

مکان‌یابی مناطق برای ساخت نیروگاه‌های بادی به کمک روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت سیستان)

ساناز تناکیان^۱، حسین پیری صحراگرد^{۲*}، میثم امیری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۱۷

چکیده

با توجه به پتانسیل قوی منطقه سیستان از نظر انرژی باد به‌عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، یافتن مکان بهینه برای استقرار تجهیزات و تأسیسات بهره‌برداری از انرژی باد ضروری است. در این راستا پژوهش حاضر با هدف تعیین مکان مناسب برای احداث نیروگاه‌های بادی، با توجه به معیارها و زیر معیارهای آب‌وهوایی (سرعت باد و جهت باد)، جغرافیایی (ارتفاع و شیب)، اقتصادی - اجتماعی (فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از راه‌های ارتباطی و نزدیکی به شبکه انتقال نیرو) و زیست‌محیطی (فاصله از مناطق حفاظت‌شده و فاصله از آبراهه‌ها)، با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منطقه سیستان انجام شد. برای این منظور، وزن هریک از معیارها و گزینه‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی تعیین شد. تحلیل فضایی و تلفیق لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS انجام و نقشه تناسب اراضی برای احداث نیروگاه بادی در چهار کلاس (عالی، خوب، متوسط و ضعیف) تهیه شد. بر اساس نتایج، ۷۱۳۰ کیلومترمربع از کل مساحت منطقه مورد مطالعه (۱۶۲۰۷ کیلومترمربع) که در محدوده شهرستان‌های نیمروز و هامون قرار گرفته، به دلیل مسطح بودن، وزش بادهای مداوم و پر قدرت با جهت غالب شمالی و در نتیجه کسب امتیاز بالاتر از سایر معیارها، در مقایسه با سایر مناطق، برای ساخت نیروگاه بادی دارای تناسب عالی است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده تلفیقی از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی، به‌عنوان یک سیستم پشتیبان، می‌تواند با شناسایی مناطق دارای شایستگی بالاتر، علاوه بر فراهم آوردن امکان توسعه پایدار منطقه، موفقیت طرح‌های استفاده از انرژی‌های نوین را به همراه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستان، نیروگاه بادی، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)، سامانه اطلاعات جغرافیایی.

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد بیابان‌زدایی، دانشگاه زابل

۲. استادیار دانشکده آب و خاک، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه زابل، نویسنده مسئول / hopiry@uoz.ac.ir

۳. عضو هیئت‌علمی، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، گروه پژوهشی مدیریت منابع آب، دانشگاه زابل

مقدمه

انرژی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در توسعه و پیشرفت فعالیت‌های انسانی، عامل مهمی در توسعه پایدار جوامع انسانی است. رشد تقاضا برای انرژی، افزایش استانداردهای زندگی، خطر گرم‌شدن کره زمین و کمبود منابع سوخت‌های فسیلی باعث شده تا توجه جهانی بر روی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر متمرکز شود (کایا و کهرمان^۱، ۲۰۱۱). در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی باد به‌دلیل فراوانی، تجدیدپذیری، اقتصادی و پاک بودن، امنیت در عرضه انرژی و همچنین حفاظت از محیط‌زیست در حال افزایش است (آیدین^۲، ۲۰۱۰؛ بهرامی و عباس‌زاده، ۲۰۱۳). از سوی دیگر، به‌دلیل مسائلی مانند توسعه سریع در فناوری‌های مرتبط با استحصال انرژی باد، هزینه‌های کم‌استحصال این نوع انرژی، نصب راحت و راه‌اندازی سریع توربین‌های بادی، باعث شده است تا این نوع انرژی جایگزین مطمئنی برای سیستم‌های انرژی امروزه به شمار آید (تسوتسوس^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ کیم^۴ و همکاران، ۲۰۱۶).

با توجه به وسعت زیاد کشور و تنوع توپوگرافی، مطالعه دقیق پتانسیل‌های مربوط به انرژی باد و امکان‌سنجی استقرار تجهیزات و تأسیسات بهره‌برداری از این پتانسیل مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی است. بنابراین بررسی تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه‌های بادی به‌شکل ناحیه‌ای ضروری است (صلاحی، ۲۰۰۴؛ رزمی و همکاران، ۲۰۱۵). در این راستا، در سال‌های اخیر استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در تلفیق با روش‌های ارزیابی چندمعیاره با هدف یافتن مکان بهینه در مناطق مختلف کشور افزایش یافته است (مینایی، ۲۰۰۹؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۳؛ اسدی و همکاران، ۲۰۱۳؛ طباطبایی و امیری، ۲۰۱۵).

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، بسیاری از مناطق بادخیز کشور، مانند شهرستان رفسنجان در استان کرمان،

شهرستان‌های روانسر، سرپل ذهاب و کنگاور در استان کرمانشاه، مناطق شمال شرقی استان بوشهر، شمال و غرب استان خوزستان، منجیل در استان گیلان و شهرستان نمین در استان اردبیل برای استقرار نیروگاه بادی دارای شایستگی بالایی هستند (صباحی و همکاران، ۲۰۱۱؛ امیرشاهی و نصیرپور، ۲۰۱۵). علاوه بر این، مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با استفاده از ارزیابی چندمعیاره مکانی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در استان بوشهر نشان داد که مناطق شرقی استان بوشهر بهترین مکان برای احداث نیروگاه‌های بادی هستند (طباطبایی و امیری، ۲۰۱۵). همچنین لاتینوپولوس و کچاگیا^۵ (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی و با لحاظ کردن عوامل تکنولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به انتخاب سایت مناسب برای احداث نیروگاه‌های بادی در یونان پرداختند. نتایج پژوهش این محققان نشان داد که بیش از ۱۲ درصد از منطقه مطالعه‌شده از پتانسیل بالایی برای احداث نیروگاه‌های بادی برخوردار است. با توجه به این توانمندی، می‌توان با برنامه‌ریزی مناسب، بخش زیادی از انرژی مورد نیاز کشور را با احداث نیروگاه‌های بادی در مناطق مستعد تأمین کرد، اما در حال حاضر کمتر از ۲ درصد از مجموع کل پتانسیل موجود در سطح کشور مورد بهره‌برداری قرار گرفته است (علم‌الهدی، ۲۰۱۰).

با توجه به موارد ذکرشده، ایستگاه زابل در تمام ماه‌های سال به‌جز آذر و دی دارای توان بادخیزی بالایی است و از این نظر یکی از مناسب‌ترین مناطق برای احداث نیروگاه بادی است (امیرشاهی و نصیرپور، ۲۰۱۵). به عبارت دیگر، با توجه به وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، همچنین وزش بادهایی با سرعت و تداوم مناسب و عدم ارزیابی تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی، همچنین عدم استفاده از پتانسیل انرژی باد به‌عنوان انرژی‌های پاک و نو در سطح منطقه سیستان، استفاده از روش‌هایی با کارایی و دقت بالا برای شناسایی عوامل مؤثر در مکان‌یابی استقرار نیروگاه‌های بادی یکی از ملزومات توسعه منطقه است و می‌تواند با شناسایی مناطق دارای شایستگی بالاتر، امکان موفقیت طرح‌های توسعه‌ای را

