نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی سال چهاردهم، شماره ۳۴، پاییز ۹۳

مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله مراتب فازی و تحلیل شبکه در استان اردبیل

دریافت مقاله:۹۲/۲/۴ پذیرش نهایی:۹۳/۱/۲
صفحات:۱۹۴-۱۷۴

علی عزیزی: دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی و مدیریت محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران[1]
Email: Aliazizi89@ut.ac.ir
حمیدرضا جعفری: استاد گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران
Email:hjafari@ut.ac.ir
بهرام ملک محمدی: استادیار گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیطزیست، دانشکده محیطزیست دانشگاه تهران
Email:Malekb@ut.ac.ir
فرامرز خوش‌اخلاق: استادیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
Email: fkhosh@ut.ac.ir

چکیده

انرژی باد یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد که استفاده از آن به دلیل عدم آلودگی محیطزیست و همچنین قیمت پایین توربین‌های بادی در مقایسه با دیگر انرژی‌های نو، در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است. در این راستا یافتن مکان بهینه برای استقرار تجهیزات و تأسیسات بهره‌برداری از پتانسیل‌های موجود و بالقوه ضروری است. پژوهش حاضر به مکان‌یابی محل مناسب جهت استقرار توربین‌های بادی در استان اردبیل با در نظر گرفتن معیارهای موثر در این راستا می-پردازد. به این صورت که از طریق تحلیل سلسله مراتب فازی و تحلیل شبکه، وزن هر معیار و زیر معیارهای آن محاسبه شد. نواحی دارای محدودیت برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی حذف و با استفاده از توابع تحلیلی در GIS، کل محدوده برای هر یک از معیارها پهنه‌بندی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که قسمت‌های شرقی شهرستان اردبیل در محدوده سیاسی شهر نمین می‌تواند به عنوان مکانی مناسب جهت بهره‌گیری از انرژی باد مورد توجه قرار گیرد. همچنین مقایسه نتایج دو مدل در

[1]. **نویسنده مسئول**: خیابان انقلاب، خیابان قدس، پلاک ۲۳، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، کدپستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

اوزان به دست آمده، طبقه‌بندی کلاس‌ها و صحت سنجی مدل در این تحقیق بیانگر این مطلب می‌باشد که روش FAHP نسبت به ANP نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

کلید واژگان: نیروگاه بادی، تحلیل سلسله‌مراتب فازی، تحلیل شبکه، سیستم اطلاعات جغرافیایی، استان اردبیل

مقدمه

انرژی یکی از مهم‌ترین موارد مورد تقاضا برای توسعه و پیشرفت فعالیت‌های انسانی است. انرژی باد یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد که استفاده از آن به دلیل عدم آلودگی محیط‌زیست و همچنین قیمت پایین توربین‌های بادی در مقایسه با دیگر انرژی‌های نو، در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است. به طوری که بیش‌ترین ظرفیت تولید الکتریسیته در انرژی‌های نو در اروپا در سال ۲۰۰۸ متعلق به انرژی بادی (۴۳ درصد) بوده است (WWEA, 2010: 10).

بررسی ۱۰ ساله وزش باد در ایستگاه‌های سینوپتیک کشور نشان دهنده وجود توان تولید برق بادی در بسیاری از نواحی کشور به ویژه در فصل تابستان است (گندم‌کار، ۱۳۸۸: ۸۷). تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان می‌دهد که تنها در ۲۶ منطقه از کشور میزان ظرفیت اسمی با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۳٪، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات می‌باشد ضمن آنکه با برنامه‌ریزی مناسب دستیابی به توان ۱۰ گیگاوات[1] نیز امکان‌پذیر می‌باشد، اما مجموع ظرفیت‌های نصب شده تاکنون کمتر از ۲ درصد میزان تخمین پتانسیل باد در سطح کشور است (علم الهدی، ۱۳۸۹: ۶۵). در نهایت باید به این نکته توجه نمود که با نصب یک مگاوات برق بادی در اروپا برای ۱۵ الی ۱۹ نفر شغل ایجاد می‌شود که این رقم در کشورهای در حال توسعه تا دو برابر می‌رسد (اسماعیل نیا و سجادیان، ۱۳۸۹: ۱۶۸). گام اول و اساسی برای توسعه‌ی انرژی‌های نوین، مطالعه‌ی دقیق پتانسیل‌های مربوطه می‌باشد (Dutra & Szklo, 2008:2509). در مرحله دوم یافتن مکان بهینه برای استقرار تجهیزات و تأسیسات بهره‌برداری از پتانسیل‌های موجود و بالقوه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

وجود فاکتورهای متعدد در مکان‌یابی محل نیروگاه‌های بادی، لزوم به‌کارگیری سیستمی که علاوه بر دقت بالا از نظر سرعت عمل و سهولت انجام عملیات در حد بالایی قرار داشته باشد را

[1] - GigaWatt

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

ضروری می‌سازد. امروزه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی[1] (GIS) در تلفیق با مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره[2] به طور گسترده قابلیت به‌کارگیری در برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی و مباحث مربوط به مکان‌یابی را دارا می‌باشند (مینائی، ۱۳۸۸: ۱۱).

در زمینه نیروگاه‌های بادی بنیو[3] و همکاران (۲۰۰۷) در کشور تایلند تحت حمایت سازمان‌های مربوطه و با تلفیق و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[4] و GIS با در نظر گرفتن معیارهای ارتفاع، پتانسیل باد، ناهمواری‌های سطح زمین، فاصله از روستا، نقاط زیستی، فرودگاه، مناظر طبیعی، بزرگراه‌ها، مناطق استراتژیک، رودخانه‌ها و کانال‌ها، مناطق مستعد برای نصب توربین‌های بزرگ را شناسایی کردند. آیدین[5] و همکاران (۲۰۱۰) از تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و منطق فازی و با استفاده از معیارهای پتانسیل باد، فاصله از شهرهای بزرگ، رودخانه، شهرک، فرودگاه، مناطق حفاظت شده و سکونتگاه پرنده‌ها و فاکتور آلودگی صوتی، مناطق مناسب برای نیروگاه‌های بادی به منظور بهره‌گیری در برنامه‌ریزی فضایی را تعیین نمودند. همچنین سلیز[6] و همکاران (۲۰۱۰) در لهستان اقدام به ارزیابی پراکنش پتانسیل باد با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و با در نظر گرفتن سه معیار اقتصادی، اکولوژیکی و فنی نمودند. ایشان با در نظر گرفتن عواملی چون ارتفاع، مناطق شهری، پهنه‌های آبی، مناطق جنگلی، مناطق حفاظت شده، شیب، راه‌های ارتباطی، شبکه انتقال نیرو مناطق، پهنه‌های مناسب برای سرمایه‌گذاری در زمینه احداث نیروگاه‌های بادی را مشخص نمودند.

