GES	Journal of Geography and Environmental Studies, 11 (43), Autumn 2022 https://ges.iaun.ac.ir ISSN: 2008-7845 20.1001.1.20087845.1401.11.43.1.2

Research Article

Potential Measurement and Estimation of Wind Power Characteristics for Energy Generation (Synoptic Stations of Mazandaran Province)

Bairamvand, Rayhaneh
Ph.D. Student of Climatology, Department of Geography, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran
Email: bayramvand@rocketmail.com
Motevalli, Sadrodin (Corresponding Author)
Associate Professor, Department of Geography, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran
Email: s_motevalli@iaunour.ac.ir, 09111212312
Janbaz Ghobadi, GholamReza
Assistant Professor, Department of Geography, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran
Email: j_ghobadi@iaunour.ac.ir
Derafshi, Khabat
Assistant Professor of Geomorphology, Natural Heritage Department, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Email: kh.derafshi@richt.ir

Abstract
Recently, Mazandaran Province has needed more energy. Considering the capabilities of this province in generating renewable energy, recognizing the potentials of clean energy generation and consumption, especially wind energy, should be a priority in the plans of managers and researchers. Current study has been done with the aim of spatial capability of wind energy in Mazandaran Province with emphasis on its topography. In order to initially estimate the energy that can be obtained from wind flow in the province, the necessary calculations were performed on wind direction and velocity data over a period of 12 years. Statistic data of 15 synoptic meteorological stations in the province at a height of 10 meters were used to collect daily wind speed and direction data. After calculating the average wind speed, wind speed continuity and wind power density in the meteorological stations, layers of each were prepared at heights of 10, 30 and 50 m using interpolation in ArcGIS software environment. The 50-meter-high wind speed zoning map in Mazandaran Province shows that among the study stations, Baladeh station with an average monthly wind speed of 5.98 meters per second at a height of 50 meters, has a maximum wind speed of 7.78 meters per second in July. This station experiences wind speeds of more than 6 meters per second for about 7 months of the year (April to October), especially during the warmer months of the year. This station also has the highest wind power density (WPD) with 51, 142 and 228 watts per square meter respectively at a height of 10, 30 and 50 meters above the ground. Also, the station has the highest amount of electrical energy output in Mazandaran Province with an average annual wind power of 58.4 kW, amount of electricity generated annually about 511452 kWh per year and network capacity of 17.7%. Therefore, this area is a suitable place in Mazandaran province for installing wind turbines and constructing wind power plant to generate electricity.

Keywords: Mazandaran Province, resistance economy, renewable energy, wind turbine, wind power density.

Citation: Bairamvand, R.; Motevalli, S.; Janbaz Ghobadi, Gh.R.; Derafshi, Kh. (2022) Potential Measurement and Estimation of Wind Power Characteristics for Energy Generation (Synoptic Stations of Mazandaran Province), Journal of Geography and Environmental Studies, 11 (43), 6-23. Dor: 20.1001.1.20087845.1401.11.43.1.2

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granded to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – acsses article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

20.1001.1.20087845.1401.11.43.1.2

مقاله پژوهشی

پتانسیل‌سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی (ایستگاه‌های همدیدی استان مازندران)

ریحانه بایرام‌وند

دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

صدرالدین متولی*

دانشیار، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

غلامرضا جانباز قبادی

استادیار، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

خه‌بات درفشی

استادیار ژئومورفولوژی، گروه میراث طبیعی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

چکیده

استان مازندران در سال‌های اخیر نیاز بیش‌تری به انرژی پیدا کرده است. با توجه به قابلیت‌های این استان در تولید انرژی‌های نوین، شناخت پتانسیل‌های تولید انرژی پاک و مصرف آن، به‌خصوص انرژی بادی، بایستی در اولویت برنامه‌های مسئولان و پژوهشگران قرار گیرد. در پژوهش حاضر، به‌منظور برآورد اولیه انرژی قابل حصول از جریان باد در استان مازندران و قابلیت‌سنجی فضایی انرژی بادی ، محاسبات لازم بر روی اطلاعات سمت و سرعت باد در یک بازه زمانی ۱۲ ساله انجام گردید. برای جمع‌آوری داده‌های روزانه سرعت و جهت وزش باد، آمار ۱۵ ایستگاه سینوپتیک در ارتفاع ۱۰ متری مورد استفاده قرار گرفت. پس از محاسبه مشخصه‌های باد در ایستگاه‌های هواشناسی، با استفاده از درون‌یابی در ArcGIS، لایه‌های هر کدام از آن‌ها تهیه شد. نقشه پهنه‌بندی سرعت باد ارتفاع ۵۰ متری، بیان‌گر آن است که در بین ایستگاه‌های مطالعاتی، ایستگاه بلده با میانگین ماهانه سرعت باد ۵/۹۸ متر بر ثانیه در ارتفاع ۵۰ متری، از حداکثر سرعت باد ۷/۷۸ متر بر ثانیه در ماه جولای برخوردار است. این ایستگاه، با میانگین سالانه قدرت باد ۵۸/۴ کیلووات، میزان انرژی الکتریکی تولیدی سالانه حدود ۵۱۱۴۵۲ کیلووات ساعت در سال و ظرفیت شبکه ۱۷/۷ درصد، بالاترین مقدار انرژی الکتریکی خروجی را در استان دارد.

کلمات کلیدی: استان مازندران، اقتصاد مقاومتی، انرژی پاک، توربین بادی، چگالی توان باد.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

نویسنده مسئول: صدر الدین متولی، دانشیار، گروه جغرافیا، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران، s_motevalli@iaunour.ac.ir

بیان مسأله

می‌توان بیان داشت که منابع اصلی انرژی که هفتاد درصد نیاز جهان را در مدل‌های سوخت‌های فسیلی و انرژی شکافت هسته اورانیوم تأمین می‌کند، در اواخر قرن جاری رو به اتمام خواهد بود و مسلماً نگرانی‌های بسیاری را برای بشر در پی خواهد داشت. البته این نگرانی و اطلاع از اتمام منابع انرژی فسیلی و هسته‌ای اورانیوم از سال‌ها پیش توجه دانشمندان و مسئولان را به خود معطوف کرده و تلاش‌ها و مطالعات گسترده‌ای در مورد جایگزین کردن منابع جدید انرژی در سرتاسر دنیا در حال انجام است (کنیسارین و ماهکاموا[1]، ۲۰۰۷؛ گندمکار، ۱۳۸۸؛ حیدری، ۱۳۸۸؛ اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۰، انتظاری و همکاران، ۱۳۹۱؛ سیف، ۱۳۹۳). از طرفی، افزایش دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای که توسط احتراق سوخت‌های فسیلی آزاد می‌شوند، به‌صورت تهدید کننده‌ای موجب تغییرات بی‌سابقه آب و هوای زمین شده است (IPCC, 2013). به‌همین دلیل، در حال حاضر یک توافق مشترک برای کاهش انتشارات کربن به صفر در دراز مدت وجود دارد. بیش از یک میلیارد نفر، یعنی ۱۵ درصد از جمعیت دنیا، هنوز به برق دسترسی ندارند (REN21 , 2015). در حالی‌که تا پایان قرن بیست و یکم، اگر اوضاع به‌همین منوال باشد، شاید جمعیت دو برابر شود. تقاضای انرژی با وجود بهبود در بازدهی انرژی، دو تا چهار برابر خواهد شد. حال این سؤال پیش می‌آید که این تقاضای عظیم انرژی چگونه به‌صورت پاک، ایمن و پایدار تأمین خواهد شد. با توجه به منابع هنگفتی که دولت برای تولید یک کیلو وات برق هزینه می‌کند، این پرسش برای همه مطرح است که برای کاهش مصرف و تامین انرژی ارزان‌تر چه باید کرد. در بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد یکی از اقتصادی‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق است که علاوه بر عدم آلودگی محیط زیستی و فراوان و دائمی بودن، کم‌ترین نوسانات قیمتی را نیز دارد (استرانتزالی و آراوسیس[2]، ۲۰۱۶). گام اول برای توسعه استفاده از انرژی بادی مکان‌یابی نواحی است که در آن انرژی بادی در حد مطلوب و دیگر شرایط لازم احداث نیروگاه وجو داشته باشد. منابع انرژی‌های نو اساساً بدون کربن بوده و اغلب پایدارتر از سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای هستند؛ اگر چه هنوز تمام فناوری‌های آن تکامل و توسعه نیافته و قیمت برخی از آن‌ها همچنان بالا است (بویل، ۱۳۹۵؛ انتظاری و همکاران، ۱۳۹۱؛ رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۳؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مریانجی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌طور کلی، انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از عناصر مهم سازگاری با تغییرات آب و هوایی محسوب می‌شوند؛ به‌طوری‌که به انعطاف‌پذیری بیش‌تر سامانه‌های انرژی موجود کمک می‌کنند و از سوی دیگر، برقراری خدمات انرژی را در شرایط آب و هوایی در حال تغییر تضمین می‌کنند (آجای[3] و همکاران، ۲۰۱۱؛ ایلیک و آیدین[4]، ۲۰۱۵؛ الوهی[5] و همکاران، ۲۰۱۷؛ کرویت[6] و همکاران، ۲۰۱۸؛ چن[7] و همکاران، ۲۰۱۸؛ سالام[8] و همکاران، ۲۰۱۸).

مبانی نظری پژوهش

در حوزه انرژی، هدف از اصول ۲۴ گانه اقتصاد مقاومتی در حقیقت مقاوم‌سازی اقتصاد در برابر شوک‌های داخلی و خارجی است. برای اجرای اقتصاد مقاومتی در حوزه انرژی، لازم است تا بندهای کلی مختص آن تشریح شده و سپس با مطالعه و کار کارشناسی، راهبردهای عملیاتی لازم تدوین شود تا با اجرای آن‌ها بتوان صنعت مورد نظر را در برابر تهدیدهای خارجی مقاوم ساخت (دانشفر و مقدم، ۱۳۹۵؛ صحرایی و اکبریان فیضی، ۱۳۹۸). اقتصاد مقاومتی با محوریت اقتصاد دانش‌بنیان در حوزه انرژی منجر به تبدیل تحریم‌ها و تهدیدهای خارجی به فرصت، توجه به دانش بومی، استفاده از حداکثر توان تولیدات داخلی و سرمایه‌گذاری با منافع بلندمدت برای کشور می‌شود (محسنی، ۱۳۹۷؛ صحرایی و اکبریان فیضی، ۱۳۹۸).

