



Institute of Geography



## Evaluated the location of Wind Power Plants Based on Spatial Assessment of Environmental Factors Mazandaran Province, Iran

Reyhaneh Bairamvand <sup>a</sup>, Sadroddin Motevalli <sup>b</sup>, GholamReza Janbaz Ghobadi <sup>c</sup>, Khabat Derafshi<sup>d</sup>.

<sup>a</sup>. PhD student in Climatology, Department of Geography, Noor Branch, Islamic Azad University, Noor, Iran

<sup>b</sup>. Associate Professor of Department of Geography, Noor Branch, Islamic Azad University, Noor, Iran

<sup>c</sup>. Assistant Professor, Department of Geography, Noor Branch, Islamic Azad University, Noor, Iran

<sup>d</sup>. Assistant Professor of Geomorphology, Department of Natural Heritage, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Wind energy offers many advantages, which explains why it's one of the fastest-growing energy sources in the world. Many researches efforts are aimed at addressing the challenges to greater use of wind energy. Wind energy doesn't pollute the air like power plants that rely on combustion of fossil fuels, such as coal or natural gas. On the other hands, the world is fast becoming a global village due to the increasing daily requirement of energy by all population across the world while the earth in its form cannot change. The need for energy and its related services to satisfy human social and economic development, welfare and health is increasing. Returning to renewables to help mitigate climate change is an excellent approach which needs to be sustainable in order to meet energy demand of future generations. 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.

#### Materials and methods

Current study has been done with the aim of spatial capability of wind energy in Mazandaran Province with emphasis on its environmental factors. A descriptive, analytical and field approach is used in this study. The spatial capability of wind energy in Mazandaran Province was evaluated using spatial and quantitative data. 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 information over a period of 12 years. Statistics 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. Using AHP and ANP models, layers of 4 technical (climatic), environmental-social, topographic and economic criteria including 21 sub-criteria were prepared then overlapped to determine suitable locations for

---

. Corresponding author ([s\\_motevalli@iaunour.ac.ir](mailto:s_motevalli@iaunour.ac.ir))

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.338793.1007678>

**Received: 25 March 2022; Received in revised form: 24 May 2022; Accepted: 27 July 2022**

Copyright © 2022 The Authors. Published by University of Tehran. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

construction of power plants or installation of wind turbines in Mazandaran Province. Finally, wind potential spatial measurement was performed using spatial, cellular and zoning analyzes in ArcMap software environment.

### **Result and discussion**

According to the calculations, it is clear that the price of fuel consumed by power plants in the current situation and based on the use of gas will make gas power plants still more cost-effective. In this case, it can be seen that even the cost of pollution cannot make the wind power plant more economical; Because the wind power plant is highly sensitive to exchange rate which this sensitivity is due to the high cost of imported equipment. But if the price of fuel used by power plants is calculated on the basis of the real price, wind farms will be justified. Therefore, with the resistance economy approach, replacing thermal power plants with wind power plants will be economical and cost-effective in the medium and long term. In this way, in addition to using the potential of renewable and clean energy in electricity generation (according to the environmental potential of Mazandaran Province), much lower environmental damage compared to fossil fuels and greater durability of non-renewable fuels for transmission to future generations, the economic costs of power generation and power plant networks maintenance will also be reduced. The relative weights obtained from the network analysis process model (AHP) in the process of selection of the suitable location of wind power plants in the province showed that the effect of climatic criterion with a relative weight of 0.543 is greater than other three criteria in preparing the zoning map. Topographic criteria with a relative weight of 0.26, economic with a relative weight of 0.111 and environmental-social criteria with a relative weight of 0.086 are in the second to fourth categories of influencing the preparation of optimal zoning maps for wind power plants in Mazandaran Province. According to the zoning map obtained from ANP model such as AHP map, the western parts of Noor township, the northern parts of Savadkuh, Sari, Neka and Behshahr townships, the central zone of Babol township along with the central zone and the northern parts of Amol township are more suitable than other parts of the province to establish or build wind power plants.

### **Conclusion**

Energy sector strategies should be developed and planned with the approach of optimizing energy consumption and planning in renewable energy development. This study was done with the aim of spatial measurement of wind energy in Mazandaran Province. The most favorable conditions for the installation of wind turbines can be observed in the mountainous and high parts of Noor Township.

**Keywords:** Environmental factors, Mazandaran Province, Selection of location, Spatial assessment, Wind plant.

## مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه بادی مبتنی بر ارزیابی فضایی عوامل محیطی مطالعه موردی: استان مازندران

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

صدرالدین متولی<sup>۱</sup> - 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 پدیدآورده 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 محققان قرار گیرد. روش پژوهش این مطالعه توصیفی - تحلیلی می‌باشد که با استفاده از داده‌های مکانی و کمی مرتبط با مسئله تحقیق در پی بررسی و ارزیابی قابلیت پتانسیل فضایی انرژی بادی در گستره استان مازندران است. در ابتدا به‌منظور برآورد اولیه انرژی قابل حصول از جریان باد در استان مازندران و قابلیت سنجی فضایی انرژی بادی، محاسبات لازم بر روی اطلاعات سمت و سرعت باد در یک بازه زمانی ۱۲ ساله انجام گردید. در ادامه، بر اساس گروه کارشناسان خبره، مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای، منابع علمی در این زمینه و اطلاعات موجود و در دسترس، چهار عامل اقلیمی، اقتصادی، محیطی - اجتماعی و توپوگرافی به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها جهت تعیین پهنه‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های بادی در گستره استان مازندران انتخاب شده‌اند. این سه معیار شامل ۲۱ زیر معیار است که پس از وزن دهی، تعیین وزن معیار و همپوشانی، تهیه نقشه پهنه‌بندی نهایی با استفاده از دو مدل ANP و AHP تهیه شده است. با توجه به نقشه، قسمت‌های غربی شهرستان نور، قسمت‌های شمالی شهرستان‌های سوادکوه، ساری، نکا و بهشهر، نوار مرکزی شهرستان بابل به همراه نوار مرکزی و قسمت‌های شمالی شهرستان آمل، از پهنه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های استان مازندران به جهت استقرار یا ساخت نیروگاه‌های بادی برخوردار هستند.

**واژگان کلیدی:** مکان‌یابی، ارزیابی فضایی، نیروگاه بادی، عوامل محیطی، استان مازندران.

## مقدمه

بادها در نتیجه توزیع نابرابر حرارت خورشیدی در اطراف جهان رخ می‌دهند. سرعت و جهت باد می‌تواند بر طبق ویژگی‌های توپوگرافی متفاوت باشد (Brower, 1992; Allouhi et al., 2017; Chen et al., 2018). همانند دیگر منابع انرژی تجدید پذیر، مردم از نیروی باد برای قرن‌ها تا عصر صنعت مدرن بهره گرفته‌اند و این موجب شده است تا مردم به گسترش منابع انرژی قابل اطمینان‌تر از سوخت‌های فسیلی روی آورند (Ilkilic et al., 2015; گندمکار، ۱۳۸۸؛ انتظاری و همکاران، ۱۳۹۱). به‌رحال، بحران نفت که در اواسط دهه ۱۹۷۰ رخ داد، کشورها را به سرمایه‌گذاری بیش‌تر در منابع جدید انرژی برای از بین بردن وابستگی به سوخت‌های فسیلی تشویق کرده است (International Energy Agency, 2006; Strantzali & Aravosis, 2016; Salam et al., 2018). بهره‌برداری از منابع انرژی تجدید پذیر مانند باد، وابستگی به کشورهای دیگر برای تولید انرژی را کاهش می‌دهد. انرژی باد در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، موجب خسارات زیست‌محیطی کم‌تری می‌شود. یکی از اثرات مفید انرژی باد بر محیط‌زیست، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای Co2 است (Caralis et al., 2008). توربین‌های بادی علاوه بر این که نیرو تولید کرده، هیچ‌گونه گازهای گلخانه‌ای را در جو تولید نمی‌کنند. با این وجود، هنوز برخی از اثرات منفی روی جامعه و محیط وجود دارد (Rehman et al., 2020; Negash et al., 2020; International Energy Agency, 2003).

از طرفی، اثرات منفی زیست‌محیطی انرژی بادی که به‌طور مشترک توسط دانشمندان پذیرفته شده است، عبارت‌اند از: تأثیر روی زیستگاه‌های حیوانی مثل برخورد‌های پرنده با توربین‌های بادی، تولید سروصدا، تأثیرات بصری، مسائل ایمنی و تداخل‌های الکترومغناطیس (Anthrax: Green Information, 2008). تیغه‌های دوار توربین‌های بادی باعث تار شدن تصویر در چشمان پرندگان شده و آن‌ها تصور می‌کنند مسیری را که در حال طی آن هستند، امن بوده و این امر باعث برخورد پرنده با توربین بادی می‌شود (Morrison & Sinclair, 2004). به‌منظور جلوگیری از برخورد پرنده، توربین‌های بادی باید در فواصل معینی از مسیر پرندگان نصب شوند. توربین‌های بادی باید حداقل ۵۰۰ متر دورتر از نواحی حفاظت‌شده حیات وحش نصب شوند (Yue & Wang, 2006). پیشنهاد دیگر آن است که توربین‌های بادی حداقل ۳۰۰ متر دورتر از زیستگاه پرندگان نصب شوند تا بتواند پرندگان را از برخورد محافظت کند (Clarke, 1991). تأثیر بیش‌تر انرژی بادی بر روی زیستگاه، تولید سروصدا می‌باشد. هرچند که قوانین و آیین‌نامه‌هایی از نظر سطح قابل قبول تولید سروصدا وجود دارد، اما این امر به سطح توسعه‌یافتگی جوامع بستگی دارد. اگرچه به توافق رسیدن در میزان سروصدای تولیدشده آسان نیست (Wrixon et al., 1993). مقامات مختلف، در مورد سروصدا، ضوابط مختلفی دارند که یکی از آن‌ها این است که توربین‌های بادی باید حداقل ۵۰۰ متر دورتر از نزدیک‌ترین زیستگاه قرار گیرد (Kruyt et al., 2018; Tester et al., 2005).

تأثیرات بصری یکی دیگر از عوارض جانبی توربین‌های بادی است که بین افراد متفاوت است. از آنجایی که انرژی باد، انرژی پاک ایجاد می‌کند، بعضی از مردم از دیدن توربین‌ها و مزرعه‌های بادی لذت می‌برند؛ از سوی دیگر، برخی افراد می‌توانند این مسئله را مطرح کنند که نصب توربین‌های بادی مغایر چشم‌اندازهای شهری است (Ramirez-Rosado et al., 2008). با توجه به مطالعات (Baban & Parry, 2001)، توربین‌ها باید ۲۰۰۰ متر دورتر از شهرک‌های بزرگ، به خاطر اهمیت مسئله زیبایی چشم‌اندازها واقع شوند. هرچند تعدادی از حوادث جدی که رخ می‌دهد، ناشی از ضعف مدیریت یا عدم رعایت قوانین ایمنی است؛ زیرا انرژی بادی از دیدگاه ایمنی، به‌طور کلی در سطح خوب محسوب می‌شود (Wrixon et al., 1993). از دیگر نکاتی که در انتخاب حداقل سرعت باد باید مدنظر قرار گیرد، حداقل سرعتی است که در رده‌بندی‌های توربین‌های بادی مطابق با استاندارد بین‌المللی IEC61400-1 برای توربین‌های بادی در نظر گرفته شده است. این سرعت مربوط به رده IV بوده و برابر ۶ متر بر ثانیه می‌باشد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰).

در راستای مکان‌یابی فضایی پهنه‌های مناسب استقرار نیروگاه‌های بادی با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی، سیستم

اطلاعات جغرافیایی، سهم قابل توجهی به‌عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری در شناسایی مکان‌های سازگار با محیط‌زیست، مانند مکان‌یابی توربین‌های بادی که به مدیریت و تجزیه‌وتحلیل طیف گسترده‌ای از انواع داده مکانی نیازمند است، دارد. همچنین GIS هر دو ابزار توسعه فنی و چارچوب تحلیل را ارائه می‌کند (آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۴). سطح پیچیده GIS را می‌توان با توجه به هدف تغییر داد؛ این امر ممکن است به‌منظور ارائه نقشه، برای محققان مورد استفاده قرار گیرد یا ممکن است داده‌هایی برای تجزیه‌وتحلیل و مدل‌سازی مشخص، فراهم نماید (Rodriguez-Bachiller & Glasson, 2004). پتانسیل انرژی باد و نگرانی‌های مختلف زیست‌محیطی، باید توأمان در شناسایی مکان‌های مناسب برای ایجاد و استقرار توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گیرد. تجزیه‌وتحلیل تصمیم‌گیری چند معیاری مکانی (MCDA) یکپارچه‌شده با GIS، امکان ترکیب اطلاعات (داده‌های) جغرافیایی با ترجیحات تصمیم‌گیرندگان را به‌منظور ارائه ارزیابی کل از چندین معیار متعارض و ناسازگار را فراهم می‌سازد (Malczewski, 1999)؛ رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۳؛ مریانجی و همکاران، ۱۳۹۶). بنابراین، تجزیه‌وتحلیل GIS ممکن است به تعیین مناطق مناسب بر اساس ضوابط خاص و پیشرفت‌های آینده، کمک کند (Malczewski, 2006)؛ اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ احمدی و داداشی رودبادی، ۱۳۹۴؛ جانباز قبادی، ۱۳۹۸).

رحمان و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی پتانسیل انرژی بادی در امتداد عارضه‌های توپوگرافی مختلف در Tamil Nada در هند، به تعیین و توسعه پتانسیل انرژی بادی در سه شهر واقع‌شده در ارتفاع‌های متفاوت در ایالت Tamil Nadu هند پرداخته‌اند. شواهد تاریخی ثبت‌شده 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 به‌دست‌آمده 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، Chennai به‌عنوان مناسب‌ترین سایت یا مکان برای تولید انرژی بادی در نظر گرفته شد. نقاش و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی پتانسیل انرژی بادی برای سه ناحیه توپوگرافیکی در Eritrea 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 Eritrea واقع شده‌اند، اما می‌توان آن‌ها را در سه ناحیه دسته‌بندی کرد: ناحیه ساحلی، اراضی پست غربی و ارتفاعات مرکزی. ناحیه ساحلی بیش‌ترین پتانسیل را به لحاظ نیروی بادی دارد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان ارزیابی‌های اولیه درباره تولید احتمالی نیرو در سایت‌های معین مورد استفاده قرار گیرد. کریویت 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. چین و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی تحت عنوان برآوردهای حال حاضر و آینده پتانسیل انرژی بادی در عربستان سعودی، پتانسیل نیروی باد را در این منطقه بر اساس MENA CORDEX (آزمایش ریزمقیاس اقلیم منطقه‌ای مختصات خاورمیانه شمال آفریقا) تحلیل کرده‌اند. این پژوهشگران مشخص کرده‌اند که پتانسیل بالای انرژی باد در منطقه وسیعی از عربستان سعودی وجود دارد.

جانباز قبادی (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان پتانسیل سنجی 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 ذکرشده، 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، نقشه‌های رقومی و پهنه‌بندی شاخص‌های سرعت و انرژی باد ترسیم گردید. نتایج این پژوهش نشان که ایستگاه بلده نور با دارا بودن سرعت و چگالی قدرت باد تقریباً بالا، از توانی بالغ بر ۳۰۰ وات بر مترمربع برخوردار است؛ لذا مکان مناسبی برای نصب توربین‌های بادی جهت استحصال انرژی، به‌خصوص در فصول گرم سال در استان به شمار می‌رود. عزیزی و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی با عنوان رفتارشناسی باد در ایستگاه‌های کوهستانی البرز غربی تحت تأثیر اداشت‌های 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 سازوکار باد دامنه‌ای (باد فراشیب - فروشیب یا نسیم کوه - دره) قرار داده است. موقعیت ایستگاه دیلمان در دامنه جنوبی رشته‌کوه 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 ناحیه و پیش‌بینی انرژی باد در استان 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 بالأخص مناطق شمالی استان بیش‌ترین سرعت متوسط باد را (بالای سه متر در ثانیه) داشته و مناطق غرب و جنوب غرب دارای کم‌ترین سرعت باد در طول دوره مطالعاتی بوده‌اند. بادخیزی‌ترین منطقه، نواحی شرق و شمالی استان است و در بیش‌تر زمان‌های سال دارای توان تولید برق بادی است.

شیوه بهره‌برداری از حامل‌های انرژی در ایران، علی‌رغم 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 تجدید پذیر 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 پژوهش حاضر مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه بادی مبتنی بر ارزیابی فضایی عوامل محیطی به‌صورت موردی برای استان مازندران انجام می‌شود. در واقع هدف اصلی پژوهش، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی بر مبنای عوامل محیطی جهت تعیین مکان مناسب احداث نیروگاه‌ها در مناطق مستعد و بادخیز استان مازندران است.

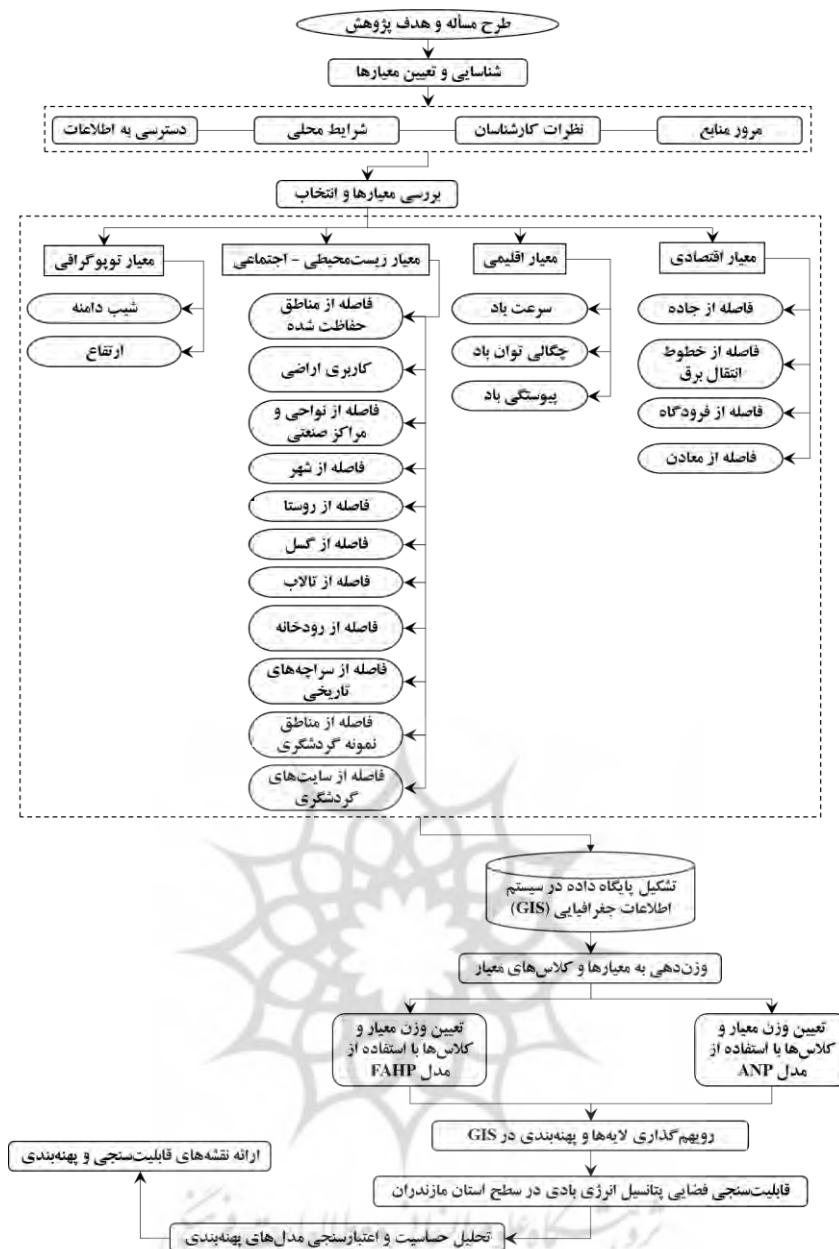
## روش پژوهش

روش پژوهش این مطالعه توصیفی - تحلیلی می‌باشد که با استفاده از داده‌های مکانی و کمی مرتبط با مسئله تحقیق در پی بررسی و ارزیابی قابلیت پتانسیل فضایی انرژی بادی در گستره استان مازندران است. در مکان‌یابی نیروگاه بادی معیارهای متعددی را می‌توان دخالت داد. معمولاً هرچقدر عوامل بیش‌تری در مدل دخالت داده شود، خروجی دقیق‌تری

خواهد داشت. اما با توجه به عدم دسترسی به تمامی اطلاعات و داده‌های دخیل در مکان‌یابی این مراکز در ناحیه مورد مطالعه، سعی شده است که مؤثرترین و ضروری‌ترین عوامل فنی، اقتصادی، اجتماعی - محیطی و توپوگرافی در نظر گرفته شود. در این بخش از مطالعه حاضر، از نظرات کارشناسان متخصص متشکل از برنامه‌ریزان شهری و روستایی، کارشناسان توسعه انرژی‌های نو، متخصصان حوزه محیط‌زیست و نیز تحلیل‌گیران و متخصصان حوزه GIS استفاده شده است (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۲؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۲؛ آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ تناکیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ اسدی و خورشیددوست، ۱۳۹۸). بر اساس گروه کارشناسان خبره، مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای، منابع علمی در این زمینه و اطلاعات موجود و در دسترس، چهار عامل اقلیمی، اقتصادی، محیطی - اجتماعی و توپوگرافی به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها جهت تعیین پهنه‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های بادی در گستره استان مازندران انتخاب شده‌اند. این چهار معیار شامل ۲۱ زیر معیار سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، پیوستگی وزش باد (تعداد ساعت) با سرعت ۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر، فاصله از فرودگاه، فاصله از شهر، نزدیکی به خطوط انتقال نیرو (برق)، فاصله از روستا، کاربری اراضی، مناطق حفاظت‌شده (زیست‌محیطی)، فاصله از سایت‌های تاریخی، فاصله از راه‌آهن، فاصله از راه، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از مراکز و نواحی صنعتی، فاصله از مناطق نمونه گردشگری، فاصله از سایت‌های گردشگری، شیب، فاصله از معدن، فاصله از تالاب و دریاچه و فاصله از رودخانه هستند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۲؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۲؛ آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ تناکیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ اسدی و خورشیددوست، ۱۳۹۸) که در ادامه به روش تهیه هر کدام، وزن دهی، تعیین وزن معیار، همپوشانی و در نهایت تهیه نقشه پهنه‌بندی نهایی با استفاده از دو مدل AHP و ANP پرداخته می‌شود. مدل مفهومی روش‌شناسی پژوهش در شکل ۲ آورده شده است.

جدول شماره ۱. مشخصات زیرمعیارهای مورداستفاده در مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران

ردیف	زیر معیار	منبع تهیه و مشخصات
۱	سرعت باد	داده‌های باد ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک
۲	چگالی انرژی باد	استان مازندران طی دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷
۳	پیوستگی باد	
۴	فاصله از فرودگاه	
۵	فاصله از شهر	
۶	نزدیکی به خطوط انتقال نیرو	
۷	فاصله از روستا	
۸	مناطق حفاظت‌شده	
۹	فاصله از سایت‌های تاریخی	
۱۰	فاصله از راه‌آهن	داده‌های برنامه آمایش استان مازندران (استاندارد)
۱۱	فاصله از راه	مازندران و مهندسین مشاور مازند طرح) و پایگاه
۱۲	کاربری اراضی	ملی داده‌های علوم زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)
۱۳	فاصله از مراکز صنعتی	
۱۴	فاصله از مناطق نمونه گردشگری	
۱۵	فاصله از سایت‌های گردشگری	
۱۶	فاصله از گسل	
۱۷	فاصله از معدن	
۱۸	فاصله از تالاب	
۱۹	فاصله از رودخانه	
۲۰	ارتفاع	مدل رقمی ارتفاع ۳۰ متری ASTER
۲۱	شیب	



شکل شماره ۱. مدل مفهومی روش شناسی مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران

### محدوده مورد مطالعه

استان مازندران با وسعتی معادل ۲۳۷۵۶ کیلومترمربع حدود ۱/۴۶ درصد از مساحت کشور را در برداشته و از لحاظ مساحت خاکی هجدهمین 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 ۲). استان مازندران برخلاف انتظار، پتانسیل بالایی جهت استفاده از پتانسیل انرژی بادی و احداث نیروگاه‌های بادی دارد. این استان با شرایط خاص توپوگرافی (از ارتفاع ۲۶- متر تا ارتفاع بیش از ۵۰۰۰ متر)، جهت دامنه‌های شمالی و وزش باد دهی غالب غربی و شمال غربی 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 ارزان‌قیمت را به‌جای انرژی‌های رایج مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و گران‌قیمت 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 بیش‌ازپیش مطرح می‌شود.



شکل شماره ۲. موقعیت جغرافیایی گستره استان مازندران و شهرستان‌های آن

## بحث و یافته‌ها

از آنجایی که انجام پهنه‌بندی یا مکان‌یابی استقرار و ساخت نیروگاه‌های بادی و تحلیل آن، نیاز به لایه‌های رستری (سطح) دارد، لایه‌های رقومی زیرشاخص‌ها باید از نوع داده رقومی به رستر تبدیل شوند. جهت تبدیل لایه‌های رقومی ۲۱ زیر شاخص مورد استفاده به لایه‌های رستری، از تابع فاصله اقلیدسی با حداکثر فاصله در محیط نرم‌افزاری ArcMap استفاده شده است. با به‌کارگیری این تابع، لایه‌هایی به‌دست آمده است که فاصله از هر کدام از متغیرها را در گستره استان مازندران نشان می‌دهد. در جدول ۱ زیرمعیارهای مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی و مشخصات هر کدام از آن‌ها، ارائه گردیده است. شکل ۳ نیز زیرشاخص‌های ۲۱ گانه مورد استفاده در مکان‌یابی پهنه‌های مناسب استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران را نشان می‌دهد. پس از رستری کردن این لایه‌ها، چون هر نقشه معیار دارای دامنه و مقیاس اندازه‌گیری متفاوتی است، برای تحلیل و ارزیابی چند معیاری باید مقیاس اندازه‌گیری آن‌ها را متناسب و همخوان کرد. به‌منظور همسان‌سازی مقیاس‌های اندازه‌گیری و تبدیل آن‌ها به واحدهای قابل مقایسه، از فرآیند استانداردسازی معیارها استفاده می‌شود. در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای استاندارد کردن معیارها، چند رویکرد مختلف شامل روش‌های قطعی، احتمالاتی و فازی وجود دارد که در این پژوهش برای استانداردسازی داده‌ها از روش فازی در این محیط نرم‌افزاری ArcGIS استفاده شده است.

در خصوص زیرمعیارهای اقلیمی (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 ظرفیت سنجی فضایی پتانسیل انرژی باد در سطح استان مورد استفاده قرار گرفته که موقعیت آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مشخصات سرعت و جهت باد و پارامترهای تابع توزیع احتمال ویسول آن تعیین گردیده 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، تداوم سرعت باد و چگالی قدرت باد در ایستگاه‌های

هواشناسی موردبررسی، با استفاده از درون‌یابی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS، لایه‌های سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین و پیوستگی وزش باد (تعداد ساعت) با سرعت ۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر تهیه‌شده است.

پس از کنترل کمی و کیفی داده‌های جمع‌آوری‌شده، مشخصات سرعت و جهت باد و پارامترهای تابع توزیع احتمال ویبول آن تعیین گردیده و سپس پتانسیل و چگالی توان باد ایستگاه‌های استان محاسبه‌شده 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، تداوم سرعت باد و چگالی قدرت باد در ایستگاه‌های هواشناسی موردبررسی، 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 تهیه‌شده است. برای تخمین سرعت باد در ارتفاعات بالاتر (برای مثال ارتفاع ۴۰ متر مناسب برای احداث توربین بادی) از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده می‌شود.

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

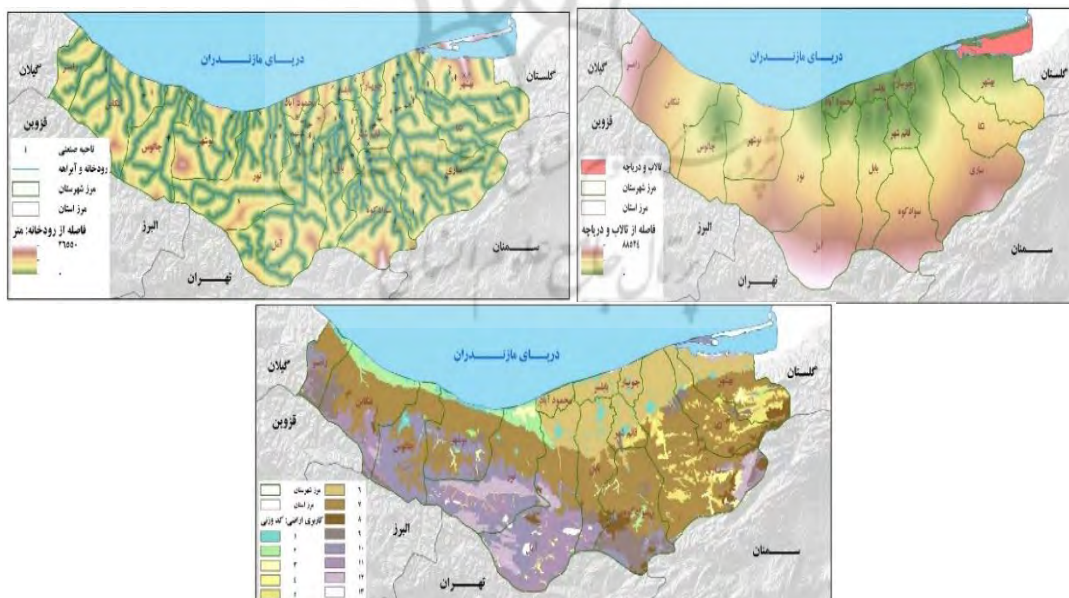
$$v = v_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^a \quad \text{رابطه (۲)}$$

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

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

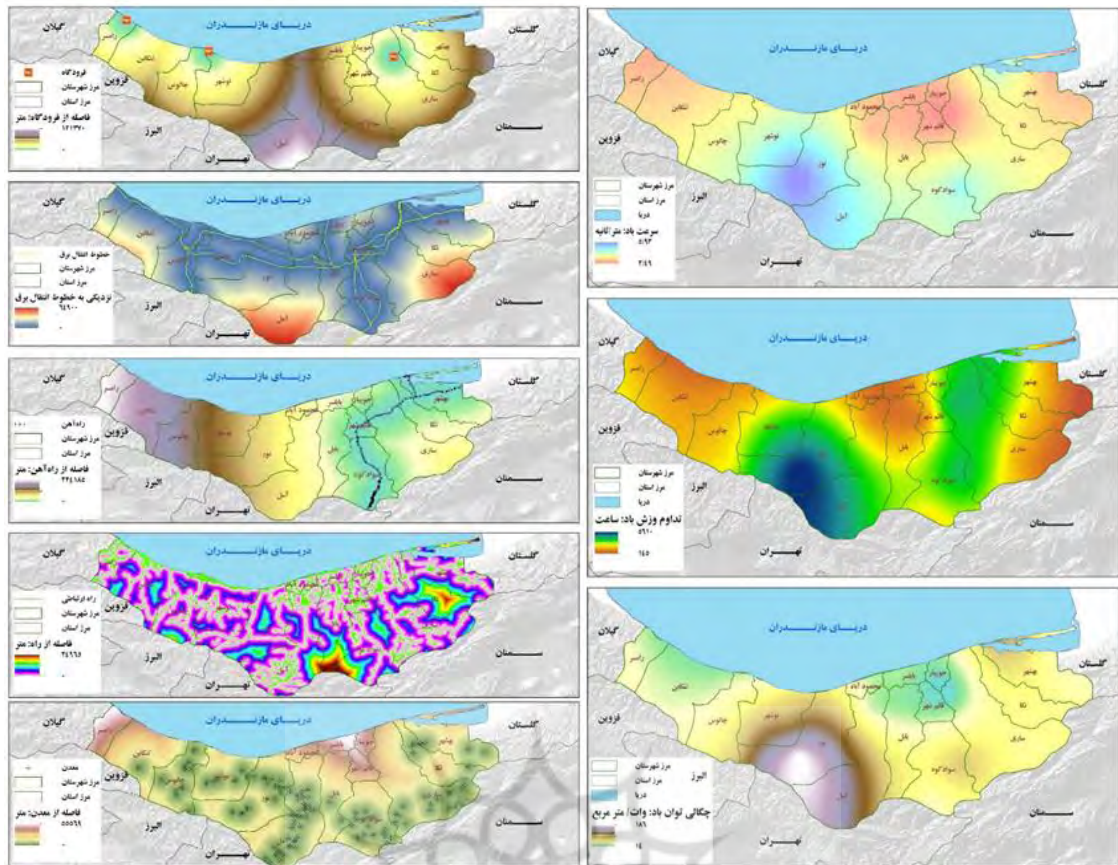
میزان چگالی انرژی بادی نیز در یک مکان می‌تواند از رابطه ۳ به‌دست‌آمده آید.

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \tau \left(\frac{k+3}{k}\right) \Gamma \quad \text{رابطه (۴)}$$

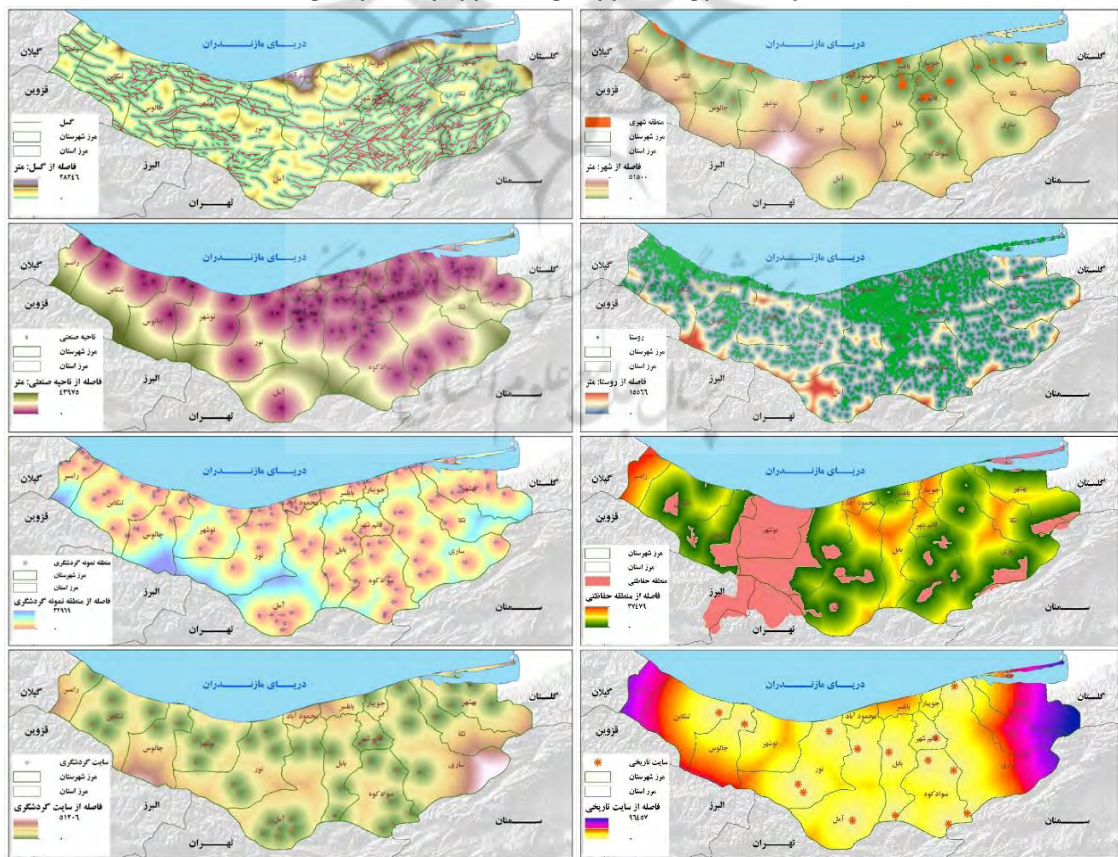


شکل شماره ۳. الف). زیرمعیارهای محیطی - اجتماعی (فاصله از تالاب و دریاچه و فاصله از رودخانه) مورد استفاده در مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران





شکل شماره ۳. ب) زیرمعیارهای اقلیمی (سرعت باد، چگالی توان باد و بیوستگی باد)؛ زیرمعیارهای اقتصادی (فاصله از فرودگاه، نزدیکی به خطوط انتقال برق، فاصله از راه‌آهن، فاصله از راه و فاصله از معدن)



شکل ۳ ج) زیرمعیارهای محیطی - اجتماعی (فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از منطقه حفاظتی و فاصله از سایت‌های تاریخی) و زیرمعیارهای محیطی - اجتماعی (فاصله از گسل، فاصله از ناحیه صنعتی، فاصله از منطقه نمونه گردشگری و فاصله از سایت گردشگری) مورد استفاده در مکان‌یابی استقرار نیروگاه بادی مازندران

در ارتباط با به‌کارگیری روش فازی باید اشاره کرد که در تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره، تئوری فازی معمول‌ترین روش برای بحث و بررسی عدم قطعیت‌ها شناخته شده است. در واقع روشی است برای برگرداندن طیف متنوع و گسترده‌ای از اطلاعات - داده‌های عینی، اطلاعات کمی، نظرها و قضاوت‌های ذهنی و عینی به یک‌زبان طبیعی که توصیف اثرات محیط را فراهم می‌آورد (Kuswandari, 2004). استانداردهای داده‌ها، همه مقادیر و ارزش‌های لایه‌های نقشه‌ای را به دامنه یکسانی، مثلاً بین صفر تا یک یا صفر تا ۲۵۵، تبدیل می‌کند. در دامنه بین ۰ و ۱، اگر  $\mu_A(x)=1$  باشد، در آن صورت یک عنصر  $x$  مشخصاً به  $A$  تعلق دارد. به همین ترتیب اگر  $\mu_A(x)=0$  باشد، در آن صورت عنصر  $x$  مشخصاً به  $A$  تعلق ندارد. درجه بالای ارزش عضویت یک عنصر به معنای نسبت بالای تعلق آن به مجموعه است. در واقع، هر عدد فازی در عطف به یک واژه زبانی و یک مجموعه فازی مطرح می‌شود. با تبدیل ارزش‌های زبانی به اعداد فازی، انجام عملیات حسابی و منطقی بر روی آن‌ها، روال مشخصی به خود می‌گیرد.

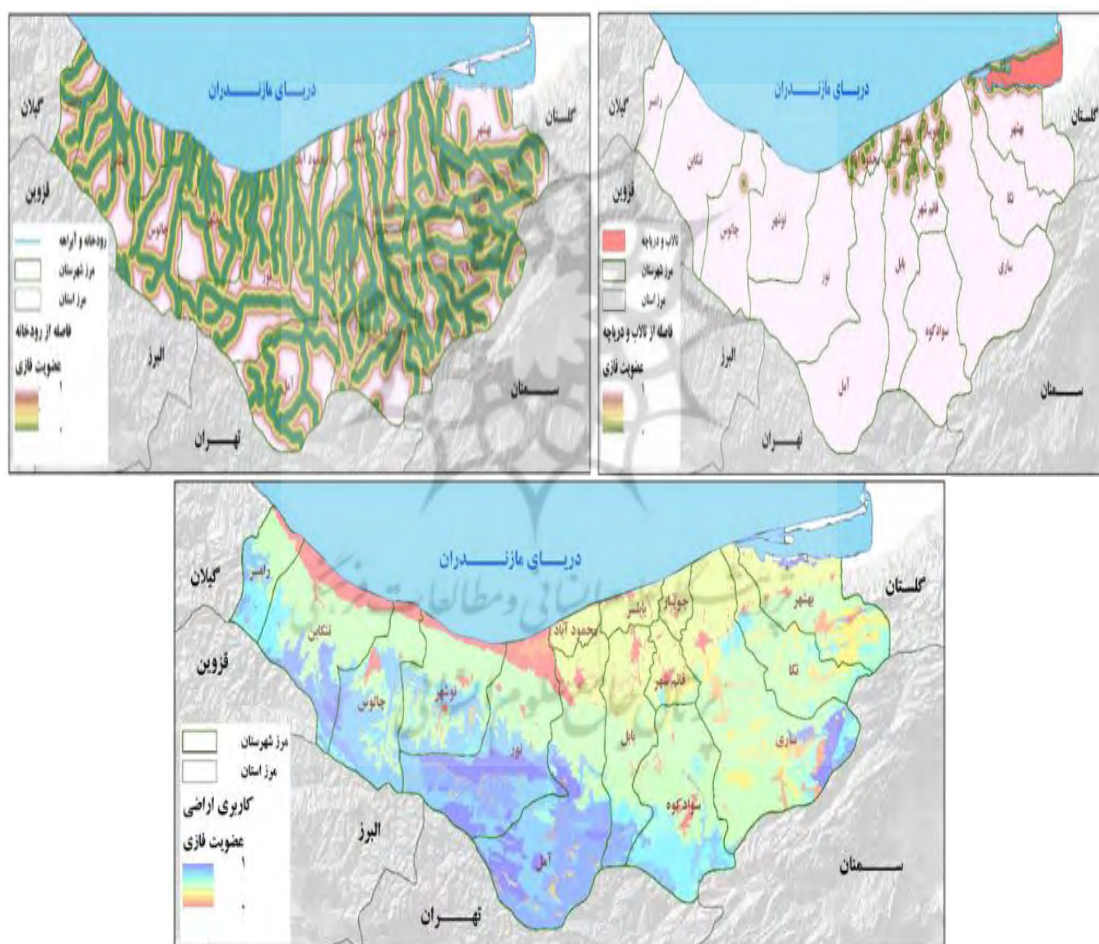
جدول ۲. توابع عضویت معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در پهنه‌بندی سیل‌خیزی حوضه آبخیز

شاخص	زیر شاخص	نقطه کنترل	تابع عضویت فازی
اقلیمی	سرعت باد	a=3, b=5	Sigmoidal - Increasing
	چگالی توان باد	a=120, b=150	Sigmoidal - Increasing
	پیوستگی باد	a=3000, b=4000	Sigmoidal - Increasing
اقتصادی	فاصله از فرودگاه	a=3000, b=5000	Large
	نزدیکی به خطوط انتقال برق	a=2500, b=10000	Linear - Decreasing
	فاصله از راه‌آهن	a=500, b=1500	Sigmoidal - Symmetric
	فاصله از راه	a=500, b=2000	Sigmoidal - Symmetric
	فاصله از معدن	a=2000, b=10000	Large
	فاصله از شهر	a=2000, b=10000	Large
	فاصله از روستا	a=1500, b=3000	Large
	مناطق حفاظت‌شده	a=1000, b=3000	Large
	فاصله از سایت‌های تاریخی	a=1000, b=3000	Large
	کاربری اراضی	Coding	Linear - Increasing
محیطی - اجتماعی	فاصله از مراکز صنعتی	a=1000, b=3000	Large
	فاصله از مناطق نمونه گردشگری	a=1000, b=3000	Large
	فاصله از سایت‌های گردشگری	a=1000, b=3000	Large
	فاصله از غسل	a=2500, b=4000	Sigmoidal - Symmetric
توپوگرافی	فاصله از رودخانه	a=1000, b=5000	Sigmoidal - Symmetric
	فاصله از تالاب	a=1000, b=3000	Large
	شیب	a=15, b=35	Linear - Decreasing
	ارتفاع	a=1000, b=2000	Linear - Increasing

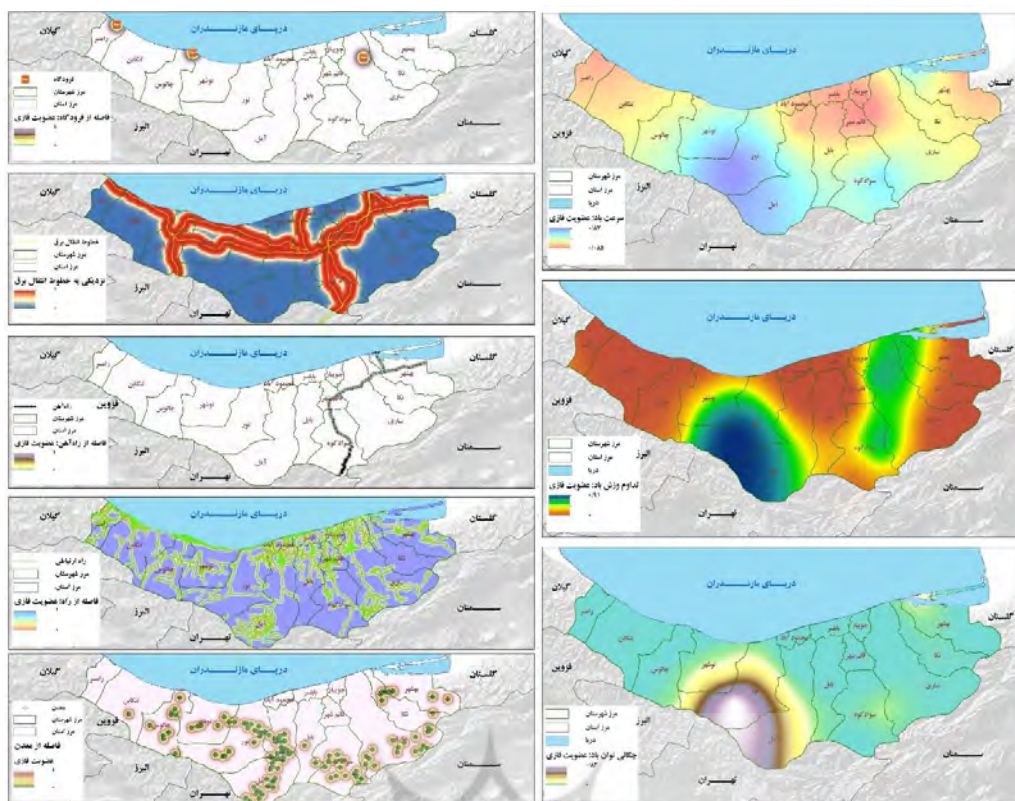
جدول ۲ توابع عضویت فازی مورد استفاده برای استانداردسازی زیرشاخص‌های به کار گرفته شده را نشان می‌دهد؛ با توجه به این جدول، از تابع‌های Linear, Large و Sigmoidal برای استانداردسازی زیرشاخص‌های مؤثر در مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی استفاده شده است. با به‌کارگیری تابع عضویت فازی Linear-Decreasing، با فاصله گرفتن از هر کدام از متغیرها، ارزش عضویت فازی لایه‌ها به سمت صفر میل کرده که نتیجه آن، کاهش توان پهنه در استقرار نیروگاه بادی می‌باشد؛ از این تابع برای تعیین عضویت فازی لایه‌های نزدیکی به خطوط انتقال برق و شیب استفاده شده است. بنابراین، به هر میزان که شیب پایین‌تر و یا پهنه‌ها به خطوط انتقال برق نزدیک‌تر باشد، برای استقرار نیروگاه بادی مناسب‌تر هستند. از تابع‌های Linear-Increasing و Large جهت فازی‌سازی معیارهای فاصله از فرودگاه، فاصله از معدن، فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، فاصله از سایت‌های تاریخی،



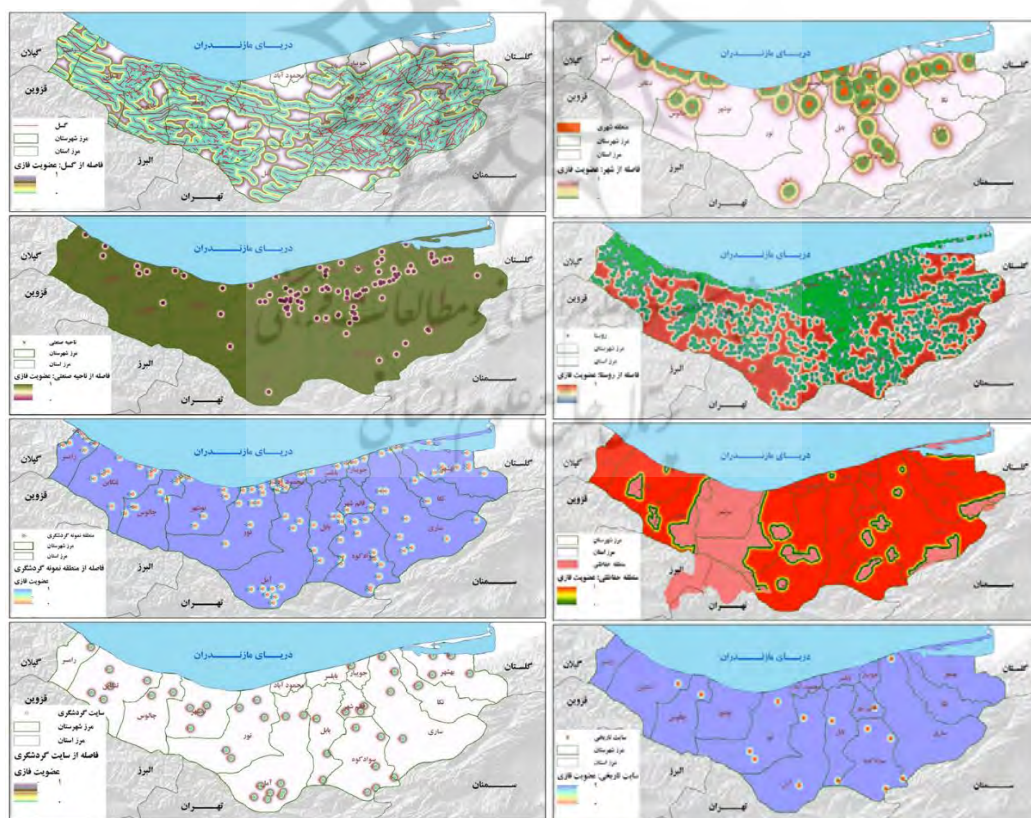
فاصله از مراکز صنعتی، فاصله از مناطق نمونه گردشگری، فاصله از سایت‌های گردشگری، فاصله از تالاب و ارتفاع استفاده شده است. با بهره‌گیری از این دو تابع، هر میزان از موقعیت هر کدام از متغیرهای مذکور فاصله گرفته شود و یا ارتفاع افزایش یابد، پهنه‌های مناسب‌تری برای استقرار نیروگاه‌های بادی هستند. بدین ترتیب، مقادیر بزرگ‌تر این زیرمعیارها، عضویت فازی بزرگ‌تری گرفته و به سمت یک میل می‌کند. تفاوت دو تابع Linear و Large در این است که Linear به صورت خطی مستقیم ارزش متغیرها را به عضویت فازی تبدیل می‌کند؛ اما در تابع Large از مقادیری همچون انحراف معیار برای تعیین عضویت‌های فازی استفاده می‌گردد. زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اقلیمی (سرعت باد، چگالی توان باد و پیوستگی باد) با استفاده از تابع Sigmoidal-increasing فازی سازی شده‌اند. این تابع که به تابع S شکل معروف است، یک تابع خطی است که مقادیر متغیرها را بین ۰ تا ۱ فازی می‌کند. متغیرهای فاصله از راه‌آهن، فاصله از راه، فاصله از گسل و فاصله از رودخانه با توجه به ماهیت متقارن آن‌ها، با استفاده از تابع عضویت Sigmoidal Symmetric - فازی شده‌اند. شکل ۴ نقشه‌های عضویت فازی یا استاندارد شده هر کدام از زیرشاخص‌ها را بر اساس توابع فازی استفاده شده، نشان می‌دهد.



شکل شماره ۴. الف) عضویت فازی زیرمعیارهای محیطی - اجتماعی (فاصله از تالاب و دریاچه و فاصله از رودخانه) مورد استفاده در مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران



شکل شماره ۴. ب) عضویت فازی زیرمعیارهای اقلیمی (سرعت باد، چگالی توان باد و پیوستگی باد)؛ عضویت فازی زیرمعیارهای اقتصادی (فاصله از فرودگاه، نزدیکی به خطوط انتقال برق، فاصله از راه‌آهن، فاصله از راه و فاصله از معدن)

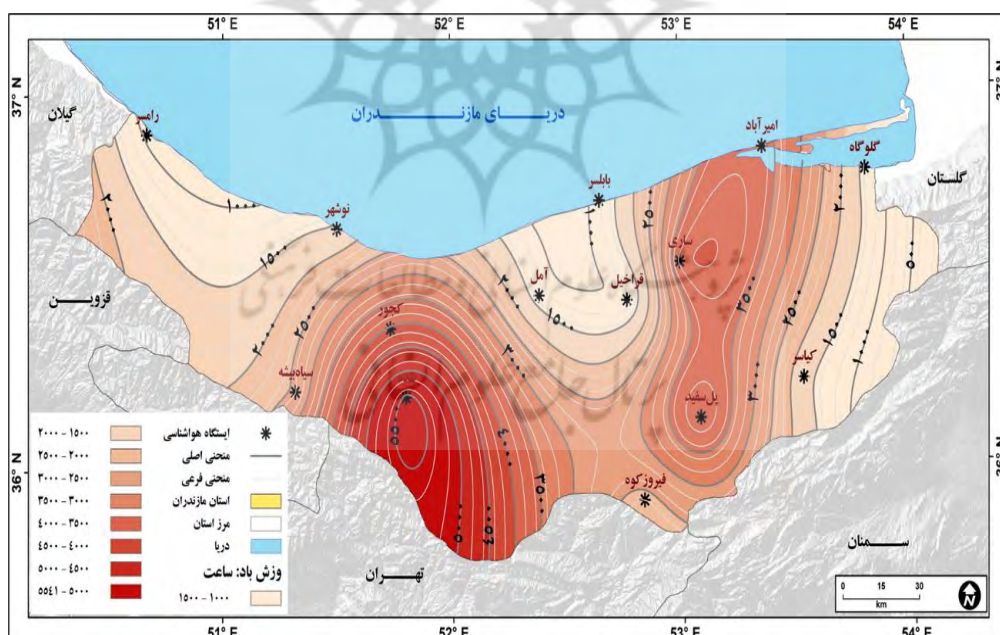


شکل شماره ۴. ج) عضویت فازی زیرمعیارهای محیطی - اجتماعی (فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از منطقه حفاظتی و فاصله از سایت‌های تاریخی) و عضویت فازی زیرمعیارهای محیطی - اجتماعی (فاصله از گسل، فاصله از ناحیه صنعتی، فاصله از منطقه نمونه گردشگری و فاصله از سایت گردشگری) مورد استفاده در مکان‌یابی استقرار نیروگاه بادی مازندران



### پهنه‌بندی تداوم، سرعت و چگالی قدرت باد (WPD)

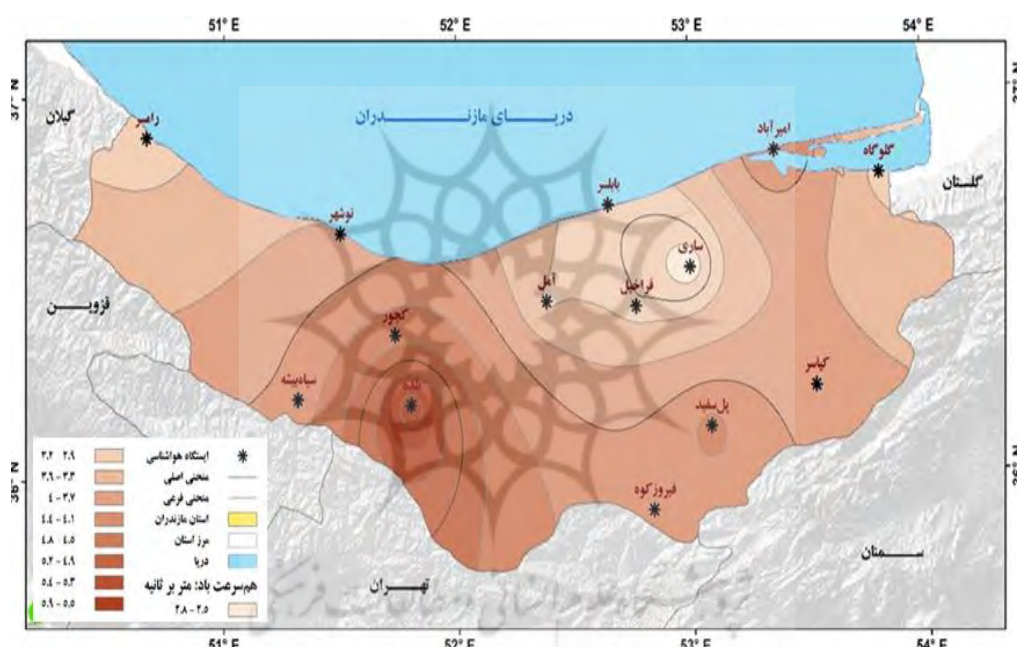
با استفاده از داده‌های مجموع ساعات تداوم وزش باد با سرعت برابر یا بیش‌تر از ۳ متر بر ثانیه، به‌عنوان سرعت آستانه حداقل برای احداث توربین‌های بادی، نقشه هم تداوم سالانه تعداد ساعات وزش باد با سرعت ۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر ترسیم‌شده است (شکل ۵). ایستگاه بلده با تداوم وزش ۵۵۴۸ ساعت (۶۳/۳ درصد) برابر یا بیش‌تر از آستانه مذکور در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، بهترین وضعیت را از لحاظ احداث توربین‌های بادی دارا می‌باشد. ایستگاه‌های کجور، پل سفید، ساری و امیرآباد نیز به ترتیب با تداوم وزش ۴۰۴۸، ۳۹۳۲، ۳۸۶۸ و ۳۶۴۰ ساعت (به ترتیب ۴۶/۲، ۴۴/۹، ۴۴/۲ و ۴۱/۶ درصد) نیز شرایط به‌نوبت مساعدی برای احداث برخی از توربین‌های بادی را دارند. اما در مقابل، ایستگاه‌های آلاشت، قراخیل قائم‌شهر، آمل، بابل، 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، بابل و رامسر و غرب شهرستان جویبار و نیز قسمت‌های ساحلی شهرستان‌های نوشهر و نور، به همراه بخش‌های دشتی و جلگه‌ای شهرستان‌های قائم‌شهر، بابل و آمل از وضعیت ضعیفی به لحاظ 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 به همراه بخش‌های غربی ساری، نکا و بهشهر دارای وضعیت به‌نوبت مساعدتری به لحاظ 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 شماره ۵. نقشه هم تداوم سالانه تعداد ساعات وزش باد با سرعت برابر یا بیش‌تر از ۳ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از زمین

نقشه پهنه‌بندی سرعت باد ارتفاع ۵۰ متری در سطح استان مازندران (شکل ۶)، 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 حدود ۷ ماه از سال (ماه‌های آوریل تا اکتبر)، به‌ویژه ماه‌های گرم

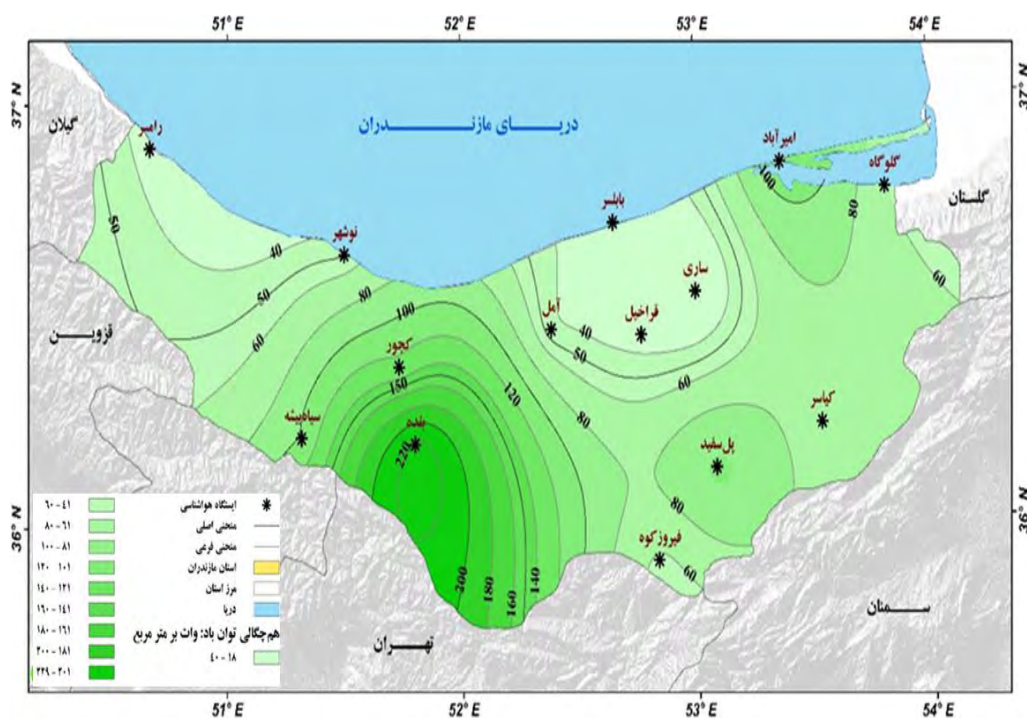
سال، سرعت باد در محدوده بیش از ۶ متر بر ثانیه را تجربه می‌کند. به عبارتی در تمام طول سال، ایستگاه بلده در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، مقادیر باد با سرعت بالاتر از ۳ متر بر ثانیه را ثبت کرده و این می‌تواند نشان‌دهنده وجود شرایط مناسب جهت راه‌اندازی توربین‌ها و استحصال انرژی از آن‌ها باشد. پس از بلده، ایستگاه‌های کجور، پل سفید، امیرآباد، سیاه‌بیشه و فیروزکوه با میانگین ماهانه سرعت باد بالاتر از ۴ متر بر ثانیه، شرایط مساعدتری را نسبت به سایر ایستگاه‌ها در جهت بهره‌گیری از پتانسیل انرژی بادی دارند؛ به‌خصوص ایستگاه‌های کجور، پل سفید و امیرآباد که حدود ۹ ماه از سال (ماه‌های فوریه تا اکتبر) دارای سرعت باد بالاتر از ۴ متر بر ثانیه هستند؛ این سرعت باد در ایستگاه‌های سیاه‌بیشه و فیروزکوه به ترتیب در ۶ و ۵ ماه اتفاق می‌افتد. فراوانی سرعت بادهای بالاتر از ۴ متر بر ثانیه در ماه‌های سرد سال، از ویژگی ایستگاه‌های نامبرده بوده که از مشخصه‌های خوب یک سایت جهت احداث نیروگاه‌های برق بادی است. در سایر ایستگاه‌های استان مازندران، به‌ویژه ایستگاه‌های ساری، آلاشت، رامسر، گراخیل، گلوگاه، قراخیل، بابلسر و آمل، بادهای با سرعت بالاتر از ۳ متر بر ثانیه، سهم کمی را از میزان باد وزشی منطقه شامل می‌شوند که بیان‌گر عدم شرایط مساعد برای بادخیزی و بهره‌گیری از پتانسیل انرژی بادی در این مناطق می‌باشد.



شکل شماره ۶. نقشه هم‌سرعت متوسط سالانه باد استان مازندران در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

بر طبق نقشه پهنه‌بندی چگالی قدرت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین (شکل ۷)، ایستگاه بلده با سرعت بادی بیش از ۵ متر بر ثانیه و دارا بودن بیش‌ترین فراوانی مقادیر سرعت باد در محدوده ۳ تا ۵ متر بر ثانیه، از میزان چگالی قدرت باد حدود ۲۲۸ وات بر مترمربع برخوردار بوده که با توجه به ارتفاع توربین قابل‌استفاده در منطقه و بهره‌گیری از اطلس باد اتحادیه انرژی آمریکا، از نظر کلاس‌بندی در رده ۲ (متوسط) قرار می‌گیرد؛ همچنین بیش‌ترین چگالی قدرت باد مربوط به ماه‌های گرم سال بوده که توانی بالغ بر ۲۰۰ وات بر مترمربع را دارد و شرایط مساعدی را برای نصب توربین‌ها جهت استحصال انرژی فراهم می‌آورد. ایستگاه‌های کجور، امیرآباد، سیاه‌بیشه و پل سفید با سرعت بادی در حدود ۲ تا ۵ متر بر ثانیه، به ترتیب دارای چگالی قدرت باد ۱۲۶، ۱۱۳، ۱۰۲ و ۱۰۲ وات بر مترمربع هستند. کم‌ترین چگالی انرژی باد را هم ایستگاه‌های ساری، آلاشت، قراخیل، رامسر و بابلسر با مقادیر به ترتیب ۱۹، ۳۲، ۳۳، ۳۵ و ۳۸ وات بر مترمربع به خود اختصاص داده‌اند.

