دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال هفدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۳۹۶، صفحات ۹۴-۷۱

*بهروز ابراهیمی هروی[۱]
کاظم رنگزن[۲]

ظرفیت سنجی احداث نیروگاه بادی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) در استان خوزستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹٤/۰۱/۱۵

چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)[۳]، مکان‌های مناسب جهت احداث نیروگاه بادی در استان خوزستان شناسایی شدند. معیارهای اصلی مورد استفاده برای این منظور به‌ترتیب اولویت شامل: معیارهای فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشند که هرکدام از این معیارها دارای مجموعه زیرمعیارهایی می‌باشند. مجموعه زیرمعیارها (به‌ترتیب اولویت) شامل: چگالی قدرت باد، شیب و توپوگرافی زمین، ارتفاع زمین، فاصله از گسل (زیرمعیارهای معیار فنی)، نوع کاربری زمین، فاصله از مناطق حفاظت شده، فاصله از رودخانه، جنس خاک (زیرمعیارهای معیار زیست‌محیطی)، فاصله از شبکه انتقال نیرو، فاصله از راه‌های ارتباطی، فاصله از مناطق شهری و فاصله از مناطق روستایی (زیرمعیارهای معیار اقتصادی) می‌باشند. تحلیل سلسله مراتبی فازی انجام شده در این تحقیق با توجه به اولویت‌بندی معیارها و زیرمعیارها انجام شد. در این تحقیق با استفاده از اطلاعات سرعت روزانه باد، بیش‌ترین فراوانی سرعت باد و سپس چگالی قدرت باد محاسبه شد. میانگین تعداد سال‌های مورداستفاده

*۱- دانش‌آموخته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز (نویسنده مسئول).
E-mail: Behrouz.85.64@gmail.com
۲- گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.

3- Fuzzy Analysis Hierarchical Process

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

جهت محاسبه بیش‌ترین فراوانی سرعت باد، حدود ۲۰ سال می‌باشد. نتایج این قسمت نشان داد مقادیر بیش‌ترین فراوانی سرعت باد و چگالی قدرت باد به‌ترتیب ($\frac{m}{s}$) ۷-۳ و ($\frac{w}{m^2}$) ۲۰۹/۹۵-۱۵/۲۰٤ است. پس از جمع‌آوری نقشه‌های زیرمعیارها، نقشه‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) آماده و سپس با استفاده از نتایج تحلیل سلسله مراتبی فازی و به‌کمک توابع موجود، پردازش، استانداردسازی، فازی‌سازی و در انتها پس از روی‌هم‌گذاری نقشه‌های ایجاد شده در مراحل قبلی، نقشه مناطق مناسب احداث نیروگاه بادی در استان خوزستان به‌دست آمد. نتایج نشان داد که نوارهایی از مناطق جنوب‌غرب، جنوب و بخش‌هایی از مرکز استان برای احداث نیروگاه بادی بهترین گزینه‌ها هستند.

کلید واژه‌ها: مکانیابی، نیروگاه بادی، تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، استانداردسازی، فازی‌سازی.

مقدمه

گرم شدن جهانی و افزایش تقاضای سالیانه برای انرژی دو دلیل مهم برای توجه به انرژی باد به‌عنوان انرژی پاک می‌باشد (رئیس‌زاده و مطهر[4]، ۲۰۱۱: ٤۰۵۸). با توجه به این‌که آلودگی محیط‌زیست ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و محدودیت منابع فسیلی در جهان ۲ عامل مهم دیگر برای توجه به انرژی باد است. جابه‌جایی مکانی یک توده هوایی را باد می‌نامند. این جابه‌جایی در اثر عوامل مختلف طبیعی و مصنوعی می‌تواند رخ دهد (تالینلی و همکاران[5]، ۲۰۱۱: ۲۱٤). انرژی باد در نهایت یک منبع خورشیدی است (راماچاندرا و شروتی[6]، ۲۰۰۵: ۱۵٦۲). مطالعات نشان داده است که ۳۵٪ انرژی باد در فاصله یک کیلومتری از سطح زمین قرار دارد که این مقدار انرژی ۲۰ برابر انرژی مصرفی دنیا می‌باشد (جباری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱).

یکی از بزرگ‌ترین مسائل مربوط به قدرت باد در مقایسه با تولید برق متعارف، وابستگی آن به نوسانات باد است که این هم مستقیماً وابسته به شرایط هواشناسی است. به‌خاطر وابستگی باد به آب‌وهوا، بازده قدرت باد نمی‌تواند در یک زمان مشخص تضمین شود (مارسیوکاتیس و همکاران[7]، ۲۰۰۸: ۲٦٦). بحران نفت که در اواسط ۱۹۷۰ روی داد، کشورها را تشویق به استفاده از منابع انرژی جدید نمود و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را از بین برد. یکی از تأثیرات استفاده از انرژی باد روی محیط‌زیست، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای همانند CO_2 است (گورسوسکی و همکاران[8]، ۲۰۱۳: ۳۷٦). اگرچه سوخت‌های فسیلی هنوز ارزان و فراوان هستند، خطر گرم شدن جهانی باعث شده که بسیاری از اکتشافات به‌سمت جایگزینی منابع انرژی تجدیدپذیر بروند (جانکه[9]، ۲۰۱۰: ۲۲۲۸).

4- Reiszade and Motahar
5- Talinli.et al
6- Ramachandra & Shruthi
7- Marciukaitis.et al
8- Gorsevski, et al
9- Janke

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

مقدار کمّی انرژی باد قابل دسترس در هر نقطه‌ای، چگالی قدرت باد[10] نامیده می‌شود. چگالی قدرت باد (WPD) متناسب با مکعب سرعت باد است و علاوه بر سرعت باد، به چگالی هوا در ارتفاع موردنظر نسبت به سطح دریا نیز بستگی دارد که خود تابعی از فشار و دمای هوا است. با توجه به کاهش چگالی هوا با افزایش ارتفاع از سطح دریا و درنتیجه برخورد کم‌تر مولکول‌های هوا با پره‌های توربین، چگالی قدرت باد نسبت به قدرت باد مشخصه دقیق‌تری در معرفی توان ایستگاه‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر است. برای محاسبه چگالی قدرت باد از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$WPD = \frac{\rho \times V^3}{2}$$ رابطه (۱)

که در آن ρ چگالی هوا و V سرعت باد (متربرثانیه) می‌باشد. برای محاسبه چگالی هوا می‌توان از رابطه (۲) استفاده کرد:

$$\rho = 1/225 - (1/119\times10^{-4})\times Z$$ رابطه (۲)

در این رابطه Z ارتفاع ایستگاه از سطح دریا (متر) می‌باشد (مجرد و همتی، ۱۳۹۲: ۱٤٥). قدرت حاصل از انرژی باد در واحد سطح، چگالی انرژی باد، از فاکتورهای تعیین‌کننده در ظرفیت‌سنجی انرژی باد و مکان‌یابی مناطق مناسب برای نصب توربین‌های بادی است (امیدوار، دهقان طزرجانی، ۱۳۹۱: ۱٥۹). جهت باد به‌صورت مصور در نمودارهای قطبی (گلباد) نمایش داده می‌شود و برحسب درجه در جهت ساعتگرد اندازه‌گیری می‌شود. جهت وزش باد در انتخاب مکان نصب توربین‌های بادی و طراحی آن‌ها عامل مهمی محسوب نمی‌شود. چراکه امروزه با وجود سامانه‌های کنترل کامپیوتری، با تغییر جهت وزش باد، پره‌های توربین‌های بادی همواره در جهت وزش باد قرار می‌گیرند. با این وجود گلبادها برای چگونگی آرایش توربین‌های بادی و چیدمان آن‌ها در مزرعه بادی بسیار مؤثر می‌باشند (مجرد و همتی، ۱۳۹۲: ۱٤٦). کارایی نیروگاه به سرعت باد در ارتفاعی که توربین نصب شده است، دارد (تالینلی و همکاران[11]، ۲۰۱۱: ۲۲۱). آستانه لازم سرعت باد برای تولید نیروی الکتریکی، بسته به نوع توربین، فن‌آوری ساخت و کاربرد آن متفاوت است. به‌طور کلی توربین‌ها را با توجه به سرعت متوسط سالانهٔ باد می‌توان به دو شکل توربین‌های منفرد و مزرعه بادی احداث نمود (مجرد و همتی، ۱۳۹۲: ۱٤٦). در منابع مختلف مقادیر متفاوت آستانه لازم برای احداث نیروگاه بادی ذکر شده است: محدوده سرعت باد برای تولید الکتریسیته ٥–٦ $\frac{m}{s}$ است (کیهانی و همکاران[12]، ۲۰۱۰: ۲۰۰). نیروگاه‌های بادی بزرگ مقیاس نیاز به میانگین سرعت سالیانه ۷–۹ $\frac{m}{s}$ دارند. نیروگاه‌های کوچک مقیاس به میانگین سالیانه سرعت باد ۳ $\frac{m}{s}$ (زمانی‌که به شبکه برق متصل نیستند) و ٤/٥ $\frac{m}{s}$

10- Wind Power Density (WPD)
11- Talinli.et al
12- Keyhani, et al

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

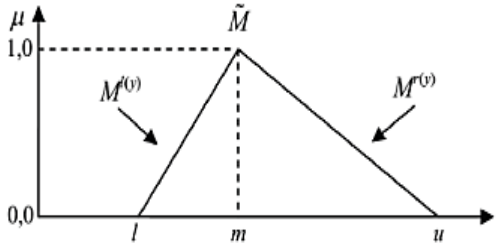
(زمانی‌که به شبکه متصل هستند)، نیاز دارند (راماچاندرا و شروتی،[13] ۲۰۰۵: ۱۵۶۳). در مناطق دورافتاده اگر میانگین سرعت باد کم‌تر از ۳–٤ $\frac{m}{s}$ باشد امکان اجرای پمپاژ آب توسط نیروی باد وجود دارد. در حالی‌که برای اجرای طرح‌های بزرگ WECS اگر میانگین سرعت باد کم‌تر از ٦–۷ $\frac{m}{s}$ باشد از لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نیست. حداقل سرعت لازم برای راه‌اندازی یک توربین بادی کوچک ۳–٤ $\frac{m}{s}$ و توربین‌های تجاری به‌صورت مزرعه بادی ٦ $\frac{m}{s}$ است. بادی که بتواند توربین را به حرکت درآورد نباید کم‌تر از ۳ $\frac{m}{s}$ سرعت داشته باشد (مجرد و همتی، ۱۳۹۲: ۱٤۳). معمولاً حداقل سرعت باد جهت راه‌اندازی توربین‌های بزرگ بسته به نوع و طراحی توربین ۳–٤ $\frac{m}{s}$ می‌باشد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰: ۸). اکثر توربین‌های بادی برای شروع به بازدهی با سرعت ۳ $\frac{m}{s}$ طراحی شده‌اند (امیدوار، دهقان طزرجانی، ۱۳۹۱: ١٦٦). در پژوهش حاضر با توجه به تنوع امکان بهره‌گیری از انرژی باد در اشکال الکتریکی (و حتی مکانیکی)، سرعت آستانه‌ای لازم باد برای راه‌اندازی یک توربین بادی معادل ۳ $\frac{m}{s}$ در نظر گرفته شده است که در واقع آستانه لازم برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک غیرمتصل به شبکه سراسری برق است (مجرد و همتی، ۱۳۹۲: ١٤٤). سودآوری و تولید انرژی توسط نیروگاه‌های بادی اساساً بستگی به مکان نیروگاه بادی دارد. انتخاب مکان نامناسب برای احداث نیروگاه باعث کاهش جذب انرژی باد، افزایش هزینه‌های نگهداری و... می‌شود. یافتن مکانی که تمام معیارها را رعایت کند باعث می‌شود که حداکثر انرژی توسط نیروگاه تولید شده و هزینه‌های سرمایه‌ای را به‌حداقل ممکن برساند (امیدوار، دهقان طزرجانی، ۱۳۹۱: ۱۵۸).

سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌کمک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی ابزاری سودمند در زمینه مکان‌یابی محسوب می‌شوند. در این تحقیق از GIS در جمع‌آوری، ذخیره، پردازش، تحلیل و خروجی گرفتن از مجموعه داده‌ها به‌منظور شناسایی نقاط مناسب احداث نیروگاه بادی استفاده شد. در تحلیل سلسله مراتبی مهم‌ترین بخش امتیازدهی معیارها و زیرمعیارها می‌باشد که در این زمینه منطق فازی با در نظر گرفتن یک بازه (و نه یک عدد دقیق) برای هر معیار روشی سودمند محسوب می‌شود که روزبه‌روز بر قابلیت‌های آن افزوده می‌شود و کاربردهای بیش‌تری پیدا می‌کند. در این تحقیق برای مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی، از روش سلسله مراتبی فازی بهره گرفته شده است. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی سه کارکرد اصلی دارد: ۱) ساختاردهی به پیچیدگی؛ ۲) سنجش بر مبنای مقیاس نسبی و ۳) ترکیب. اولین قدم در ساختار سلسله مراتبی تبدیل ساختار پیچیده مسئله به ساختار ساده و قابل فهم است که حتی افراد عادی بدون هیچ آموزش رسمی بتواند آن‌را درک کرده و در مورد آن قضاوت کنند. چهار مقیاس اندازه‌گیری وجود دارد که شامل اسمی، رتبه‌ای، فاصله‌ای و نسبی می‌باشد. روش سلسله مراتبی برخلاف دیگر روش‌ها که از مقیاس‌های سطح پائین استفاده می‌کنند سنجش و مقایسه را بر مبنای مقیاس نسبی بنا می‌نهد. اولین مرحله در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، تجزیه مسئله به ساختار سلسله مراتبی شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها است. تحلیل سلسله مراتبی یک فرآیند ذهنی است و به جهت عدم دقت عددی این روش، امکان بروز خطا در ارزیابی بیش‌تر از دیگر علوم وجود دارد؛ بنابراین نیاز به بررسی سازگاری در اینجا وجود دارد (زنجیرچی،

13- Ramachandra & Shruthi

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

۱۳۹۰). پایه و اساس مجموعه‌ها و منطق فازی به‌وسیله پرفسور لطفی‌زاده استاد ایرانی مطرح شد. هنگامی‌که مجموعه مرجع نامحدود باشد لیست کردن همه اعضا همراه با مقدار عضویت مربوطه غیرممکن است. مجموعه اعداد حقیقی نمونه‌ای از مجموعه مرجع نامحدود است. این‌گونه مجموعه‌های فازی را اعداد فازی می‌گویند. عدد فازی ممکن است به‌صورت مثلثی یا ذوزنقه‌ای بیان شود. در حالت مثلثی عدد مربوطه به‌صورت $\tilde{M}= (l, m, u)$ نمایش می‌دهند (عطائی، ۱۳۸۹). تابع عضویت عدد فازی مثلثی به‌قرار زیر است:



$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & if\ x \le a \\ \dfrac{x-l}{m-l} & if\ a \le x \le b \\ \dfrac{u-x}{u-m} & if\ b \le x \le c \\ 0 & if\ x \ge c \end{cases}$$

شکل ۱: تابع عضویت عدد مثلثی فازی ($\tilde{M}$) (منبع: Daneshvar Rouyendegh and Erkan, 2012:924)

کشور ایران از لحاظ منابع مختلف انرژی یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌شود (جدول ۱) چرا که از یک سو دارای منابع گسترده سوخت‌های فسیلی و انرژی تجدیدناپذیر نظیر نفت و گاز است و از سوی‌دیگر دارای پتانسیل فراوان انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله باد می‌باشد. ایران در معرض جریان‌های قاره‌ای که از آسیا، اروپا، آفریقا، هند و اقیانوس اطلس می‌آیند، قرار دارد. از آن‌جایی‌که ایران منطقه بادخیزی می‌باشد استفاده از انرژی بادی نه‌تنها ممکن است بلکه از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه می‌باشد. مطالعات انجام شده درخصوص تعیین پتانسیل باد در ایران نشان‌دهنده این است که ایران کشوری با وزش بادهای با سرعت متوسط ٦ $\frac{m}{s}$ می‌باشد که در برخی از مناطق، باد مناسب و مداوم‌تری برای تولید برق موجود است. وزارت نیرو اقدامات اساسی در زمینه ارزیابی توان بالقوه تولید انرژی از باد در ایران کرده است که برای این امر، ۵۳ ایستگاه سینوپتیک در سراسر کشور نصب کرده و این ایستگاه‌ها هر ۱۰ دقیقه اطلاعات مربوط به باد را ثبت می‌کنند. میانگین سرعت باد در مناطق جنوبی ایران حدود ۵ $\frac{m}{s}$ است (کیهانی و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۸۹). ایران در آسیا بعد از هند، چین و ژاپن در مکان چهارم استفاده از نیروگاه بادی قرار دارد.

جدول ۱- ظرفیت بادی نصب شدهٔ ایران در سال‌های مختلف (World Wind Energy Report, 2009)

سال	۲۰۰۵	۲۰۰٦	۲۰۰۷	۲۰۰۸
ظرفیت بادی (مگاوات)	۳۲	٤۷	٦۷	۸۲

مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا منطقه مورد مطالعه در این تحقیق معرفی می‌شود سپس به بیان داده‌های مورد استفاده و معیارهای

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

مکان‌یابی به‌منظور احداث نیروگاه بادی پرداخته می‌شود. بعد از آن وزن‌دهی و تلفیق لایه های اطلاعاتی مورد استفاده با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی بیان می‌شود و اعداد مربوطه نمایش داده می‌شوند.

منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان در طول جغرافیایی ´۴۲ °۴۷ تا ´۳۹ °۵۰ و عرض جغرافیایی ´۵۸ °۲۹ تا ´۵۸ °۳۲ واقع گردیده است (مرشدی و همکاران، ۱۳۸۹: ۹۸). براساس نتایج نهایی سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۰، جمعیت استان خوزستان بیش از ٤٥٣١٧٣٠ نفر (حدود ٦/٠٣٪ جمعیت کل کشور) بوده و از این لحاظ در رتبه پنجم در بین استان‌های کشور قرار دارد (دفتر آمار و اطلاعات استانداری خوزستان، ۱۳۹۰). استان خوزستان با مساحتی بالغ بر ٦٤٧٤٦ کیلومتر مربع، وسیع‌ترین استان در جنوب‌غربی ایران است. بنابراین این استان، با این جمعیت و وسعت، نیاز به انرژی بالایی دارند که یکی از این انرژی‌های مناسب، انرژی بادی می‌باشد (شکل ۲).

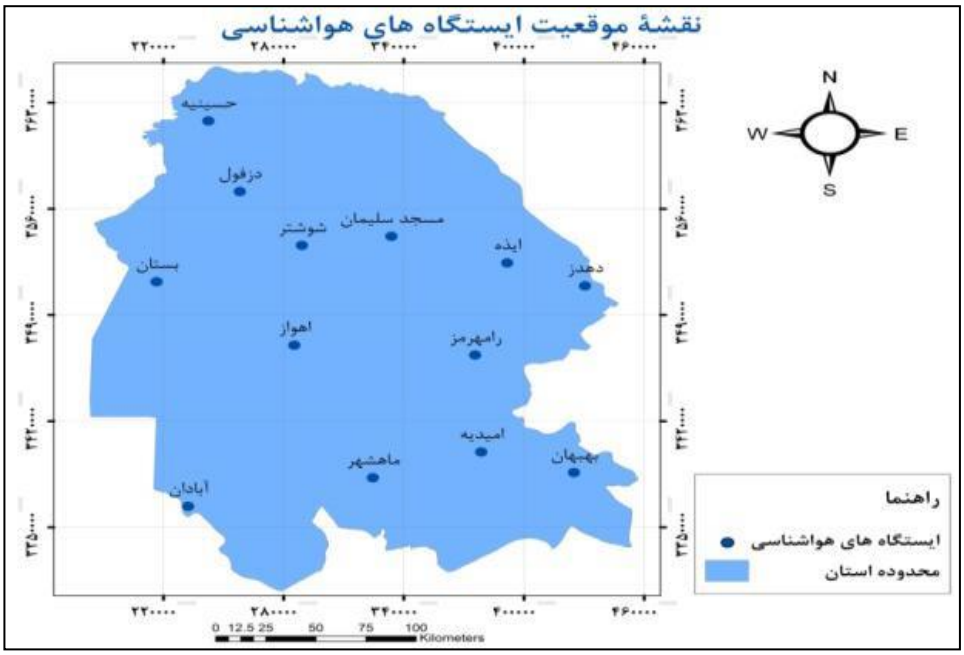


شکل ۲: موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های سرعت باد (اخذ شده از سازمان هواشناسی خوزستان) و نقشه‌های معیارهای مورد استفاده به منظور مکان‌یابی نیروگاه بادی است که لازم بود ابتدا این نقشه‌ها جمع‌آوری و سپس آماده سازی شده و در نهایت استانداردسازی و فازی‌سازی شوند و در انتها تمام نقشه‌ها (به‌همراه نقشه‌های باد استان) روی‌هم‌گذاری شده و مناطق مناسب به‌منظور احداث نیروگاه بادی مشخص شدند. در این تحقیق از آمار سرعت باد روزانه اخذ شده از ایستگاه‌های هواشناسی استان خوزستان استفاده شد. این داده‌ها از مهم‌ترین داده‌های لازم برای ظرفیت‌سنجی احداث نیروگاه بادی است. از ١٦ ایستگاه هواشناسی موجود در استان خوزستان، داده‌های

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

سرعت باد بعضی از ایستگاه‌ها به‌صورت ماهانه در دسترس بوده و بنابراین برای انجام این تحقیق مناسب نمی‌باشند. در نهایت آمار ۱۳ ایستگاه هواشناسی موجود در استان خوزستان به‌صورت روزانه در دسترس بوده و برای این تحقیق از آنها استفاده شد. ایستگاه‌های هواشناسی مورداستفاده، بعد از شناسایی موقعیت جغرافیایی، توسط نرم‌افزار ArcGIS فراخوانده شدند. (شکل ۳) موقعیت ایستگاه‌های مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نقشه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه

(جدول ۲) تعداد سال‌هایی که در این تحقیق از داده‌های هواشناسی آن استفاده شده است را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بعضی از ایستگاه‌ها مثل ایستگاه هواشناسی حسینیه تازه تأسیس بوده و آمار هواشناسی آنها نسبت به آمار دیگر ایستگاه‌ها کم‌تر بوده است و به‌منظور بالا بردن دقت روش اجرا شده، از آمار این ایستگاه‌ها استفاده شده است.

جدول ۲- تعداد سال‌های داده‌های هواشناسی ایستگاه‌ها موجود در استان خوزستان

آبادان	اهواز	امیدیه	ایذه	بستان	بهبهان	حسینیه	دزفول	دهدز	رامهرمز	شوشتر	ماهشهر	مسجد سلیمان
۲۲	۲۱	۲۲	۱۸	۲۱	۲۰	۷	۲۱	۷	۱۹	۱۶	۲۲	۲۰

هرچه تعداد سال‌های آمار هواشناسی مورد استفاده بیش‌تر باشد اعتمادپذیری نتایج بیش‌تر خواهد بود. در این تحقیق با استفاده از فراوانی روزانه سرعت باد، فراوانی سالانه سرعت باد و سپس بیش‌ترین فراوانی سرعت باد برای هر کدام از ایستگاه‌ها محاسبه شد و با استفاده از آن چگالی قدرت باد، محاسبه شد. لازم به ذکر است که انحراف معیار

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

فراوانی‌های باد هر کدام از ایستگاه‌ها نیز محاسبه شد. انحراف معیار که معمول‌ترین معیار سنجش پراکندگی داده‌ها محسوب می‌شود، بیان کننده میزان تغییرات سرعت باد است و در واقع ثبات باد را در مکان موردمطالعه نشان می‌دهد. هرچه مقدار این پارامتر به صفر نزدیک‌تر باشد، به این معناست که داده‌های سرعت باد همگن‌تر بوده و سرعت‌های ناگهانی شدید کم‌تر اتفاق افتاده است (امیدوار و دهقانطرزجانی، ۱۳۹۱). به‌دلیل محدودیت در تعداد صفحات ارائه مطالب و این‌که نمایش آمار بیش‌ترین فراوانی تمام ایستگاه‌ها فضای زیادی را نیاز دارد برای نمونه در (جدول ۳)، آمارایستگاه اهواز و در (جدول ٤) آمار بیش‌ترین فراوانی و انحراف معیار بیش‌ترین فراوانی تمام ایستگاه‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۳- آمار فراوانی سرعت باد برای ایستگاه هواشناسی اهواز

سال شمسی	۷۰	۷۱	۷۲	۷۳	۷٤	۷٥	۷٦	۷۷	۷۸	۷۹	۸۰	فراوانی کل	انحراف معیار
بیش‌ترین فراوانی	٦	۳	٦	٥	٥	٥	٥	٦	٥	٥	٦	٥	۱/۰٤٤
سال شمسی	۹۰	۸۱	۸۲	۸۳	۸٤	۸٥	۸٦	۸۷	۸۸	۸۹	۹۰		
بیش‌ترین فراوانی	٤	٦	٦	٤	٦	٤	۳	٥	٥	۳	٤		

جدول ٤- بیش‌ترین فراوانی و انحراف معیار سرعت باد ایستگاه‌های هواشناسی استان خوزستان

	آبادان	امیدیه	اهواز	ایذه	بستان	بهبهان	حسینیه
بیش‌ترین فراوانی	۷	۷	٥	۳	٦	٥	٥
انحراف معیار	۱/۲	۱/۷	۱/۱	۱/۷	۰/۸	۱/۱	۰/٦
بیش‌ترین فراوانی	دزفول	دهدز	رامهرمز	شوشتر	ماهشهر	مسجد سلیمان	
انحراف معیار	۳	۳	٥	۳	۷	٦	

لازم به ذکر است که مقادیر بیش‌ترین فراوانی نمایش داده شده (جدول٤) مربوط به ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (ارتفاع نصب دستگاه های سرعت‌سنج در ایستگاه‌های هواشناسی) هستند و باید به ارتفاع نصب توربین‌های بادی تبدیل شوند. در منابع علمی ارقام متفاوتی برای ارتفاع دکل توربین‌های بادی ذکر شده است. معمولاً ارتفاع محور بیش‌تر توربین‌های بادی تجاری، در حدود۳۰ الی۸۰ متری و اغلب ۵۰ متری از سطح زمین است. همچنین از ارتفاع‌های ۱۲۰، ۱۵۰ و حتی ۲۰۰ متری هم صحبت به‌میان آمده است (مجرد و همتی، ۱۳۹۲: ١٤٤). که در این تحقیق مقدار ۸۰ متری برای ارتفاع پروانه‌های توربین بادی فرض شده است. به‌عبارتی با استفاده از آمار مربوط به سرعت روزانه باد (حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی) در ارتفاع ۱۰ متری، بیش‌ترین فراوانی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و سپس با استفاده از رابطه ۳، بیش‌ترین فراوانی سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری محاسبه و در نهایت چگالی

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

قدرت باد در ارتفاع ۸۰ متری محاسبه شد و در تحلیل‌ها از چگالی قدرت باد استفاده شد:

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha}$$ رابطه (۳)

V سرعت باد در ارتفاع جدید (متر بر ثانیه)، H ارتفاع جدید از سطح زمین (متر)، H_0 ارتفاع اصلی از سطح زمین (متر)، α معرف سرعت باد[14] و V_0 سرعت باد در ارتفاع اصلی (متر بر ثانیه) است. مقدار α با توجه به پوشش سطح زمین و با استفاده از جداول مخصوص تعیین می‌شود (مجرد و همتی، ۱۳۹۲: ۱٤٤) عامل α که متأثر از زبری سطح می‌باشد برای ایستگاه‌های دهدز، ایذه، رامهرمز و مسجد سلیمان مقدار آن را برابر با ۰/۱۹ (مقدار پیشنهادی برای مناطق پوشیده از درختچه و بوته است) و برای سایر ایستگاه‌ها مقدار آن را برابر با ۰/۱ (مقدار پیشنهادی برای سطوح مسطح و دشتی و فاقد پوشش سبز) قرار داده شد (برتون و وملدورف، ۲۰۱۱: ۲[15]). (جدول ۵) بیش‌ترین فراوانی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، ۸۰ متری و همچنین چگالی قدرت باد در ارتفاع ۸۰ متر را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مشخصات سرعت باد و چگالی قدرت باد در ایستگاه های هواشناسی منطقه مورد مطالعه

	آبادان	امیدیه	اهواز	ایذه	بستان	بهبهان	مسجد سلیمان
ارتفاع ایستگاه	٦/٦	٢٦	٥/٢٢	٨٢٧	٦/٨	٣١٣	٣٢٠
سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری	۷	۷	۵	۳	٦	۵	٦
سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری (رابطه۳)	۸/٦	۸/٦	٦/٢	٤/٤	۷/٤	٦/٢	۸/۹
چگالی هوا (رابطه۲)	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۱	۱/۲	۱/۱۸	۱/۱۹
چگالی قدرت باد (رابطه۱)	۲۰۹/۹	۲۰۹/٦	۷٦/٥	۱٥/۲	۱۳۲/۲	۷٤/۲	۱۲۸/۲
ارتفاع ایستگاه	حسینیه	دزفول	دهدز	رامهرمز	شوشتر	ماهشهر	
سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری	۳٥٤	۸۲	۱٤٥۷	٤٥۰	٦۷	۳۰	
سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری (رابطه۳)	۵	۳	٦	۵	٦	۷	
چگالی هوا (رابطه۲)	٦/٢	۳/۷	۸/۹	۷/٤	۷/٤	۸/٦	
چگالی قدرت باد (رابطه۱)	۱/۱۸	۱/۲	۱	۱/۱۷	۱/۲	۱/۲	

با بررسی‌ها و مطالعات انجام یافته، برای مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی ۳ معیار اصلی در نظر گرفته شد سپس این معیارها به زیرمعیارهای موردنظر تقسیم‌بندی شدند. معیارهای اصلی از نظر اولویت‌بندی در این تحقیق به‌ترتیب شامل معیارهای فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی است. زیرمعیارها به‌ترتیب اولویت شامل: چگالی قدرت باد، شیب و توپوگرافی زمین، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از گسل (زیرمعیار معیار فنی)، نوع کاربری زمین، فاصله از مناطق حفاظت شده، ، فاصله از رودخانه، جنس خاک (زیرمعیارهای معیار زیست محیطی)، فاصله از شبکه انتقال نیرو،

14- Wind shear exponent
15- Bratton and Womeldorf

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

فاصله از راه‌های ارتباطی، فاصله از شهر و فاصله از روستا (زیرمعیارهای معیار اقتصادی) می‌باشد. در این تحقیق جاده‌ها، راه‌آهن و راه‌های دسترسی محلی (راه‌های روستایی) در هم ادغام و هر سه نوع مسیر حمل‌ونقل را به‌عنوان راه‌های ارتباطی، درنظر گرفته شد. بنابراین در نهایت برای این تحقیق از ۱۲ معیار استفاده شد. در این تحقیق برای تعیین ضریب اهمیت هر معیار، مقایسات به‌صورت دودویی انجام شده و نمره‌دهی براساس روش فازی انجام شد.

- معیارهای مکان‌یابی

ارتفاع زمین از سطح دریا:

ارتفاع زمین به دو صورت تأثیرگذار است اول این‌که در ارتفاع‌های بالاتر انتقال تجهیزات برای ساخت نیروگاه مشکل‌تر می‌شود و دوم این‌که ارتفاع در سرعت باد تأثیرگذار است و با افزایش ارتفاع سرعت باد افزایش یافته و فشار و دمای هوا کاهش می‌یابد که این کاهش فشار و دما در میزان توان قابل استحصال از توربین تأثیرگذار است و بنابراین نباید میزان ارتفاع به‌قدری باشد که در میزان این توان تغییرات محسوسی ایجاد نماید (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۲).