1. Kaya & Kahraman

2. Aydin

3. Tsoutsos

4. Kim

5. Latinopoulos & Kechagia

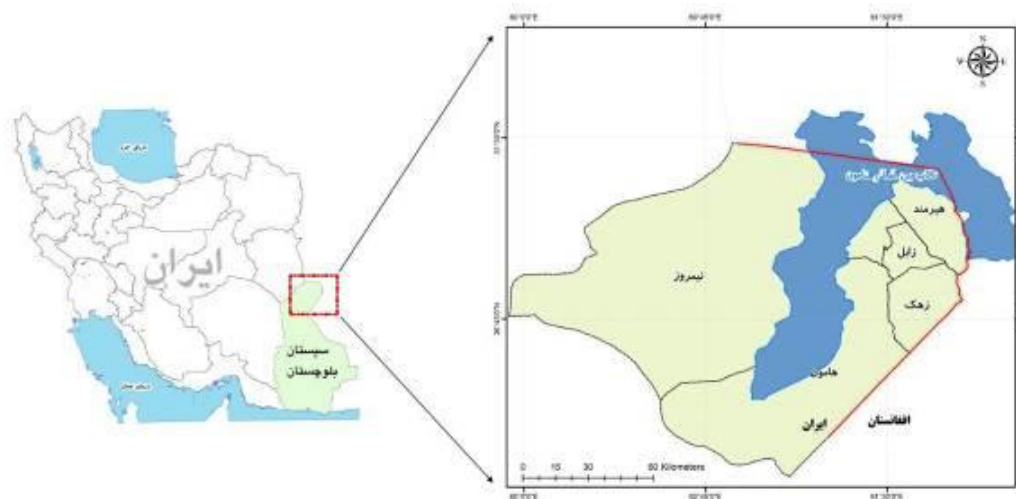
تبخیر زیاد، بارندگی کم و پراکنده، بادهای شدید و طوفان شن را نام برد (سرگلزایی، ۲۰۰۹). بادهای صد و بیست روزه، باد قوس و باد هفتم از جمله مهم‌ترین بادهای دشت سیستان است. سرعت وزش بادهای شمالی و شمال‌غربی در اغلب موارد بیش از ۱۵ کیلومتر است و معمولاً به حدود ۲۵ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت می‌رسد. همچنین مواردی که در آن سرعت باد به ۷۰ تا ۹۰ و گاهی هم ۱۰۸ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت برسد، نیز مشاهده شده‌است. حداکثر سرعت باد در منطقه سیستان مربوط به بادهای ۱۲۰ روزه است که به ۱۰۰ و حتی ۱۲۰ کیلومتر در ساعت هم می‌رسد (سرگلزایی، ۲۰۱۴). سیستان از نظر اقلیمی دارای آب و هوای گرم و خشک و بیابانی است. تابستان در سیستان بسیار گرم و زمستان‌ها سرد است. در این منطقه، تیرماه با حداکثر درجه حرارت سالانه 53°C گرم‌ترین ماه سال و دی ماه با حداقل حرارت مطلق 12°C زیر صفر سردترین ماه سال می‌باشد. منطقه سیستان در مسیر فعل و انفعالات جوی میان کانون‌های نسبی پرفشار در شمال شرق کشور و کانون‌های نسبی کم فشار در جنوب شرق کشور قرار گرفته و وزش بادهای آن شدیداً متأثر از این فعل و انفعالات است. این امر موجب می‌شود که منطقه سیستان از نظر جوی جریانات هوا در منطقه فعالی قرار داشته‌باشد (سرگلزایی، ۲۰۰۹). بیشترین جهات وزش باد مربوط به بادهای شمالی و شمال‌غربی می‌باشد که حدود هشتاد درصد کل موارد مشاهده را به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۲).

افزایش داده و علاوه بر ایجاد اشتغال و درآمد، با اتخاذ تصمیمات مناسب از هدررفت هزینه‌ها نیز جلوگیری کند. از سوی دیگر، با توجه به تعدد عوامل مؤثر در ارزیابی تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه‌های بادی، بهره‌گیری از روش‌هایی که با در نظر گرفتن وزن همه عوامل مؤثر، قادر باشد نتایجی تولید کند که علاوه بر دقت بالا از نظر سرعت عمل و سهولت انجام عملیات در حد بالایی قرار داشته باشد، از اولویت‌های پژوهشی منطقه است. با توجه به این مهم، پژوهش حاضر در تلاش است تا با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، علاوه بر شناسایی عوامل دارای وزن بیشتر، مکان‌های با شایستگی بیشتر را برای استقرار نیروگاه‌های بادی در منطقه سیستان شناسایی کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه سیستان با مساحت ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی بین 30° درجه و 18° دقیقه تا 31° درجه و 20° دقیقه عرض شمالی و 61° درجه و 10° دقیقه تا 61° درجه و 50° دقیقه طول شرقی، در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده‌است (شکل ۱). این منطقه از شمال و شرق به کشور افغانستان، از جنوب به شهرستان زاهدان و از مغرب و شمال غربی به دشت لوت و شهرستان نهبندان استان خراسان جنوبی محدود می‌شود. از خصوصیات بارز آب‌وهوایی این منطقه می‌توان به بالا بودن میزان زمان تشعشع خورشید، فراوانی دامنه تغییرات درجه حرارت روزانه و فصلی، رطوبت کم،



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کشور و استان سیستان و بلوچستان

Figure (1): Geographical location of study area in the country, Sistan and Baluchestan province

روش تحقیق

در این تحقیق، از آمار بیست ساله آب و هوایی شامل سرعت باد، جهت باد، دما و فشار منطقه سیستان (زابیل، زهک، هیرمند و هامون) و مناطق اطراف دشت سیستان (زاهدان، نهبندان، بیرجند، قاین، شهداد و بم) در بازه زمانی ۱۳۷۵-۱۳۹۵ با توجه به اطلاعات در دسترس استفاده شد. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از نظر کارشناسان و خبرگان، معیارهای آب و هوایی (سرعت باد و جهت باد)، معیارهای جغرافیایی (ارتفاع و شیب)، معیارهای اقتصادی - اجتماعی (فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از راه‌های ارتباطی و نزدیکی به شبکه انتقال نیرو) و زیست محیطی (فاصله از مناطق حفاظت شده و فاصله از آبراهه‌ها) به عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین معیارها انتخاب و مقایسه زوجی هریک از معیارها و زیرمعیارها انجام شد و سپس وزن معیارها و زیرمعیارها از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و با استفاده از نرم‌افزار Fuzzy AHP Solver به دست آمد. بعد از محاسبه وزن هریک از معیارها و زیرمعیارها، نقشه‌های مورد نیاز برای مکان‌یابی احداث نیروگاه‌های بادی در منطقه مورد مطالعه، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. برای تهیه لایه سرعت باد و جهت باد از اطلاعات ایستگاه‌های بادسنجی و سینوپتیکی و روش درونیابی استفاده و نقشه ارتفاع و شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تهیه شد. در مرحله بعد، هریک از نقشه‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی طبقه‌بندی شد و بر اساس مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به هم، طبق نظر کارشناسی، به هر کلاس امتیاز داده شد. بعد از تعیین وزن هریک از کلاس‌ها نرخ ناسازگاری قضاوت‌ها با استفاده از روابط زیر محاسبه شد:

$$C.R. = C.I. / R.I \quad (1)$$

$$C.I. = \lambda \text{Max-n} / n-1 \quad (2)$$

جدول (۱): دامنه معیارهای مورد استفاده برای حذف مناطق دارای محدودیت

Table (1): Range of used criteria to remove areas with restrictions

معیار	حدود دارای محدودیت برای مکان‌یابی
فاصله از شبکه انتقال نیرو	مناطق با فاصله کمتر از ۵۰۰ متر
فاصله از راه‌های ارتباطی	مناطق با فاصله کمتر از ۱۵۰۰ متر
فاصله از مناطق مسکونی	مناطق با فاصله کمتر از ۲۵۰۰ متر
فاصله از فرودگاه	مناطق با فاصله کمتر از ۳۰۰۰ متر

در این روابط، n تعداد معیارها و R.I شاخص سازگاری تصادفی است. به‌طور خلاصه، برای انجام تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، پس از رسم نمودار سلسله‌مراتبی و تعریف اعداد فازی به‌منظور انجام مقایسات زوجی، Si برای هریک از سطوح ماتریس مقایسه زوجی محاسبه و درجه ارجحیت Si ها نسبت به هم تعیین شد. در مرحله بعد، پس از محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس مقایسات زوجی، نرمال‌سازی انجام و وزن بردار نهایی محاسبه شد (شیرویه‌زاد و سروش، ۲۰۱۴).

جدول (۲) طبقات معیارهای مؤثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه‌های بادی و میزان ارجحیت و امتیاز آن‌ها را نشان می‌دهد. در گام بعد، وزن‌های به‌دست‌آمده از مدل در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در هریک از لایه‌های مربوط به خود با دستور Calculator Field ضرب شده و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تلفیق و همپوشانی نقشه‌ها صورت گرفت و بعد اقدام به شناسایی نواحی دارای محدودیت شد (جدول ۱). در مرحله بعد، نقشه محدودیت در نقشه نهایی ضرب شده و مناطق دارای محدودیت از کل نقشه حذف شد. در نهایت، نقشه مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های بادی تهیه و نقشه نهایی با دقت ۵۰۰ مترمربع به‌صورت رستری حاصل شد. سپس نقشه حاصل در چهار کلاس در بازه‌های مساوی (عالی، خوب، متوسط و ضعیف) طبقه‌بندی شد. شکل (۲) فرایند مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با تلفیق سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات اداره هواشناسی و گلباد منطقه سیستان، جهت باد غالب در منطقه شمال غرب بوده و حداکثر سرعت باد ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت است (شکل ۳).