صلاحی (۱۳۸۵) به یافتن بهترین مکان جهت ساخت نیروگاه بادی در استان اردبیل مبادرت نمود. ایشان با توجه به اینکه ایستگاه اردبیل بیش‌ترین فراوانی و سرعت باد را در استان داشته، پژوهش خود را معطوف به این ایستگاه نموده و تنها با لحاظ پارامتر باد مناطق مناسب در سطح شهرستان را برای این منظور معرفی نمودند. تقی لو (۱۳۹۰) جهت ارزیابی پتانسیل نیروی باد برای احداث توربین‌های بادی در استان زنجان از سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (روش شاخص همپوشانی، روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، روش تاپسیز[7]، تاپسیز- فازی[8]) استفاده نمود. با به‌کارگیری معیارهای

[1] - Geographical Information System (GIS)
[2] - Multi-Criteria Decision Making
[3] - Bennui
[4] - Analytical Hierarchy Process
[5] - Aydin
[6] - Sliz
[7] - Topsis
[8] - Topsis-Fuzzy

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

سرعت باد، کاربری اراضی، توپوگرافی، شیب زمین، آب‌وهوا، بارندگی، پوشش گیاهی، فاصله از شهر، فاصله از روستاها، دسترس به راه‌ها و خطوط ریل، فاصله از رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، فاصله از خطوط گسل و جنس زمین مناطق مناسب برای احداث نیروگاه‌های بادی را تعیین نمود. عبدی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهش خود به امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی در مراوه‌تپه استان گلستان از لحاظ فنی و اقتصادی پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد که در صورتی که روند مطالعات امکان‌سنجی قبل از احداث نیروگاه‌های بادی از طریق میکروسایتینگ[1] به صورت صحیح انجام پذیرد بیشتر مشکلات کنونی در رابطه با مرحله احداث نیروگاه بادی مرتفع می‌گردد.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، در زمینه پتانسیل سنجی باد جهت بهره‌برداری از آن در کشور، پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است، لیکن در زمینه مکان‌یابی نیروگاه بادی، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد توجه قرار نگرفته است. از بین این روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از روش‌هایی است که بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (زبردست، ۱۳۸۹: ۸۰)؛ اما وجود دو عامل در این مدل باعث شده تا برای برطرف سازی آن‌ها در این تحقیق از دو مدل توسعه یافته‌تر استفاده شود. وجود عدم قطعیت در فرایند مقایسه و تعیین اهمیت نسبی گزینه‌ها، اولین نقطه ضعفی است که این مدل از خود نشان می‌دهد. دومین ایرادی که مدل تحلیل سلسله مراتبی از خود نشان می‌دهد عدم برقراری ارتباط بین سلسله مراتب تصمیم‌گیری است. این امر نیز به مانند ایراد اولی نتایج این مدل را از حیث نزدیکی به دنیای واقعی دچار ضعف می‌سازد. همین امر را می‌توان دلیل ارائه مدل دیگر ساعتی با عنوان مدل تحلیل شبکه[2] عنوان نمود. این فرایند، نظریه جدیدی است که در آن ساختار شبکه‌ای، جانشین ساختار سلسله مراتبی شده است. این ویژگی سبب می‌شود که به صورت نظامند، وابستگی‌ها و بازخوردهای بین معیارها و زیر معیارها بررسی شوند (سعیدی و نجفی، ۱۳۸۹: ۳۱۲). فرض اصلی در AHP بر روی عملکرد مستقل گروه‌های بالایی سلسله مراتبی از همه‌ی قسمت‌های پایینی آن و از معیارهای هر سطح و طبقه بنا نهاده شده است (Chung et al, 2005: 22 & Dyson, 2004: 636). این فرض ممکن است در برخی موارد صادق نباشد و در چنین شرایطی نتیجه روش AHP ممکن است موجب برعکس شدن رتبه‌ها شود. به همین دلیل در سال‌های اخیر استفاده از ANP به جای AHP در اغلب زمینه‌ها افزایش پیدا کرده

[1] - Micrositing
[2]- Analytic Network Process (ANP)

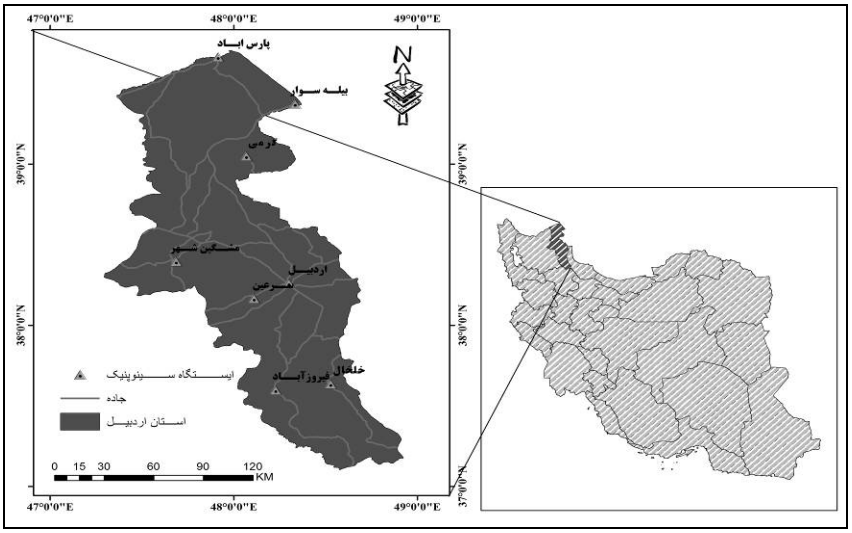
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

است (زبردست، ۱۳۸۹: ۷۹). در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن مهم‌ترین معیارهای تأثیرگذار و در دسترس، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و منطق فازی به تعیین مکان‌های مناسب جهت استقرار توربین‌های بادی در استان اردبیل پرداخته شد. از مدل تحلیل شبکه و سلسله مراتبی فازی[1] به دلیل مزیت‌های این مدل‌ها نسبت به مدل سلسله مراتبی استفاده شده و نتایج حاصل از مدل‌های به کار رفته باهم مقایسه و ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مورد مطالعه

استان اردبیل (شکل ۱) در شمال غربی فلات ایران با مساحتی بالغ بر ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع که تقریباً ۱/۰۹٪ از کل مساحت کشور را در برمی‌گیرد در مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳ دقیقه و ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. ناهمواری‌های استان اردبیل که حدود دو سوم نواحی کوهستانی آذربایجان را شامل می‌شود. از نقطه‌نظر تأثیرگذاری بر وزش بادهای محلی فوق‌العاده حائز اهمیت می‌باشند. ناهمواری‌ها با ایجاد اختلاف ارتفاع و به تبع آن اختلاف فشار هوا در فصول مختلف سال و به خصوص در فصل گرم سال، شرایط را برای وزش بادهای محلی فراهم می‌آورد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی استان اردبیل و ایستگاه‌های سینوپتیک در آن

