



بهینه سازی انتخاب مکان نیروگاه خورشیدی با استفاده از رویکرد ترکیبی GIS - AHP: مطالعه موردی استان آذربایجان غربی ثنا نباتی¹، رضا بابازاده²، علی نمازیان^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

2- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

3- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

*کاشان، ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳، a.namazian@kashanu.ac.ir

چکیده

منابع انرژی تجدیدپذیر رویکردی نوین در استراتژی توسعه انرژی محسوب می شوند. در این خصوص، سامانه های فتوولتائیک (PV) با توسعه جهشی و سیر نزولی هزینه ها از اهمیت بسیاری برخوردارند. راندمان و سودآوری سیستم های PV منوط به موضع گیری مدون تجهیزات PV می باشد. پژوهش پیش رو، در پی استخراج مدل تناسب اراضی برای احداث نیروگاه PV با سلول های سیلیکونی با نگرش به پارامترهای اکولوژیکی، تکنولوژیکی و توپولوژیکی، در استان آذربایجان غربی است. هدف اصلی مقاله، ارائه رویکردی نوین برای انتخاب مکان نیروگاه های خورشیدی با ترکیب روش های تصمیم گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی می باشد. بدین منظور، پس از بسط معیارهای کلیدی و شناسایی محدودیت های اثرگذار، الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی در سیستم های اطلاعات جغرافیایی تلفیق شد. حاصل این تلفیق، حصول نتایج دقیق تر ناشی از به کارگیری داده های اقلیم شناسی و توپوگرافی واقعی و ضریب تاثیر هر معیار در نگاشت نهایی می باشد. در ادامه، دو رویکرد وزن های بیشتر و وزن های برابر مطرح گردید و نتایج با روش پایه مقایسه شد. در راستای سهولت تبیین نتایج، شاخصی تحت عنوان شاخص تناسب زمین (LSI) تعریف شد که مناطق بالقوه را در 5 دسته، گروه بندی کرد. بر اساس شاخص LSI، مناطق با پتانسیل بیشتر جهت استقرار سامانه های PV، از رتبه بالاتری برخوردارند. نتایج مدل حاکی از آن است که بالغ بر 22 درصد از پهنه مطالعاتی از سیستم های PV پشتیبانی می کنند. همچنین، مناطق با پتانسیل بالا ($LSI > 3$) عمدتاً نوار شرقی و بخش مرکزی استان را در بر می گیرد. تجزیه برآیند الحاقی پایگاه های داده، امکان دستیابی به مساحت بیشتر با توسعه زیرساخت های موجود را تصدیق می کند. انطباق نتایج رویکردها بر صحت نتایج حاصله تاکید دارد.

کلیدواژه ها: بهینه سازی، انرژی تجدیدپذیر، سیستم های تولید پراکنده، سیستم فتوولتائیک، تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM)

Optimization of solar power plant location selection using a hybrid approach: a case study of West Azerbaijan Province

1- MSc student, Department of Industrial Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

* P.O.B. 8731753153 Kashan, Iran, a.namazian@kashanu.ac.ir

Received: 9 April 2023 Accepted: 6 Feb. 2024

Abstract

Following the recent development trend in the struggle to clean the environment, solar energy is considered as a clean energy, one of the most desirable alternatives to non-renewable resources. This paper presents an integrated approach to face the challenge of PV power plant site selection using analytical hierarchy process (AHP) and geographic information systems (GIS). The contribution of this research is in the development of an applicable approach for decision makers, in guiding the selection of the location of PV parks to achieve optimal performance and minimize costs, time and environmental effects. The important advantage of this research is the flexibility of the criteria's weight in the direction of the decision maker's goals. In this way, after determining the weight of the effective criteria, removing restrictions from the area and overlapping the weighted layers, an index called the Land Suitability Index (LSI) is defined. Based on this index, heavier areas are more favorable for building PV plants. Finally, the land suitability was grouped into five categories using the equal distance classification method. For further comparison, we tested two paths under the title of greater non-ecological weight and equal weight. The results showed that, like the basic approach, 22% of the area is ready to receive PV panels. However, the degree of suitability of some points in each approach had slight differences, which shows the flexibility of the chosen method. The decision maker can choose the appropriate path based on his goals.

Keywords: Optimization, Renewable Energy, Distributed Generation Systems, Photovoltaic System (PV), Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

گرفته سالانه تقریباً 3,400,000 EJ تابش خورشیدی به سطح زمین می‌رسد و با راندمان تبدیل 10 درصد، حدود 0.1 درصد از این انرژی خورشیدی بر خوردی در سطح زمین، قادر به تولید حدود 3000 گیگاوات انرژی است [10]. استان آذربایجان غربی با تابش سالانه 1898 kW/h از کمینه کران قابل پذیرش (1278 kW/h) جهت استفاده از تکنولوژی‌های انرژی خورشیدی نظیر کلکتورهای خورشیدی یا سیستم‌های فتوولتائیک عبور کرده است. آذربایجان غربی با مساحت تقریبی 37437 km² دوازدهمین استان پهناور کشور و پس از آذربایجان شرقی دومین استان وسیع شمال شرق است. این واقعیت که مساحت آذربایجان غربی بسیار زیاد است، امکان ایجاد سایت‌های فتوولتائیک در مقیاس استانی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، ساختارهای توپوگرافی فعال، دشت‌های وسیع و پراکندگی روستایی موجود بستر ساز ایجاد نیروگاه‌های فتوولتائیک با شمار و وسعت زیادی در سطح استان هستند. پژوهش پیش‌رو، تعیین مکان‌های مطلوب جهت ایجاد سایت‌های فتوولتائیک در مقیاس استانی با نگرش به معیارهای اکولوژیکی، تکنولوژیکی و دسترسی و با هدف حداقل سازی تخریب تعادل طبیعی استان آذربایجان غربی را تضمین می‌کند. جهت احراز بیشینه مزایای سیستم‌های فتوولتائیک، احساس نیاز به تعیین مکان بهینه برای احداث مزارع به صورت برجسته به چشم می‌خورد. در دهه‌های اخیر، مطالعات بسیاری، راهکارهایی برای شناسایی بهترین مکان بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر پیشنهاد کرده‌اند. به طور مثال، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی⁵ برای وزن دهی به معیارهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد، و از تاپسیس⁶ [11-12] و تاپسیس فازی [13-14] برای ارزیابی گزینه‌ها و نصب نیروگاه‌های ترموالکتریک استفاده شد. در مطالعه [15] از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و مجموعه‌های فازی شهودی، برای کشف مناطق بهینه استان ارزوم⁷ ترکیه جهت بهره‌برداری‌های فتوولتائی استفاده شد. در مرجع [16] زاویه آزیموت بهینه هر مکان یافت شد؛ سپس از تحلیل سلسله مراتبی برای ارزیابی مکان‌های بالقوه استفاده گردید. در مطالعه [17] سه مکان بالقوه برای ساخت نیروگاه خورشیدی، با اعمال محدودیت در منطقه جنوب غربی ایالات متحده آمریکا و به طور خاص ایالت کالیفرنیا انتخاب شد. سپس با استفاده از رویکرد انتخاب بر اساس مزایا⁸، بهترین نواحی برگزیده شدند. در نهایت، نتایج حاصل با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مقایسه و انطباق دو رویکرد اثبات شد. مرجع [18] مسئله تعیین مکان نیروگاه‌های ترکیبی را با استفاده از تحلیل حقوقی، مدل سازی اقتصادی و انرژی، ارزش گذاری پولی و بهینه‌سازی عددی بررسی می‌کند. در مرجع [19] مناطق با پتانسیل بالا در کشور ایران با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره⁹ استخراج شد. سپس، یک مدل تصمیم‌گیری بر اساس الگوریتم‌های درخت تصمیم و بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شد. در نهایت، ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های درخت تصمیم و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در شناسایی مکان‌های بهینه انرژی خورشیدی مقایسه شد. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از روش تحلیل پوششی داده، مکان‌ها با