- شیب و توپوگرافی زمین

برای دستیابی به توان موثر نیروگاه، نباید محل قرارگیری توربین‌ها در پشت موانع طبیعی یا مصنوعی باشد. همچنین شیب‌های بالاتر کار اجرای عملیات ساخت نیروگاه را با مشکل مواجه می‌کند ضمن آن‌که شیب‌های بالاتر سقوط هر کدام از برج‌های نیروگاه بادی را به‌سبب فرسایش بیش‌تر خاک، وجود بادهای شدید و اثر جاذبه زمین افزایش می‌دهد. مناطق نامناسب شامل تپه‌هایی با شیب بیش‌تر از ۱۵ درجه است (بنوئی و همکاران[16]، ۲۰۰۷).

- نوع کاربری زمین

پوشش زمین مطابق با تناسبش برای ساخت نیروگاه به کلاس‌هایی تقسیم می‌شوند. مناطق ایده‌آل شامل پوشش‌گیاهی کوتاه مانند درختچه‌ها، دشت‌ها، علف‌زار، بوته‌زار، استپ، کشاورزی و زمین‌های بی‌ثمر هستند این مناطق ممانعتی برای کاهش سرعت باد به‌وجود نمی‌آورند. تالاب‌ها و پوشش‌گیاهی بلند به‌دلیل اهمیت اکولوژیکی‌شان مکان‌های مناسبی برای احداث نیروگاه بادی نیستند. پوشش زمینی نامناسب برای احداث نیروگاه‌ها شامل دامنه‌های کوهستان، تپه‌های شنی، مکان‌های سنگریزه‌ای، یخ، صخره‌ها، دره‌ها و مناطق توسعه‌یافته است (جانکه[17]، ۲۰۱۰: ۲۲۳۲). زمین‌های مورد استفاده برای توربین‌های بادی می‌توانند برای کشاورزی و چرای دام مورداستفاده قرار بگیرند زیرا تنها ۱٪ از زمین برای ساخت پی توربین و راه دسترسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- فاصله از مناطق حفاظت‌شده

16- Bennui et al
17- Janke

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

منطقه حفاظت شده منطقه‌ای است که شامل اراضی طبیعی و دارای منابع طبیعی اعم از جنگل، مرتع، حیات‌وحش و ... بوده که از لحاظ ظرفیت تکثیر یا تولیدمثل (گیاهی یا جانوری) و همچنین حفظ و احیای رستنی‌ها و جانوران دارای اهمیت ویژه است. این مناطق به‌دلیل دارا بودن جنگل‌ها و یا مراتع پرارزش و مناظر زیبا و برای جلوگیری از تخریب پوشش‌گیاهی و جانوری موجود در آن‌ها مورد حفاظت قرار می‌گیرند. مزارع بادی به‌دلیل اضافه کردن یک عامل تکنولوژیکی به منظره طبیعی بر خاصیت ذاتی طبیعت این مناطق تأثیر منفی می‌گذارند (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۱).

فاصله از رودخانه

توربین‌های بادی واقع در سواحل و نزدیک به آب‌ها و در مجاورت رودخانه‌ها، تأثیرات نامطلوبی بر جلوه این مناطق خواهند گذاشت (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۱). مناطق نزدیک رودخانه امکان بروز سیلاب و شستن پی برج‌ها و درنهایت سقوط برج‌ها را افزایش می‌دهد. برخلاف نیروگاه‌های هسته‌ای و نیروگاه‌های سوخت فسیلی که مقدار زیادی آب را برای خنک کردن استفاده می‌کنند، نیروگاه‌های بادی نیازی به آب برای تولید انرژی الکتریکی ندارند.

– فاصله از راه‌های ارتباطی

مسیرهای جابجایی افراد شامل راه‌ها، راه‌آهن و سایر راه‌ها مانند راه‌های دسترسی محلی می‌باشند (نوراللهی و همکاران،۱۳۹۰: ۱۰). هرچه نیروگاه به راه ارتباطی نزدیک‌تر باشد امکان خدمات‌رسانی و ساخت نیروگاه راحت‌تر است.

– فاصله از شهر و فاصله از روستا

توربین‌های بادی به‌خاطر بزرگی اندازه‌شان توانایی تخریب بصری محیط‌زیست را دارند. در کنار آن سروصدا و لرزش توربین‌ها ممکن است که ساکنان منطقه مسکونی مجاور این نیروگاه از اختلال خواب، سردرد و... رنج ببرند (تالینلی و همکاران[18]، ۲۰۱۱: ۲۲۵). توربین‌های بادی عموماً در مناطق شهری نصب نمی‌شوند چراکه ساختمان‌ها جلوی وزش باد را سد می‌کنند و همین‌طور قیمت زمین نیز معمولاً زیاد است. منابع مختلف اعداد و ارقام مختلفی را برای فاصله از شهر بیان کرده‌اند: توربین‌های بادی باید حداقل به فاصله ۵۰۰ متر از نزدیک‌ترین محل سکونت باشند (آیدین و همکاران[19]، ۲۰۱۰: ۳٦٦). راماچاندرا و شروتی[20] (۲۰۰۵) اظهار می‌دارند که به‌دلیل نگرانی‌های زیبایی (براساس تأثیرات بصری‌ای که نیروگاه دارد) توربین‌های بادی باید در فاصله ۲۰۰۰ متری از شهرک‌های

18- Talinli et al
19- Aydin et al
20- Ramachandra & Shruthi

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

بزرگ باشند. به‌دلیل امنیتی حداقل فاصله نیروگاه‌ها باید ۱۰۰۰ متر باشد (مارسیوکاتیس و همکاران[۲۱]، ۲۰۰۸: ۲٦۷). در مورد فاصله از روستا، تمام دلایلی که برای فاصله از شهر گفته شد در مورد روستا نیز صدق می‌کند و مقدار فاصله، کمی تغییر دارد.

- فاصله از گسل

گسل به شکستگی‌هایی اطلاق می‌شود که سنگ‌های دو طرف صفحه شکستگی نسبت به یکدیگر حرکت کنند. در حالت کلی هیچ سازه‌ای نباید روی گسل قرار بگیرد زیرا احتمال حرکت پوسته زمین در این مناطق خیلی بیش‌تر از مناطق غیرگسلی می‌باشد و این خود می‌تواند باعث بروز صدمات جبران‌ناپذیری به تأسیسات داشته باشد.

- جنس خاک

خاک‌هایی که شن و ماسه بالایی دارند از خاک‌هایی که گل و لای (سیلت) و رس بالایی دارند، بهتر می‌توانند سازه‌های بزرگ را پشتیبانی کنند. همچنین خاک‌هایی که مقدار مواد آلی بالایی دارند کم‌ترین تناسب را برای سازه‌های بزرگ دارند. به‌ترتیب مناسب‌ترین خاک‌ها شامل گراول (شن)، ماسه، سیلت و رس با میزان آب کم‌تر از ۵۰٪، سیلت و رس با میزان آب بیش‌تر از ۵۰٪ و در نهایت خاک با مقدار مواد آلی زیاد می‌باشد (گورسوسکی و همکاران[۲۲]، ۲۰۱۳: ۳۷۹).

- فاصله از خطوط انتقال نیرو

محل قرارگیری توربین‌های بادی بستگی به ساختار و شرایط اتصال به شبکه برای فرآیندهای اتصال به شبکه دارد. بازار الکتریسیته به‌طورمستقیم بر ظرفیت تولیدی نیروگاه بادی تأثیرگذار است (تالینلی و همکاران[۲۳]، ۲۰۱۱: ۲۲٤).

- چگالی قدرت باد

مهم‌ترین معیار برای انتخاب مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه بادی باد است. معمولاً حداقل سرعت باد جهت راه‌اندازی توربین‌های بزرگ $\frac{m}{s}$ ٤-۳ بسته به نوع طراحی توربین است (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰: ۸). اگر سرعت باد از مقدار معینی بیش‌تر گردد تولید برق به‌طور خودکار قطع می‌گردد به‌طوری که اگر سرعت باد $\frac{m}{s}$ ۵ باشد تولید شروع می‌گردد و در $\frac{m}{s}$ ۱٦ تولید حداکثر است و نهایتاً در $\frac{m}{s}$ ۲۵ تولید به‌طور خودکار قطع می‌گردد تا به اجزا توربین بادی آسیبی نرسد. برق به‌دست آمده از باد با مکعب سرعت باد متناسب است، بدین معنا که دو برابر کردن سرعت باد، برق حاصله را به‌صورت ضریبی از ۸ افزایش می‌دهد.

21- Marciukaitis et al
22- Gorsevski et al
23- Talinli et al

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

در این تحقیق از روش سلسله مراتبی فازی (FAHP) به‌روش چانگ استفاده شد. چانگ با لحاظ نمودن اعداد مثلثی فازی در ماتریس مقایسات زوجی، ابتدا عناصر هر سطر را با هم جمع و سپس هنجارسازی کرد و درنهایت درجه احتمال بزرگ‌تر بودن هر عدد از بقیه را محاسبه و پس از نرمال‌سازی مجدد، به‌عنوان وزن گزینه‌ها معرفی کرد. روش چانگ مبتنی بر میانگین حسابی نظرات نخبگان و روش نرمالایز ساعتی و با استفاده از اعداد فازی مثلثی توسعه داده شده است (زنجیرچی، ۱۳۹۰). در روش مثلثی به‌روش چانگ از ۳ عدد به‌منظور مقایسه زوجی استفاده شد که عدد اول سمت چپ کم‌ترین مقدار ممکن، عدد وسط محتمل‌ترین مقدار (امیدوارکننده‌ترین ارزش) و عدد سوم سمت راست بیش‌ترین مقدار ممکن را نمایش می‌دهد. اعداد مقیاس تبدیل فازی در (جدول ٦) نمایش داده شده‌اند.

جدول ٦- مقیاس تبدیل فازی مثلثی (زنجیرچی، ۱۳۹۰)

مقیاس زبانی	مقیاس فازی مثلثی	مقیاس فازی مثلثی معکوس
اهمیت دقیقاً مساوی	(۱ , ۱ , ۱)	(۱ , ۱ , ۱)
کمی مهم‌تر	(۱/۲ , ۱ , ۳/۲)	(۲/۳ , ۱ , ۲)
مهم‌تر	(۱ , ۳/۲ , ۲)	(۱/۲ , ۲/۳ , ۱)
خیلی مهم‌تر	(۳/۲ , ۲ , ۵/۲)	(۲/۵ , ۱/۲ , ۲/۳)
خیلی زیاد مهم‌تر	(۲ , ۵/۲ , ۳)	(۱/۳ , ۲/۵ , ۱/۲)
کاملاً مهم‌تر	(۵/۲ , ۳ , ۷/۲)	(۲/۷ , ۱/۳ , ۲/۵)

- وزن دهی و تلفیق لایه‌ها

نحوه تأثیر هریک از معیارها در بخش بالا بررسی شدند. جداول مقایسه زوجی معیارهای اصلی و زیرمعیارها به‌روش فازی و همچنین ضریب ناسازگاری هر کدام از مقایسات زوجی در (جدول های ۷، ۸، ۹ و ۱۰) نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که برای تعیین ضریب ناسازگاری هر کدام از مقایسات زوجی از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شد.

