به‌گزینی مکان‌های مستعد توسعه مزارع خورشیدی در استان خراسان جنوبی با استفاده از روش Fuzzy-AHP (مقالۀ پژوهشی)

۱- فاطمه جهانی‌شکیب*، استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
jahanishakib@birjand.ac.ir
۲- فاطمه جعفری‌پور، دانشجوی کارشناسی ارشد، ارزیابی محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۳- سیده‌بهاره حسینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی علوم محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

چکیده

در سال‌های اخیر میل رو به گسترشی نسبت به استفاده از انرژی خورشیدی، به‌عنوان یکی از انرژی‌های پاک و نوین در میان کشورهای جهان دیده می‌شود. استان خراسان جنوبی از مناطق کمتر توسعه یافته ایران است که انتقال حامل‌های انرژی به این استان پرهزینه است. از طرفی توسعه مزارع کشاورزی در استان خراسان جنوبی با توجه به کمبود منابع آبی در اقلیم خشک و کویری با چالش جدی مواجه است. بنابراین توسعه مزارع خورشیدی می‌تواند جایگزین خوبی برای توسعه مزارع کشاورزی به ویژه محصولات آب بر باشد. هدف این پژوهش شناسایی مکان‌های بهینه توسعه مزارع خورشیدی در استان خراسان‌جنوبی است. مراحل مختلف این پژوهش در شش گام انجام شده است. ابتدا به کمک روش دلفی معیارهای تأثیرگذار بر مکان‌یابی مزارع خورشیدی شناسایی شد. در گام دوم به کمک اساتید و افراد متخصص حوزه محیط‌زیست معیارها با کدنویسی، رتبه‌بندی و غربال‌گری شد. در گام سوم پایگاه داده مکانی معیارهای مؤثر تشکیل شد. در گام چهارم وزن معیارهای اثرگذار از طریق روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) محاسبه گردید. در گام پنجم لایه‌های معیارهای مؤثر طبقه‌بندی و کدگذاری شد. در گام نهایی نیز، روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های معیار فازی وزن‌دار شده با عملگر فازی گاما انجام گرفت. نتایج نشان داد، در استان خراسان جنوبی شهرستان‌های طبس (۳۸۷/۱ کیلومترمربع)، نهبندان (۱۲۰/۴ کیلومترمربع) و سرایان (۱۱۹ کیلومترمربع) به ترتیب مکان‌هایی با توانمندی بسیار بالا در توسعه مزارع خورشیدی در استان هستند. همچنین میزان مساحت بهینه به تفکیک شهرستان‌های استان در سطح متوسط، مطلوب و بسیار مطلوب برای بهره‌برداری در شرایط متفاوت ارائه گردید. نتایج فعلی این پژوهش و حتی تغییر شرایط موجود با اجرای مجدد رویکرد ارائه شده می‌تواند تصمیمات مدیران را آگاهانه به سمت توسعه خردمندانه منطقه، استفاده از ظرفیت‌های محیط‌زیست و انرژی‌های نوین سوق دهد.

واژگان کلیدی: مزارع خورشیدی، همپوشانی، غربالگری معیارها، عملگر فازی گاما، خراسان جنوبی

مقدمه

یکی از اهداف توسعه پایدار، افزایش سطح استاندارد زندگی در راستای حفظ محیط‌زیست همراه با توجیه اقتصادی است. برای تحقق این هدف، اقدامات متعدد و مؤثری در زمینه‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی باید صورت گیرد. جایگزینی انواع سوخت‌ها با منابع آلاینده و محدود با انرژی‌های نوین نظیر انرژی خورشیدی، حفاظت از سلامت جامعه در مقابل آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌ها، ارتقاء وضعیت‌محیط‌زیست، توانایی در ضوابط پایش و الزامات محیط‌زیستی از جمله مواردی هستند که در ایجاد رفاه اجتماعی و زندگی سالم مؤثرند [۲۳].

فناوری فتوولتائیک خورشیدی یکی از فنآوری‌های در حال رشد منابع تجدیدپذیر در سراسر دنیا است [۶]. بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، نه تنها به بهبود کل منابع انرژی کمک می‌کند، بلکه انتشار گازهای مضر و سمی را نیز کاهش می‌دهد. در ایران اراده قوی سیاسی برای توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و استفاده از توانایی‌های آن وجود دارد. یکی از موانع توسعه انرژی خورشیدی، عدم پایداری

و متغیر بودن تابش خورشیدی است که می‌تواند از یک منطقه به منطقه دیگر از نظر جغرافیایی متفاوت باشد [۱۳]. این وضعیت متغیر درباره هر نوع توسعه‌ای نظیر شهر، صنعت، کشاورزی و غیره وجود دارد. بنابراین شناخت وضعیت سرزمین و مؤلفه‌های مؤثر در شناسایی توان سرزمین در توسعه کاربری‌های مختلف امری ضروری است.

به منظور به‌گزینی مکان‌های مستعد توسعه مزارع خورشیدی باید به متغیرها و مؤلفه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی را توجه نمود تا زمینه توسعه پایدار فراهم شود. در غیر این صورت، با صرف هزینه‌های بالا می‌توان توسعه را به پایان رساند، اما ممکن است به حالت پایدار در آینده ادامه نیابد.

بسیاری از جوامع، به خصوص در کشورهای در حال توسعه، تقویت پایه‌های توسعه و پایدار نمودن آن، نیازمند برنامه‌ریزی و شناسایی امکانات و منابع بالقوه و بالفعل خود هستند [۱]. بیش از ۸۰ درصد داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده برای تصمیم‌سازی، ماهیت مکانی و زمانی دارد [۱۲]. هدف نهایی از به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی فراهم کردن پشتیبانی برای تصمیم‌گیری‌های مکانی است [۱۰]. مکان‌یابی مزارع خورشیدی و اهمیت بازدهی بیشتر این نیروگاه‌ها به دما و ساعات آفتابی، انرژی تابشی دریافتی زمین، ارتفاع، گرد و غبار، شیب زمین و رطوبت نسبی وابسته است.

پژوهش‌های بسیاری در داخل و خارج از کشور در راستای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی انجام شده است. Kenisarin (۲۰۰۷) در پژوهش خود افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای را دلیل جهت‌گیری به سمت استفاده از منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر می‌داند [۹]. Aydin (۲۰۰۹) به ایجاد روشی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی مناطق پیشنهادی، تاسیس نیروگاه بادی، خورشیدی و هیبریدی باد و خورشید با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی پرداخته است [۲]. Miller and Lumby (۲۰۱۲)، به معرفی روش‌های بهره‌برداری انرژی خورشیدی در نیروگاه‌های خورشیدی در کشور هند پرداخته‌اند [۱۱].

در پژوهشی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش الکتره به منظور شناسایی مکان‌های مناسب برای توسعه مزارع خورشیدی فتوولتائیک در جنوب شرقی اسپانیا به کار گرفته شده است [۱۸]. در این مطالعه، معیارهای آب و هوایی، محیط زیست، موقعیت مکانی و ارزیابی سرزمین را در نظر قرار گرفته شد. سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی تناسب مکان‌های توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر مراکش و مشخص گردید که سرزمین‌های بخش جنوبی مناسب‌ترین مکان‌ها هستند [۲۲].

مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک در استان ملطیه ترکیه نیز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله مراتبی با در نظر گرفتن عوامل مؤثر زیادی از جمله توانمندی انرژی خورشیدی، جاده‌ها، خطوط انتقال انرژی، مراکز انتقال، شیب، جهت، موقعیت سدها و رودخانه‌ها، خطوط لوله گاز طبیعی، گسل‌ها، پوشش زمین و مناطق مسکونی انجام گرفت [۳].