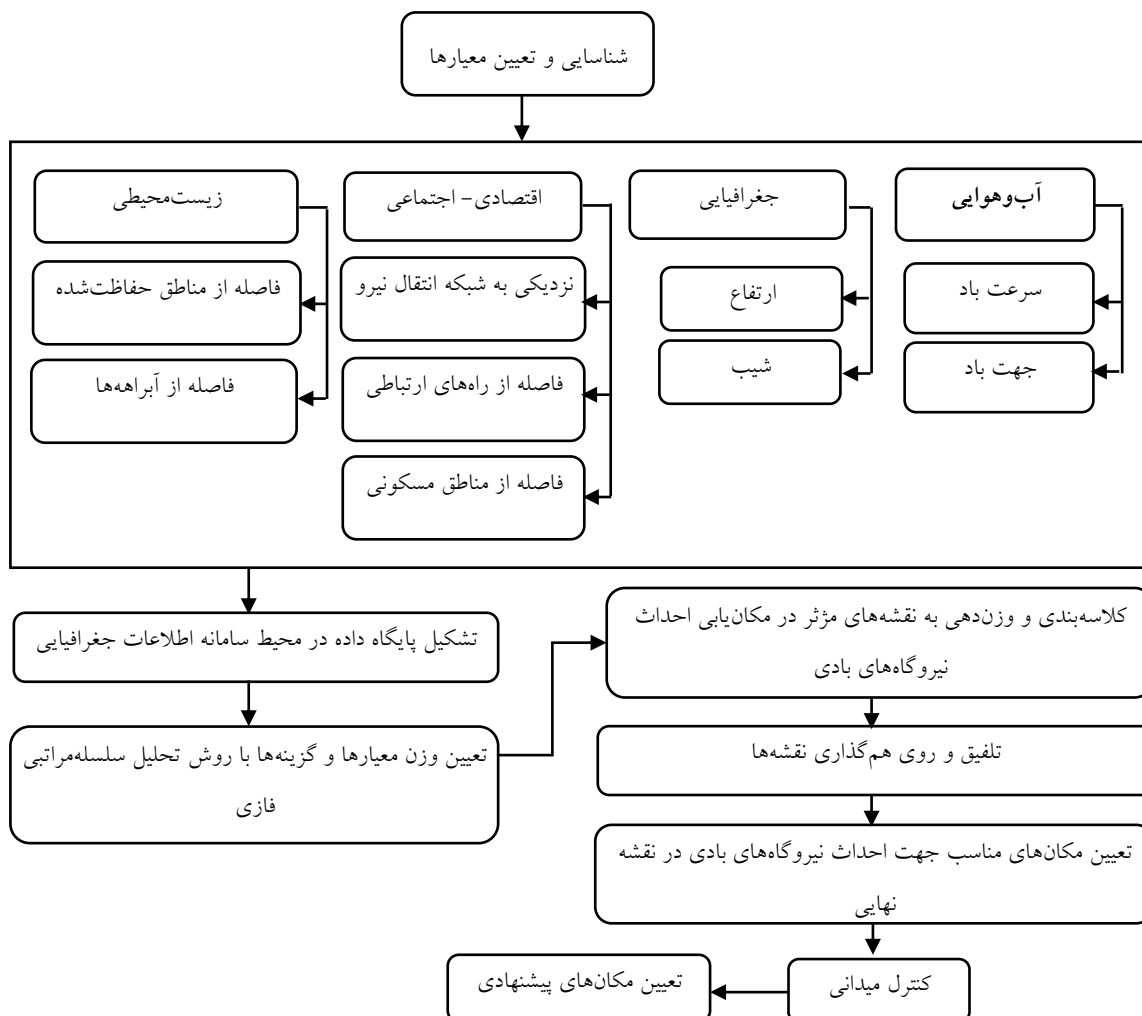
فاصله از مناطق حفاظت‌شده
فاصله از منابع آب‌های سطحی

مناطق با فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متر
مناطق با فاصله کمتر از ۲۵۰ متر

جدول (۲): طبقات معیارهای مؤثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه‌های بادی و میزان ارجحیت و امتیاز آن‌ها در دشت سیستان

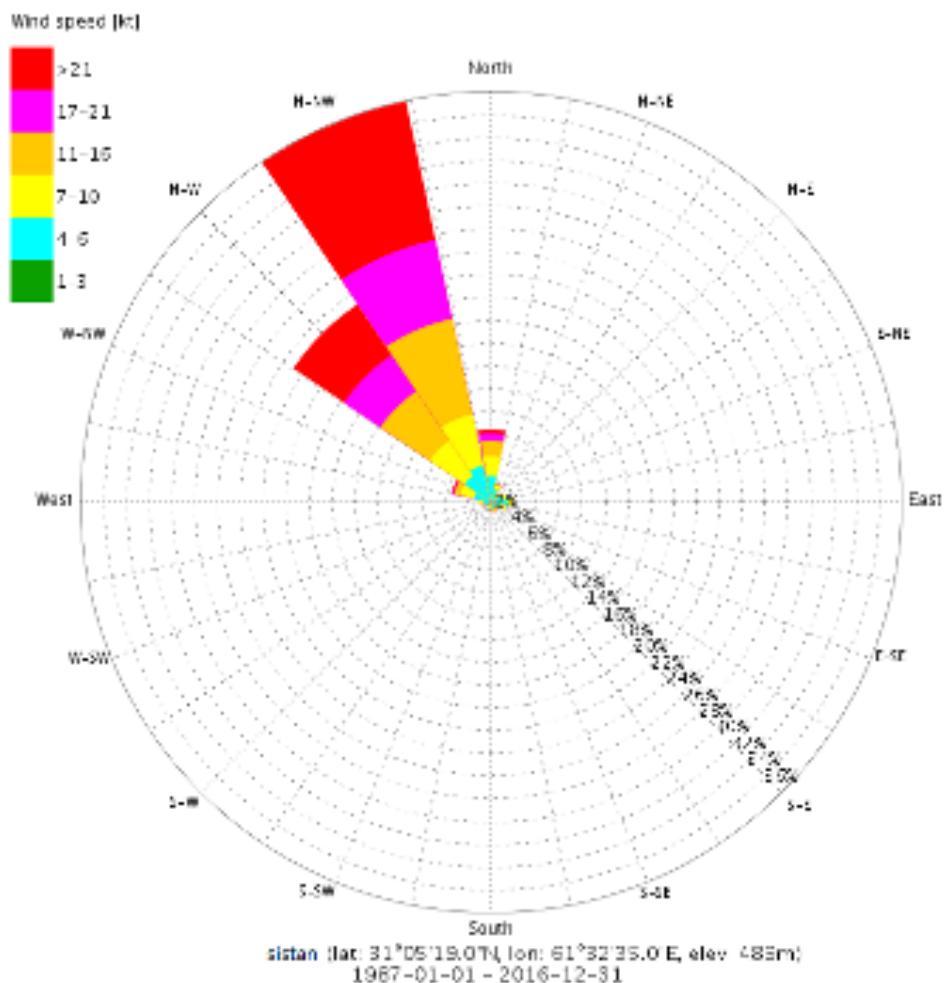
Table (2): Classes of effective criteria for assessing potential wind power plants construction and its priorities and scores in Sistan plain

میزان ارجحیت و امتیاز				طبقات معیارهای مؤثر	
نامناسب	نسبتاً مناسب	مناسب	بسیار مناسب		
-	۲/۵ - ۵/۵	۵/۶ - ۵/۵	۶/۵ <	سرعت باد (کیلومتر بر ساعت)	آب‌وهوایی
W-NW	N	N-W	N-NW	جهت باد	
۱۵۰۰ - >۲۰۰۰	۱۵۰۰ - ۱۲۰۰	۱۲۰۰ - ۸۰۰	۸۰۰ - ۵۰	ارتفاع (متر)	جغرافیایی
۱۱ - >۱۵	۱۱ - ۷	۷ - ۳	۳ - ۰	شیب (درصد)	
۴۵۰۰ <	۱۵۰۰ - ۰	۴۵۰۰ - ۱۵۰۰	-	فاصله از شبکه انتقال نیرو (متر)	اقتصادی -
۴۵۰۰ <	۴۵۰۰ - ۳۰۰۰	۳۰۰۰ - ۱۵۰۰	۱۵۰۰ - ۵۰۰	فاصله از راه‌های ارتباطی (متر)	اجتماعی
۴۰۰۰ - ۲۵۰۰	۵۵۰۰ - ۴۰۰۰	۷۰۰۰ - ۵۵۰۰	>۷۰۰۰	فاصله از مناطق مسکونی (متر)	
۱۰۰۰ - ۰	-	۱۰۰۰ <	-	فاصله از مناطق حفاظت‌شده (متر)	زیست‌محیطی
۱۵۰۰ - ۰	۳۰۰۰ - ۱۵۰۰	۳۰۰۰ <	-	فاصله از آبراهه‌ها (متر)	



شکل (۲): فرایند مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی با تلفیق سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS در منطقه سیستان

Figure (2): The process of wind power plants locating by combining multi-criteria decision-making systems and GIS in the Sistan plain



شکل (۳): گلباد برآیند دشت سیستان (زابل، زهک، هیرمند و هامون) و ایستگاه‌های مورد مطالعه اطراف آن (زاهدان، نهبندان، بیرجند، قاین، شهداد و بم) در بازه زمانی ۱۳۷۵-۱۳۹۵

Figure (3): Windrose result of Sistan Plain (Zabol, Zahak, Hirmand and Hamoon) and nearby stations of the studied area (Zahedan, Nehbandan, Birjand, Qain, Shahdad and Bam) in the period 1996 to 2016.