جدول ۷- مقایسات زوجی معیارهای اصلی

	فنی	زیست‌محیطی	اقتصادی
فنی	(۱-۱-۱)	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۱/۵-۲-۲/۵)
زیست‌محیطی	(۰/٦۷-۱-۲)	(۱-۱-۱)	(۰/۵-۱-۱/۵)
اقتصادی	(۰/٤-۰/۵-۰/٦۷)	(۰/٦۷-۱-۲)	(۱-۱-۱)
وزن	۰/٤۱	۰/۲۳٤	۰/۲٦٦
ضریب ناسازگاری		۰/۰۵	

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

جدول ۸- مقایسات زوجی زیرمعیارهای فنی

	ارتفاع از سطح دریا (متر)	شیب زمین (درجه)	چگالی قدرت باد (وات بر مترمربع)	فاصله از گسل (کیلومتر)
ارتفاع از سطح دریا (متر)	(۱-۱-۱)	(۰/۶۷-۱-۲)	(۰/۴-۰/۵-۰/۶۷)	(۰/۵-۱-۱/۵)
شیب زمین (درجه)	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۱-۱-۱)	(۰/۶۷-۱-۲)	(۱/۵-۲-۲/۵)
چگالی قدرت باد (وات بر مترمربع)	(۱/۵-۲-۲/۵)	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۱-۱-۱)	(۲/۵-۳-۳/۵)
فاصله از گسل (کیلومتر)	(۰/۶۷-۱-۲)	(۰/۴-۰/۵-۰/۶۷)	(۰/۲۸۶-۰/۳۳-۰/۴)	(۱-۱-۱)
وزن	۰/۱۸۲	۰/۳۱	۰/۴۲۲	۰/۰۹۳
ضریب ناسازگاری		۰/۰۳		

جدول ۹- مقایسات زوجی زیرمعیارهای زیست‌محیطی (فواصل به کیلومتر می‌باشند)

	فاصله از مناطق حفاظت شده	جنس خاک	فاصله از رودخانه	کاربری زمین
فاصله از مناطق حفاظت شده	(۱-۱-۱)	(۱/۵-۲-۲/۵)	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۰/۶۷-۱-۲)
جنس خاک	(۰/۴-۰/۵-۰/۶۷)	(۱-۱-۱)	(۰/۶۷-۱-۲)	(۰/۲۸۶-۰/۳۳-۰/۴)
فاصله از رودخانه	(۰/۶۷-۱-۲)	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۱-۱-۱)	(۰/۴-۰/۵-۰/۶۷)
کاربری زمین	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۲/۵-۳-۳/۵)	(۱/۵-۲-۲/۵)	(۱-۱-۱)
وزن	۰/۳۱	۰/۰۹۳	۰/۱۸۲	۰/۴۲
ضریب ناسازگاری		۰/۰۳		

جدول ۱۰- مقایسات زوجی زیرمعیارهای اقتصادی (واحدها به کیلومتر می‌باشند)

	راه‌های ارتباطی	فاصله از شهر	فاصله از روستا	فاصله از شبکه انتقال نیرو
راه‌های ارتباطی (کیلومتر)	(۱-۱-۱)	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۱/۵-۲-۲/۵)	(۰/۶۷-۱-۲)
فاصله از شهر (کیلومتر)	(۰/۶۷-۱-۲)	(۱-۱-۱)	(۱-۱/۵-۲)	(۰/۴-۰/۵-۰/۶۷)
فاصله از روستا (کیلومتر)	(۰/۴-۰/۵-۰/۶۷)	(۰/۵-۰/۶۷-۱)	(۱-۱-۱)	(۰/۳۳-۰/۴-۰/۵)
فاصله از شبکه انتقال نیرو (کیلومتر)	(۰/۵-۱-۱/۵)	(۱/۵-۲-۲/۵)	(۲-۲/۵-۳)	(۱-۱-۱)
وزن	۰/۳۲۴	۰/۲۴۳	۰/۰۲۷	۰/۴۱
ضریب ناسازگاری		۰/۰۲		

برای استانداردسازی لایه‌ها، پس از آماده کردن تمام لایه‌ها در ابتدا لایه‌ها را به‌صورت رستری با اندازه سلول برابر (۳۰ متر)، تبدیل شد بدین منظور لایه‌های وکتوری موجود را بر اساس تابع فاصله (Distance) به رستر تبدیل و به این صورت استانداردسازی شدند. استانداردسازی به‌منظور آماده کردن لایه‌ها برای انجام مرحله بعد (مرحله

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

فازی‌سازی) می‌باشد، انجام شد. مرحله فازی‌سازی، بر اساس تابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS[۲۴]، انجام شد. فازی‌سازی در این نرم‌افزار شامل انواع توابع است که در اینجا از توابع زیر استفاده شد:

تابع تبدیل فازی بزرگ (large): زمانی‌که مقادیر بالاتر داده‌های ورودی مورد نظر باشد، از این تابع استفاده می‌شود.

تابع تبدیل فازی خطی (linear): یک تابع خطی بین مقادیر حداقل و حداکثر که کاربر آن‌را مشخص کرده ایجاد می‌کند. تمام مقادیر بالاتر از مقدار حداکثر، عضویت یک و مقادیر کم‌تر از مقدار حداقل، عضویت صفر می‌گیرند (راهنمای ArcGIS). انتخاب تابع استاندارد سازی و محدوده مورد نظر با توجه به (جدول ۱۱) طرح ریزی شد (شکل ۱).

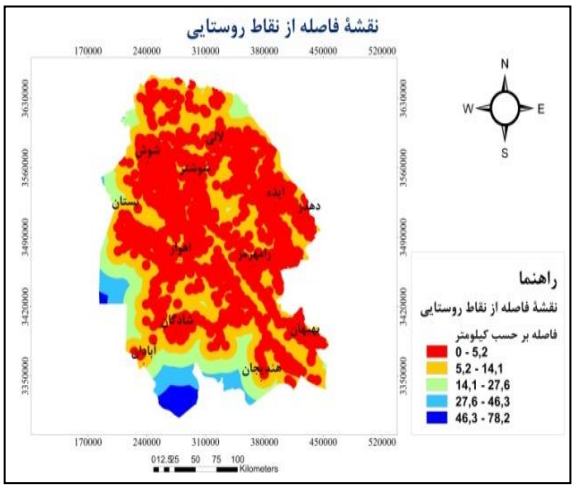
جدول ۱۱- تابع استاندارد سازی و محدودهٔ در نظر گرفته شده برای آن

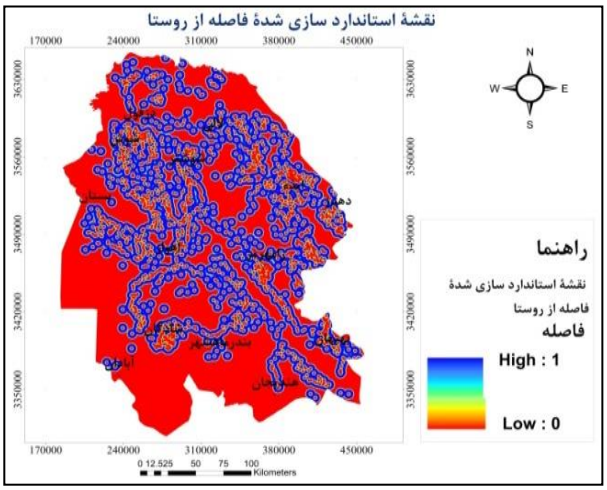
معیارهای مکان یابی	نقطه کنترل l	نقطه کنترل m	نقطه کنترل u	midpoint	spread	تابع عضویت فازی
معیارهای فنی						
ارتفاع از سطح دریا (برحسب متر)	محدوده استان	۳۰۰	۷۰۰	-	-	خطی
شیب و توپوگرافی زمین (برحسب درجه)	محدوده استان	۹	۱٤/۵	-	-	خطی
چگالی قدرت باد (برحسبوات برمترمربع)	۱۸۰/۳-	۲۰۹/۹۵	محدوده استان	-	-	خطی
فاصله از گسل (برحسب متر)	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰	محدوده استان	-	-	خطی
معیارهای زیست محیطی						
فاصله از مناطق حفاظت شده (برحسب متر)	-	-	-	۱۰۰۰	۵	بزرگ
فاصله از رودخانه (برحسب متر)	-	-	-	۳۰۰	۵	بزرگ
معیارهای اقتصادی						
فاصله از راه های ارتباطی (بر حسب متر)	۵۰۰	۱۰۰۰	محدوده استان	-		خطی
فاصله از راه های ارتباطی (برحسب متر)	محدوده استان	۳۰۰	۴۰۰۰	-	-	خطی
فاصله از شهر (برحسب متر)	۲۰۰۰	۳۰۰۰	محدوه استان	-	-	خطی
فاصله از شهر (برحسب متر)	محدوده استان	۵۰۰۰	۶۰۰۰	-	-	خطی
فاصله از روستا (برحسب متر)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	محدوده استان	-	-	خطی
فاصله از روستا (برحسب متر)	محدوده استان	۴۰۰۰	۵۰۰۰	-	-	خطی
فاصله از خطوط انتقال نیرو (برحسب متر)	محدوده استان	۱۰۰۰	۲۰۰۰	-	-	خطی

24- Fuzzy Membership

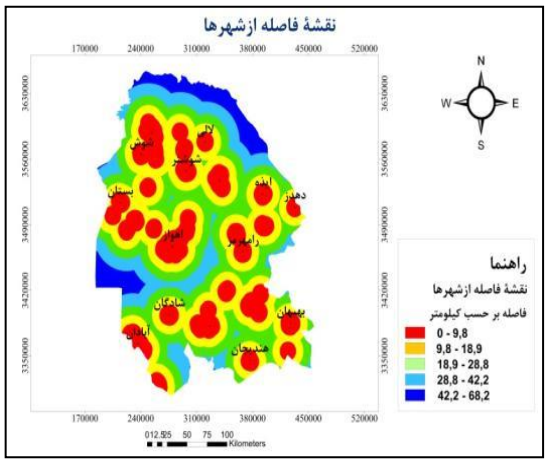
[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

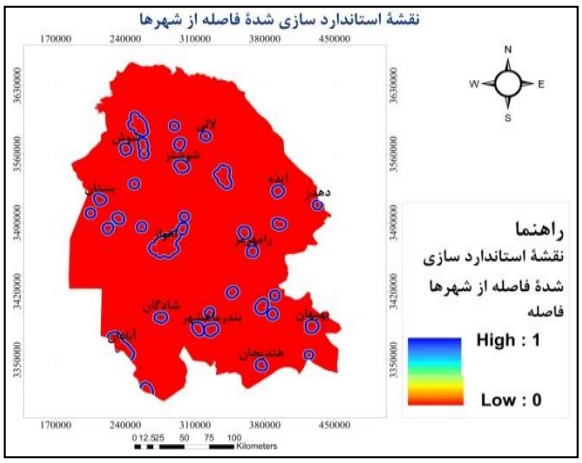
نقشه‌های حاصل از وزن‌دهی معیارها و استانداردسازی نقشه‌های حاصل، در (شکل‌های ٤ تا ١٦) نشان داده شده‌اند.