در مطالعه‌ای با هدف انتخاب مناسب‌ترین مکان برای نیروگاه‌های انرژی خورشیدی از ۱۱ لایه داده شامل مدت تابش آفتاب، تابش خورشید، شیب، جهت، جاده، منابع آب، مناطق مسکونی، خطوط گسل‌ها، مناطق معدن، خطوط نیروی برق و ترانسفورماتورها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد [۲۰].

به کمک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی مکان‌های مناسب مقدماتی انرژی خورشیدی برای اتصال به شبکه برق الجزایر در دو منطقه شناسایی شد [۱۹].

در داخل کشور نیز، سامانی و همکاران (۱۳۹۸) مکان‌های مناسب برای مزارع خورشیدی را به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام و پهنه‌های مطلوب توسعه مزارع را با درجه‌های مختلف در استان آذربایجان شرقی نشان دادند [۱۸]. همچنین، رفیعی و همکاران (۱۳۹۶) برای مکان‌یابی عرصه‌های نیروگاه خورشیدی، از فرآیند سلسله مراتبی تحلیل پوششی داده‌ای[1] (DEA)[2] دو مرحله‌ای تحت شرایط عدم اطمینان استفاده کرده‌اند [۱۴].

[1]- Data Envelopment Analysis

در این تحقیق پنج شاخص شامل شدت تابش خورشید، شدت رخ دادن حوادث طبیعی،کمیت محیط مناسب، کمیت زمین‌شناسی و نزدیکی مصرف‌کننده مورد توجه قرار گرفت. در آخر، بر اساس نتایج مدل DEA، اولویت مکان‌های بهینه استقرار مشخص گردید. تقوایی و همکاران (۱۳۹۶) پهنه‌بندی و مکان یابی نیروگاه های خورشیدی در استان اصفهان را انجام دادند. نتایج نشان داد که حدود ۱۷ درصد از مساحت استان در وضعیت بسیار مطلوب از لحاظ استقرار پنل‌های خورشیدی قرار دارد. متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق شاخص‌های اقلیمی نظیر گرد و غبار، وزش باد، ابر ناکی، بارندگی، رطوبت هوا، دمای محیط، ساعت آفتابی و همچنین مؤلفه کاربری اراضی، فاصله از منابع مصرف بود [۲۱].

در پژوهشی با عنوان توانسنجی استقرار نیروگاه‌های خورشیدی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی[1] (AHP) و منطق فازی، معیارهای شامل ساعت‌های آفتابی، درجه حرارت، ابرناکی، بارندگی، گرد و غبار و ارتفاع بررسی شد. در این پژوهش جهت تجزیه و تحلیل اطلاعات، از روش درون‌یابی[2] و برای فازی‌سازی لایه‌ها از رابطه منطق فازی در محیط GIS استفاده شده است. برای تعیین میزان اهمیت متغیرها، از مدل AHP استفاده شده است. نتایج نشان داد که شهرهای سراوان و نیک‌شهر برای احداث نیروگاه خورشیدی کاملاً مناسب، خاش و قسمت‌هایی از شهرستان ایرانشهر به‌عنوان مناطق مناسب، زابل- چابهار-کنارک و قسمتی از شهرستان ایرانشهر نسبتاً نامناسب و کاملاً نامناسب هستند [۱۳].

ذوقی و همکاران (۱۳۹۴) مدل r.sun را در برآورد میزان دریافت انرژی خورشیدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در استان اصفهان به کار گرفتند و میزان دریافت انرژی خورشیدی منطقه را محاسبه کردند. مؤلفه‌های مورد استفاده در این پژوهش ارتفاع، شدت و جهت تابش، شیب، انرژی خورشید بود [۲۴]. بر اساس نتایج، بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی استان اصفهان بیشترین ساعت آفتابی را داشتند. صادقی و همکاران (۱۳۹۲)، با اولویت‌بندی معیارها مؤثر بر مکان یابی نیروگاه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی و انرژی بادی) در استان کرمان با استفاده از GIS و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به بررسی معیارها مؤثر بر انرژی خورشیدی و بادی پرداخته و با استفاده از GIS و MADAM مناسب‌ترین مکان‌ها در را برای احداث این نیروگاه‌ها تعیین کردند. در این تحقیق از متغیرهای ساعت های آفتابی، گرد و غبار و درجه حرارت منطقه استفاده شده بود [۱۷].

هدف اصلی تحقیق حاضر، شناسایی مکان‌های بهینه برای توسعه مزارع خورشیدی یا استقرار نیروگاه خورشیدی در استان خراسان جنوبی است. با توجه به آلودگی سوخت‌های فسیلی و همچنین هزینه بالای آن‌ها و ضرورت تأمین انرژی، استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر از نظر محیط‌زیستی و اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. استان خراسان جنوبی که در اقلیم گرم و خشک قرار گرفته است و استانی آفتابی محسوب می‌شود، می‌تواند گزینه مناسبی برای نصب و راه‌اندازی نیروگاه‌های خورشیدی باشد. همچنین با توجه به کمبود منابع آبی در استان خراسان جنوبی، توسعه مزارع خورشیدی می‌تواند جایگزین خوبی برای توسعه مزارع کشاورزی به ویژه محصولات آب بر باشد.

مواد و روش‌ها

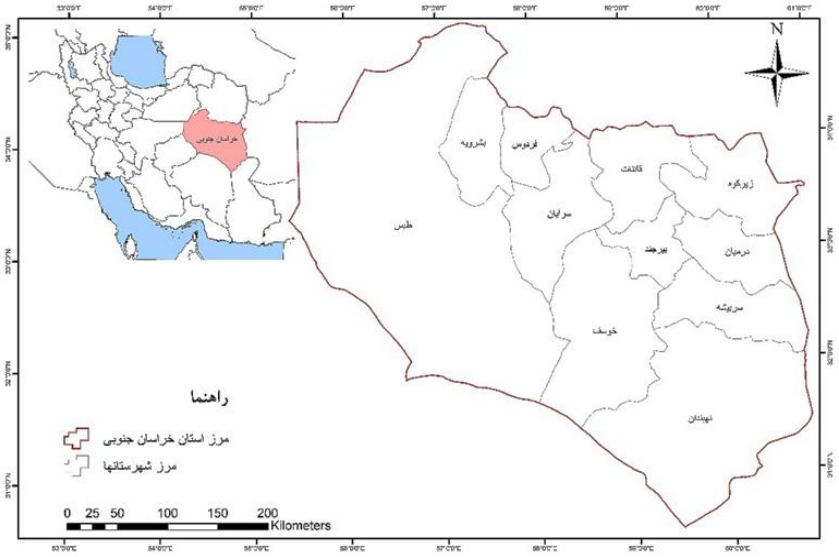
منطقه موردمطالعه

استان خراسان جنوبی با مساحت ۱۵۱,۹۱۳ کیلومترمربع و با آب و هوای متنوع در شرق کشور واقع شده است. این استان با مرکزیت بیرجند، از شمال به خراسان رضوی و از شرق به طول ۳۳۱ کیلومتر دارای مرز مشترک با کشور افغانستان بوده و از غرب به استان یزد، اصفهان و سمنان و از جنوب به استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان محدود می‌باشد (شکل ۱).

در حال حاضر این استان دارای ۱۱ شهرستان، ۲۸ شهر، ۲۵ بخش، ۶۱ دهستان و ۳۵۵۵ آبادی است [۶]. شهرستان‌های این استان شامل بیرجند، قاینات، طبس، فردوس، نهبندان، سرایان، سربیشه، درمیان، بشرویه، خوسف و زیرکوه می‌باشد (شکل ۱).

[1] Analytical Hierarchy Process

[2] IDW



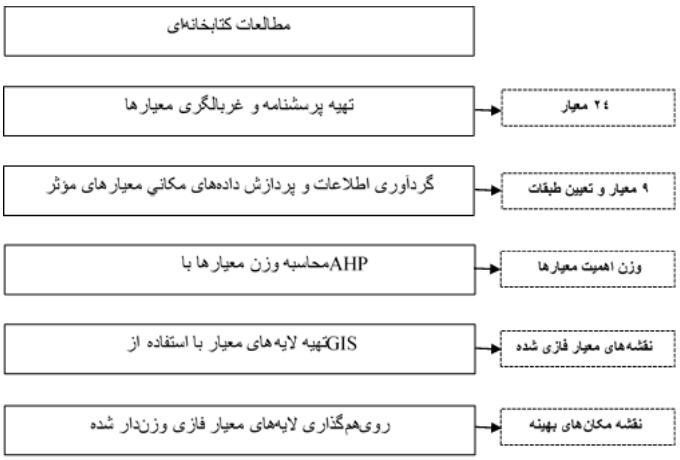
شکل ۱. موقعیت استان خراسان جنوبی

روش تحقیق

فرآیند تحقیق از طریق گام های شش گانه در این پژوهش انجام شده است که در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

گام اول) مطالعات کتابخانه‌ای:

شناسایی معیارهای تأثیرگذار بر مکان‌یابی مزارع خورشیدی با کمک مطالعات کتابخانه‌ای اعم از جستجوی اینترنتی، و بررسی اسناد و درگاه سازمانی صورت گرفت. در فرآیند امکان‌سنجی توسعه مزارع خورشیدی در استان خراسان جنوبی ۲۴ معیار در سه دسته فیزیکی (نظیر درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، رطوبت، گسل، تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی، بارندگی، درجه حرارت، تعداد روزهای ابری، سرعت و جهت باد غالب، گرد و خاک، ساختار زمین شناسی و فاصله از مسیل‌ها و رودخانه‌ها)، اقتصادی و اجتماعی (اعم از فاصله از راه‌ها، فاصله از شهر، زیبا شناختی، توان فرسایش، فاصله از خطوط انتقال نیرو، کاربری‌ها و فاصله از مراکز کم‌جمعیت و پرجمعیت) و زیستی (مانند پوشش گیاهی، زیستگاه‌ها و فاصله از مناطق تحت حفاظت) شناسایی گردید. اگرچه بازدهی هرچه بیشتر نیروگاه‌ها وابسته به دما و ساعات آفتابی و انرژی تابشی دریافتی زمین است ولی با این وجود مؤلفه‌های دیگری نیز در پایداری توسعه، بهره‌برداری بهتر و داشتن توجیه اقتصادی در میان‌مدت، مدنظر قرار گرفت.



شکل ۲. نمودار جریانی روش کار تحقیق (کادرهای با خط پیوسته بیانگر مراحل انجام تحقیق است و کادرهای خط‌چین نتیجه هر مرحله را نشان می‌دهد)

گام دوم) تهیه پرسشنامه و غربالگری معیارها:

در گام دوم یک پرسشنامه به‌منظور غربال‌گری معیارها تهیه گردید و در اختیار ۲۰ نفر از اساتید و افراد متخصص حوزه محیط‌زیست قرار گرفت. برای رتبه‌بندی معیارهای مهم و اثرگذار کد غربالگری در متلب نگارش شد.

براساس نتایج غربالگری، درآخر از ۲۴ معیار اولیه مشخص شده، ۹ معیار اصلی برگزیده شد. این معیارها شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، رطوبت، فاصله از گسل، تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی، بارندگی، ابرناکی یا تعداد روزهای ابری و نزدیکی به راه‌ها بودند (جدول ۱) .

گام سوم) گردآوری اطلاعات و پردازش داده های مکانی معیارهای مؤثر:

در گام سوم، داده‌های مکانی مربوط به ۹ معیار مؤثر شامل نقشه‌های شیب، جهت شیب، ارتفاع، رطوبت، فاصله از گسل، تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی، بارندگی، ابرناکی یا تعداد روزهای ابری و نزدیکی به راه‌ها جمع‌آوری و تهیه شد. اطلاعات مربوط به ارتفاع، گسل‌ها و جاده‌ها از سازمان برنامه و بودجه و اطلاعات هواشناسی و اقلیم از اداره کل هواشناسی استان دریافت شد. سپس نقشه‌های معیار به‌منظور تعیین میزان و نحوه اثرگذاری هر یک از معیارها طبقه‌بندی شد.

گام چهارم) محاسبه وزن معیارها:

در گام چهارم میزان اهمیت هر یک از ۹ معیار مؤثر توسط نظرسنجی از متخصصان محیط‌زیست تعیین شد. نظرسنجی در قالب ماتریس مقایسات زوجی از طریق روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به‌کمک نرم‌افزار Expert choice انجام و وزن معیارها محاسبه شد. روش تجزیه تحلیل سلسله مراتبی اولین بار توسط توماس ساعتی معرفی شد و به سرعت به یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تبدیل شد [۹].

در این روش ارزش و اهمیت معیارها، دو به دو نسبت به هم مشخص شدند و ماتریس مقایسه زوجی معیارها تشکیل گردید. یکی از مزیت‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام شده برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها است. برای بررسی ناسازگاری از ضریبی به‌نام ناسازگای[1] (IR)[2] استفاده شده است. برای تعیین وزن مراحل زیر انجام شد:

۱) تعریف و سازمان‌دهی معیارها در یک سلسله مراتب (تشکیل ماتریس معیارها)؛

۲) انجام مقایسه دو به دوئی از اهمیت نسبی معیارها برای ایجاد وزن؛

۳) تعیین درجه دقت و صحت وزن‌دهی که از شاخص سازگاری استفاده می‌شود و برمبنای رویکرد بردار ویژه تئوری گراف محاسبه می‌گردد. اگر شاخص کمتر مساوی ۰/۱ باشد وزن‌دهی صحیح است.

بنابراین، اهمیت معیارها به‌ترتیب اولویت تأثیر در به‌گزینی مکان‌های مستعد مزارع خورشیدی برحسب اجماع نظر متخصصان مربوطه به دست آمد.

گام پنجم) تهیه لایه‌های معیار با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی:

در این گام معیارها بر اساس معیارهای توانسنجی فیزیکی، اقتصادی-اجتماعی و زیستی در نرم‌افزار Arc Map 10.3، با استفاده از روش درون یابی IDW به نقشه‌های رستری با اندازه سلول ۵۰ در ۵۰ تبدیل شدند. این روش یکی از روش‌های درون‌یابی متناسب با هدف شناخته شده است. همچنین در مطالعه‌ای که در استان فارس انجام شده بهترین روش درون‌یابی بعد از آزمون روش های مختلف، روش IDW معرفی شده است. نقشه‌های معیار برحسب میزان تأثیرگذاری طبقه‌بندی و کدگذاری شد. با توجه به شرایط فازی حاکم بر معیارهای مورد استفاده برای سنجش گزینه‌ها، از روش سلسله مراتبی فازی استفاده شده است.

منظور از شرایط فازی، وجود عدم قطعیت و دامنه تغییرات برای رتبه‌دهی به یک معیار است. با توجه به هفت مجموعه توابع فازی ارائه شده، یکی از این هفت مجموعه توسط کاربر تعریف می‌شود. سپس نقشه‌های معیار کدگذاری شده با استفاده از توابع افزایشی خطی و کاهشی بر اساس نوع طبقه‌بندی داده‌ها، با دستور Fuzzy

[1]- Inconsistency Ratio

membership تبدیل به لایه‌های فازی با ارزش صفر تا یک شدند. در آخر هر لایه معیار فازی شده در وزن اهمیت بدست آمده از طریق AHP ضرب گردید.

گام ششم) روی‌هم گذاری لایه های معیار فازی وزن‌دار شده:

در گام نهایی انجام پژوهش، روی‌هم گذاری فازی لایه‌های معیار فازی وزن‌دار شده با عملگر فازی گاما موسوم به روش AHP-FUZZY با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام گرفت. این روش تلفیقی از به کارگیری روش وزن‌دهی AHP با روش روی‌هم گذاری فازی لایه‌های اطلاعاتی است. نقشه به دست آمده از این روش بیانگر مکان‌های بهینه جهت توسعه مزارع خورشیدی هستند.

نتایج

اقداماتی که در گام‌های اول تا چهارم انجام شد منجر به استخراج جدول ۱ شامل تشریح معیارها، غربال‌گری، تعیین نحوه اثرگذاری و وزن‌دهی به معیارها در به‌گزینی مکان‌های مستعد توسعه مزارع خورشیدی شد.

براساس نتایج و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، بیشترین وزن و اهمیت در به‌گزینی مکان های مستعد مزارع خورشیدی، مربوط به تابش (یا تعداد روزهای آفتابی) است. همچنین ضریب ناسازگاری در ماتریس مقایسات زوجی در محدوده معتبر با مقدار ۰/۰۹ بدست آمد.

مطابق با فرآیند پژوهش در گام پنجم، نقشه‌های ۹ معیار موثر ترسیم شد (شکل ۳ تا ۱۱). مطابق با شکل ۳، می‌توان گفت بخش زیادی از پهنه‌های سرزمینی در استان خراسان جنوبی در مناطق کم شیب و هموار قرار گرفته است. بخش اندکی از مساحت استان در شرق و نواحی غربی میانه دارای شیب‌های زیاد هستند. نقشه طبقات ارتفاعی استان (شکل ۴)، بیانگر پراکنش پستی‌ها و بلندی‌ها در منطقه مورد مطالعه است. بیشتر سرزمین‌های استان خراسان جنوبی دارای ارتفاع کمتر از ۱۵۰۰ متر هستند. مطابق شکل ۵ بیشتر مناطق استان دارای دامنه‌های با شیب جنوبی و شرقی هستند.

معیار بعدی تأثیر گذار در به گزینی نیروگاه های خورشیدی، ساعت آفتابی است. این معیار مهم‌ترین مؤلفه اقلیمی است و نشان‌دهنده میزان انرژی دریافتی مناطق از خورشید است. ساعات آفتابی مجموع ساعات ماهانه یا سالانه ایستگاه هواشناسی است (شکل ۶). براساس شکل ۷، هرچه فاصله از گسل بیشتر باشد مکان مناسب‌تری برای مزارع خورشیدی است، این امر در کدگذاری و پهنه‌بندی فاصله از گسل‌ها در استان رعایت شده است. معیار رطوبت نیز در استان مطابق با شکل ۸ پهنه‌بندی و کدگذاری شد.

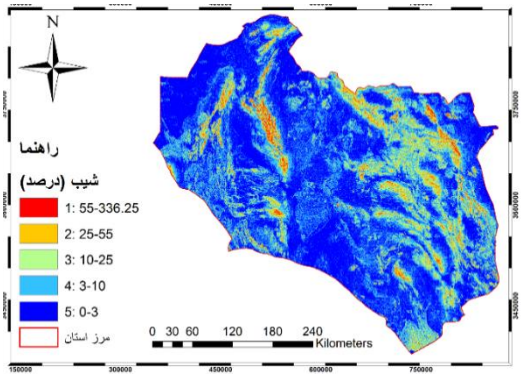
با توجه به جدول ۱، پهنه‌بندی داده‌های اقلیمی ابرناکی و بارندگی بر اساس داده های تعداد روز های ابری در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان، انجام شد (شکل‌های ۹ و ۱۰). در آخر، برای آخرین معیار نیز هر چه فاصله از جاده بیشتر باشد، مطلوبیت مکانی جهت توسعه نیروگاه کاهش می یابد که این نکته در کدگذاری و پهنه‌بندی مناطق مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۱).

نقشه‌های معیار حاصل از کدگذاری طبقات به لایه‌های فازی باارزش صفر و یک تبدیل شد (شکل‌های ۱۲ تا ۲۰). سپس هر نقشه معیار فازی شده در وزن اهمیت حاصل از روش AHP، ضرب و لایه‌های معیار فازی‌شده وزن‌دار تهیه شد. در آخر با عملگر فازی گاما نقشه‌های معیار فازی شده وزن‌دار روی‌هم‌گذاری شد و نقشه مکان‌های بهینه جهت توسعه مزارع خورشیدی به دست آمد. طبق شکل ۲۱ شهرستان‌های بشرویه، خوسف، زیرکوه، سرایان، طبس، فردوس و نهبندان مکان‌هایی با درجه بهینگی متوسط، مطلوب و بسیار مطلوب برای توسعه مزارع خورشیدی هستند.

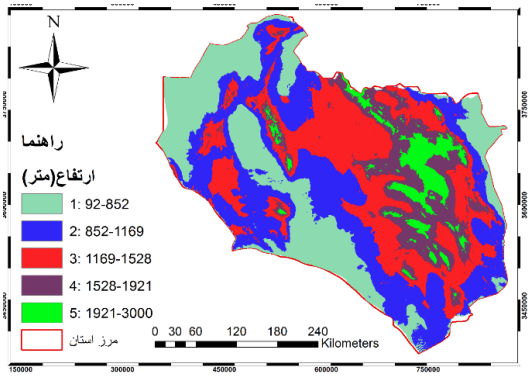
میزان مساحت‌ها در شهرستان‌های با درجه بهینگی متوسط، مطلوب و بسیار مطلوب به تفکیک در جدول ۲ درج شده است. طبس (۳۸۷/۱ کیلومترمربع)، نهبندان (۱۲۰/۴ کیلومترمربع) و سرایان (۱۱۹/۶ کیلومترمربع) به ترتیب مکان‌های با مطلوبیت بسیار بالا در استان خراسان جنوبی هستند. لازم به ذکر است که مساحت‌های بدست آمده با غربال‌گری از معیارهای متعدد و با نگاه سخت‌گیرانه بدست آمده و توان بالفعل بیشتر مورد نظر قرار گرفته است.

جدول ۱. طبقه‌بندی معیارهای به‌کار رفته در به‌گزینی مکانی

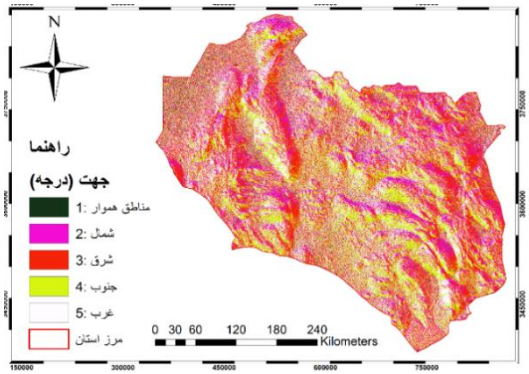
معیار	طبقات در منطقه مطالعه	وزن معیار
شیب (درصد): به‌عنوان یکی از ویژگی‌های شکل زمین در نظر گرفته می‌شود.	طبقه ۱: ۳۳۶/۲۵ -۵۵ طبقه ۲: ۵۵-۲۵ طبقه ۳: ۲۵-۱۰ طبقه۴: ۱۰-۳ طبقه۵: ۳-۰	۰/۲۰۸
جهت شیب: از نظر میزان دریافت انرژی خورشیدی و همچنین زاویه قرارگیری صفحه‌های دریافت‌کننده‌ی انرژی خورشیدی دارای اهمیت است.	طبقه ۱: ۰ - (۱-) طبقه ۲: ۴۵-۰ طبقه ۳: ۱۳۵-۴۵ طبقه ۴: ۲۲۵-۱۳۵ طبقه۵: ۳۱۵ -۲۲۵	۰/۱۴۰
ارتفاع (متر): هرقدر ارتفاع منطقه‌ای از سطح دریا کمتر باشد، ضخامت جو ضخیم از غلظت بیشتر ترکیبات و عوامل جذبی یا انعکاسی حکایت دارد. هرقدر ارتفاع منطقه بیشتر باشد، ترکیبات جو رقیق‌تر و ضخامت جو کمتر است. ضخامت و ترکیبات جو علاوه بر ورود انرژی موج کوتاه خورشید، انرژی موج بلند زمین را هم کنترل می‌کند (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۶). بنابراین مناطق مرتفع به‌دلیل دریافت انرژی زیاد، دارای پتانسیل بالاتری نسبت به مناطق پست هستند.	طبقه ۱: ۸۵۲-۹۲ طبقه ۲: ۱۱۶۹-۸۵۲ طبقه ۳: ۱۵۲۸-۱۱۶۹ طبقه ۴: ۱۹۲۱-۱۵۲۸ طبقه۵: ۳۰۰۰-۱۹۲۱	۰/۰۲۱
رطوبت (میلی گرم): منظور رطوبت نسبی است یا نسبت مقدار بخار آب موجود در هوا به مقدار بخار آبی است که اگر هوا در همان درجه حرارت می‌داشت به‌صورت اشباع بود. این نسبت همیشه به صورت درصد بیان می‌شود.	طبقه ۱: ۴۴/۶۹-۳۹ طبقه ۲: ۳۹-۳۷ طبقه ۳: ۳۷-۳۵ طبقه ۴: ۳۵-۳۳ طبقه۵: ۳۳-۳۰	۰/۰۶۳
فاصله از گسل (متر): این متغیر از جهت آسیب به پنل‌ها و تاسیسات مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابراین هرچه فاصله از گسل بیشتر باشد بهتر است. فاصله بهینه ۱۰ کیلومتر درنظر گرفته شده است.	طبقه ۱: ۱۰۰۰۰-۰ طبقه ۲: ۲۰۰۰۰-۱۰۰۰۰ طبقه ۳: ۳۰۰۰۰-۲۰۰۰۰ طبقه ۴: ۴۰۰۰۰-۳۰۰۰۰ طبقه۵: ۵۳۰۰۰-۴۰۰۰۰	۰/۰۲۸
تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی: به‌عنوان انرژی تابشی هم شناخته می‌شود و مهم‌ترین متغیر اقلیمی است که میزان دریافت انرژی خورشیدی را نشان می‌دهد. ساعات آفتابی مجموع ساعات ماهانه یا سالانه ایستگاه هواشناسی است. این متغیر خود تحت تأثیر عرض جغرافیایی و ابرناکی آسمان است.	طبقه ۱: ۳۱۸۰-۳۰۶۶ طبقه ۲: ۳۵۲۰-۳۱۸۰ طبقه ۳: ۳۲۹۰-۳۲۵۰ طبقه ۴: ۳۳۲۰-۳۲۹۰ طبقه۵: ۳۳۷۷-۳۳۲۰	۰/۳۱۰
بارندگی (میلی‌متر): مناطق با بارش بالا در طول سال از یک طرف نشان دهنده از بالا بودن رطوبت منطقه بوده که خود مهم‌ترین عامل جذب تابش موج کوتاه است، از طرف دیگر نشان‌دهنده وجود ذرات معلق بالا در اتمسفر آن نقطه بوده که هم در جذب و هم در انعکاس تابش موج کوتاه نقش دارد. بارش اثر نامطلوبی از نظر فنی داشته که کثیف شدن صفحات فتوولتائیک را سبب می‌شود.	طبقه ۱: ۱۹۵/۹۹-۱۷۰ طبقه ۲: ۱۷۰-۱۵۰ طبقه ۳: ۱۵۰-۱۳۰ طبقه ۴: ۱۳۰-۱۰۵ طبقه۵: ۱۰۵-۸۳	۰/۰۹۴
ابرناکی یا تعداد روزهای ابری: ابرناکی مانند رطوبت و بارندگی بر میزان انرژی دریافتی از خورشید تاثیرگذار است. هرچه تعداد روزهای ابری بیشتر باشد، میزان انرژی دریافتی از خورشید کاهش میابد و از این لحاظ بر میزان تولید انرژی تاثیر مستقیم دارد.	طبقه ۱: ۴۶/۵۴- ۳۸ طبقه ۲: ۳۸-۳۴ طبقه ۳: ۳۴-۳۱ طبقه ۴: ۳۱-۲۹ طبقه۵: ۲۹-۲۲	۰/۰۹۴
نزدیکی به راه‌ها (متر): این متغیر از لحاظ صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل و نقل و انتقال اهمیت دارد. دسترسی آسان به راه ها و جاده ها ، میزان هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. اما نزدیکی بیش از حد به راه‌های اصلی از لحاظ ایمنی و آلودگی ها احتمالی می‌تواند دردسرساز باشد. فاصله ایمن ۶ کیلومتر در نظر گرفته شده است.	طبقه ۱: ۸۶۰۰۰-۵۵۰۰۰ طبقه ۲: ۵۵۰۰۰-۱۰۰۰۰ طبقه ۳: ۱۰۰۰۰-۶۰۰۰ طبقه ۴: ۱۰۰۰-۰ طبقه۵: ۶۰۰۰-۱۰۰۰	۰/۰۴۰



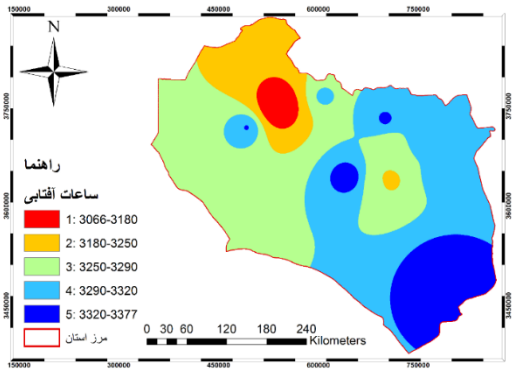
شکل۳: نقشه طبقه‌بندی معیار شیب



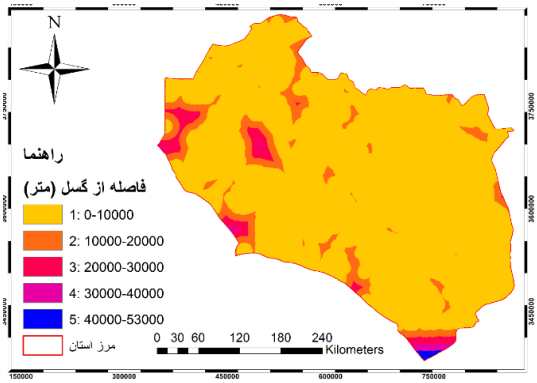
شکل۴: نقشه طبقه‌بندی ارتفاع



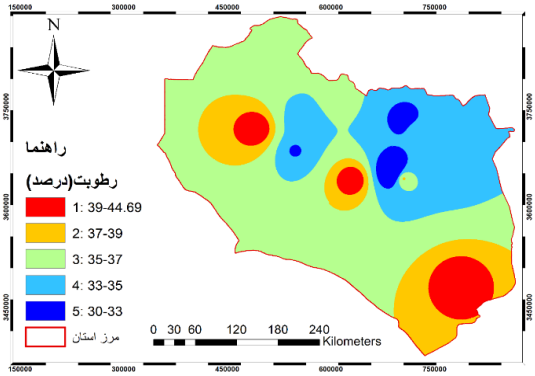
شکل۵: نقشه طبقه‌بندی جهت



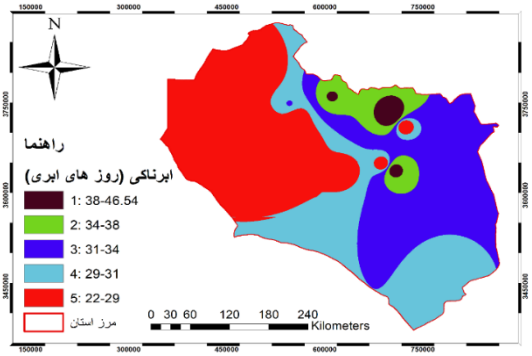
شکل۶: نقشه طبقه‌بندی ساعات آفتابی



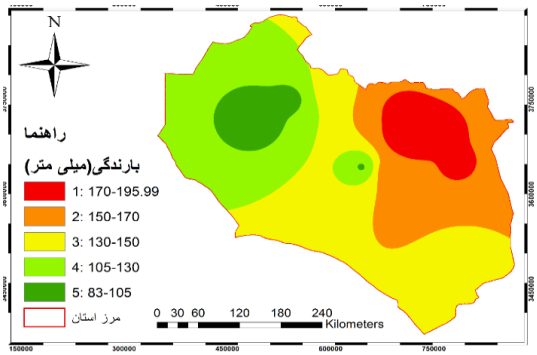
شکل۷: نقشه طبقه‌بندی فاصله از گسل



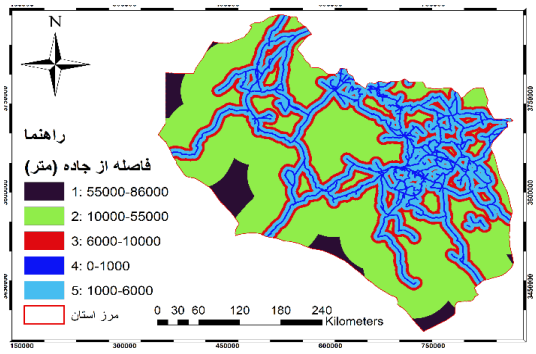
شکل۸: نقشه طبقه‌بندی رطوبت



شکل۹: نقشه طبقه‌بندی ابرناکی

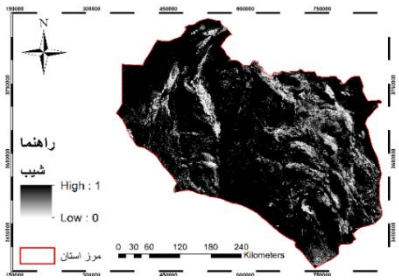


شکل۱۰: نقشه طبقه‌بندی بارندگی

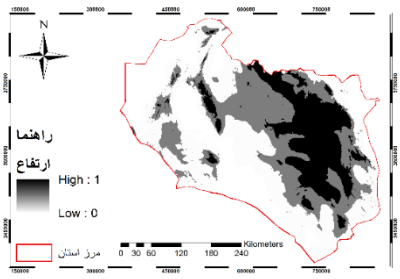


شکل ۱۱: نقشه طبقه‌بندی جاده

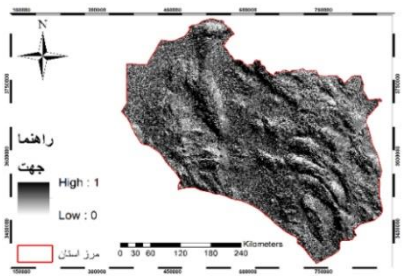
بنابراین، با تغییر شرایط موجود و یا با چشم‌پوشی از برخی هزینه‌های توسعه می‌توان به مساحت‌های بیشتری با اجرای دوباره مدل ارائه شده دست یافت. بر اساس جدول ۲ و شکل ۲۱، برخی از شهرستان‌ها مانند بیرجند، درمیان، سربیشه و قائنات با توجه به معیارهای مورد بررسی در حال حاضر دارای مطلوبیت مناسبی برای توسعه مزارع خورشیدی نیستند.



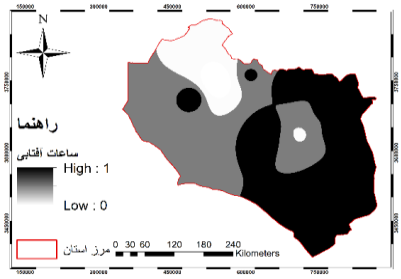
شکل ۱۲: نقشه فازی‌شده شیب



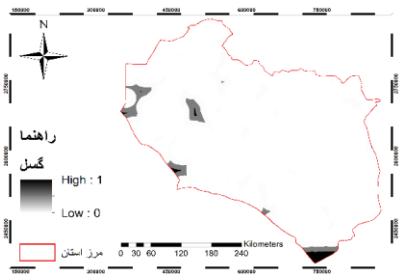
شکل ۱۳: نقشه فازی‌شده ارتفاع



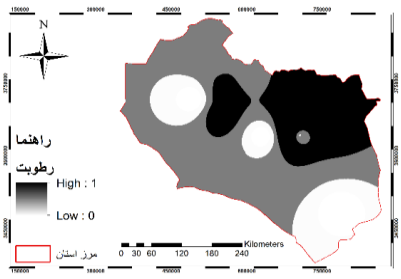
شکل ۱۴: نقشه فازی‌شده جهت



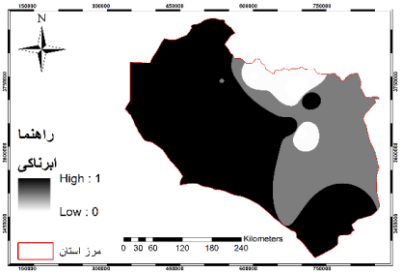
شکل ۱۵: نقشه فازی‌شده ساعات آفتابی



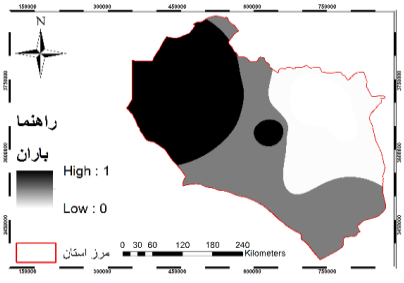
شکل ۱۶: نقشه فازی‌شده گسل



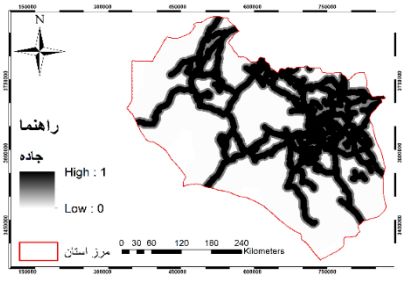
شکل ۱۷: نقشه فازی‌شده رطوبت



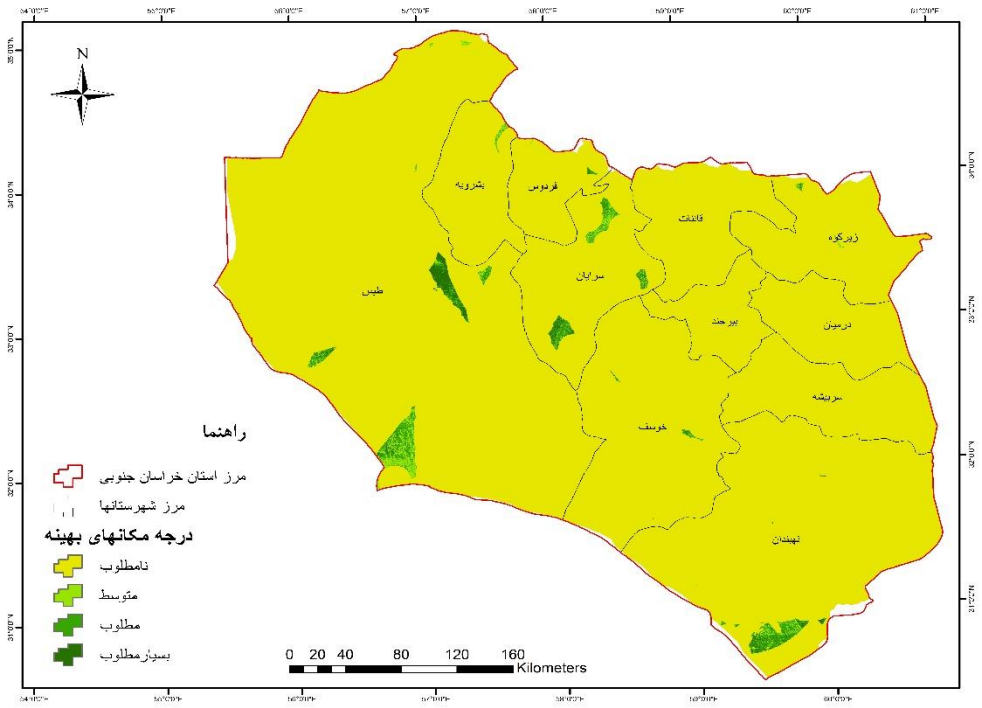
شکل ۱۸: نقشه فازی‌شده ابرناکی



شکل ۱۹: نقشه فازی‌شده بارندگی



شکل ۲۰: نقشه فازی‌شده فاصله از جاده



شکل ۲۱. نقشه مکان‌های بهینه برای توسعه مزارع خورشیدی در استان خراسان جنوبی

جدول ۲. میزان مساحت بهینه شهرستان‌های استان خراسان جنوبی برای توسعه مزارع خورشیدی

شهرستان/ مساحت با درجه مطلوبیت (کیلومتر مربع)	متوسط	مطلوب	بسیار مطلوب
بشرویه	۳۲/۴۱۳	۱۸/۴۲۰	۰/۰۰۰
خوسف	۶/۵۳۵	۲۵/۴۳۰	۱۱/۵۲۸
زیرکوه	۱۹/۳۶۸	۱۱/۹۷۳	۲/۲۴۰
سرایان	۱۴۱/۵۳۸	۲۹۰/۹۱۰	۱۱۹/۵۷۵
طبس	۴۷۶/۵۲۵	۵۶۸/۸۳۳	۳۸۷/۰۸۳
فردوس	۷/۳۸۰	۱۲/۶۶۰	۴/۸۰۸
نهبندان	۱۱۳/۴۲۸	۳۵۶/۶۵۳	۱۲۰/۴۴۸

نتیجه‌گیری

با توجه به تمایل روزافزون در استفاده از انرژی‌های نوین مانند انرژی خورشیدی، برنامه‌ریزی در بهره‌برداری اصولی ضروری است. خراسان جنوبی نیز به عنوان یکی از مناطق برخوردار از توانمندی انرژی خورشیدی در کشور شناخته می‌شود. بهره‌گیری از آن نیازمند شناسایی مکان‌های بهینه برای توسعه مزارع خورشیدی است. از طرفی توسعه مزارع کشاورزی در استان خراسان جنوبی با توجه به کمبود منابع آبی استان در اقلیم خشک و کویری با چالش جدی مواجه است. بنابراین، توسعه مزارع خورشیدی می‌تواند جایگزین خوبی برای توسعه مزارع کشاورزی به ویژه محصولات آب‌بر و راهبردی باشد.

پیشنهاد می‌گردد مطالعات مقایسه‌ای بین مزارع کشاورزی و مزارع خورشیدی انجام شود. در این میان مزارع الزاماً مفهوم کشت برنج، گندم، غلات و دیگر محصولات نخواهد داشت، بلکه برداشت انرژی از یک مزرعه مفهوم جدیدی است که با اتصال به شبکه جمع‌آوری انرژی و توسعه رمزارزها، چرخه بازاریابی آن در محل تولید نیز کامل می‌گردد.

عملکرد و راندمان مزارع خورشیدی به طور کامل به شرایط مکانی اقلیمی محل استقرار صفحات خورشیدی وابسته است. مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی امری ضروری و مهم به حساب می‌آید. این پژوهش کوششی در شناسایی مکان‌های مطلوب و بهینه برای توسعه

نیروگاه‌های خورشیدی در استان است. فرآیند به کار رفته برای پهنه‌بندی مکان‌های مطلوب توسعه نیروگاه‌های خورشیدی نشان می‌دهد که با استفاده از خرد جمعی و در نظر گرفتن کارشناسان و متخصصان ذی‌ربط می‌توان به صورت علمی و منطقی و حتی سخت‌گیرانه مکان‌های مناسب را تعیین نمود.

به دلیل این‌که در مقیاس استان خراسان جنوبی، پژوهش مشابه انجام نشده است، امکان مقایسه نتایج مکانی کمتر وجود دارد. تنها پژوهش انجام شده حوزه در مطالعاتی مقاله حاضر، مطالعه یوسفی و همکاران در شهرستان بیرجند، مرکز استان خراسان جنوبی است، که با توجه به به کارگیری عدد عملگر فازی مشابه، نتایج تقریباً مشابهی به دست آمده است. در مطالعات مختلف صورت گرفته در گذشته نظیر اسفندیاری (۱۳۹۱)، تقوایی و صبوحی (۱۳۹۶)، رحیمی و همکاران (۱۳۹۶) و رفیعی و همکاران (۱۳۹۶) نیز استفاده از این روش ترکیبی، سودمند و کارآمد بوده است.

میزان مساحت‌های مطلوب به دست آمده در این مطالعه در مقایسه با مطالعاتی که در اقلیم خشک نظیر استان‌های فارس (گرجی و همکاران، ۱۳۹۶)، سیستان و بلوچستان (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۶) و اصفهان (تقوایی و صبوحی، ۱۳۹۶) در استان خراسان جنوبی کم‌تر به دست آمده است. یکی از دلایل این تفاوت‌ها، رویکرد سخت‌گیرانه (کم‌ترین هزینه اقتصادی و تأکید بیشتر بر توان سرزمین) به کار گرفته شده در این مطالعه است. بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت مکان‌های بهینه توسعه مزارع خوشیدی با لحاظ نمودن مجموعه‌ای از مولفه‌های فیزیکی مؤثر نظیر شکل زمین، متغییرهای اقلیمی و نزدیکی به زیرساخت‌های حمل و نقلی می‌تواند برای اجرا بر اساس ردیف بودجه‌های مورد توجه سازمان‌های مربوطه در استان خراسان جنوبی به ترتیب اولویت بسیار مطلوب، مطلوب و متوسط قرار گیرد.

