصب توربین‌های کوچک می‌توان با استحصال انرژی برای بهره‌وری در مصارف کشاورزی نظیر پمپاژ آب چاهها و انرژی منازل استفاده کرد. ایستگاه کوهستانی سیاه‌بیشه چالوس با بیشترین چگالی قدرت باد (۱۰۵ وات بر مترمربع) در ارتفاع ۵۰ متری در اواخر پاییز تا اواسط زمستان (نوامبر تا فوریه) توانی بین ۱۰۰ الی ۱۵۰ وات بر متر مربع دارد. به عبارتی ایستگاه سیاه‌بیشه از اوایل پاییز تا اواسط زمستان دارای حداکثر وزش باد در طول سال است. میزان انرژی سالانه تولیدی این ایستگاه ۲۱۹ مگاوات ساعت است که با نصب توربین‌های کوچک و اخذ انرژی می‌توان در مصارف کشاورزی نظیر پمپاژ آب چاهها استفاده کرد. نتیجه این بررسی با تحقیقات شریفی و همکاران (۱۳۸۵) در امکان‌سنجی احداث نیروگاه برق بادی در جرنندق تاکستان و پروین (۱۳۸۹) در ارزیابی پتانسیل انرژی باد در استان قم مطابقت دارد. در نهایت ایستگاههای بابلسر و رامسر به همراه دیگر ایستگاه‌های موجود در استان به علت پایین بودن درصد وزش و چگالی توان باد برای نصب توربین‌های بادی جهت استحصال برق مناسب نیستند و به عبارتی ناحیه نسبتاً کم‌باد استان محسوب می‌شوند.

منابع

۱. پروین، نادر. ۱۳۸۹. بررسی انرژی‌های نو در ایران با تأکید بر ارزیابی پتانسیل انرژی باد در استان قم. چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، زاهدان.
۲. ثقفی، محمود. ۱۳۸۲. انرژی‌های تجدیدپذیر نوین. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
۳. جمیل، مجید. کمال عباسپورثانی و اسماعیل خراسانی. ۱۳۸۳. فاصله بهینه بین توربین‌های بادی در یک نیروگاه بادی. نشریه انرژی ایران، سال ۸، شماره: ۵۵.
۴. رحیمی، عبدالرحیم. مهدی ثقفی. ۱۳۸۵. ارزیابی فنی و اقتصادی احداث توربین‌های کوچک برق بادی در بروجرد. علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هشتم، شماره ۳.
۵. رضایی بنفشه، مجید. سعید جهانبخش. یعقوب دین‌پژوه و مرضیه اسمعیل پور. ۱۳۹۳. امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۶، شماره ۳.

33544. Prepared under Task. WF7C0202.
16. Fadare, D. 2010. The application of artificial neural networks to mapping of wind speed profile for energy application in Nigeria, *Applied Energy*. 87:934–942.
 17. Keyhani, A., Ghasemi, M., Khanali, M., and Abbaszadeh, R. 2010. An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, *Tehran Energy*. 35: 188–201.
 18. Landberg, L. 1997. Modelling the wind climate of Ireland, Riso National Laboratory, Wind Energy and Atmospheric Physics Department, Roskilde, Denmark. *Boundary-Layer Meteorology*. 85: 359–378.
 19. Mostafaeipour, A. 2010. Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 : 93–111.
 20. Mostafaeipoura, A., and Abarghoeei, H. 2008. Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12: 1758–1766.
 21. Selic, A. 2003. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey, *Renewable Energy*. 29:593_604
 22. Shafiuzzaman Khan, K., and Muhtasham, H. 2006. A pre-feasibility study of wind resources in Kutubdia Island, Bangladesh, *Renewable Energy*. 31: 2329–2341.
 23. Tehinda, R., and Kaptoum, E. 2003. Wind energy in Adamou and North Cameroon provinces, *Energy Conversion and Management*. 44: 845–857.
 24. www.mystaya.ca.windographer software available at.
 25. www.rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/tabl es/A-8T.
 ۶. سازمان انرژیهای نو ایران (سانا). ۱۳۸۶. انرژی های نو راه حل حیات بشر در دهه آینده. نشریه اقتصاد انرژی، شماره ۹۷.
 ۷. سلطانی، سیدباقر. مسیب رضایی محمودی. منصور عزیزخانی و مجتبی ذوالجوادی. ۱۳۸۹. بررسی پتانسیل انرژی باد به منظور امکان سنجی تأسیس نیروگاه بادی (مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی سینوپتیکی بلده). اولین کنفرانس بین المللی سالانه انرژی پاک، کرمان، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی. شریفی، مهدی و ابوالفضل شیرزاد سینی. ۱۳۸۵. امکان سنجی احداث نیروگاه برق بادی در جرنندق تاکستان باتوجه به پتانسیل جریان باد منطقه. بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانی، پژوهشگاه نیرو.
 ۹. کیانی فر، علی. ۱۳۷۸. بررسی و تحلیل موجودیت انرژی باد در منطقه دیزباد خراسان. دومین همایش ملی انرژی، تهران، کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو.
 ۱۰. مجرد، فیروز. شهرام همتی. ۱۳۹۲. ارزیابی قابلیت های انرژی باد در استانهای کرمانشاه و کردستان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۳، شماره ۲۹.
 ۱۱. محمدی حمیدی، سمیه. نوبخت سبحانی. ۱۳۹۷. ارزیابی شاخص های توسعه پایدار در منطقه خاورمیانه با تاکید بر کشور ایران. مجله آمایش جغرافیایی فضا، دوره ۸، شماره ۲۸.
 12. Akpinar, E., and Akpinar, S. 2005. A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems, *Energy Conversion and Management*. 46: 515- 532.
 13. Al-Abbadi, N. 2005. Wind energy resource assessment for five locations in Saudi Arabia, *Renewable Energy*. 30: 1489–1499.
 14. Elliott, D. 2000. Philippines Wind Energy Resource Atlas Development, NREL/CP-500-28903.
 15. Elliott, D. 2003. Wind Energy Resource Atlas of Armenia, NREL/TP-500-



پروژه نگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی