فصلنامه علمی – ترویجی «نشریه انرژی ایران»
دوره ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۳۵-۵

پتانسیل‌سنجی بهره‌برداری از مزارع خورشیدی مبتنی بر فاکتورهای اقلیمی : مطالعه موردی استان ایلام

[۱] احسان نورالهی، [۲] داود فدایی*، [۳] مهدی مظفری

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵/۳/۱۶

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۵/۱۰/۱۹

کلمات کلیدی:
انرژی خورشیدی،
تجزیه و تحلیل مکانی،
قابلیت اراضی،
فازی ای اچ پ،
جی آی اس

چکیده

انرژی‌خورشیدی یکی از انواع منابع انرژی‌تجدیدپذیر می‌باشد که با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی استان ایلام، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هدف این مقاله، ارزیابی و شناسایی مناطق مستعد و دارای پتانسیل بالا جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در استان ایلام می‌باشد. با توجه به ضرورت لحاظ نمودن محدودیت‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی؛ به منظور شناسایی مناطق غیرقابل بهره‌برداری لایه‌های رقومی مربوط به محدودیت‌های تعریف‌شده اعم از حداقل فاصله از مناطق حفاظت شده، حداقل فاصله از مناطق مسکونی، حداقل فاصله از خطوط انتقال و ... در محیط نرم‌افزار GIS تهیه می‌گردد و با استفاده از روی‌هم قراردادن این لایه‌ها با منطق AND نقشه نهایی مربوط به مناطق غیرقابل بهره‌برداری استان تهیه می‌گردد. در ادامه به منظور ارزیابی قابلیت مناطق قابل بهره‌برداری، پس از شناسایی و تعریف ۴ دسته معیاراصلی و ۱۱ زیرمعیار مربوطه؛ وزن نسبی این معیارها و زیرمعیارها با استفاده از تکنیک FAHP و براساس نظرات گروهی از خبرگان دانشگاهی، دولتی و صنعتی مرتبط با حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر تعیین می‌گردد و نقشه نهایی مربوط به قابلیت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای ۱۸ بخش مختلف استان ایلام مطابق با تقسیمات سیاسی کشور با روش جمع وزنی در محیط نرم افزار GIS تهیه می‌گردد.

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر e.noorollahi@aut.ac.ir
۲. استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول) fadaid@aut.ac.ir
۳. دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر mehdi_mozafari85@yahoo.com

۱. مقدمه

نمایندگان ۱۹۵ کشور حاضر در بیست‌ویکمین کنفرانس متعهدین به کنوانسیون تغییرات آب‌وهوایی در پاریس[1]، در دسامبر ۲۰۱۵ به یک توافق و الزام قانونی[2] برای تعیین تکلیف وضعیت محیط‌زیستی زمین رسیدند. در این کنفرانس گسترش استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گاز به عنوان دلیل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG[3]) و گرم‌شدن زمین شناخته شده و کشورهای جهان متعهد شده‌اند که میزان افزایش دمای کره زمین کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد باشد و همچنین کشورها تلاش خواهند کرد تا این افزایش از سقف ۱.۵ درجه سانتیگراد فراتر نرود [۲۰]. ایران با تولید سالانه ۸۵۰ میلیون‌تن گازهای گلخانه‌ای یکی از ۱۰ کشور اصلی دنیا در تولید این گازها است. بر اساس تعهدات الزام شده در COP، ایران تلاش خواهد کرد تا سال ۲۰۳۰ در حدود ۱۹۰ میلیون‌تن از حجم گازهای گلخانه‌ای خود را کاهش دهد. رسیدن به این تعهد و الزام قانونی، بهره‌برداری از انرژی‌های‌تجدیدپذیر را به عنوان یک راه‌کار مناسب پیش‌روی سیاست‌گذاران حوزه انرژی قرار می‌دهد[۵].

انرژی خورشیدی یکی از بهترین و اقتصادی‌ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران می‌باشد که نه تنها سبب کاهش بسیاری از دغدغه‌های بشری، مانند آلودگی‌های زیست‌محیطی و به دنبال آن بیماری‌های نوپدید، پایان‌پذیری منابع فسیلی و مانند آن‌ها می‌شود، بلکه با توجه به شرایط اقلیمی و آب وهوایی کشور، می‌تواند به خوبی گسترش یابد. در ایران در یک منطقه به مساحت ۲۰۰۰ کیلومتر مربع ، امکان نصب۶۰ گیگاوات نیروگاه حرارتی خورشیدی وجود دارد. در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های انرژی خورشیدی به دلیل سادگی آن، حمل و نقل آسان، قابلیت اطمینان بالا، عدم وجود قطعات مکانیکی، سازگاری با محیط‌زیست و عدم نیاز به سوخت، در حال توسعه می‌باشند[۷].

شناسایی مکان مناسب جهت احداث مزارع خورشیدی مانند هر پروژه مهندسی دیگر، به اطلاعات پایه و برنامه‌ریزی دقیق نیازمند است. مسئله‌ی مهم دیگر در فرآیند بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی

1. Paris climate conference (COP21) in December 2015
2. legally binding
3. Greenhouse gas (GHG)

علاوه بر ضرورت وجود پتانسیل انرژی‌خورشیدی در منطقه، اولویت‌بندی مکان‌های مختلف با توجه به معیارهای متعدد فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است. سیستم اطلاعاتی جغرافیایی (GIS[1]) به عنوان یک ابزار بسیار مفید و کاربردی قادر به ایجاد یک پایگاه داده است که می‌تواند به عنوان نقطه‌ی آغاز برای هدایت هر سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS[2]) عمل کند[۴].

هدف این مقاله، ارزیابی و شناسایی مناطق مستعد و دارای پتانسیل بالا جهت احداث نیروگاه خورشیدی در استان ایلام می‌باشد. با توجه به ضرورت لحاظ نمودن محدودیت‌های کلیدی: مانند فاصله از مراکز جمعیتی، فاصله از خطوط انتقال، فاصله از راه‌های دسترسی و ...، در گام نخست این مقاله به منظور تحلیل تناسب اراضی[3] مناطق مختلف استان بر اساس موقعیت جغرافیایی هر منطقه و محدودیت‌های تعریف شده، نقشه مناطق غیرقابل بهره‌برداری مشخص می‌گردد. نقشه مناطق مناسب برای بهره‌برداری از روی‌هم قرار دادن لایه‌های رقومی مربوط به محدودیت‌ها تهیه شده در سیستم اطلاعاتی جغرافیایی تهیه می‌گردد. در ادامه به منظور شناسایی قابلیت مناطق مختلف بر اساس معیارهای تعریف شده و زیرمعیارهای مربوطه، نقشه نهایی از روی‌هم گذاشتن این لایه‌ها جهت تهیه نقشه اولویت‌بندی بخش‌های مختلف استان ایلام، برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی تهیه می‌گردد.

معیارهای تعریف شده با استفاده از مطالعه و جمع‌بندی ادبیات موضوع و نظرات خبرگان این حوزه در ۴ دسته معیار اصلی و ۱۱ زیرمعیار مورد بررسی قرار می‌گیرند. وزن نسبی معیارها و زیرمعیارهای تعریف شده با استفاده از تکنیک فرآیند تحلیل‌سلسله مراتبی فازی (FAHP[4]) و بر اساس نظرات تیمی ۶ نفره متشکل از خبرگان دانشگاهی، صنعتی و دولتی مرتبط با حوزه برنامه‌ریزی انرژی‌های تجدیدپذیر انجام می‌گیرد. در پایان به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج برای مناطق مختلف استان ایلام، بر اساس تقسیمات سیاسی استان برای ۱۸ بخش استان ایلام مورد بررسی قرار می‌گیرد و هر بخش از استان در یکی از پنج کلاس (عالی، خوب، متوسط، کم و ضعیف) جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی قرار خواهد گرفت.

1. Geographic information system(GIS)
2. Decision support system(DSS)
3. land suitability analysis
4. Fuzzy Analytical Hierarchy process(FAHP)

در بخش بعدی این مقاله، مروری بر ادبیات موضوع انجام می‌شود، سپس منطقه مورد مطالعه در این تحقیق معرفی می‌گردد، در ادامه، متدلوژی تحقیق و سپس نتایج و خروجی‌ها مورد بحث قرارمی‌گیرد و در پایان، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. پیشینه تحقیق

با توجه به ویژگی‌های مسائل مطرح در حوزه انرژی، واضح است که پرداختن به این مسائل نیازمند به‌کارگیری یک رویکرد چندمعیاره می‌باشد. بهره‌گیری از تکنیک‌های تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA[1])، به طور فزآینده‌ای مورد توجه برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران حوزه انرژی در زمینه موضوعاتی مانند مدیریت انرژی، برنامه‌ریزی انرژی‌های‌تجدیدپذیر، تخصیص منابع انرژی و ... قرار گرفته است[۶،۱۴]. در مطالعه‌ای آقای استین به منظور اولویت‌بندی تکنولوژی‌های مختلف تولید الکتریسیته از منابع انرژی‌تجدیدپذیر و منابع فسیلی، با به‌کارگیری تکنیک فرآیند تحلیل‌سلسله‌مراتبی (AHP[2]) و تعریف معیارهای مالی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی[3] پرداختند [۶]. آقای اردوغان و کایا به منظور بررسی گزینه‌های تولید انرژی و تهیه یک نقشه راه برای بخش انرژی در کشور ترکیه، یک روش تصمیم‌گیری‌چندمعیاره ترکیبی (FAHP-TOPSIS[4]) بر اساس مجموعه‌های فازی نوع ۲ ارائه نمودند[۱۱].

