Dor: 20,1001,1,20085656,1401,15,57,4,0

صص ۱۰۸-۹۱

مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل Boolean در محیط ArcGIS (مطالعه موردی: 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 جانبازقبادی
استادیار گروه جغرافیا، واحد نور دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران
خه بات درفشی
استادیار ژئومورفولوژی، گروه میراث طبیعی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۵

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. روش پژوهش این مطالعه توصیفی - تحلیلی است که با استفاده از داده‌های مکانی و کمی مرتبط با مسئله پژوهش در پی بررسی و ارزیابی قابلیت اراضی ستان مازندران برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی 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 چهار معیار شامل ۱۸ زیرمعیار است که پس از وزن دهی، تعیین وزن معیار و همپوشانی، نقشه پهنه‌بندی نهایی با استفاده از مدل Boolean تهیه شده است. با توجه به نقشه نهایی، نوار مرکزی استان در محدوده شهرستان‌های نور، آمل و بابل، قسمت‌های شمالی شهرستان‌های نور و ساری، جنوب شهرستان‌های سوادکوه و قائم‌شهر و نیز قسمت مرکزی و جنوبی شهرستان بهشهر، پهنه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های استان مازندران به جهت استقرار یا ساخت نیروگاه‌های بادی هستند.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی، نیروگاه بادی، Boolean، استان مازندران.

*نویسنده مسئول: ۰۹۱۱۱۲۱۲۳۱۲ Email: s_motevalli@iaunour.ac.ir

مقدمه

بـادهـا در نتیجـه توزیع نـابرابر حرارت خورشـــیدی در اطراف جهان رخ می‌دهند. ســـرعت و جهت باد می‌تواند بر طبق ویژگی‌های توپوگرافی متفاوت باشـد (Brower, 1992: 23؛ Allouhi et al. 2017: 315؛ Chen et al. 2018: 15). همانند دیگر منابع انرژی تجدید پذیر، مردم از نیروی باد برای قرن‌ها تا عصـــر صـــنعت مدرن بهره گرفته‌اند و این موجب شده است تا مردم به گسترش منابع انرژی قابل اطمینان‌تر از سوخت‌های فسیلی روی آورند (گندمکار، ۱۳۸۸: ۶۸؛ انتظاری و همکاران، 1391: 35؛ Ilkilic and Aydin, 2015: 80). به هر حال بحران نفت که در اواسـط دهه ۱۹۷۰ رخ داد، کشـورها را به سـرمایه‌گذاری بیش‌تر در منابع جدید انرژی برای از بین بردن وابسـتگی به سـوخت‌های فسـیلی تشـویق کرده اسـت (International Energy Agency, 2006: 115؛ Strantzali and Aravosis, 2016: 886؛ Salam et al. 2018: 17). بهره‌برداری از منابع انرژی تجدید پذیر مانند باد، وابسـتگی به کشـورهای دیگر برای تولید انرژی را کاهش می‌دهد. انرژی باد در مقایسـه با سـوخت‌های فسـیلی، موجب خسـارات زیست‌محیطی کم‌تری می‌شود. یکی از اثرات مفید انرژی باد بر محیط‌زیسـت، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای Co^2 است (Caralis et al. 2008: 8). توربین‌های بادی علاوه بر این‌که 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 (International Energy Agency, 2003: 73؛ Negash et al. 2020: 3؛ Rehman et al. 2020: 177).

از طرفی، اثرات منفی زیسـت‌محیطی انرژی بادی که به‌طور مشترک توسط دانشمندان پذیرفته شده است، عبارتند از: تأثیر روی زیستگاه‌های حیوانی مثل برخوردهای پرنده با توربین‌های بادی، تولید سر و صدا، تأثیرات بصری، مسائل ایمنی و تداخل‌های الکترومغناطیس (Anthrax: Green Information, 2008: 13). تیغه‌های دوار توربین‌های بادی باعث تار شـدن تصـویر در چشـمان 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 می‌شـــود (Morrison and Sinclair, 2004: 438). 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 حفاظت شـده حیات‌وحش نصـب شوند (Depeng et al. 2006: 209). پیشنهاد دیگر آن است که توربین‌های بادی حداقل ۳۰۰ متر دورتر از زیسـتگاه پرندگان نصـب شـوند تا بتواند پرندگان را از برخورد محافظت کند (Clarke, 1991: 743). تأثیر بیش‌تر انرژی بادی بر روی زیستگاه، تولید سر و صدا است. هرچند که قوانین و آیین‌نامه‌هایی از نظر سـطح قابل قبول تولید سـر و صـدا وجود دارد، اما این امر به سـطح توسـعه‌یافتگی جوامع بسـتگی دارد. اگرچه به توافق رسیدن در میزان سر و صدای تولید شده آسان نیست (Wrixon et al. 1993: 18). مقامات مختلف، در مورد سر و صدا، ضـوابط مختلفی دارند که یکی از آن‌ها این است که توربین‌های بادی باید حداقل ۵۰۰ متر دورتر از نزدیک‌ترین زیستگاه قرار گیرد (Tester et al. 2005: 81؛ Kruyt et al. 2018: 98).

تأثیرات بصـری یکی دیگر از عوارض جانبی توربین‌های بادی است که بین افراد متفاوت است. از آنجایی‌که انرژی باد، انرژی پاک ایجاد می‌کند، بعضـــی از مردم از دیدن توربین‌ها و مزرعه‌های بادی لذت می‌برند؛ از ســـوی دیگر، برخی افراد می‌توانند این مسـئله را مطرح کنند که نصـب توربین‌های بادی مغایر چشـم‌اندازهای شـهری اسـت (Ramirez-Rosado et al. 2008: 559). با توجه به مطالعات (Baban and Parry, 2001: 64)، توربین‌ها بادی باید ۲۰۰۰ متر دورتر از شهرک‌های بزرگ، به خاطر اهمیت مسئله زیبایی چشم‌اندازها واقع شوند. هرچند تعدادی از حوادث جدی که رخ می‌دهد، ناشـی از ضعف مدیریت یا عدم رعایت قوانین ایمنی است؛ زیرا انرژی بادی از دیدگاه ایمنی، به‌طورکلی در سطح خوب محسـوب می‌شـود (Wrixon et al. 1993: 18). از دیگر نکاتی که در انتخاب حداقل سرعت باد باید مدنظر قرار گیرد، حداقل ســرعتی اســت که در رده‌بندی‌های توربین‌های بادی مطابق با اســتاندارد بین‌المللی IEC61400-1 برای توربین‌های بادی در نظر گرفته شـده است. این سرعت مربوط به رده IV بوده و برابر ۶ متر بر ثانیه می‌باشد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰: ۳).

در راستای مکان‌یابی فضایی پهنه‌های مناسب استقرار نیروگاه‌های بادی با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، سـهم قابل توجهی به‌عنوان یک ابزار پشـتیبان تصـمیم‌گیری در شـناسـایی مکان‌های سـازگار با محیط‌زیســـت، مانند مکان‌یابی توربین‌های بادی که به مدیریت و تجزیه و تحلیل طیف گســـترده‌ای از انواع داده مکانی نیازمند اسـت، دارد. همچنین GIS هر دو ابزار توسـعه فنی و چارچوب تحلیل را ارائه می‌کند (آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۷). سـطح پیچیده GIS را می‌توان با توجه به هدف تغییر داد؛ این امر ممکن اسـت به‌منظور ارائه نقشـه، برای محققان مورد استفاده قرار گیرد یا ممکن است داده‌هایی برای تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی مشخص، فراهم نماید (Rodriguez-Bachiller and Glasson, 2004: 371). پتانســـیل انرژی باد و نگرانی‌های مختلف زیســـت‌محیطی، باید توأمان در شـناسایی مکان‌های مناسب برای ایجاد و استقرار توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گیرد. تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چنـد معیـاری مکـانی (MCDA) یکپـارچـه شـــده بـا GIS، امکان ترکیب اطلاعات (داده‌های) جغرافیایی با ترجیحات تصـــمیم‌گیرندگان را به‌منظور ارائه ارزیابی کل از چندین معیار متعارض و ناســازگار را فراهم می‌ســازد (Malczewski, 1999: 29؛ رضـایی بنفشـه و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۶۵؛ مریانجی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۹۰)؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل GIS ممکن اسـت به تعیین مناطق مناسب بر اساس ضوابط خاص و پیشرفت‌های آینده، کمک کند (Malczewski, 2006: 271؛ اسـفندیاری و همکاران، ۱۳۹۰: ۱؛ آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۹؛ احمدی و داداشـــی رودبادی، ۱۳۹۴: ۸۵؛ جانباز قبادی، ۱۳۹۸: ۲۱۰).

شـیوه بهره‌برداری از حامل‌های انرژی در ایران، علی‌رغم توسـعه اقتصـادی ملی و ارتقای سـطح رفاه عمومی، باعث نگرانی از وضـعیت مصـرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای گردیده اسـت. لذا کشور ایران در روند توسعه خود نیاز به افزایش انرژی دارد و ضـرورتاً می‌بایسـت در برنامه‌ریزی توسعه خود جایگاه ویژه‌ای را برای تأمین انرژی‌های تجدید پذیر در نظر داشـــته باشـــد. 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 فضـایی عوامل محیطی به‌صورت موردی برای استان مازندران انجام می‌شود. در واقع هدف اصلی پژوهش، تهیه نقشـه پهنه‌بندی بر مبنای عوامل محیطی جهت تعیین مکان مناسـب احداث نیروگاه‌ها در مناطق مستعد و بادخیز استان مازندران است.

منطقه مورد مطالعه

اسـتان مازندران با وسـعتی معادل ۲۳۷۵۶ کیلومترمربع حدود ۱/۴۶ درصـد از مسـاحت کشـور را در برداشـته 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 ۱). استان مازندران برخلاف انتظار، پتانسیل بالایی جهت استفاده از پتانسیل انرژی بادی و احداث نیروگاه‌های باد دارد. این استان با شـرایط خاص توپوگرافی (از ارتفاع ۲۶- متر تا ارتفاع بیش از ۵۰۰۰ متر)، جهت دامنه‌های شـمالی و وزش بادهای غالب غربی و شـمال‌وز و نیز شـمالی و همچنین سـایر بادهای محلی در مناطق مختلف آن، شـرایط مسـاعد را برای ارزیابی و قابلیت سـنجی 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 سـوخت‌های 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 ضـروری می‌نماید. با در نظر گرفتن وضـعیت اقتصادی کشور و صرف هزینه‌های بسیار گزاف در جهت تأمین نیروی برق و نظر به پیاده‌سـازی عملی و اجرایی شـدن دسـتورالعمل‌های اقتصـاد مقاومتی، لزوم اسـتفاده از انرژی‌های نو، به‌ویژه انرژی بادی، در سطح استان مازندران بیش از پیش مطرح می‌شود.

مآخذ: نگارندگان

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی گستره استان مازندران و شهرستان‌های آن

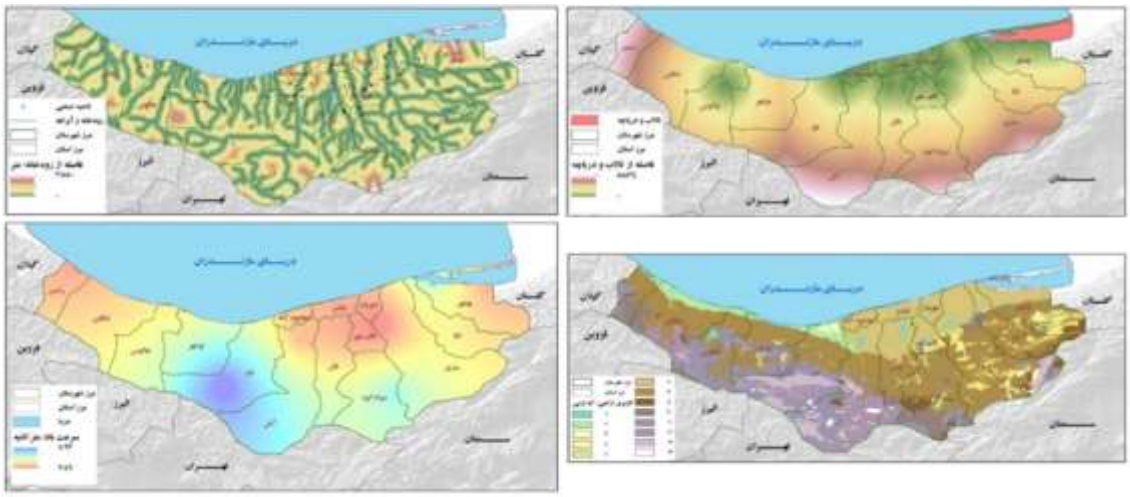
داده‌ها و روش‌ها

روش پژوهش این مطالعه توصیفی – تحلیلی می‌باشد که با استفاده از داده‌های مکانی و کمی مرتبط با مسئله پژوهش در پی بررسی و مکان‌یابی پهنه‌های مناسب استقرار نیروگاه‌های بادی در گستره استان مازندران است. در مکان‌یابی نیروگاه بادی معیارهای متعددی را می‌توان دخالت داد. معمولاً هر چقدر عوامل بیش‌تری در مدل دخالت داده شود، خروجی دقیق‌تری خواهد داشت؛ اما با توجه به عدم دسترسی به‌تمامی 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 تحلیل‌گران و متخصصان حوزه GIS استفاده شده است (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۰۵؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۲: ۹۶؛ آقاجانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۹؛ تناکیان و همکاران، ۱۳۹۷: ۵؛ اسدی و خورشید دوست، ۱۳۹۸: ۱۰۳). 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 ۱۸ زیرمعیار سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین، 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، شیب، فاصله از معدن، فاصله از تالاب و دریاچه و فاصله از رودخانه هستند که در ادامه به روش تهیه هرکدام، وزن دهی، تعیین وزن معیار، همپوشانی و در نهایت تهیه نقشه پهنه‌بندی نهایی با استفاده از مدل Boolean پرداخته می‌شود.

در جدول ۱ زیرمعیارهای مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی و مشخصات هرکدام از آن‌ها، ارائه گردیده است. شکل ۲ نیز زیرشاخص‌های ۱۸ گانه مورد استفاده در مکان‌یابی پهنه‌های مناسب استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران را نشان می‌دهد.

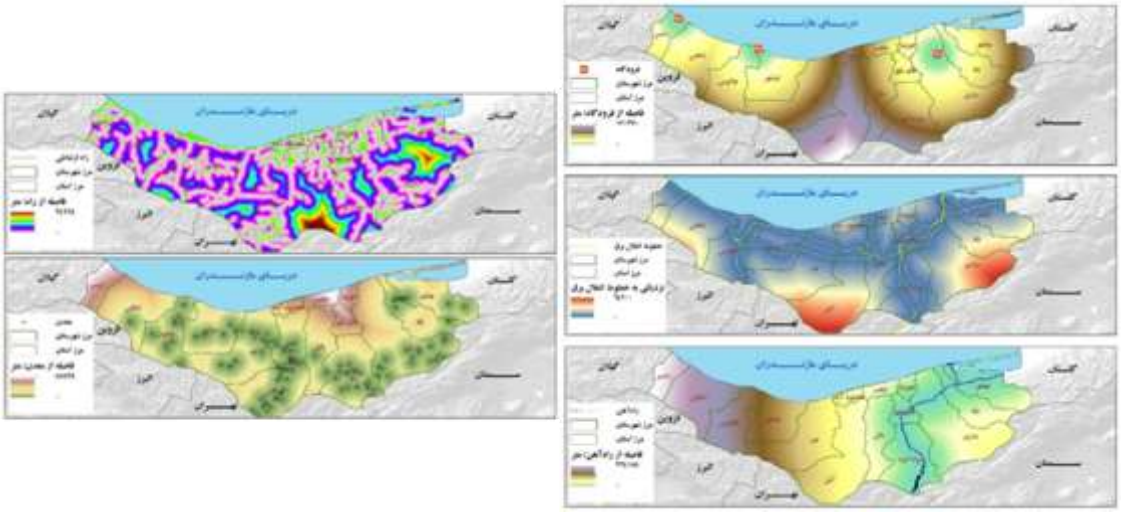
جدول ۱: مشخصات زیرمعیارهای مورد استفاده در مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران

ردیف	زیرمعیار	منبع تهیه و مشخصات
۱	سرعت باد	داده‌های باد ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان مازندران طی دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷
۲	فاصله از فرودگاه	داده‌های برنامه آمایش استان مازندران (استانداری مازندران و مهندسین مشاور مازند طرح) و پایگاه ملی داده‌های علوم زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)
۳	فاصله از شهر	
٤	نزدیکی به خطوط انتقال نیرو	
٥	فاصله از روستا	
٦	مناطق حفاظت شده	
۷	فاصله از سایت‌های تاریخی	
۸	فاصله از راه‌آهن	
۹	فاصله از راه	
۱۰	کاربری اراضی	
۱۱	فاصله از مراکز صنعتی	
۱۲	فاصله از مناطق نمونه گردشگری	
۱۳	فاصله از گسل	
۱٤	فاصله از معدن	
۱٥	فاصله از تالاب	
۱٦	فاصله از رودخانه	
۱۷	ارتفاع	مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری ASTER
۱۸	شیب	



مآخذ: نگارندگان

شکل ۲ الف: زیرمعیارهای محیطی – اجتماعی (فاصله از تالاب و دریاچه و فاصله از رودخانه) مورد استفاده در مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران؛ زیرمعیار اقلیمی (سرعت باد)

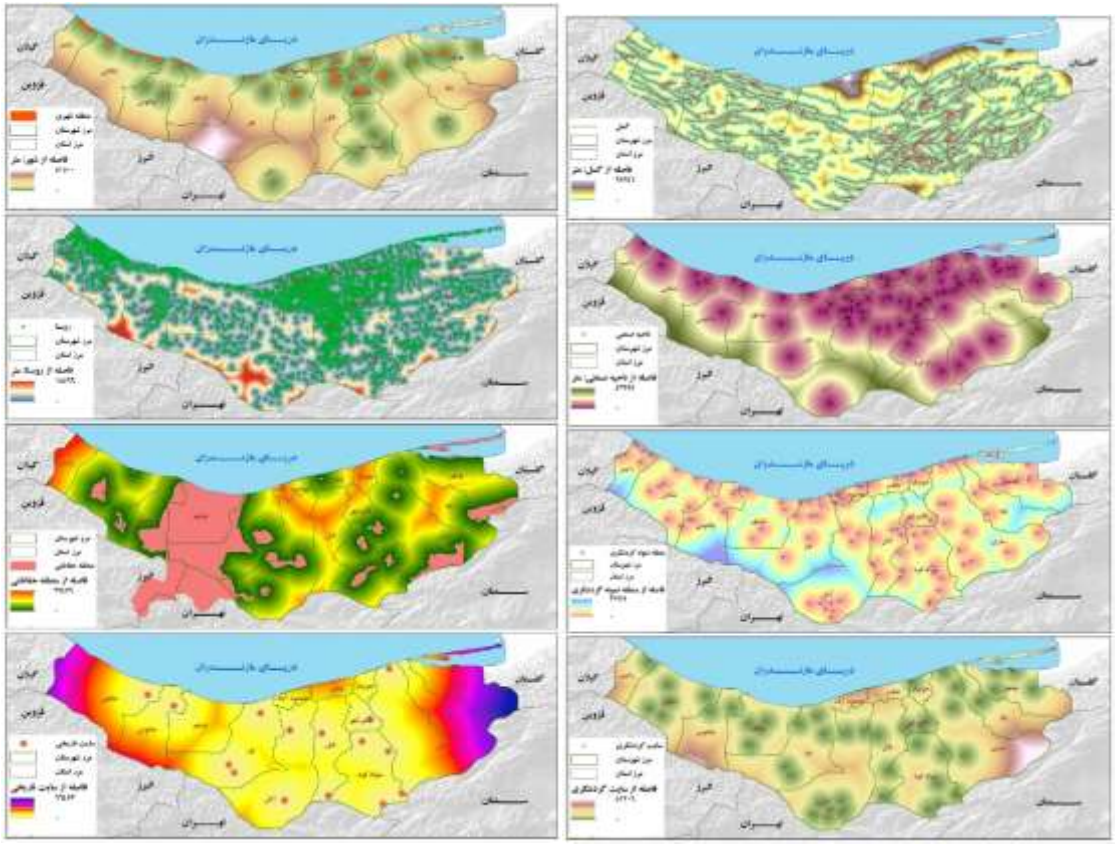


مآخذ: نگارندگان

شکل ۲ ب: زیرمعیارهای اقتصادی (فاصله از فرودگاه، نزدیکی به خطوط انتقال برق، فاصله از راه‌آهن، فاصله از راه و فاصله از معدن)

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[1]، احتمالاتی[2] و فازی[3] وجود دارد که در این پژوهش برای استانداردسازی داده‌ها از روش Boolean در این محیط نرم‌افزاری ArcGIS استفاده شده است.

[1]. Deterministic
[2]. Probabilistic
[3]. Fuzzy



مآخذ: نگارندگان

شکل ۲ 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 خصوص زیرمعیارهای اقلیمی (سرعت باد)، از داده‌های روزانه باد ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان طی دوره آماری مشترک (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ میلادی) 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 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 در ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی، با استفاده از درون‌یابی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS، لایه سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین بیش‌تر تهیه شده است. پس از آماده‌سازی لایه‌های مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان مازندران، از مدل Boolean برای استانداردسازی و تلفیق لایه‌های مذکور و در نهایت تهیه نقشه نهایی استفاده شده است. این مدل برگرفته از نام ریاضی‌دان مطرح انگلیسی (جورج بولی) بوده که در سال ۱۹۷۴ به‌وسیله وارنز مورد استفاده قرار گرفته و در سال ۱۹۸۹ به‌وسیله روبینو توسعه داده شد. در مدل بولین (دودویی)، ترکیب منطقی ارزش‌ها به‌صورت "بله" و "خیر" است (نوریان، ۱۳۸۳: ۳). این مدل بیش‌تر در مرحله غربال اولیه به کار می‌رود؛ یعنی مرحله‌ای که در آن گزینه غیرقابل قبول و قابل‌قبول برای استفاده مجزا می‌گردند. بدین‌معنا که در هر لایه، گزینه‌های قابل قبول مقدار یک و گزینه‌های غیرقابل قبول، مقدار صفر را به خود می‌گیرند. به عبارتی، مدل

بولین مناسبت مکانی را بر اساس عملگرهای شرطی، به‌صورت "صفر" یا "یک" نمایش می‌دهد و در مرحله بعد با استفاده از توابع منطقی مانند AND، OR، XOR و NOT برای این‌که شرط مخصوصی درست است یا غلط، استفاده می‌کند و به‌وسیله آن‌ها لایه‌ها با هم ترکیب می‌شوند و نتیجه نهایی آن، داوری در مورد یک محل برای یک فعالیت یا کاربری خاص است که در این محل یا مناسب است (یک) یا مناسب نیست (صفر) و حالت دیگری جز این دو وجود ندارد.

لایه‌های استفاده شده در این پژوهش برای تحلیل پهنه‌های مناسب نیروگاه بادی، با توجه به نقش هرکدام و تعریف شاخص‌ها، بر اساس منطق بولین (تابع منطقی AND) به فایل‌های رستری[1] (فرمتی که در محیط ArcMap قابلیت تحلیل و پهنه‌بندی دارد) تبدیل شده و در مرحله بعد این لایه‌ها بر روی‌هم قرار گرفتند تا بتوان به پهنه‌های مناسب نیروگاه بادی دست‌یافت. روی‌هم قرار گرفتن لایه‌ها[2] با نوار ابزار "Spatial Analyst: Raster Calculator" و با استفاده از تابع منطقی "OR" انجام می‌گیرد. صحت حاصل از اجرای تابع‌های AND و OR در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: جدول صحت برای تابع منطقی OR

Inputs		Outputs
X	Y	X + Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	2

جدول ۳: جدول صحت برای تابع منطقی And

Inputs		Outputs
X	Y	XY
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

مأخذ: نگارندگان

جدول ۴ تابع مدل Boolean و نیز آستانه‌های مورد استفاده برای استانداردسازی هرکدام از زیرشاخص‌های به کار گرفته شده را نشان می‌دهد.

[1] . Raster
[2] . Overlay

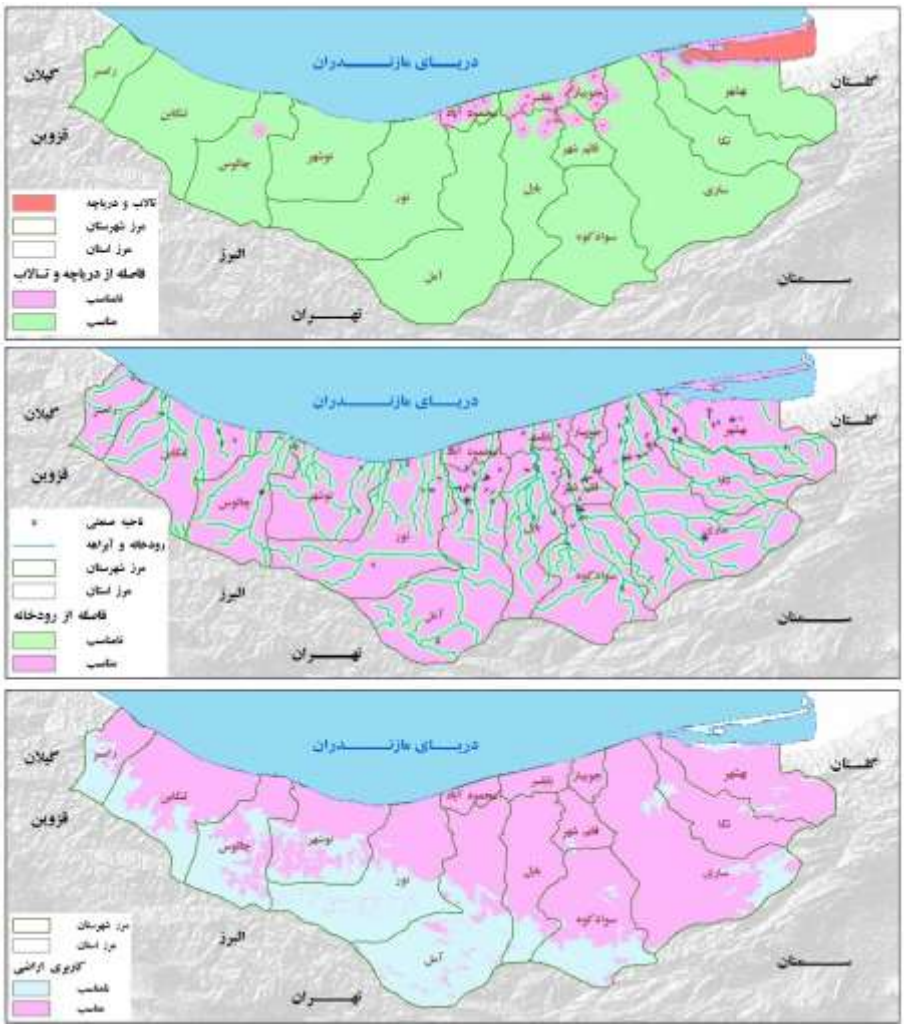
جدول ٤: تعریف آستانه عددی زیرمعیارهای مورد استفاده در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی استان مازندران

شاخص	زیرشاخص	آستانه مناسب
اقلیمی	سرعت باد	۴ متر بر ثانیه و بالاتر
اقتصادی	فاصله از فرودگاه	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
	نزدیکی به خطوط انتقال برق	مناطق با فاصله ۵۰۰ تا ۴۵۰۰ متر
	فاصله از راه‌آهن	مناطق با فاصله ۲۵۰ تا ۴۵۰۰ متر
	فاصله از راه	مناطق با فاصله ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر
	فاصله از معدن	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۲۰۰۰ متر
محیطی - اجتماعی	فاصله از شهر	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۷۰۰۰ متر
	فاصله از روستا	مناطق با فاصله ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر
	مناطق حفاظت شده	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
	فاصله از سایت‌های تاریخی	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
	کاربری اراضی	بر اساس ارزش اقتصادی و نوع کاربری
	فاصله از مراکز صنعتی	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
	فاصله از مناطق نمونه گردشگری	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
	فاصله از گسل	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
	فاصله از رودخانه	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
	فاصله از تالاب	مناطق با فاصله بیش‌تر از ۳۰۰۰ متر
توپوگرافی	شیب	مناطق با شیب کم‌تر از ۱۵ درصد
	ارتفاع	مناطق با ارتفاع ۵۰ تا ۲۰۰۰ متر

مآخذ: نگارندگان

بحث و یافته‌ها

پس از تعریف آستانه عددی هرکدام از زیرمعیارهای مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران، استانداردسازی معیارهای مذکور بر مبنای مناسب یا نامناسب بودن ارزش عددی هرکدام از لایه‌ها برای تهیه نقشه مکان‌یابی انجام گرفت. شکل ۳ نقشه‌های استاندارد شده هرکدام از این زیرمعیارها را بر طبق منطق Boolean (یا مناسب است و یا نامناسب) نشان می‌دهد. پس از مرحله استانداردسازی، همپوشانی لایه‌ها با استفاده از تابع منطقی OR انجام گرفت که نتیجه آن به‌عنوان نقشه نهایی مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی منطقه مطالعاتی در شکل ۴ ارائه شده است.

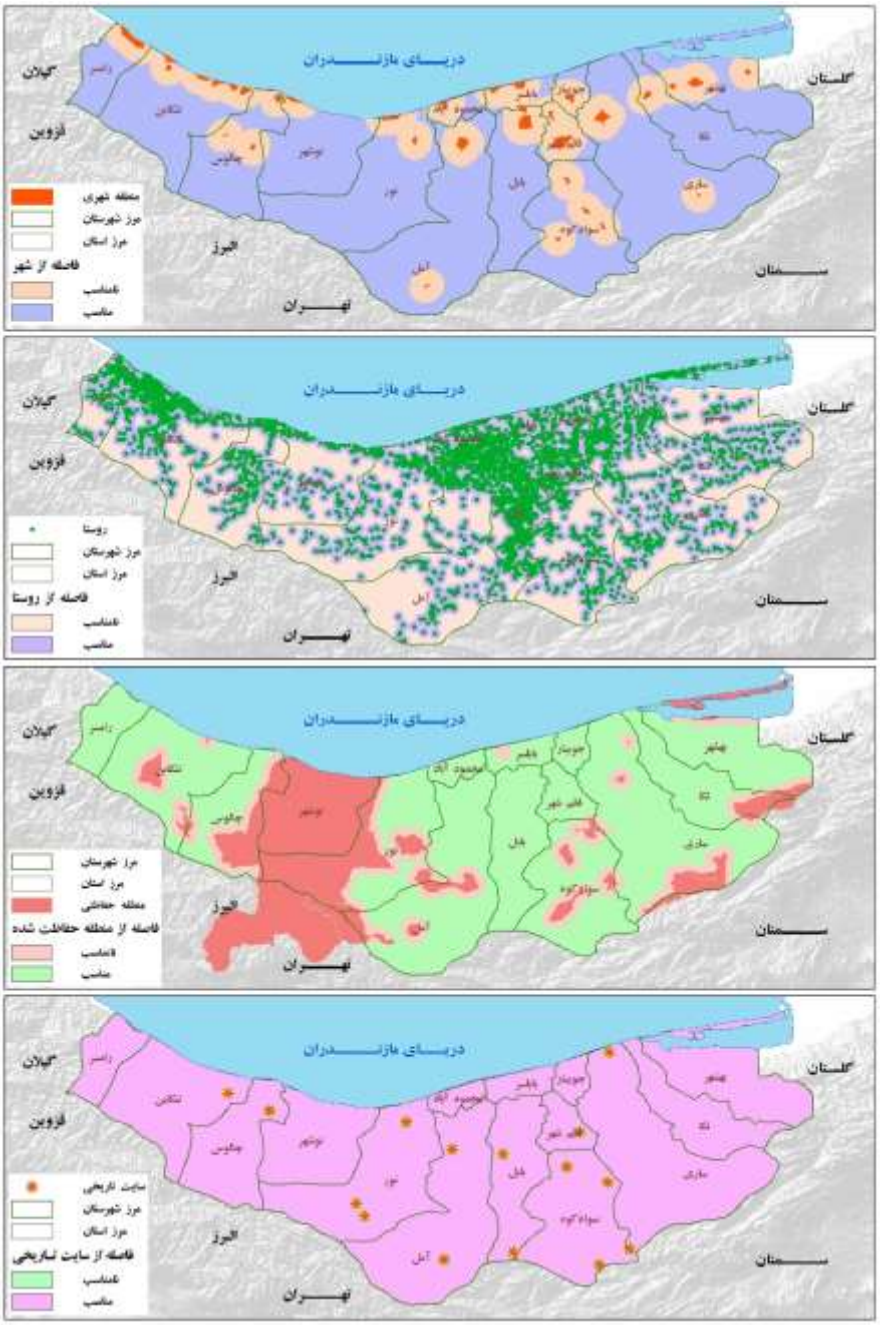


مآخذ: نگارندگان

شکل ۳ الف): نقشه استاندارد شده زیرمعیارهای محیطی – اجتماعی (فاصله از تالاب و دریاچه، فاصله از رودخانه و کاربری اراضی) مورد استفاده در مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران

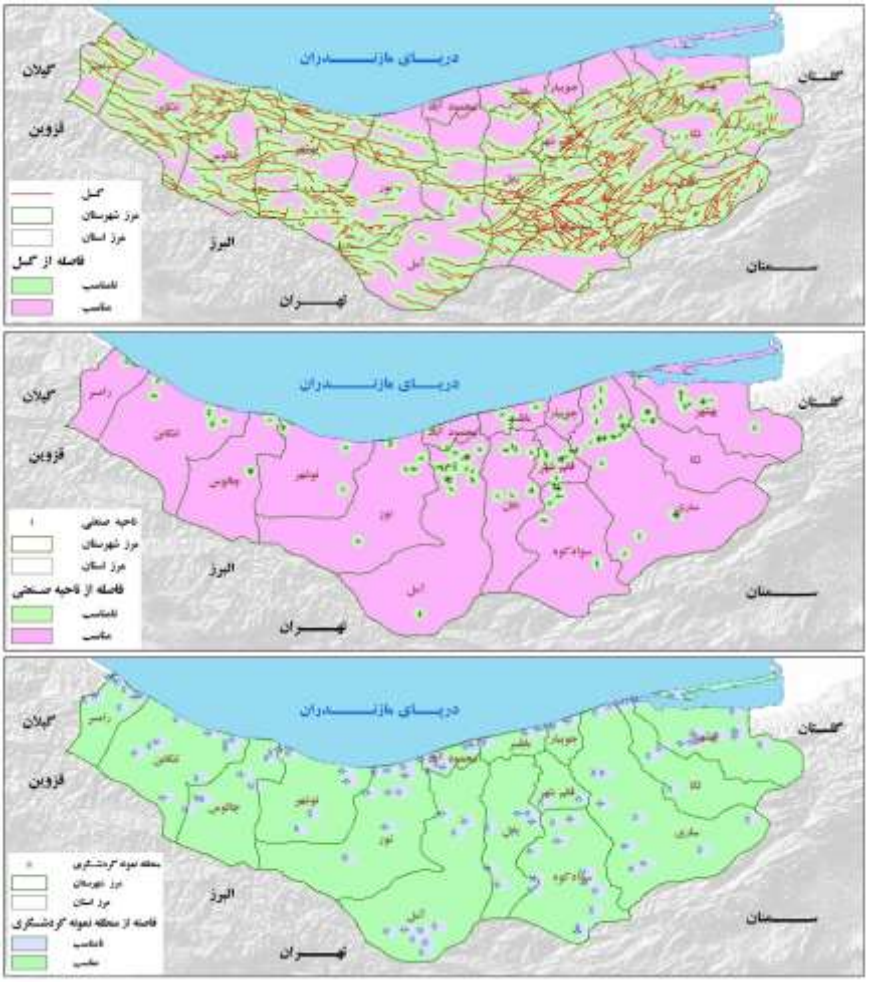
با توجه به نقشه نهایی، نوار مرکزی استان در محدوده شهرستان‌های نور، آمل و بابل، قسمت‌های شمالی شهرستان‌های نور و ساری، جنوب شهرستان‌های سوادکوه و قائم‌شهر و نیز قسمت مرکزی و جنوبی شهرستان بهشهر، پهنه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های استان مازندران به جهت استقرار یا ساخت نیروگاه‌های بادی هستند. این در حالی است که در گستره سرزمینی تمامی شهرستان‌های منتهی به ارتفاعات البرز (بخش‌های جنوبی)، اگرچه وضعیت معیار اقلیمی (سرعت 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 است، 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 مجموع، بخش شرقی استان مازندران، از شرایط مساعدتری نسبت به بخش غربی آن برای احداث نیروگاه‌های بادی برخوردار است.



مآخذ: نگارندگان

شکل ۳ ب): نقشه استاندارد شده زیرمعیارهای محیطی – اجتماعی (فاصله از شهر، فاصله از روستا، فاصله از منطقه حفاظتی و فاصله از سایت‌های تاریخی) در مکان‌یابی استقرار نیروگاه بادی مازندران

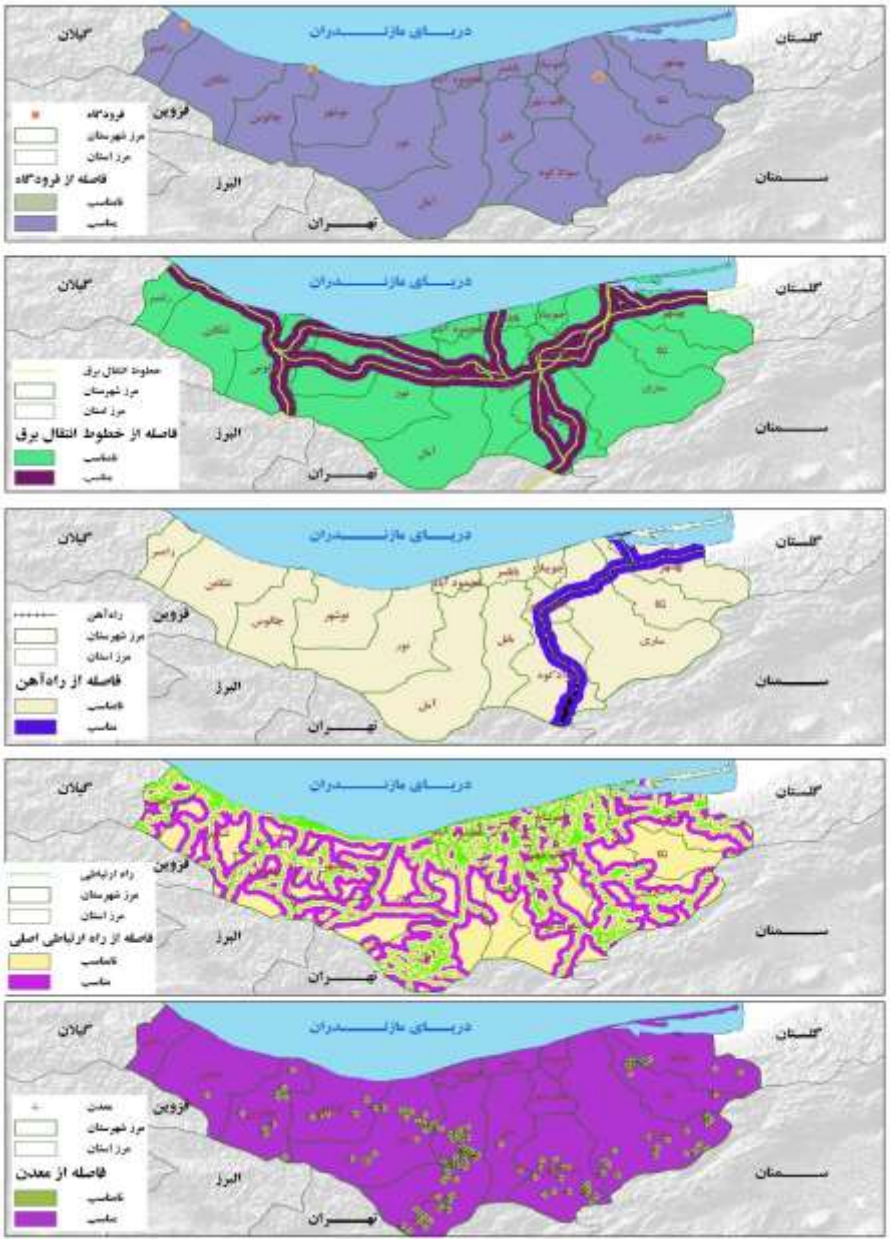


مآخذ: نگارندگان

شکل ۳ ج): نقشه استاندارد شده زیرمعیارهای محیطی – اجتماعی (فاصله از گسل، فاصله از ناحیه صنعتی و فاصله از منطقه نمونه گردشگری) مورد استفاده در مکان‌یابی استقرار نیروگاه بادی مازندران

مآخذ: نگارندگان

شکل ۳ د): نقشه استاندارد شده زیرمعیار اقلیمی (سرعت باد) در مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران

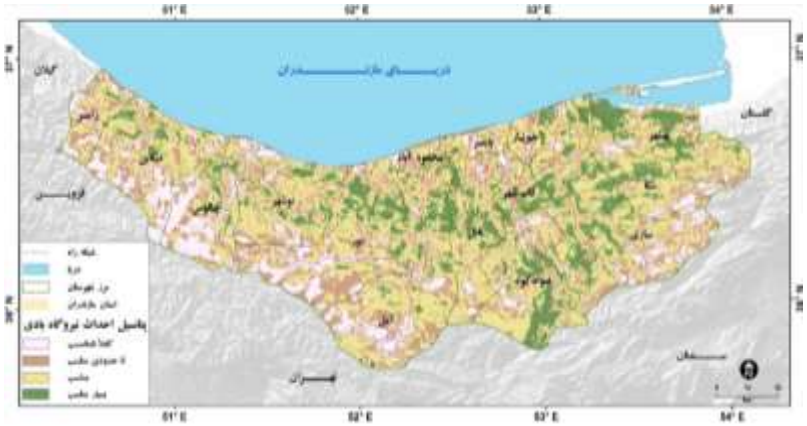


مآخذ: نگارندگان

شکل ۳ و): نقشه استاندارد شده زیرمعیارهای اقتصادی (فاصله از فرودگاه، نزدیکی به خطوط انتقال برق، فاصله از راه‌آهن، فاصله از راه و فاصله از معدن) در مکان‌یابی پهنه‌های استقرار نیروگاه‌های بادی استان مازندران

با توجه به نقشه نهایی، نوار مرکزی استان در محدوده شهرستان‌های نور، آمل و بابل، قسمت‌های شمالی شهرستان‌های نور و ساری، جنوب شهرستان‌های سوادکوه و قائم‌شهر و نیز قسمت مرکزی و جنوبی شهرستان بهشهر، پهنه‌های مناسب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های استان مازندران به جهت استقرار یا ساخت نیروگاه‌های بادی هستند. این در حالی است که در گستره سرزمینی تمامی شهرستان‌های منتهی به ارتفاعات البرز (بخش‌های جنوبی)، اگرچه وضعیت معیار اقلیمی (سرعت 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 مجموع، بخش شرقی استان مازندران، از شرایط مساعدتری نسبت به بخش غربی آن برای احداث نیروگاه‌های بادی برخوردار است.



مآخذ: نگارندگان

شکل ٤: نقشه نهایی مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در سطح استان مازندران با استفاده منطق Boolean

نتیجه‌گیری

از مجموع انرژی‌های یاد شده موسوم به انرژی‌های نو، به نظر 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 گردیده است. 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 تجدید پذیر، انرژی باد یکی از اقتصادی‌ترین انرژی‌های تجدید پذیر در تولید برق است که علاوه بر عدم آلودگی محیطزیستی و فراوان و دائمی بودن، کم‌ترین نوسانات قیمتی را نیز دارد.

استان مازندران نیز با آب‌وهوایی متنوع، وجود تنوع توپوگرافی و به‌تبع آن ایجاد مراکز فشار حرارتی محلی، سبب شده است که در برخی نقاط استان در طول سال، بادهایی با شدت‌های مختلف بوزد. با توجه به گسترش استفاده از انرژی باد جهت تولید برق، مکان‌یابی مناطق مستعد جهت تأسیس مزارع باد در مناطق شمالی و حفظ محیطزیست، امری ضروری به نظر می‌رسد. استان مازندران در سال‌های اخیر نیاز بیش‌تری به انرژی پیدا کرده است. لذا 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.

این پژوهش، باهدف قابلیت سنجی فضایی انرژی بادی در استان مازندران برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی انجام گرفته است. 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 به لحاظ آستانه‌های تعریف شده برای احداث نیروگاه بادی و 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 به نسبت مساعدتری می‌باشند. همسو با یافته این پژوهش، عزیزی و همکاران (۱۳۹۳)، آقاجانی و همکاران (۱۳۹۴) و تناکیان و همکاران (۱۳۹۷) نیز سرعت باد را مهم‌ترین معیار آب‌وهوایی در احداث نیروگاه‌های بادی معرفی کرده‌اند. در انتهای این بحث و بر مبنای یافته‌های این پژوهش، موارد زیر به‌عنوان پیشنهادهای پژوهشی و کاربردی/ اجرایی، ارائه می‌شود.

پیشنهادها

- محاسبه دوره بازگشت سرمایه استقرار نیروگاه بادی بر اساس قیمت خرید انرژی و راندمان توربین‌ها به‌منظور مقایسه تطبیقی استفاده از انرژی‌های پاک در مقابل استفاده از سوخت‌های فسیلی در تأمین انرژی؛
- آنالیز آلودگی‌های صوتی ناشی از حرکت پره توربین‌های بادی به جهت برآورد دقیق فاصله احداث نیروگاه از شبکه‌های انتقال نیرو، نواحی مسکونی و شبکه‌های ارتباطی؛
- ایجاد سیستم پشتیبان تصمیم گیر با شناسایی مناطق دارای اولویت بیش‌تر به‌منظور امکان توسعه پایدار منطقه، جلوگیری از هدر رفت هزینه‌ها و موفقیت اجرای طرح‌های توسعه‌ای و طرح‌های استفاده از انرژی‌های نوین در منطقه؛
- در اختیار گذاشتن یافته‌های این پژوهش و پژوهش‌های مشابه برای برنامه‌ریزان و سرمایه‌گذاران تا بتوانند بر اساس داده‌های مکانی، بهتر تصمیم‌گیری نمایند؛
- بررسی رابطه ارتفاع، شیب و فرسایش خاک منطقه مطالعاتی با هزینه‌های احداث نیروگاه‌های بادی به‌منظور تعیین بهترین توپوگرافی استقرار توربین‌ها در سطح استان؛
- تحلیل زیست‌محیطی مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در خصوص وجود پرندگان بومی و مهاجر، وجود مناطق حفاظت شده زیست‌محیطی، آلودگی صوتی و برهم خوردن زیست‌بوم‌ها؛
- تحلیل موانع محیطی (طبیعی و انسان‌ساخت) در مکان‌یابی مکان‌های احداث مزارع توربین‌های بادی در سطح استان؛
- تحلیل خوشه‌ای ایستگاه‌های سطح استان و منطقه بندی آن بر اساس ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی، محیطی – اجتماعی و اقتصادی به‌منظور برآورد و مقایسه هزینه‌های احداث نیروگاه بادی و تعیین مقرون به‌صرفه‌ترین مکان‌های بهره‌گیری از انرژی بادی.

منابع

۱- 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.

۲- اسدی، مهدی. خورشید دوست، علی‌محمد. (۱۳۹۸). مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان آذربایجان شرقی با استفاده از روش AHP، جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال بیست و سوم، شماره ۷۰، صص. ۱۰۱-۱۲۲.

۳- اسفندیاری، علی. رنگرزی، کاظم. صابری، عظیم. فتاحی مقدم، مهدی. (۱۳۹۰). پتانسیل سنجی احداث نیروگاه‌های خورشیدی با بررسی پارامترهای اقلیمی در استان خوزستان با استفاده از GIS، همایش ملی ژئوماتیک، تهران.

۴- آقاجانی، حسین. فتاحی مقدم، مهدی. اکبری، هدی. فتاحی، رضا. (۱۳۹۴). مکان‌یابی توربین‌های بادی مبتنی بر ارزیابی فضایی زیست‌محیطی (نمونه موردی: استان خراسان رضوی)، نشریه انرژی ایران، سال هجدهم، شماره ۱، صص. ۸۵-۱۰۰.

۵- انتظاری، علیرضا. امیر احمدی، 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.

۶- تناکیان، ساناز. پیری صحراگرد، حسین. امیری، میثم. (۱۳۹۷). مکان‌یابی مناطق برای ساخت نیروگاه‌های بادی به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت سیستان)، مهندسی اکوسیستم بیابان، سال هفتم، شماره ۱۹، صص. ۱-۱۶.

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

۸- 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.

۹- صادقی، زین‌العابدین. دلال‌باشی اصفهانی، زهرا. حری، حمیدرضا. (۱۳۹۲). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مکان‌یابی نیروگاه‌های انرژی‌های تجدید پذیر (انرژی خورشیدی و انرژی باد) استان کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاستگذاری انرژی، سال یکم، شماره ۲، صص. ۹۳-۱۱۰.

۱۰- 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.

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

۱۲- 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.

۱۳- نوراللهی، یونس. اشرف، سید محمدعلی. زمانی، محسن. (۱۳۹۰). پتانسیل سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه انرژی ایران، سال چهاردهم، شماره ۳۷، صص. ۲-۲۲.

۱۴- نوریان، فرشاد؛ شکوهی علی(۱۳۸۳). مکان‌یابی کاربری اراضی شهری با استفاده از دستگاه‌های اطلاعات جغرافیایی فازی (Fuzzy-GIS)، همایش ژئوماتیک، آبان ۱۳۸۳، تهران، صص۱۱.

15- 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.

16- Anthrax: General Information [Online] Http://Www.Windpowerworks. Net, Available 30.12.08.

17- Baban, S.M.J. And Parry, T. 2001. Developing And Applying A GIS-Assisted Approach To Locating Wind Arms In The UK. Renewable Energy, Vol. 24. Pp. 59-71.

18- Brower, M. 1992. Cool Energy, Revised Edition, Renewable Solution To Environment Problems. Cambridge. MA, The MIT Press, 200pp.

19- Caralis, G. Perivolaris, Y. Rados, K. And Zervos A. 2008. On The Effect Of Spatial Dispersion Of Wind Power Plants On The Wind Energy Capacity Credit In Greece. Environmental Research Letter, Vol. 3. Pp. 3-15.
20- 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.
21- Clarke A. 1991. Wind Energy Progress And Potential. Energy Policy, Vol. 19. Pp. 742-755.
22- Depeng, Y. Yongbing, L. Runguo, Z. And Xian, W. 2006. Regularities Of Wind-Erosion Of Different Land-Use Types In Yongding River Sandy Land, Beijing. Frontiers Of Forestry In China, Vol. 1. Pp. 208-213.
23- 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.
24- International Energy Agency. 2003. Renewables For Power Generation Status And Prospects. Paris, France: IEA, 194pp.
25- International Energy Agency. 2006. Renewable Energy: RD And D Priorities. Insight From IEA Technology Programs. Paris, France: IEA, 224pp.
26- 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.
27- 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.
28- Malczewski, J. 1999. GIS And Multicriteria Decision Analysis. John Wiley And Sons, New York, 408pp.
29- Malczewski, J. 2006. Ordered Weighted Averaging With Fuzzy Quantifiers: GIS-Based Multicriteria Evaluation For Land-Use Suitability Analysis. Applied Earth Observation And Geoinformation, Vol. 8. Pp. 270-277.
30- Morrison, M.L. And Sinclair, K. 2004. Wind Energy Technology, Environmental Impacts Of. Encyclopedia Of Energy, Vol. 6. Pp. 435-448.
31- 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.
32- Ramirez-Rosado, I.J. Garcia-Garrido, E. Fernandez-Jimeneza, A. Zorzano-Santamaria P.J, Monteiro, C. Miranda, V. 2008. Promotion Of New Wind Farms Based On A Decision Support System. Renewable Energy, Vol. 33. Pp. 558-566.
33- 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.
34- Rodriguez-Bachiller, A. And Glasson, J. 2004. Geographical Information Systems And Expert Systems For Impact Assessment Part I: GIS. CRC Press, 408 Pp.
35- 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).
36- Strantzali, E. And Aravosis, K. 2016. Decision Making In Renewable Energy Investments: A Review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, Vol. 55. Pp. 885-898.
37- Tester, J.W. Drake, E.M. Driscoll, M.J. Golay, M.W. And Peters, W.A. 2005. Sustainable Energy. Second Edition, Choosing Among Options, Cambridge, MA: The MIT Press, 1056pp.
38- Wrixon, G.T. Rooney, A.M.E. And Palz, W. 1993. Renewable Energy-2000. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 126pp.