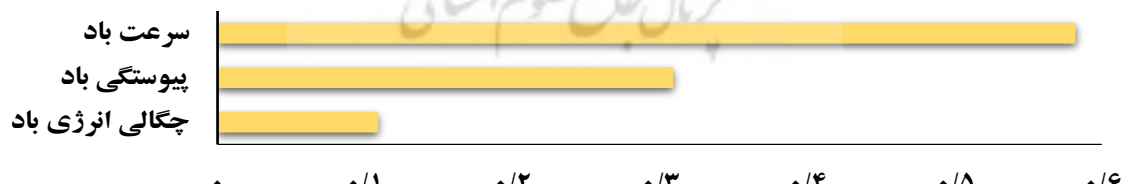




شکل شماره ۷. هم‌چگالی قدرت باد سالانه ایستگاه‌های استان مازندران در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

#### مکان‌یابی بهینه‌های استقرار نیروگاه بادی با روش AHP

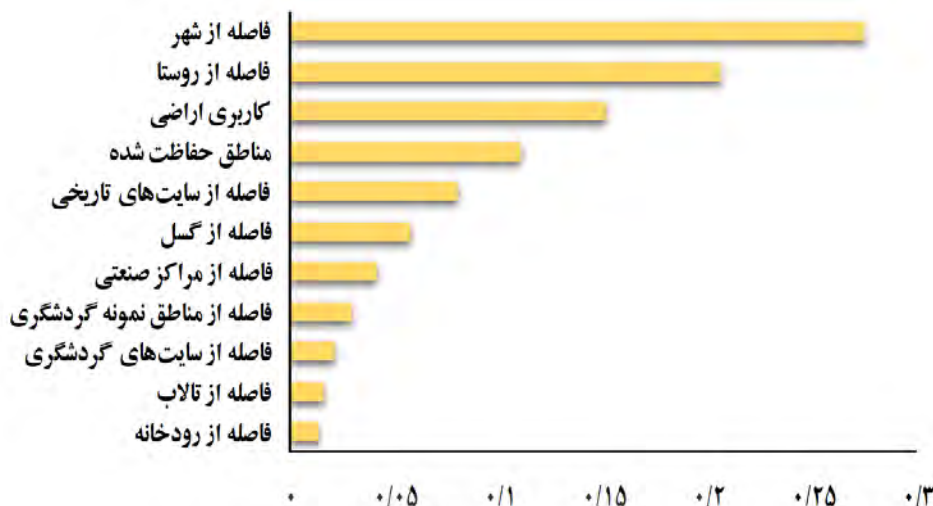
به‌منظور بهره‌گیری از لایه‌های سرعت، پیوستگی و چگالی باد در تهیه نقشه مکان‌یابی بهینه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی در استان مازندران، این لایه‌ها نیز در مقایسه‌های زوجی دخیل داده شدند. شکل ۸ وزن نسبی به‌دست‌آمده از مقایسه زوجی زیرشاخص‌های مربوط به معیار اقلیمی را بر اساس فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، زیر معیار سرعت باد با وزن نسبی ۰/۵۸۲ مهم‌ترین عامل اقلیمی مؤثر در مکان‌یابی بهینه‌های مناسب استقرار نیروگاه‌های بادی از نظر کارشناسی می‌باشد. همسو با یافته‌های این پژوهش، عزیزی و همکاران (۱۳۹۳)، آقاجانی و همکاران (۱۳۹۴) و تاکیان و همکاران (۱۳۹۷) نیز سرعت باد را به‌عنوان مهم‌ترین معیار آبهوایی در احداث نیروگاه‌های بادی معرفی نموده‌اند. زیرمعیارهای پیوستگی باد و چگالی انرژی باد به ترتیب با ۰/۳۰۹ و ۰/۱۰۹ در رده‌های بعدی اثرگذاری بر تعیین مکان‌های بهینه استقرار نیروگاه بادی در سطح استان مازندران قرار دارند.



شکل شماره ۸. وزن نسبی حاصل از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و مقایسه زوجی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اقلیمی بر مبنای نظرات کارشناسی در تهیه نقشه مکان‌های بهینه استقرار نیروگاه بادی استان مازندران

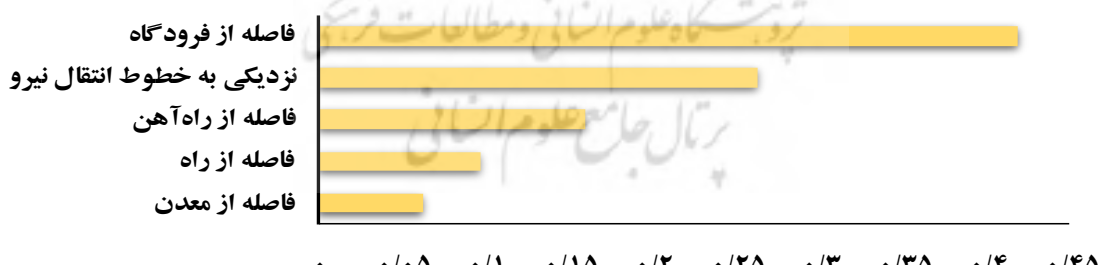
انجام مقایسه زوجی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی جهت تعیین وزن نسبی زیرشاخص‌های ۱۱ گانه استفاده‌شده در معیار محیطی - اجتماعی بیان‌گر آن است که فاصله از شهر با وزن نسبی ۰/۲۷۵ مؤثرترین زیر شاخص در تعیین مکان‌های بهینه می‌باشد. زیرشاخص‌های فاصله از روستا و کاربری اراضی نیز با وزن‌های نسبی به ترتیب ۰/۲۰۶ و ۰/۱۵۱ دومین و سومین زیر شاخص اثرگذار هستند. این در حالی است که از نظر کارشناسی و انجام فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، فاصله از

رودخانه با وزن نسبی ۰/۰۱۳، فاصله از تالاب و دریاچه با وزن نسبی ۰/۰۱۶ و فاصله از سایت‌های گردشگری با وزن نسبی ۰/۰۲۱، از اثرگذاری کم‌تری نسبت به سایر زیرشاخص‌های مربوط به معیار مذکور در مکان‌یابی بهینه‌های ساخت و استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران برخوردار هستند. شکل ۹ وزن نسبی زیرمعیارهای ذکر شده را نشان می‌دهد.



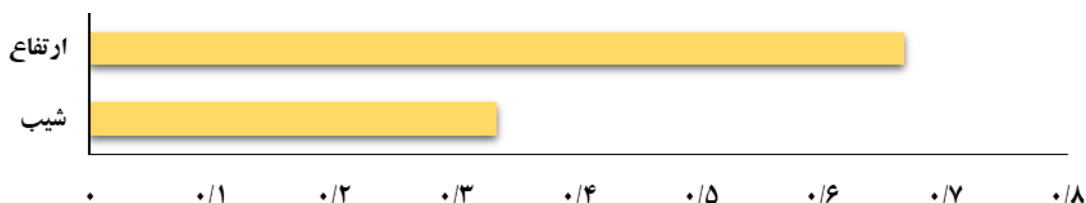
شکل شماره ۹. وزن نسبی حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه زوجی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص محیطی - اجتماعی بر مبنای نظرات کارشناسی در نقشه مکان‌های بهینه استقرار نیروگاه بادی مازندران

در خصوص زیرمعیارهای مربوط به شاخص اقتصادی، انجام مقایسه‌های زوجی بیان‌گر آن است که متغیر فاصله از فرودگاه با وزن نسبی ۰/۴۱۹، مهم‌ترین متغیر اقتصادی اثرگذار بر تعیین مکان‌های بهینه استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران می‌باشد. متغیرهای نزدیکی به خطوط انتقال نیرو (۰/۲۶۳)، فاصله از راه‌آهن (۰/۱۶)، فاصله از راه (۰/۰۹۷) و فاصله از معدن (۰/۰۶۲) به ترتیب رده‌های دوم تا پنجم تأثیرگذاری متغیرهای اقتصادی بر تعیین مکان‌های بهینه هدف را دارند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. وزن نسبی حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه زوجی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اقتصادی بر مبنای نظرات کارشناسی در تهیه نقشه مکان‌های بهینه استقرار نیروگاه بادی استان مازندران

چهارمین شاخص موردبررسی در این پژوهش به جهت تعیین مکان‌ها یا بهینه‌های بهینه استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران، توپوگرافی بوده که شامل دو زیر معیار ارتفاع و شیب است. انجام مقایسه‌های زوجی در تعیین وزن نسبی این دو زیر معیار نشان می‌دهد که ارتفاع با وزن نسبی ۰/۶۶۷ از اهمیت بیش‌تری نسبت به زیر معیار شیب با وزن نسبی ۰/۳۳۳ در تعیین مکان‌های بهینه هدف برخوردار است (شکل ۱۱).



شکل شماره ۱۱. وزن نسبی حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه زوجی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص توپوگرافی بر مبنای نظرات کارشناسی در نقشه مکان‌های پهنه استقرار نیروگاه بادی استان مازندران

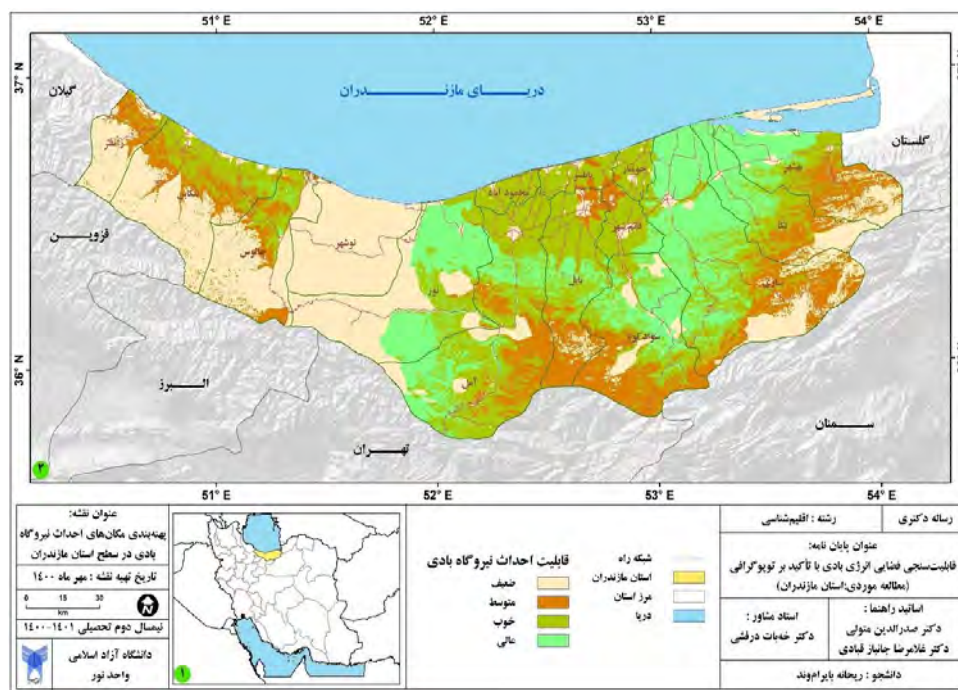
پس از محاسبه نسبی وزن معیار یا همان وزن نسبی که بیان‌گر میزان تأثیر هر کدام از زیرشاخص‌ها در تهیه لایه شاخص و به عبارتی تأثیرگذاری در تهیه نقشه مکان‌های پهنه استقرار نیروگاه‌های بادی است، جهت تلفیق یا همپوشانی آن‌ها برای تهیه لایه شاخص‌های چهارگانه، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در قالب ماتریس حاصل از نظرات کارشناسی و مقایسه زوجی انجام شد که نتیجه این مقایسه در شکل ۱۲ ارائه شده است. با توجه به این شکل، شاخص اقلیمی با وزن نسبی ۰/۴۶۷، مهم‌ترین شاخص اثرگذار در تعیین مکان‌های پهنه استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران، از دیدگاه نظرات کارشناسی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی شناخته شده است؛ این شاخص شامل سه زیر شاخص سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، چگالی توان باد در ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین و پیوستگی باد (تعداد ساعات وزش باد با سرعت ۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر) می‌شود. شاخص توپوگرافی (شامل دو زیر شاخص ارتفاع و شیب) با وزن نسبی ۰/۲۷۷ در رده بعدی اثرگذاری قرار داده شده و شاخص‌های اقتصادی (شامل پنج زیر شاخص فاصله از فرودگاه، نزدیکی به خطوط انتقال نیرو، فاصله از راه‌آهن، فاصله از راه و فاصله از معدن) با وزن نسبی ۰/۱۶ و محیطی - اجتماعی (شامل ۱۱ زیر شاخص) با وزن نسبی ۰/۰۹۵ به ترتیب سومین و چهارمین شاخص اثرگذار موردبررسی بر روی پهنه‌های مناسب استقرار نیروگاه‌های بادی هستند.

محاسبه وزن معیار شاخص‌های چهارگانه موردبررسی با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، امکان همپوشانی آن‌ها و تهیه نقشه مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی را در سطح استان مازندران فراهم آورد. این همپوشانی بر طبق رابطه ۵ انجام شده که شکل عمومی معادله تلفیق چهار شاخص را بیان می‌کند. با انجام این کار، نقشه نهایی تعیین مکان‌های پهنه استقرار نیروگاه بادی در استان مازندران با استفاده از مدل AHP به دست آمده آمد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

رابطه ۵) مکان پهنه استقرار نیروگاه بادی = (اقلیم × ۰/۴۶۷) + (توپوگرافی × ۰/۲۷۷) + (اقتصاد × ۰/۱۶) + (محیطی - اجتماعی × ۰/۰۹۵)



شکل شماره ۱۲. وزن نسبی حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه زوجی شاخص‌های چهارگانه اقلیمی، توپوگرافی، محیطی - اجتماعی و اقتصادی بر مبنای نظرات کارشناسی در تهیه نقشه مکان‌های پهنه استقرار نیروگاه بادی در استان مازندران



شکل شماره ۱۳. نقشه پهنه‌بندی مکان‌های استقرار نیروگاه بادی در سطح استان مازندران با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

با توجه به نقشه پهنه‌بندی حاصل از مدل AHP، قسمت‌های غربی شهرستان نور، قسمت‌های شمالی شهرستان‌های سوادکوه، ساری، نکا و بهشهر، نوار مرکزی شهرستان بابل به همراه نوار مرکزی و قسمت‌های شمالی شهرستان آمل، از پهنه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های استان مازندران به جهت استقرار یا ساخت نیروگاه‌های بادی برخوردار هستند. این در حالی است که در گستره سرزمینی تمامی شهرستان‌های منتهی به ارتفاعات البرز (بخش‌های جنوبی)، اگرچه وضعیت معیار اقلیمی و زیرشاخص‌های آن (سرعت باد، چگالی توان باد و پیوستگی باد) شرایط مطلوب‌تر و بهینه‌تری را برای ساخت نیروگاه‌های بادی در مقایسه با سایر معیارها و زیرمعیارها دارد، اما با توجه به پوشش اراضی این بخش‌ها که جنگل‌های با تراکم بالا می‌باشد، احداث نیروگاه بادی در آن‌ها توصیه نمی‌شود. بخش‌های شمالی و منطبق بر پهنه‌های ساحلی و جلگه‌ای استان (به‌استثنای محدوده ساحلی امیرآباد) نیز با توجه به فراهم نبودن شرایط آستانه حداقلی معیارهای فنی باد برای به حرکت درآوردن توربین‌های بادی، مکان‌های مناسبی جهت استقرار نیروگاه نیستند.

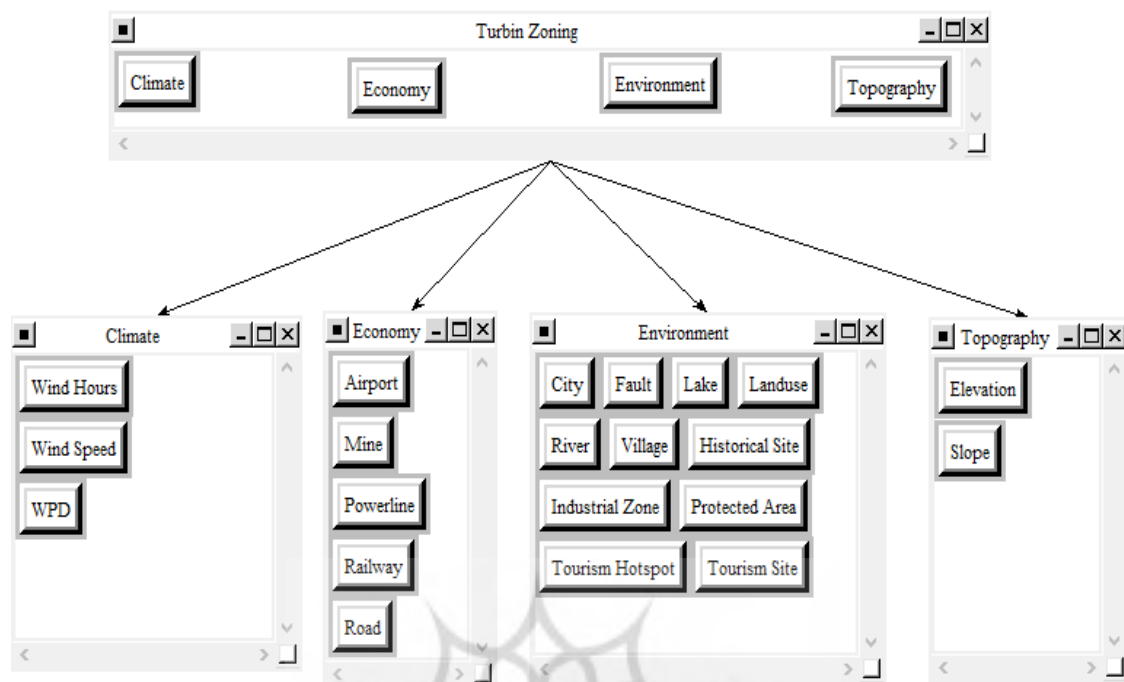
### مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه بادی با روش ANP

مراحل پیاده‌سازی این مدل را می‌توان در ۶ گام خلاصه نمود: پایه‌ریزی مدل و ساختار مسئله، ماتریس مقایسه‌های زوجی و برآورد وزن نسبی، تشکیل سوپر ماتریس اولیه، تشکیل سوپر ماتریس وزنی، محاسبه بردار وزنی عمومی و محاسبه وزن نهایی معیارها (شکل ۱۴).

جدول ۳ وزن نسبی حاصل از مدل ANP در مقایسه معیارها و زیرمعیارهای به کار گرفته‌شده در مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، سرعت باد با وزن نسبی ۰/۴۹۳ مهم‌ترین زیر معیار اقلیمی، فاصله از فرودگاه با وزن نسبی ۰/۵۲۲ مهم‌ترین زیر معیار اقتصادی، فاصله از شهر با وزن نسبی ۰/۲۶۸ مهم‌ترین زیر معیار محیطی - اجتماعی و ارتفاع با وزن نسبی ۰/۶۶۷ مهم‌ترین زیر معیار توپوگرافی در تهیه نقشه مکان‌یابی هدف می‌باشند. وزن‌های نسبی حاصل از مدل فرآیند تحلیل شبکه همچنین نشان می‌دهد که تأثیر معیار اقلیمی با وزن نسبی ۰/۵۴۳ نسبت به سه معیار دیگر در تهیه نقشه پهنه‌بندی بیش‌تر می‌باشد. معیارهای توپوگرافی



با وزن نسبی ۰/۲۶، اقتصادی با وزن نسبی ۰/۱۱۱ و محیطی - اجتماعی با وزن نسبی ۰/۰۸۶ در رده‌های دوم تا چهارم اثرگذاری بر تهیه نقشه پهنه‌های بهینه استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران قرار گرفته‌اند.



شکل شماره ۱۴. ساختار اجرای مدل فرآیند تحلیل شبکه برای پهنه‌بندی مکان‌های بهینه استقرار نیروگاه بادی در استان مازندران

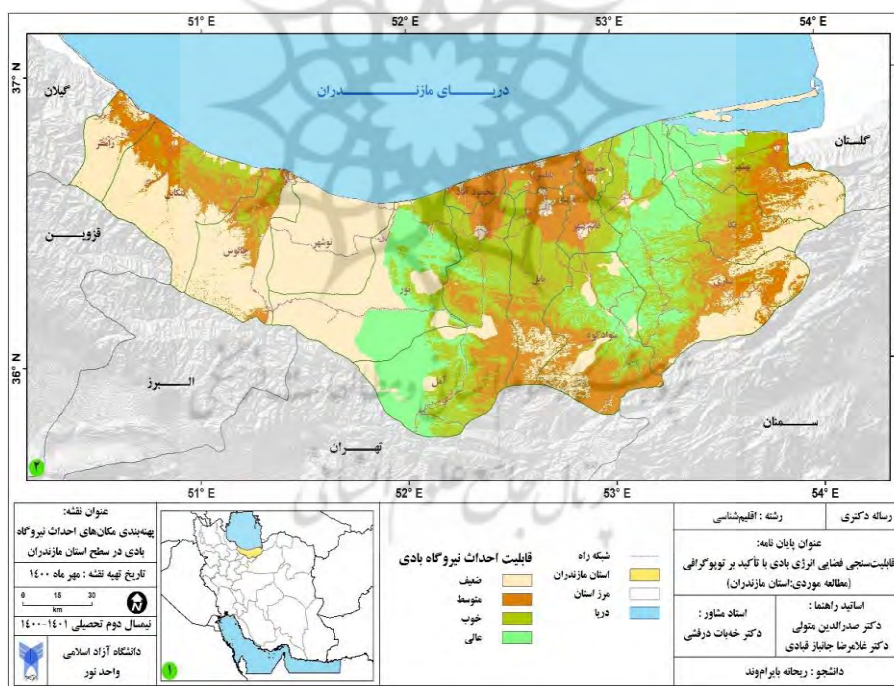
جدول شماره ۳. وزن نسبی حاصل از مدل ANP در مقایسه معیارها و زیرمعیارهای به کار گرفته‌شده در مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران

ردیف	معیار	ANP وزن	زیر معیار	ANP وزن
۱			سرعت باد	۰/۴۹۳
۲	اقلیمی	۰/۵۴۳	چگالی انرژی باد	۰/۱۹۶
۳			پیوستگی باد	۰/۳۱۱
۴			فاصله از فرودگاه	۰/۵۲۲
۵			نزدیکی به خطوط انتقال نیرو	۰/۲۵۷
۶	اقتصادی	۰/۱۱۱	فاصله از راه‌آهن	۰/۱۰۸
۷			فاصله از راه	۰/۰۷۲
۸			فاصله از معدن	۰/۰۴
۹			فاصله از سایت‌های تاریخی	۰/۰۸۳
۱۰			فاصله از شهر	۰/۲۶۸
۱۱			فاصله از روستا	۰/۱۶۶
۱۲			کاربری اراضی	۰/۲۵۹
۱۳			فاصله از مراکز صنعتی	۰/۰۴۳
۱۴	محیطی - اجتماعی	۰/۰۸۶	فاصله از مناطق نمونه گردشگری	۰/۰۳۳
۱۵			فاصله از سایت‌های گردشگری	۰/۰۲۴۷
۱۶			فاصله از گسل	۰/۰۵۱
۱۷			مناطق حفاظت‌شده	۰/۱۰۱
۱۸			فاصله از تالاب	۰/۰۱۶
۱۹			فاصله از رودخانه	۰/۰۱۱
۲۰	توپوگرافی	۰/۲۶	ارتفاع	۰/۶۶۷
۲۱			شیب	۰/۳۳۳

محاسبه وزن معیار شاخص‌های چهارگانه موردبررسی با فرآیند تحلیل شبکه، امکان همپوشانی آن‌ها و تهیه نقشه مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی را در سطح استان مازندران فراهم آورد. این همپوشانی بر طبق رابطه ۲ انجام شده که شکل عمومی معادله تلفیق چهار شاخص را بیان می‌کند. با انجام این کار، نقشه نهایی تعیین مکان‌های بهینه استقرار نیروگاه بادی در استان مازندران با استفاده از مدل ANP به دست آمده آمد که در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

رابطه ۲) مکان بهینه استقرار نیروگاه بادی = (اقلیم  $\times 0/543$ ) + (توپوگرافی  $\times 0/26$ ) + (اقتصاد  $\times 0/111$ ) + (محیطی - اجتماعی  $\times 0/086$ )

با توجه به نقشه پهنه‌بندی حاصل از مدل ANP همانند نقشه AHP، قسمت‌های غربی شهرستان نور، قسمت‌های شمالی شهرستان‌های سوادکوه، ساری، نکا و بهشهر، نوار مرکزی شهرستان بابل به همراه نوار مرکزی و قسمت‌های شمالی شهرستان آمل، از پهنه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های استان مازندران به جهت استقرار یا ساخت نیروگاه‌های بادی برخوردار هستند. این در حالی است که در گستره سرزمینی تمامی شهرستان‌های منتهی به ارتفاعات البرز (بخش‌های جنوبی)، اگرچه وضعیت معیار اقلیمی و زیرشاخص‌های آن (سرعت باد، چگالی باد و پیوستگی باد) شرایط مطلوب‌تر و بهینه‌تری را برای ساخت نیروگاه‌های بادی در مقایسه با سایر معیارها و زیرمعیارها دارد، اما با توجه به پوشش اراضی این بخش‌ها که جنگل‌های با تراکم بالا می‌باشد، احداث نیروگاه بادی در آن‌ها توصیه نمی‌شود. بخش‌های شمالی و منطبق بر پهنه‌های ساحلی و جلگه‌ای استان (به‌استثنای محدوده ساحلی امیرآباد) نیز با توجه به فراهم نبودن شرایط آستانه حداقلی معیارهای فنی باد برای به حرکت درآوردن توربین‌های بادی، مکان‌های مناسبی جهت استقرار نیروگاه نیستند.



شکل شماره ۱۵. نقشه پهنه‌بندی مکان‌های استقرار نیروگاه بادی در سطح استان مازندران با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه

## نتیجه‌گیری

با توجه به نقشه پهنه‌بندی حاصل از مدل ANP همانند نقشه AHP، قسمت‌های غربی شهرستان نور، قسمت‌های شمالی شهرستان‌های سوادکوه، ساری، نکا و بهشهر، نوار مرکزی شهرستان بابل به همراه نوار مرکزی و قسمت‌های شمالی شهرستان آمل، از پهنه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های استان مازندران به جهت استقرار یا ساخت نیروگاه‌های بادی برخوردار هستند. این در حالی است که در گستره سرزمینی تمامی شهرستان‌های منتهی به ارتفاعات

البرز (بخش‌های جنوبی)، اگرچه وضعیت معیار اقلیمی و زیرشاخص‌های آن (سرعت باد، چگالی توان باد و پیوستگی باد) شرایط مطلوب‌تر و بهینه‌تری را برای ساخت نیروگاه‌های بادی در مقایسه با سایر معیارها و زیرمعیارها دارد، اما با توجه به پوشش اراضی این بخش‌ها که جنگل‌های با تراکم بالا می‌باشد، احداث نیروگاه بادی در آن‌ها توصیه نمی‌شود. بخش‌های شمالی و منطبق بر پهنه‌های ساحلی و جلگه‌ای استان (به‌استثنای محدوده ساحلی امیرآباد) نیز با توجه به فراهم نبودن شرایط آستانه حداقلی معیارهای فنی باد برای به حرکت درآوردن توربین‌های بادی، مکان‌های مناسبی جهت استقرار نیروگاه نیستند. در مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان سرعت باد با وزن نسبی ۰/۴۹۳ مهم‌ترین زیر معیار اقلیمی، فاصله از فرودگاه با وزن نسبی ۰/۵۲۲ مهم‌ترین زیر معیار اقتصادی، فاصله از شهر با وزن نسبی ۰/۲۶۸ مهم‌ترین زیر معیار محیطی - اجتماعی و ارتفاع با وزن نسبی ۰/۶۶۷ مهم‌ترین زیر معیار توپوگرافی در تهیه نقشه مکان‌یابی هدف می‌باشند. وزن‌های نسبی حاصل از مدل فرآیند تحلیل شبکه همچنین نشان می‌دهد که تأثیر معیار اقلیمی با وزن نسبی ۰/۵۴۳ نسبت به سه معیار دیگر در تهیه نقشه پهنه‌بندی بیش‌تر می‌باشد. معیارهای توپوگرافی با وزن نسبی ۰/۲۶، اقتصادی با وزن نسبی ۰/۱۱۱ و محیطی - اجتماعی با وزن نسبی ۰/۰۸۶ در رده‌های دوم تا چهارم اثرگذاری بر تهیه نقشه پهنه‌های بهینه استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران قرار گرفته‌اند.

## تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

## منابع

- احمدی، م. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۴). توان‌سنجی نیروگاه‌های بادی با روش FAHP در منطقه سمنان. فصل‌نامه بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران، ۱۳ (۴۷)، ۸۱-۹۸.
- اسدی، م. و خورشید دوست، ع.م. (۱۳۹۸). مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان آذربایجان شرقی با استفاده از روش AHP. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۳ (۷۰)، ۱۰۱-۱۲۲.
- اسفندیاری، ع.؛ رنگری، ک.؛ صابری، ع. و فتاحی مقدم، م. (۱۳۹۰). پتانسیل سنجی احداث نیروگاه‌های خورشیدی با بررسی پارامترهای اقلیمی در استان خوزستان با استفاده از GIS، همایش ملی ژئوماتیک، تهران.
- آقاجانی، ح.؛ فتاحی مقدم، م.؛ اکبری، ه. و فتاحی، ر. (۱۳۹۴). مکان‌یابی توربین‌های بادی مبتنی بر ارزیابی فضایی زیست‌محیطی (نمونه موردی: استان خراسان رضوی)، نشریه انرژی ایران، ۱۸ (۱)، ۸۵-۱۰۰.
- انتظاری، ع.؛ امیراحمدی، ا.، عرفانی، ع. و برزویی، ا. (۱۳۹۱). ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۳ (۹)، ۳۳-۴۶.
- تناکیان، س.؛ پیری صحراگرد، ح. و امیری، م. (۱۳۹۷). مکان‌یابی مناطق برای ساخت نیروگاه‌های بادی به کمک روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت سیستان)، مهندسی اکوسیستم بیابان، ۷ (۱۹)، ۱-۱۶.
- جانابزقادی، غ. (۱۳۹۸). پتانسیل سنجی انرژی باد جهت تعیین مکان بهینه برای احداث توربین‌های بادی در استان مازندران. آمایش جغرافیایی فضا، ۳ (۳۴)، ۲۰۹-۲۲۴.
- رضایی بنفشه، م.؛ جهانبخش، س.؛ دین‌پژوه، و اسمعیل‌پور، م. (۱۳۹۳). امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان‌های اردبیل و زنجان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۳ (۴۶)، ۲۶۱-۲۷۴.
- صادقی، ز.؛ دلال‌باشی اصفهانی، ز. و حری، ح.ر. (۱۳۹۲). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مکان‌یابی نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی و انرژی باد) استان کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره. پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، ۱ (۲)، ۹۳-۱۱۰.
- عزیزی، ق.؛ فرید مجتهدی، ن.؛ شعبان‌زاده، ف.؛ نگاه، س. و عابد، ح. (۱۳۹۶). رفتارشناسی باد در ایستگاه‌های البرز غربی تحت تأثیر واداشت‌های محیطی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۱ (۶۲)، ۲۰۳-۲۲۲.
- گندمکار، ا. (۱۳۸۹). تعیین گستره افقی باد سیستان با استفاده از تحلیل خوشه‌ای. فصل‌نامه جغرافیایی طبیعی، ۱۰، ۶۷-۷۶.
- مریانجی، ز.؛ حسینی، ا. و عباسی، ح. (۱۳۹۶). ناحیه و پیش‌بینی پتانسیل انرژی باد در استان همدان با استفاده از سیستم

اطلاعات جغرافیایی. اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۶ (۱۰۴)، ۱۸۵-۱۰۴.  
 (۱۳) نوراللهی، ی.؛ اشرف، م.ع. و زمانی، م. (۱۳۹۰). پتانسیل سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه انرژی ایران، ۱۴ (۳۷)، ۲-۲۲.

## References

- 1) Aghajani, H., Fattahi Moghaddam, M., Akbari, H., & Fattahi, R. (2015). Location of wind turbines based on environmental spatial assessment (Case study: Khorasan Razavi Province). *Journal of Iran Energy*, Vol. 18. No. 1. Pp. 85-100. [In Persian].
- 2) Ahmadi, M., & Dadashi Roudbari, A. (2015). Feasibility study of wind power plants with AHP method in Semnan region. *Journal of the Iranian Geographical Association*, 13, 81-98. [In Persian].
- 3) Allouhi, A., Zamzoum, O., & Islam, M.R. (2017). Evaluation of wind energy potential in Morocco' coastal regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 311-324.
- 4) Anthrax: General Information [Online] [http://www.windpowerworks. Net](http://www.windpowerworks.Net), available 30.12.08.
- 5) Asadi, M., & Khorshidoust, A.M. (2020). Site selection of wind power in East Azerbaijan Province by using AHP. *Geography and Planning*, 23(70), 101-122. [In Persian].
- 6) Azizi, G., Farid Mojtahedi, N., Shaebanzadeh, F., Negah, S., & Abed, H. (2017). Wind behavior in west Alborz stations influenced by environmental implications. *Geography and Planning*, 21(62), 203-222. [In Persian].
- 7) Baban, S.M.J., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind arms in the UK. *Renewable Energy*, 24, 59-71.
- 8) Brower, M., (1992). *Cool energy*, revised edition, renewable solution to environment problems. Cambridge. MA, The MIT Press, 200pp.
- 9) Caralis, G., Perivolaris, Y. Rados, K., & Zervos, A. (2008). On the effect of spatial dispersion of wind power plants on the wind energy capacity credit in Greece. *Environmental Research Letter*, 3, 3-15.
- 10) Chen, W., Castruccio, S., & Genton, M.G. (2018). Current and future estimates of wind energy potential over Saudi Arabia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 6443-6459.
- 11) Clarke, A. (1991). Wind energy progress and potential. *Energy Policy*, 19, 742-55.
- 12) Entezari, A., Amir Ahmadi, A., Erfani, A., & Borzuie, A. (2012). Evaluation of wind energy potential and feasibility of wind power plant construction in Sabzevar. *geographical studies of arid regions. Geographical Studies of Arid Regions*, 3(9-10), 33-46. [In Persian].
- 13) Esfandiari, A., Rangzi, K., Saberi, A., & Phattahi Moghadam, M. (2011). Potential measurement of solar power plants construction by studying climatic parameters in Khuzestan province using GIS, *Geomatic National Conference*, Tehran, Iran. [In Persian].
- 14) Gandomkar, A. (2010). Determining the horizontal wind direction of Sistan using cluster analysis. *Physical Geography Journal*, 10, 67-76. [In Persian].
- 15) Ilkilic, C., & Aydin, H. (2015). Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 78-86.
- 16) International Energy Agency. (2003). *Renewables for power generation status and prospects*. Paris, France: IEA, 194pp.
- 17) International Energy Agency. (2006). *Renewable energy: RD and D priorities. Insight from IEA technology programs*. Paris, France: IEA, 224pp.
- 18) Janbazghobadi, G.( 2020). Potentiometric analysis of wind energy to determine the optimum location for wind turbines in Mazandaran province. *Geographical Planning of Space Journal*, 9(34), 209-224. [In Persian].
- 19) Krut, B., Dujardin, J., & Lehning, M. (2018). Improvement of wind power assessment in complex terrain: the case of COSMO-1 in the Swiss Alps. *Front. Energy Res*, 6(102), 1-10.
- 20) Kuswandari, R., (2004). Assessment of different methods for measuring the sustainability of forest management. *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede*, Netherlands, 143pp.
- 21) Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley and Sons, New York, 408pp.
- 22) Malczewski, J. (2006). Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, 270-277.
- 23) Maryanaji, Z., Hossieni, A., & Abbasi, H. (2018). Zoning and forecasting of the wind energy potential in Hamadan Province using, *Geographic Information System*, 26(104), 186-196. [In Persian].
- 24) Morrison, M.L., & Sinclair, K. (2004). Wind energy technology, environmental impacts of. *Encyclopedia of Energy*, 6, 435-48.



- 25) Negash, T., Mollerstrom, E., & Ottermo, F. (2020). An assessment of wind energy potential for the three topographic regions of Eritrea. *Energies*, 13(1846), 1-12.
- 26) Noorollahi, Y., Ashraph, M.A., & Zamani, M. (2011). Assessment of the West Regional wind power energy potential using Geographic Information System (GIS). *Iranian Journal of Energy*, 14(37), 2-22. [In Persian].
- 27) Ramirez-Rosado, I.J., Garcia-Garrido, E., Fernandez-Jimenez, A., Zorzano-Santamaria P.J, Monteiro, C., & Miranda, V., (2008). Promotion of new wind farms based on a decision support system. *Renewable Energy*, 33, 558-66.
- 28) Rehman, S., Natarajan, N., Vasudenvan, M., & Alhems, L.M. (2020). Assessment of wind energy potential across varying topographical features of Tamil Nadu, India. *Energy Exploration and Exploitation*, 38(1), 175-200.
- 29) Rezaie Banafsheh, M., Jahanbakhsh, S., Dinpazhooh, Y., & Esmali, M. (2014). Feasibility study of using wind energy in Ardabil and Zanzan Provinces. *Natural Geography Research*, 3(46), 261-274. [In Persian].
- 30) Sadeqi, Z., Dalalbashi Esfehiani, Z., & Horri, H.R. (2013). Prioritize the factors affecting the location of renewable energy plants (solar and wind energy) in Kerman Province using GIS and multi-criteria decision-making techniques. *Energy Planning and Policy Research*, 1(2), 93-110. [In Persian].
- 31) Salam, M.A., Yazdani, M.G., & 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).
- 32) Strantzali, E., & Aravosis, K. (2016). Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 885-898.
- 33) Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., Golay, M.W., & Peters, W.A. (2005). *Sustainable energy. Second edition, choosing among options*, Cambridge, MA: The MIT Press, 1056pp.
- 34) Tonakian, S., Piri Sahragard, H., & Amiri, M. (2018). Selection the locating areas for the construction of wind farms using fuzzy hierarchical analysis (Case study: Sistan plain). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(19), 1-16. [In Persian].
- 35) Wrixon, G.T., Rooney, A.M.E., & Palz, W. (1993). *Renewable energy-2000*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 126pp.