در زمینه مکان‌یابی و پتانسیل‌سنجی بهره‌برداری از انرژی‌های‌تجدیدپذیر در کشور ایران مطالعات مختلفی صورت گرفته است. در مطالعه‌ای[۱۳] به امکان‌سنجی بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی برای مناطق مختلف ایران بر اساس اطلاعات به دست آمده از ۶۳ ایستگاه مورد مطالعه و همچنین استفاده از نقشه‌های تابش[5] در محیط نرم‌افزار GIS پرداخته شده است و با توجه به بررسی‌های انجام شده به جز مناطق ساحلی جنوبی، بیشترین تابش مربوط به نواحی مرکزی و جنوبی کشور ایران می‌باشد و وجود

1. Multi-criteria decision analysis (MCDA)
2. Analytical Hierarchy process(AHP)
3. socio-economic-political
4. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution(TOPSIS)
5. Radiation

تابش به میزان $500\frac{w}{m^2}$ نشان‌دهنده پتانسیل این مناطق جهت بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتاییک است.

آقای کوسوک‌ساری و همکاران با استفاده از بهینه‌سازی ریاضی، شبیه‌سازی و با در نظر گرفتن معیارهایی مانند: میزان تابش خورشیدی، شیب، ارتفاع و زاویه، به ارائه یک چارچوب یکپارچه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین بهترین سایز و مکان مربوط به پلنت‌های فتوولتاییک می‌پردازند. در این مطالعه، مکان‌های کاندید شناسایی می‌شوند و در ادامه با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، برنامه بلندمدت توسعه این تکنولوژی ارائه می‌نمایند[۱۵]. اولویت‌بندی مناطق مختلف برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در استان کونیا[1] در کشور ترکیه بر اساس دو دسته معیار کلی فاکتورهای زیست‌محیطی[2] و فاکتورهای اقتصادی[3] در مطالعه‌ای توسط یویان[۱۲] مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه برای فاکتور زیست محیطی ۳ زیرمعیار فاصله از مناطق مسکونی، کاربری سرزمینی و فاصله از جاده‌ها تعریف شده است و در ارتباط با فاکتور اقتصادی زیرمعیارهای شیب و فاصله از خطوط انتقال، در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش فرآیند تحلیل‌سلسله‌مراتبی وزن معیارها تعریف و بر اساس وزن‌های به دست آمده، لایه‌های رقومی تهیه شده بر روی‌هم قرار می‌گیرد و در نهایت نقشه مربوط به مناطق مناسب برای بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی تعیین شده است.

به منظور مکان‌یابی مزارع خورشیدی در جنوب اسپانیا، مقاله‌ای[۸] بر اساس معیارهای تعریف شده و استفاده از نرم‌افزار GIS اولویت‌بندی مکان‌های کاندید را با استفاده از روش ELECTRE-TRI[4] تعیین می‌نماید. ارزیابی‌های انجام شده بر اساس ۴ دسته معیار: محیط‌زیست، مکانی، هواشناسی و جغرافیا و ۱۰ زیرمعیار تعریف شده انجام شده است. در مطالعه‌ای[۹] به منظور تعیین بهترین موقعیت مکانی برای قرارگیری تأسیسات خورشیدی ترموالکتریک[5] با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و فرآیندتحلیل‌سلسله‌مراتبی برای تعیین وزن معیارها و همچنین تکنیک تاپسیس

1. Konya
2. Environmental
3. Economic
4. ELimination and Choice Expressing Reality (ELECTRE)
5. Solar thermoelectric

فازی سلسله مراتبی[1] برای ارزیابی و اولویت‌بندی ۱۰ منطقه کاندید شده در این مطالعه استفاده نمودند. آقای نجفی و همکاران[۷] به بررسی وضعیت موجود و چشم‌انداز بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی در کشور ایران پرداخته‌اند. با توجه به وسعت ۱.۶×۱۰^{۱۲} متر مربع و داشتن ۳۰۰ روز آفتابی در کشور ایران در کنار متوسط تابش $\frac{kw-h}{m^2}$ ۲۲۰۰ شرایط مناسبی جهت بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی در کشور ایران فراهم است. در حال حاضر واحدهای انرژی‌خورشیدی کشور ایران در شهرهای شیراز، سمنان، طالقان، یزد، تهران و خراسان قرار دارند.

در تحقیق دیگری[۲۳]، از ارزیابی چندمعیاره مکانی با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی[2]، برای ارزیابی تناسب اراضی مزارع بزرگ برای استقرار تکنولوژی فتوولتائیک در کشور عمان استفاده شده و ۹ زیرمعیار را در قالب سه دسته معیار اصلی شامل معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی جهت ارزیابی مناطق مختلف مدنظر قرار می‌دهد. نتایج نشان داد که ۰.۵ درصد از مجموع اراضی عمان، سطح تناسب بالایی برای نصب تجهیزات فتوولتائیک دارند. آقای بسارتی و همکاران در مطالعه‌ای[۱۶] به پتانسیل بهره‌برداری از تابش خورشیدی در کشور ایران و تهیه نقشه‌های تابش خورشیدی برای ۵حالت به منظور بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی با استفاده از تکنولوژی سلول خورشیدی (PV[3]) و (CSP[4]) پرداختند. آن‌ها در ادامه به بررسی امکان‌سنجی احداث یک پلنت ۵ مگاواتی فتوولتایک در ۵۰ شهر ایران پرداختند که بر اساس نتایج به دست آمده مناطق مرکزی و جنوبی کشور ایران دارای بیشترین اولویت بودند.

در مطالعه دیگری، به منظور بهترین مکان برای راه‌اندازی یک نیروگاه خورشیدی با توجّه به معیارهای مختلف اعم از جغرافیایی، استراتژیکی، دسترسی به شبکه‌ی برق سراسری و ...، با استفاده از تکنیک فرآیندتحلیل‌سلسله‌مراتبی پرداختند. با توجّه به معیارهای موجود و نظر کارشناسان خبره از بین گزینه‌های فراوان، ۴ منطقه اصفهان، کرمان، یزد و زاهدان برای انتخاب مکان نیروگاه خورشیدی انتخاب شدند. از بین دلایل مختلف برای انتخاب گزینه‌های متفاوت به پارامترهایی همچون:

1. Fuzzy Topsis
2. Fuzzy set theory
3. Photovoltaic(PV)
4. Concentrating Solar Power (CSP)

فرکانس‌های تابشی، ابرناکی، باد و دسترسی به شبکه‌ی سراسری برق اشاره شد. براساس نتایج به‌دست آمده، بهترین گزینه‌ی انتخابی یزد می‌باشد، گزینه‌ی دوّم اصفهان، گزینه سوّم با اختلاف کمی از گزینه دوّم، کرمان بوده و زاهدان به‌عنوان آخرین گزینه شناسایی شد.

آقای فرجی سبکبار و همکاران در مطالعه خود به منظور پتانسیل‌سنجی اراضی ایران برای احداث مزارع فتوولتائیک، ۱۴ معیار را معرفی کردند که این معیارها عبارتند از: تابش مستقیم، تابش پراکنده، دما، رطوبت، روزهای ابری، ضریب شفافیت، ارتفاع، زمین شناسی، شیب، دسترسی به زمین، هزینهٔ زمین، کاربری زمین، خطوط انتقال برق و نیروی متخصص. ایشان در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که معیارهای تابش مستقیم، فاصله از خطوط انتقال برق و دما، به ترتیب دارای بیشترین اهمیت و معیار نیروی انسانی کمترین اهمیت را دارد و نتایج نشان داد به ترتیب، سه استان یزد، کرمان و خراسان جنوبی دارای بهترین پتانسیل برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک هستند.

آقای اسفندیاری و همکاران به منظور پتانسیل‌سنجی استان خوزستان جهت یافتن مناطق مستعد و با پتانسیل بالا جهت احداث نیروگاه خورشیدی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS استفاده نمودند. معیارهای تعداد روزهای آفتابی، ابرناکی، روزهای گرد و خاک، رطوبت نسبی، ارتفاع و بارش سالانه، معیارهای مورد استفاده در این پژوهش بودند. بر اساس نتایج بدست آمده شهرهای بهبهان، رامهرمز و باغ ملک و منطقه کوچکی از شوشتر به عنوان مناطق مناسب جهت احداث نیروگاه خورشیدی مشخص گردید.

در این پژوهش بر اساس متدلوژی پیشنهادی تحقیق، پس از اصلاح و بازتعریف معیارهای موجود در ادبیات موضوع، ۴ دسته معیار اصلی و ۱۱ زیرمعیار که هرکدام در پنج سطح تعریف شده‌اند شناسایی می‌شود و تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcMap و نرم افزار Super Decision برای بخش‌های مختلف استان ایلام به منظور شناسایی مناطق مناسب برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی انجام می‌شود.

۳. معرفی منطقه مورد مطالعه

استان ایلام در بین ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ از خط استوا، در جنوب‌غربی کشور با مساحت ۲۰۱۳۳ کیلومترمربع واقع شده است و دارای ۵۹۰ هزار نفر جمعیت است. این استان از طرف جنوب به خوزستان، از شرق با لرستان و قسمتی از خوزستان، از

شمال با کرمانشاه و از غرب با کشور عراق با طول مرزی ۴۳۰ کیلومتر همسایه است و از لحاظ اقلیمی جزء مناطق گرم ایران است.

استان ایلام به دو ناحیه‌ی جغرافیایی تقسیم می‌شود که مناطق مرتفع در شمال و شرق استان بخشی از رشته کوه زاگرس می‌باشد و مناطق جنوب‌غربی استان را دشت‌های پست و گرم پوشانده است. بخش‌های کوهستانی استان دارای آب‌وهوای سرد با پوشش گیاهی متراکم و بارندگی مناسب است. مناطق میانه دارای آب‌وهوای معتدل و مناطق غربی دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل است. به طور کلی فعالیت اقتصادی استان ایلام شامل کشاورزی، صنعت و خدمات به ترتیب با ۲۴.۵درصد، ۲۸.۱ درصد و ۴۷.۴ درصد می‌باشد.

سهم استان ایلام در تولید انرژی الکتریکی کشور با به مدار آمدن نیروگاه‌های برق‌آبی در حال بهره‌برداری و طرح‌های در دست اجرا روندی افزایشی دارد. جدول مشخصات عمومی نیروگاه‌های برق آبی استان را نشان می‌دهد.