از مناطق از شیب بسیار مناسبی برخوردارند. ۹۲/۷٪ و ۵۶/۱٪ از منطقه به ترتیب از نظر فاصله از شبکه انتقال نیرو و فاصله از راه‌های ارتباطی در طبقه نسبتاً مناسب قرار گرفت. ۹۸/۶٪ از منطقه از لحاظ معیار فاصله از مناطق مسکونی بسیار مناسب است. همچنین از نظر معیار فاصله از مناطق حفاظت‌شده، ۹۷/۳٪ از منطقه مناسب و معیار فاصله از آبراهه‌ها ۹۸/۹٪ از منطقه، شایستگی بسیار مناسبی دارد (جدول ۳). نقشه طبقات برخی از معیارهای مؤثر در احداث نیروگاه‌های بادی که پس از انجام پژوهش تهیه شد، در شکل‌های (۴) تا (۱۲) ارائه شده است.

نتایج

تعیین وزن معیارهای مورد بررسی

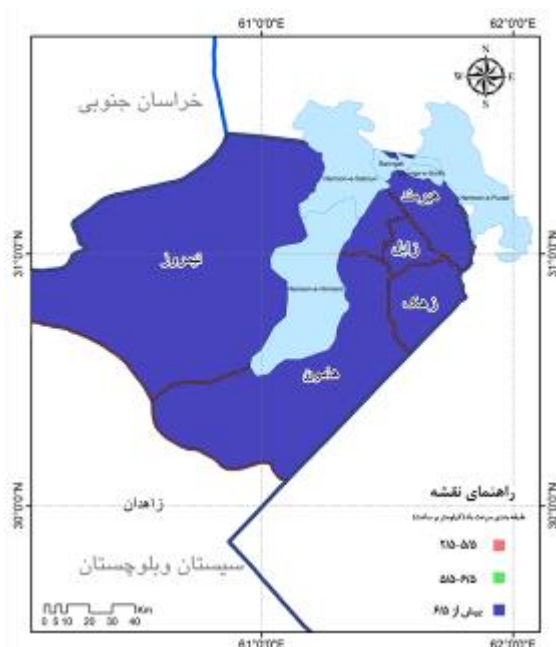
نتایج طبقات معیارهای مؤثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه‌های بادی حاصل از انجام پژوهش نشان داد که از کل مساحت منطقه مورد مطالعه (۱۶۲۰۷ کیلومترمربع)، به غیر از مناطق ممنوعه (۵۹۴۱ کیلومترمربع) شامل فاصله از فرودگاه، فاصله از آثار باستانی، فاصله از شهر و روستا، ۱۰۰٪ مناطق از شایستگی بسیار مناسبی از لحاظ سرعت باد برخوردارند. همچنین حدود ۸۰/۱٪ از مناطق از لحاظ جهت باد، شایستگی بسیار مناسبی دارند. از نظر ارتفاع نیز ۸۵/۶٪ از مناطق در طبقه بسیار مناسب و مناسب قرار گرفت و ۸۶/۲٪

جدول (۳): مساحت طبقات معیارهای مؤثر در پتانسیل‌سنجی احداث نیروگاه‌های بادی و میزان ارجحیت و امتیاز آن‌ها در منطقه سیستان
 Tabel (3): Area of effective criteria classes for assessing potential wind power plants construction and its priorities and scores in the Sistan plain

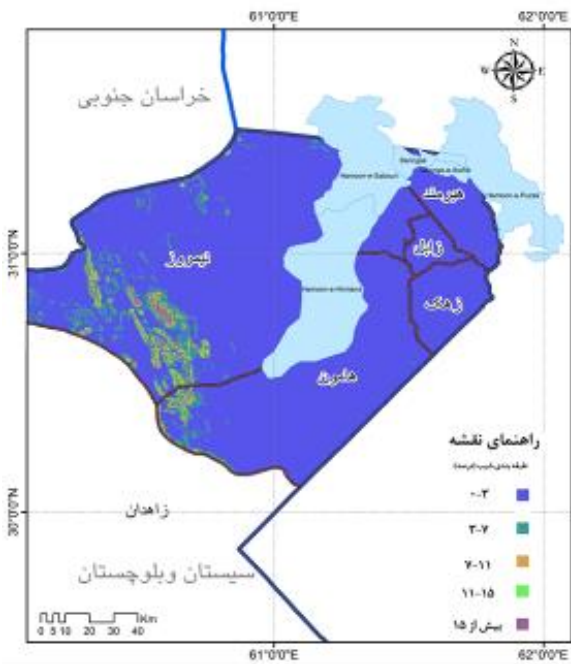
میزان ارجحیت و امتیاز								طبقات معیارهای مؤثر	
نامناسب		نسبتاً مناسب		مناسب		بسیار مناسب			
درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع		
-	-	-	-	-	-	۱۰۰	۱۰۲۶۷/۲۵	سرعت باد	افلیم
-	-	۱۰/۷۴	۱۱۰۲/۵	۹/۱۱	۹۳۵/۵	۸۰/۱۵	۸۲۲۹/۲۵	جهت باد	
۱/۶۵	۱۶۹	۱۲/۷۳	۱۳۰۷	۱۹/۵۳	۲۰۰۵/۲۵	۶۶/۰۹	۶۷۸۶	ارتفاع	جغرافیایی
۱/۸۶	۱۹۰/۸۱	۲/۹۶	۳۰۴۰/۰۶	۸/۹۰	۹۱۳/۸۱	۸۶/۲۸	۸۸۵۸/۵۶	شیب	
-	-	۹۲/۷۰	۹۵۱۷/۵	۷/۳۰	۷۴۹/۷۵	-	-	فاصله از شبکه انتقال نیرو	اقتصادی - اجتماعی
۲/۲۰	۲۲۵/۵	۵۶/۱۰	۵۷۶۰	۲۹/۶۱	۳۰۴۰	۱۲/۰۹	۱۲۴۱/۷۵	فاصله از راه‌های ارتباطی	
۰/۵۳	۵۴/۷۵	۰/۴۵	۴۶/۵	۰/۴۱	۴۲/۵	۹۸/۶۰	۱۰۱۲۳/۵	فاصله از مناطق مسکونی	
۲/۶۸	۱۷۵	-	-	۹۷/۳۲	۹۹۹۲/۲۵	-	-	فاصله از مناطق حفاظت‌شده	زیست‌محیطی
-	-	۰/۰۴	۵	۱/۰۳	۱۰۶	۹۸/۹۳	۱۰۱۵۶/۲۵	فاصله از آبراه‌ها	



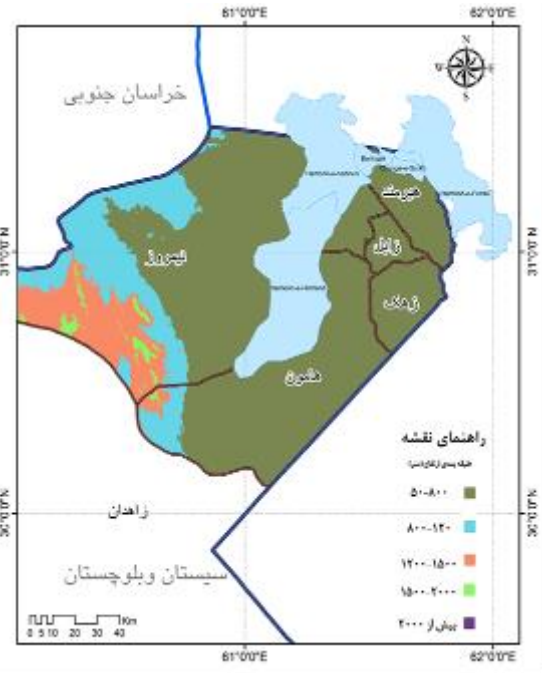
شکل (۵): نقشه طبقه‌بندی شده جهت باد
 Figure (5): Classified map of wind direction



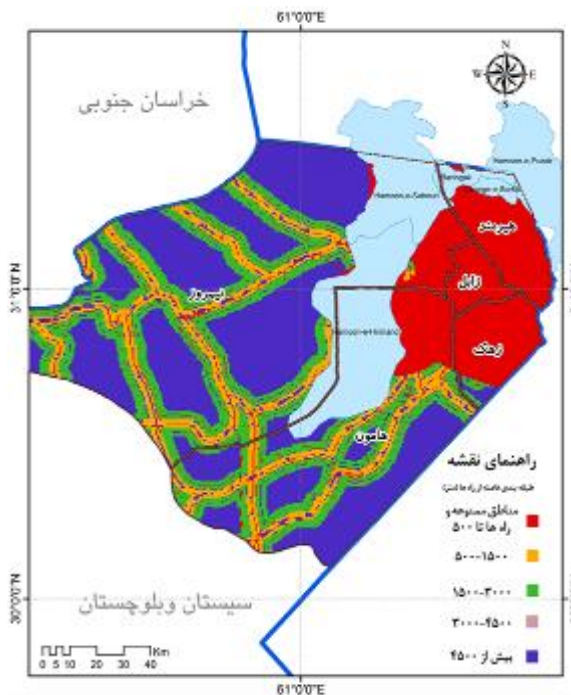
شکل (۴): نقشه طبقه‌بندی شده سرعت باد
 Figure (4): Classified map of wind velocity



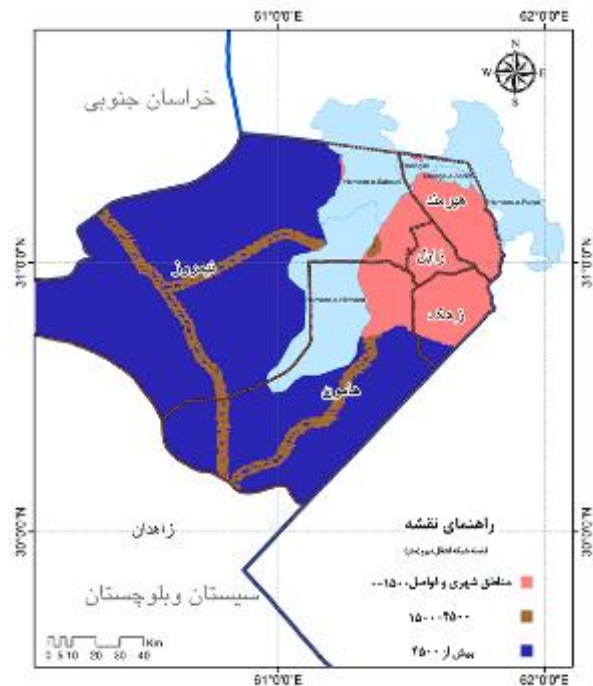
شکل (۷): نقشه طبقه‌بندی شده شیب
Figure (6): Classified map of slope



شکل (۶): نقشه طبقه‌بندی شده ارتفاع
Figure (6): Classified map of altitude



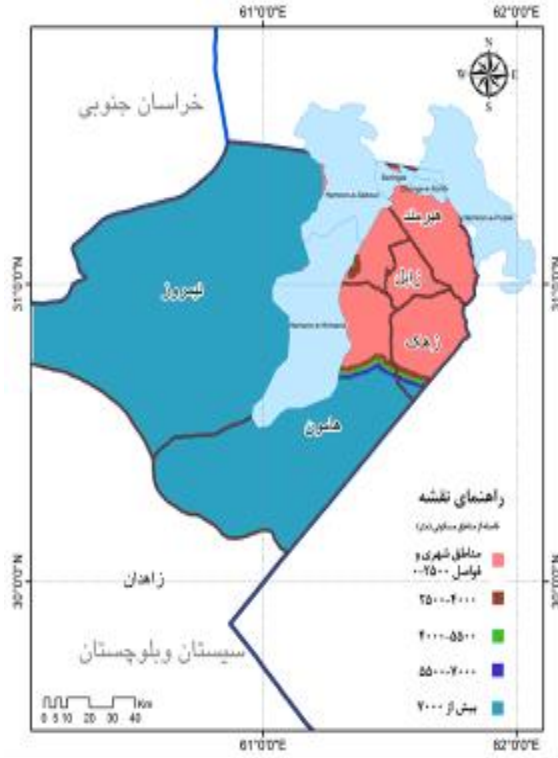
شکل (۹): نقشه طبقه‌بندی شده فاصله از راه‌های ارتباطی
Figure (9): Distance classified map from communication paths



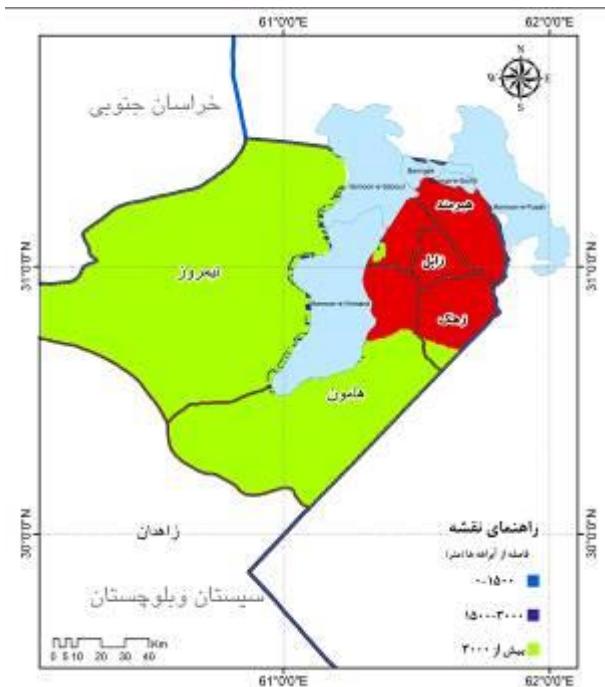
شکل (۸): نقشه طبقه‌بندی شده نزدیکی به شبکه انتقال نیرو
Figure (8): Distance classified map to the power transmission network



شکل (۱۱): نقشه طبقه‌بندی شده فاصله از مناطق حفاظت شده
 Figure (11): Distance classified map from protected area



شکل (۱۰): نقشه طبقه‌بندی شده فاصله از مناطق مسکونی
 Figure (10): Distance classified map from residential areas



شکل (۱۲): نقشه طبقه‌بندی شده فاصله از آبراهه‌ها
 Figure (12): Distance classified map from water rout

شد. نتایج مقایسه زوجی گزینه‌ها و معیارها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در جدول (۴) آورده شده است. در معیار آب و هوایی سرعت باد با وزن ۰/۵۷، از بین معیارهای

بر اساس نتایج، در این پژوهش، از بین معیارهای مکان‌یابی احداث نیروگاه‌های بادی، معیار آب‌وهوایی دارای بیشترین اهمیت و معیار زیست‌محیطی دارای کمترین اهمیت شناسایی

جغرافیایی، ارتفاع با وزن ۰/۶۶، در معیارهای اقتصادی - در پتانسیل سنجی احداث نیروگاه بادی برخوردارند. با توجه به اجتماعی فاصله از راه‌های ارتباطی و نزدیکی به شبکه انتقال اهمیت معیارها و زیرمعیارهای بررسی شده و با توجه به نقشه نیرو با وزن ۰/۴۲ و همچنین از بین معیارهای زیست‌محیطی، نهایی، مناطق مناسب برای احداث نیروگاه‌های بادی در سطح فاصله از مناطق حفاظت‌شده با وزن ۰/۶۶، از اهمیت بیشتری دشت سیستان شناسایی شدند.

جدول (۴): نتایج مقایسه زوجی و وزن معیارها و زیرمعیارها در پتانسیل سنجی احداث نیروگاه بادی در دشت سیستان

Tablel (4): Results of paired comparison and weight of criteria and sub-criteria in potential analysis of construction of wind power plant in the Sistan plain

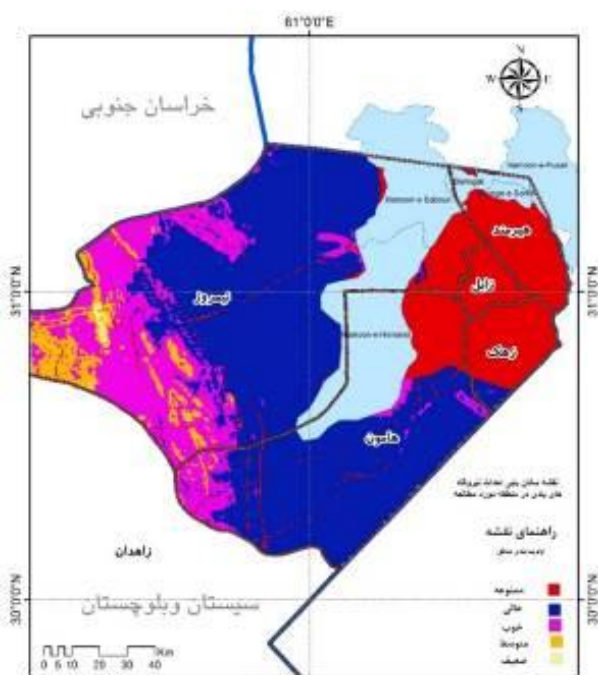
وزن	زیست‌محیطی	اقتصادی - اجتماعی	جغرافیایی	آب‌وهوایی	معیارهای مؤثر در پتانسیل سنجی	
۰/۴۴	۳	۷	۷	۱	آب‌وهوایی	
۰/۲۸	۳	۵	۱	-	جغرافیایی	
۰/۲۰	۵	۱	-	-	اقتصادی - اجتماعی	
۰/۰۶	۱	-	-	-	زیست‌محیطی	
وزن	فشار	دما	جهت باد	سرعت باد	زیرمعیارهای آب‌وهوایی	
CR = ۰/۰۹						
۰/۵۷	۷	۷	۶	۱	سرعت باد	
۰/۴۲	۷	۷	۱	-	جهت باد	
CR = ۰/۰۷						
	وزن	خاک‌شناسی	شیب	ارتفاع	زیرمعیارهای جغرافیایی	
	۰/۶۶	۵	۷	۱	ارتفاع	
	۰/۳۳	۶	۱	-	شیب	
CR = ۰/۰۰						
	فاصله از آثار باستانی	فاصله از فرودگاه	فاصله از مناطق مسکونی	نزدیکی به شبکه انتقال نیرو	فاصله از راه‌های ارتباطی	زیرمعیارهای اقتصادی - اجتماعی
وزن	۰/۴۲	۷	۷	۱	۱	فاصله از راه‌های ارتباطی
۰/۴۲	۷	۷	۷	۱	-	نزدیکی به شبکه انتقال نیرو
۰/۰۷	۴	۴	۱	-	-	فاصله از مناطق مسکونی
CR = ۰/۰۵						
		وزن	فاصله از آبراهه‌ها	فاصله از مناطق حفاظت‌شده	زیرمعیارهای زیست‌محیطی	
		۰/۶۶	۳	۱	فاصله از مناطق حفاظت‌شده	
		۰/۳۳	۱	-	فاصله از آبراهه‌ها	
CR = ۰/۰۵						

نقشه نهایی مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی

۱۶۲۰۸ کیلومتر مربع)، ۵۹۴۱ کیلومتر مربع (۳۶/۶٪) آن جزو مناطق ممنوعه شناسایی شد و مناطق مجاز برای احداث نیروگاه‌های بادی یا مناطقی با شایستگی عالی، در محدوده‌های مرکز دشت سیستان (شهرستان نیمروز و هامون) با مساحت ۷۱۳۰ کیلومتر مربع (۴۴٪) قرار گرفته است. از نظر شایستگی استقرار نیروگاه، ۶۱۱ کیلومتر مربع (۳/۷٪) از منطقه در طبقه متوسط و ۲۴۶۲/۵ کیلومتر مربع (۱۵/۱٪) از منطقه در طبقه خوب قرار گرفته است. علاوه بر این، محدوده‌های بندان و

پس از تعیین معیارهای مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و به‌دست‌آوردن وزن معیارها و تجزیه و تحلیل نقشه معیارهای مؤثر، نقشه مکان‌های مناسب و اولویت‌بندی مناطق جهت احداث نیروگاه‌های بادی تهیه شد. نقشه حاصل با توجه به نسبت متوسط تغییرات هر پارامتر، به چهار کلاس (عالی، خوب، متوسط و ضعیف) طبقه‌بندی شد (شکل ۱۳). نتایج این پژوهش نشان داد که از کل مساحت منطقه مورد مطالعه

اطلاعات احداث نیروگاه بادی برخوردارند. در جدول (۵) اطلاعات مربوط به نقشه مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی ارائه شده است.



شکل (۱۳): نقشه پتانسیل سنجی احداث نیروگاه‌های بادی در دشت سیستان
Figure (13): Site suitability map of wind power plants construction in Sistan plain

شمار می‌رود، سرعت باد است؛ زیرا هرچه سرعت باد بیشتر باشد، توان کارکرد و بازدهی نیروگاه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر هرچه بادها هم‌جهت‌تر باشند، یعنی بادهای هم‌جهت و یک سو باشد، به دلیل کاهش استهلاک برای جابه‌جایی پره‌های توربین در جهت باد امتیاز بالاتری دارد. همسو با یافته این پژوهش، عزیزی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که سرعت باد مهم‌ترین معیار آب‌وهوایی در احداث نیروگاه‌های بادی است.

زیرمعیارهای جغرافیایی مورد بررسی در این پژوهش شامل ارتفاع و شیب بود که از بین آن‌ها، معیار ارتفاع دارای وزن بیشتری در احداث نیروگاه بادی در منطقه مورد مطالعه است. ارتفاع ارتباط مستقیم با هزینه دارد، هرچه منطقه مورد نظر ارتفاع بیشتری داشته باشد هزینه‌های احداث و تجهیزات بیشتر می‌شود. بنابراین بهتر است محل ساخت نیروگاه در مناطقی با ارتفاع کم در نظر گرفته شود. همچنین شیب منطقه مورد نظر برای ساخت، به دلیل وجود فرسایش خاک و صرفه‌جویی در

سفيدآبه در اطراف دشت سيستان با مساحت ۶۲/۵ كيلومتر مربع (۰/۳۸٪) جزو مناطقی هستند که با توجه به معیارهای مورد بررسی در این پژوهش، از تناسب کمی جهت

جدول (۵): مشخصات نقشه پتانسیل سنجی احداث نیروگاه‌های بادی در دشت سیستان

Table (5): Specification of site suitability map for the wind power plants construction in Sistan plain

محدوده	ردیف	کلاس	مساحت بر حسب کیلومتر مربع	درصد از مساحت دشت سیستان
-	-	ممنوعه	۵۹۴۱	۳۶/۶۵
۱	۱	ضعیف	۶۲/۵	۰/۳۸
۲	۲	متوسط	۶۱۱	۳/۷۶
۳	۳	خوب	۲۴۶۲/۵	۱۵/۱۹
۴	۴	عالی	۷۱۳۰	۴۴
مساحت کل	-	-	۱۶۲۰۷	۱۰۰

بحث و نتیجه‌گیری

در مجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر می‌توان گفت که حدود ۴۴ درصد منطقه سیستان معادل ۷۱۳۰ کیلومتر مربع دارای شایستگی بالایی جهت استقرار نیروگاه بادی می‌باشد. مناطق با پتانسیل بالا عمدتاً در محل‌هایی قرار گرفته‌اند که با معیارهای انتخاب‌شده در پژوهش حاضر جهت انتخاب مکان بهینه جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در منطقه سیستان همخوانی دارد. بر اساس نتایج حاصل، این مناطق در محدوده‌های مرکز دشت سیستان (شهرستان نیمروز و هامون) قرار گرفته است.