1- مقدمه

در نیم‌قرن گذشته با افزایش تقاضای انرژی ناشی از بهبود اقتصاد و استانداردهای زندگی، کاهش قابل توجهی در ذخایر منابع فسیلی وجود داشته است که نمی‌توان آن را نادیده گرفت؛ به گونه‌ای که طی 30 تا 40 سال آتی، این ذخایر به تنهایی قادر به پاسخگویی به نیازهای جهان نخواهند بود. این واقعیت که افزایش نامتعارف تقاضای الکتریسیته و محدودیت و آثار نامطلوب منابع فسیلی، جوامع را به سمت اتخاذ مسیرهای جایگزین رهنمود ساخته، غیرقابل انکار است. بر اساس ارزیابی‌ها، تقاضا برای انرژی برق به طور مداوم در حال افزایش است. از سویی توسعه فناوری نیز با افزایش چشمگیری همراه بوده است [1]؛ به گونه‌ای که منابع موجود توان تأمین الکتریسیته لازم را ندارند. این ناتوانی از افزایش دو برابری مصرف برق در هر 14.5 سال نشأت می‌گیرد [2]. سوخت‌های فسیلی منبع بنیادین تولید الکتریسیته، با 60 درصد بیشترین سهم تأمین انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی بر محیط زیست و اقلیم تأثیرات هنگفتی دارد. در راستای تلاش جهانی اخیر برای اقتصاد کم‌کربن، تمایل برای به‌کارگیری جایگزین‌های سازگار با محیط زیست جهت کنترل مشکلات محیط زیستی و کاهش تغییرات اقلیمی افزایش یافته است. در اتحادیه اروپا، انرژی خورشیدی در مقیاس وسیع برای کاهش انتشار کل دی اکسید کربن مورد استفاده قرار گرفته است [3]. طول عمر نیروگاه‌های خورشیدی تقریباً 25 تا 30 سال است [4]. از سویی بر اساس اظهارات دومینگز¹، افزایش نیروگاه‌های خورشیدی روند صعودی ضایعات فتوولتائیک شامل تمام مواد دور ریخته شده از سیستم‌های فتوولتائیک² نظیر ماژول‌ها، اینورترها، ترانسفورماتورها و سایر اجزای معیوب سیستم را به طور چشمگیری شتاب خواهد بخشید [5]. از این‌رو، افزایش طول عمر و راندمان نیروگاه‌های PV همگام با غلبه بر موانع زیست محیطی موجود مورد توجه خواهد بود. لذا، سیاست‌های رشد اقتصادی در منظر توسعه ایمن و پایدار با محوریت احیای حیات طبیعی و بهبود ثبات ژئوپلیتیکی به کانون تمرکز جوامع بدل گشته است. برای اعمال این سیاست‌ها، تحلیل عمیق اراضی با در نظر گرفتن طیف وسیعی از جنبه‌های مختلف جهت تجلی منابع انرژی تجدیدپذیر ضروری است. انجام این تحلیل‌ها به مدد تکنولوژی‌های پیشرفته و نوظهور امروزی نظیر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی³ و زیرساخت‌های سنجش از دور به ویژه برای پشتیبانی و تکوین مزارع سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر⁴، تسهیل یافته است.

در این زمینه سیستم‌های انرژی خورشیدی به دلیل در دسترس بودن و خروجی بالقوه بالا، با پتانسیل‌های قابل توجهی بسیار مهم ارزیابی شده است [6-8]. پیش‌بینی می‌شود که تولید انرژی خورشیدی در آینده نزدیک به‌ویژه در مناطق صنعتی توسعه قابل توجهی داشته باشد [9]. طبق مطالعات صورت

⁵ Analytic Hierarchy Process (AHP)

⁶ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

⁷ Erzurum

⁸ Choosing By Advantages (CBA)

⁹ Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

¹ Domínguez

² Photovoltaic (PV)

³ Geographic Information System (GIS)

⁴ Renewable Energy Systems (RES)

روشی توانمند و منعطف است که به وسیله آن می‌توان مسائل پیچیده را در سطوح مختلف حل کرد. روش یادشده، در بسیاری از زمینه‌ها برای تعریف و تجزیه و تحلیل ترجیحات کاربر در طیف گسترده‌ای از حوزه‌های کاربردی استفاده شده است.

الف- تشخیص مسئله موجود و ایجاد سلسله مراتب. برای اجرای یک تحلیل سلسله مراتبی با n معیار مراحل زیر طی می‌شود:
ب- تشکیل ماتریس ترجیحی مقایسه‌ای طبق منبع [26] و به شکل جدول 1.

جدول 1 تفسیر ارزش امتیاز اولویت

درجه ارجحیت	ارزش معیار \bar{a}_{ij} نسبت به معیار j
ارجحیت یکسان	1
ارجحیت کم	3
ارجحیت متوسط	5
ارجحیت زیاد	7
ارجحیت خیلی زیاد	9
ارجحیت‌های نسبی	8, 6, 4, 2

پ- محاسبه بردار وزنی نرمال شده با استفاده از رابطه (1).

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

این کار با تقسیم هر درایه (a_{ij}) بر جمع درایه‌های هر ستون و به منظور بی‌مقیاس سازی معیارهای موجود صورت می‌گیرد.

ت- محاسبه میانگین سطری برای دستیابی به وزن نسبی معیارها با استفاده از رابطه (2).

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij}}{n} \quad (2)$$

ث- اعمال معادله (3) برای هر پیکسل از لایه منطقه به منظور دستیابی به نقشه مناطق مناسب.

$$\text{suitable areas} = \sum_{i=1}^n r * w_i * x_i, \quad r \in \{0, 1\} \quad (3)$$

که در آن، x_i جمع ارزش هر معیار و w_i وزن هر معیار است. r یک مقیاس باینری است که برای مناطق مناسب «یک» و برای مناطق نامناسب، مقدار «صفر» را به خود اختصاص می‌دهد.

ج- برآورد نرخ ناسازگاری (CR) از مقادیر بردار نرمال شده از طریق رابطه (4).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

CI نشانگر شاخص سازگاری بوده و با استفاده از رابطه (5) به دست می‌آید.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

که در آن، λ_{max} حداکثر مقدار ویژه است.

RI شاخص سازگاری تصادفی است و مقدار آن به تعداد معیارها بستگی دارد. مقادیر RI به ازای n های مختلف در جدول 2 آورده شده است.

کارایی بالای فتوولتائیک شناسایی شده و با به کارگیری تحلیل سلسله مراتبی گروهی، وزن‌دهی معیارها و با استفاده از تاپسیس گروهی رتبه‌بندی مکان‌ها، صورت گرفت [20]. در مرجع [21] پس از معرفی اعداد فازی شهودی مثلثی، از اپراتور TIFGOWA برای تعیین وزن معیارها و از روش پرومته¹ فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شد. در پژوهشی در رابطه با پروژه‌های فتوولتائیک منطقه خدماتی بزرگراه، با کمک تکنیک دیمتل² وزن شاخص‌ها تعیین شده و با روش تودیم³ گزینه‌های پیش‌رو رتبه‌بندی شدند [22]. علاوه بر این، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی همراه با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره توسط بسیاری از محققان برای ارزیابی مکان‌های مناسب مزارع فتوولتائیک استفاده شد. در [9] پس از وزن‌دهی معیارها با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با کمک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی نواحی بهینه استقرار پنل‌های فتوولتائی تعیین شد. در مطالعه [23] جهت یافتن مناسب‌ترین مناطق سایت فتوولتائیک از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. این پژوهش با نگرش به حداکثر، حداقل و میانگین تابش افقی سالانه و شاخص پاک‌ی هوا دنبال شد. در نهایت بخش‌های مرکز و جنوب ایران مناسب‌ترین نواحی برای میزبانی از سیستم‌های فتوولتائیک معرفی شدند.