جدول۱. مشخصات عمومی نیروگاه‌های برق آبی استان ایلام در سال ۱۳۹۱

مشخصات عمومی نیروگاه‌های استان ایلام				
نام نیروگاه	نوع نیروگاه	سال بهره‌برداری	ظرفیت	حجم کل مخزن (میلیون مترمکعب)
سیمره	برق‌آبی	۱۳۹۴/۰۴/۰۲	۴۸۰ مگاوات	۲ میلیارد و هشتصد
مشخصات عمومی طرح‌های در دست مطالعه و اجرای نیروگاه‌های برق‌آبی				
سد تلمبه ذخیره‌ای ایلام		در دست مطالعه	-	-

با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی استان ایلام، و وجود آب و هوای گرم و خشک بیابانی با دشت‌های وسیع گرمسیرمنطقه مهران ، دهلران و دشت عباس، در قسمت جنوبی استان میانگین سالیانه دمای هوا بین ۲۶-۱۸ درجه سانتیگراد و تابش سالیانه خورشید به میزان ۳۴۰۰-۳۰۰۰ ساعت در سال به نظر می‌رسد که مناطقی با پتانسیل بالا جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در این استان وجود داشته باشد.

بر اساس آخرین نقشه تابشی ارائه شده در سال ۱۳۹۴ با وجود پتانسیل متوسط تابش ۵.۲–۴.۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز در استان ایلام اما متاسفانه تا سال ۱۳۹۴ هیچ نیروگاه‌خورشیدی در استان ایلام به بهره‌برداری نرسیده است.

٤. روش شناسی تحقیق

در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد جهت بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی در استان ایلام از سیستم اطلاعات جغرافیایی با رویکرد تصمیم‌گیری‌چند معیاره استفاده شده است. بر اساس تقسیمات سیاسی کشور، بررسی‌های انجام شده در سطح بخش‌های مختلف استان ایلام انجام می‌شود و میزان اولویت بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی برای هر کدام از ۱۸ بخش استان تعیین می‌گردد. به صورت خلاصه، متدلوژی پیشنهادی شامل مراحل ذیل می‌باشد:

- تشکیل گروهی متشکل از خبرگان دانشگاهی، دولتی و صنعتی جهت طرح‌ریزی و اجرای فرآیند شناسایی، ارزیابی معیارها و انجام مقایسات زوجی
- شناسایی محدودیت‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی جهت بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی در بخش‌های مختلف استان به منظور شناسایی مناطق قابل بهره‌برداری
- تهیه لایه‌های مربوط به محدودیت‌ها در نرم‌افزار GIS
- روی‌هم گذاری[1] لایه‌ها در نرم‌افزار GIS با منطق AND و تهیه نقشه مناطق قابل بهره‌برداری در استان
- شناسایی و ارزیابی معیارهای موثر بر پتانسیل انرژی خورشیدی به منظور تحلیل پتانسیل و قابلیت مناطق مختلف
- تعین وزن معیارهای ارزیابی با استفاده از فرآیندتحلیل‌سلسله‌مراتبی‌فازی
- تهیه لایه‌های مربوط به معیارها[2] در نرم‌افزار GIS

1. Overlay
2. criteria layers

- روی‌هم گذاری لایه‌ها در نرم‌افزار GIS با روش جمع وزنی و تهیه نقشه قابلیت مناطق جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی.

تمام فرآیند رقومی‌سازی، تبدیل و آنالیز نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arcmap 10.2.2 انجام می‌گردد و محاسبات مربوط به فرآیندتحلیل‌سلسله‌مراتبی‌فازی، با استفاده از نرم‌افزار Super Decision انجام می‌گیرد. در ادامه مراحل متدلوژی پیشنهادی تشریح می‌گردند.

شناسایی مناطق قابل بهره‌برداری

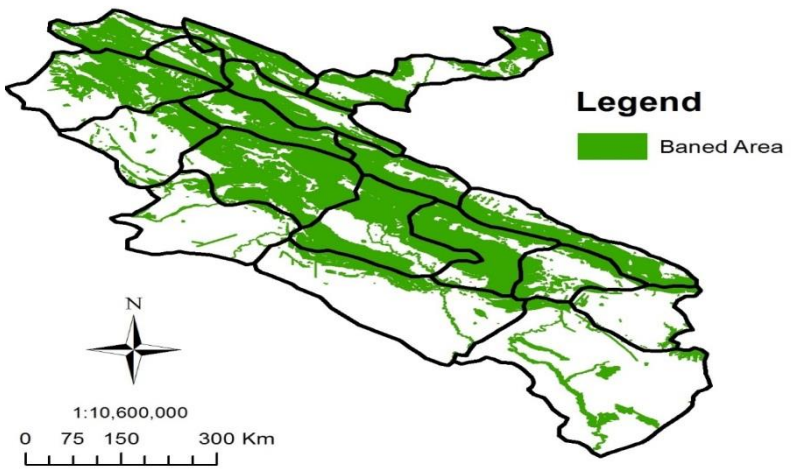
در این مرحله هدف بررسی و شناسایی مناطق مختلف استان، برای اجرا و پیاده‌سازی تکنولوژی انرژی خورشیدی می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، نرم‌افزار GIS ابزار بسیار مفیدی است، به این دلیل که این سیستم نه تنها قادر به تجزیه‌وتحلیل و تصویرسازی اطلاعات زمین – فضایی[1] می‌باشد بلکه می‌تواند با ایجاد یک پایگاه‌داده، برای هدایت سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری به منظور شناسایی موقعیت‌های مکانی مناسب، مورد استفاده قرار گیرد. در برنامه توسعه تکنولوژی خورشیدی در نظر گرفتن برخی محدودیت‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی جهت حذف مناطق نامناسب ضروری می‌باشد. زمین یکی از زیرساخت‌های اصلی مورد نیاز برای احداث نیروگاه‌ها است و این منطقه مسئله برای نیروگاه‌های خورشیدی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا نیروگاه‌خورشیدی در مقایسه با روش‌های دیگرتولید انرژی، به زمین بیشتری نیاز دارد[۲۲]. به طور کلی به منظور استقرار یک مزرعه خورشیدی رعایت محدودیت‌های کلیدی ذیل بسیار مهم بوده و نقض هر کدام از این شرایط عملاً استفاده از منطقه مورد بررسی را غیرقابل قبول می‌سازد[۱۸].

- رعایت فاصله مناسب از مناطق حفاظت شده مانند: آثار طبیعی ملی، پناهگاه حیات وحش و پارک‌های ملی
- رعایت فاصله مناسب از مناطق مسکونی و مراکز جمعیتی (حداقل فاصله باید ۲۰۰۰ متر از شهرها و ۵۰۰ متر از روستاها)

1. Geo-Spatial

- کاربری اراضی مانند جنگل، زمین‌های کشاورزی آبی و دیم نمی‌تواند گزینه مناسبی برای احداث پلنت خورشیدی باشد.
- رعایت فاصله مناسب از گسل‌ها
- مناطق بیشتر از ۲۲۰۰ متر ارتقاع از سطح دریا دارای ارجحیت پایین برای احداث پلنت خورشیدی است.
- مناطق با شیب بیشتر از ۱۰ درصد دارای ارجحیت پایین برای احداث پلنت خورشیدی است.

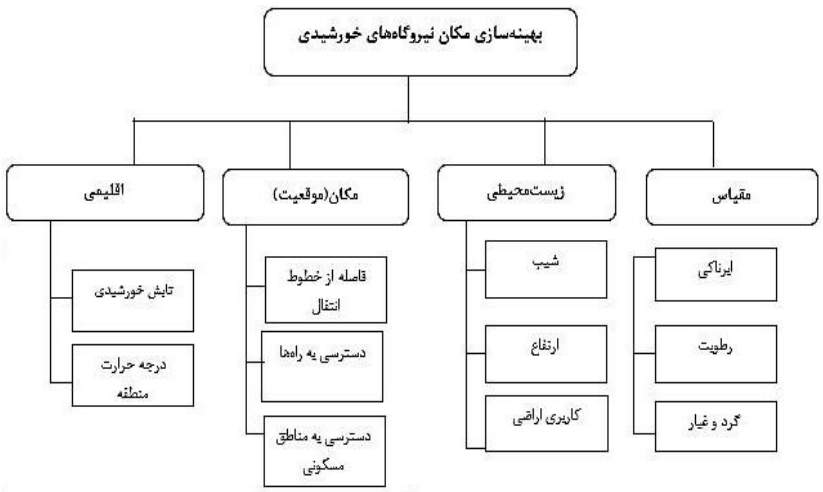
این محدودیت‌ها در محیط نرم افزار GIS پیاده‌سازی می‌گردند و در ادامه بر اساس منطق AND این لایه‌ها روی هم قرار می‌گیرند و بر اساس نتایج حاصل از روی‌هم قرارگرفتن این لایه‌ها مناطق مناسب جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی شناسایی می‌گردد. این نتیجه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه مناطق غیرقابل بهره‌برداری

تحلیل پتانسیل بهره‌برداری از انرژی خورشیدی

در این مرحله به منظور ارزیابی پتانسیل بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی در مناطق مختلف استان، پس از شناسایی معیارها و زیرمعیارهای موثر بر قابلیت بهره‌برداری از انرژی‌خورشیدی، با استفاده از فرآیندتحلیل‌سلسله‌مراتبی‌فازی اهمیت نسبی معیارها با توجه به نظر خبرگان تعیین می‌گردد. معیارهای مکان‌یابی معمولاً در قالب گروه‌های مختلفی مانند: زیست‌محیطی، اقتصادی، جغرافیایی، جمعیتی، کاربری زمین، هیدرولوژیکی، امنیتی، فنی و ... مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در این تحقیق بر اساس ادبیات موضوع و مرور معیارهای مورد استفاده در زمینه مکان‌یابی مزارع خورشیدی، پرسش‌نامه‌هایی تهیه شد و در اختیار شش نفر از متخصصان مرتبط برای پاسخ‌گویی قرار گرفت که ۱۱ معیار به عنوان اثرگذارترین معیارها جهت بررسی در این تحقیق شناسایی شدند و مطابق با ساختار سلسله‌مراتبی نشان داده شده در شکل (۲) دسته‌بندی می‌گردند. در ادامه توضیحاتی در ارتباط با معیارهای تعریف شده، ارائه می‌گردد.



شکل ۲. ساختار فرآیند سلسله‌مراتبی

فاصله از خطوط انتقال

با توجه به هزینه بالای مربوط بـه احـداث خطـوط انتقـال تـوان، یکـی از معیارهـای مهـم در مسـئله مکان‌یابی مزارع خورشیدی فاصله از خطوط انتقال می‌باشد. به طورکلی خطوط انتقال توان الکتریکی از نظر ایمنی، امنیت شبکه و همچنین امکان دسترسی سریع جهت نصب تجهیزات و تعمیـرات احتمـالی، در مکان‌یابی مزارع خورشیدی تاثیرگذار می‌باشند. مطالعات نشان داده است که بهترین فاصله از شـبکه برق برای ایمنی مزارع خورشیدی و شبکه ۰ تا ۳ مایل می‌باشد[۱۷]. به عبارتی نزدیکی مکـان احـداث نیروگاه به خطوط انتقال انرژی الکتریکی یک مزیت مهم اقتصادی می‌باشد.

دسترسی به راه‌های ارتباطی

احداث جاده‌های ارتباطی جدید به منظور حمل و نقل لوازم و تجهیزات بسیار هزینه‌بر است و همچنـین از عوامل اجتناب‌ناپذیر در احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند. به طور مسلم هر چقدر دسترسـی بـه نیروگاه آسان‌تر باشد، هزینهٔ احداث نیروگاه نیز کاهش می‌یابد، به همین منظور در ایـن مقالـه، میـزان حداکثر فاصله از جاه‌های اصلی در مکان‌یابی مزارع خورشیدی به عنوان معیارهای مکانی مـدنظر قـرار گرفته است و حداکثر فاصله مجاز ۱۰۰۰۰ متردر نظر گرفته شده است.

نزدیکی به مناطق مسکونی

رعایت فاصله مناسب از مناطق مسکونی و مراکز جمعیتی از عوامل مهم در احداث نیروگـاه خورشـیدی می‌باشد. نیروگاه خورشیدی حداقل باید ۲۰۰۰ متر از شهرها و ۵۰۰ متر از روستاها فاصله داشته باشند.

تابش خورشیدی

مهم‌ترین پارامتر اقلیمی است که نشان‌هنده میزان انرژی دریافتی مناطق از خورشید می‌باشـد. سـاعات آفتابی مجموع ساعات ماهانه یا سالانه یک منطقه است.

درجه حرارت منطقه

یکی از اجزای سیستم‌های فتوولتاییک، مبدل انرژی یعنی پنل خورشیدی می‌باشد، چون ایـن سیسـتم، توان و انرژی مورد نیاز را تأمین می‌کند، لازم است به درستی طراحی شود. یکی از مواردی که در تعیین اندازه پنل مورد نیاز مؤثر است، بازده آن می‌باشد. بازده پنل‌های خورشیدی به دمـای آن بسـتگی دارد و

دمای پنل نیز ناشی از دمای محیط و شدت تابش خورشید است. قابلیت اجرایی مدل‌های سیستم فتوولتاییک با افزایش دمای هوا نیز کاهش می‌یابد. به ازای هر ۱ درجه افزایش دمای سلول در دماهای بالاتر از ۲۵ درجه مقدار انرژی تولیدی در حدود ۰.۴ تا ۰.۵ درصد کاهش می‌یابد[۲۳].

شیب

یکی از عوامل بسیار مهم در پتانسیل سنجی مزارع فتوولتائیک است و میانگین مقدار آن در ایران حدود ۱۱ درصد است. زمین‌هایی با شیب بیشتر از ۴ درصد، به این دلیل آن‌که پنل‌ها روی ردیف بعدی سایه می‌اندازند و باعث تأثیر بر بازدهی سیستم می‌گردند، از ارجحیت کمتری برخوردار می‌باشند[۲۲].

ارتفاع

هر قدر ارتفاع منطقه‌ای از سطح دریا کمتر باشد، ضخامت جو بیشتر می‌گردد. جو ضخیم از غلظت بیشتر ترکیبات و عوامل جذبی یا انعکاسی حکایت دارد. از آن‌جایی که مواد درشتر و غلیظتر در طبقات پایین جمع می‌گردند، جو بالای کوه‌ها رقیق‌تر بوده و ضخامت جو هم کمتر است. ضخامت و ترکیبات جو علاوه بر ورود انرژی موج کوتاه خورشید، انرژی موج بلند زمین را هم کنترل می‌کند. بنابراین مناطق مرتفع به دلیل دریافت انرژی زیاد دارای پتانسیل بالاتری نسبت به مناطق پست می‌باشند.

کاربری اراضی

کاربری زمین بدان معنی است که از هر واحد زمین در سطح شهر به چه صورتی استفاده می‌شود و چه فعالیت‌هایی در ترکیب با هم در قطعات مختلف زمین استقرار می‌یابند. مطالعات کاربری زمین می‌تواند شامل انواع ساختارهای اساسی در مورد زمین باشد. زمین‌شناسی، آب و هواشناسی، هیدرولوژی، مقبولیت اراضی خالی، کاربری انواع فعالیت‌های زمین، کیفیت ساختاری محیط، قیمت زمین، بافت‌های تاریخی، نواحی مسکونی برحسب انواع گروه‌های درآمدی و اقشار مختلف اجتماعی از جمله مباحث مورد مطالعه در برنامه کاربری زمین است.

جنگل، زمین‌های کشاورزی آبی و دیم نمی‌تواند گزینه مناسبی برای احداث پلنت خورشیدی باشد.

گرد و غبار

از ترکیبات مهم جوی، به ویژه در حوالی سطح زمین ترکیبات غیرگازی و جامدی است که هواویز نامیده می‌شود. هواویزها ۱۵ درصد انرژی موج کوتاه خورشید را جذب می‌کنند. با توجه به تغییرات زیست‌محیطی چند سال اخیر و ورود سامانه‌های گرد و غبار در مناطق جنوب و جنوب غرب کشور، برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی مناطقی حائز اهمیت است که کمترین روزهای غبار آلودگی را در سال داشته باشند.

ابرناکی

یکی از معیارهای مورد استفاده در این پژوهش تعداد روزهای ابری در سال می‌باشد. با توجه به این که تعداد روزهای ابری اثر مهمی بر روی تعداد ساعات آفتابی و متعاقب آن میزان تولید پنل‌ها می‌گذارد؛ به طور مسلم، هرچه تعداد روزهای ابری در منطقه‌ای بیشتر باشد، به دلیل به حداقل رسیدن تابش دریافتی، مقدار تولید به شدت افت کرده و گاهی ممکن است به صفر برسد. میانگین درصد ابرناکی در ایران حدود ۴۰ درصد است.

رطوبت

به مقدار آبی که در هوا وجود دارد رطوبت گفته می‌شود. در مقیاس جهانی، به طور متوسط یک درصد حجم اتمسفر را بخار آب تشکیل می‌دهد. اما عملاً ممکن است این مقدار در مناطق مختلف متغیر می‌باشد. بخار آب و دی اکسید کربن جذب کننده‌های انرژی تابشی در جو می‌باشند. لذا افزایش میزان رطوبت با بازدهی پنل‌های خورشیدی رابطه معکوس دارد. همچنین رطوبت نسبی با تغییر درجه حرارت به طور معکوس کم و زیاد می‌شود.

پس از تعریف معیارهای مناسب برای ارزیابی معیارها با بهره‌گیری از نظر متخصصان زمینه انرژی خورشیدی، متغییرهای توصیفی انتخاب می‌شوند. سپس گزینه‌های منتخب با استفاده از مقیاس‌های جدول (۲) که شامل اعداد فازی مثلثی است، تبدیل شده و به منظور انجام محاسبات و تحلیل نتایج، تعمیم داده می‌شوند.

جدول۲. متغییرهای کلامی و اعداد فازی متناظر

مقادیر مقیاس‌های کلامی	اعداد فازی مثلثی
بسیار بالا	(۰.۹ ،۱،۱)
بالا	(۰.۷ ، ۰.۹ ،۱)
متوسط بالا	(۰.۵ ، ۰.۷ ، ۰.۹)
متوسط	(۰.۳ ، ۰.۵ ، ۰.۷)
متوسط کم	(۰.۱ ، ۰.۳ ، ۰.۵)
پایین	(۰ ، ۰.۱ ، ۰.۳)
بسیار پایین	(۰ ، ۰ ، ۰.۱)

محاسبه وزن نسبی معیارهای مورد بررسی با استفاده از تکنیک FAHP

فرآیند تحلیل‌سلسله‌مراتبی توسط توماس. ال ساعتی[۱۶] توسعه داده شد و توسط محققین بسیاری در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری‌چندمعیاره (MADM[1]) است که توانایی حل مسائل پیچیده را در زمینه‌های مختلف کیفی و کمی دارا است. برای مقابله با وجود ابهام در اطلاعات و یا مشکلات در قضاوت‌ها و مقایسات، از نظریه مجموعه فازی به عنوان یک ابزار مناسب استفاده نمود. بسیاری از محققان از روش فرآیند تحلیل‌سلسله‌مراتبی‌فازی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تعیین اولویت گزینه‌های مناسب استفاده نموده‌اند[۱۲].

در این تحقیق تیم خبرگان شامل؛ ۶ کارشناس از خبرگان دانشگاهی، دولتی و صنعتی جهت طرح‌ریزی و اجرای فرآیند شناسایی معیارها تشکیل شده و انجام مقایسات زوجی با استفاده از متغیرهای زبانی مطابق با جدول (۲) انجام می‌گیرد. به منظور تجمیع نظرات به دست آمده در فرآیند تصمیم‌گیری گروهی از روش میانگین هندسی مطابق با رابطه (۱) استفاده شده است در ادامه و به منظور فازی زدایی با استفاده از روش مرکز ثقل مطابق رابطه (۲) ارزش غیر فازی نتایج به دست آمده محاسبه می‌گردد.

1. Multiple Attributive Decision Making(MADM)

$$\tilde{F} = \left((\prod_{t=1}^{K} l_t)^{\frac{1}{K}} \ , (\prod_{t=1}^{K} m_t)^{\frac{1}{K}} \ , (\prod_{t=1}^{K} u_t)^{\frac{1}{K}} \right) \quad (۱)$$

که در آن (l_t, m_t, u_t)، نظرکارشناس t $(t = 1,2,3, \dots, K)$ است.

$$n^* = \frac{[(u-l)+(m-l)]}{3} + l = \frac{l+m+u}{3} \quad (۲)$$

با توجه به نتایج بدست آمده محاسبات نهایی جهت تعیین وزن نسبی معیارها با استفاده از نرم‌افزار Super Decision انجام می‌شود. نتایج مربوط به طبقه‌بندی معیارهای تعریف شده و همچنین وزن‌های به‌دست آمده از روش فرآیند تحلیل‌سلسله‌مراتبی‌فازی در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول۳. نتایج مربوط به سطوح تعریف شده و اوزان محاسبه شده

برای معیارهای ارزیابی با استفاده از روش FAHP

هدف	Obj.	وزن	معیار	وزن	زیرمعیار	وزن	وزن نهایی
تعیین قابلیت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در مناطق مختلف	اقلیم	۰.۳۴۶	تابش خورشیدی $(\frac{Kwh}{m^2-year})$	۵۷۰.۲	<۱۷۰۰	۰.۰۵۵	۰.۰۱۵
					۱۹۰۰-	۰.۱۵	۰.۰۴۱
					۲۰۰۰-	۰.۱۹۵	۰.۰۵۴
					۲۱۰۰-	۰.۲۸	۰.۰۷۷
					>۲۱۰۰	۰.۳۲	۰.۰۸۸
			درجه حرارت منطقه (C)	۱۷۰.۰	۲۴-۲۵	۰.۳	۰.۰۲۱
					۲۵-۲۶	۰.۲۶	۰.۰۱۸
					۲۶-۲۷	۰.۱۹	۰.۰۱۳
					۲۷-۲۸	۰.۱۵	۰.۰۱۱
					>۲۸	۰.۱	۰.۰۰۷
	مکان	۰.۲۸۱۲	فاصله از خطوط انتقال (km)	۰.۱۱۲	>۲۰	۰.۱۱	۰.۰۱۲
					۱۵-۲۰	۰.۱۳	۰.۰۱۵
					۱۰-۱۵	۰.۱۶	۰.۰۱۸
					۵-۱۰	۰.۲۶	۰.۰۲۹
					۰-۵	۰.۳۴	۰.۰۳۸
			دسترسی به راه‌ها (km)	۰.۰۸۸۲	>۲۰	۰.۱	۰.۰۰۹
					۱۵-۲۰	۰.۱۴	۰.۰۱۲
					۱۰-۱۵	۰.۱۶	۰.۰۱۴

وزن نهایی	وزن	زیرمعیار	وزن	معیار	وزن	Obj.	هدف
۰.۰۲۳	۰.۲۶	۵-۱۰					
۰.۰۳۰	۰.۳۴	۰-۵					
۰.۰۲۸	۰.۳۵	<۵۰۰	۰.۰۸۱	دسترسی به مناطق مسکونی (m)			
۰.۰۱۹	۰.۲۳۵	۵۰۰-					
۰.۰۱۳	۰.۱۶	۲۰۰۰-					
۰.۰۱۲	۰.۱۴۵	۴۰۰۰-					
۰.۰۰۹	۰.۱۱	>۵۵۰۰					
۰.۰۰۴	۰.۰۵۵	۲۰۰-۰	۰.۰۸۱	(m) ارتفاع	۰.۲۳۱	زیست‌محیطی	
۰.۰۰۶	۰.۰۸	۴۵۰-۲۰۰					
۰.۰۱۰	۰.۱۲۵	۷۵۰-۴۵۰					
۰.۰۱۸	۰.۲۲	۱۲۰۰-					
۰.۰۴۲	۰.۵۲	<۱۲۰۰					
۰.۰۳۶	۰.۴۴۵	<۱	۰.۰۸	(%) شیب			
۰.۰۲۰	۰.۲۵	۱-۲					
۰.۰۱۲	۰.۱۵۵	۲-۳					
۰.۰۰۸	۰.۰۹۸	۳-۴					
۰.۰۰۴	۰.۰۵۲	>۴					
۰.۰۵۳	۰.۷۵	بایر	۰.۰۷	کاربری اراضی			
۰.۰۰۷	۰.۱	مرتع					
۰.۰۰۶	۰.۰۸	زراعی دیم					
۰.۰۰۴	۰.۰۵	زراعی					
۰.۰۰۱	۰.۰۲	زراعی آبی					
۰.۰۰۲	۰.۰۴	۱۷۰-۱۲۰	۰.۰۵۸	ابرناکی	۰.۱۴۷۲	مقیاس	
۰.۰۰۴	۰.۰۷	۱۲۰-۸۰					
۰.۰۰۹	۰.۱۵	۸۰-۵۰					
۰.۰۱۷	۰.۲۹	۵۰-۳۰					
۰.۰۲۶	۰.۴۵	۳۰-۱۲					

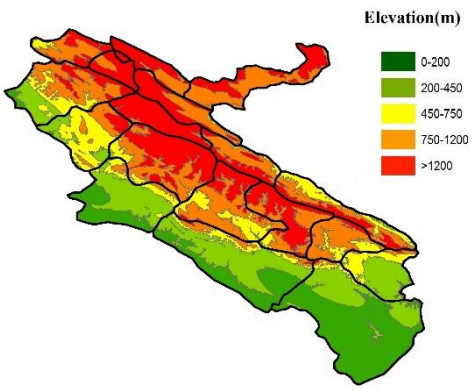
وزن نهایی	وزن	زیرمعیار	وزن	معیار	وزن	Obj.	هدف
۰.۰۰۴	۰.۰۹	۸۳-۶۰	۰.۰۴۱	رطوبت (%)			
۰.۰۰۵	۰.۱۳	۶۰-۵۰					
۰.۰۰۷	۰.۱۸	۴۲-۵۰					
۰.۰۰۹	۰.۲۳	۴۲-۳۵					
۰.۰۱۵	۰.۳۷	۳۵-۲۶					
۰.۰۰۲	۰.۰۵	۱۶۸-۱۲۰	۰.۰۴۸۲	گرد و غبار			
۰.۰۰۵	۰.۱	۱۲۰-۷۰					
۰.۰۰۷	۰.۱۵	۷۰-۵۰					
۰.۰۱۰	۰.۲	۵۰-۳۰					
۰.۰۲۴	۰.۵	<۳۰					

۵. تهیه لایه‌های رقومی، تلفیق و تجزیه و تحلیل نتایج

در این تحقیق، ۱۱ معیار به عنوان موثرترین عوامل در پتانسیل‌سنجی مناطق مختلف برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی معرفی شده است که در این میان با توجه به جدول شماره (۳)، معیارهای تابش، فاصله از خطوط انتقال برق و دما، به ترتیب دارای بیشترین اهمیت می‌باشند. در مورد معیار خطوط انتقال برق با توجه به این که هزینه‌های انتقال برق فوق‌العاده بالا است، دور بودن از خطوط انتقال برق می‌تواند هزینه‌های سنگینی برای احداث نیروگاه را تحمیل کند که با احتساب این هزینه‌ها حتی ممکن است، احداث نیروگاه از لحاظ اقتصادی به صرفه نباشد. در مورد معیار دما نیز، مطالعات انجام شده، نشان داده است که دما در فرآیند تبدیل فتوولتائیک نقش اساسی ایفا می‌کند و بازدهی الکتریکی و قدرت خروجی سیستم‌های فتوولتائیک، به صورت خطی با دما در ارتباط است به گونه‌ای که با افزایش دما، میزان بازدهی ماژول‌ها به شدت افت می‌کند. به همین سبب، معیار دما نیز از اهمیت خاصی برخوردار است.

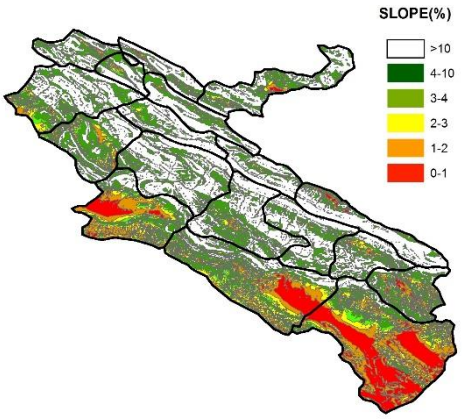
در ارتباط با معیارهای تعریف شده؛ نقشه‌های مربوط به فاصله از خطوط انتقال، حریم جاده‌ها و مناطق حفاظت شده از منابع مختلف به صورت نقشه‌های رقومی[1] و در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. نقشه مربوط به کاربری اراضی از طرح جامع محیط‌زیست و در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای استان ایلام تهیه می‌گردد. نقشه ارتفاع و شیب با استفاده از DEM[2] ارتفاعی کشور تهیه شده است.

با توجه به اینکه در اغلب ایستگاه‌های سینوپتیک کشور میزان تابش مورد سنجش قرار نمی‌گیرد، در این تحقیق برای معیار میزان تابش از داده‌های سازمان هواشناسی یا اقیانوس‌شناسی ایالات متحده (NOAA[3]) استفاده شده است. نتایج مربوط به معیارهای تعیین شده در این تحقیق با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری و بر اساس ۵ سطح تعریف شده برای هر معیار در جدول (۳) تعیین می‌گردد، نتایج به دست آمده برای این معیارها در شکل‌های شماره ۳ تا ۱۳ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که در مورد هر معیار کلاس ۵ بهترین کلاس و کلاس ۱ به عنوان بدترین کلاس در نظر گرفته شده است.

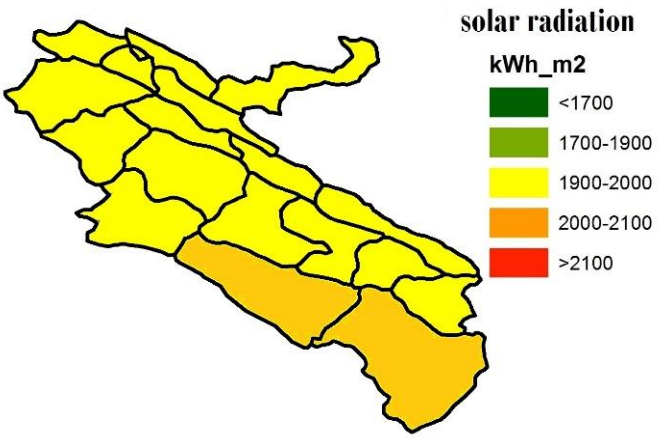


شکل۳. معیار ارتفاع

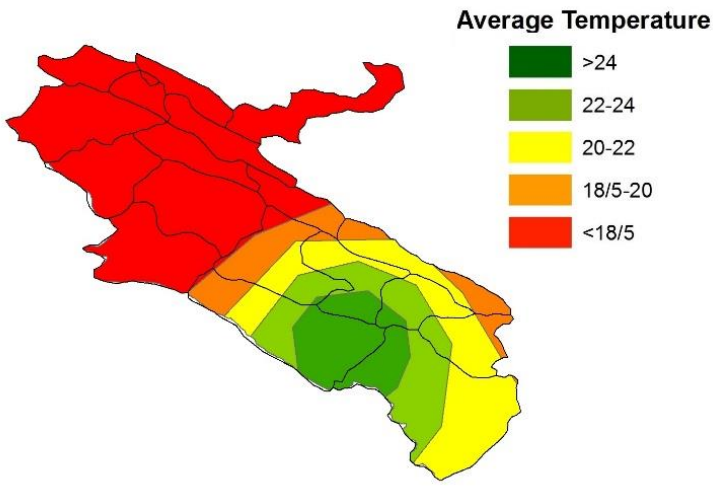
1. digitized
2. Digital Elevation Model
3. Digital Elevation Model