در مقایسه زوجی معیارهای اصلی پتانسیل سنجی نیروگاه‌های بادی بر اساس مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی معیارهای آب و هوایی (سرعت و جهت باد) دارای اهمیت بیشتری بوده و وزن بیشتری را به خود اختصاص داده است. یکی از مهم‌ترین معیارهایی که در ساخت نیروگاه‌های بادی به

از مناطق حفاظت شده، از میان معیارهای زیست محیطی، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده و از اهمیت بیشتری برخوردار است.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از جامع ترین سیستم های طراحی شده برای تصمیم گیری با معیارهای چندگانه است. در این روش به هر گزینه با توجه به امتیازهای تخصیص یافته در مقایسه با هم (مقایسه زوجی) و نیز با توجه به ارجحیت شاخص ها نسبت به هم، امتیازی داده می شود که نشان دهنده قابلیت بهتر آن گزینه با توجه به معیارهای تعریف شده است که قضاوت و محاسبات را آسان می کند. همچنین این تکنیک میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می دهد که از مزایای ممتاز این تکنیک در تصمیم گیری چند معیاره است. به علاوه از یک مبنای نظری قوی برخوردار بوده و بر اساس اصول بدیهی بنا شده است (پرهیزگار و غفاری، ۲۰۰۶). ویژگی اصلی فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس قضاوت زوجی است. به عبارتی، در این روش ابتدا عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوط خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می شود. سپس با استفاده از این ماتریس، وزن نسبی عناصر محاسبه می گردد.

نتایج به دست آمده در نتیجه استفاده از این روش برای تعیین وزن لایه ها نشان می دهد که با توجه به سادگی و انعطاف پذیری آن و همچنین محاسبه سازگاری در قضاوت ها، می تواند در بررسی موضوعات مربوط به مکان یابی کاربرد مطلوبی داشته باشد (هیل و براتن، ۲۰۰۵). سامانه های اطلاعات جغرافیایی نیز به عنوان ابزاری برای برنامه ریزی فضایی، در فرایند برنامه ریزی، تجسم، مدیریت داده ها، تجزیه و تحلیل و همچنین قابلیت ارزیابی آن ها مورد توجه قرار دارد. از همین رو استفاده تلفیقی از روش های چندمعیاره و سامانه های اطلاعات جغرافیایی در زمینه مکان یابی نیروگاه بادی در مطالعات متعددی مورد توجه قرار گرفته است و نتایج مطلوبی نیز حاصل شده است (زبردست، ۲۰۱۰؛ اسدی و همکاران، ۲۰۱۳؛ سانچز لوزانو^۲ و همکاران، ۲۰۱۶).

هزینه ها باید کم باشد. با توجه به دشتی بودن منطقه مورد بررسی، محدودیتی از نظر این عوامل در منطقه وجود ندارد.

همان طور که اشاره شد، زیرمعیارهای اقتصادی - اجتماعی مورد بررسی در این پژوهش شامل فاصله از راه های ارتباطی، نزدیکی به شبکه انتقال نیرو و فاصله از مناطق مسکونی (فاصله از شهرها و فاصله از روستاها) بود. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر، فاصله از شبکه انتقال نیرو و فاصله از راه های ارتباطی دارای بیشترین تأثیر در بررسی پتانسیل منطقه برای استقرار نیروگاه بادی هستند و بیشترین وزن به این عوامل اختصاص دارد. به دلیل آلودگی های صوتی ناشی از حرکت پره توربین های بادی و لزوم نزدیکی به خطوط ارتباطی برای انتقال برق حاصل از تولید نیروگاه بادی به شبکه های انتقال نیرو و حمل تجهیزات و با رعایت فواصل محدودیت نسبت به راه های ارتباطی و خطوط انتقال نیرو، لازم است فاصله ای مناسب برای ساخت نیروگاه لحاظ گردد. از دیگر زیرمعیارهای تأثیرگذار در تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه، فاصله از نواحی مسکونی است. به طوری که هرچه فاصله از مناطق مسکونی زیادتر باشد، آن منطقه امتیاز بیشتری را به خود اختصاص می دهد، چراکه وجود آلودگی های صوتی ناشی از چرخش توربین ها و سایه انداختن بر ساختمان ها و خطرات پرتاب پره توربین مستلزم در نظر داشتن نکات ایمنی است (عزیزی و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج حاصل از این پژوهش نیز همسو با یافته های پژوهش ذکر شده است.

در بخش زیرمعیارهای زیست محیطی، فاصله از مناطق حفاظت شده وزن بیشتری را نسبت به فاصله از آبراه ها به خود اختصاص داد. معیارهای زیست محیطی یکی از عوامل مهم در مکان یابی احداث نیروگاه های بادی به شمار می آیند. به دلیل وجود پرندگان بومی و مهاجر، وجود مناطق حفاظت شده، آلودگی صوتی و برهم خوردن زیست بوم ها، توجه به مسائل زیست محیطی در مکان یابی نیروگاه های بادی یکی از مهم ترین مسائل در احداث این گونه نیروگاه ها در ایران و جهان است. با توجه به دلایل ذکر شده، ضروری است که توربین های بادی از این پهنه های آبی، فاصله لازم را داشته باشد. در تأیید یافته این پژوهش مرشدی و همکاران (۲۰۱۱) گزارش داده اند که فاصله

1. Hill & Braaten

2. Sánchez-Lozano

تصمیم‌گیری نمایند، هرچند انتخاب معیارهای دقیق‌تر و بیشتر یکی از چالش‌های پیش روی کاربران این روش‌هاست و می‌تواند نتایج حاصل از این روش‌ها را متأثر سازد. به‌طور کلی بر اساس نتایج پژوهش حاضر می‌توان بیان کرد که ضروری است تلاش‌های جدی و مؤثر جهت مدیریت صحیح و ارائه راهکار مناسب جهت بهره‌برداری حداکثری از پتانسیل‌های موجود در منطقه سیستم صورت گیرد و سالانه بخشی از سرمایه‌گذاری‌ها صرف رسیدگی به طرح‌های توسعه پایدار انرژی‌های نوین، به‌خصوص بهره‌برداری از انرژی باد در منطقه سیستم گردد، چراکه تولید برق حاصل از آن می‌تواند به‌عنوان یک انرژی پایدار در توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی منطقه نقش قابل توجهی ایفا کند.

با توجه به نتایج پژوهش انجام‌شده، حدود ۴۴ درصد از منطقه سیستم به‌دلیل دارا بودن دو ویژگی آب‌وهوایی مهم (بادهای متداوم با سرعت بالا و جهت بادهای غالب ثابت شمالی) از پتانسیل بالایی برای احداث نیروگاه‌های بادی برخوردار است. بر اساس نتایج حاصل، استفاده تلفیقی از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیر، می‌تواند با شناسایی مناطق دارای شایستگی بالاتر، علاوه بر فراهم آوردن امکان توسعه پایدار منطقه، از هدررفت هزینه‌ها جلوگیری کرده و موفقیت اجرای طرح‌های توسعه‌ای و طرح‌های استفاده از انرژی‌های نوین را در منطقه سرعت بخشد. از منظر اقتصادی نیز این موضوع به برنامه‌ریزان و سرمایه‌گذاران کمک زیادی می‌کند تا بتوانند بر اساس داده‌های مکانی، بهتر

منابع

1. Alam al-Hoda, S.H., 2010. Wind Energy, Ambassador of Hope. Scientific, Educational and Research Journal of the Oil, Gas and Petrochemical Industries (4) 1, 67-61.
2. Amir Shahi, H., Nasirpour, Z., 2015. Solar Energy: Its applications and challenges in Sistan. Third National Conference on Agriculture and Sustainable Natural Resources, Tehran, Iran, 77-93.
3. Asadi, M., Entezari, A., Akbari, A., 2013. Identification of fields and navigation of wind power plants in the northeast of Iran using AHP method and geographic information system. MA thesis, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University.
4. Aydin, N. Y., Kentel, E., Duzgun, S., 2010. GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 364-373.
5. Azizi, A., Jafari, H., Malek Mohammadi, B., Khosh Akhlagh, F., 2014. Placing wind power plants using fuzzy hierarchy analysis and network analysis in Ardebil Province. Journal of Applied Research on Geographic Sciences 14 (34), 194-174.
6. Bahrami, M., Abbaszadeh, P., 2013. An overview of renewable energies in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 198-208.
7. Hill, M. J., Braaten, R., 2005. Multi criteria decision analysis in spatial decision support: the assess analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. Environmental Modeling & Software 20, 955-976.
8. Kaya, T., Kahraman, C., 2011. Multi criteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. Expert Systems with Applications 38(6) 6577-6585.
9. Kim, Y.J., Yong O.K., Seok Kang, K., Shin Lee, J., 2016. Site selection of offshore wind farms around the Korean Peninsula through economic evaluation. Renewable Energy 54, 189-195.
10. Latinopoulos, D and Kechagia, K. 2016. A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. Renewable Energy.550-560.
11. Minaei, M., 2009. Implementation of Agricultural Planning Model Using Fuzzy Logic and Geographic Information System (Case study: Friedounshahr). Msc Thesis, Faculty of Geography, Tehran University, 146.
12. Morshedi, J., Borna, R., Asghari Pour Dasht Bozorg., A., Ahmadi, H., and Zaheri Abdehvand, Z., 2011. Wind power plants site

- selection using analytical hierarchical process (AHP) in GIS. *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems Application in Planning* 2(1): 97-111.
13. Parhizgar, A., Ghafari, A., 2006. Geographic information system and multi-criteria decision analysis. Malczewski, Jacek. Tehran: SAMT Publication, 23-43.
 14. Razmi, J., Hakimi Asl, A., Nasrollahi, M., Hakimi Asl, M., 2015. Evaluation of wind power plant establishment in five metropolitan cities of Iran using fuzzy hierarchical analysis method. *Industrial Technology Development Quarterly* 23, 20-38.
 15. Sabahi, H., Jamili, M., Amini, M., Pasandideh, M., 2011. Time effects of dust on the performance of wind turbines, First International Conference on Modern Approaches to Energy Conservation, Tehran, Iran, 36-46.
 16. Sadeghi, Z., Dalal Bashi Esfahani, Z., Horri, H., 2013. Prioritizing factors affecting locating renewable energies (Solar Energy and Wind Energy) in Kerman Province using geographic information system and multi-criteria decision making techniques. *Journal of Energy Planning and Policymaking Research* 2(1), 110-93.
 17. Salahi, B., 2004. Potentiometric analysis of wind power and fitness of realistic likelihood of wind using Vibol probability density distribution function at synoptic stations in Ardabil Province, *Journal of Geographic Research* 72, 87-104.
 18. Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., Lamata, M. T., 2016. GIS-based onshore wind farm site selection using fuzzy multi-criteria decision making methods, evaluating the case of southeastern Spain. *Landscape and Urban Planning* 10(3), 86-102.
 19. Sargolzaei, S., 2009. The role of geological-environmental parameters in the development of ancient and modern Sistan residential, Msc Thesis in Geo-Environmental Sciences, Ferdowsi University, Mashhad.
 20. Sargolzaei, S., 2014. Wind Atlas of Sistan Province, Regional Power Publication of Sistan and Baluchestan Province.
 21. Shirvyeh Zad, E., Soroush, H., 2014. A comprehensive approach to fuzzy analytical hierarchy process (FAHP), data envelopment analysis and analysis (DEA) for assessing the performance of male and female workers, 10th International Industrial Engineering Conference, 10 pages.
 22. Tabatabaei, T., Amiri, F., 2015. Placement wind power plants based on the assessment of spatial multi-criteria and hierarchical analysis process in Bushehr Province. *Remote sensing and GIS in Natural resources* 6 (1), 1-16.
 23. Tsoutsos, T, Tsitoura, I, Kokologos, D., Kalaitzakis, K., 2016. Sustainable siting process in large wind farms case study in Crete. *Renewable Energy* 75, 474- 480.
 24. Zebardast, E., 2010. The Application of Analytic Network Process (ANP) in Urban and Regional Planning, *Honar hay Ziba Memari Va Shahrsazi* 2(41), 79-90.

Site Suitability Analysis of Wind Power plants using Fuzzy Hierarchical Analysis (Case Study: Sistan Plain)

Sanaz Tanakian¹, Hossein Piri Sahragard^{*†}, Meysam Amiri³

Received: 2/02/2018

Accepted: 7/06/2018

Extended Abstract

Introduction: Energy as a contributor to human well-being plays an important role in the sustainable development of human societies. The growing demand for energy, higher standards of living, global warming, and decreasing fossil fuel resources have focused the global attention on renewable energies (Kaya and Kahraman, 2010). Owing to the rapid development of wind energy extraction technologies, low cost of this type of energy, and easy installation of wind turbines, this kind of energy is considered to be a viable alternative to current energy systems (Yang et al., 2016; Zaim et al., 2014; Tsoutsos et al., 2016). The present study aimed to identify the factors with more weight and more suitable sites for wind power plants in Sistan by considering climatic criteria (wind speed and direction), geographical criteria (elevation and slope), socioeconomic criteria (distance from residential areas, distance from routes, and proximity to electrical grids) and environmental criteria (distance from protected areas and waterways) through fuzzy hierarchical analysis and GIS.

Materials and Methods: The present study applied available 20-year weather statistics including wind speed, wind direction, temperature, and pressure in the Sistan region (Zabol, Zahak, Hirmand, and Hamoun) and the regions around the Sistan plain (Zahedan, Nehbandan, Birjand, Qaen, Shahdad, and Bam) from 1996 to 2016. Initially, expert opinion was used to extract climate measures (including wind velocity and direction), geographical factors (elevation and slope), socio-economic criteria (distance from residential areas, distance from communication pathways and vicinity to energy transport networks), and environmental scales (distance from protected areas and waterways) as significant and effective factors, which were later compared in pairs. Criteria and subcriteria weights were then obtained using fuzzy hierarchical analysis with Fuzzy AHP SolVer software. Maps needed for locating areas for the construction of wind power plants in the study area were prepared using GIS according to the sub-criteria. In the next step, each of the maps was classified using GIS. Based on the paired comparisons, each class was then scored according to the expert opinion, and the weight of each class was thus obtained using Fuzzy AHP SolVer. Finally, a map of suitable sites for the construction of wind power plants was developed, and the final map was provided in the form of a raster map with a precision of 500 square meters.

Results

Determining the weight of criteria: According to the study results, the climatic criterion is of greatest importance among the criteria considered for locating wind power plants, and the environmental criteria was identified as the least important. The most important criteria were found to be wind speed with a weight of 0.57 (among the climate criterion), elevation with a weight of 0.66 (among the geographical criteria), distance from route, and proximity to electrical grids with a weight of 0.42 (among the socioeconomic criteria), and distance from protected areas with a weight of 0.66 (among the environmental criteria).

Final map for the location of wind power plants: The resulting map was classified into four classes (excellent, good, moderate, and poor) according to relative average change in each parameter. The results of the present

1. MSc graduated, Range and Watershed department, University of Zabol

2. Assistant Professor, Soil and Water College, Range and Watershed department, University of Zabol (Corresponding author: hopiry@uoz.ac.ir).

3. Academic staff, Hamoun international wetland research institute, University of Zabol

DOI: 10.22052/deej.2018.7.19.1

study showed that an area of 5941 km² of the total area of the study area (16208 km²) (36.6%) includes restricted areas, and the authorized areas for the construction of wind power plants (in the excellent class) are part of the Sistan plain (Nimruz and Hamoon cities) with an area of 7130 km² (44%). In terms of land suitability, 611 km² (3.7%) of the area was classified in the moderate class and 462.5 km² (15.1%) in the good class. In addition, the regions of Bandan and Sefidabeh around the Sistan plain with an area of 62.5 km² (0.38%) are among the areas less suitable for construction according to the criteria.

Discussion & conclusion: Wind speed is one of the most important climatic criteria considered for the construction of wind power plants. The higher the wind speed, the greater the power generated by the wind turbines. On the other hand, the more a wind blows in one direction, the higher the wind is scored as it more effectively rotates the turbine blades. Consistent with the findings of the present study, wind speed was reported to be the main climatic criterion for the construction of wind power plants (Azizi et al., 2014). among the geographical criteria, elevation was found to be the most important one for the construction of wind power plants in the studied area. The possibility for building facilities and agricultural activities decreases with higher elevation as a limiting factor (Sabokbar et al., 2010). Therefore, areas with higher elevations must be avoided when locating a suitable site as higher elevations increase the investment cost (Bennui, 2007).

Considering general results of this study, we can conclude that 44 percent of the regions highly suitable for establishment of wind power plants, contributing to 7130 kilometers in area. Resulting regions with high potential for wind power plant establishment, mainly areas in the central plain of Sistan (Nimruz and Hamoon cities) were selected from regions consistent with the inclusion criteria of this study. According to the study results, the combined use of fuzzy hierarchical analysis and GIS as a decision-making support system can be an effective strategy to identify more potential areas to create the conditions for the regional sustainable development, reduce the costs, and speed up the implementation of development projects and plans aimed at new energies. The study results emphasized the necessity of more serious and effective efforts for proper management and effective solutions to fully exploit the potential of the Sistan region. It is also imperative that part of the investments is spent annually on sustainable development plans for new energies, in particular wind energy in Sistan. The production of electricity as a sustainable energy can play a significant role in economic, social, and cultural development in the region.

Keywords: Sistan, wind power plant, fuzzy hierarchy analysis, geographic information system.