[1]- Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

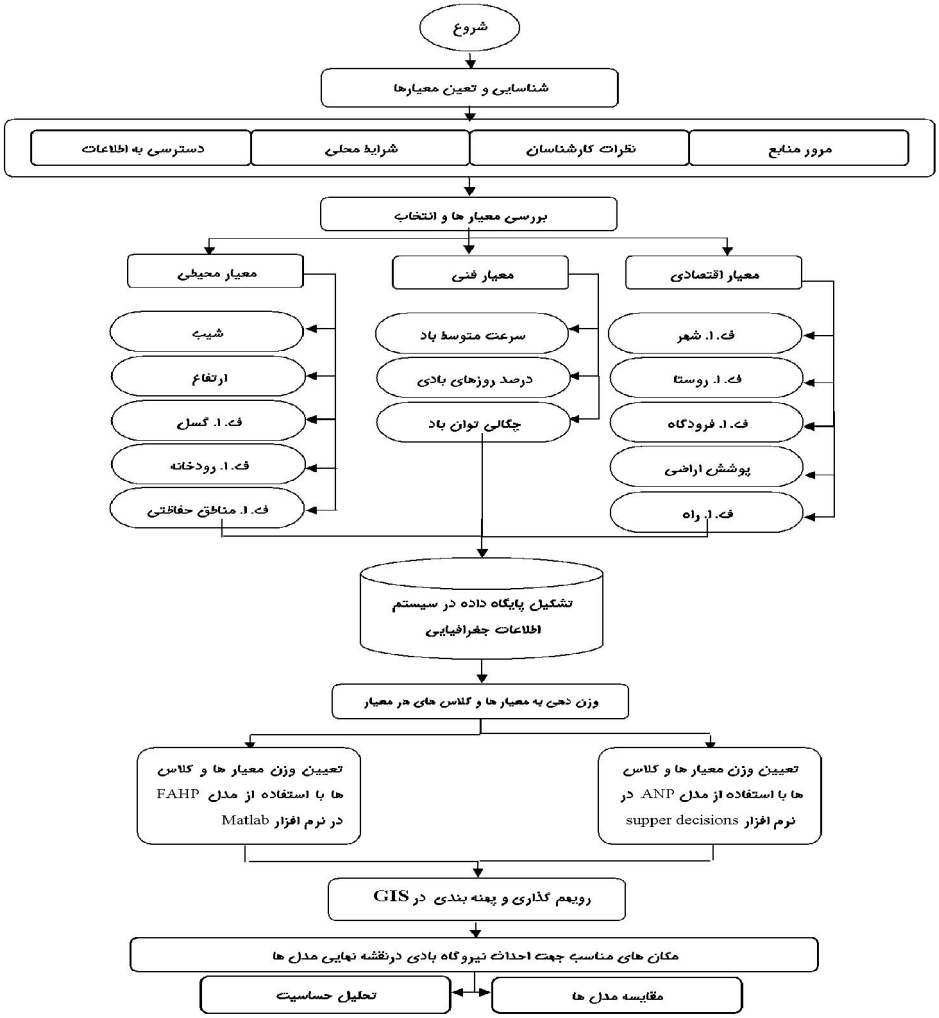
روش تحقیق

پردازش و تحلیل داده‌ها در این پژوهش با توجه به معیارهای سه‌گانه اقتصادی، فنی و محیطی صورت گرفته است. پس از آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی بر اساس روندنما (شکل ۲)، از روش FAHP و ANP برای تعیین وزن کلاس‌های هر لایه و وزن نهایی معیارها استفاده گردید. در روش‌های مذکور ابتدا با استفاده از نظر کارشناسان و متخصصین مقایسه زوجی هرکدام از معیارها و زیر معیارها مشخص شده و به نرم‌افزار MATLAB برای FAHP و Supper decisions برای ANP وارد گردید. سپس وزن هر یک از معیارهای سه‌گانه و زیر معیارهای آن از نرم‌افزارهای مذکور استخراج شد. در گام بعد وزن‌های به دست آمده از دو مدل مذکور در محیط GIS در هر یک از لایه‌ها ضرب شده و همراه با آن تلفیق لایه‌ها با استفاده از رویهم اندازی موزون صورت گرفت. سپس نقشه نهایی به صورت رستری حاصل گردید. نقشه نهایی در لایه محدودیت ضرب شده و مناطق دارای محدودیت از کل نقشه حذف گردید. در پایان نقشه نهایی حاصل از دو روش فوق نرمال شده و به ۵ کلاس از کاملاً نامناسب تا کاملاً مناسب تقسیم شد و مناطق مناسب برای استقرار تعیین گردید. در ادامه سایر جزئیات، ابزار و روش مورد استفاده معرفی می‌شوند.

معیارهای انتخابی برای تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی

در مکان‌یابی نیروگاه بادی معیارهای متعددی را می‌توان دخالت داد. معمولاً هر چقدر عوامل بیشتری در مدل دخالت کنند، خروجی دقیق‌تری خواهند داشت؛ اما با توجه به عدم دسترسی به کلیه اطلاعات دخیل در بحث مکان‌یابی این مراکز در ناحیه مورد مطالعه، سعی شده است که مؤثرترین و ضروری‌ترین عوامل فنی، اقتصادی و محیطی در نظر گرفته شوند. در این تحقیق از نظرات گروه کارشناسان خبره متشکل از برنامه‌ریزان شهری و روستایی، کارشناسان توسعه انرژی‌های نو، متخصصین حوزه محیط‌زیست و متخصصین GIS استفاده گردید. بر اساس نظرات گروه کارشناسان خبره، مطالعات کتابخانه‌ای، نتایج حاصل از پرسشنامه، منابع علمی در این زمینه و اطلاعات موجود و در دسترس، عوامل زیر (جدول ۱) به عنوان مهم‌ترین معیارهای تعیین پهنه‌های مناسب جهت استقرار نیروگاه‌های بادی انتخاب شدند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل (۲) فرآیند مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با تلفیق سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS

جدول (۱) معیارهای مورد استفاده در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی

معیارهای اقتصادی	معیارهای فنی	معیارهای محیطی
کاربری اراضی	سرعت متوسط باد	فاصله از مناطق چهارگانه
فاصله از شهر	چگالی توان باد	فاصله از گسل
فاصله از روستا	پیوستگی باد	ارتفاع
فاصله از فرودگاه	------	شیب
فاصله از شبکه راه‌های ارتباطی اصلی	------	فاصله از رودخانه‌های اصلی

مأخذ: نگارندگان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

روش پتانسیل‌یابی بادی

برای به دست آوردن متوسط سرعت باد از آمار خام سازمان هواشناسی کشور از رابطه شماره ۱ استفاده شد. پس از به دست آوردن متوسط سرعت باد از طریق درون‌یابی داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک استان (هشت ایستگاه)، لایه پتانسیل باد تهیه شد. به دلیل اینکه اندازه‌گیری سرعت باد در ایستگاه‌های سینوپتیک در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین انجام می‌شود برای نصب توربین‌های بادی بایستی فاکتورهای منتسب به باد را در ارتفاع هدف تخمین زد. در این پژوهش با توجه به اینکه توربین‌های ساخت داخل دارای ارتفاع متوسط ۴۰ متر بوده و یک نمونه از آن در استان و در شهر سرعین نصب شده است، ویژگی‌های باد در ارتفاع ۴۰ متری محاسبه و تخمین زده شد. برای تهیه سرعت باد در ارتفاع ۴۰ متری از رابطه ۲ استفاده شد.

رابطه ۱:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Fi \,.\, Vi$$

که در این رابطه $\bar{v}$ متوسط سرعت باد، n تعداد داده‌ها، Fi فراوانی سرعت باد و Vi مرکز طبقه می‌باشد.

رابطه ۲:

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{H}{H_r}\right)^a$$

که در این رابطه V سرعت باد در ارتفاع H (مورد نظر) و Vr سرعت باد در ارتفاع H_r (مبنا)، a ضریب زبری زمین می‌باشد برای به دست آوردن چگالی توان (انرژی) باد از تجزیه و تحلیل داده‌های خام سازمان هواشناسی بهره برده شد. پس از جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌های مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک استان چگالی توان باد با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید. این داده‌ها نیز به همراه داده‌های درصد روزهای باد با استفاده از GIS تبدیل به لایه رستری شدند.

رابطه ۳:

$$P = \frac{1}{2}\rho A \sum_{i=1}^{n} P(Vi) \,.\, Vi^3 \,/100$$

که در آن P چگالی توان باد، P(Vi) احتمال مرکز ، Vi^3 مکعب سرعت طبقه، ρ چگالی هوا، A واحد سطح می‌باشد.

فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

فرایند تحلیل شبکه یکی دیگر از فنون تصمیم‌گیری چند معیاره است که شباهت زیادی به روش AHP داشته و یا به عبارتی بهتر شکل گسترش یافته فرایند تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. برای پیاده‌سازی این مدل و دست‌یابی به اوزان معیارها از نرم‌افزارSupper decisions استفاده می‌شود. مراحل پیاده‌سازی این مدل را می‌توان در ۶ گام خلاصه نمود:۱- پایه‌ریزی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

مدل و ساختار مسئله، ۲- ماتریس مقایسات زوجی و برآورد وزن نسبی، ۳ - تشکیل سوپر ماتریس اولیه، ۴- تشکیل سوپر ماتریس وزنی (جدول ۲)، ۵- محاسبه بردار وزنی عمومی و ۶ - محاسبه وزن نهایی معیارها

جدول (۲) نمونه خروجی ماتریس موزون از نرم‌افزار Supper decisions

		معیارهای فنی					معیارهای فنی		
خوشه	معیار	ف.ا. فرودگاه	ف.ا. جاده	ف.ا. روستا	ف.ا. شهر	پوشش اراضی	پیوستگی باد	چگالی باد	سرعت باد
معیارهای فنی	ف.ا. فرودگاه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۸۳۶۶۹
	ف.ا. جاده	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۴۷۱	۰	۰	۰٫۰۵۰۵۴
	ف.ا. روستا	۰٫۰۶۲۳۲۲	۰	۰	۰	۰٫۰۳۳۵۵	۰٫۰۶۲۳۲۷	۰	۰٫۰۲۳۳۶۳
	ف.ا. شهر	۰٫۱۸۶۹۸۵	۰	۰	۰	۰٫۱۰۷۳۶	۰٫۱۲۴۶۵۳	۰	۰٫۰۵۹۸۱
	پوشش اراضی	۰	۱	۰٫۲۹۵۷	۰٫۲۴۹۳۱	۰٫۰۶۱۲۹۷	۰٫۰۶۲۳۲۷	۰٫۲۴۹۳۱	۰٫۰۳۱۹۲
معیارهای فنی	پیوستگی باد	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۹۳۲۳	۰	۰	۰٫۰۹۷۰۱۶
	چگالی باد	۰٫۱۴۸۴	۰	۰٫۲۳۴۷	۰٫۱۹۷۸۸	۰٫۱۴۷۹۹	۰٫۱۴۸۴	۰	۰٫۱۷۶۲۹
	سرعت باد	۰٫۴۴۵۲۴	۰	۰٫۴۶۹۵	۰٫۳۹۵۷۶۳	۰٫۳۵۲۴۱	۰٫۴۴۵۲۴۵	۰٫۵۹۳۶۴۵	۰٫۳۲۰۳۴

فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

مفهوم فازی بودن در روش AHP، به صورت غیرمستقیم و بدون استفاده از مجموعه‌های فازی مورد توجه قرار گرفته است. در واقع در این روش با استفاده از عبارت‌های زبانی، مفهوم فازی بودن در تعیین ماتریس‌های مقایسه زوجی دخالت داده می‌شود (مطیعی لنگرودی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۳۳). در میان روش‌هایی که مفهوم فازی را در مدل تحلیل سلسله مراتبی اعمال نموده‌اند می‌توان به روش ارائه شده توسط باکلی اشاره نمود. روش AHP فازی ارائه شده توسط باکلی[1]، شکل تعمیم یافته‌ای از روش AHP کلاسیک می‌باشد. در این روش برای مقایسه زوجی گزینه‌ها از اعداد فازی و برای به دست آوردن وزن‌ها و ارجحیت‌ها از روش

[1] - Buckley

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

میانگین‌گیری هندسی استفاده می‌گردد. چرا که این روش به سادگی به حالت فازی قابل تعمیم می‌باشد؛ و همچنین جواب یگانه‌ای برای ماتریس مقایسات زوجی تعیین می‌نماید. در این روش شخص تصمیم‌گیرنده می‌تواند مقایسات زوجی المان‌های هر سطح را در قالب اعداد فازی ذوزنقه‌ای بیان نماید (عطایی، ۱۳۸۹: ۱۰۳). الگوریتم روش باکلی را می‌توان در قالب چهار گام زیر بیان نمود.

گام اول- در این گام ماتریس‌های مقایسات زوجی توسط شخص تصمیم گیرنده مشخص می‌گردد. المان‌های این ماتریس‌ها، اعداد فازی ذوزنقه‌ای خواهند بود. چنانچه ارجحیت المان i ام بر المان j ام را با $\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, b_{ij}, d_{ij})$ نشان دهیم، آنگاه ارجحیت المان j ام بر المان i ام به صورت زیر خواهد بود.

رابطه-۳

$$\tilde{a}_{ji} = \left(\frac{1}{d_{ij}}, \frac{1}{c_{ij}}, \frac{1}{b_{ij}}, \frac{1}{a_{ij}}\right)$$

در صورتی که $i = j$ باشد، $\tilde{a}_{ij} = \tilde{a}_{ji} = (1,1,1,1)$ خواهد بود.

گام دوم- در این گام، وزن‌های فازی $(\widetilde{W}_i)$ محاسبه می‌گردد. برای این کار ابتدا میانگین هندسی هر سطر از ماتریس‌های مقایسات زوجی با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

رابطه-۴

$$\tilde{Z}_i = (\tilde{a}_{i1} \,.\, \tilde{a}_{i1} \,.\,.\,.\,.\, \tilde{a}_{in})^{1/n}$$

سپس وزن فازی، $\widetilde{W}_i$ از رابطه زیر به دست می‌آید.

رابطه-۵

$$\widetilde{W}_i = \tilde{Z}_i \,.\, (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \ldots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$$

عملگرهای ضرب و جمع در روابط فوق، عملگرهای فازی می‌باشند. در ادامه به جزئیات نحوه محاسبه $\widetilde{W}_i$ ها اشاره می‌شود. فرض کنید مرز (کران) چپ و راست مجموعه فازی $\tilde{a}_{ij}$ به ترتیب به صورت روابط زیر تعریف گردد.

رابطه-۶

$$f_i(a) = \left[\prod_{j=1}^{n} \left((b_{ij} - a_{ij})a + a_{ij}\right)\right]^{\frac{1}{n}} \quad , \quad a \in [0,1]$$

رابطه-۷

$$g_i(a) = \left[\prod_{j=1}^{n} \left((c_{ij} - d_{ij})a + b_{ij}\right)\right]^{1/n} \quad , \quad a \in [0,1]$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

همچنین رابطه-۸ $\bar{a}_i = \left[\prod_{j=1}^{n} \bar{a}_{ij}\right]^{1/n}$ و رابطه-۹ $a = \sum_{i=1}^{m} a_i$ به صورت مشابه bi و b، ci و c و di و d را نیز می‌توانیم تعریف نماییم. بدین ترتیب وزن فازی، $\widetilde{W}_i$ از رابطه زیر به دست می‌آید.

رابطه-۱۰

$$\widetilde{W}_i = \left(\frac{a_i}{d}, \frac{b_i}{c}, \frac{c_i}{b}, \frac{d_i}{a}\right)$$

به طوری که تابع عضویت $\mu_{\widetilde{W}_i}(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

رابطه-۱۱

$$\mu_{\widetilde{W}_i}(X) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \le (a_i / d) \text{ or } x \ge (d_i / a) \\ 1 & \text{if } (b_i / c) \le x \le (c_i / b) \\ a \in [0,1] & \text{if } (a_i / d) \le x \le (d_i / c) \\ a \in [0,1] & \text{if } (c_i / b) \le x \le (d_i / a) \end{cases}$$

زمانی که $(a_i / d) \le x \le (b_i / c)$ باشد، x از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

رابطه-۱۲

$$x = f_i(a) / g(a)$$

همچنین زمانی که $(c_i / b) \le x \le (d_i / a)$ باشد، x از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

رابطه-۱۳

$$x = g_i(a) / f(a)$$

به طوری که

رابطه-۱۴

$$f(a) = \sum_{i=1}^{m} f_i(a)$$

رابطه-۱۵

$$g(a) = \sum_{i=1}^{m} g_i(a)$$

به طریق مشابه، گام دوم برای تمام مقادیر i و j تکرار و تمام ارجحیت‌های فازی، rij ها محاسبه می‌شود.

گام سوم- در این گام با ترکیب ارجحیت‌ها و وزن‌های به دست آمده در گام قبل، مقادیر مطلوبیت فازی، $\widetilde{U}_i$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

رابطه-۱۶

$$\widetilde{U}_i = \sum_{j=1}^{n} \widetilde{W}_j \, \tilde{r}_{ij}$$

به طوری که برای عملگرهای ضرب و جمع فازی در رابطه فوق از روابطی که قبلاً در این بخش تعریف کردیم، استفاده می‌کنیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

گام چهارم- عملیات دیفازی سازی اوزان فازی: در این پژوهش از روش مرکز سطح برای عملیات فازی زدایی استفاده گردید. در این روش که رایج‌ترین روش کمیت فازی به کمیت کلاسیک می‌باشد از رابطه زیر برای محاسبه Z^* استفاده می‌شود.

رابطه-۱۷

$$z^* = \frac{\int \mu_{\tilde{c}}(z).z\,dz}{\int \mu_{\tilde{c}}(z)\,dz}$$

که در آن $\int$ علامت انتگرال است

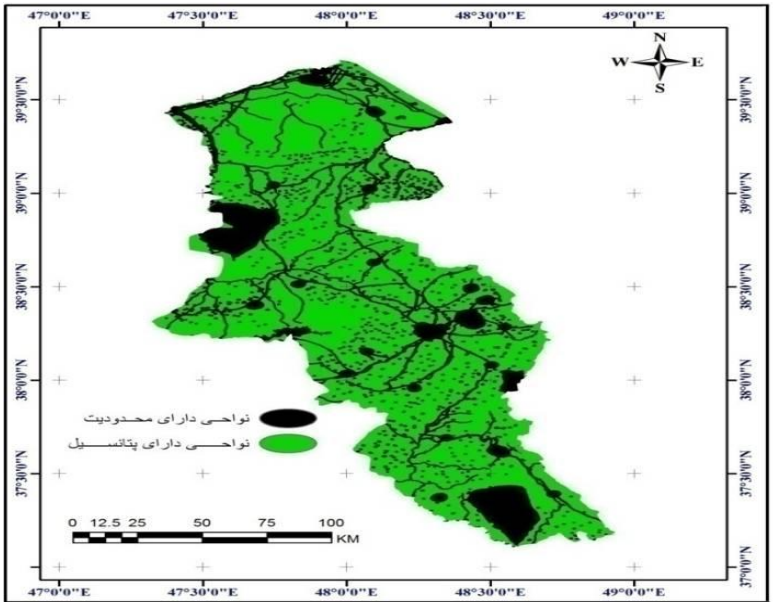
مباحث و یافته‌ها

در راستای دستیابی به هدف مورد نظر، بعد از تهیه لایه‌های اطلاعاتی اقدام به شناسایی نواحی دارای محدودیت شد. نواحی دارای محدودیت به نواحی گفته می‌شود که به دلایلی ازجمله ویژگی فیزیکی و یا بر اثر یک سری قوانین و معیارها برای اجرای پروژه و فعالیت مورد نظر مناسب نبوده و یا دارای منع قانونی است. برای تولید نقشه محدودیت معمولاً از منطق بولین استفاده می‌شود. بدین صورت که به پیکسل‌های تشکیل دهنده نواحی دارای محدودیت ارزش صفر (۰) و سایر پیکسل‌های نقشه منطقه مورد مطالعه ارزش عددی یک (۱) داده می‌شود. در نهایت نقشه‌ای تولید می‌شود که دارای ارزش صفر و یک خواهد بود. این نقشه در خروجی نهایی ضرب شده و مناطق دارای محدودیت از خروجی نهایی کسر می‌شود. در پژوهش حاضر بعد از بررسی و آنالیز منطقه و مطالعه منابع و استانداردها، لایه‌های مندرج در جدول ۳ به عنوان مناطق دارای محدودیت در نظر گرفته شده و در انتها از نقشه خروجی حذف گردیدند(شکل ۳).

جدول (۳) حدود معیار جهت حذف مناطق دارای محدودیت

لایه نقشه	حدود داری محدودیت برای مکان‌یابی
خطوط ارتباطی اصلی	مناطق با فاصله کمتر از ۵۰۰ متر
رودخانه‌ها	مناطق با فاصله کمتر از ۴۰۰ متر
مناطق چهارگانه	محدوده تحت مدیریت سازمان حفاظت محیطزیست
لایه فاصله از شهر	مناطق با فاصله کمتر از ۲۰۰۰ متر
لایه فاصله از روستا	مناطق با فاصله کمتر از ۵۰۰ متر
لایه فاصله از فرودگاه	مناطق با فاصله کمتر از ۳۰۰۰ متر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل (۳) نواحی دارای محدودیت مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل مأخذ: نگارندگان

در ادامه فرایند با اعمال روش ارائه شده در بخش قبل بر روی مجموعه اطلاعات گردآوری شده برای استان اردبیل و تشکیل لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز، اطلاعات ورودی و خروجی به دو مدل ANP و FAHP مورد پردازش قرار گرفت. جدول‌های ۴ و ۵، به ترتیب اوزان نهایی مستخرج از مدل تحلیل شبکه و تحلیل سلسله مراتبی فازی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل فراوانی جداول وزن کلاس‌های هر معیار از نمایش جداول مقایسه زوجی همه این معیارها خودداری به عمل آمده و تنها اوزان نهایی نمایش داده شد.

جدول (۴) اوزان نهایی معیارها خروجی نرم‌افزار Supper decisions

معیار	وزن نهایی	معیار	وزن نهایی
سرعت باد	۰/۳۷۵۴۳۰	ف. ا.روستا	۰/۰۲۶۷۹۵
چگالی باد	۰/۱۳۵۲۷۶	ف. ا.فرودگاه	۰/۰۳۱۴۰۴
پیوستگی باد	۰/۰۵۹۲۷۲	ارتفاع	۰/۰۳۷۵۵۳
ف. ا.گسل	۰	شیب	۰/۰۸۸۱۱۸
ف. ا.رودخانه	۰/۰۰۵۷۶۰	پوشش اراضی	۰/۱۵۴۹۴۷
ف. ا.شهر	۰/۰۴۹۹۹۷	ف. ا.جاده	۰/۰۲۴۶۱۰
ف. ا.مناطق حفاظت‌شده	۰/۰۱۰۸۳۴		

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

با دستیابی به اوزان کلاس‌های هر لایه، این اوزان در لایه‌ها ضرب و سپس این لایه‌ها پهنه-بندی شدند. همچنین با حصول وزن هر معیار (لایه‌ها) با استفاده از رویهم اندازی موزون این لایه‌ها، نقشه نهایی حاصل شد. نقشه حاصل از روش‌های مورد استفاده مطابق با شکل شماره ۷ به پنج طبقه از کاملاً مناسب تا نامناسب طبقه‌بندی شد. از مجموع کل مساحت استان اردبیل در مدل FAHP، حدود ۱۵۰۰ کیلومترمربع (۸,۳۶ درصد) و در مدلANP حدود ۱۱۹۹ کیلومترمربع (۶,۶۸ درصد) کاملاً مناسب جهت استقرار توربین‌های بادی تعیین گردید. در جدول (۶) مساحت پنج کلاس حاصل از دو مدل برحسب کیلومترمربع و درصد نشان داده شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در هر دو روش مناطق کاملاً مستعد به طور عمده در شرقی‌ترین نقطه شهرستان اردبیل و به طور عمده منطبق با محدوده سیاسی شهر نمین می‌باشند که در وهله اول این پهنه‌ها دارای پتانسیل باد قابل‌توجه بوده و در نواحی با شیب نسبتاً مناسب قرار دارند. همچنین این مناطق در اراضی دیم و مرتعی واقع شدند که این امر نه تنها از هزینه خرید زمین می‌کاهد بلکه باعث دوری این مراکز از زمین‌های حاصلخیز و حفظ این زمین‌ها می‌شود. همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل‌ها نیز بیانگر این مطلب است که بخش قابل توجهی از پهنه‌های کاملاً مناسب و مناسب، منطبق بر کلاس‌های کاملاً مناسب هر یک از پارامترهای ورودی در دو مدل بوده است و این امر رضایت‌بخش بودن نتایج مدل‌های مورد استفاده را در مطالعات مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی نشان می‌دهد. شکل شماره ۴ نتایج حاصل از مقایسه کلاس کاملاً مناسب خروجی دو مدل با کلاس کاملاً مناسب لایه‌های ورودی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل سرعت باد دارای بیش‌ترین انطباق (۹۵ درصد) و ارتفاع (صفر درصد) دارای کمترین انطباق می‌باشد. شکل ۵ نیز اولویت‌بندی بخش‌های مختلف منطقه مطالعاتی را از نظر تناسب برای استقرار توربین‌های بادی نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

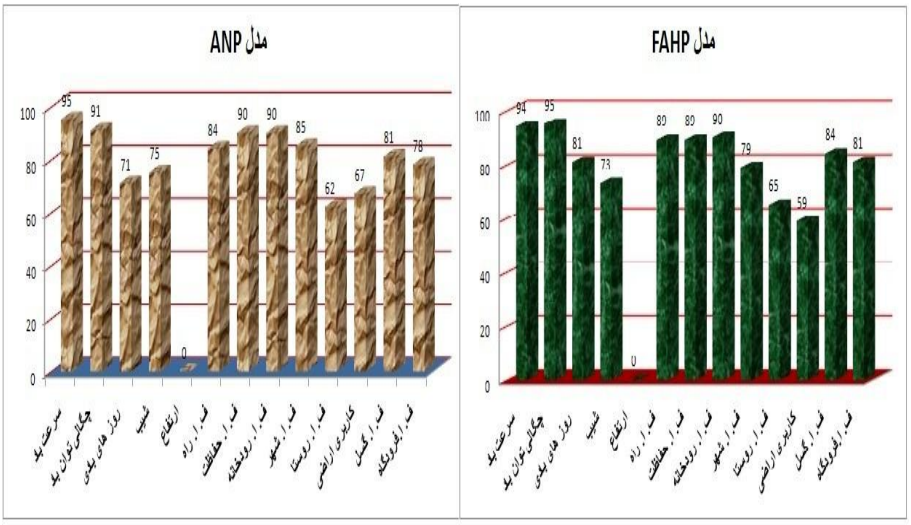
جدول (۵) اعداد فازی ذوزنقه‌ای مستخرج از نظرات کارشناسان به همراه وزن‌های نهایی معیارها در مدل FAHP

معیار	ف. ا.جاده	پوشش اراضی	شیب	ارتفاع	ف.ا.مناطق حفاظت‌شده	ف. فرودگاه	ف. ا. روستا	ف. ا.شهر	ف. ا. رودخانه	ف. ا. گسل	پیوستگی باد	نیروی باد	سرعت باد	وزن نهایی
سرعت باد	(۱/۱،۷/۱،۶/۱،۵/۴)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۴/۳)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۴/۳)	(۱/۱،۷/۱،۶/۱،۵/۴)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۴/۴)	(۱/۱،۷/۱،۶/۱،۵/۴)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۳/۳)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۳/۳)	(۱/۱،۷/۱،۶/۱،۵/۴)	(۱/۱،۴/۱،۴/۱،۳/۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۳/۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	۰،۰۳۴۴
نیروی باد	(۱/۱،۷/۱،۶/۱،۵/۴)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۴/۳)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۴/۳)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۵/۴)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۴/۳)	(۱/۱،۳/۱،۱/۱،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۴/۱،۴/۱،۳/۲)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۵/۴)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۴/۳)	(۴،۳،۲،۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۵، ۴، ۳، ۲)	۰،۰۳۵۹
پیوستگی باد	(۱/۱،۷/۱،۶/۱،۵/۴)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۴/۳)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۴/۳)	(۱/۱،۷/۱،۶/۱،۵/۴)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۴/۳)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۱/۱،۴/۱،۴/۱،۳/۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۵/۴،۱/۱،۳/۳)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۳/۳)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۲)	(۴، ۳، ۳، ۲)	۰،۰۵۴۹
ف. ا. گسل	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۳/۱،۱/۱،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۳/۱،۱/۱،۲)	(۵،۴،۳،۳)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۴،۳،۲،۲)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۵،۴،۳،۳)	(۶،۵،۴،۳)	(۴، ۴، ۳، ۲)	۰،۰۹۱۷
ف. ا. رودخانه	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۱/۱،۳/۱،۱،۲)	(۴،۳،۲،۲)	(۱/۱،۴/۱،۴/۱،۳/۲)	(۱/۱،۳/۱،۲/۲،۱)	(۴،۳،۲،۲)	(۱/۱،۳/۱،۱،۲)	(۴،۳،۲،۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۳،۲،۲،۱)	(۵،۴،۳،۳)	(۶،۵،۵،۴)	(۷،۶،۵،۴)	۰،۰۲۷۳
ف. ا.شهر	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۳/۳)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۴/۳)	(۱/۱،۶/۱،۵/۱،۴/۳)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۴،۳،۲،۱)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۲)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۴،۳،۲،۲)	(۶،۵،۴،۳)	(۷،۶،۵،۴)	۰،۰۱۹۹
ف. ا. روستا	(۴،۳،۲،۱)	(۴،۳،۲،۲)	(۴،۳،۲،۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۴،۳،۲،۱)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۳،۲،۲،۱)	(۳،۲،۱،۱)	(۳،۲،۲،۱)	(۴،۴،۳،۲)	(۴،۳،۳،۲)	(۵،۴،۳،۳)	۰،۰۲۷۳
ف. فرودگاه	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۳/۳)	(۱/۱،۳/۱،۱،۲)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۳/۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۲)	(۱/۱،۵/۱،۴/۱،۳/۳)	(۳،۲،۲،۱)	(۳،۲،۱،۱)	(۴،۷،۶،۵)	۰،۰۳۵۵
ف.ا.مناطق حفاظت‌شده	(۴،۳،۲،۱)	(۴،۳،۲،۱)	(۴،۳،۲،۲)	(۱/۱،۳/۱،۲/۱،۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۳،۳،۲،۴)	(۳،۲،۲،۱)	(۴،۴،۳،۲)	(۳،۲،۲،۱)	(۳،۲،۱،۱)	(۵،۴،۴،۳)	(۶،۵،۴،۳)	(۶،۵،۴،۴)	۰،۰۸۶۰
ارتفاع	(۴،۳،۲،۱)	(۴،۳،۲،۲)	(۴،۳،۲،۲)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۳،۲،۲،۱)	(۴،۴،۳،۲)	(۴،۳،۳،۲)	(۶،۵،۴،۳)	(۴،۴،۳،۲)	(۴،۳،۳،۲)	(۷،۶،۵،۴)	(۶،۵،۵،۴)	(۷،۶،۵،۴)	۰،۰۴۰۹
شیب	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۱)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۱)	(۳،۲،۲،۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۵،۴،۴،۳)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۱)	(۳،۲،۱،۱)	(۵،۴،۴،۳)	(۵،۴،۴،۳)	(۶،۵،۴،۳)	۰،۰۵۸۲
پوشش اراضی	(۴،۳،۲،۱)	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۴،۳،۳،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۳،۲،۱،۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲/۲)	(۴،۳،۳،۲)	(۳،۲،۱،۱)	(۴،۳،۳،۲)	(۶،۵،۴،۳)	(۵،۴،۴،۳)	(۶،۵،۴،۳)	۰،۰۵۹۹
ف. ا.جاده	(۱، ۱، ۱، ۱)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۴،۳،۳،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۵،۴،۳،۳)	(۱/۱،۴/۱،۳/۱،۲)	(۵،۴،۳،۳)	(۳،۲،۲،۱)	(۴،۳،۳،۲)	(۷،۶،۵،۴)	(۶،۵،۵،۴)	(۷،۶،۵،۴)	۰،۰۲۲۰۹
وزن نهایی	۰،۰۳۴۴	۰،۰۳۵۹	۰،۰۵۴۹	۰،۰۱۹۹	۰،۰۲۷۳	۰،۰۹۱۷	۰،۰۳۵۵	۰،۰۸۶۰	۰،۰۴۰۹	۰،۰۵۸۲	۰،۱۵۹۹	۰،۱۳۸۷	۰،۲۲۰۹

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

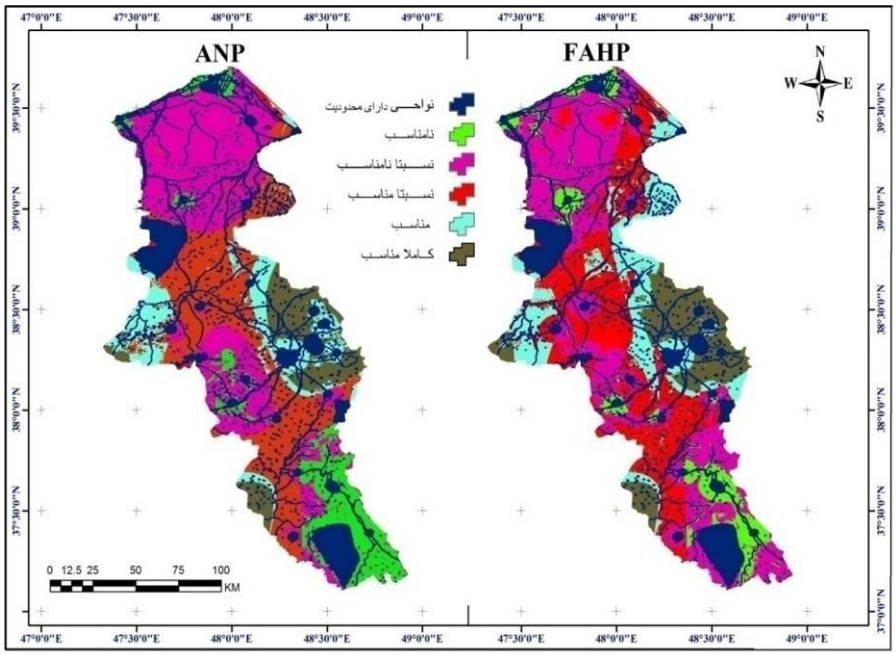
جدول (۶) مساحت کلاس‌های پنج‌گانه در دو مدل

مدل	ANP		FAHP	
کلاس‌ها	مساحت (کیلومترمربع)	مساحت (درصد)	مساحت (کیلومترمربع)	مساحت (درصد)
لایه محدودیت	۵۰۸۹	۲۸,۳۵	۵۰۸۹	۲۸,۳۵
نامناسب	۱۶۲۵	۹,۰۵	۱۰۷۵	۵,۹۹
نسبتاً نامناسب	۴۶۴۳	۲۵,۸۶	۴۳۷۱	۲۴,۳۵
نسبتاً مناسب	۳۹۰۱	۲۱,۷۳	۳۹۲۳	۲۱,۸۵
مناسب	۱۴۹۶	۸,۳۳	۱۹۹۵	۱۱,۱۱
کاملاً مناسب	۱۱۹۹	۶,۶۸	۱۵۰۰	۸,۳۶
جمع	۱۷۹۵۳	۱۰۰	۱۷۹۵۳	۱۰۰



شکل (۴) صحت‌سنجی نتایج خروجی از دو مدل بر اساس انطباق با اطلاعات لایه‌های ورودی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل (۵) نقشه اولویت‌بندی اراضی استان اردبیل از نظر تناسب برای استقرار توربین‌های بادی

نتیجه‌گیری

همزمان با کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های ناشی از مصرف آن، در طول چند دهه اخیر استفاده از انرژی‌های نو به علت وفور در طبیعت و عدم ایجاد آلودگی مورد توجه قرار گرفته است. انرژی باد به دلیل فراوانی، اقتصادی بودن و قابلیت بهره‌برداری آسان در میان انرژی‌های نو از اقبال زیادی برخوردار هست. در این میان شناخت مکان‌های مناسب برای بهره‌برداری از این انرژی پاک مسئله‌ای است که نیاز به در نظر گرفتن عوامل بسیاری داشته که تجزیه و تحلیل را مشکل می‌سازد. از آنجا که انتخاب عرصه‌های مناسب برای شناخت مکان‌های مناسب برای بهره‌برداری از این انرژی پاک مستلزم در نظر گرفتن عوامل متعددی می‌باشد و با توجه به گستردگی و پیچیدگی پارامترهای موثر در مکان‌یابی، ضرورت استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تلفیق آن با سایر ابزار مدیریتی و برنامه‌ریزی مطرح می‌گردد. همچنین با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی که بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و اغلب با خطا همراه می‌باشند، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با یک رویکرد تلفیقی، می‌تواند نقش مهمی را در فرآیند مکان‌یابی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

این مناطق و تسریع در روند برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مناسب از این انرژی پاک در کشور ایفا نمایند. برای تحقق این اهداف، در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌های FAHP و ANP در کنار سیستم اطلاعات جغرافیایی به شناسایی نواحی مستعد برای استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل اقدام گردید و نتایج دو مدل مذکور در دو نقشه جداگانه ارائه شد.

پهنه‌بندی نهایی نقشه حاصل از مدل‌های مورد استفاده به پنج کلاس شامل کاملاً مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، نسبتاً نامناسب و نامناسب طبقه‌بندی شد. مقایسه مدل‌های مذکور با توجه به نقشه نهایی (شکل شماره ۵)، نتایج صحت سنجی (شکل ۴) و اوزان به دست آمده نسبت به هم در راستای نتایج این پژوهش بیانگر این مطلب می‌باشد که هرچند مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی نسبت به مدل شبکه از دقت و حساسیت بیشتری در رتبه‌بندی کلاس‌ها از خود نشان می‌دهد. ولی نباید از ویژگی‌های مثبت مدل تحلیل شبکه غافل شد چرا که مدل FAHP با وجود دقت در نتایج نسب به مدل ANP، روابط احتمالی موجود بین معیارها را نادیده می‌گیرد. فرایند تحلیل شبکه به دلیل رفع نقص موجود در فرایند تحلیل سلسله مراتبی به وجود آمد چرا که در تحلیل سلسله مراتبی ارتباطات احتمالی بین معیارها نادیده گرفته شده بود. به عنوان مثال در فرایند مکان‌یابی نیروگاه بادی در استان اردبیل معیار درصد روزهای بادی به دلیل اینکه دارای ارتباطات اندکی با سایر معیار می‌باشد برخلاف مدل FAHP وزن کمتری را به خود اختصاص داده است که این می‌تواند بر خروجی نهایی نیز تأثیرگذار باشد و یا معیار گسل که در استقرار توربین‌های بادی می‌تواند در بحث ایمنی تأثیرگذار باشد در مدل تحلیل شبکه به دلیل عدم ارتباطات با سایر معیارها، وزن آن صفر شده است.

با توجه به اینکه مهم‌ترین معیارهای مکان‌یابی نیروگاه بادی شامل متوسط سرعت، چگالی توان و درصد روزهای بادی به صورت نقطه‌ای می‌باشند تعیین بهینه‌ترین مکان‌ها مستلزم مطالعه بر اساس ایستگاه‌های اندازه‌گیری بیشتری می‌باشد. بر این اساس می‌توان پیشنهاد کرد در مطالعات بعدی از ایستگاه‌های بیشتر استفاده شود. با توجه به نتایج این مقاله پیشنهاد می‌گردد که در پتانسیل‌یابی مکان‌های مناسب شهرستان اردبیل نواحی شرقی آن جهت احداث نیروگاه بادی مورد توجه بیشتر قرار گیرد. روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند برای انجام مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در سایر مناطق کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد و نتایج آن در برنامه‌ریزی استفاده از انرژی‌های بادی در کشور اعمال شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

منابع و ماخذ

۱. اسماعیل نیا، علی‌اصغر؛ سجادیان، فائزه سادات (۱۳۸۹) **ارزیابی اقتصادی احداث نیروگاه بادی با ملاحظات مکانیسم توسعه پاک (CDM)**، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال ۷، ش ۲۵، صص ۱۴۳-۱۷۲.

۲. تقی لو، علی (۱۳۹۰) **ارزیابی پتانسیل‌های نیروی بادی برای احداث توربین‌های بادی (مطالعه موردی استان زنجان)**، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم انسانی دانشگاه تربیت مدرس، استاد راهنما: فرج: فرجزاده، م

۳. زبردست، اسفندیار (۱۳۸۹) **کاربرد فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای**، نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی، دوره: ۲، شماره: ۴۱، صص ۷۹-۹۰

۴. سعیدی، حمیدرضا؛ نجفی، اکبر (۱۳۸۹) **کاربرد فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در تعیین اولویت خروج دام از جنگل و ساماندهی جنگل نشینان (مطالعه موردی :سری باباکوه، حوضه آبخیز دو گیلان)**. مجله جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران، سال دوم، شماره ۴، صص ۳۰۹ - ۳۲۱

۵. صلاحی، برومند (۱۳۸۵) **تعیین مناسب‌ترین مکان جهت احداث نیروگاه بادی در استان اردبیل. طرح تحقیقاتی فارسی**. اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، شماره راهنما :۲۲۴ ط/خاک

۶. عبدی، حمدی. حسین زاده خنکداری، تقی. ذاکری‌فر، رزم‌آرا. عباسیه کهن، سید حسن. هاشمی پنبه چوله، سید ابراهیم (۱۳۹۰) **امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی مراوه‌تپه**، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰

۷. عطایی، محمد (۱۳۸۹) **تصمیم‌گیری چند معیاره فازی**، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

۸. علم الهدی، سید حمزه (۱۳۸۹) **انرژی باد، سفیر امید- نشریه علمی، آموزشی و پژوهشی صنعت نفت، گاز و پتروشیمی**، سال اول، شماره ۴، صص ۶۷-۶۱

۹. گندم‌کار، امیر (۱۳۸۸) **ارزیابی پتانسیل باد در کشور ایران**، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۰، شماره پیاپی ۳۶، شماره ۴، صص ۱۰۰-۸۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

۱۰.مطیعی لنگرودی، سید حسن. نصیری، حسین. عزیزی، علی. مصطفایی، ابوالفضل (۱۳۹۱) **مدل‌سازی توان اکولوژیک سرزمین از منظر کاربری‌های کشاورزی و مرتعداری با استفاده از روش Fuzzy AHP در محیط GIS، (مطالعه موردی شهرستان مرودشت).** آمایش سرزمین. سال چهارم. شماره ششم. صص ۱۰۱ – ۱۲۴

۱۱.مینائی، مسعود (۱۳۸۸) **پیاده‌سازی مدل آمایشی کشاورزی با استفاده از منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS): (منطقه مورد مطالعه فریدون‌شهر)،** پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ۱۴۶ صفحه.

Aydin, Nazli Yonca. Kentel, Elcin. Duzgun, Sebnem., (2010) ***GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatia planning: A case study from Western Turkey***, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 364–373

Bennui, Adul., Rattanamanee, Payom., Puetpaiboon, Udomphon., (2007) ***SITE SELECTION FOR LARGE WIND TURBINE USING GIS***, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment (ICEE-2007)

Chung, Shu-Hsing., Lee, A.H.L., Pearn,W.L., (2005) ***Analytic Network Process (ANP) Approach for Product Mix Planning in Semiconductor Fabricator***, International Jornal of Production Economics, Volume 96, pp.15-36.

Dutra Ricardo, Szklo Alexandre, (2008), ***Assessing long-teem incentive programs for implementing wind power in Brazil using GIS-based methods***, Renewable Energy, Volume 33, Issue 12, December 2008, Pages 2507–2515

Dyson, Robert G., (2004) ***Strategic Development and SWOT Analysis at the University of Warwick,*** European Jornal of Operational Research, Volume 152, pp.631-640.

Sliz-Szkliniarza, B. Vogta, Joachim., (2010) ***GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential***,Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1696–1707

WWEA, (2010), ***World Wind Energy Report 2009***, Retrieved fromwww.wwindea.org

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]