در این پژوهش مساحت‌های به دست آمده با غربال‌گری از معیارهای متعدد و با نگاه سخت‌گیرانه به دست آمده و توان فعلی محیط‌زیست بیشتر مورد نظر قرار گرفته است. بنابراین، با اجرای دوباره مدل و با تغییر شرایط موجود یا با چشم‌پوشی از برخی هزینه‌های توسعه می‌توان به مساحت‌های بهینه بیشتری دست یافت. در راستای دستیابی به بهره‌برداری پایدار نیز پیشنهاد می‌شود فرآیند ارائه شده برای سایر انرژی‌های پاک مانند باد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مطالعاتی در آینده می‌تواند به مبحث منطقه‌بندی در صادرات و واردات صورت‌های مختلف انرژی‌های پاک بپردازد.

تقدیر و تشکر

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۸۶۵۵/د/۱۳۹۸ مورخ ۱۳۹۸/۰۴/۱۸ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بیرجند انجام شده است که بدین‌وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

References

[1]. Amanpour, S. Alizadeh, H. Daman Bagh, S. (2013). Evaluation of the development rate of the cities of Kermanshah province in terms of having urban service indicators. *Malayer Environmental Management Quarterly*, 6(73). 105-127, (in Farsi).

[2]. Aydın, N. Y. (2009). *GIS-based site selection approach for wind and solar energy systems: a case study from Western Turkey* (Master's thesis).

[3]. Colak, H. E., Memisoglu, T., & Gercek, Y. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, 149, 565-57.

[4]. DiPippo, R. (2012). *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*. Butterworth-Heinemann.

[5]. Esfandiari, A. (2012). Potential Assessment of Solar Power Plant Construction by Studying Climatic Parameters in Khuzestan Province Using GIS, *Journal of Research and Urban Planning*. 8(28). 61-82, (in Farsi).

[6]. Ferroukhi, R. Gielen, D. Kieffer, G. Taylor, M., Nagpal, D. Khalid, A. (2014), Rethinking Energy: Towards a New Power System, International Renew Energy Agency (IRENA).

[7]. Information portal of the National Iranian Petroleum Products Distribution Company.

https://khorasanjonobi.niopdc.ir, retrieval (2019).

[8]. Janke, Jason R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35(10), 2228-2234.

[9]. Kenisarin, M. & Mahkamov, Kh. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913-1965.

[10]. Makhdoom, M. Darvish sefat, A. Jafarzadeh, H. Makhdoom, R. (2011). *Environmental assessment and planning with GIS*. University of Tehran Press, Tehran.

[11]. Miller, Alasdair, and Ben Lumby. (2012). Utility scale solar power plants: a guide for developers and investors. Guidilines book written for IFC. World Bank Group, New Delhi, India.

[12]. Mohammadi, J. (2007). Pedometry, Plek Publications, Tehran, 15 volumes.

[13]. Nissan Samani, n. Tahoni, A. (1398). Evaluation of suitable places for solar farms using GIS and multi-criteria decision making methods (Case study of East Azarbaijan province). *Journal of Human Geography Research quarterly*, (3). 747-764, (in Farsi).

[14]. Rafiei.N. Sherafati, m. (2017). Presenting a Hierarchical Process of Fuzzy Data Envelopment Analysis for Locating Solar Power Plant Sites. *Quarterly Journal of Industrial Management*, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, (4)12, (in Farsi).

[15]. Rahimi, M. Pazand, F.Abdalahi, A. (2017), Potential measurement of solar power plant in Sistan and Baluchestan province using AHP model and fuzzy logic. *Journal of Geography and Development*, (49). 23-36, (in Farsi).

[16]. Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (2020), Title of webpage: http://tamaenergy.com, retrieval (2018).

[17]. Sadeghi, Z. Dalal Bashi, Z. Hori, H (2013). Prioritization of Factors Affecting the Location of Renewable Energy Power Plants (Solar and Wind Energy) in Kerman Province Using Geographic Information System (GIS) and Multi-Criteria Decision Making Techniques, *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*. 1(2), (in Farsi).

[18]. Sánchez-Lozano, J. M., Antunes, C. H., García-Cascales, M. S., & Dias, L. C. (2014). GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain. *Renewable Energy*, 66, 478-494.

[19]. Settou, B., Settou, N., Gouareh, A., Negrou, B., Mokhtara, C., & Messaoudi, D. (2021). A high-resolution geographic information system-analytical hierarchy process-based method for solar PV power plant site selection: a case study Algeria. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(1), 219-234.

[20]. Soydan, O. (2021). Solar power plants site selection for sustainable ecological development in Nigde, Turkey. *SN Applied Sciences*, 3(1), 1-18.

[21]. Taghvaei, M. Saboohi, A. (2017). Zoning and location of solar power plants in Isfahan province. *Journal of Research and Urban Planning*, (28). 61-82, (in Farsi).

[22]. Tahri, M., Hakdaoui, M., & Maanan, M. (2015). The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1354-136

[23]. The economic effects of energy on the environment (2019), Petro energy information network. Public Relations of the Ministry of Oil. (2005).

[24]. Zoghi, M. Sadat, M. Ehsani, A. (2015). Evaluation of r.sun model in estimating solar energy intake in arid and semi-arid regions (Case study of Isfahan province). *Ecology*, 14(2), 415-427, (in Farsi).

Optimal sites selection for solar farms development using Fuzzy-AHP method in Southern Khorasan province

1- Fatemeh Jahanishakib, assistance professor, environmental science department, at Birjand University, Iran.
jahanishakib@birjand.ac.ir
2- Fatemeh Jafaripour, M.Sc. student of environmental science, Birjand University, Birjand, Iran.
3- Bahare Hoseini, M.Sc. student of environmental science, University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Received: 08 Jan 2021
Accepted: 27 Feb 2021

Abstract

In recent years, there has been a growing demand for solar energy, as one of the cleanest and most innovative energy sources in the world. South Khorasan province is one of the less developed regions of Iran that the transfer of energy carriers to this province is costly. On the other hand, the development of agricultural farms in South Khorasan province is facing a serious challenge due to the lack of water resources in arid and desert climate. Therefore, the development of solar farms can be a good alternative for the development of agricultural farms, especially irrigated and non-strategic crops. The purpose of this study is to identify the optimal locations for the development of solar farms in South Khorasan province. The different stages of this research have been done in six steps. First, the criteria affecting the location of solar farms were identified by the Delphi method. In the second step, with the help of experts and environmentalists, the criteria were coded and screened. In the third step, the spatial database of effective criteria was established. In the fourth step, the weight of the effective criteria was calculated through the Analytic Hierarchy Process (AHP). In the fifth step, the layers of effective criteria were classified and coded. In the final step, the weighted fuzzy layers with gamma fuzzy operator was overlapped. The results showed that in South Khorasan province, the cities of Tabas (387.4 km^2), Nehbandan (120.4 km^2) and Sarayan (119.6 km^2) are sites with very high optimality for the development of solar farms in the province, respectively. The optimal area by the cities of the province at the average, desirable and very desirable level for operation in different conditions was presented. The current results and even changing the existing conditions by re-implementing the proposed approach can consciously lead managers' decisions towards the wise development of the region, the use of environmental capacities and new energies.

Keywords: Solar farms, Optimal selection, Screening criteria, Fuzzy Gamma Operator, South Khorasan Province