طبق ملاحظات بیان شده، مسئله تعیین مکان سایت فتوولتائیک، نیازمند برقراری تعادل بین عوامل موثر بسیاری از جمله محیط زیست، دسترسی به زیرساخت‌ها، جامعه، اقلیم و جغرافیا است. ادبیات موجود بیشتر عواملی نظیر دسترسی، زیست محیطی و تکنولوژیکی را در نظر می‌گیرد، اما عوامل اجتماعی مانند تراکم جمعیت به ندرت ذکر می‌شود [24-25 و 9]. در حالی که رشد سریع جمعیت، توجه تصمیم‌گیرندگان را به سمت عوامل مرتبط با نفوذ اجتماعی و رفتار انسانی معطوف داشته است. بنابراین، لزوم ارائه یک مدل انتخاب سایت جامع و مفهومی که الزامات انتخاب مکان را تماماً برآورده کند، محسوس است. در اینجا به منظور رفع کاستی موجود، یک مدل جدید و منعطف انتخاب مکان بر اساس پیشینه تحقیقاتی جامع و با در نظر گرفتن عوامل اکولوژیکی، تکنولوژیکی، دسترسی و اجتماعی ارائه شده است.

سهم اصلی مقاله پیش‌رو، ارائه یک طرح جامع و روشمند برای انتخاب سایت نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن چهار عامل بنیادی و زیرعامل‌های مربوطه است. طرح پیشنهادی، به منظور حمایت از انتخاب مکان نیروگاه‌های خورشیدی، قابلیت اعمال در منطقه را داراست. هدف این مقاله در درجه اول ارائه یک طرح ارزشمند و معنادار برای انتخاب مکان سایت‌های فتوولتائیک به منظور ارائه پشتیبانی فنی جهت تحقق انرژی خورشیدی بهینه است.

2- روش پیشنهادی

2-1- روش تصمیم‌گیری چند معیاره

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ابزارهایی هستند که امکان انتخاب بهترین معیار از بین معیارهای چندگانه و گاه متضاد را فراهم می‌کنند. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط پروفیسور توماس ال. ساعتی⁴ در سال 1977 توسعه یافت که برای دستیابی به هدف موجود، از ماتریس مقایسات زوجی استفاده می‌کند [26]. این تکنیک،

⁴ Thomas L. Saati

¹ Preference ranking organization method for enrichment evaluation (PROMETHEE)

² Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)

³ Portuguese acronym for Interactive Multi-Criteria Decision Making (TODIM)

اینورها و ترانسفورماتورها را تحت تأثیر قرار می دهد [31]. از این رو، دمای پایین تر اجازه تولید الکتریسیته بیشتری به سلول های خورشیدی می دهد. رطوبت نسبی (C3): رطوبت محیط تا حدودی بر بازده انرژی و میزان تخریب پنل های فتوولتائیک در دراز مدت تأثیر دارد. رطوبت بالا، سبب جذب امواج تابشی با طول موج کوتاه توسط بخار آب موجود در اتمسفر می شود که پتانسیل کمتری را برای بهره مندی از انرژی خورشیدی ایجاد می کند؛ همچنین رطوبت، با فراهم کردن بستر تشکیل شبنم و تجمع گردوغبار بر سطح پنل خورشیدی، توان خروجی کمتری را به وجود می آورد [32-33].

میزان بارندگی (C4): قطرات باران به دلیل وزن خود تحت تأثیر نیروی گرانش به زمین سقوط می کنند. این سقوط می تواند منجر به تأثیرات فیزیکی مستقیمی بر روی محیط شود. همچنین باران با کاهش شدت تابش خورشیدی قادر به کاهش کارایی پنل های PV است. ذرات معلق موجود در اتمسفر، قبل از تشکیل قطرات باران از طریق جذب تابش های کوتاه و تبدیل آنها به حرارت، به عنوان هسته ای برای ایجاد قطرات باران عمل کرده و به صورت غیرمستقیم فرایند ایجاد قطرات باران را تسریع می کنند. از سویی، بارش اثرات نامطلوب تکنولوژیکی نظیر آلودگی سطح سلول ها و بروز نقص فنی را به همراه دارد [34]. شیب زمین (C5): شیب زمین یک پارامتر تکنولوژیکی در مطالعات تعیین محل احداث نیروگاه است که به طور چشمگیری بر پایداری محل احداث نیروگاه اثرگذار است. شیب زمین تأثیری مستقیم بر روی هزینه عمرانی مزارع خورشیدی دارد. شیب زیاد، علاوه بر افزایش هزینه تسطیح زمین و ساخت سازه های PV، احتمال سایه آرایه PV را افزایش می دهد. در شرایط سایه، نور مستقیم خورشید مسدود می شود و از این رو تولید برق خروجی از آرایه PV کاهش می یابد [35]. در این زمینه، هیچ قانونی مبنی بر میزان شیب مناسب به منظور احداث نیروگاه PV وجود ندارد. در این مطالعه، مناطق با شیب بیش از 5 درجه حذف شدند. از سوی دیگر، مناطق با شیب کمتر ارجحیت دارند.

جنبه های زمین (C6): بهترین جهت برای ایجاد نیروگاه PV، جهتی است که بیشترین میزان تابش خورشیدی را داشته باشد؛ این جهت، در مناطق مختلف با توجه به تنوع عرض جغرافیایی متفاوت است. در منطقه مورد مطالعه که در نیمکره شمالی واقع شده است، یک جهت رو به جنوب ایده آل ترین جهت خواهد بود. برای تهیه نقشه جنبه های زمین، نقشه حاوی اطلاعات ارتفاع در قالب داده های خطی (خطوط کانتور) از داده های برداری در پایگاه سیستم های اطلاعات جغرافیایی به دست آمد و از این داده ها مدل رقومی ارتفاعی تهیه شد. سپس نقشه جهت زمین با استفاده از تحلیل مدل سازی فضایی سه بعدی سیستم های اطلاعات جغرافیایی به دست آمد.

مجاورت با خطوط انتقال برق (C7): در این مسئله یکی از چالش های مهم، نزدیکی به خطوط انتقال برق است. میزان تلفات شبکه توزیع برق، با طول و نوع خطوط انتقال نیرو، رابطه مستقیم دارد. با افزایش فاصله بین نیروگاه فتوولتائیک و خطوط انتقال، تلفات انرژی افزایش میابد که در نهایت درآمد سالانه پروژه را کاهش می دهد. همچنین، افزایش فاصله از خطوط انتقال برق نیازمند سرمایه گذاری بیشتر برای ایجاد خطوط انتقال جدید است. در این مطالعه فاصله بهینه از خطوط انتقال بین 0 تا 50 کیلومتر انتخاب شد [36]. مجاورت با جاده های اصلی (C8): احداث نیروگاه PV مستلزم حمل و نقل

اگر $CR \leq 0.10$ باشد، نرخ سازگاری رضایت بخش در نظر گرفته می شود. در غیر این صورت، مقایسات زوجی در تضاد با هم هستند و باید اصلاح شوند [26].

جدول 2 شاخص سازگاری تصادفی برای مقادیر مختلف معیارها

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0.6	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5

3- مطالعه موردی

3-1- منطقه مطالعه

این مطالعه، در استان آذربایجان غربی واقع در شمال غرب ایران با مساحت 37437 km^2 انجام شد. استان آذربایجان غربی بین عرض شمالی 35 درجه و 58 دقیقه تا 39 درجه و 46 دقیقه (از خط استوا) و طول شرقی 44 درجه و 3 دقیقه تا 47 درجه و 23 دقیقه (از نصف النهار گرینویچ) قرار دارد. این منطقه به دلیل اقلیم سرد و کوهستانی، زمستان های به شدت سرد و تابستان های نسبتاً گرمی دارد. حداکثر ساعات تابش خورشید¹ در این منطقه، در سال 2016 بیش از 5.2 kWh/m^2 تعیین شده است. موقعیت جغرافیایی، مناطق عظیم بلااستفاده و میزان تابش خورشیدی روزانه، همه عواملی هستند که پتانسیل عمیقی برای بهره برداری از انرژی خورشیدی در این استان، می آفرینند. دفتر پتانسیل سنجی و ارزیابی منابع سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی ایران (ساتبا)، پتانسیل استان آذربایجان غربی در تولید برق از انرژی های تجدیدپذیر را بررسی کرده است. بر اساس این بررسی، آذربایجان غربی دارای پتانسیل حداقلی 527.95 مگاوات برای تولید برق از محل انرژی خورشیدی می باشد.

3-2- عوامل موثر بر انتخاب سایت نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی

تابش خورشیدی (C1): تابش خورشیدی، میزان قدرت تابش الکترومغناطیسی خورشید بر واحد سطح بوده و یکی از ضروری ترین معیارهای انتخاب مکان سایت های فتوولتائیک به شمار می رود؛ زیرا تعیین کننده میزان برق خروجی مزرعه خورشیدی است [27]. با افزایش مقدار تابش خورشیدی، ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و در نتیجه حداکثر توان پنل فتوولتائیک افزایش می یابد [28]. از این رو مقدار تابش افقی جهانی در سال، به طور مستقیم با کارایی نیروگاه های خورشیدی در ارتباط است.

میانگین دمای سالانه (C2): بهره وری ماژول های خورشیدی تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط دمایی محیط قرار دارد. کارایی پنل های خورشیدی تا دمای 65 درجه سانتی گراد تأیید شده است؛ با این حال در دمای 15 تا 35 درجه سانتی گراد سلول های خورشیدی حداکثر بازده را برداشت می کنند [29]. با افزایش دما، پنل، ولتاژ و توان کمتری تولید می کند؛ در نتیجه کارایی کمتری دارد، به گونه ای که هر یک درجه افزایش دما 0.4-0.5 درصد از رادمان تبدیل نیروی سلول آ می کاهد. به گونه ای که با آزمایش سلول فتوولتائیک BP Saturn، کاهش راندمان از 15.8٪ در 25°C به 12٪ در 80°C به اثبات رسیده است [30]. علاوه بر این، دمای بالا عملکرد سایر اجزای سیستم فتوولتائیک، مانند

³ Digital elevation model (DEM)

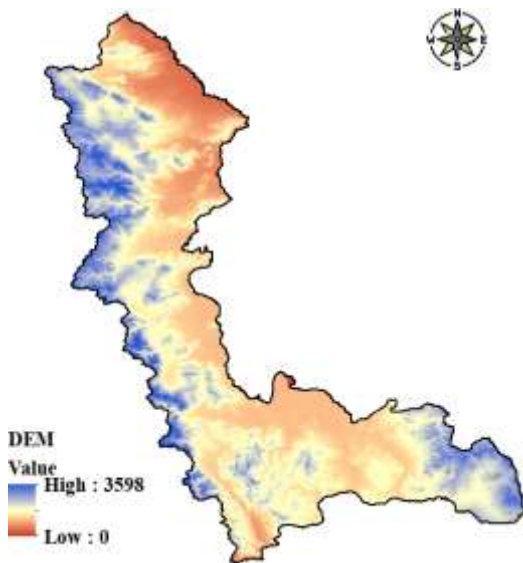
¹ Peak Sun Hours (PSH)

² Power Conversion Efficiency (PCE)



شکل 1 نقشه مناطق حفاظت شده

مناطق شهری و جاده‌های اصلی: به دلیل تراکم بالای جمعیت و ترافیک موجود در نواحی مسکونی و مسائل ایمنی مرتبط، این مناطق یک محدودیت به شمار می‌آیند؛ بنابراین، ایجاد یک حائل اطراف نواحی مسکونی و خطوط ارتباطی، ضروری است. در این مطالعه، فاصله 1000 متری از مناطق حفاظت‌شده، فاصله 1500 متری از مناطق مسکونی و 500 متری از جاده‌ها، فاصله بهینه شناخته شده است. حائل‌های لازم، اطراف هر یک از محدودیت‌ها، ایجاد می‌شود. سپس لایه‌های محدودیت، در یکدیگر ادغام می‌شوند. حال به مناطق بدون محدودیت که امکان بررسی برای اجرای پروژه را دارند، ارزش «یک» و به مناطق دارای محدودیت که امکان توسعه پروژه وجود ندارد، ارزش «صفر» تخصیص داده می‌شود، تا نقشه باینری محدودیت‌ها حاصل شود. با تبدیل نقشه محدودیت‌ها به نقشه باینری، امکان ضرب این نقشه، در نقشه معیارها فراهم خواهد آمد. در ادامه نداشت هر یک از معیارهای مطرح شده، آورده شده است:



شکل 2 مدل رقمی ارتفاع (DEM)

تجهیزات بزرگ و شکننده مانند مازول‌های PV، سازه‌ها، کانکتور و اینورتر است. در مرحله بهره‌برداری نیز دسترسی به محل پروژه به‌منظور مسائل پشتیبانی، تعمیرات و نگهداری امری ضروری است. بنابراین، مکان انتخاب شده باید کمترین فاصله ممکن تا جاده‌های اصلی را داشته باشد تا از ایجاد هزینه توسعه مشارع جلوگیری به عمل آید. در نظر گرفتن این عامل در زمان انتخاب مکان، برای اجرای نیروگاه یک الزام مهم است و ممکن است هزینه کلی پروژه را تحت‌الشعاع قرار دهد.

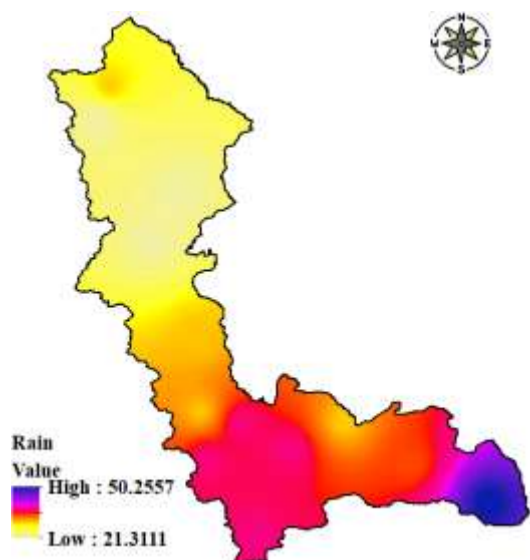
مجاورت با مناطق مسکونی (C9): مناطق مسکونی به علت دربرداشتن مراکز پرجمعیت می‌توانند منجر به کاهش تلفات انتقال برق و هزینه شوند. به دلیل صرفه‌جویی در هزینه‌ها، سودآوری نیروگاه خورشیدی و نرخ بازگشت سرمایه در این مناطق افزایش پیدا می‌کند. با این حال، به جهت مسائل ایمنی و ترافیکی و استلزام محیط وسیع، ایجاد مزارع فتوولتائیک در داخل مناطق شهری توصیه نمی‌شود. در عین حال، نیروگاه‌های خورشیدی نزدیک به شهرها خواهند بود تا اطمینان حاصل شود که نیازهای انرژی منطقه و همچنین هزینه‌ها برآورده می‌شود [27]. در این مطالعه، یک حائل 1.5 کیلومتری از مناطق مسکونی و فاصله حداکثری 50 کیلومتری در نظر گرفته شده است، که در این بازه نیز فواصل کمتر ارجحیت بیشتری می‌یابند. از فاصله اقلیدسی برای محاسبه نزدیک‌ترین سایت مطلوب، بر اساس فاصله خط مستقیم استفاده می‌شود.

3-3- محدودیت‌های شناسایی شده در منطقه

شیب‌های بیشتر از 5 درجه: شیب زمین بر میزان تشعشعات ورودی آرایه‌های فتوولتائیک اثرگذار است؛ هر چه شیب مسطح‌تر باشد، میزان تابش خورشیدی دریافتی افزایش پیدا می‌کند. شیب منطقه‌ای که در آن تأسیسات فتوولتائیک احداث می‌شود، با توجه به تأثیر آن بر هزینه‌های مربوط به آماده‌سازی و برنامه‌ریزی زمین، تناسب مکان را تعیین می‌کند. مناطق با شیب بالای 5 درجه به علت نداشتن توجه اقتصادی، به‌عنوان محدودیت تشخیص داده شده و از منطقه مطالعاتی حذف شده‌اند.