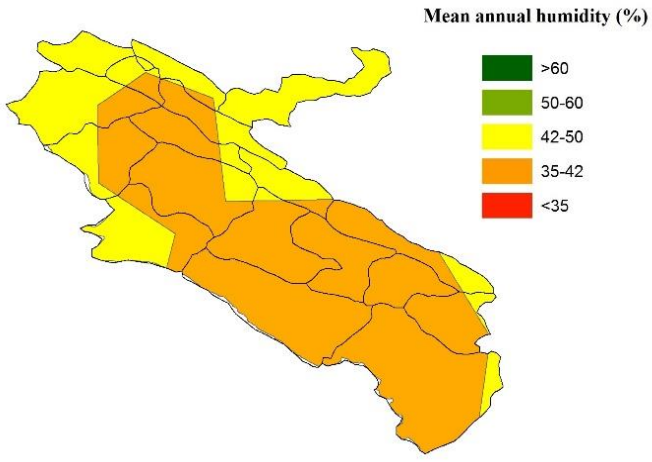
شکل۴. معیار شیب



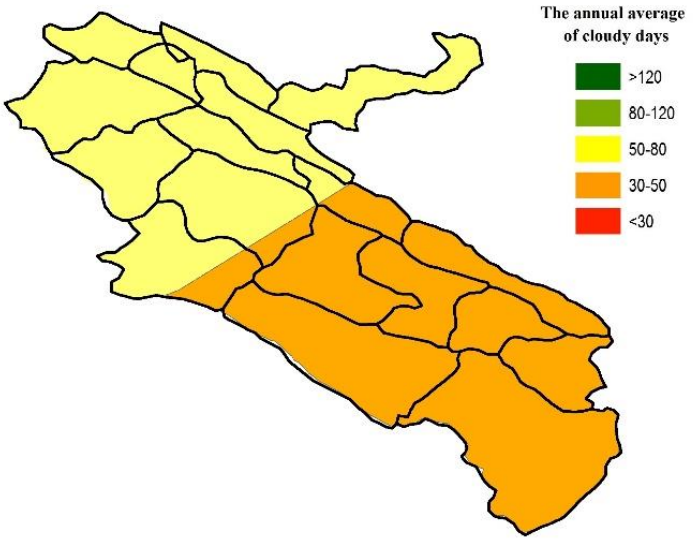
شکل۵. معیار تابش خورشیدی



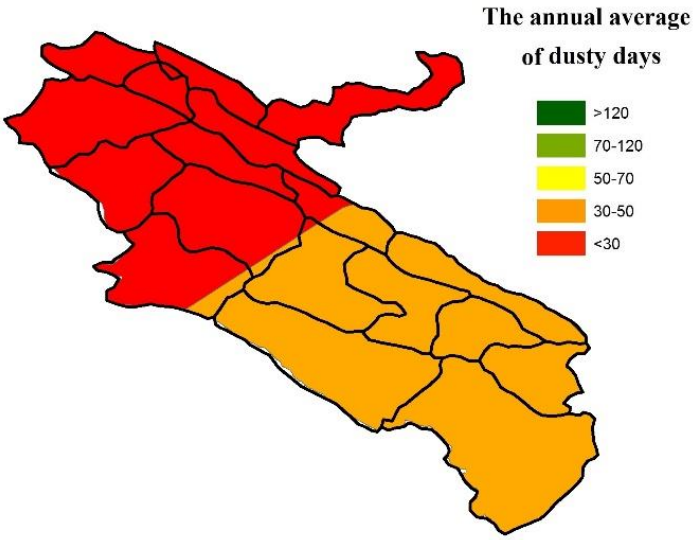
شکل۶. معیار سالانه دما



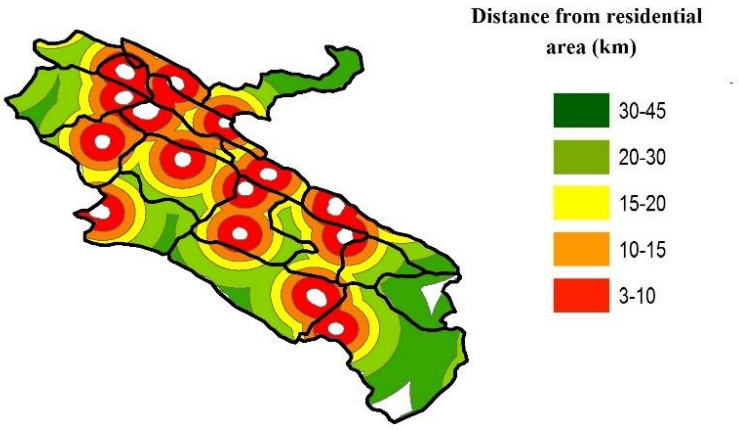
شکل۷. معیار متوسط رطوبت سالانه



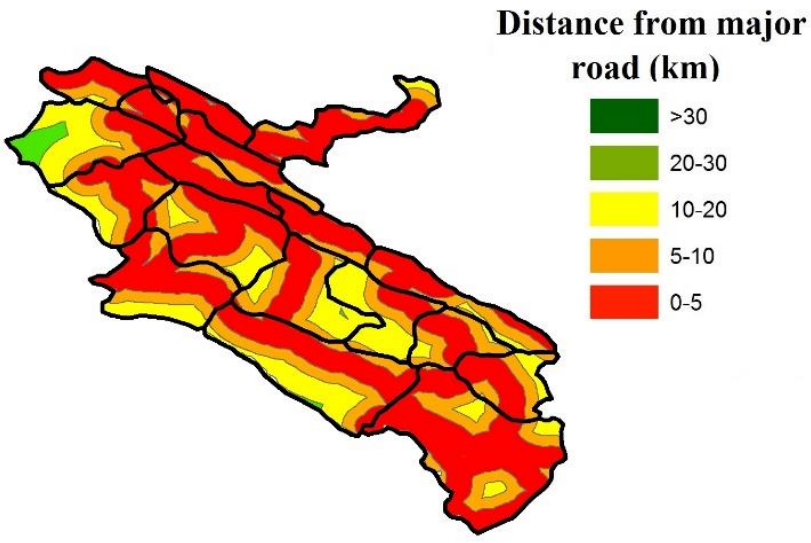
شکل۸. معیار متوسط سالانه روزهای ابری



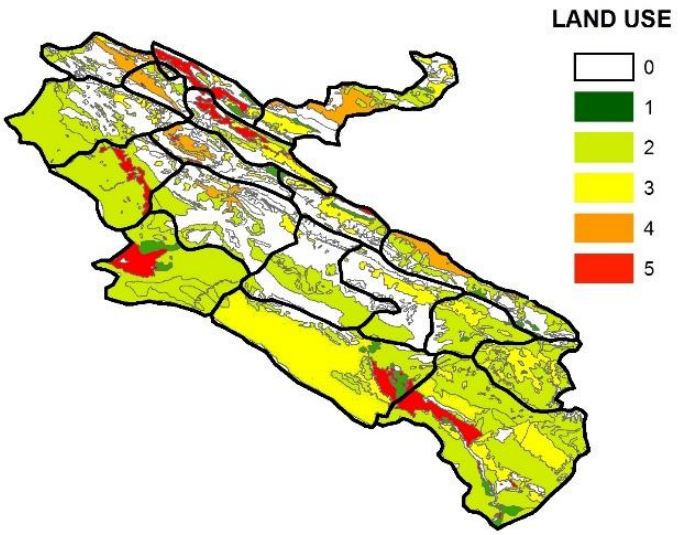
شکل۹. معیار متوسط سالانه روز گرد و غبار



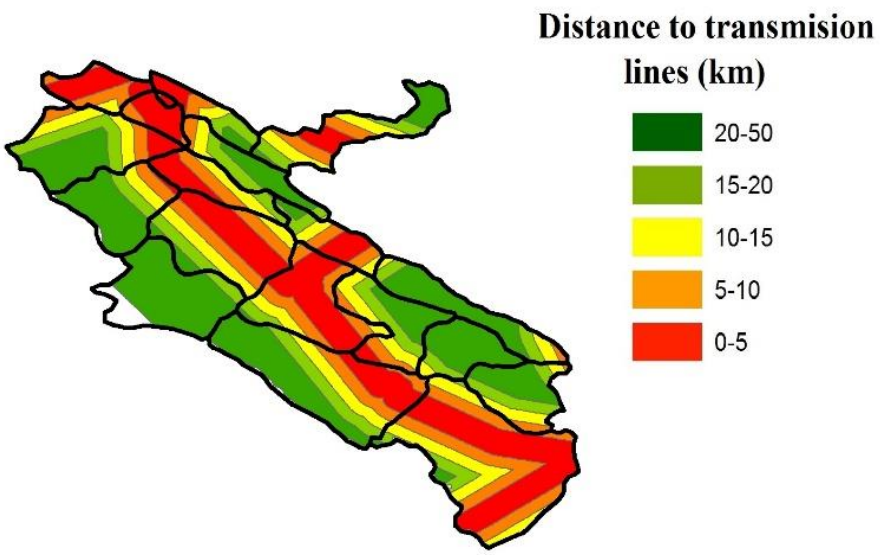
شکل۱۰. معیار فاصله از منطقه مسکونی



شکل۱۱. معیار دسترسی به راه‌ها



شکل۱۲. کاربری اراضی

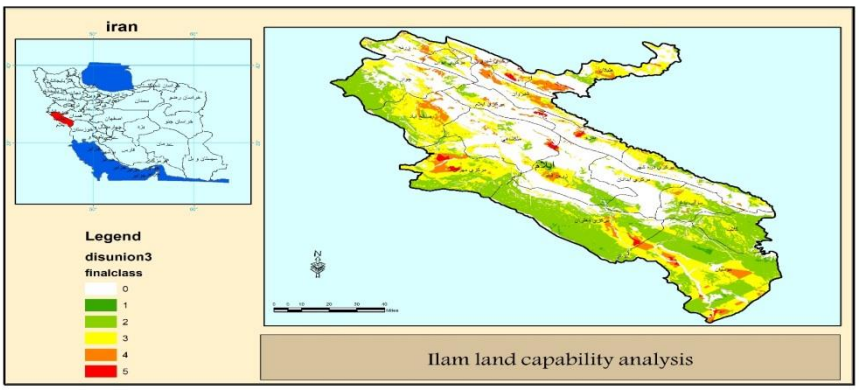


شکل ۱۳. فاصله از خطوط انتقال توان

پیش از فرآیند تلفیق لایه‌های به دست آمده به منظور تهیه نقشه نهـایی قابلیـت اراضـی منـاطق مختلف، لازم است بخش‌های غیر قابل بهره‌برداری از بررسی‌ها حذف می‌شوند. به این ترتیب مناطقی که در موقعیتی نزدیک‌تر از حداقل فاصله‌ی تعیین شده به معیارهای شهرها و مراکـز جمعیتـی، راه‌هـا، خطوط انتقال برق، آبراهه‌ها و مناطق حفاظت‌شده و یا دورتر از حداکثر میزان فاصـله‌ی تعیـین شـده از معیارهای تعریف شده قرار گرفته‌اند، از بررسی‌ها کنار گذاشته می‌شوند. همچنین مناطق با شیب بـالای ۱۰ ٪ از نقشه‌ی شیب، مناطق با ارتفاع بیش از ۲۲۰۰ متر از نقشه‌ی ارتفاع و مناطق با تابش خورشـید کمتر از ۱۳۰۰ از لایه‌ی رقومی تابش نیز حذف خواهند شد.

در ادامه بر اساس وزن‌های نسبی به دست آمده از روش FAHP ، مطابق با جدول (۳)، لایه‌هـای رقومی به دست آمده با روش جمع وزنی ساده با هم ترکیب می‌شوند و با روی‌هم قراردادن این لایه‌هـا و انتخاب قسمت‌های مشترک در همه لایه‌ها بر اساس کلاس‌بندی تعریف شده، نقشه نهایی مربوط به اولویت مناطق مختلف که در شکل (۱۴) نشان داده شده است به دست می‌آید.

به منظور تعیین اولویت بخش‌های مختلف استان با توجه به سهم هر بخش از کلاس‌های تعریف شده در نقشه نهایی بر اساس کلاس‌های عالی (۵)، خوب (۴)، متوسط (۳)، کـم (۲) و ضـعیف (۱) تلفیـق شـده و اولویت‌بندی ۱۸ بخش استان برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی مطابق جدول (۴) تعیین می‌گردد.



شکل۱۴. نقشه مربوط به اولویت‌بندی مناطق مختلف استان ایلام
جهت بهره‌برداری از انرژی‌خورشید

جدول ۴. نتایج به دست آمده برای مساحت مربوط به کلاس‌های مختلف (Km^2)

بخش	شهرستان	مناطق ممنوعه	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس۳	کلاس ۴	کلاس ۵	مساحت کل
موسیان	دهلران	۳۶۵/۲۲	۴۰/۴۷	۱۳۸۲/۲۲	۱۰۲۲/۴۸	۱۷۹/۹۲	۲۴/۳۶	۳۰۱۴/۶۶
مرکزی دهلران	دهلران	۴۴۶/۵۰	۲۰/۹۹	۱۳۹۳/۳۴	۳۱۵/۲۱	۵۸/۸۵	۱۴/۶۸	۲۲۴۹/۵۷
زرین آباد	دهلران	۸۸۸/۹۹	۶/۸۰	۲۲۳/۵۱	۱۷۵/۷۵	۴۸/۱۶	۴/۱۵	۱۳۴۷/۳۵
مرکزی آبدانان	آبدانان	۷۸۹/۲۸	۳/۰۰	۱۰۶/۴۲	۱۰۳/۰۲	۳/۹۶	-	۱۰۰۵/۶۸
کلات	آبدانان	۱۰۵/۰۲	۱/۰۴	۵۷۴/۲۵	۱۵۸/۶۷	۴/۲۴	-	۸۴۳/۲۳
مرکزی مهران	مهران	۱۶۱/۱۲	۰/۳۸	۴۹۵/۲۱	۶۶۷/۷۳	۱۰۶/۶۴	۳۷/۱۱	۱۴۶۸/۱۹
چوار	ایلام	۶۸۱/۱۲	۰/۱۱	۵۰۲/۸۳	۲۴۷/۸۹	۳۰/۴۰	۰/۴۲	۱۴۶۲/۷۸
صالح آباد	مهران	۲۹۵/۹۴	۰/۰۴	۲۱۶/۷۳	۴۶۱/۱۷	۱۲۵/۳۲	۰/۸۳	۱۱۰۰/۰۲
سراب باغ	آبدانان	۳۰۲/۱۵	-	۲۳۲/۶۰	۱۶۳/۰۲	۲۰/۷۰	۰/۰۳	۷۱۸/۵۰
مرکزی شیروان	شیروان و چرداول	۳۱۰/۹۷	-	۱/۴۱	۷۹/۴۹	۴۱/۸۳	۱۸/۸۵	۴۵۲/۵۵
زرنه	ایوان	۳۶۱/۴۱	-	۵۳/۵۰	۱۱۴/۱۸	۴۵/۳۰	۱/۱۱	۵۷۵/۵۰
مرکزی ایوان	ایوان	۲۰۳/۴۰	-	۲۹/۰۱	۷۷/۲۱	۱۳/۰۸	۰/۱۴	۳۲۲/۸۳
شیروان	شیروان و چرداول	۴۳۰/۰۴	-	۷/۱۶	۱۳۰/۸۶	۱۱۰/۳۵	۱/۴۳	۶۷۹/۸۴
مرکزی ایلام	ایلام	۵۱۱/۱۹	-	۳۶/۲۸	۶۹/۹۱	۲۹/۳۶	۸/۵۲	۶۵۵/۲۷
ملکشاهی	ملکشاهی	۱۱۸۳/۴۳	-	۵۸/۱۴	۲۹۹/۳۷	۴۱/۱۱	۱۳/۱۶	۱۵۹۵/۲۲
هلیلان	شیروان و چرداول	۵۴۷/۳۲	-	۵۵/۶۶	۳۳۰/۵۱	۱۲۰/۲۱	۱۱/۸۱	۱۰۶۵/۵۱
بدره	دره شهر	۴۱۵/۵۱	-	۲۶/۸۶	۷۸/۳۷	۲۹/۵۱	۱۵/۷۲	۵۶۵/۹۸
مرکزی دره شهر	دره شهر	۵۵۰/۸۳	-	۱۲۹/۱۷	۲۰۱/۱۲	۱۸/۴۴	۰/۱۹	۸۹۹/۷۵

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول (۴)، همان طور که مشاهده می‌شود برای بخش‌های مختلفی از استان ایلام مساحت‌های قابل توجهی در کلاس‌های عالی و خوب برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی قرار گرفته‌اند به عنوان نمونه برای بخش موسیان ۲۴/۳۶ کیلومتر مربع از مساحت این بخش در کلاس عالی قرار گرفته است . از آن جایی که برای احداث هر یک مگاوات پلنت خورشیدی به طور متوسط نیاز به حدود یک هکتار زمین می‌باشد مساحت در دسترس مربوط به کلاس عالی برای بخش موسیان به معنی وجود پتانسیل احداث تقریبا ۲۴۳۶ مگاوات نیروگاه خورشیدی در این بخش با شرایط عالی می‌باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده حدود ۱.۷ درصد از مناطق استان در کلاس عالی، ۶ درصد در کلاس خوب، ۲۳ درصد در کلاس متوسط، ۲۶.۸ درصد در کلاس با قابلیت کم و نهایتا کمتر از نیم درصد در کلاس ضعیف و همچنین ۴۲ درصد در کلاس مناطق ممنوعه قرار گرفته اند.