1. Kenisarin and Mahkamov
2. Strantzali and Aravosis
3. Ajayi
4. Ilkilic and Aydin
5. Allouhi
6. Kruyt
7. Chen
8. Salam

برای ارائه راهبردهای اقتصاد مقاومتی لازم است محورهای تأثیرگذار (شرایط داخلی و محیطی) بخش انرژی شناسایی شده و با بررسی وضعیت موجود و افق آینده، راهبردهای لازم ارائه شود. کشور ما دارای وابستگی‌های متعددی، مرتبط با حوزه انرژی است که مهم‌ترین آن وابستگی به نفت در بودجه است و سالانه این وابستگی برخلاف برنامه ششم توسعه در حال افزایش است. طبق سیاست‌های برنامه پنجم توسعه لازم است در پایان برنامه پنجم (سال ۱۳۹۵)، قطع وابستگی هزینه‌های جاری دولت به درآمدهای نفت و گاز انجام پذیرد که این مهم، در پایان این دوره محقق نشد. در افق برنامه ششم توسعه در پایان سال ۱۴۰۴، وابستگی بودجه به نفت باید به صفر برسد (باقری و تقوی، ۱۳۹۳). از مهم‌ترین وابستگی‌های این حوزه به کشورهای خارجی می‌توان به فروش و بیمه محموله‌های نفتی، تکنولوژی روز در اکتشاف و حفاری و تأمین منابع ارزی در توسعه میادین اشاره کرد. برای کم کردن اثر این وابستگی‌ها می‌توان راهکارهایی در جهت تبدیل این وابستگی‌ها به ابزاری برای رشد حوزه انرژی پیشنهاد کرد. توسعه پالایشگاه‌های کوچک، کاهش خام‌فروشی و تنوع در صادرات فرآورده‌ها (زیرا تحریم این کالاها سخت‌تر است)، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌خصوص انرژی‌های نو مانند بادی و خورشیدی از جمله مواردی است که می‌توان پیشنهاد کرد (میلانی، ۱۳۹۴؛ صحرایی و اکبریان فیضی، ۱۳۹۸).

ریمن[1] و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی پتانسیل انرژی بادی در امتداد عارضه‌های توپوگرافی مختلف در تامیل نادا[2] در هند، به تعیین و توسعه پتانسیل انرژی بادی در سه شهر واقع شده در ارتفاع‌های متفاوت در ایالت تامیل نادا هند پرداخته‌اند. شواهد تاریخی ثبت شده از سرعت و جهت باد، دما و فشار برای این سه شهر جنوبی هند طی دوره آماری ۳۸ ساله (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷) جمع‌آوری شده است. میانگین سالانه انرژی خالص به‌دست آمده و میانگین سالانه خالص عامل ظرفیت به‌عنوان پارامترهای شاخص برای بیان پتانسیل انرژی بادی در موقعیت‌های جغرافیایی مشخص که در توزیع سرعت باد دارای تفاوت‌های قابل توجهی هستند، انتخاب شدند. بر مبنای تحلیل‌های انجام شده توسط این پژوهشگران، چنای[3] به‌عنوان مناسب‌ترین سایت یا مکان برای تولید انرژی بادی در نظر گرفته شد. نگاش[4] و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی پتانسیل انرژی بادی برای سه ناحیه توپوگرافیکی در اریتره[5] پتانسیل انرژی بادی و مشخصه‌های آن را برای ۲۵ مکان بادخیز در این منطقه بر مبنای داده‌های باد سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ مورد ارزیابی قرار دادند. اگرچه این سایت‌ها همگی در منطقه اریتره واقع شده‌اند، اما می‌توان آن‌ها را در سه ناحیه دسته‌بندی کرد: ناحیه ساحلی، اراضی پست غربی و ارتفاعات مرکزی. ناحیه ساحلی بیش‌ترین پتانسیل را به‌لحاظ نیروی بادی دارد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان ارزیابی‌های اولیه درباره تولید احتمالی نیرو در سایت‌های معین مورد استفاده قرار گیرد. کرویت[6] و همکاران (۲۰۱۸)، پژوهشی را با عنوان بهبود ارزیابی نیروی بادی در اراضی دارای توپوگرافی‌های مختلف (پیچیده): مورد مدل COSMO-1 در آلپ سوئیس انجام داده‌اند. این پژوهش حاوی مجموعه‌ای از برآوردها است که پتانسیل نیروی بادی را در سوئیس با استفاده از مدل پیش‌بینی هواشناسی عددی COSMO-1 بررسی کرده است. عملکرد مدل برای استفاده از آن در اراضی دارای توپوگرافی‌های مختلف (پیچیده) با استفاده از مقایسه نتایج آن با سرعت باد ساعتی مدل‌سازی شده در ایستگاه‌های هواشناسی کوهستان‌های سوئیس در یک دوره ۲ ساله اعتبارسنجی شده است. سالام و همکاران (۲۰۱۸) پژوهشی را با عنوان بررسی پتانسیل‌های انرژی بادی در داروسالام[7] برونئی انجام داده‌اند.

1. Rehman
2. Tamil Nada
3. Chennai
4. Negash
5. Eritrea
6. Kruyt
7. Darussalam

در این پژوهش مشخصه‌های باد، سرعت و جهت آن با استفاده از توزیع ویبول بر اساس اندازه‌گیری سرعت باد در دو نقطه مختلف در داروسالام برونئی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تولید انرژی سالانه در بادهای با سرعت ۵ متر بر ثانیه در دامنه‌ای بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلو وات برای هر دو منطقه مطالعه شده در داروسالام برونئی قرار دارد.

جانباز قبادی (۱۳۹۸)، در پژوهشی با عنوان پتانسیل‌سنجی انرژی باد جهت تعیین مکان بهینه برای احداث توربین‌های بادی در استان مازندران، به 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 پرداخته است. این پژوهشگر برای این منظور از داده‌های سرعت و جهت وزش باد ۵ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی استان طی سال‌های آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ میلادی در فاصله‌های زمانی ۳ ساعته و در ارتفاع ۱۰ متری استفاده کرده است. در پژوهش ذکر شده، مشخصات سرعت و جهت باد و پارامترهای تابع توزیع احتمال ویبول آن تعیین گردید و سپس پتانسیل و چگالی توان باد ایستگاه‌های استان محاسبه گردید. با استفاده از نرم‌افزار ویندوگرافر به تحلیل انرژی باد و ترسیم گراف و نمودارها پرداخته شد و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار GIS، نقشه های رقومی و پهنه‌بندی شاخص‌های سرعت و انرژی باد ترسیم گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که 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. با توجه به این‌که پژوهش جانباز قبادی (۱۳۹۸) نیز در منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر انجام گرفته است، طول دوره آماری و تعداد ایستگاه‌های انتخابی این دو پژوهش با همدیگر متفاوت می‌باشد. همچنین برآورد مشخصه‌های باد در ارتفاع‌های مختلف و تهیه نقشه پهنه‌بندی انرژی الکتریکی خروجی سالانه ایستگاه‌های استان مازندران در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین با رویکرد اقتصاد مقاومتی، نوآوری‌های پژوهش حاضر را دربر می‌گیرد.

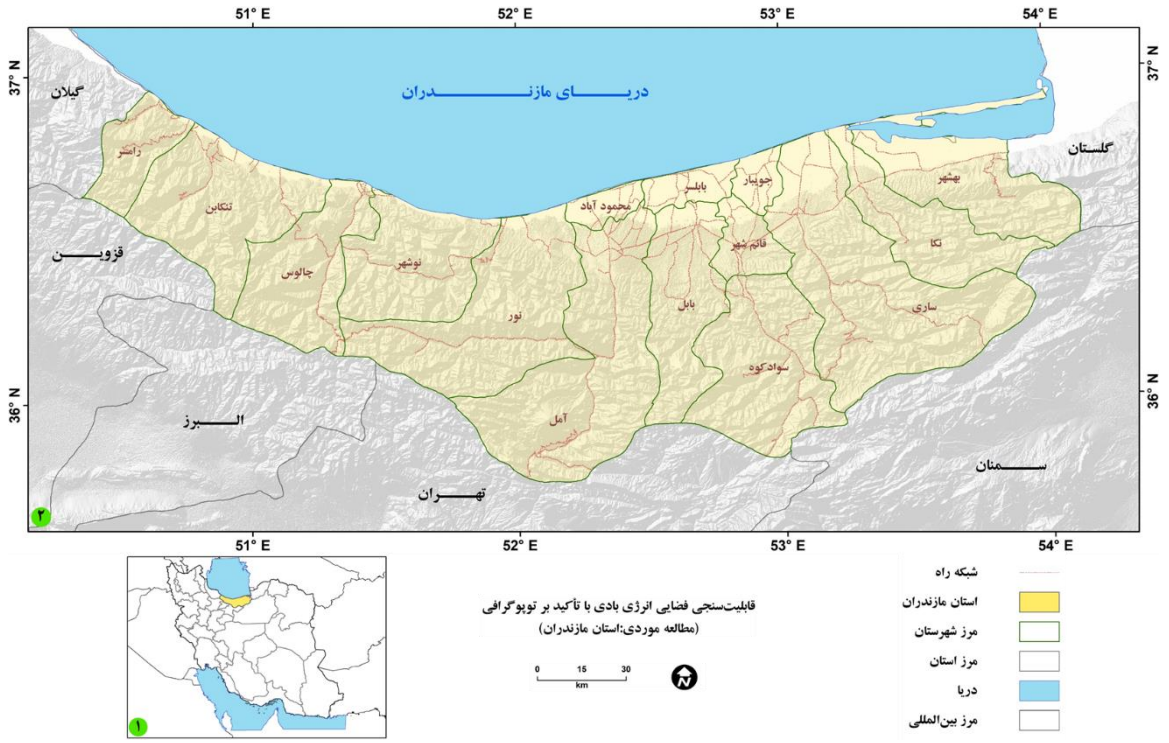
عزیزی و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی با عنوان رفتارشناسی باد در ایستگاه‌های کوهستانی البرز غربی تحت تأثیر واداشت‌های محیطی، با استفاده از داده‌های ساعتی سرعت و جهت باد و برازش و تحلیل شرایط توپوگرافیک، نشان دادند که ایستگاه سینوپتیک ماسوله یکی از بهترین نمونه ایستگاه‌های کوهستانی ایران جهت مطالعه در زمینه آب و هواشناسی کوهستان محسوب می‌شود. موقعیت قرارگیری مناسب این ایستگاه در میانه دامنه، منطقه را تحت تأثیر ساز و کار باد دامنه‌ای (باد فراشیب – فروشیب یا نسیم کوه – دره) قرار داده است. موقعیت ایستگاه دیلمان در دامنه جنوبی رشته کوه البرز در یک موقعیت فروافتاده، تأثیر مهمی بر کاهش تندی باد در این ایستگاه داشته است. مریانجی و همکاران (۱۳۹۵)، در پژوهش خود با عنوان ناحیه‌بندی و پیش‌بینی انرژی باد در ساتان همدان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، میانگین و حداکثر سرعت باد سالانه و فصلی و انرژی آن را بر اساس داده‌های نه ایستگاه سینوپتیک در سطح استان همدان و در دوره اقلیمی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ محاسبه و تحلیل کرده و پراکندگی مکانی سرعت و انرژی باد در این منطقه را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش، تأثیر توپوگرافی بر سرعت باد نشان داد که شهرستان‌های کوهپایه‌ای استان از جمله همدان، نهاوند و اسدآباد بیش‌تر در معرض وزش بادهای دشت – کوه می‌باشند و گرم باد پدیده خاص هواشناسی ناشی از اثر کوهستان، غالباً در شهرستان همدان رخ می‌دهد. بر اساس نقشه رقومی سرعت و انرژی باد در منطقه، شرق و مناطقی از شهرستان ملایر و بالاخص مناطق شمالی استان بیش‌ترین سرعت متوسط باد را (بالای سه متر در ثانیه) داشته و مناطق غرب و جنوب‌غرب دارای کم‌ترین سرعت باد در طول دوره مطالعاتی بوده‌اند. بادخیزترین منطقه، نواحی شرق و شمالی استان است و در بیش‌تر زمان‌های سال دارای توان تولید برق بادی است. احمدی و همکاران (۱۳۹۴)، در پژوهشی با عنوان توان‌سنجی استفاده از باد با رویکرد اقلیمی به‌منظور راه‌اندازی نیروگاه‌های بادی در منطقه سمنان، به فازی‌سازی معیارها، نقاط کنترل و نوع توابع فازی برای هریک از لایه‌ها (سرعت باد، سرعت باد غالب، فشار، دما، شیب، ارتفاع، مناطق حفاظت شده،

کاربری اراضی و ...) بر اساس درجه‌بندی عضویت آن‌ها در محدوده صفر تا یک در نرم‌افزار ادریسی پرداخته‌اند. سپس با توجه به اهمیت تلفیق اطلاعات، فرآیند تلحیل سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی به لایه‌ها انتخاب و به کمک نرم‌افزار Expert Choice پیاده‌سازی شده است. در ادامه، از از نرم افزار GIS به‌منظور تحلیل فضایی و همپوشانی لایه‌ها استفاده شده است. پس از تجزیه و تحلیل اطلاعات، استان سمنان از نظر قابلیت احداث نیروگاه بادی به چهار سطح عالی، خوب، متوسط و ضعیف تقسیم گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که مناطق با درجه عالی جهت احداث نیروگاه بادی در منطقه شامل محدوده مطالعاتی در ایستگاه دامغان با مساحتی بالغ بر ۳۴۳۳۰۱ هکتار یا ۳/۵۴ درصد از کل مساحت منطقه مورد بررسی قرار دارد. علاوه بر این، مناطق با درجه خوب با مساحتی بالغ بر ۲۲۷۹۲۵۰ هکتار یا ۲۳/۴۳ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه شامل ایستگاه‌های بیارجمند، جنوب‌غربی شاهرود، دامغان و شمال گرمسار می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

شیوه بهره‌برداری از حامل های انرژی در ایران، علی رغم توسعه اقتصادی ملی و ارتقای سطح رفاه عمومی، باعث نگرانی از وضعیت مصرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای گردیده است. لذا کشور ایران در روند توسعه خود نیاز به افزایش انرژی دارد و ضرورتاً می‌بایست در برنامه‌ریزی توسعه خود جایگاه ویژه‌ای را برای تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر داشته باشد. در این بین، باد به‌عنوان یکی از مظاهر انرژی‌های نو از جایگاه ویژه‌ای با توجه به منابع داده‌های بادی و شرایط توپوگرافی در کشور ایران برخوردار است. لذا در این پژوهش قابلیت‌سنجی فضایی انرژی بادی به‌صورت موردی برای استان مازندران انجام می‌شود. در واقع هدف اصلی 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 با رویکرد اقتصاد مقاومتی است. هدف در اقتصاد مقاومتی شناخت توانمندی‌های ملی، به حداقل رساندن نقاط ضعف، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری بخش‌های مختلف اقتصادی است. حوزه انرژی یکی از مهم‌ترین بخش‌های پیاده‌سازی راهبردهای اقتصاد مقاومتی است. با توجه به شرایط اقتصادی کشور و در نظر گرفتن ظرفیت‌ها و پتانسیل‌ها، اقتصاد مقاومتی از سوی رهبر معظم انقلاب اسلامی، راهگشای مشکلات اقتصادی کنونی مطرح گردیده و لازم است که در حوزه انرژی به شیوه مناسبی این سیاست را در بخش‌های عملیاتی به‌کار گرفت. ایران کشور وسیعی است که مکان‌های بادخیز فراوانی دارد و استان مازندران نیز از این شرایط برخوردار است. استفاده از این منابع می‌توان در آینده‌ای نه چندان دور، بخش زیادی از نیازهای انرژی استان را تأمین نماید. این امر وقتی بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد که آزادسازی قیمت‌های انرژی (نفت و گاز) صورت گرفته و تولید برق با استفاده از این منابع با قیمت واقعی خود انجام گیرد. در این صورت است که انرژی بادی توجیه اقتصادی بسیار ویژه‌تری پیدا کرده و به‌عنوان یکی از راهکارهای اقتصاد مقاومتی نقش ایفا خواهد نمود. بنابراین، چارچوب مفهمومی پژوهش در قالب شناسایی معیارهای مؤثر بر قابلیت‌سنجی فضایی انرژی بادی و محاسبه مشخصات فنی باد به‌منظور تحلیل تولید انرژی بادی با رویکرد اقتصاد مقاومتی می‌باشد.

محدوده مورد مطالعه

استان مازندران با وسعتی معادل ۲۳۷۵۶ کیلومتر مربع 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 (شکل ۱). با توجه به اطلاعات موجود در اطلس جهانی خورشیدی، مقدار ساعات آفتابی در استان به‌طور میانگین برابر ۴ کیلو وات ساعت بر متر مربع در روز است که این مقدار برابر ۱۴۶۰ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال خواهد بود. با مقایسه این مقدار از انرژی با پتانسیل کشور آلمان که در بهترین شرایط دارای ساعات آفتابی میانگین برابر ۳/۲ کیلو وات ساعت بر متر مربع در روز است، می‌توان به این نتیجه رسید که استان مازندران برخلاف انتظار، پتانسیل بالایی جهت استفاده از پتانسیل انرژی بادی و احداث نیروگاه‌های باد دارد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی گستره استان مازندران و شهرستان‌های آن (نگارندگان، ۱۴۰۰)

این استان با شرایط خاص توپوگرافی خود (از ارتفاع ۲۶- متر تا ارتفاع بیش از ۵۰۰۰ متر)، جهت دامنه‌های شمالی و وزش بادهی غالب غربی و شمال‌غربی و نیز شمالی و همچنین سایر بادهای محلی در مناطق مختلف آن، شرایط مساعد را برای ارزیابی و قابلیت‌سنجی فضایی انرژی بادی دارد. افزایش جمعیت استان مازندران و مطرح بودن آن به‌عنوان قطب اول گردشگری کشور، ظرفیت برد استان را در استفاده از منابع محیطی به‌شدت کاهش داده است که لزوم توجه به انرژی‌های نو و ارزان قیمت را به‌جای انرژی‌های رایج مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و گران قیمت مطرح می‌سازد. بنابراین، مطالعه و پهنه‌بندی قابلیت‌های مناطق مختلف استان در استفاده از انرژی بادی با تأکید بر شرایط توپوگرافی استان و شناسایی مناطق مستعد ایجاد نیروگاه‌های بادی ضروری می‌نماید. با در نظر گرفتن وضعیت اقتصادی کشور و صرف هزینه‌های بسیار گزاف در جهت تأمین نیروی برق و نظر به پیاده‌سازی عملی و اجرایی شدن دستورالعمل‌های اقتصاد مقاومتی، لزوم استفاده از انرژی‌های نو، به‌ویژه انرژی بادی، در سطح استان مازندران بیش از پیش مطرح می‌شود.

داده‌ها و روش‌ها

بهره‌گیری از انرژی بادی با رویکرد اقتصاد مقاومتی

در این بخش از پژوهش، با رویکرد اقتصاد مقاومتی، هزینه‌های تولید انرژی با فرض آزادسازی قیمت انرژی، در نیروگاه‌های حرارتی (گازی) و بادی با همدیگر مقایسه خواهد شد تا مشخص شود که در کدام سناریو، قیمت تمام شده کم‌تری برای تولید برق صرف خواهد شد. در جدول ۱، داده‌های ورودی مدل جهت بررسی تطبیقی نیروگاه گازی و بادی ارائه شده است. مبنای داده‌های این جدول، استفاده از آمارهای رسمی بوده است که از سازمان‌هایی شامل معاونت تولید شرکت توانیر (ترازنامه انرژی کشور)، دفتر مهندسی باد سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) و شرکت ملی نفت اخذ شد. لازم به ذکر است که در مقطع کنونی سوخت یارانه‌ای به نیروگاه‌ها اختصاص پیدا می‌کند و نیروگاه‌های بادی برای هر متر مکعب گاز ۹۰۰ ریال و برای هر لیتر گازوئیل ۳۵۰۰ ریال بپردازند. نرخ تنزیل با توجه به نرخ تورم عمومی و شرایط اقتصادی کشور در سال‌های گذشته و با استفاده از اطلاعات

میدانی از تحلیلگران اقتصادی در نظر گرفته شده است. در نیروگاه‌های بادی عمده نیاز به منابع دلاری در بخش سرمایه‌گذاری اولیه است؛ در نیروگاه‌های گازی عمده منابع هزینه‌ای در جریان بهره‌برداری از نیروگاه صورت می‌گیرد و سوخت نیروگاه سهم به‌سزایی در آن دارد. هرچند ارزیابی اقتصادی بودن نیروگاه بادی در شرایط فعلی انجام شده است، اما حتی در شرایط نرخ ارز بالاتر هم اقتصادی باقی خواهد ماند.

پتانسیل‌سنجی فضایی انرژی بادی

روش پژوهش این مطالعه توصیفی - تحلیلی می‌باشد که با استفاده از داده‌های مکانی و کمی مرتبط با مسأله تحقیق در پی بررسی و ارزیابی قابلیت پتانسیل فضایی انرژی بادی در گستره استان مازندران است. در خصوص معیارهای اقلیمی باد (سرعت، پیوستگی و چگالی توان باد)، از داده‌های روزانه باد ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان طی دوره آماری مشترک (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی) برای تهیه لایه‌های مذکور استفاده شده است. داده‌های سرعت و جهت باد ۱۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، به‌منظور ظرفیت‌سنجی فضایی پتانسیل انرژی باد در سطح استان مورد استفاده قرار گرفته که موقعیت آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. این ایستگاه‌ها عبارتند از رامسر، نوشهر، سیاه‌بیشه، کجور، بلده، آمل، بابلسر، قراخیل قائم‌شهر، پل سفید، آلاشت، فیروزکوه، ساری، کیاسر و بندر امیرآباد. از آنجا که باد یک متغیر برداری بوده و جهت و سرعت آن تحت تأثیر عوامل مختلف محلی و جوی است، بازسازی داده‌های آن غیر ممکن و یا با خطای زیادی توأم است. لذا به‌دلیل آن‌که دوره آماری باد در همه ایستگاه‌ها مشابه نبود، محدوده سال‌های با دوره آماری مشترک طی ۱۲ سال انتخاب شد.

جدول (۱): داده‌های ورودی مدل جهت بررسی تطبیقی نیروگاه گازی و نیروگاه بادی

ردیف	عنوان	واحد	گازی بزرگ	بادی ۶۶۰ کیلووات	بادی ۲ مگاوات
۱	ظرفیت کل (MW)	-	۱۰۰	۱۰۰/۳۲	۱۰۰
۲	تعداد	-	۴	۱۵۲	۵۰
۳	ظرفیت واحد (MW)	-	۲۵	۰/۶۶	۲
۴	مدل	-		Vestas-V47	Vestas-V90
۵	ضریب ظرفیت (CF)	درصد	۳۶	۲۶	۳۵
۶	ضریب تعدیل e تعمیر نگه‌داری	درصد	۱۵	۱۵	۱۵
۷	ضریب تعدیل e سوخت	درصد	۱۵	-	-
۸	هزینه سوخت (FC) واقعی گازوییل	دلار بر میلیون بی تی یو	۲۲/۶۲۲۹	-	-
۹	هزینه سوخت (FC) فعلی گازوییل	ریال بر میلیون بی تی یو	۶۱۰۸۱۸۳	-	-
۱۰	هزینه سوخت (FC) واقعی گاز	دلار بر میلیون بی تی یو	۸/۶۴۵۷	-	-
۱۱	هزینه سوخت (FC) فعلی گاز	ریال بر میلیون بی تی یو	۲۳۳۴۳۳۹	-	-
۱۲	نرخ گرما (مقدار گرما برای تولید هر کیلووات ساعت) HR	میلیون بی تی یو بر کیلووات ساعت	۰/۰۱۲	-	-
۱۳	مجموع آلاینده‌های تولید شده به‌ازای هر واحد گرما به گرم (EF)	گرم بر میلیون بی تی یو	۷۶۹۶۹/۵	-	-
۱۴	مجموع خسارت دلاری آلاینده‌ها (WED)	دلار بر گرم	۰/۰۱۱	-	-
۱۵	تعداد ساعات دسترسی در سال (HY)	ساعت	۷۳۵۸/۴	۸۴۹۷/۲	۸۴۹۷/۲
۱۶	کل هزینه تعمیر و نگه‌داری ثابت (FOM)	دلار بر کیلووات سال	۲۸/۷۴	۳۰	۳۰
		ریال بر کیلووات سال	۷۷۶۰۹۹۷	۸۱۰۰۰۰۰	۸۱۰۰۰۰۰
۱۷	کل هزینه تعمیر و نگه‌داری متغیر (VOW)	سنت بر کیلووات سال	۰/۱۸۹۸۰۱۸	۰/۸	۳۰
		ریال بر کیلووات سال	۱۰۹۵۹/۶۲	۴۶۱۹۴	۱۷۳۲۲۹۰
۱۸	مدت زمان ساخت نیروگاه (CL)	سال	۱	۲	۲
۱۹	کل هزینه اولیه نیروگاه (TPC)	دلار بر کیلووات	۲۲۹/۸۲۴	۶۰۰	۱۳۵۰
		ریال بر کیلووات	۶۲۰۵۲۴۸۰	۱۶۲۰۰۰۰۰۰	۳۶۴۵۰۰۰۰۰
۲۰	طول عمر نیروگاه (PL)	سال	۱۵	۲۰	۲۰
۲۱	نرخ تنزیل (R)	درصد	۴۵	۴۵	۴۵
۲۲	نرخ استهلاک (DR)	درصد	۶/۷	۵	۵

منبع: آمارهای رسمی منتشر شده توسط بانک جهانی (۲۰۰۹)، ترازنامه انرژی ایران منتشر شده توسط وزارت نیرو (۱۳۹۵)، معاونت تولید شرکت توانیر، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) و شرکت ملی نفت ایران

پس از کنترل کمی و کیفی داده‌های جمع‌آوری شده، مشخصات سرعت و جهت باد و پارامترهای تابع توزیع احتمال ویبول آن تعیین گردیده (سلیک[1]، ۲۰۰۳؛ آکپینار و آکپینار[2]، ۲۰۰۵) و سپس پتانسیل و چگالی توان باد ایستگاه‌های استان محاسبه شده است. نرم‌افزار مورد استفاده برای انجام این بخش از پژوهش و تحلیل انرژی بادی و نیز ترسیم گراف‌ها، Windographer است. پس از محاسبه متوسط سرعت باد، تدام سرعت باد و چگالی قدرت باد در ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی، با استفاده از درون‌یابی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS، لایه‌های سرعت باد، چگالی توان باد و پیوستگی وزش باد (تعداد ساعت) با سرعت ۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متری از سطح زمین تهیه شده است.

جدول (۲): موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان مازندران (نگارندگان، ۱۴۰۰)

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع ایستگاه (متر)	دوره آماری
۱	رامسر	۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه	۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه	-۲۰	۲۰۱۷-۱۹۵۵
۲	نوشهر	۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه	۳۶ درجه و ۳۹ دقیقه	-۲۰/۹	۲۰۱۷-۱۹۷۷
۳	سیاه‌بیشه	۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه	۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه	۲۱۶۵	۲۰۱۷-۱۹۹۹
۴	کجور	۵۱ درجه و ۴۴ دقیقه	۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه	۱۵۵۰	۲۰۱۷-۲۰۰۶
۵	بلده	۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه	۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه	۲۱۲۰	۲۰۱۷-۲۰۰۶
۶	آمل	۵۲ درجه و ۲۳ دقیقه	۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه	۲۳/۷	۲۰۱۷-۲۰۰۱
۷	بابلسر	۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه	۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه	-۲۱	۲۰۱۷-۱۹۵۱
۸	قراخیل	۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه	۳۶ درجه و ۲۷ دقیقه	۱۴/۷	۲۰۱۷-۱۹۸۴
۹	آلاشت	۵۲ درجه و ۵۱ دقیقه	۳۶ درجه و ۵ دقیقه	۱۹۰	۲۰۱۷-۲۰۰۳
۱۰	فیروزکوه	۵۲ درجه و ۵۰ دقیقه	۳۵ درجه و ۵۵ دقیقه	۱۹۷۵/۶	۲۰۱۷-۱۹۹۳
۱۱	پل‌سفید	۵۳ درجه و ۵ دقیقه	۳۶ درجه و ۸ دقیقه	۶۱۰	۲۰۱۷-۲۰۰۳
۱۲	ساری	۵۳ درجه	۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه	۲۳	۲۰۱۷-۱۹۹۹
۱۳	کیاسر	۵۳ درجه و ۳۲ دقیقه	۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه	۱۲۹۴/۳	۲۰۱۷-۲۰۰۲
۱۴	امیرآباد	۵۳ درجه و ۲۲ دقیقه	۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه	-۲۰	۲۰۱۷-۲۰۰۵
۱۵	گلوگاه	۵۳ درجه و ۴۹ دقیقه	۳۶ درجه و ۴۷ دقیقه	-۱۰	۲۰۱۷-۲۰۰۵

برای تخمین سرعت باد در ارتفاعات بالاتر (برای مثال ارتفاع ۴۰ متر مناسب برای احداث توربین بادی) از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده می‌شود.

رابطه ۱)
$$\frac{v}{v_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^a$$

رابطه ۲)
$$v = v_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^a$$

که v سرعت باد در ارتفاع z بالای سطح زمین (سرعت باد در ارتفاع مورد نظر) و v_{ref} سرعت مرجع یا سرعتی بادی در که در اتفاع z_{ref} اندازه‌گیری شده (سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری) و α تابع میزان زبری یا ناهمواری سطح زمین است و مقدار آن را می‌توان از رابطه ۳ به‌دست آورد.

رابطه ۳)
$$a = \frac{[0.37 - 0.088\ln v_{10}]}{[1 - 0.088\ln(z_{10}/10)]}$$

میزان چگالی انرژی باد نیز در یک مکان می‌تواند از رابطه ۳ به‌دست آید.

رابطه ۴)
$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} p c^3 \tau \left(\frac{k+3}{k}\right) T$$

1. Selic
2. Akpinar and Akpinar

یافته‌ها و بحث

توجیه اقتصادی نیروگاه بادی

جدول‌های ۳ و ۴ هزینه همتراز شده نیروگاه گازی (سوخت گاز) و نیروگاه بادی را نشان می‌دهد. مقایسه هزینه‌های تمام شده برای تولید سوخت توسط نیروگاه‌های حرارتی در شرایط فعلی و شرایط آزادسازی قیمت انرژی (سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر مبنای قیمت‌های واقعی انرژی) با هزینه‌های تولید برق توسط نیروگاه‌های بادی، استفاده از توربین‌های بادی را کاملاً توجیه‌پذیر می‌نماید. در این جدول LCOE[1] هزینه همتراز شده انرژی بر حسب کیلووات ساعت بر ریال است که بر پایه مجموع هزینه‌های سرمایه، هزینه تعمیر و نگه‌داری، هزینه سوخت و هزینه اثرات خارجی مشخص می‌شود. با توجه به محاسبات انجام شده مشخص است که قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها در وضعیت فعلی و بر مبنای استفاده از گاز باعث خواهد شد که کماکان نیروگاه‌های گازی مقرون به‌صرفه‌تر باشند. در این حالت می‌توان مشاهده نمود که حتی هزینه آلایندگی نمی‌تواند باعث مقرون به‌صرفه شدن نیروگاه بادی گردد؛ به این خاطر که نیروگاه بادی نسبت به تغییرات نرخ ارز حساسیت بالایی دارد که این حساسیت در نتیجه بالا بودن هزینه خرید تجهیزات وارداتی حاصل می‌شود. اما در صورتی‌که از گازوئیل برای تأمین سوخت نیروگاه‌های حرارتی استفاده شود، کاملاً مشخص است که با توجه به بالاتر بودن قیمت گازوئیل نسبت به گاز، استفاده از نیروگاه‌های بادی کاملاً مقرون به‌صرفه خواهد بود. اگر قیمت گاز در گام‌های بعدی هدفمندی یارانه حامل‌های انرژی افزایش پیدا کند و به قیمت ریالی گازوئیل نزدیک‌تر شود، نیروگاه گازی با سوخت گاز نیز نمی‌تواند با نیروگاه بادی به‌لحاظ اقتصادی، رقابت نماید.

جدول (۳): هزینه همتراز شده نیروگاه گازی (سوخت گاز) و نیروگاه بادی (نگارندگان، ۱۴۰۰)

قیمت سوخت (بر اساس سال ۱۳۹۹)	نرخ دلار (ریال)	$LOCE_t$ (ریال) نیروگاه گازی	$LOCE_w$ (ریال) نیروگاه گازی	
			۶۶۰ کیلووات	۲ مگاوات
۹۳۰ ریال (فعلی)	۲۷۰۰۰۰	۲۱۱۳۰/۰۹۲	۲۲۲۸۰/۵۰۸	۲۲۵۴۳/۶۹۳
۳۰ سنت (واقعی)	۲۷۰۰۰	۸۵۵۱۵/۵۲۳	۲۲۲۸۰/۵۰۸	۲۲۵۴۳/۶۹۳

جدول (۴): هزینه همتراز شده نیروگاه گازی (سوخت گازوئیل) و نیروگاه بادی (نگارندگان، ۱۴۰۰)

قیمت سوخت (بر اساس سال ۱۳۹۹)	نرخ دلار (ریال)	$LOCE_t$ (ریال) نیروگاه گازی	$LOCE_w$ (ریال) نیروگاه گازی	
			۶۶۰ کیلووات	۲ مگاوات
۳۵۰۰ ریال (فعلی)	۲۷۰۰۰۰	۴۷۶۴۱/۷۸۱	۲۲۲۸۰/۵۰۸	۲۲۵۴۳/۶۹۳
۷۸ سنت (واقعی)	۲۷۰۰۰	۲۰۰۲۹۶/۴۸	۲۲۲۸۰/۵۰۸	۲۲۵۴۳/۶۹۳

اگر قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر مبنای قیمت واقعی محاسبه شود، در هر دو وضعیت مصرف گاز به‌صورت تک سوخت و مصرف گاز و گازوئیل به‌صورت توأمان، نیروگاه‌های بادی توجیه‌پذیر خواهند بود. بنابراین، با رویکرد اقتصاد مقاومتی، جایگزینی نیروگاه‌های حرارتی تولید انرژی با نیروگاه‌های بادی در میان‌مدت و بلندمدت، اقتصادی و مقرون به‌صرفه خواهد بود. به این ترتیب که علاوه بر استفاده از توان انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک در تولید برق (با توجه به توان‌های محیطی استان مازندران)، خسارت‌های زیست‌محیطی بسیار پایین‌تر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی و پایایی و ماندگاری بیش‌تر سوخت‌های تجدیدناپذیر جهت انتقال به نسل‌های بعدی، هزینه‌های اقتصادی تولید نیروی برق و نگه‌داری شبکه‌های نیروگاهی نیز کاهش پیدا خواهد کرد. بر این اساس، ظرفیت‌سنجی پتانسیل فضایی انرژی بادی در سطح استان مازندران، می‌تواند با توجه به رویکرد اقتصاد مقاومتی در حوزه تأمین انرژی این استان، کاملاً توجیه‌پذیر باشد که در ادامه به تشریح یافته‌های آن بر اساس داده‌های مشخصات فنی باد ایستگاه‌های همدیدی استان پرداخته می‌شود.

1. Levelized Cost of Energy (LCOE)

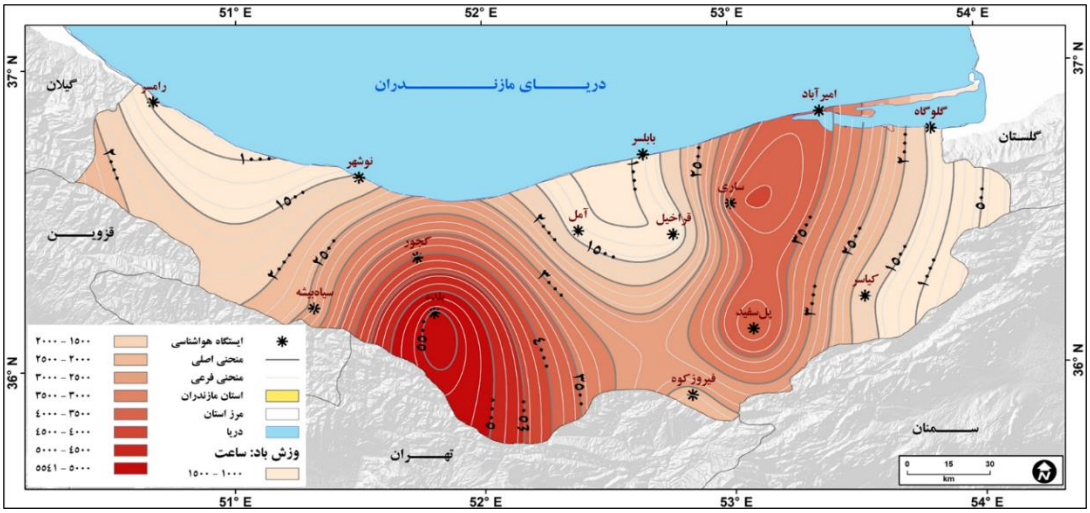
فراوانی و تداوم مقادیر سرعت باد

الگوی جریان باد در سطح زمین صرفاً در ایستگاه‌های سینوپتیک به‌طور مستمر و روزانه در چند نوبت مختلف ثبت شده و جریان باد در ترازهای ۲ تا ۱۰ متری از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. به‌طور کلی در سطح جلگه مازندران و نوار ساحلی آن، سمت غربی باد غالب در تمام فصول و اکثر ماه‌های سال به‌شمار می‌رود. مسیر باد نایب غالب تحت تأثیر کانون‌های محلی فشار تغییرات زیادی دارد. اما مسیر شرقی و شمال شرقی از فراوانی به‌نسبت بیش‌تری برخوردار هستند. ضمن آن‌که مسیر شمالی کم‌ترین دفعات وزش را داشته است. این امر نشان می‌دهد که تأثیر خشکی‌ها و دیگر عوامل جغرافیایی به‌دلیل نوسانات حرارتی بیش‌تر از دریای مازندران است و در فصول مختلف یک مرکز کم‌فشار محلی و نسبتاً بسته بر روی نواحی مرکزی دریای مازندران شکل می‌گیرد که مرکز مکش جریانات از محیط پیرامون است. به‌همین دلیل بادهای وزش یافته از سمت شمال اندک است و در شرایط محلی صرفاً بادهای دریا به خشکی را به‌صورت نسیم‌های محلی می‌توان مشاهده نمود که عمق نفوذ آن‌ها به داخل جلگه مازندران اندک است. در فصل زمستان، الگوی جریان باد در جلگه ساحلی مازندران عمدتاً تحت تأثیر جریانات غربی با ۱۷/۹۳ درصد است و باد نایب غالب از سمت شرقی با ۱۱/۶۵ درصد از فراوانی کل دیده‌بانی‌ها وزش می‌یابد. همچنین در فصل زمستان، در سایر جهات جغرافیایی، مقدار و جریان باد اندک است. فصل بهار، به‌طور کلی دارای ۲۹/۶۲ درصد هوای آرام است و مسیر غربی با ۱۴/۶۶ درصد جهت باد غالب را شامل می‌شود. مسیر بادهای شمال شرقی باد نایب غالب را به‌وجود می‌آورد و همچنین شدیدترین و بیش‌ترین بادها با سرعت ۵ تا ۷ متر در ثانیه منطبق بر غالب و جهت شمال غربی می‌باشد. در این فصل کم‌ترین وزش باد از جهت جنوب شرقی بوده که فراوانی ۳/۶۸ درصد را نشان می‌دهد. الگوی جریان باد در فصل تابستان به‌گونه‌ای است که به‌طور متوسط ۳۴/۸۸ درصد هوای آرام دارد. جهات غربی و جنوبی در فراوانی تعداد بادها به‌ترتیب مسیر باد غالب و نایب غالب به‌شمار می‌رود. با این توضیح که وقوع بادهایی با میانگین سرعت ۵ تا ۷ متر در ثانیه از سمت غرب، نشان‌دهنده شدت بیش‌تر بادها از این جهت می‌باشد. فصل پاییز در میان سایر فصول از هوای آرام‌تری برخوردار است و در مجموع ۳۷/۸۷ درصد از مواقع هوا آرام می‌باشد. جهت غربی، باد غالب این فصل است و شدیدترین بادها نیز از همین سمت می‌وزند و جهت جهت جنوبی مسیر نایب غالب به‌شمار می‌رود . همچنین جریان باد از سمت شمال به میزان ۲/۷۹ درصد حداقل تعداد وزش را به‌خود اختصاص داده است.

با توجه به داده‌های باد روزانه، حدود ۳۴/۲۱ درصد از مواقع شبانه‌روز در سال، هوای ناحیه جلگه‌ای آرام است و در سایر اوقات باد از جهات مختلف می‌وزد. حدود ۱۵/۴ درصد از بادهای وزیده شده سرعتی حدود ۱ تا ۳ متر در ثانیه دارند و ۳۹/۸ درصد نیز میانگین سرعت آن‌ها ۳ تا ۵ متر در ثانیه است که هر دو گروه از بادهای فوق جریان‌های نسیم ضعیفی را به‌وجود می آورند. حدود ۱۰/۵۸ درصد از بادها نیز میانگین سرعت آن‌ها ۵ تا ۷ متر در ثانیه است که سری بادهای نسبتاً قوی را شامل می‌شود. در طول سال جهت باد غربی با ۱۴/۴۸ درصد از کل فراوانی جهت غالب را شامل می‌شود و باد جنوب غربی با ۹ درصد مسیر نایب غالب و باد جنوب شرقی با ۳/۹۹ درصد حداقل میزان وزش باد را دارا بوده است.

با استفاده از داده‌های مجموع ساعات تداوم وزش باد با سرعت برابر یا بیش‌تر از ۳ متر بر ثانیه، به‌عنوان سرعت آستانه حداقل برای احداث توربین‌های بادی، نقشه هم‌تداوم سالانه تعداد ساعات وزش باد با سرعت ۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر ترسیم شده است (شکل ۲). ایستگاه بلده با تداوم وزش ۵۵۴۸ ساعت (۶۳/۳ درصد) برابر یا بیش‌تر از آستانه مذکور در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، بهترین وضعیت را از لحاظ احداث توربین‌های بادی دارا می‌باشد. ایستگاه‌های کجور، پل‌سفید، ساری و امیرآباد نیز به‌ترتیب با تداوم وزش ۴۰۴۸، ۳۹۳۲، ۳۸۶۸ و ۳۶۴۰ ساعت (به‌ترتیب ۴۶/۲، ۴۴/۹، ۴۴/۲ و ۴۱/۶ درصد) نیز شرایط به‌نسبت مساعدی برای احداث برخی از توربین‌های بادی را دارند. اما در مقابل، ایستگاه‌های آلاشت، قراخیل قائم‌شهر، آمل، بابلسر، فیروزکوه، گلوگاه، کیاسر، نوشهر و رامسر، دارای مقادیر پایینی از تداوم وزش بادهای با سرعت بیش‌تر از ۳ متر بر ثانیه بوده و نمی‌توانند محل‌های مناسبی برای نصب

توربین‌های بادی و احداث نیروگاه باشند. در مجموع، بخش‌های غربی استان مازندران شامل شهرستان‌های رامسر، تنکابن و چالوس، شرق شهرستان‌های بهشهر، نکا و ساری و همچنین نوار ساحلی استان شامل شهرستان‌های محمودآباد، بابلسر و غرب شهرستان جویبار و نیز قسمت‌های ساحلی شهرستان‌های نوشهر و نور، به‌همراه بخش‌های دشتی و جلگه‌ای شهرستان‌های قائم‌شهر، بابل و آمل از وضعیت ضعیفی به‌لحاظ تداوم وزش باد با حداقل آستانه برای نصب توربین‌های بادی برخوردار هستند. این در حالی است که در بخش‌های کوهپایه‌ای و مرتفع شهرستان‌های نوشهر، نور، آمل و نیز محدوده همجواری شهرستان‌های قائم‌شهر و سوادکوه به‌همراه بخش‌های غربی ساری، نکا و بهشهر دارای وضعیت به‌نسبت مساعدتری به‌لحاظ تداوم وزش بادهای با سرعت‌های ۳ متر بر ثانیه و بزرگ‌تر از آن می‌باشند. در نهایت می‌توان مساعدترین شرایط نصب توربین‌های بادی را در بخش‌های کوهستانی و مرتفع شهرستان نور مشاهده نمود.



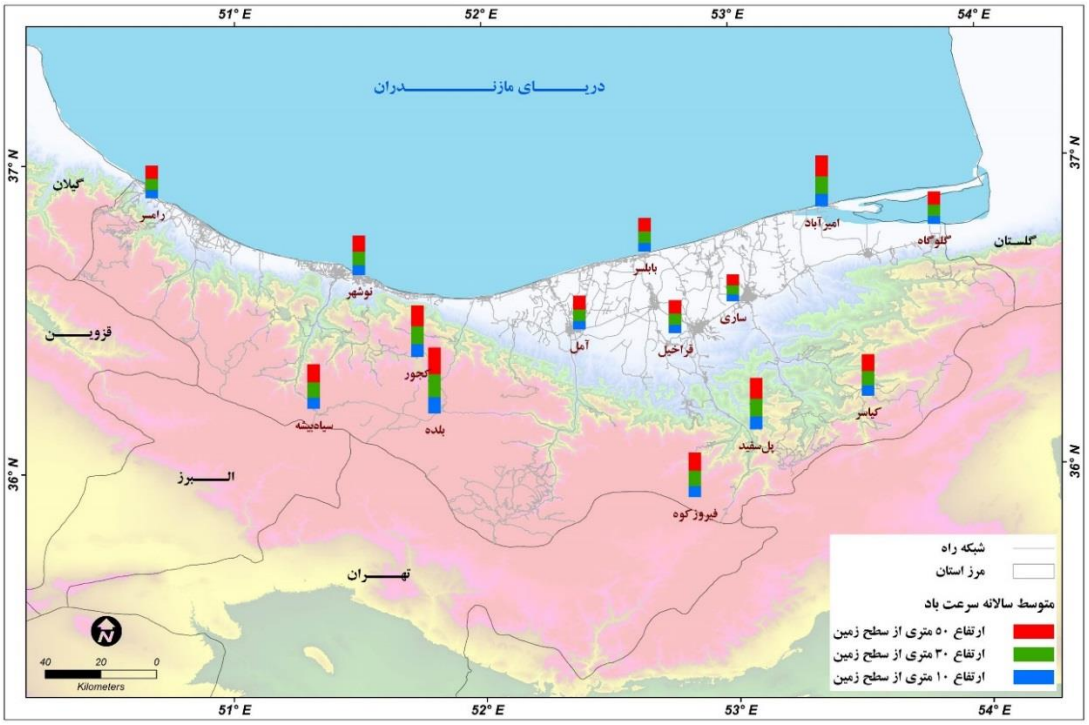
شکل (۲): نقشه هم‌تداوم سالانه تعداد ساعات وزش باد با سرعت برابر یا بیش از ۳ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از زمین (نگارندگان، ۱۴۰۰)

روند تغییرات سرعت باد متوسط ماهانه و سالانه با افزایش ارتفاع

در منابع علمی، ارقام متفاوتی برای ارتفاع دکل توربین‌های بادی ذکر شده است. معمولاً ارتفاع محور بیش‌تر توربین‌های بادی تجاری، در حدود ۳۰ الی ۸۰ متری (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ مجرد و همتی، ۱۳۹۲) و اغلب ۵۰ متری از سطح زمین است؛ لیکن از ارتفاع‌های ۱۲۰، ۱۵۰ و حتی ۲۰۰ متری هم صحبت به میان آمده است. با توجه به رابطه‌های محاسبه سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف، مقادیر سرعت متوسط ماهانه و سالانه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان تا ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین محاسبه شده است. بر مبنای این محاسبه‌ها، می‌توان مناطق دارای پتانسیل بالا و پایین تولید انرژی بادی را با دقت بیش‌تری از یکدیگر متمایز نمود. ایستگاه‌های مطالعاتی در اغلب ماه‌های سال، فاقد بادهایی با سرعت مورد لزوم برای نصب توربین‌های بادی می‌باشند. سرعت‌های باد بیش از ۳ متر بر ثانیه، به‌عنوان حداقل آستانه سرعت مورد نیاز برای به حرکت درآوردن توربین‌ها، تنها در برخی از ماه‌های سال در ایستگاه‌های فیروزکوه، سیاه‌بیشه، کجور، بلده، امیرآباد و پل‌سفید مشاهده می‌شود. تعداد ماه‌های با متوسط سرعت وزش باد ۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر، در ایستگاه بلده ۸ ماه، در ایستگاه کجور ۶ ماه، در ایستگاه پل‌سفید ۵ ماه، در ایستگاه فیروزکوه ۴ ماه، در ایستگاه امیرآباد ۳ ماه و در ایستگاه سیاه‌بیشه ۱ ماه است. بنابراین، بیش‌ترین ماه‌ها و بالاترین سرعت‌های ماهانه باد، مربوط به ایستگاه بلده است. ماه‌های مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای و آگوست نیز دارای بالاترین مقادیر متوسط سرعت باد در منطقه مطالعاتی هستند.

در ادامه، تغییرات سرعت باد با افزایش ارتفاع از سطح زمین تا ارتفاع ۱۰۰ متری محاسبه شده است. معمولاً حداقل سرعت برای راه‌اندازی توربین‌ها کوچک، بین ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، بسته به نوع و طراحی توربین متغیر است. بر این اساس، تنها ایستگاه بلده است

که در تمامی ارتفاعات مختلف از سطح زمین، قابلیت بهره‌برداری از برق بادی را در مقیاس محدود دارا می‌باشد. ایستگاه‌های فیروزکوه، سیاه‌بیشه، کجور، امیرآباد و پل‌سفید از ارتفاع ۲۰ متری به بالاتر، ایستگاه‌های نوشهر و کیاسر از ارتفاع ۳۰ متری به بالاتر و ایستگاه‌های آمل، بابلسر و قراخیل قائم‌شهر از ارتفاع ۴۰ متری به بالاتر شرایط محدود بهره‌برداری از انرژی بادی را دارند. از دیگر نکاتی که در انتخاب حداقل سرعت باد باید مد نظر قرار گیرد، حداقل سرعتی است که در رده‌بندی‌های توربین‌های بادی مطابق با استاندارد بین‌المللی IEC61400-1 برای توربین‌های بادی درنظر گرفته شده است. این سرعت مربوط به رده IV بوده و برابر ۶ متر بر ثانیه می‌باشد (نوراللهی، ۱۳۹۰). از این نظر، تنها ایستگاه بلده است که از ارتفاع تقریبی ۴۰ متری به بعد از شرایط مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی باد برخوردار است و در تمامی ماه‌های سال، سرعت متوسط باد، معادل یا بیش‌تر از آستانه لازم می‌باشد. نقشه‌های هم‌سرعت متوسط سالانه باد منطقه مورد مطالعه برای ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متری در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نقشه تهیه شده، حداکثر سرعت باد ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین، در بخش‌های جنوبی و مرتفع شهرستان‌های نور، آمل نوشهر، سوادکوه و تا حدودی چالوس رخ می‌دهد که بیش‌ترین مقدار آن هم بر بخش‌های جنوبی شهرستان نور منطبق می‌باشد. این در حالی است که قسمت‌های دشتی و ساحلی استان مازندران، به‌خصوص محدوده شهرستاهای جویبار، بابلسر، محمودآباد، ساری، قائم‌شهر، شمال شهرستان‌های سوادکوه، بابل، آمل و نیز بخش‌های غربی استان (رامسر و تنکابن) و شرق شهرستان‌های بهشهر و نکا دارای حداقل‌های متوسط سرعت باد سالانه می‌باشند.

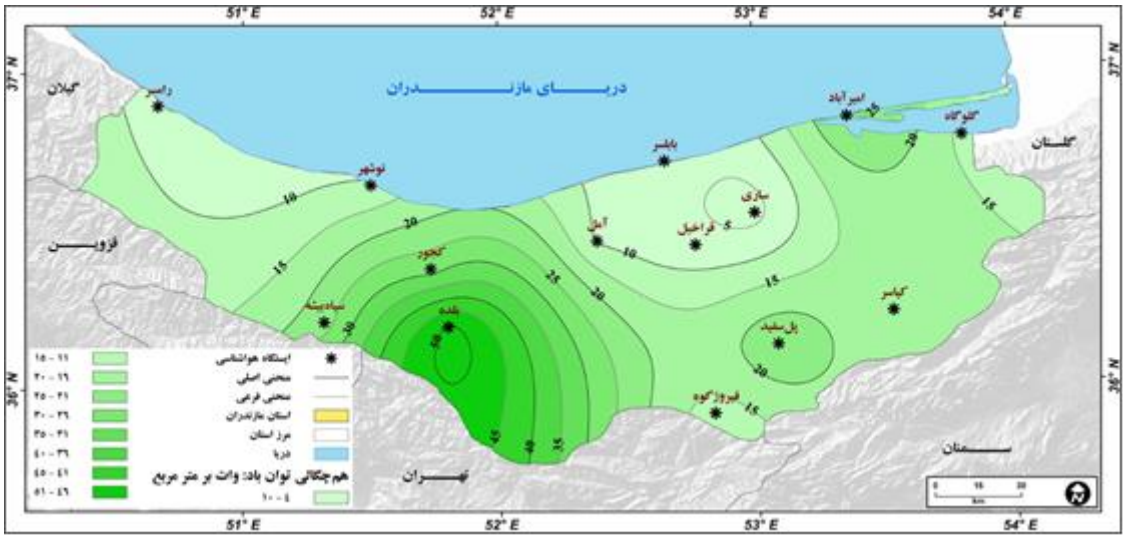


شکل (۳): نقشه هم‌سرعت متوسط سالانه باد استان مازندران در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متری از سطح زمین (نگارندگان، ۱۴۰۰)

چگالی قدرت باد (WPD)[1]

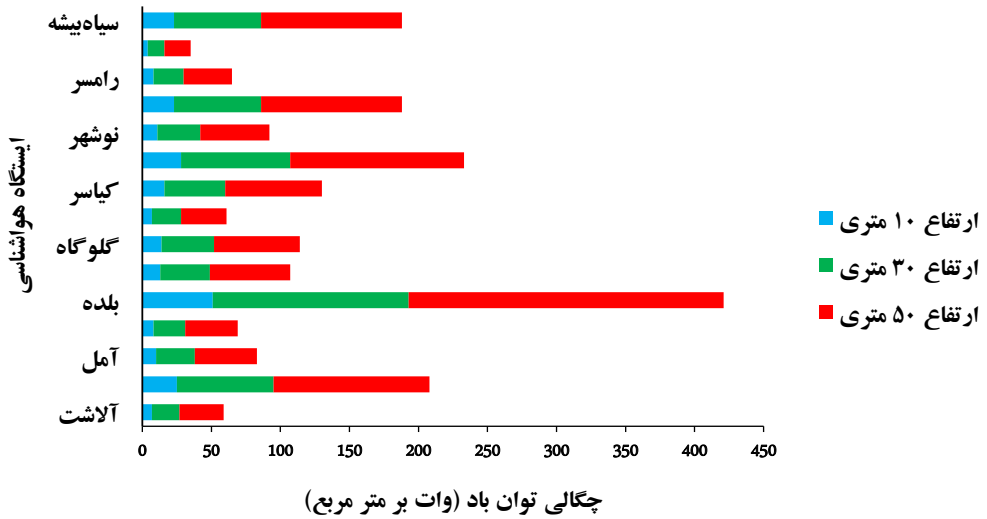
با توجه به کاهش چگالی هوا با افزایش ارتفاع از سطح دریا و در نتیجه برخورد کم‌تر مولکول‌های هوا با پره‌های توربین، چگالی قدرت باد نسبت به باد، مشخصه قوی‌تری در معرفی توان ایستگاه‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر است. ایستگاه بلده در طی دوره آماری با چگالی انرژی باد ۵۱ وات بر متر مربع در ارتفاع ۱۰ متری، ۱۴۲ وات بر متر مربع در ارتفاع ۳۰ متری و ۲۲۸ وات بر متر مربع در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، بیش‌ترین چگالی قدرت باد را در بین ایستگاه‌های مطالعاتی دارد. پس از بلده، ایستگاه کجور با چگالی‌های ۲۸، ۷۹ و ۱۰۳ وات بر متر مربع به‌ترتیب در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متری از سطح زمین، وضعیت بهتری را به‌لحاظ

چگالی قدرت باد دارا می‌باشد. ایستگاه‌های امیرآباد، سیاه‌بیشه و پل سفید در رده‌های بعدی چگالی قدرت باد در استان مازندران قرار گرفته‌اند. پایین‌ترین میزان چگالی قدرت باد در ایستگاه ساری است که برای ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متری به‌ترتیب ۴، ۸ و ۱۲ وات بر متر مربع محاسبه شده است. در ایستگاه‌های آلاشت، قراخیل، رامسر، بابلسر و آمل نیز میزان چگالی قدرت باد پایین است. نقشه پهنه‌بندی چگالی توان باد ایستگاه‌های هواشناسی استان مازندران در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل (۴): هم‌چگالی قدرت باد سالانه ایستگاه‌های استان مازندران در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (نگارندگان، ۱۴۰۰)

مشاهده می شود که در بین ایستگاه‌های استان مازندران، ایستگاه بلده به‌لحاظ موقعیت منطقه و با داشتن سرعت باد بیش از ۴ متر در ثانیه در ۶ ماه از سال، به‌خصوص در ماه‌های ژوئن و جولای، حداکثر چگالی انرژی باد را که حدود ۵۱ وات بر متر مربع است، دارد. ایستگاه‌های کجور، امیرآباد، سیاه‌بیشه و پل سفید به‌ترتیب با ۲۸، ۲۵، ۲۳ و ۲۳ وات بر متر مربع، در رده‌های بعدی چگالی توان باد در سطح استان قرار گرفته‌اند. ایستگاه‌های ساری، آلاشت، قراخیل، رامسر و بابلسر به‌ترتیب با ۴، ۷، ۷، ۸ و ۸ وات بر متر مربع، از حداقل چگالی انرژی باد در ارتفاع ۱۰ متری طی دوره آماری مورد بررسی (سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷) برخوردار هستند (شکل ۵).

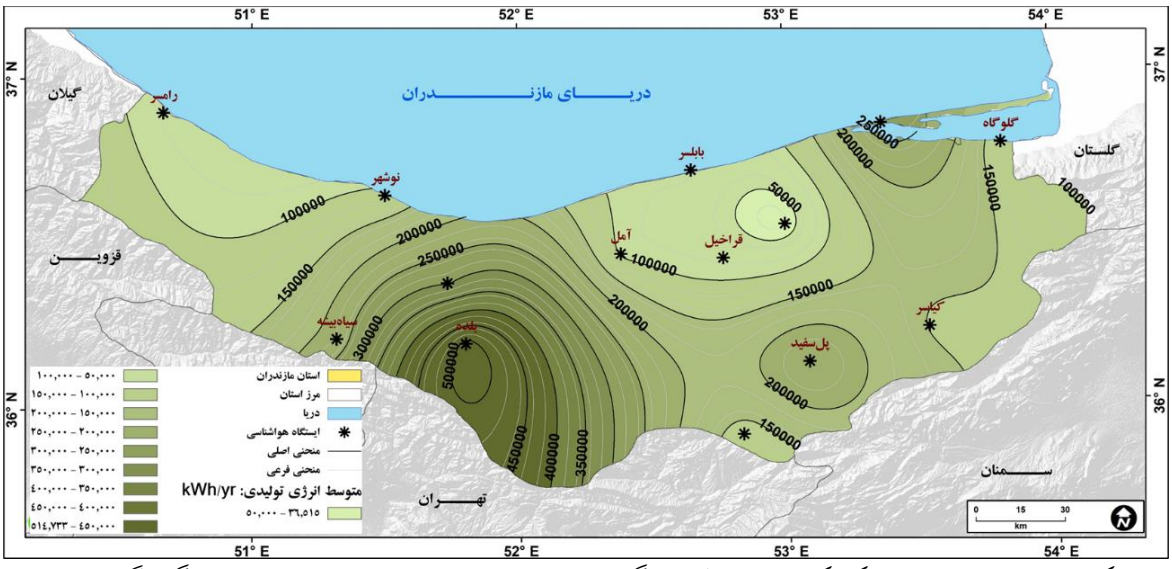


شکل (۵): نمودار چگالی قدرت باد سالانه ایستگاه‌های استان مازندران در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متری از سطح زمین (نگارندگان، ۱۴۰۰)

1. Wind Power Density

انرژی قابل استحصال باد

میزان انرژی قابل استحصال توسط توربین‌های بادی، علاوه بر سرعت و تداوم باد به عواملی همچون راندمان توربین، ارتفاع دکل و دایره چرخش پره‌ها (سطح جاروب شده) وابسته است. در حال حاضر، توربین‌های با ظرفیت ۳ تا ۵ مگاوات در بازارهای جهانی عرضه می‌گردد؛ اما حمل‌ونقل و نصب این توربین‌ها نیازمند تجهیزات و زیرساخت‌های خاص خود می‌باشد. توربین‌های نصب شده در ایران با تکنولوژی شرکت وستاس دانمارک، دارای ارتفاع ۴۰ متری و محدوده سرعتی ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه هستند. ایستگاه بلده در بین ایستگاه‌های مختلف استان، با دارا بودن میانگین سالانه قدرت باد ۵۸/۴ کیلووات و میزان انرژی الکتریکی تولیدی سالانه حدود ۵۱۱۴۵۲ کیلووات ساعت در سال و ظرفیت شبکه ۱۷/۷ درصد، بالاترین مقدار انرژی الکتریکی خروجی را در استان دارد. لذا این منطقه جهت نصب توربین‌های بادی و احداث مزرعه بادی برای تولید انرژی برق، مکان مناسبی در سطح استان مازندران می‌باشد. ایستگاه‌های کجور، امیرآباد، پل‌سفید و سیاه‌بیشه در رده‌های بعدی پتانسیل استحصال انرژی بادی قرار می‌گیرند. در مقابل، ایستگاه‌های ساری، آلاشت، قراخیل، رامسر و بابلسر، به جهت سرعت باد کم‌تر، مکان‌های مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی بادی محسوب نمی‌شوند. نقشه پهنه‌بندی انرژی الکتریکی خروجی سالانه ایستگاه‌های استان مازندران در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، در شکل ۶ آورده شده است.



شکل (۶): نقشه پهنه‌بندی انرژی الکتریکی خروجی سالانه ایستگاه‌های استان مازندران در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین (نگارندگان، ۱۴۰۰)

نتیجه‌گیری

راهبردهای بخش انرژی می‌بایست با رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی و سرمایه‌گذاری در بخش توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر تدوین و برنامه‌ریزی شوند. اتلاف بخش عمده‌ای از برق تولیدی در شبکه‌های انتقال، فرسودگی واحدهای پتروشیمی و پالایشگاهی و آلودگی هوا در شهرهای بزرگ دلیلی بر این ادعا است. انرژی‌های تجدیدپذیر به سرعت در حال گسترش است و پاک بودن، تجدیدپذیر بودن، در دسترس بودن تکنولوژی برداشت و اقتصادی بودن را می‌توان شاخص‌های اصلی آن به‌شمار آورد. محققان بر این باور هستند که این انرژی‌ها در قرن بیست‌ویک به‌دلیل تنوع و گستردگی آن‌ها در سرتاسر جهان می‌توانند جای انرژی‌های تجدیدناپذیر مانند ذخایر نفت و گاز را پر کنند. با بهینه‌سازی انرژی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به حداکثر استفاده از توان واحدهای نیروگاهی، پالایشگاهی و پتروشیمی دست یافت و از طرفی بحران آلودگی شهرها را نیز کنترل کرد. در اقتصاد مقاومتی به جذب سرمایه‌های داخلی و خارجی برای توسعه انرژی اشاره شده است. اما با توجه به وضع تحریم‌ها علیه ایران و بالا

رفتن ریسک سرمایه‌گذاری برای کشورهای خارجی، امکان جذب سرمایه به میزان کافی برای کشور مقدور نیست. بدین‌ترتیب، به‌نظر می‌رسد به کمک درآمدهای حاصل از فروش نفت و گاز و دیگر بخش‌های اقتصادی کشور، می‌توان زیرساخت‌های لازم برای توسعه انرژی‌های نو اعم از منابع تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی و باد و دیگر منابع غیر متعارف نفت و گاز، فراهم کرد. از مجموع انرژی‌های یاد شده موسوم به انرژی‌های نو، به‌نظر می‌رسد که استفاده از انرژی خورشید و باد در کشور ما اقتصادی‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر باشد؛ اما به جهت هزینه گزاف تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی امروزه توجه بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران به انرژی بادی معطوف گردید. با توجه به منابع هنگفتی که دولت برای تولید یک کیلووات برق هزینه می‌کند، این پرسش برای همه مطرح است که برای کاهش مصرف و تأمین انرژی ارزان‌تر چه باید کرد. در بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد یکی از اقتصادی‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق است که علاوه بر عدم آلودگی محیط زیستی و فراوان و دائمی بودن، کم‌ترین نوسانات قیمتی را نیز دارد. این پژوهش، با هدف قابلیت‌سنجی فضایی انرژی بادی در استان مازندران انجام گرفت. نقشه پهنه‌بندی سرعت باد ارتفاع ۵۰ متری در سطح استان مازندران، بیان‌گر آن است که در بین ایستگاه‌های مطالعاتی، ایستگاه بلده با میانگین ماهانه سرعت باد ۵/۹۸ متر بر ثانیه در ارتفاع ۵۰ متری، از حداکثر سرعت باد ۷/۷۸ متر بر ثانیه در ماه جولای برخوردار است. در تمام طول سال، ایستگاه بلده در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، مقادیر باد با سرعت بالاتر از ۳ متر بر ثانیه را ثبت کرده و این می‌تواند نشان‌دهنده وجود شرایط مناسب جهت راه‌اندازی توربین‌ها و استحصال انرژی از آن‌ها باشد. بر پایه رابطه‌های محاسبه چگالی توان باد و نیز مقایسه نقشه‌های هم‌چگالی قدرت باد سالانه منطقه در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متری از سطح زمین با پهنه‌های نقشه‌های سرعت باد، می‌توان دریافت که چگالی قدرت باد به‌طور مستقیم از سرعت باد تأثیر می‌پذیرد. بنابراین، وضعیت مشابهی همانند سرعت باد در مورد چگالی آن ملاحظه می‌شود. بدین‌ترتیب که ایستگاه‌های بلده، کجور، امیرآباد، پل‌سفید، سیاه‌بیشه و فیروزکوه بیش‌ترین مقادیر و ایستگاه‌های ساری، آلاشت، قراخیل، رامسر، بابلسر، آمل و نوشهر پایین‌ترین مقادیر چگالی باد را دارا هستند. میزان انرژی قابل استحصال توسط توربین‌های بادی، علاوه بر سرعت و تداوم باد به عواملی همچون راندمان توربین، ارتفاع دکل و دایره چرخش پره‌ها (سطح جاروب شده) وابسته است. در حال حاضر، توربین‌های با ظرفیت ۳ تا ۵ مگاوات در بازارهای جهانی عرضه می‌گردد؛ اما حمل‌ونقل و نصب این توربین‌ها نیازمند تجهیزات و زیرساخت‌های خاص خود می‌باشد. توربین‌های نصب شده در ایران با تکنولوژی شرکت وستاس دانمارک، دارای ارتفاع ۴۰ متری و محدوده سرعتی ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه هستند. ایستگاه بلده در بین ایستگاه‌های مختلف استان، با دارا بودن میانگین سالانه قدرت باد ۵۸/۴ کیلووات و میزان انرژی الکتریکی تولیدی سالانه حدود ۵۱۱۴۵۲ کیلووات ساعت در سال و ظرفیت شبکه ۱۷/۷ درصد، بالاترین مقدار انرژی الکتریکی خروجی را در استان دارد. لذا این منطقه جهت نصب توربین‌های بادی و احداث مزرعه بادی برای تولید انرژی برق، مکان مناسبی در سطح استان مازندران می‌باشد. در مجموع، بخش‌های غربی استان مازندران شامل شهرستان‌های رامسر، تنکابن و چالوس، شرق شهرستان‌های بهشهر، نکا و ساری و همچنین نوار ساحلی استان شامل شهرستان‌های محمودآباد، بابلسر و غرب شهرستان جویبار و نیز قسمت‌های ساحلی شهرستان‌های نوشهر و نور، به‌همراه بخش‌های دشتی و جلگه‌ای شهرستان‌های قائم‌شهر، بابل و آمل از وضعیت ضعیفی به‌لحاظ تداوم وزش باد با حداقل آستانه برای نصب توربین‌های بادی برخوردار هستند. این در حالی است که در بخش‌های کوهپایه‌ای و مرتفع شهرستان‌های نوشهر، نور، آمل و نیز محدوده همجواری شهرستان‌های قائم‌شهر و سوادکوه به‌همراه بخش‌های غربی ساری، نکا و بهشهر دارای وضعیت به‌نسبت مساعدتری به‌لحاظ تداوم وزش بادهای با سرعت‌های ۳ متر بر ثانیه و بزرگ‌تر از آن می‌باشند. در نهایت می‌توان مساعدترین شرایط نصب توربین‌های بادی را در بخش‌های کوهستانی و مرتفع شهرستان نور مشاهده نمود. حداکثر سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین، در بخش‌های جنوبی و مرتفع شهرستان‌های نور، آمل نوشهر، سوادکوه و تا حدودی چالوس رخ می‌دهد که بیش‌ترین مقدار آن هم بر بخش‌های جنوبی شهرستان

نور منطبق می‌باشد. این در حالی است که قسمت‌های دشتی و ساحلی استان مازندران، به‌خصوص محدوده شهرستاهای جویبار، بابلسر، محمودآباد، ساری، قائم‌شهر، شمال شهرستان‌های سوادکوه، بابل، آمل و نیز بخش‌های غربی استان (رامسر و تنکابن) و شرق شهرستان‌های بهشهر و نکا دارای حداقل‌های متوسط سرعت باد سالانه می‌باشند.

منابع

احمدی، محمود.؛ داداشی رودباری، علی. (۱۳۹۴). توان‌سنجی نیروگاه‌های بادی با روش FAHP در منطقه سمنان، فصل‌نامه علمی پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران، دوره جدید، سال سیزدهم، شماره ۴۷، صص. ۸۱-۹۸.

اسفندیاری، علی.؛ رنگزی، کاظم.؛ صابری، عظیم.؛ فتاحی مقدم، مهدی. (۱۳۹۰). پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه‌های خورشیدی با بررسی پارامترهای اقلیمی در استان خوزستان با استفاده از GIS، همایش ملی ژئوماتیک، تهران، صص ۱-۹.

انتظاری، علیرضا.؛ امیراحمدی، ابوالقاسم.، عرفانی، عاطفه.، برزویی، اکرم. (۱۳۹۱). ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال سوم، شماره‌های ۹ و ۱۰، صص. ۳۳-۴۶.

باقری، رضا.؛ تقوی، مسعود. (۱۳۹۳). بررسی نقش صنعت نفت، گاز و انرژی برای تحقق اقتصاد مقاومتی، دومین کنفرانس بین‌المللی اقتصاد در شرایط تحریم، شرکت پژوهشی طرود شمال، بابلسر، صص ۱-۱۳.

بویل، گادفری. (۱۳۹۵). انرژی‌های نو: انرژی برای آینده‌ای پایدار، مترجم: عبدالرحیم پرتوی، چاپ سوم، مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، ۶۰۸ ص.

جانبازقبادی، غلامرضا. (۱۳۹۸). پتانسیل‌سنجی انرژی باد جهت تعیین مکان بهینه برای احداث توربین‌های بادی در استان مازندران، آمایش جغرافیایی فضا، سال سوم، شماره ۳۴، صص. ۲۰۹-۲۲۴.

حیدری، مصطفی. (۱۳۸۸). مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در ایران، نشریه مبدل گرمایی، پیاپی ۱۸، صص. ۶۰-۷۱.

دانشفر، محمد حسین.؛ مقدم، محمد رضا. (۱۳۹۵). راهبردهای اقتصاد مقاومتی در صنعت نفت و گاز کشور، اولین کنفرانس ملی مدیریت و اقتصاد جهانی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، صص ۱-۱۶.

رضایی بنفشه، مجید.؛ جهانبخش، سعید.؛ دین‌پژوه، یعقوب.؛ اسمعیل‌پور، مرضیه. (۱۳۹۳). امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال سوم، شماره ۴۶، صص. ۲۶۱-۲۷۴.

صحرایی، صادق.؛ اکبریان فیضی، لیلا. (۱۳۹۸). راهبردهای اقتصاد مقاومتی در حوزه انرژی با محوریت صنعت نفت و گاز کشور، ششمین کنگره ملی تحقیقات راهبردی در شیمی و مهندسی شیمی با تأکید بر فناوری‌های بومی ایران، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، صص. ۱-۱۳.

عزیزی، قاسم.؛ فرید مجتهدی، نیما.؛ شعبان‌زاده، فائزه.؛ نگاه، سمانه.؛ عابد، حسن. (۱۳۹۶). رفتارشناسی باد در ایستگاه‌های البرز غربی تحت تأثیر واداشت‌های محیطی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال بیست و یکم، شماره ۶۲، صص. ۲۰۳-۲۲۲.

گندمکار، امیر. (۱۳۸۹). تعیین گستره افقی باد سیستان با استفاده از تحلیل خوشه‌ای. فصل‌نامه جغرافیایی طبیعی، شماره دهم، صص. ۶۷-۷۶.

مجرد، فیروز.؛ همتی، شهرام. (۱۳۹۲). ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره سیزدهم، سال ۲۹، صص. ۱۳۷-۱۵۷.

محسنی، حسین. (۱۳۹۷). راهبردهای بخش انرژی مبتنی بر رویکرد اقتصاد مقاومتی، اقتصاد توسعه و برنامه‌ریزی، سال هفتم، شماره ۲، صص. ۲۵-۴۷.

محمدی، حسین.؛ رستمی جلیلیان، شیما.؛ تقوی، فرحناز.؛ شمسی‌پور، علی اکبر. (۱۳۹۱). پتانسیل‌سنجی انرژی باد در استان کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و چهارم، شماره ۲، صص. ۱۹-۳۲.

مریانجی، زهره.؛ حسینی، سید اکبر.؛ عباسی، حامد. (۱۳۹۶). ناحیه‌بندی و پیش‌بینی پتانسیل انرژی باد در استان همدان با استفاده از سیستم

اطلاعات جغرافیایی، اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۴، صص. ۱۸۵-۱۰۴.

میلانی، جمیل. (۱۳۹۴). اقتصاد مقاومتی و خودباوری ملی، فرصت‌ها و چالش‌های تحقق آن، مجله اقتصادی، سال پانزدهم، شماره‌های ۷ و ۸، صص. ۵-۲۲.

Ajayi, O.O., Fagbenle, R.O., and Katende, J. 2011. Availability of wind energy resource potential for power generation at Jos, Nigeria. Frontiers in Energy Vol. 5. No. 4. Pp. 376-385.

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, Vol. 46. Pp. 515-532.

Allouhi, A., Zamzoum, O., and Islam, M.R. 2017. Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 72. Pp. 311-324.

Chen, W., Castruccio, S., and Genton, M.G. 2018. Current and future estimates of wind energy potential over Saudi Arabia. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 123. Pp. 6443-6459.

Ilkilic, C., and Aydin, H. 2015. Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44. Pp. 78-86.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Report 2013, ipcc.ch site, Report Section.

Kenisarin, M., Mahkamov, K. 2007. Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11. No. 9. Pp. 1913-1965.

Kruyt, B., Dujardin, J., and Lehning, M. 2018. Improvement of wind power assessment in complex terrain: the case of COSMO-1 in the Swiss Alps. Front. Energy Res. Vol. 6. 102. DOI: 10.3389/fenrg.2018.00102.

Negash, T., Mollerstrom, E., and Ottermo, F. 2020. An assessment of wind energy potential for the three topographic regions of Eritrea. Energies, Vol. 13. No. 1846. Pp. 1-12.

Rehman, S., Natarajan, N., Vasudenvan, M., and Alhems, L.M. 2020. Assessment of wind energy potential across varying topographical features of Tamil Nadu, India. Energy Exploration and Exploitation, Vol. 38. No. 1. Pp. 175-200.

REN21 (Global Status Report). 2015. Annual reporting on renewables: ten years of excellence. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.

Salam, M.A., Yazdani, M.G., and Rahman, Q.M. 2018. Investigation of wind energy potentials in Brunei Darussalam. Frontiers in Energy. Available at: https://doi.org/10.1007/s11708-018-0528-4 (accessed 26 August 2019).

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, Vol. 29. Pp. 593-604.

Strantzali, E., and Aravosis, K. 2016. Decision making in renewable energy investments: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55. Pp. 885-898.

نحوه ارجاع به مقاله:

بایرام‌وند، ریحانه؛ متولی، صدرالدین؛ جانباز قبادی؛ غلامرضا؛ درفشی، خبات (۱۴۰۱) پتانسیل‌سنجی و برآورد مشخصه‌های نیروی باد برای تولید انرژی (ایستگاه‌های همدیدی استان مازندران)، جغرافیا و مطالعات محیطی ۱۱ (۴۳)، ۶-۲۳، Dor: 20.1001.1.20087845.1401.11.43.1.2

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granded to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – acsses article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.