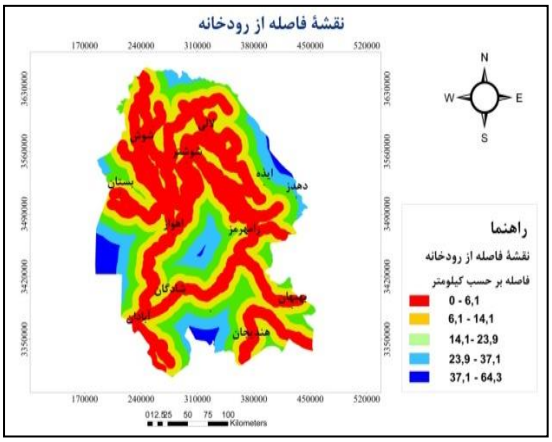


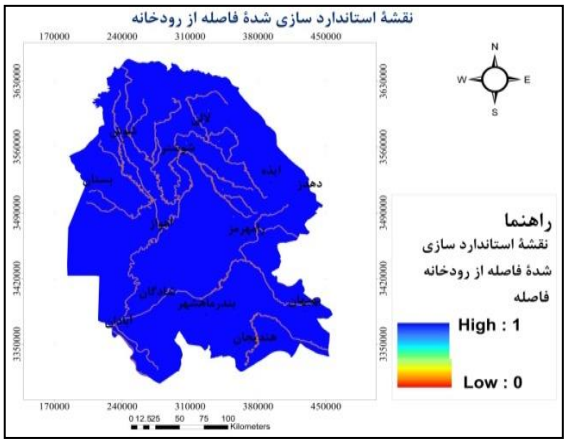
شکل ٤: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار فاصله از روستا





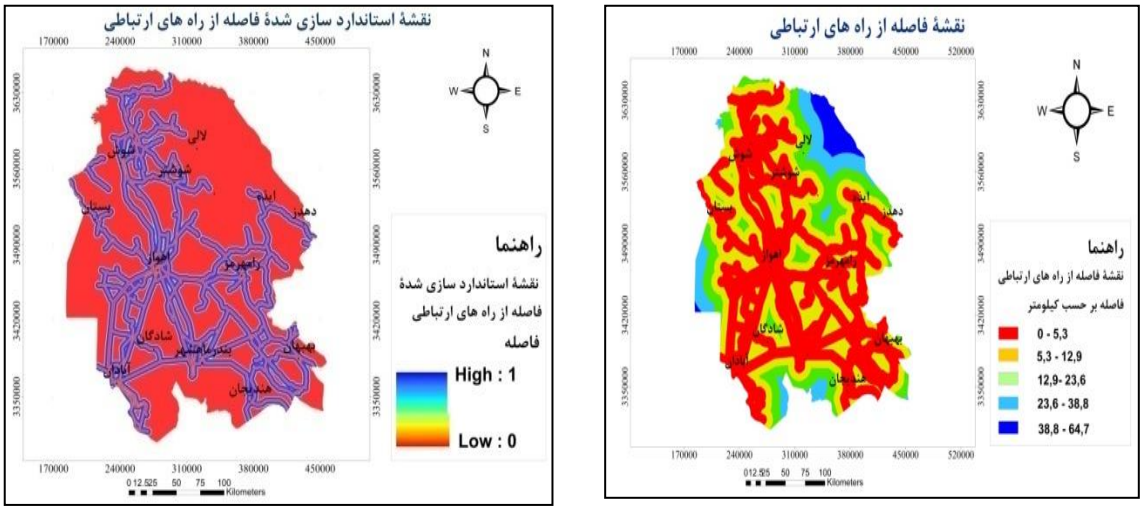
شکل ٥: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار فاصله از شهر



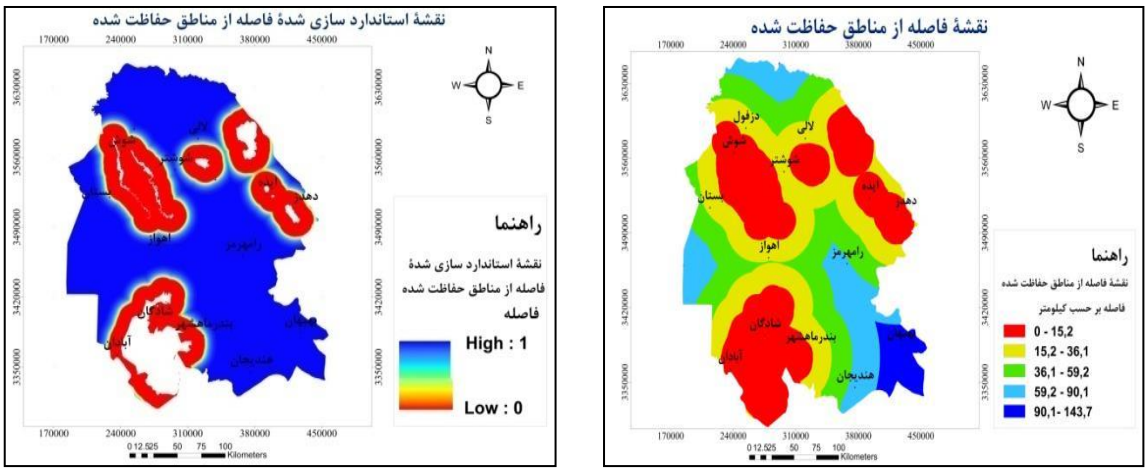


شکل ٦: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار فاصله از رودخانه

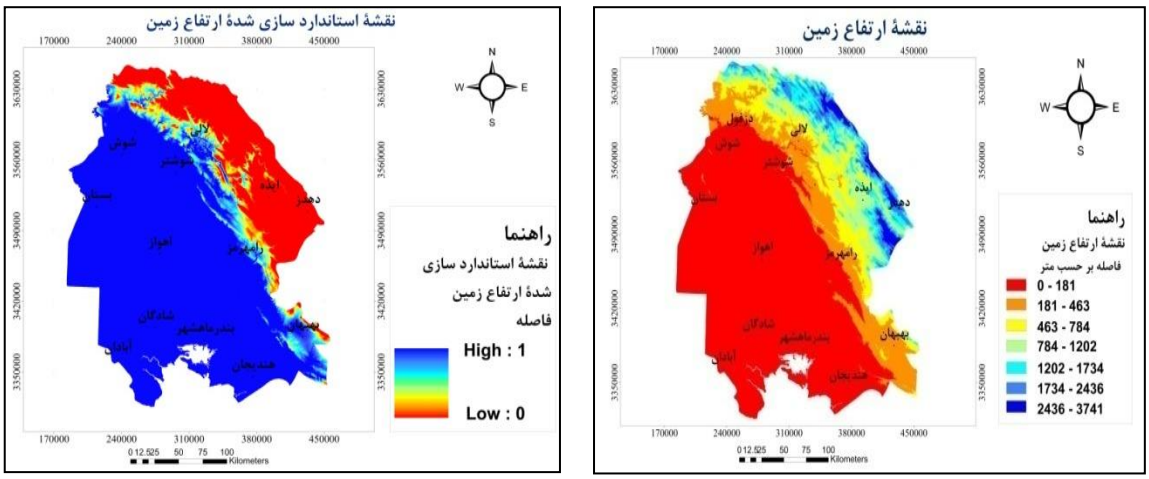
[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۷: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار فاصله از راه‌های ارتباطی

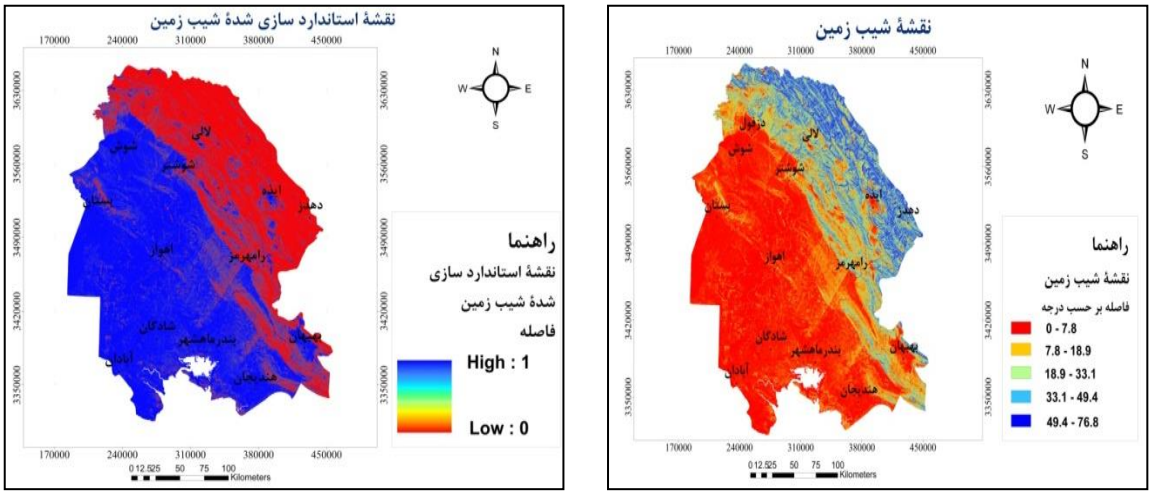


شکل ۸: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار فاصله از مناطق حفاظت شده

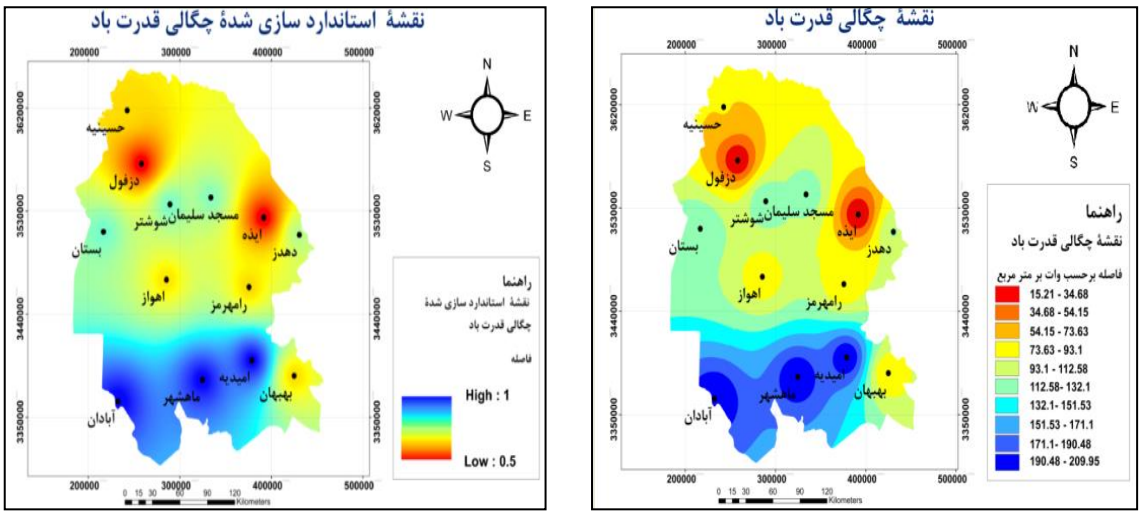


شکل ۹: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار ارتفاع زمین

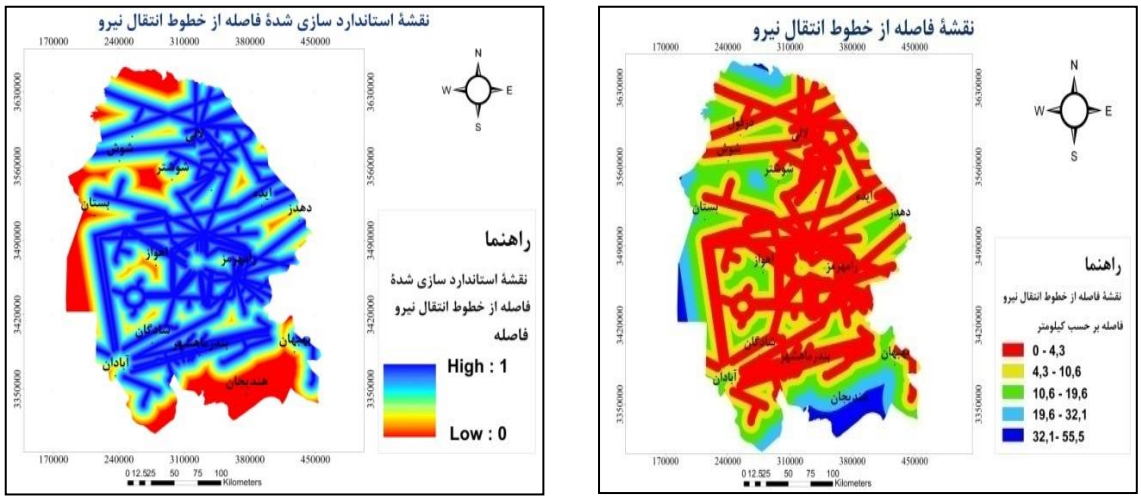
[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۱۰: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار شیب و توپوگرافی زمین

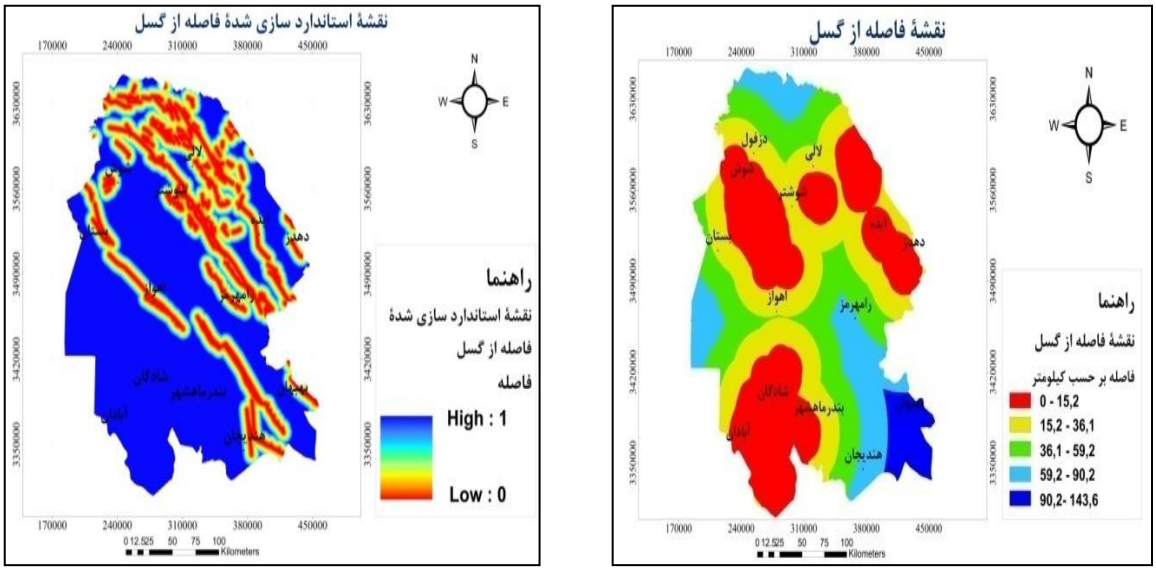


شکل ۱۱: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار چگالی قدرت باد



شکل ۱۲: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار فاصله از خطوط انتقال نیرو

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



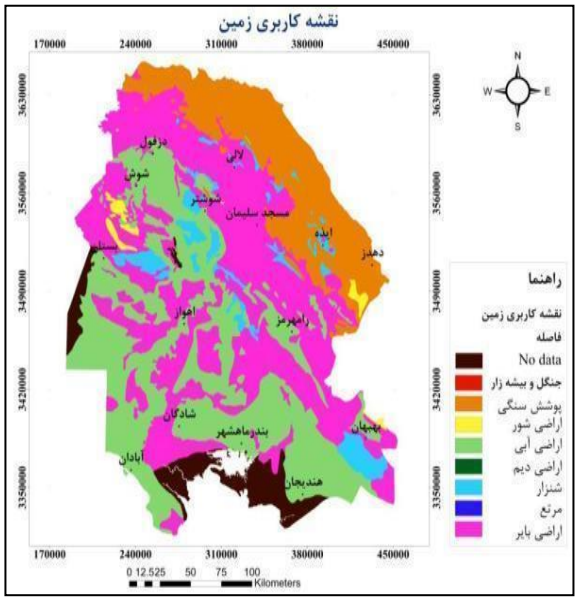
شکل۱۳: نقشه فاصله و نقشه استاندارد سازی شده برای معیار فاصله از گسل

نقشه‌های کاربری اراضی و جنس خاک بر اساس امتیازهای (جدول ۱۲) تبدیل به رستر شدند و در ادامه مراحل تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند.

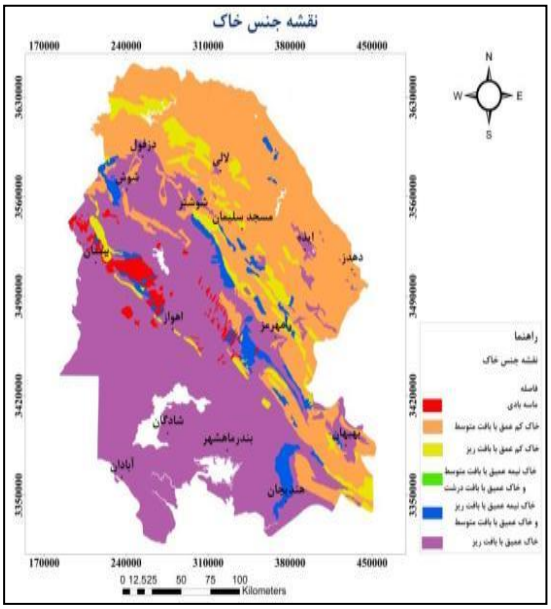
جدول ۱۲- ارزش‌های داده شده به کاربری اراضی و جنس خاک در استان خوزستان

نقشهٔ کاربری اراضی		نقشهٔ جنس خاک	
انواع کاربری اراضی موجود در استان خوزستان	ارزش	انواع خاک های موجود در استان خوزستان	ارزش
اراضی آبی	۰/۵	خاک کم‌عمق	۰/۷
اراضی بایر	۱	خاک کم‌عمق با بافت ریز	۰/۷۵
اراضی دیم	۰/٦	خاک کم‌عمق با بافت متوسط	۰/۷
اراضی شور	۰/٤	خاک نیمه‌عمیق با بافت ریز	۰/۸۵
پوشش سنگی	۰/۳	خاک نیمه‌عمیق با بافت متوسط	۰/۸
جنگل و بیشه‌زار	۰/۱	خاک عمیق با بافت ریز	۰/۹
دریاچه	۰	خاک عمیق با بافت متوسط	۰/۸۵
شن‌زار	۰/۷	خاک عمیق با بافت درشت	۰/۸
		ماسه بادی	۰/۳

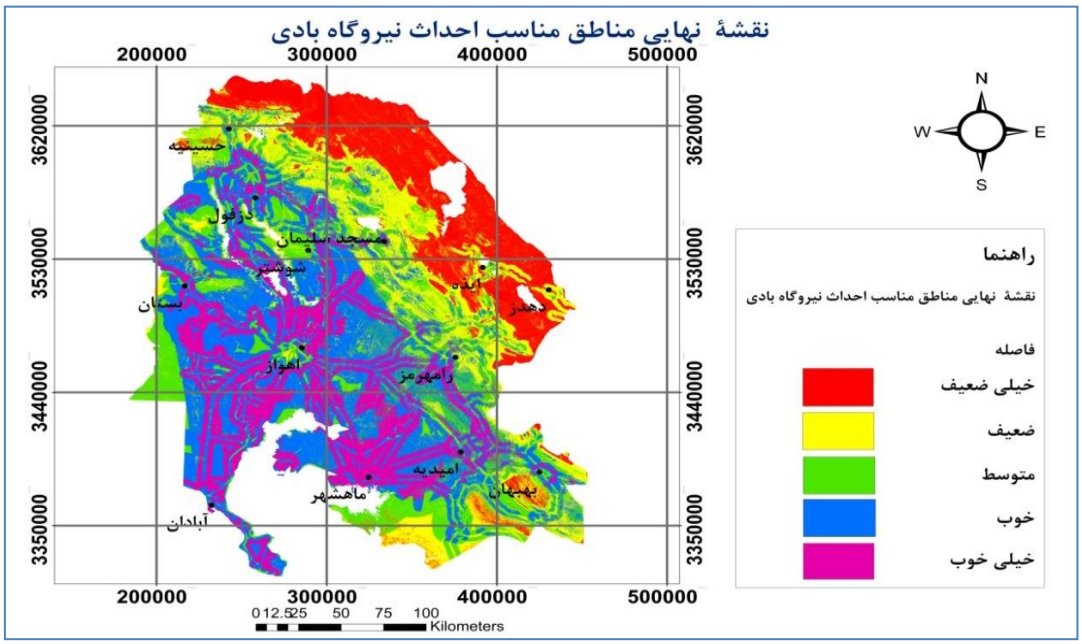
[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۱۴: نقشه رستری کاربری زمین در استان خوزستان



شکل ۱۵: نقشه رستری جنس خاک در استان خوزستان



شکل ۱۶: نقشهٔ نهایی مناطق مناسب احداث نیروگاه بادی

نتیجه‌گیری

در حال حاضر در کشور ایران انرژی تجدیدپذیر (مانند انرژی بادی) کم‌تر از ۱ درصد از تولید برق را به خود اختصاص داده و قرار است تا پایان دولت دهم به ۳ درصد و در پایان برنامه سند چشم انداز توسعه به ۱۰ درصد افزایش یابد. لذا بایستی گرایش به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌دلایلی همچون تجدیدپذیر بودن، در دسترس

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

بودن، آلودگی کم‌تر و مهم‌تر از همه توسعه پایدار اقتصادی موردتوجه قرار بگیرد. تعداد نیروگاه‌های بادی در کشور با توجه به قابلیت‌های مناسب نقاط مختلف کافی نیست و نیاز به توسعه این مکان‌ها در سایرنقاط بیش از پیش احساس می‌شود. از این‌رو این مطالعه با هدف امکان‌سنجی بهره‌برداری از انرژی باد در استان خوزستان با اولویت مشخص نمودن بهترین مناطق برای نصب توربین‌های بادی انجام شد.

با توجه به نقشه نهایی مشخص شد که مناطق خیلی مناسب از نظر احداث نیروگاه بادی به‌صورت نوارهایی می‌باشند که اصولاً تمام معیارها را به‌صورت کامل دارا می‌باشند. مناطق خوب از نظر احداث نیروگاه بادی، اصولاً در مناطق کم ارتفاع قرار دارند که از دامنه‌های کوه‌های زاگرس شروع شده و تا مرز استان یا ساحل خلیج فارس امتداد دارند. مناطق خیلی ضعیف و ضعیف اصولاً در مناطق کوهستانی شرق و شمال‌شرق استان خوزستان قرار دارند که یکی از دلایل آن طبیعت کوهستانی و گسل‌خیز بودن این ناحیه است. مناطق متوسط نیز اصولاً به‌صورت نوارهایی یا در فاصله بین مناطق خوب و ضعیف قرار دارند یا این‌که در نزدیکی سواحل خلیج فارس قرار دارند که این امر نشان می‌دهد که از نظر یک یا چندمعیار (مثل جنس خاک و حتی قسمتی از مناطق حفاظت شده) مناسب نمی‌باشند. مشخص شده است که روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) از نظر روش تصمیم‌گیری جزء یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های موجود برای اهداف این چنینی است (همانند روش‌های هوش محاسباتی مثل روش استنتاج فازی). چرا که این روش به‌جای در نظر گرفتن عددی خاص و غیرانعطاف برای هر معیار، بازه‌ای را برای آن معیار در نظر می‌گیرد.

هدف این تحقیق مکان‌یابی مناطق مناسب برای احداث نیروگاه بادی است، بنابراین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، مناطق مناسب شناسایی شدند و همین‌طور با توجه به داده‌های هواشناسی و محاسبه چگالی قدرت باد (جدول ۵) مشخص شد که استان خوزستان برای احداث نیروگاه بادی کوچک‌مقیاس و توربین تجاری به‌صورت مزرعه بادی مناسب است زیرا بیش‌ترین فراوانی سرعت باد در این استان بین محدوده $\frac{m}{s}$ ۷-۳ است که در این محدوده سرعت، نیروگاه بادی کوچک‌مقیاس و مزارع بادی تجاری (البته با کارایی کم‌تر) قابل راه‌اندازی و نصب است که این مقدار سرعت باد، در واقع آستانهٔ لازم برای راه‌اندازی توربین‌های کوچک غیرمتصل به شبکه سراسری برق می‌باشد. به‌طورکلی توربین‌ها را باتوجه به سرعت متوسط سالانهٔ باد می‌توان به دو شکل توربین‌های منفرد و مزرعه بادی احداث نمود. امروزه بهره‌گیری ازانرژی بادی به شکل مزرعه بادی مطلوبیت بیش‌تری دارد و در صورت عدم وجود مناطق مناسب برای استقرار مزرعه بادی، امکان بهره‌گیری از توربین‌های منفرد مدنظر قرار می‌گیرد.

مهم‌ترین نکات در خصوص صحت مکان‌های پیشنهادی برای احداث نیروگاه بادی در استان خوزستان بدین صورت می‌باشد: مناطق مناسب برای احداث نیروگاه بادی در قسمت‌های غربی، جنوب‌غربی و قسمتی از مرکز استان خوزستان شناسایی شدند که دلایل آن‌ها مناسب‌تر بودن معیارهای تأثیرگذار در احداث نیروگاه بادی و همچنین وجود بادهای قوی‌تر در این بخش می‌باشد؛ زیرا با توجه به (جدول ۵) و مشاهده اعداد چگالی قدرت باد (به‌عنوان کلیدی‌ترین عامل احداث نیروگاه باد) مشخص می‌شود که آمار هواشناسی ایستگاه‌های آبادان، امیدیه و

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

ماهشهر دارای بیش‌ترین مقادیر چگالی قدرت باد (مهم‌ترین عامل در احداث نیروگاه بادی) هستند که در نقشه نهایی مناطق مناسب احداث نیروگاه بادی نیز این مناطق جزء مناطق با حداکثر ظرفیت برای احداث نیروگاه بادی شناخته شده‌اند. کما این‌که بیش‌تر بادهای استان خوزستان بادهایی‌اند که از جهت جنوبی و غربی و جنوب‌غربی می‌وزند و این بادها در قسمت‌های نامبرده شدیدتر بوده و هرچه به قسمت‌های شرقی و شمالی این استان پیش می‌رود از شدت و قدرت آن‌ها کاسته می‌شود بنابراین در قسمت‌های غربی و جنوب‌غربی بادها شدیدتر و به‌صورت مداوم‌تری می‌وزند. لازم به ذکر است که تحقیق انجام شده توسط مرشدی و همکاران و اصغری‌پور و همکاران نیز مکان‌های مشابهی (جنوبغرب، جنوب و نوارهایی از مرکز استان) برای احداث نیروگاه بادی مناسب تشخیص دادند.

نکته پایانی این‌که یکی از مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه بادی، سواحل هستند اما در استان خوزستان به‌دلیل فقدان شیب لازم، وقوع جزر و مد باعث شده که منطقه جزر و مدی[۲۵] بسیار وسیع باشد و مانع استقرار تجهیزات موردنظر شود و امکان نصب تأسیسات و از جمله نیروگاه بادی را در این مناطق کاهش داده است.

25- Intertidal

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

منابع

- اصغری پور دشت بزرگ، ا؛ مرشدی، ج؛ برنا، ر (۱۳۹۰)، «کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی در مکان‌یابی احداث نیروگاه‌های بادی (مطالعه موردی: استان خوزستان)»، ***کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی***، شماره ۳، صص ۹۵-۷۷.

- امیدوار، ک؛ دهقانطزرجانی، م (۱۳۹۱)، «پتانسیل سنجی و برآورد مشخصه های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه‌های همدیدی استان یزد»، ***فصلنامه تحقیقات جغرافیایی***، شماره ۱۰۵، صص ۱۶۸-۱۴۹.

- جباری، ع؛ شایقی، ح؛ اسماعیل‌نژاد، ب؛ زواری، ا؛ نجفی، د (۱۳۹۱)، «مکان‌یابی و اندازه‌یابی بهینه توربین‌های بادی در شهرستان مشکین شهر با لحاظ عوامل فنی و اقتصادی و امکان‌سنجی نصب در الگوریتم گسسته کرم شب‌تاب»، نخستین کنفرانس انرژی بادی ایران، ۱۸ و ۱۹ مهر ماه ۱۳۹۱، صص ۹-۱.

- زنجیرچی، م (۱۳۹۰)، «***فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی***»، تهران، انتشارات صانعی شهمیرزادی.

- عطائی، م (۱۳۸۹)، «***تصمیم‌گیری چند معیاره فازی***»، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

- مجرد، ف؛ همتی، ش (۱۳۹۲)، «ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان»، ***تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی***، شماره ۲۹، صص ۱۵۷-۱۳۷.

- مرشدی، ج؛ برنا، ر؛ اصغری پور دشت بزرگ، ا؛ احمدی، ه؛ ظاهری عبده وند، ز (۱۳۸۹)، «مکان‌یابی نیروگاه های بادی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط GIS»، ***کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در برنامه ریزی***، شماره ۲، صص ۱۱۱-۹۷.

- نوراللهی، ی؛ اشرف، م؛ زمانی، م (۱۳۹۰)، «پتانسیل‌سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)»، ***انرژی ایران***، شماره ۱، صص ۲۲-۲.

- Aydin, N.,Yonca, k., Elcin, D. S., (2010), "GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatialplanning: A case study from Western Turkey", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 29: 364–373

- Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P., Chetpattananondh, K., (2007), "Site selection for large wind turbine using GIS", ***PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment – ICEE***.

- Bratton, C. D., Womeldorf, A. C., (2011), "The wind shear exponent: comparing measured against simulated values and analyzing the phenomena that affect the wind shear", Proceedings of ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability ES2011, pp 1-7.

- Daneshvar Rouyendegh, B., Erkan, T. E., (2012), "Selection of academic staff using the fuzzy analytic hierarchy process (fahp): a pilot study", ***Technical Gazette***, 56: 923-929.

- Gorsevski, P. V., Cathcart, S., Mirzaei, G., Jamali, M. M., Ye. Xinyue, G., Enrique, (2013), "A group-based spatial decision support system for wind farm site selection in Northwest Ohio", ***Energy Policy***, 55: 374-385.

- Janke, J. R., (2010), "Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado", ***Renewable Energy***, 35: 2228-2234.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

- Keyhani, A., Ghasemi, M., Khanali, M., Abbaszadeh, R., (2010), "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran", ***Energy***, 35: 188-201.
- Marciukaitis, M., Katinas, V., Kavaliauskas, A., (2008), "Wind power usage and prediction prospects in Lithuania", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 12: 265-277.
- Ramachandra,. T. V., Shruthi, B. V., (2005), "Wind energy potential mapping in Karnataka, India, using GIS", ***Energy Conversion and Management***, 46: 1561-1578.
- Reiszade, M., Motahar, S., (2011), "The wind energy potential in the coasts of Persian Gulf used in design and analysis of a horizontal axis wind turbine", ***World Renewable Energy Congress-sweden***, 46: 4058-4065
- Talinli, I., Topuz, E., Aydin, E., Kabakci, S. B., (2011), "A Holistic Approach for Wind Farm Site Selection by FAHP", ***Wind Farm-Technical Regulation***, Potential Estimation and Sitting Assessment, 33: 213-234
- World Wind Energy Report (2009), "9th world wind energy conference & exhibition large-scale integration of wind power", Istanbul, Turkey, 15-17 June 2010. [on line]: www.wwec2010.com.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]