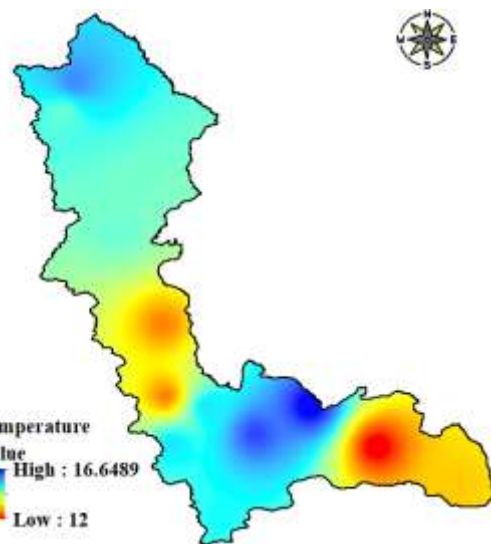
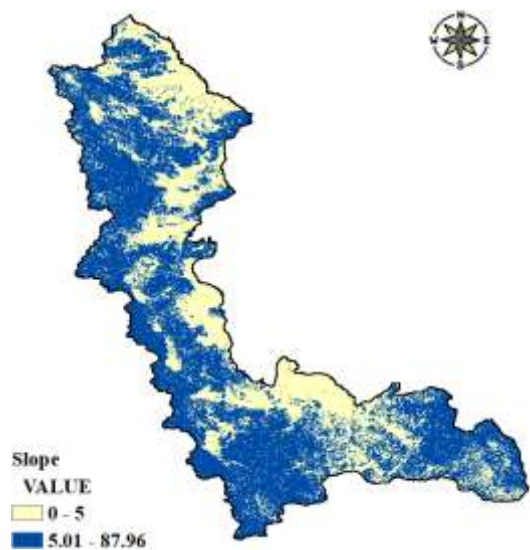
مناطق حفاظت شده: منطقه حفاظت شده بخشی از بیوم بوده که کلیه عناصر آن اعم از زنده و غیرزنده با اهداف خاص در سطوح حفاظتی مختلف مورد حفاظت قرار می‌گیرند. شکل 1 این مناطق را نشان می‌دهد.

شکل 5 میانگین رطوبت سالانه (C3)



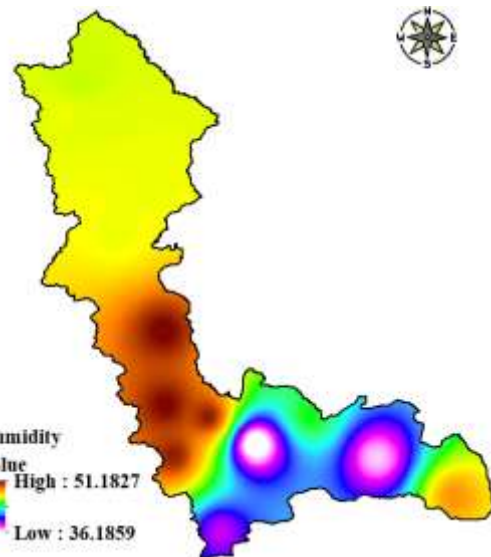
شکل 3 نقشه تابشی خورشید (C1)

شکل 6 میانگین بارش سالانه (C4)



شکل 4 میانگین دمای سالانه (C2)

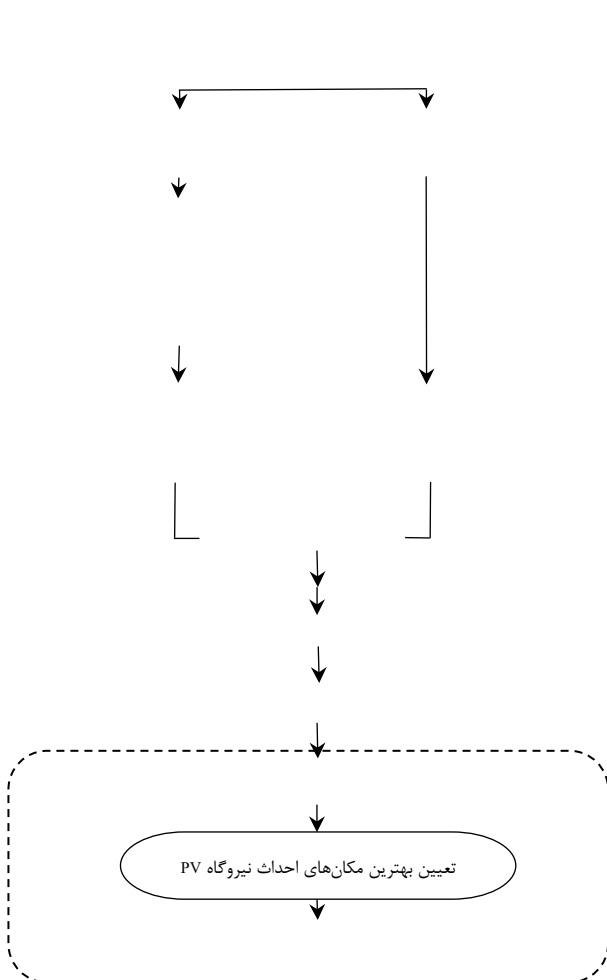
شکل 7 نقشه شیب (C5)



شکل 10 توزیع جاده‌های اصلی (C8)



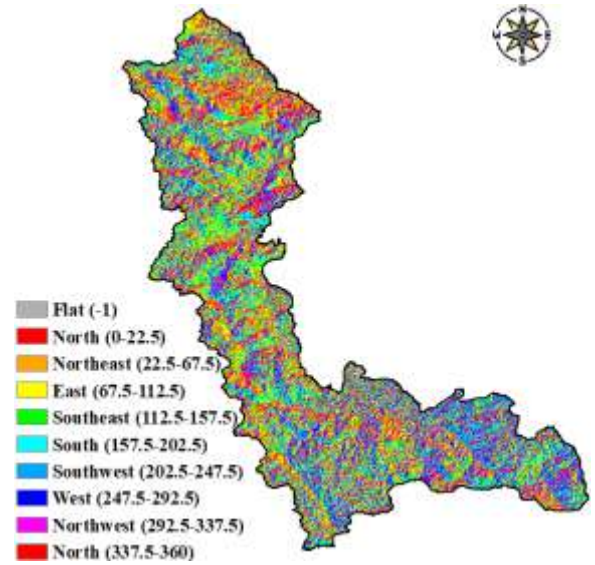
شکل 12 توزیع مناطق مسکونی (C9)



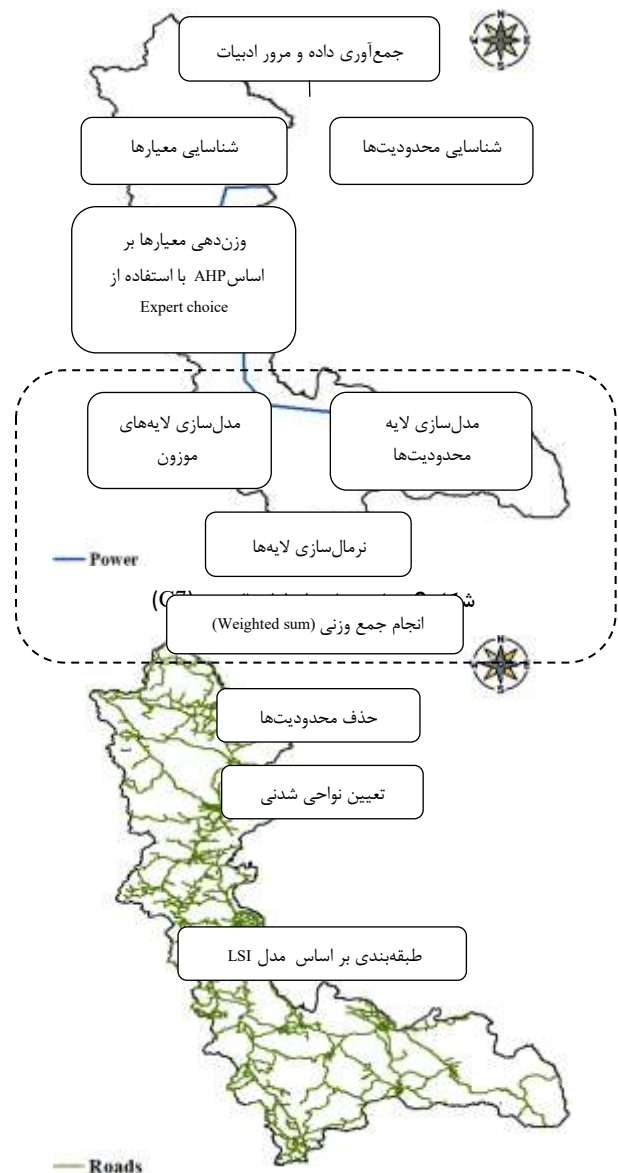
شکل 12 فلوجارت مورد استفاده در مقاله

3-4- طراحی پایگاه داده فضایی

در این مطالعه، 9 لایه معیار برای بررسی به دست آمد. لایه‌های معیار، در شکل 3 تا 11 نشان داده شده است. این داده‌ها که در سه قالب برداری مختلف،



شکل 8 جنبه‌های زمین (C6)



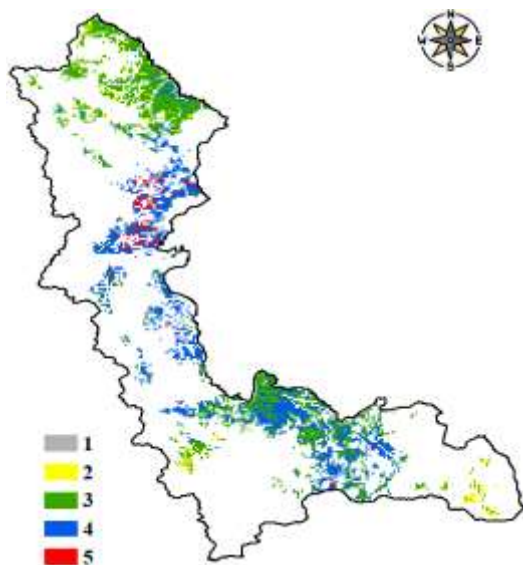
شامل می‌شود. بر اساس داده‌های حاصل، منطقه مورد مطالعه از پتانسیل امیدوارکننده‌ای جهت بهره‌برداری از انرژی PV برخوردار است. بر اساس تحلیل نتایج، اراضی مناسب در مجاورت با جاده‌های اصلی، خطوط انتقال و مناطق مسکونی قرار دارند؛ بنابراین، پتانسیل زیادی برای داشتن سایت‌های مناسب بیشتر، با بهبود کارایی خطوط برق و شبکه‌های اصلی جاده‌ای وجود دارد. با این حال، هیچ سایتی امتیاز کامل ($LSI = 10$) به دست نیاورده است که نشان‌دهنده نقص برخی معیارها، در هر منطقه است.

جدول 3 ماتریس مقایسات زوجی معیارها

مقادیر مقیاس	شاخص تناسب زمین (LSI)
0-4	1
4-5	2
5-6	3
6-7	4
7-10	5

4-2- تحلیل نتایج مدل‌سازی

روش ارائه شده، در منطقه مورد مطالعه در مقیاس کاربردی مورد بررسی قرار گرفت. نقشه نهایی مبتنی بر تحلیل سلسله مراتبی - سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، در شکل 14 ارائه شده است.



شکل 14 نتایج شاخص تناسب با استفاده از وزن‌های تحلیل سلسله مراتبی

4-3- تجزیه و تحلیل میزان حساسیت

به منظور بررسی سیاست‌های جایگزین، دو تئوری دیگر، شامل تئوری وزن برابر و وزن غیر اکولوژیکی بیشتر، ارائه گردید؛ سپس به تفکیک، تأثیر هر تئوری بر

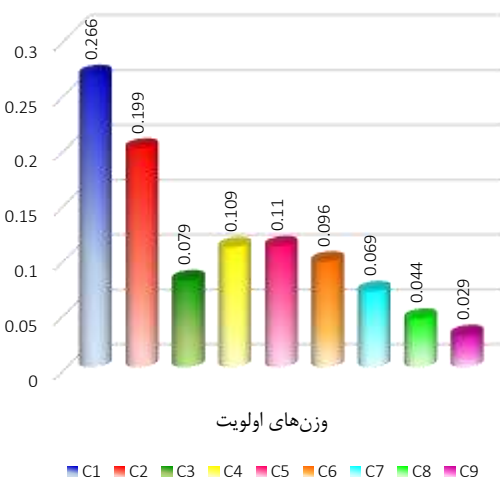
شامل نقطه‌ای، خطی و چندضلعی بودند، پس از مرتب‌سازی، برای ایجاد پایگاه داده جغرافیایی یکپارچه به سیستم مختصات WGS 1984 / UTM Zone 39 N تبدیل شدند. سپس داده‌هایی که در لایه‌های جداگانه در پایگاه داده نگهداری می‌شدند، برای هم‌مقیاس‌سازی به فرمت رستری تبدیل شدند تا توسط فرآیند تحلیل سلسله مراتبی تجزیه و تحلیل شوند.

4-4- مراحل انجام مدل‌سازی و نتایج

مراحل مدل‌سازی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM - GIS) به تفصیل در شکل 12 نشان داده شده است.

4-1- مدل‌سازی همپوشانی وزنی

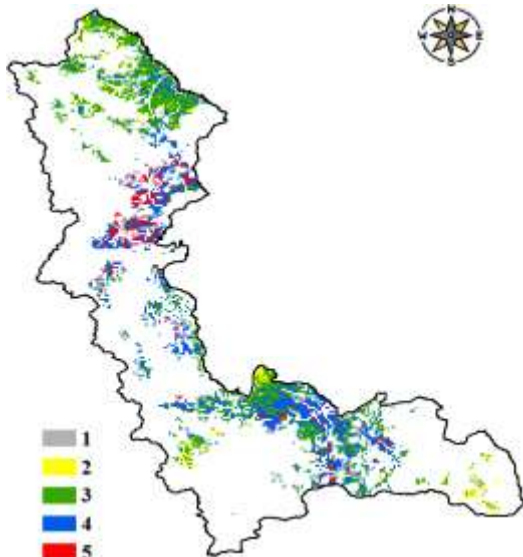
به جهت ارزیابی متقارن معیارها، از نظرات کارشناسان این حوزه و مطالعات مشابه در تعیین وزن و سطوح اولویت استفاده شد. سپس این معیارها تحت یک ماتریس مقایسه زوجی قرار گرفتند که در جدول 3 ارائه شده است. برای اطمینان از صحت قضاوت‌ها، نرخ سازگاری (CR) برابر با مقدار 0.07 محاسبه شد. با توجه به اینکه $CR < 0.1$ به دست آمد، مشخص می‌شود که وزن عامل با CR سازگار است. وزن‌های عامل حاصل از ماتریس مقایسه زوجی در شکل 13 نشان داده شده است. با توجه به اینکه داده‌ها در مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری شده‌اند برای تحلیل‌های چندمعیاری فضایی باید لایه‌های تولید شده نرمال‌سازی گردند. در گام بعد، هر یک از لایه‌های نرمال موجود بر اساس وزن متناظر خود ارزش‌گذاری شده و پس از جمع وزنی¹، ارزش هر پیکسل بر اساس وزن‌های تحلیل سلسله مراتبی مشخص می‌شود.



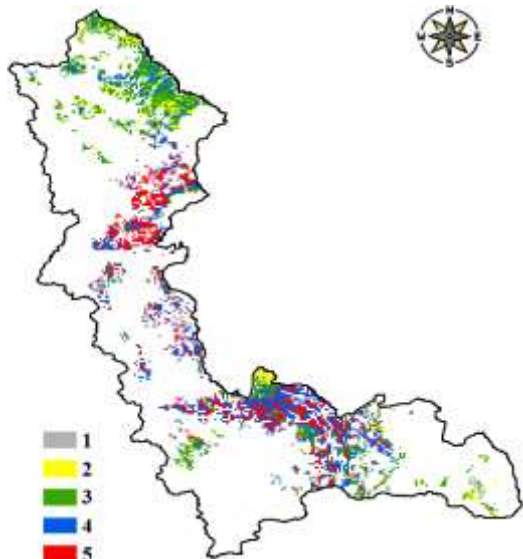
شکل 13 نمودار توزیع وزن‌ها بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی

تجزیه و تحلیل شاخص تناسب زمین مبتنی بر GIS - AHP، حاکی از آن است که بخش‌هایی از استان، با مساحت تقریبی 8186 هزار کیلومتر مربع (22.08٪ از کل پهنه مطالعاتی) برای میزبانی از مزارع PV آماده بوده و به هیچ منطقه غیرعملی تعلق ندارد. از این میزان، 10.12٪ از پتانسیل بیش از سطح متوسط ($LSI > 3$) برخوردارند که مقداری برابر با 45.85٪ از مناطق مطلوب را

¹ Weighted sum



شکل 15 نتایج شاخص تناسب با استفاده از وزن‌های برابر



شکل 16 نتایج شاخص تناسب با استفاده از وزن غیر اکولوژیکی بیشتر

شاخص تناسب زمین مورد ارزیابی قرار گرفت. مقصود اصلی بیان تئوری وزن‌های برابر، اجتناب از ریسک با نادیده گرفتن ارجحیت نسبی هر معیار به سایرین بود. بدین منظور حداکثر جمع وزن‌ها (مقدار یک) به تعداد کل معیارها تقسیم و تحلیل حساسیت مربوطه انجام شد. این کار با تخصیص وزن 0.111٪ به هر زیر معیار در هر دو دسته، صورت پذیرفت. با مقایسه نتایج تئوری یاد شده با تئوری پایه، درک بهتری از میزان تأثیر معیارها بر لایه تناسب حاصل و اهمیت وزن هر معیار پدید می‌آید. شکل 15 نشان‌دهنده شاخص تناسب زمین مربوط به تئوری وزن‌های برابر است. در مقایسه با روش تحلیل سلسله مراتبی، مساحت مناطق مناسب (مناطق دارای $LSI > 3$) 335.4 کیلومتر مربع (بیش از 4٪ از نواحی فاقد محدودیت) افزایش یافته است؛ این تغییر، اساساً به معیارهای تصمیم‌گیری مربوط می‌شود که وزن بیشتری به عوامل دسترسی نظیر معیار نزدیکی به خطوط انتقال، جاده‌های اصلی، همچنین مناطق مسکونی تخصیص داده شده است. از این رو، با بهبود عوامل شناسایی شده ضمن سرمایه‌گذاری‌های بیشتر، می‌توان به مناطق مناسب بیشتری، خصوصاً در نواحی غربی دست یافت.

با استناد به نتایج حاصل، تخصیص وزن‌های بالاتر به معیارهای غیراکولوژیکی (دسترسی و توپولوژی)، می‌تواند گزینه مناسبی باشد. طبق نتایج به‌دست آمده، تخصیص وزن‌های بیشتر به عوامل غیراکولوژیکی، مناسب‌ترین نواحی را در مقایسه با تئوری تحلیل سلسله مراتبی، بیش از 7 برابر، و در مقایسه با تئوری وزن‌های برابر نزدیک به 3 برابر، افزایش می‌دهد.

جدول 4 ماتریس مقایسات زوجی معیارها

معیار	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	1	2	2	2	5	3	4	6	7
C2	0.5	1	2	2	4	2	3	6	5
C3	0.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	1	2
C4	0.5	0.5	2	1	2	1.5	1.5	1	2
C5	0.2	0.25	1	0.5	1	2	2	6	5
C6	0.333	0.5	1	0.667	0.5	1	2	4	5
C7	0.25	0.333	0.667	0.667	0.5	0.5	1	3	4
C8	0.167	0.167	1	1	0.167	0.25	0.333	1	2
C9	0.143	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.25	0.5	1

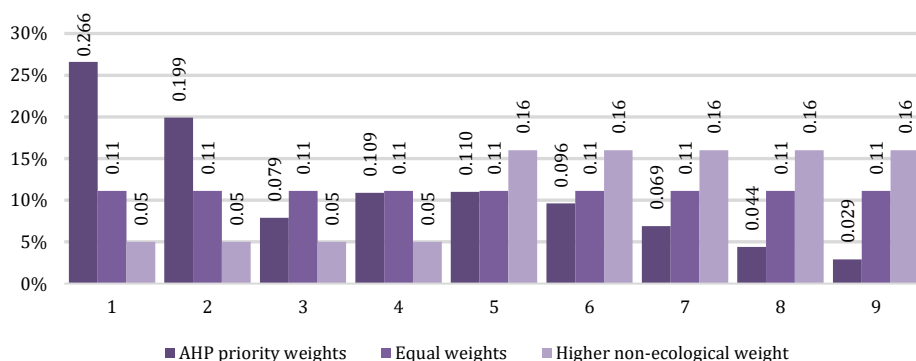
اکولوژی، توپولوژی و دسترسی نامناسب‌تر، از تناسب کمتری برای هدف مطالعه حاضر برخوردارند. همچنین بخش وسیعی از غرب استان به علت واقع شدن در

بر اساس نتایج، نوار شرقی به دلیل داشتن زیرساخت‌های لازم، تراکم بالایی از مناسب‌ترین مناطق LSI را نشان می‌دهد. مناطق غرب استان، به دلیل شرایط

این پژوهش با توسعه لایه‌های معیار از جمله دمای هوا، رطوبت نسبی، میزان بارندگی و تابش خورشیدی و با استفاده از داده‌های واقعی، رویکردی برای انتخاب بهترین سایت نیروگاه PV در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد؛ که می‌تواند باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها شده و نیز دریچه‌ای به توسعه زیرساخت‌های آینده بگشاید. ادغام تکنیک‌های MCDM با GIS یک تکنیک بسیار مفید برای بهبود لایه‌های معیار و گنجاندن وزن معیارها می‌باشد. همچنین، ارائه نتایج جامع، با بررسی پروژه از نظر اکولوژیکی، توپولوژی، دسترسی و اجتماعی امکان‌پذیرتر می‌شود.

مزیت اصلی این پژوهش، تاکید بر به‌کارگیری زیرساخت‌ها و منابع موجود برای تأمین نیروی الکتریکی موردنیاز شهروندان در منطقه مطالعاتی است. نتایج، بر مناسب بودن سایت PV در استان آذربایجان غربی با استفاده از روش‌های MCDM تاکید می‌کنند. نتایج حاصل را می‌توان برای شناسایی مناطق بالقوه برای نصب نیروگاه PV و همچنین پشتیبانی از توسعه هم‌افزایی تولید و شبکه برق منطقه مورد استفاده قرار داد.

در تحقیقات آینده، می‌توان با گنجاندن سایر معیارهای تصمیم‌گیری نظیر رشد جمعیت، توزیع پوشش گیاهی، و معیارهای اقتصادی مدلی کامل ارائه کرد. همچنین می‌توان به‌صورت جزئی، هر یک از مناطق را مورد بررسی قرار داد. علاوه بر این، استفاده از سامانه‌های هیبریدی متشکل از چند منبع تجدیدپذیر، نظیر نیروگاه‌های خورشیدی - بادی، خورشیدی - زیست توده و نیروگاه خورشیدی کاملاً تجدیدپذیر می‌تواند موضوع کار قرار گیرد.



