

ارزیابی مکان‌های مناسب برای مزارع خورشیدی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)

نجمه نیسانی سامانی* - دانشیار سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران
امیر طاحونی - دانشجوی دکتری سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۲/۷ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۳/۲۱

چکیده

انرژی از نیازهای اصلی بشر و موتور محرک توسعه اقتصادی است. منابع انرژی سنتی محدود و آلاینده هستند و این موضوع دولت‌ها را خواهان جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای منابع انرژی سنتی کرده است. یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی خورشیدی است که برای استفاده از آن از فناوری سلول‌های خورشیدی استفاده می‌کنند. در ایران، اراده قوی سیاسی برای توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد، اما یکی مهم‌ترین موضوعات در این باره یافتن مکان بهینه برای استقرار صفحات خورشیدی است. در پژوهش حاضر، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک Fuzzy AHP که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است، مکان‌های مناسب برای استقرار نیروگاه خورشیدی در استان آذربایجان شرقی شناسایی شده است. براساس نتایج این پژوهش، ۶/۶۰ درصد از اراضی استان از تناسب عالی، ۱۸/۳۱ درصد از تناسب خوب و ۲۷/۱۰ درصد از تناسب متوسط برای نصب نیروگاه خورشیدی برخوردارند، اما ۴۷/۹۹ درصد اراضی استان مطلوبیت لازم را برای نصب نیروگاه خورشیدی ندارند. در حالت کلی مناطق غربی و جنوب غربی استان بیشترین تناسب و مناطق شمالی و شمال شرقی استان کمترین تناسب را از دیگر مناطق برای نصب نیروگاه خورشیدی دارند. همچنین تحلیل حساسیت وزن‌های به‌دست‌آمده از روش Fuzzy AHP نشان می‌دهد معیارهای GHI و PVOUT اهمیت زیادی در تعیین مناطق مناسب برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دارند.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، تحلیل حساسیت، سیستم اطلاعات جغرافیایی
(GIS)، Fuzzy AHP، MCDM.

مقدمه

انرژی نیاز اساسی انسان است (سیندهو و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۹۶) و برای دستیابی به اهداف به‌هم‌وابسته جوامع مدرن مانند برآورده کردن نیازهای انسانی برای گرمایش، سرمایش، روشنایی، تحرک و گستره بزرگی از کاربردها و تأمین قدرت و گرما برای سیستم‌های تولیدی اهمیت بسیاری دارد (دیاکولاکی، ۲۰۰۵: ۷۸، استرانزالی و آراوویسیس، ۲۰۱۶: ۸۸۵). انرژی موتور محرک توسعه اقتصادی در سراسر جهان است. منابع جهانی انرژی را می‌توان به سه گروه اصلی انرژی‌های فسیلی (نفت، گاز، زغال سنگ و ...)، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر (باد، خورشید، زمین گرمایی، بایومس و ...) طبقه‌بندی کرد (علمداری و همکاران، ۲۰۱۳: ۷۷۸). بیشتر منابع انرژی که در حال حاضر به آن‌ها متکی هستیم، محدودند و به دلیل تقاضای روزافزون تمام خواهند شد. علاوه بر این، مشکلات جدی مانند آلودگی هوای محلی و آب‌وخاک یکی از پیامدهای مصرف منابع انرژی مختلف است. ادامه استفاده از سوخت‌های فسیلی، نه تنها به دلیل تأثیرات جهانی بر سیستم آب و هوایی، بلکه به علت آثار کوتاه‌مدت و بلندمدت بر جامعه و اکوسیستم هوشمندانه نیست (الیوت، ۲۰۰۷). با افزایش آگاهی‌ها از خطرات تغییر اقلیم، بسیاری از کشورها راهبردهای لازم را برای گذار به اقتصادهای کم‌کربن^۱ تأیید کرده‌اند. جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر^۲ یکی از راهبردهای اصلی کربن‌زدایی^۳ است (ادنهوفر، ۲۰۱۱: ۱۰۷۵؛ پانوار، ۲۰۱۱: ۱۵۱۳). ظرفیت جهانی انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به سرعت در حال افزایش است و انتظار می‌رود این روند ادامه یابد (دینسر، ۲۰۰۰: ۱۵۷). پتانسیل زیادی در استقرار و گسترش فناوری‌های منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد؛ زیرا این منابع طبیعی و رایگان به سرعت پرشونده هستند و در سراسر جهان گسترده شده‌اند. فناوری فتوولتائیک خورشیدی^۴ یکی از فناوری‌های در حال رشد منابع انرژی تجدیدپذیر در سراسر دنیاست (فرخی و همکاران، ۲۰۱۴: کاندلاز، ۲۰۱۳: ۹۶). بهره‌برداری از پتانسیل خورشیدی که هم منحصربه‌فرد و هم دست‌نخورده است، نه تنها به بهبود ترکیب کل منابع انرژی کمک می‌کند، بلکه انتشار گازهای مضر و سمی را نیز کاهش می‌دهد (سیندهو و لوترا، ۲۰۱۶: ۳۳۲). مکان‌های دارای پتانسیل بالا برای نیروگاه‌های خورشیدی عبارت‌اند از ایالت متحده آمریکا، جنوب غرب، کشورهای اروپای مدیترانه، خاورمیانه، بیابان‌های ایران و هند، پاکستان، چین و استرالیا. در ایران اراده قوی سیاسی برای توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و استفاده از توانایی‌های آن وجود دارد (نجفی و همکاران، ۲۰۱۵: ۹۳۱). یکی از موانع توسعه نیروی خورشیدی، عدم پایداری و متغیر بودن تابش خورشیدی است که می‌تواند از یک سایت به سایت دیگر از نظر جغرافیایی متفاوت باشد. برای انتخاب سایت به‌منظور نصب نیروگاه خورشیدی، به سؤالاتی مانند موقعیت نیروگاه خورشیدی به چه میزان خوب است؟ و چگونه باید هزینه کلی پروژه را با در نظر گرفتن نزدیکی به زیرساخت‌های موجود و در عین حال بیشینه کردن قدرت خروجی از نیروگاه خورشیدی، کاهش داد پاسخ مناسب داد (القرنی و آتشی، ۲۰۱۷: ۱۲۲۵). تحلیل‌های چندمعیاره^۵ می‌تواند به صورت رویکردهای رسمی یا ساختاریافته برای افراد و گروه‌ها برای تعیین اولویت‌های کلی از میان گزینه‌های جایگزین با به‌کارگیری معیارها و شاخص‌های چندگانه تعریف شود (بلتون، ۲۰۰۲: هونگ و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۰۹). در واقع نیاز به ترکیب ملاحظات محیطی و اجتماعی در برنامه‌ریزی انرژی^۶ منجر به افزایش استفاده از رویکردهای چندمعیاره می‌شود (پوکهار و رامچاندان، ۲۰۰۴: ۳۶۵). این روش‌ها به‌طوری فزاینده در تصمیم‌گیری‌ها برای توسعه‌های پایدار^۷ و سیستم‌های انرژی به دلیل توانایی‌شان برای در نظر گرفتن و ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و

1. Low Carbon Economies
2. RES: Renewable Energy Sources
3. Decarbonization
4. Solar Photovoltaic Technology
5. MCA: Multi Criteria Analysis
6. Energy Planning
7. Sustainable Development

فناورانه که مورد نیاز سیستم‌های پیچیده است، محبوب شده‌اند (کوالسکی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۰۶۳). AHP^۱ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ محسوب می‌شود که در کاربردهای آکادمیک و مهندسی متداول و محبوب است. ویژگی‌های منحصر به فرد AHP مانند سادگی در درک و کاربرد در مسائل پیچیده، سبب استفاده از آن در رشته‌های مختلف در سراسر جهان شده است (وفائی‌پور، ۲۰۱۴: ۶۵۳). AHP یک تئوری سنجش و اندازه‌گیری از طریق مقایسه‌های زوجی است. از روش مقایسه‌ی زوجی برای مقایسه‌ی جایگزین‌ها و تعیین اهمیت آن‌ها در برابر یکدیگر استفاده می‌شود. برخورد با قضاوت‌های غیرقطعی^۳ برای بیان اهمیت معیارها، نشان دهنده‌ی امکان استفاده از مجموعه‌های فازی یا اعداد فازی است که در آن ابهامات تفکر انسان در نظر گرفته می‌شود (دوزیج، ۲۰۱۸: ۱۶۵).

هدف این پژوهش ارائه ابزار پشتیبان برای تصمیم‌گیران با استفاده از تکنیک Fuzzy AHP به‌عنوان یکی از روش‌های MCDM برای تعیین اهمیت نسبی و وزن معیارهاست. برای این منظور از ابزارهای GIS برای ایجاد لایه‌های معیارها و محدودیت‌ها و تحلیل‌های مکانی استفاده شد تا بررسی و انتخاب مکان‌های مناسب برای استقرار مزرعه‌های خورشیدی در استان آذربایجان شرقی صورت بگیرد.

مبانی نظری

علمداری و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی امکان‌پذیری استفاده از انرژی خورشیدی در مناطق مختلف ایران پرداختند. آنان به این منظور میانگین و کمینه و بیشینه تابش افقی سالانه را برای ایستگاه‌های مختلف محاسبه کردند و نتیجه گرفتند مناطق مرکزی و جنوبی ایران به‌جز مناطق ساحلی در جنوب، بالاترین مقادیر تابش‌های افقی را دریافت می‌کند. از میان این مناطق، خراسان جنوبی و خوزستان مقادیر قابل توجهی از تابش خورشیدی را دریافت می‌کنند که این موضوع استفاده از سیستم‌های خورشیدی را در این مناطق از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر خواهد کرد. طهری و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، مناطق مناسب برای استفاده از انرژی خورشیدی را در کشور مغرب شناسایی کردند. آن‌ها با استفاده از چهار معیار کلی مکان، اوروگرافی^۴، کاربری زمین و اقلیم نتیجه گرفتند مناسب‌ترین مکان‌ها زمین‌های تختی هستند که شیب جنوبی دارند. ذوقی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از منطق فازی و روش WLC^۵ مناطق مستعد برای استقرار صفحات خورشیدی در استان اصفهان را به‌عنوان یک منطقه خشک و نیمه‌خشک شناسایی کردند. معیارهای مورد استفاده آن‌ها در چهار دسته کلی محیطی (برای مثال کاربری زمین و منطق محافظت‌شده)، ژئومورفولوژیکی (مانند شیب و جهت شیب)، مکانی (مانند فاصله تا شهرها و جاده‌ها) و آب و هوایی (مانند تابش آفتاب و رطوبت) جای گرفته است. براساس نتیجه مطالعه آن‌ها، در تعیین مناطق بهینه برای استقرار این صفحات، لایه‌های اقلیمی مهم‌تر از بقیه معیارها هستند. اوایان (۲۰۱۳) با استفاده از روش AHP و به‌کمک GIS به بررسی مناطق مستعد برای استفاده از انرژی خورشیدی در قونیه ترکیه پرداخت. وی نتایج پایانی را در چهار دسته تناسب کم، در حد متوسط، مناسب و مناسب‌ترین دسته‌بندی کرد. معیارهای مورد استفاده او معیارهای محیطی (مانند فاصله از مناطق مسکونی) و اقتصادی (مانند فاصله از جاده) بود. وی در نهایت به این نتیجه رسید ۱۳/۹۲ درصد از مناطق مورد مطالعه بهترین تناسب برای استفاده از این انرژی را دارند. سانچز لوزانو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از GIS و روش ELECTRE-TRI^۶ و همچنین به‌کارگیری سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری IRIS مناطق مستعد استفاده از سیستم‌های

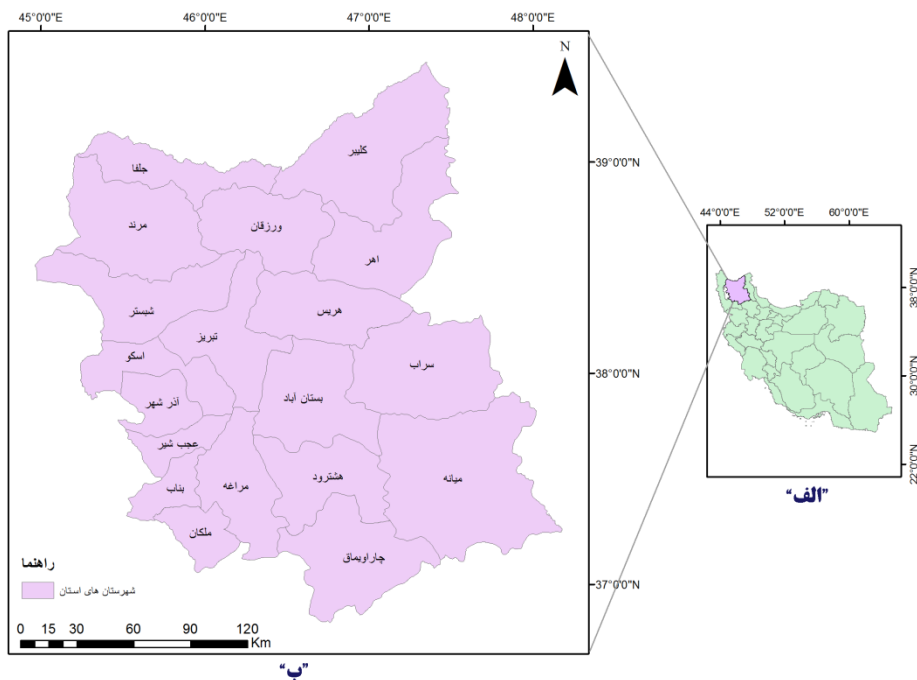
1. Analytical Hierarchy Process
2. MCDM: Multi Criteria Decision Making
3. Uncertain Judgement
4. Orography
5. Weighted Linear Combination
6. Elimination Et Choix Traduisant La Realité (Elimination and Choice Expressing Reality)

فنونلتائیک را مکان‌یابی کردند. معیارهایی که آن‌ها استفاده کردند، به چهار دسته اقلیمی، محیطی مکانی و شکل زمین تقسیم می‌شد. دورگا و همکاران (۲۰۱۸) تناسب مکانی نصب مزارع خورشیدی را بر مبنای دیدگاه‌های قانونی، اجتماعی، اقتصادی، محیطی و فرهنگی برای کشور مورس با استفاده از ترکیب GIS با تکنیک‌های تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره بررسی کردند. برای تعیین وزن ۹ معیار ارزیابی در نظر گرفته شده از روش AHP استفاده شد. سپس لایه‌های مختلف رستری ایجاد شده با استفاده از تکنیک WLC با هم ترکیب شدند که در نتیجه آن یک نقشه پتانسیل با رزولوشن بالا برای انرژی خورشیدی تولید شد. سپس به دنبال تجزیه و تحلیل‌های بیشتر با استفاده از تصاویر هوایی مناطق مورد نظر، سه مورد از بهترین مکان‌ها یافت شد که همه در دشت‌های شمالی این جزیره واقع هستند.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران و در عرض جغرافیایی $36^{\circ}45'$ شمالی تا $39^{\circ}26'$ شمالی و طول جغرافیایی $45^{\circ}05'$ شرقی تا $48^{\circ}22'$ شرقی قرار دارد. مساحت این استان 45650 کیلومترمربع و جمعیت آن حدود $3,909,000$ نفر (سال ۱۳۹۵) است (مرکز آمار ایران). این استان در تابستان آب‌وهوایی گرم و خشک و در زمستان آب‌وهوایی سرد و خشک دارد و در حالت کلی، منطقه‌ای کوهستانی محسوب می‌شود که حدود ۴۰ درصد از سطح آن را کوهستان، $28/2$ درصد را تپه‌ماهورها و $31/8$ درصد را زمین‌های هموار (دشت‌ها و جلگه‌های میان‌کوهی) فرا گرفته است. میانگین بارش سالانه آن بین $250-300$ میلی‌متر متغیر است. میانگین دمای روزانه نیز در بین ایستگاه‌های استان $6/5$ تا 15 درجه سانتی‌گراد است. براساس داده‌های این ایستگاه‌ها نواحی پست دره رود ارس گرم‌ترین و ارتفاعات دامنه شرقی سهند و دامنه‌های غربی بزقوش سردترین مناطق استان محسوب می‌شوند. میزان نزولات جوی در استان به‌طور متوسط از $250-600$ میلی‌متر در نوسان است، فصول زمستان و بهار فصول بارندگی منطقه محسوب می‌شوند و بیشترین شدت بارندگی در بهار مشاهده می‌شود (مرکز آمار ایران، سالنامه آماری استان).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه؛ الف) نقشه ایران، ب) نقشه استان آذربایجان شرقی

تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

AHP تکنیک اندازه‌گیری نسبی برای معیارهای کیفی است که اولین بار ساعتی (۲۰۰۸) آن را پیشنهاد کرد. AHP ابزار MCDM است که مسائل پیچیده را با ساده‌کردن ارزیابی تمام معیارهای مرتبط در تصمیم‌گیری، در یک نظم سلسله‌مراتبی^۱ ساختاردهی می‌کند (آراگونس و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۲۲؛ تالینی و همکاران: ۲۰۱۱، ۲۱۳).

خلاصه‌ای کوتاه از روند AHP عبارت است از:

گام اول: در ابتدا، هدف نهایی تعیین و مشخص می‌شود.

گام دوم: لازم است مقایسه‌های زوجی معیارها و جایگزین‌ها با استفاده از هر معیار انجام شود. ماتریس مقایسات زوجی را کارشناسان تهیه می‌کنند. ماتریس مقادیر به صورت $n \times n$ است که n معادل تعداد معیارهاست.

گام سوم: X_{ij} ترتیب اولویت فاکتور i ام در مقایسه با فاکتور j ام را نشان می‌دهد. در نتیجه $X_{ji} = \frac{1}{X_{ij}}$

گام چهارم: یک ماتریس مقایسه‌ای زوجی نرمال شده به روش زیر به دست می‌آید:

مجموع هر ستون محاسبه می‌شود.

هر عضو ماتریس به ترتیب بر مجموع ستون خود تقسیم می‌شود.

برای به دست آوردن وزن‌های مربوط از سطرها میانگین گرفته می‌شود.

گام پنجم: بردار ویژگی‌ها، بزرگ‌ترین مقدار ویژه و شاخص سازگاری^۲ (CI) محاسبه می‌شود. برای محاسبه CI از

معادله^۱ استفاده می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

که در اینجا λ_{max} مقدار ویژه ماتریس مقایسه‌های زوجی و n تعداد معیارهاست.

گام ششم: در نهایت نسبت سازگاری^۳ با استفاده از رابطه^۲ محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

که در این رابطه RI یک شاخص تصادفی است و مقادیر آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مقادیر قابل قبول برای RI

N	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹۰	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

مقدار قابل قبول برای CR مقادیر کوچک‌تر از ۰/۱ است.

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP)

کاربران به کمک ساختار سلسله‌مراتبی AHP می‌توانند مسئله را در قالب معیارها و زیرمعیارها ببینند. با وجود این، تصمیم‌گیران ممکن است عدم قطعیت‌هایی را در مقایسه‌های زوجی احساس کنند؛ بنابراین برای کمک به تصمیم‌گیران در حل ذات دارای ابهام مسائل انتخاب جایگزین، روش Fuzzy AHP توسعه داده شد (کو و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۳۳).

1. Hierarch Order
2. Consistency Index
3. Consistency Ratio

جدول ۲ متغیرهای زبانی برای مقایسه‌های زوجی

مقیاس فازی مثلی	مقیاس فازی مثلی	متغیر زبانی
(۱ و ۱ و ۱)	(۱ و ۱ و ۱)	برابر
(۱ و ۱/۲ و ۱/۳)	(۱ و ۲ و ۳)	حد وسط
(۱/۲ و ۱/۳ و ۱/۴)	(۲ و ۳ و ۴)	نسبتاً قوی
(۱/۳ و ۱/۴ و ۱/۵)	(۳ و ۴ و ۵)	حد وسط
(۱/۴ و ۱/۵ و ۱/۶)	(۴ و ۵ و ۶)	قوی
(۱/۵ و ۱/۶ و ۱/۷)	(۵ و ۶ و ۷)	حد وسط
(۱/۶ و ۱/۷ و ۱/۸)	(۶ و ۷ و ۸)	بسیار قوی
(۱/۷ و ۱/۸ و ۱/۹)	(۷ و ۸ و ۹)	حد وسط
(۱/۸ و ۱/۹ و ۱/۹)	(۹ و ۹ و ۹)	به شدت قوی

منبع: کنان و همکاران، ۲۰۱۳

FAHP تأثیر مهمی در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره‌ای که با عدم قطعیت روبه‌روست دارد این تکنیک کاربردهای بسیاری را در تنوع گسترده‌ای از حوزه‌های تصمیم‌گیری یافته است (وانگ و چین، ۲۰۱۱: ۵۴۱). برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها در مقایسه‌های زوجی، اهمیت نسبی هر معیار از معیار دیگر با استفاده از مقایسه‌های زبانی که در جدول ۲ آمده است تعیین می‌شود.

تحلیل حساسیت

از آنجا که نتایج به‌دست‌آمده از تکنیک‌های MCDM مقادیری از بی‌دقتی را به همراه دارند، ضروری است تحلیل حساسیت صورت بگیرد (سیندهو و همکاران، ۲۰۱۷: ۴۹۶). «تحلیل حساسیت روشی برای تعیین استحکام ارزیابی‌ها با بررسی میزان تأثیرپذیری نتایج با تغییرات در روش‌ها، مدل‌ها، ارزش‌های متغیرهای اندازه‌گیری نشده یا فرضیات است» (لوترا و همکاران، ۲۰۱۶). در این مطالعه، تحلیل حساسیت بر نتایج روش Fuzzy AHP اعمال شده است.

تعریف معیارها

تعیین مکان مناسب برای مزرعه نیروگاه خورشیدی به فهم کامل و صحیح از عوامل و چگونگی انتخاب آن‌ها دارد (ذوقی و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۸۶). معیارهای مورد استفاده در این مطالعه با توجه به منطقه مورد نظر، مطالعات پیشین و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز است. در ادامه، معیارهای انتخابی و دلیل انتخاب آن‌ها آمده است:

- (C1) تابش افقی گلوبال (GHI): در مبحث تابش خورشیدی، GHI مجموع تابش نرمال مستقیم (DNI)، تابش پراکنده‌شده افقی (DHI) و تابش بازتاب‌شده از زمین است. DNI میزان نور خورشید مستقیم است؛ درحالی‌که DHI مؤلفه تابش پراکنش‌شده توسط ابرها و دیگر اشیاء در اتمسفر است. ضمناً می‌توان میزان تابش بازتاب‌شده از سطح زمین را در مقایسه با دیگر مؤلفه‌ها ناچیز در نظر گرفت (القرنی و آتشی، ۲۰۱۷: ۱۲۲۵).
- (C2) تولید الکتریسیته فتوولتائیک پتانسیل (PVOUT): نقشه‌های PVOUT استفاده‌شده در این پژوهش، برآوردی از پتانسیل تولید برق فتوولتائیکی را فراهم می‌کنند. این معیار میانگین بلندمدت از پتانسیل تولید الکتریسیته را برای یک مزرعه خورشیدی متصل به شبکه نشان می‌دهد. برای محاسبه مقادیر این معیار، تابش خورشیدی، دمای هوا و توپوگرافی زمین در نظر گرفته می‌شود (برای توضیحات بیشتر رجوع شود به: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/tech-specs/>).

- (C3) ارتفاع: ارتفاع عاملی مؤثر برای مکان‌های صنعتی است. ارتفاع منطقه از سطح دریا، با ضخامت اتمسفر نسبت عکس دارد. هرچه اتمسفر ضخیم‌تر باشد، غلظت عوامل جذب یا بازتاب افزایش می‌یابد. از آنجا که مواد درشت‌تر در طبقات پایینی جای گرفته‌اند، اتمسفر در بالای کوه‌ها رقیق‌تر است؛ بنابراین نواحی مرتفع پتانسیل بیشتری را به دلیل دریافت انرژی بیشتر دارند (ذوقی و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۸۶)، اما هر چه ارتفاع منطقه افزایش یابد، هزینه و سختی انتقال زیرساخت‌ها و نیروی کار بیشتر می‌شود.
- (C4) شیب: شیب منطقه نیز از عوامل مهم در انتخاب مکان بهینه برای مزارع خورشیدی است. با افزایش شیب، پتانسیل زمین برای استفاده صنعتی کاهش می‌یابد (کمالی و همکاران، ۲۰۱۰؛ بونروماکائف و مورایاما، ۲۰۱۱: ۲۶۹). مناطق مسطح یا دامنه‌های دارای شیب کم در مقایسه با مناطق دارای شیب زیاد، هزینه‌های ساخت‌وساز کمتری را طلب می‌کنند؛ بنابراین زمین‌های صاف برای مزارع خورشیدی بزرگ‌مقیاس ضروری است، اما زمین‌هایی با شیب بالا به دلیل امکان‌پذیری اقتصادی پایین برای چنین پروژه‌های چندانی مفید نیستند.
- (C5) جهت شیب: شیب‌های جنوبی در مقایسه با شیب‌های شمالی انرژی بیشتری را دریافت می‌کنند؛ بنابراین شیب جنوبی جهتی ایده‌آل برای مکان‌های مزرعه خورشیدی است (طهری و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۳۵۴؛ القرنی و آتشی، ۲۰۱۷: ۱۲۲۵).
- (C6) ساعات آفتابی: این معیار به‌طور مستقیم با ساعت کارکرد پنل‌های خورشیدی ارتباط دارد و هر چه میزان آن بیشتر باشد، نشان‌دهنده این است که پنل‌های خورشیدی نصب‌شده بیشتر در مقابل نور خورشید قرار گرفته‌اند. همچنین هرچه ساعات آفتابی یک منطقه بیشتر باشد، مؤید آن است که منطقه روزهای ابری کمتری را داشته و تناسب بیشتری برای استقرار نیروگاه خورشیدی دارد.
- (C7) رطوبت نسبی: بخار آب و دی‌اکسیدکربن مهم‌ترین جذب‌کننده‌های انرژی خورشیدی هستند. نواحی‌ای با رطوبت بالا به دلیل جذب انرژی خورشیدی با طول موج‌های کوتاه به‌وسیله بخار آب مستعد استفاده از انرژی خورشیدی نیستند (ذوقی و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۸۶). همچنین وجود رطوبت می‌تواند در عملکرد پنل‌ها اختلال ایجاد کند.
- (C8) فاصله از شهرها: با توجه به اینکه یکی از اهداف استقرار مزارع خورشیدی تأمین برق مورد نیاز ساکنان شهرهاست، این مزارع باید در نزدیکی نواحی شهری احداث شوند. هرچه فاصله از مزرعه خورشیدی به نواحی شهری کمتر باشد، هزینه‌های اقتصادی برای انتقال انرژی و همچنین اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.
- (C9) فاصله از راه‌های اصلی: فاصله از راه‌های اصلی باید به میزان مطلوبی کم باشد. هرچقدر فاصله از راه‌های اصلی کم باشد، هزینه‌هایی مانند انتقال مواد مورد نیاز برای ساخت نیروگاه خورشیدی و هزینه انتقال نیروی کار کاهش می‌یابد (سبزی‌پرور و شتابی، ۲۰۰۷: ۶۴۹).

محدودیت‌های انتخاب مکان مناسب

- در برخی مناطق به دلیل محدودیت‌های قانونی یا جنبه‌های مهندسی و زیست‌محیطی، امکان استقرار مزارع خورشیدی وجود ندارد. در این پژوهش با توجه به منطقه مورد مطالعه و مطالعات پیشین بعضی مناطق به‌عنوان لایه محدودیت در نظر گرفته شده‌اند که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود:
- مناطق شهری: به دلیل برخی قوانین شهرداری‌ها و پیش‌بینی رشد شهرها در آینده، احداث مزارع خورشیدی در فاصله‌ای بسیار نزدیک به شهرها امکان‌پذیر نیست.

- مناطق حفاظت‌شده: مناطق حفاظت‌شده یا پارک‌های ملی، همچنین مناطق شکارممنوع از مواردی هستند که معمولاً قانون اجازهٔ دخل و تصرف در آن‌ها را نمی‌دهد؛ بنابراین در این پژوهش از موارد محدودیت محسوب می‌شوند.
- گسل‌های فعال: گسل‌های فعال از مواردی هستند که احداث تسهیلاتی مانند نیروگاه‌های خورشیدی یا بادی در آن‌ها از نظر ایمنی صحیح نیست؛ بنابراین محل احداث نیروگاه‌های خورشیدی باید فاصلهٔ مناسبی با گسل‌های فعال داشته باشند.

بحث و یافته‌ها

تولید لایه‌های معیار

لایه‌های مربوط به معیارهای GHI و PVOUT برای کل ایران از سایت www.solargis.com دانلود شد. سپس این لایه‌ها در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 استان آذربایجان شرقی به‌عنوان منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش استخراج شدند. لایهٔ ارتفاعی منطقه با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی^۱ (DEM) سنجدۀ ASTER ایجاد شد. همچنین تولید لایه‌های مربوط به شیب و جهت شیب منطقه نیز با استفاده از DEM منطقه و در نرم‌افزار Arcgis 10.3 صورت گرفت. مقادیر مربوط به معیارهای اقلیمی، یعنی ساعات آفتابی سالانه و میانگین رطوبت نسبی از سایت هواشناسی استان آذربایجان شرقی برای ۱۴ شهر دانلود شد. سپس مقادیردهی برای کل پهنهٔ مورد مطالعه با استفاده از درون‌یابی به روش وزن‌دهی با معکوس فاصله^۲ (IDW) صورت گرفت. لایه‌های فاصله از شهر و فاصله از جاده‌های اصلی نیز با استفاده از ابزار Euclidean distance در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 تولید شدند. همچنین اندازهٔ پیکسل همهٔ لایه‌ها با اندازهٔ پیکسل مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه تطبیق داده شد.

نرمال‌سازی لایه‌ها

از آنجا که معیارهای مورد استفاده در این پژوهش واحدهای متفاوتی دارند و هر یک از آن‌ها با برد متفاوتی از اعداد همراه هستند، باید برای استفاده در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره آن‌ها را نرمال کنیم. به عبارت دیگر، رسترهای ورودی باید به مقیاس صفر تا ۱ استاندارد شوند. نرمال‌سازی^۳ داده‌ها با توجه به ماهیت آن‌ها با معادلات متفاوتی انجام شده است. برای نرمال کردن معیارهای GHI، PVOUT، ساعات آفتابی و از رابطهٔ ۳ استفاده شد. برای معیار ارتفاع و شیب نیز از تابع Small (رابطهٔ ۴) در نرم‌افزار Arc GIS استفاده شد. برای نرمال کردن معیار ارتفاع، مقادیر بالای ۲ هزار متر و در معیار شیب، شیب‌های بیشتر از ۱۰ درجه به مقدار صفر نرمال شدند. برای معیار رطوبت نسبی، فاصله از شهر و فاصله از جاده‌های اصلی از رابطهٔ ۵ استفاده شد. در معیار فاصله از شهر فواصل بیش از ۲۰ کیلومتر و در معیار فاصله از جاده مقادیر بیش از ۱۰ کیلومتر به مقدار صفر نرمال‌سازی شدند.

$$\mu(x) = \frac{x - \min}{\max - \min} \quad (1)$$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{m}\right)^s} \quad (2)$$

1. DEM: Digital Elevation Model
2. Inverse Distance Weighting
3. Normalization

$$\mu(x) = \frac{\max - x}{\max - \min} \quad (3)$$

در رابطه‌های فوق، x مقدار معیار، m نقطه میانی و s گستره هستند.

وزن‌دهی معیارها

برای تعیین وزن‌ها و اهمیت نسبی معیارها، یک ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شد. با توجه به جدول ۲ نیز مقایسه‌های زوجی صورت گرفت. جدول ۳ نتیجه نهایی این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ماتریس مقایسه‌های زوجی معیارها

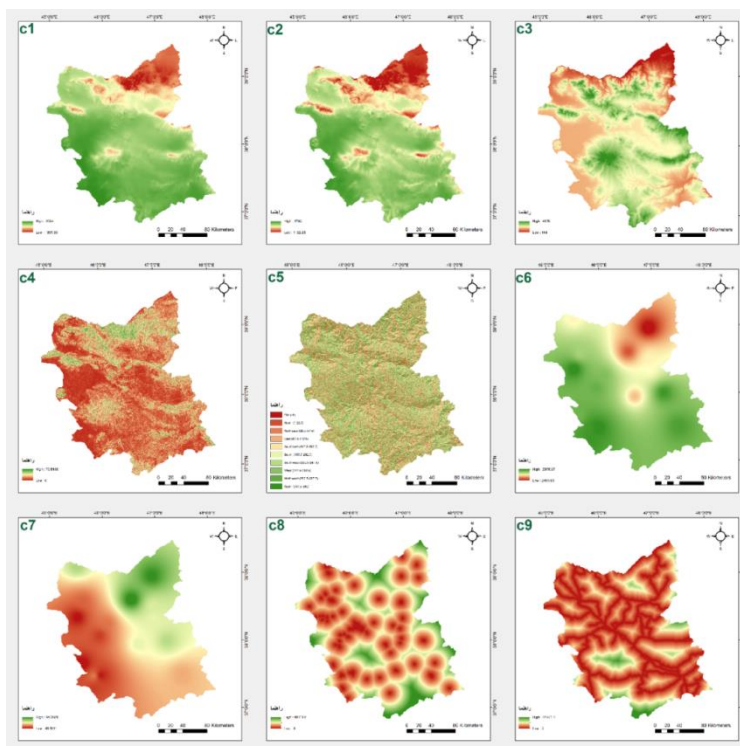
C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(۲.۳۴)	(۲.۳۴)	(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(۱.۱۱)	C1
(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(۴.۵۶)	(۴.۵۶)	(۲.۳۴)	(۲.۳۴)	(۱.۳۳)	(۱.۱۱)	(۱.۳۳)	C2
(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	C3
(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۳۳)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	C4
(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	C5
(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳)	(-۰/۲۵، ۰/۳۳، ۰/۵۱)	C6
(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(۱.۱۱)	(۱.۳۳)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳)	(-۰/۲۵، ۰/۳۳، ۰/۵۱)	C7
(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	C8
(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۳۳)	(۱.۳۳)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(۱.۱۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	(-۰/۳۳، ۰/۵۱)	C9

مقدار CR برای جدول مقایسه‌های زوجی ۰/۰۶۲ است که چون کمتر از ۰/۱ است نشان می‌دهد مقایسه‌های زوجی با یکدیگر سازگاری دارند.

در جدول ۴، وزن‌های به‌دست‌آمده برای معیارهای نه‌گانه آمده است. نحوه به‌دست‌آوردن وزن‌ها به‌طور مفصل در مقاله لئو و وانگ (۱۹۹۲) آمده است. براساس جدول ۴ معیار PVOUT و GHI بیشترین وزن و ساعات آفتابی و رطوبت نسبی کمترین وزن را دارند.

جدول ۴. وزن معیارها

وزن معیار	معیار
۰/۱۷۶۱	C1
۰/۲۴۱۶	C2
۰/۱۰۸۴	C3
۰/۰۸۴۲	C4
۰/۰۶۹۸	C5
۰/۰۵۶۴	C6
۰/۰۷۰۸	C7
۰/۰۹۶۳	C8
۰/۰۹۶۳	C9
۱	مجموع



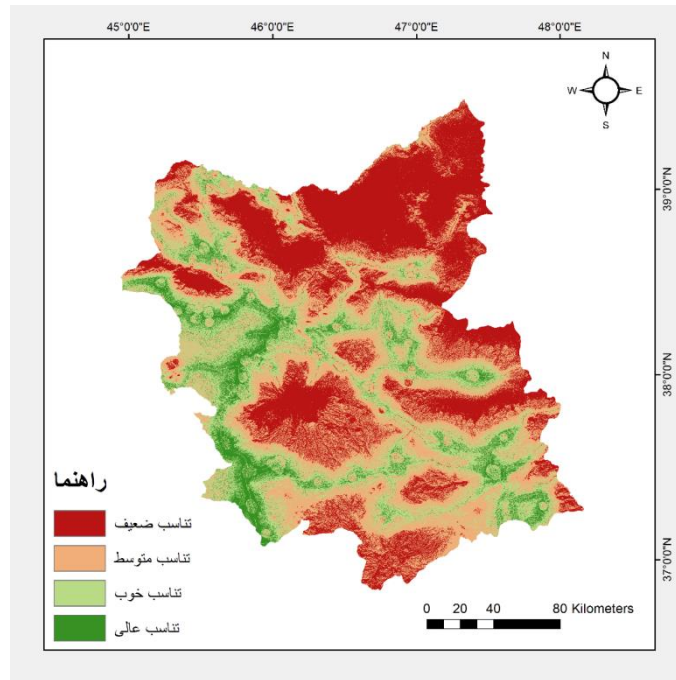
شکل ۲. نقشه معیارها

ترکیب و روی هم گذاری لایه‌های معیار

پس از نرمال سازی لایه‌ها و محاسبه وزن‌های معیارها، با استفاده از ابزار Raster Calculator نقشه اولیه تناسب ایجاد شد. کمترین میزان تناسب ۰/۰۶۲۸ و بیشترین میزان تناسب ۰/۸۰ به دست آمد. مناطق کوهستانی استان و جنگل‌های ارسباران کمترین تناسب را از دیگر مناطق دارند. همچنین بیشترین تناسب به کریدور تبریز، میاندوآب و شهرهای اطراف آن تعلق دارد. در حالت کلی، مناطق غرب استان برای نصب و استقرار مزارع خورشیدی مطلوبیت بیشتری از مناطق شرق دارند. در نهایت مقادیر تناسب اراضی به چهار دسته تناسب ضعیف (مقادیر بین ۰/۰۶ تا ۰/۴)، تناسب متوسط (مقادیر بین ۰/۴ تا ۰/۵)، تناسب خوب (مقادیر بین ۰/۵ تا ۰/۶) و تناسب عالی (مقادیر بیش از ۰/۶) تقسیم شد. مساحت هر یک از چهار دسته فوق در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. نتایج اولیه تناسب اراضی

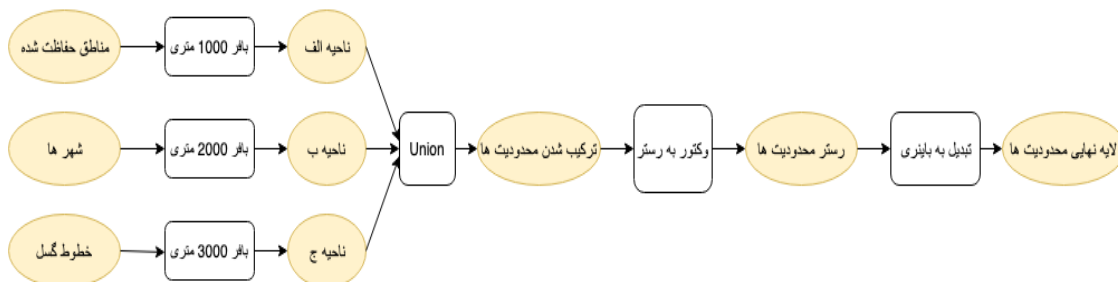
درصد	مساحت	درجه تناسب
۳۵/۱۶	۱۶۰۸۳۶۰/۴۴	تناسب ضعیف
۳۳/۶۲	۱۵۳۸۰۸۰/۵۴	تناسب متوسط
۲۳/۱۴	۱۰۵۸۴۷۳/۱۷	تناسب خوب
۰۸/۰۷	۳۶۹۱۶۷/۶۶	تناسب عالی
۱۰۰	۴۵۷۴۰۸۱/۸۲	مجموع



شکل ۳. نقشه اولیه تناسب اراضی

تولید لایه محدودیت‌ها

به منظور شناسایی بهتر مناطق مطلوب برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی لازم است مناطق حفاظت‌شده، مناطق نزدیک به گسل‌های فعال و مناطق نزدیک به نواحی مسکونی از نقشه تناسب اولیه به دست آمده از ترکیب معیارها حذف شوند. مناطق حفاظت‌شده به همراه یک بافر هزار متری، مناطق شهری به همراه یک بافر ۲ هزار متری و خطوط گسل‌های فعال به همراه یک بافر ۳ هزار متری لایه محدودیت را تشکیل می‌دهند. برای به دست آوردن لایه نهایی تناسب اراضی، از عملگر بولین^۱ استفاده شد؛ یعنی مقادیری که به عنوان مناطق دارای محدودیت شناخته شده‌اند، مقدار صفر و دیگر مناطق مقدار ۱ می‌گیرند. از ضرب این لایه در نقشه به دست آمده از ترکیب لایه‌های معیار، لایه نهایی تناسب اراضی (شکل ۴) برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی حاصل می‌شود.



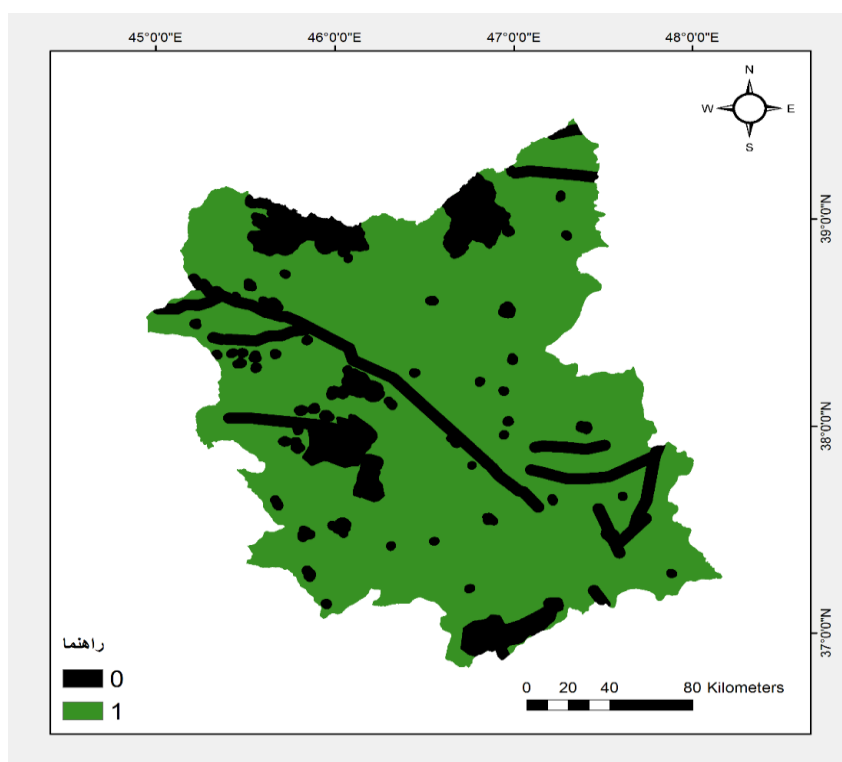
شکل ۴. دیاگرام تولید لایه محدودیت‌ها

با توجه به لایه محدودیت (شکل ۵) حدود ۲۰ درصد از مساحت کل منطقه مطالعه را مناطقی تشکیل می‌دهند که به عنوان محدودیت تعریف شده‌اند. ۸۰ درصد مناطق استان نیز قابلیت اولیه را برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی دارند. شکل ۶ نقشه نهایی تناسب اراضی منطقه مطالعه را برای استفاده از انرژی خورشیدی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶،

1. Boolean Operator

مناطق شمالی، شمال شرقی و جنوبی استان به دلیل دریافت کم انرژی خورشیدی، دوری از مناطق مسکونی، رطوبت بالا و مناطق حفاظت شده تناسب بسیار کمی برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی دارند، اما در نواحی غربی و جنوب غربی استان، تناسب بالایی برای استفاده از انرژی خورشیدی در این مناطق وجود دارد. دلیل عمده این امر دریافت بالای انرژی خورشیدی، وجود شهرهای متعدد، نزدیکی به جاده‌های اصلی و ارتفاع مناسب است. همچنین مناطق محدودی در جنوب شرقی استان تناسب بسیاری برای استقرار مزارع خورشیدی دارند. مساحت اراضی با درجات تناسب متفاوت، پس از حذف مناطق دارای محدودیت از نقشه تناسب اراضی در جدول ۶ آمده است.

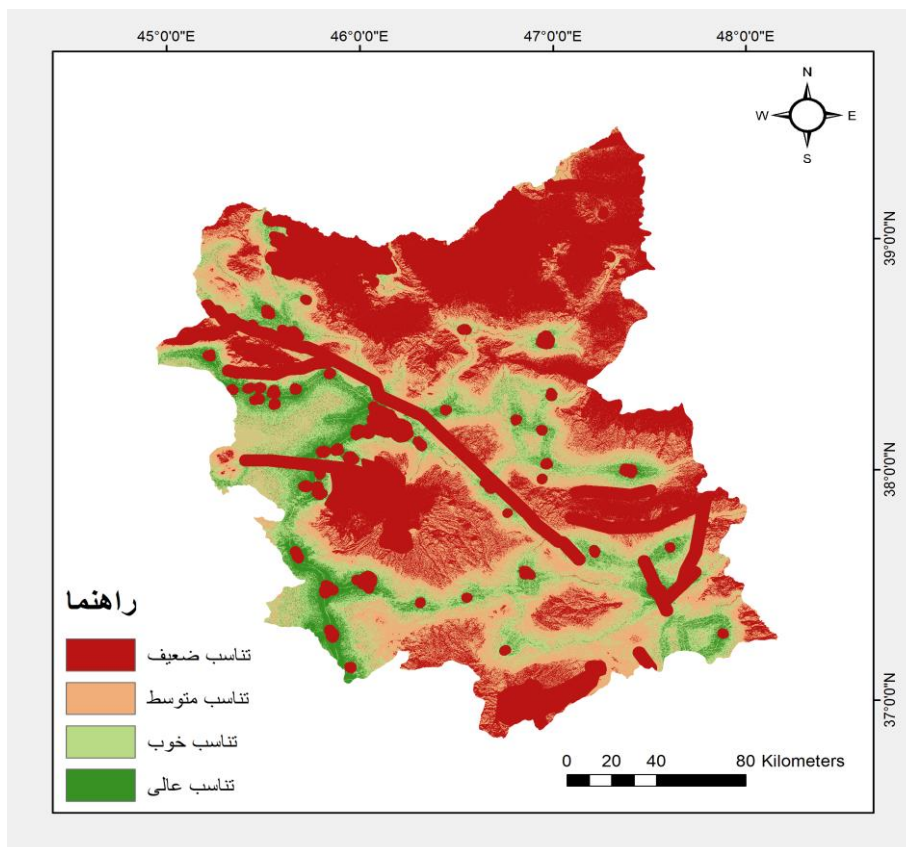
با مقایسه جدول ۵ و ۶، پس از در نظر گرفتن محدودیت‌ها، مساحت اراضی با درجه تناسب ضعیف ۱۲/۶۳ درصد افزایش یافته است؛ در حالی که مساحت اراضی با درجه تناسب متوسط، خوب و ضعیف، به ترتیب ۶/۵۲، ۴/۸۳ و ۱/۴۷ درصد کاهش یافته است.



شکل ۵. نقشه محدودیت‌ها به صورت باینری (شامل مناطق شهری، مناطق حفاظت شده و خطوط کسل‌های فعال)

جدول ۶. درجه تناسب اراضی منطقه مورد مطالعه پس از در نظر گرفتن محدودیت‌ها

درصد	مساحت	درجه تناسب
۴۷/۹۹	۲۱۹۴۹۹۸/۸۶	تناسب ضعیف
۲۷/۱۰	۱۲۳۹۷۲۰/۴۳	تناسب متوسط
۱۸/۳۱	۸۳۷۲۸۳/۶۹	تناسب خوب
۰۶/۶۰	۹۲۳۰۲۰۷۸	تناسب عالی
۱۰۰	۴۵۷۴۰۸۱/۹	مجموع



شکل ۶. نقشه نهایی تناسب اراضی

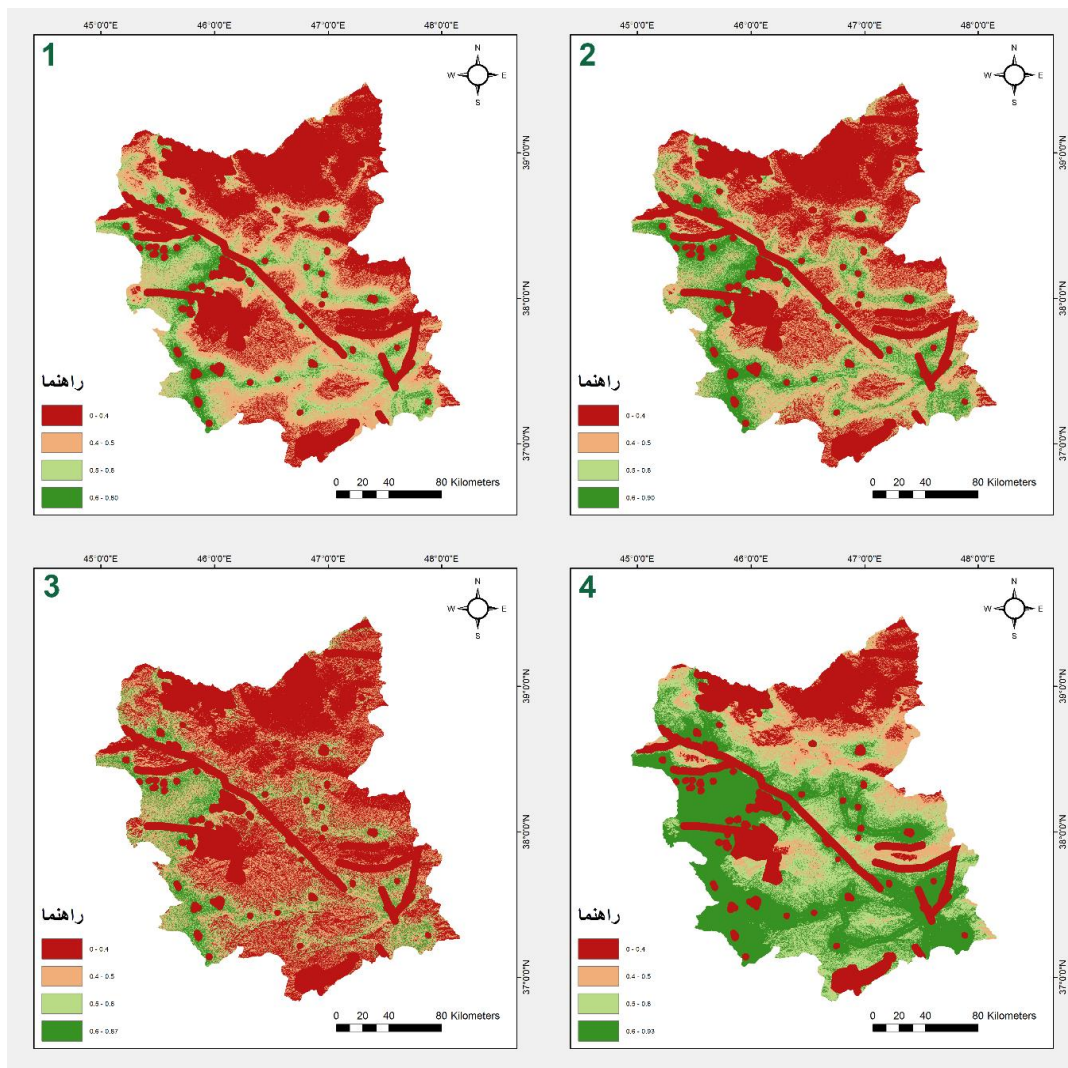
تحلیل حساسیت نتایج Fuzzy AHP

هدف اصلی تحلیل حساسیت، ارزیابی میزان تأثیر یک متغیر بر خروجی مدل کلی با دست‌کاری متغیرهاست (واینبریک و کرسویک، ۲۰۰۳: ۳۵۹). هنگامی که با عدم قطعیت مواجه هستیم، این تحلیل روی یک یا چند پارامتر امری ضروری است (قهرمان و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۶۰۳). برای تحلیل حساسیت سناریوهای مختلفی از تغییر وزن معیارها و نتیجه کلی آن‌ها بر میزان تناسب اراضی اعمال شد. در ابتدا برای همه معیارها وزن یکسانی در نظر گرفته شد تا اهمیت نسبی معیارها نادیده گرفته شود. در سناریوی بعدی ۵۰ درصد وزن به معیارهای مربوط به شکل زمین (ارتفاع، شیب و جهت شیب) داده (هر معیار ۱۶/۶۶ درصد) و وزن بقیه معیارها یکسان در نظر گرفته شد. در سناریوی آخر نیز معیار GHI و PVOUT وزن ۵۰ درصد گرفتند و برای ۷ معیار دیگر وزن یکسان تخصیص داده شد (در همه سناریوها مجموع وزن معیارها ۱۰۰ درصد است).

جدول ۷. درجه تناسب اراضی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت

درجه تناسب	مساحت (سناریوی اول)	درصد	مساحت (سناریوی دوم)	درصد	مساحت (سناریوی سوم)	درصد
تناسب ضعیف	۲۱۳۶۱۹۳/۷۲	۴۶/۷۰	۲۶۷۹۴۲۶/۸۰	۵۸/۵۸	۱۳۳۴۴۶۳/۸۱	۲۹/۱۸
تناسب متوسط	۱۰۵۰۰۳۱/۷۹	۲۲/۹۶	۹۵۷۰۰۸/۳۱	۲۰/۹۲	۵۸۶۱۶۰/۹۵	۱۲/۸۱
تناسب خوب	۸۲۲۶۷۶/۴۴	۱۸/۰۰	۵۸۰۹۶۶/۲	۱۲/۷۰	۱۰۷۲۰۰۸/۴۶	۲۳/۴۴
تناسب عالی	۵۶۴۸۰۰/۹	۱۲/۳۴	۳۵۶۳۰۱/۳۲	۰۷/۸۰	۱۵۸۱۰۶۹/۶۳	۳۴/۵۷
مجموع	۴۵۷۳۷۰۲/۸۵	۱۰۰	۴۵۷۳۷۰۲/۸۵	۱۰۰	۴۵۷۳۷۰۲/۸۵	۱۰۰

با توجه به جدول ۶ و ۷ و شکل ۷، اگر وزن همه معیارها برابر باشد، به دلیل افزایش وزن معیارهای فاصله از شهرها و فاصله از راه‌های اصلی، مساحت اراضی با درجه تناسب خوب و عالی در نزدیکی جاده‌های اصلی و شهرها افزایش پیدا می‌کند. به‌طور کلی در این حالت سهم اراضی با درجه تناسب عالی افزایش می‌یابد و اراضی با درجه تناسب ضعیف و متوسط کم می‌شود. همچنین سهم اراضی با درجه تناسب خوب تغییر چندانی نمی‌کند. در سناریوی دوم، با توجه به اینکه وزن معیارهای ارتفاع، شیب و جهت شیب افزایش می‌یابد، میزان تناسب اراضی برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی در ارتفاعات و شیب‌های شمالی کاهش قابل توجهی می‌یابند. در این سناریو نیز در حالت کلی سهم اراضی با درجه تناسب ضعیف در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از روش AHP افزایش پیدا می‌کند و درصد اراضی با درجه تناسب متوسط و خوب کاهش می‌یابد. نکته مهم در این سناریو افزایش ۱/۲ درصدی اراضی با تناسب عالی است. در سناریوی آخر، با توجه به افزایش وزن معیارهای GHI و PVOUT، هرکدام به ترتیب به میزان ۰۷/۳۹ درصد و ۰/۸۴ درصد، سهم اراضی با درجه تناسب عالی به‌ویژه در نواحی غربی استان که این دو معیار مقادیر بالایی دارند، افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. همچنین در این سناریو درصد اراضی با درجه تناسب ضعیف و متوسط به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل ۷. نقشه تناسب اراضی منطقه، ۱. وزن‌های به‌دست‌آمده از AHP، ۲. وزن‌های برابر، ۳. وزن بیشتر برای معیارهای شکل زمین، ۴. وزن بیشتر برای معیارهای GHI و PVOUT

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی به مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در منطقه‌ای کوهستانی پرداخته شد. برای یافتن مناسب‌ترین مکان از ۹ معیار مختلف و برای تعیین اهمیت نسبی معیارها از روش Fuzzy AHP استفاده شد. براساس نتایج روش Fuzzy AHP، معیار PVOUT بیشترین اهمیت نسبی و معیار ساعات آفتابی کمترین اهمیت نسبی را دارند. پس از روی هم‌گذاری لایه‌های معیارها در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 مشخص شد مناطق جنگلی و کوهستانی منطقه به دلیل برخورداری از تابش کافی و دوربودن از مراکز شهری و جاده‌های اصلی برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی مناسب نیستند، اما مناطق غربی استان به دلیل قرارگرفتن در زمین‌های هموار، دریافت کافی انرژی خورشید و نزدیکی به جاده‌های اصلی و نقاط شهری از تناسب خوبی برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی برخوردارند. برای دقیق‌تر کردن نتایج به دست آمده و حذف مکان‌هایی که امکان‌پذیری اولیه را برای استفاده از انرژی خورشیدی ندارند، محدودیت‌هایی تعریف شد. این محدودیت‌ها شامل مناطق حفاظت‌شده، مناطق مجاور شهرها و مناطق نزدیک به گسل‌های فعال است. پس از حذف این مناطق از نقشه به دست آمده از ترکیب و روی هم‌گذاری لایه‌های معیار، نقشه نهایی تناسب اراضی حاصل شد که نشان می‌دهد ۶/۰۶ درصد از اراضی استان از درجه تناسب عالی برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی برخوردارند. همچنین برای ارزیابی نتایج به دست آمده از روش AHP، تحلیل حساسیت وزن‌ها انجام شد. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد، معیارهای PVOUT و GHI و معیارهای مربوط به شکل زمین اهمیت بسیاری در تعیین مناطق مستعد برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی دارند.

منابع

۱. مرکز آمار ایران. <https://www.amar.org.ir>.
۲. مهاجرزاده، محمد، معصومی، رحیم، کمالی محمدرضا، ۱۳۸۹، اصول و معیارهای مکان‌یابی صنایع راهبردی، انتشارات مینای خرد.
3. Alamdari, P., Nematollahi, O., and Alemrajabi, A., 2013, Solar Energy Potentials in Iran: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, PP. 778–788.
4. Al Garni, H., and Awasthi, A., 2017, Solar PV Power Plant Site Selection Using a GIS-AHP Based Approach with Application in Saudi Arabia, *Applied Energy* Vol. 206, PP. 1225–1240.
5. Aragonés-Beltrán, P., Chaparro-González, F., Pastor-Ferrando, J-P., and Pla-Rubio, A., 2014, An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-Based Multi-Criteria Decision Approach for the Selection of Solar-Thermal Power Plant Investment Projects, *Energy*, Vol. 66, PP. 222–38.
6. Belton, V., and Stewart T. J., 2002 *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*, Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
7. Bunruamkaew, K., and Murayama, Y., 2011, Site Suitability Evaluation for Ecotourism Using GIS and AHP: A Casestudy of Surat Thani Province, Thailand. *Procedia Soc Behav Sci*, Vol. 21, PP. 269–78.
8. Candelise, C., Winkler, M., and Gross, R. J. K., 2013, The Dynamics of Solar PV Costs and Prices As a Challenge for Technology Forecasting, *Renewable Aand Sustainable Energy Reviews*, Vol. 26, PP. 96–107.
9. Diakoulak, I. D., Henggeler Antunes, D., and Gomes, Martins A., 2005, MCDA Aand Energy Planning, In: Figueira J, Greco S, Ehrgott M, Editors, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, United States of America: Springer.
10. Dincer, I., 2000, Renewable Energy and Sustainable Development: A Crucial Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4, PP. 75–157.
11. Doorga, J. R. S, Rughooputh, S. D. D. V., and Boojhawon, R., 2018, Multi-Criteria GIS-Based Modelling Technique for Identifying Potential Solar Farm Sites: A Case Study In Mauritius, *Renewable Energy*, Vol. 133, PP. 1-19.
12. Dozic, S., Lutovac, T., and Kali, M., 2018, Fuzzy AHP Approach to Passenger Aircraft Type Selection, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 68, PP. 165-175.
13. Elliot D., 2007, *Sustainable Energy: Opportunities and Limitations*, London: Palgrave Macmillan.
14. Ferroukhi, R., Gielen, D., Kieffer, G., Taylor, M., Nagpal, D., and Khalid, A., 2014, Rethinking Energy: Towards a New Power System, *Int Renew Energy Agency (IRENA)*.
15. Hung, M. M. H., and Yang, W., 2007, A Novel Sustainable Decision Making Model for Municipal Solid Waste Management, *Waste Management*, Vol. 27, PP. 209–19.
16. IPCC. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Youba, Sayboth, K., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Von Stechow, C., Matschoss, P., Kander, S., Schlömer, S., Editors., 2011 United Kingdomand New York, NY, USA: Cambridge University Press. P. 1075 Prep. for Working Group III Intergovernmental Panel on Climate Change.
17. Johnson, K. C., 2010, A Decarbonization Strategy for the Electricity Sector: New-Source Subsidies, *Energy Policy*, Vol. 38, PP. 2499–507.
18. Liou, T. S., J. Wang, M. J., 1992, Ranking Fuzzy Numbers with Integral Value, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 50, PP. 247-255.

19. Kahraman, C., Kaya, İ., and Cebi, S., 2009, A Comparative Analysis for Multiattribute Selection Among Renewable Energy Alternatives Using Fuzzy Axiomatic Design and Fuzzy Analytic Hierarchy Process., *Energy*, Vol. 34, PP. 1603–16.
20. Kowalski, K., Stagl, S., Madlener, R., and Omann, I., 2009, Sustainable Energy Futures: Methodological Challenges in Combining Scenarios and Participatory Multi- Criteria Analysis, *European Journal of Operational Research*, Vol. 197, PP. 1063–74.
21. Ku, C.Y., Chang, C.T., and Ho, H. P., 2010, Global Supplier Selection Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Goal Programming, *Journal of Quality and Quantity*, Vol. 44, PP. 623-640.
22. Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Yusaf, T., and Azmi, W. H., 2015, Solar Energy in Iran: Current State and Outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, PP. 931-942.
23. Pokehar, S. D., and Ramachandran, M., 2004, Application of Multi Criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning-A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 8, PP. 365–81.
24. Panwar, N. L., Kaushik, S. C., and Kothari, S., 2011, Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, PP. 1513–24.
25. Saaty, T. L., 2008, Decision Making with the Analytic Hierarchy Process, *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, PP. 83–98.
26. Sabziparavar, A., and Shetaee, H., 2007, Estimation of Global Solar Radiation in Arid and Semi-Arid Climates of East and West Iran, *Energy*, Vol. 32, PP. 649–55
27. Sanchez-Lozano, J. M., Antunes, C.H., Garcia-Cascales M.S., and 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* Vol. 66, PP. 478-479.
28. Sindhua, S., Nehraa, V., and Luthra, S., 2017, Investigation of Feasibility Study of Solar Farms Deployment Using Hybrid AHP-TOPSIS Analysis: Case Study of India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73. PP. 496–511.
29. Sindhu, S. P., Nehra, V., and Luthra, S., 2016, Recognition and Prioritization of Challenges in Growth of Solar Energy Using Analytical Hierarchy Process: Indian Outlook, *Energy*, Vol. 100, PP. 332–48.
30. Strantzali, E., and Aravossis, K., 2016, Decision Making in Renewable Energy Investments: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, PP. 885-898.
31. Tahri, M., Hakdaoui, M., and 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*, Vol. 51, PP. 1354–1362.
32. Talinli, I., Topuz, E., Aydin, E., and Kabakçı, S. B., 2011, A Holistic Approach for Wind Farm Site Selection by FAHP, *Wind Farm: Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment Intech*, Croatia, PP. 213–34.
33. Uyan, M., 2013, GIS-Based Solar Farms Site Selection Using Analytic Hierarchy Process (AHP) in Karapinar Region, Konya/Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, PP. 11-17.
34. Vafaeipour, M., Zolfani, SH., Varzandeh, M. H. M., Derakhti, A., and Eshkalag, M. K., 2014, Assessment of Regions Priority for Implementation of Solar Projects In Iran: New Application of a Hybrid Multi-Criteria Decision Making Approach, *Energy Convers Manag*, Vol. 86, PP. 653–63.
35. Wang Y., and Chin K., 2011, Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A Logarithmic Fuzzy Preference Programming Methodology, *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 52, PP. 541–553.

36. Winebrake, J. J., and Creswick, B. P., 2003, The Future of Hydrogen Fueling Systems for Transportation: An Application of Perspective-Based Scenario Analysis Using the Analytic Hierarchy Process, Technol Forecast Soc Change, Vol. 70. PP. 359–84.
37. Zoghi, M., Ehsani, A., Sadat, M., Amiri, M., and Karimi, S., 2017, Optimization Solar Site Selection by Fuzzy Logic Model and Weighted Linear Combination Method in Arid and Semi-Arid Region: A Case Study Isfahan-IRAN, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 68, PP. 986–996.