به طور کلی قرارگیری حدود ۴۲ درصد از اراضی استان ایلام در کلاس مناطق ممنوعه که در نگاه اول درصد بالایی به نظر می‌رسد به طور عمده به دلیل شیب بالای مناطق مورد مطالعه می‌باشد. همان گونه که پیش از این گفته شد، شیب‌های بالاتر از ۴ درصد برای احداث مزارع فتوولتائیک محدود کننده هستند. اما با توجه به عشایری بودن عمده مناطق جنوبی استان ایلام و امکان بهره‌برداری انرژی خورشیدی در مقیاس‌های کوچک‌تر برای این افراد، یقیناً پتانسیل بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در این مناطق می‌تواند به مراتب بیشتر از مقدار به دست آمده باشد.

٦. نتیجه گیری

استان ایلام به عنوان یک استان در حال توسعه با توجه به رشد مصرف انرژی، نیاز به توسعه و افزایش ظرفیت تولید انرژی دارد و برنامه‌ریزان می‌بایست در برنامه‌ریزی توسعه استان، جایگاه ویژه‌ای را برای برنامه‌ریزی و تأمین انرژی در نظر داشته باشد. استفاده گسترده از منابع انرژی فسیلی در بخش‌های مختلف اقتصادی ضمن ایجاد مواد آلاینده، کاهش سریع این منابع را منجر گردیده است. بنابراین باید گرایش به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به دلایلی هم‌چون تجدیدپذیر بودن، در دسترس بودن، آلودگی کمتر و مهم‌تر از همه توسعه پایدار، مورد توجه ویژه قرار گیرد. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی، می‌تواند استان ایلام را در راستای رسیدن به اهدافی هم‌چون تنوع بخشی

سبد انرژی، استفاده از منابع انرژی محلی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و در نهایت توسعه‌ی پایدار بخش انرژی یاری نماید.

هدف این مقاله، ارزیابی و شناسایی مناطق مستعد و دارای پتانسیل بالاجهت احداث نیروگاه خورشیدی در استان ایلام با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره (FAHP) و همچنین استفاده از نرم افزار GIS می‌باشد. به این منظور معیارهای تعریف شده با استفاده از مطالعه و جمع‌بندی ادبیات موضوع و نظرات خبرگان این حوزه در ۴ دسته معیار اصلی و ۱۱ زیرمعیار شناسایی شد. وزن نسبی معیارها و زیرمعیارهای تعریف شده با استفاده از تکنیک فرآیند تحلیل‌سلسله مراتبی فازی و بر اساس نظرات تیمی ۶ نفره متشکل از خبرگان دانشگاهی، صنعتی و دولتی مرتبط با حوزه برنامه‌ریزی انرژی‌های تجدیدپذیر انجام گرفت. تمامی لایه‌های رقومی مربوط به معیارها و محدودیت‌های تعریف شده در محیط نرم‌افزار ArcMap تهیه شد و با استفاده از روش جمع وزنی ساده بر روی هم قرار گرفتند. در پایان بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج برای ۱۸ بخش استان ایلام بر اساس تقسیمات سیاسی کشور انجام گرفت و با توجه به نتایج به دست آمده حدود ۱.۷ درصد از مناطق استان در کلاس عالی، ۶ درصد در کلاس خوب، ۲۳ درصد در کلاس متوسط، ۲۶.۸ درصد در کلاس با قابلیت کم و نهایتاً کمتر از نیم درصد در کلاس ضعیف و همچنین ۴۲ درصد در کلاس مناطق ممنوعه جهت نصب تجهیزات فتوولتائیک قرار گرفته اند.

در این مطالعه به منظور نزدیک نمودن بررسی‌ها و نتایج به دست آمده به شرایط دنیای واقعی، تلاش شد که محدودیت‌های اقلیمی، اجرایی، فنی و تکنولوژیکی مهم در مدل‌سازی لحاظ گردد، به عنوان نمونه با توجه به ورود سامانه‌های گرد و غبار در چند سال اخیر، فاکتور تعداد روزهای گردوغبار به عنوان یکی از فاکتورهای اثرگذار در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق می‌تواند به ایجاد یک چشم‌انداز توسعه برای توسعه بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، در مناطق مختلف استان و همچنین به عنوان یک راهنما برای بررسی‌های مشابه در سایر استان‌ها مورد استفاده قرارگیرد. با توجه به خاصیت جبرانی معیارها در روش جمع وزنی ساده، استفاده از سایر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و مقایسه نتایج با روش مورد استفاده در این تحقیق به عنوان زمینه‌ای برای توسعه این تحقیق پیشنهاد می‌شود.

منابع

[۱] اسفندیاری، علی؛ رنگزن، کاظم؛ صابری، عظیم و مهدی فتاحی مقدم (۱۳۹۰)، پتانسیل سنجی احداث نیروگاه‌های خورشیدی با بررسی پارامترهای اقلیمی در استان خوزستان با استفاده از GIS، تهران: همایش ملی ژئوماتیک، ۲۵ الی ۲۷ اردیبهشت ماه.

[۲] فرجی سبکبار، حسنعلی؛ پاک طینت، مهدی؛ آبادی، هادی؛ رحیمی کیان، اشکان و غدیر عشورنژاد (۱۳۹۲)، "تناسب سنجی اراضی به منظور احداث مزارع فتوولتائیک به کمک تلفیق سیستم‌های جمع سادهٔ وزنی و استنتاج فازی در ایران"، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، سال ۴۵ ، شمارهٔ ۴، صص۶۰-۴۵.

[۳] کرامتی، محمدعلی و همکاران (۱۳۹۳)، مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از روش AHP، اوّلین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی انرژی خورشیدی.

[4] Alamdari P., Nematollahi O., and A.A. Alemrajabi (2013), "Solar Energy Potentials in Iran: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 778–788.

[5] Besarati S.M., Padilla R.V., Goswami D.Y. and E. Stefanakos (2016), "The Potential of Harnessing Solar Radiation in Iran: Generating Solar Maps and Viability Study of PV Power Plants", *Renew. Energy*, vol. 53, No., pp. 193–199.

[6] Charabi Y. and A. Gastli (2011), "PV Site Suitability Analysis Using GIS-based Spatial Fuzzy Multi-criteria Evaluation", *Renew. Energy*, vol. 36, No.9, pp. 2554–2561.

[7] Commission W.D. (2010), "Site Options for Concentrated Solar Power Generation in the Wheatbelt Final Report" .

[8] Department of Environment Islamic Republic of Iran (2016), Available at: http://www.doe.ir/Portal/Home/Default.aspx?CategoryID=7072cd63-f3b7-4844-89ac-c82431aabdc1. [Accessed: 09-Apr-2016]

[9] Erdogan M. and I. Kaya (2015), "An Integrated Multi-criteria Decision-making Methodology Based on type-2 Fuzzy sets for Selection Among Energy Alternatives in Turkey/Iran", *J. Fuzzy Syst.*, vol. 12, No. 1, pp. 1–25.

[10] Kucuksari S., Khaleghi A.M., Hamidi M., Zhang Y., Szidarovszky F., Bayraksan G. and Y.J. Son (2014), "An Integrated GIS, Optimization and Simulation Framework for Optimal PV Size and Location in Campus area Environments", *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1601–1613.

[11] Najafi G., Ghobadian B., Mamat R., Yusaf T. and W.H. Azmi (2015), "Solar Energy in Iran: Current State and Outlook", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 49, pp. 931–942.

[12] Ong S., Campbell C., Denholm P., Margolis R. and G. Heath (2013), *Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States*, no. June, p. 7.

[13] Prasad R.D., Bansal R.C., and A. Raturi (2014), "Multi-faceted Energy Planning: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.38, pp. 686–699.

[14] Resch B., G. Sagl, Törnros T., Bachmaier A., Eggers J.B., Herkel S., Narmsara S., and H. Gündra (2014), "GIS-Based Planning and Modeling for

Renewable Energy: Challenges and Future Research Avenues", ISPRS Int. J. Geo-Information, vol. 3, No. 2, pp. 662–692.

[15] Saaty T.L. (1996), "Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytical Network Process, vol. 9 of Analytic Hierarchy Process", RWS Publications, Pittsburgh, Pa, USA.

[16] San Cristóbal J.R. (2011), "Multi-criteria Decision-making in the Selection of a Renewable Energy Project in Spain: the Vikor method", *Renew. energy*, vol. 36, No. 2, pp. 498–502.

[17] Sánchez-Lozano J.M., García-Cascales M.S., and M.T. Lamata (2015), "Evaluation of Suitable locations for the Installation of Solar Thermoelectric Power Plants", *Comput.* Ind. Eng., vol. 87, pp. 343–355.

[18] Sánchez-Lozano J.M., Henggeler Antunes C., Garcia-Cascales M.S. and L.C. Dias (2014), "GIS-based Photovoltaic Solar farms Site Selection Using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain", *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 478–494, 2014.

[19] Stein E.W. (2013), "A Comprehensive Multi-criteria Model to Rank Electric Energy Production Technologies", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 22, pp.640–654.

[20] United Nations (2015), "Adoption of the Paris Agreement".

[21] Us Epa & Nrel (2013), "Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills", No. February, p. 41.

[22] Uyan M. (2013), "GIS-based Solar Farms Site Selection Using Analytic Hierarchy Process (AHP) in Karapinar Region Konya/Turkey", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 11–17.