شکل 17 وزن معیارهای مورد استفاده در هر سه تئوری

نوار ارتفاعی و داشتن شیب بالا، از توجیه اقتصادی برخوردار نبود. این نواحی تحت عنوان نواحی نامناسب شناسایی و از نگاه تئوری‌های مطرح شده غربال شدند. در نهایت، نتایج تئوری‌های مختلف حساسیت به وزن معیارها را ثابت کرده و توزیع تناسب زمین را ارائه می‌دهد. جدول 5 نتایج نهایی به دست آمده با تغییر وزن معیارها و شکل 17 توزیع وزن هر تئوری را نشان می‌دهد؛ این نتایج اثبات می‌کنند که همه عوامل اکولوژیکی و غیر اکولوژیکی (دسترسی و توپولوژی) در ارزیابی منطقه مورد مطالعه موثر هستند.

جدول 5 نتایج نهایی به دست آمده با تغییر وزن معیارها

تئوری	وزن‌ها				
	توزیع تناسب زمین (%)				
	1	2	3	4	5
تحلیل سلسله مراتبی	0	1.3	11	9.4	0.8
وزن‌های برابر	0.1	1.4	9.6	9.1	1.9
وزن غیر اکولوژیکی بیشتر	0.3	2.1	6.2	7.9	5.5

5- نتیجه‌گیری

منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، به دلیل پایداری، ایمنی، هزینه و آثار زیست محیطی کمتر، یکی از بهترین منابع تولید برق به شمار می‌روند.

[7] P. Redweik, C. Catita, M. Brito, Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape, *Solar Energy*, Vol. 97, pp. 332-341, 2013.

[8] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, AA. Adedolun, KH. Kim, Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 894-900, 2018.

[9] HE. Colak, T. Memisoglu, Y. Gercek, Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable energy*, Vol. 149, pp. 565-576, 2020.

[10] O. Nematollahi, KC. Kim, A feasibility study of solar energy in South Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, pp. 566-579, 2017.

[11] M. Akçay, A. Mehmet, Optimal site selection for a solar power plant in Turkey using a hybrid AHP-TOPSIS method, *Celal Bayar University Journal of Science*, Vol. 14, No. 4, pp. 413-420, 2018.

[12] MA. Nazari, A. Aslani, R. Ghasempour, MA Nazari, A Aslani, R Ghasempour, Analysis of solar farm site selection based on TOPSIS approach. *International Journal of Social*

6- مراجع

[1] Key world energy statistics (IEA), *International Energy Agency*, Washington DC, 2003.

[2] EE. Michaelides, *Energy the environment and sustainability*, 1nd edition, CRC press, 2018.

[3] M. Daroń, M. Wilk, Management of energy sources and the development potential in the energy production sector—A comparison of EU countries, *Energies*, Vol. 14, No. 3, pp. 685, 2021.

[4] M. Sodhi, L. Banaszek, C. Magee, M. Rivero-Hudec, Economic Lifetimes of Solar Panels, *Procedia CIRP*, Vol. 150, pp. 782-787, 2022.

[5] A. Domínguez, R. Geyer, Photovoltaic waste assessment in Mexico, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 127, pp. 29-41, 2017.

[6] EC Kutlu, *Technical potential of rooftop solar photovoltaic for Ankara: A preliminary study*. Master's thesis, Middle East Technical University, turkey, 2020.

- cooling arrangements, *International journal of thermal sciences*, Vol. 50, No. 12, pp. 2514-2521, 2011.
- [31] M. Suri, T. Cebecauer, N. Suriova, B. Schnierer, J. Betak, V. Madlenakova, A. Skoczek, M. Caltik, Solar resource and photovoltaic power potential of Myanmar, *World Bank Group United States of America*, Vol. 1, 2017. <https://policycommons.net/artifacts/1280813/solar-resource-and-photovoltaic-power-potential-of-myanmar/1872855/>
- [32] Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2019). The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman. *Solar Energy*, 187, 30-38.
- [33] Ilse, K., Figgis, B., Khan, M. Z., Naumann, V., & Hagendorf, C. (2018). Dew as a detrimental influencing factor for soiling of PV modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(1), 287-294.
- [34] Simsek, E., Williams, M. J., & Pilon, L. (2021). Effect of dew and rain on photovoltaic solar cell performances. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 222, 110908.
- [35] B. Elboshy, M. Alwetaishi, RMH. Aly, AS. Zalhaf, A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 13, no. 3, 101618, 2022.
- [36] E. Noorollahi, D. Fadai, M. Akbarpour Shirazi, SH. Ghodsipour, Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)—a case study of Iran, *Energies*, Vol. 9, No. 8, pp. 643, 2016.
- Ecology and Sustainable Development (IJESD)*, Vol. 9, No. 1, pp. 12-25, 2018.
- [15] JM. Sánchez-Lozano, MS. García-Cascales, MT. Lamata, Evaluation of suitable locations for the installation of solar thermoelectric power plants, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 87, pp. 343-355, 2015.
- [14] S. Sindhu, V. Nehra, S. Luthra, 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, 2017.
- [15] S. Türk, A. Koç, G. Şahin, Multi-criteria of PV solar site selection problem using GIS-intuitionistic fuzzy based approach in Erzurum province/Turkey, *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, 5034, 2021.
- [16] S. Ozdemir, G. Sahin, Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP, *Measurement*, Vol. 129, pp. 218-226, 2018.
- [17] HH. Goh, C. Li, D. Zhang, W. Dai, CS. Lim, TA. Kurniawan, KC. Goh, Application of choosing by advantages to determine the optimal site for solar power plants, *Scientific Reports*, Vol. 12, 4113, 2022.
- [18] M. Drechsler, J. Egerer, M. Lange, F. Masurowski, J. Meyerhoff, M. Oehlmann, Efficient and equitable spatial allocation of renewable power plants at the country scale, *Nature Energy*, Vol. 2, No. 9, pp. 1-9, 2017.
- [19] SN. Shorabeh, NN. Samany, F. Minaei, HK. Firozjaei, M. Homaei, AD. Bolorani, A decision model based on decision tree and particle swarm optimization algorithms to identify optimal locations for solar power plants construction in Iran, *Renewable Energy*, Vol. 187, pp. 56-67, 2022.
- [20] CN. Wang, TT. Dang, JW. Wang, A combined Data Envelopment Analysis (DEA) and Grey Based Multiple Criteria Decision Making (G-MCDM) for solar PV power plants site selection: A case study in Vietnam, *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 1124-1142, 2022.
- [21] Y. Wu, B. Zhang, C. Wu, T. Zhang, F. Liu, Optimal site selection for parabolic trough concentrating solar power plant using extended PROMETHEE method: A case in China, *Renewable Energy*, Vol. 143, pp. 1910-1927, 2019.
- [22] Y. Wu, C. Wu, J. Zhou, B. Zhang, C. Xu, Y. Yan, F. Liu, A DEMATEL-TODIM based decision framework for PV power generation project in expressway service area under an intuitionistic fuzzy environment, *Journal of cleaner production*, Vol. 247, 119099, 2020.
- [23] P. Alamdari, O. Nematollahi, AA. Alemrajabi, Solar energy potentials in Iran: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 778-788, 2013.
- [24] D. Doljak, G. Stanojević, Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia, *Energy*, Vol. 127, pp. 291-300, 2017.
- [25] M. Zoghi, AH. Ehsani, M. Sadat, M. javad Amiri, S. Karimi, 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, 2017.
- [26] TL. Saaty, The Analytic Hierarchy Process Mcgraw Hill, New York, *Agricultural Economics Review*, Vol. 70, 1980.
- [27] HZ. Al Gami, A. Awasthi, Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia, *Applied energy*, Vol. 206, pp. 1225-1240, 2017
- [28] MN. Islam, MZ. Rahman, SM. Mominuzzaman, The effect of irradiation on different parameters of monocrystalline photovoltaic solar cell, *3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, IEEE, pp. 1-6, 2014.
- [29] M. Deveci, U. Cali, D. Pamucar, Evaluation of criteria for site selection of solar photovoltaic (PV) projects using fuzzy logarithmic additive estimation of weight coefficients, *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 8805-8824, 2021.
- [30] SK. Natarajan, TK. Mallick, M. Katz, S. Weingaertner, Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive