



Development of a sustainability-based decision-making model for the establishment of solar power plants:

A case study in the Yazd-Ardakan plain

Javad Beygi¹ | Akram Bemani^{2✉} | Tahere Ardakani³ | Maryam Moradi⁴

1. Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran. E-mail: j.beygi@ardakan.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran. E-mail: a.bemani@ardakan.ac.ir

3. Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran. E-mail: ardakani@ardakan.ac.ir

4. Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran. E-mail: m.moradi@ardakan.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	This study investigates the optimal site selection for establishing a photovoltaic solar power plant in the Yazd-Ardakan plain. To this end, topographical data including elevation, slope, and slope directions, as well as annual climatic information such as temperature, precipitation, relative humidity, sunshine hours, wind speed, and wind direction, were utilized. These data were collected from four different stations: Aqda, Meybod, Yazd, and Mehriz. Constraint layers, including faults, urban areas, and roads, were also examined in this research. Initially, all relevant layers corresponding to the extracted criteria were prepared and interpolated using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. Subsequently, the data were normalized, and the weights of the parameters were derived through the Analytic Hierarchy Process (AHP) using pairwise comparisons. By integrating the maps, the land suitability degree was assessed. To identify the most effective parameters, sensitivity analysis was performed. The integration process was carried out under two scenarios: one that disregarded constraints and another that considered the study's limitations. The results indicated that when constraints were taken into account, 5.15% of the Yazd-Ardakan plain exhibited moderate suitability, 8% demonstrated good suitability, and 2.8% showed excellent suitability, with these areas primarily located in the eastern and western peripheries of Meybod and Yazd counties. The sensitivity analysis further revealed that changes in the weights of climatic parameters resulted in a 3% increase in poor suitability and a decrease in excellent suitability. These findings underscore the importance of climatic parameters in determining the compatibility of lands for the establishment of solar power plants.
Article history: Received 22 December 2024 Received in revised form 02 March 2025 Accepted 12 March 2025 Published online 01 July 2025	
Keywords: <i>Land suitability, GIS, Solar energy, Site selection, WLC.</i>	

Cite this article: Beygi, J., Bemani, A., Ardakani, T., & Moradi, M. (2025). Development of a sustainability-based decision-making model for the establishment of solar power plants: A case study in the Yazd-Ardakan plain. *Journal of Natural Environment*, 78 (Monitoring and Management of Natural Environmental Pollutants), 267-282. DOI: <https://doi.org/10.22059/jne.2025.389142.2757>



توسعه مدل تصمیم گیری مبتنی بر شاخص های پایداری جهت استقرار نیروگاه های خورشیدی: مطالعه دشت یزد- اردکان

جواد بیگی^۱ | اکرم بمانی^۲ | طاهره اردکانی^۳ | مریم مرادی^۴

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران. رایانامه: j.beygi@ardakan.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران. رایانامه: a.bemani@ardakan.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران. رایانامه: ardakani@ardakan.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران. رایانامه: m.moradi@ardakan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این تحقیق، مکان یابی مناسب برای تأسیس نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک در دشت یزد اردکان مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از داده های توپوگرافی شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب و همچنین اطلاعات آب و هوایی سالانه نظیر دما، بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، سرعت و جهت باد استفاده شده است. این اطلاعات از چهار ایستگاه مختلف شامل عقدا، میبد، یزد و مهریز جمع آوری گردید. لایه های محدودیت مانند گسل ها، مناطق شهری و جاده ها نیز در این تحقیق بررسی شده اند. ابتدا تمامی لایه های مربوط به معیارهای استخراج شده تهیه و با استفاده از روش وزن دهی معکوس فاصله، درون یابی شدند. سپس داده ها نرمال سازی شدند و وزن های مربوط به پارامترها از طریق روش تحلیل سلسله مراتبی با رویکرد مقایسات زوجی استخراج گردید. با تلفیق نقشه ها، درجه تناسب اراضی به دست آمد. برای استخراج موثرترین پارامترها، آنالیز حساسیت انجام شد. فرآیند تلفیق با دو سناریو، یکی بدون در نظر گرفتن و دیگری با در نظر گرفتن محدودیت های مطالعه مورد نظر، انجام گرفت. نتایج نشان داد که با لحاظ کردن محدودیت ها، ۵/۱۵ درصد از دشت یزد اردکان دارای تناسب متوسط، ۸ درصد دارای تناسب خوب و ۲/۸ درصد دارای تناسب عالی هستند که این نواحی بیشتر در مناطق حاشیه ای شرقی و غربی شهرستان های میبد و یزد واقع شده اند. تحلیل حساسیت همچنین نشان داد که تغییر اوزان پارامترهای اقلیمی باعث افزایش ۳ درصدی تناسب ضعیف و کاهش تناسب عالی می شود. این یافته ها اهمیت پارامترهای اقلیمی را در تعیین سازگاری اراضی برای تأسیس نیروگاه های خورشیدی تأکید می کنند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰	
کلیدواژه ها: انرژی خورشیدی، تناسب اراضی، مکان یابی، GIS، WLC	

استناد: بیگی، جواد؛ بمانی، اکرم؛ اردکانی، طاهره؛ و مرادی، مریم (۱۴۰۴). توسعه مدل تصمیم گیری مبتنی بر شاخص های پایداری جهت استقرار نیروگاه های خورشیدی: مطالعه دشت یزد- اردکان. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (ویژه نامه پایش و مدیریت آلاینده های محیط زیست طبیعی)، ۲۶۷-۲۸۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.389142.2757>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

با توجه به تغییرات جهانی آب و هوا و نیاز فزاینده به منابع انرژی پایدار، انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های کلیدی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شوند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA^۱)، پیش‌بینی می‌شود که سهم انرژی خورشیدی در سبد انرژی جهانی تا سال ۲۰۳۰ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد (IEA, 2021). بنابراین، بهره‌برداری مؤثر از انرژی خورشیدی نیازمند مکان‌یابی مناسب برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی است تا حداکثر بهره‌وری با حداقل هزینه و تأثیرات محیط‌زیستی فراهم گردد (Moussa et al., 2022). انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، نه تنها به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند، بلکه با ایجاد شغل‌های جدید و تقویت اقتصادی محلی، برای جوامع مزایای اجتماعی و اقتصادی به‌همراه دارد (IRENA^۲, 2024). با این حال، تأثیرات تغییرات جوی، نظیر تغییرات دما و بارش، می‌تواند بر عملکرد و بهره‌وری سیستم‌های فتوولتائیک اثرگذار باشد (Khan et al., 2023). به‌منظور مواجهه با این چالش‌ها، اصلاحات سیاستی برای حمایت از توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر ضروری است. چنین سیاست‌هایی می‌توانند به تشویق سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی خورشیدی و بهبود زیرساخت‌ها منجر شوند (NREL^۳, 2023).

انتخاب مکان مناسب برای نیروگاه‌های خورشیدی یکی از چالش‌های بزرگ در این حوزه است. در سال ۲۰۱۸، انرژی فتوولتائیک خورشیدی تقریباً ۴۰ درصد از کل انرژی تجدیدپذیر نصب شده در سطح جهان را تشکیل می‌داد (Outlook, 2019). این فرآیند به‌ویژه به‌دلیل تنوع عوامل جغرافیایی، اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی مرتبط با آن پیچیده است. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۴) در ارزیابی و انتخاب بهترین مکان‌ها ضروری است، زیرا این روش‌ها امکان ارزیابی معیارهایی مانند شدت تابش خورشیدی، هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری، تأثیرات محیطی و دسترسی به زیرساخت‌ها را فراهم می‌کنند (Kumar et al., 2020; Bahrami et al., 2020).

پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که در بررسی مکان‌های مناسب برای نیروگاه‌های خورشیدی در ۹ استان ایران، Lotfi و همکاران (۲۰۲۱) زاهدان را به‌عنوان بهترین گزینه و تهران را به‌عنوان بدترین گزینه معرفی کرده‌اند. همچنین، روش TOPSIS^۵ در این مطالعه حساسیت کمتری نسبت به دیگر روش‌ها داشت. در مطالعات دیگر همانند Dashti و همکاران (۲۰۲۱)، معیارهای انتخاب مکان از جنبه‌های محیطی-فنی، اقتصادی-اجتماعی و محدودیت‌های محیط‌زیستی مورد بررسی قرار گرفته و مواردی چون هزینه و اثرات محیطی لحاظ شده‌اند. به‌علاوه، مطالعه Jahangiri و همکاران (۲۰۲۲) یاسوج را به‌عنوان بهترین شهر ایران برای تولید انرژی خورشیدی معرفی کرده و اعتبار آن را با استفاده از روش‌های مختلف تأیید کرده‌اند. همچنین، در ترکیه، Mirzaei (۲۰۲۲) با ترکیب تصمیم‌گیری چندمعیاره و منطق فازی، آنتالیا را به‌عنوان مناسب‌ترین مکان برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی شناسایی کرده است. به‌طور کلی، نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که انتخاب مکان بهینه برای نیروگاه‌های خورشیدی تأثیر زیادی بر عملکرد و سودآوری آنها دارد. هدف این تحقیق، توسعه مدلی جامع برای مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با در نظر گرفتن تمامی معیارهای مرتبط و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این مطالعه به‌ویژه بر روی مناطق جغرافیایی با پتانسیل بالا تمرکز می‌کند و نوآوری آن در استفاده از ترکیب روش‌های نوین تصمیم‌گیری و تجزیه و تحلیل جامع معیارهاست که به تفکیک و بهره‌برداری بهتر از منابع انرژی خورشیدی کمک می‌کند.

مدل WLC^۶ به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، در این تحقیق برای انتخاب مکان‌های بهینه جهت استقرار نیروگاه‌های خورشیدی در دشت یزد-اردکان در محیط نرم‌افزار ArcMap به‌کار گرفته شده است. این مدل به‌دلیل سادگی و قابلیت آن در تحلیل و ارزیابی معیارهای مختلف، به‌عنوان ابزاری مناسب در این زمینه در نظر گرفته شده است.

^۱International Energy Agency

^۲International Renewable Energy Agency

^۳National Renewable Energy Laboratory

^۴Multi-Criteria Decision-Making

^۵Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

^۶Weighted Linear Combination

(Saaty, 1980; Zanakakis et al., 1998). استفاده از مدل WLC در این تحقیق امکان بررسی و ارزیابی جامع و سیستماتیک مکان های مناسب برای نیروگاه های خورشیدی را فراهم کرده است. با ترکیب دقیق معیارها و وزن دهی به آنها، توازن مناسبی بین جنبه های مختلف اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی برقرار می شود (Malczewski, 1999). این امر موجب تمایز علمی و عملی تحقیق حاضر شده و به عنوان ابزار کارآمدی در فرآیند تصمیم گیری برای مکان یابی نیروگاه های خورشیدی در مناطق مشابه شناخته شده است. در نتیجه، مدل WLC نه تنها در این تحقیق اهمیت ویژه ای دارد، بلکه به عنوان الگوی قابل اعتمادی برای سایر مطالعات در زمینه انرژی های تجدیدپذیر و محیط زیست نیز شناخته می شود.

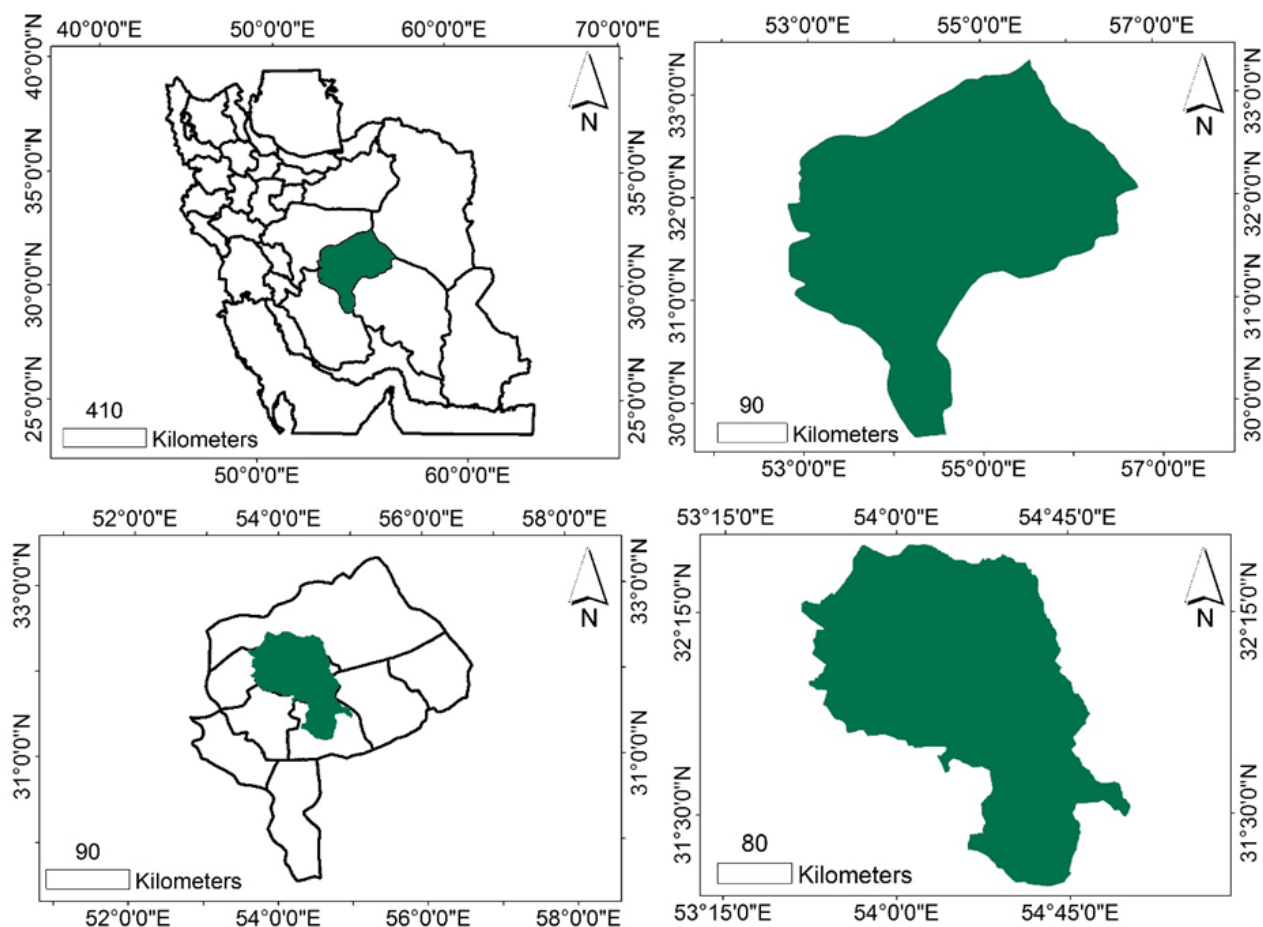
آلودگی هوا در منطقه دشت یزد اردکان به دلیل فعالیت های صنعتی و وابستگی به سوخت های فسیلی، به عنوان یکی از چالش های جدی محیط زیستی و بهداشتی تلقی می شود (Lelieveld et al., 2015). انتشار گازهای گلخانه ای و ذرات معلق، منجر به بروز بیماری های تنفسی و قلبی و کاهش کیفیت زندگی ساکنان شده است (WHO, 2018). در این راستا، استقرار نیروگاه های خورشیدی به عنوان راه حلی مؤثر برای کاهش آلودگی و افزایش پایداری انرژی مورد توجه قرار گرفته است (IRENA, 2020). بر این اساس، تحقیق حاضر به شناسایی و تحلیل مؤلفه های مختلف پایداری برای انتخاب بهینه مکان های مناسب برای استقرار نیروگاه های خورشیدی در دشت یزد- اردکان پرداخته است. استفاده از مدل WLC به عنوان ابزاری تصمیم گیری چندمعیاره، امکان ترکیب و وزن دهی دقیق به معیارهای مختلف را فراهم آورده و ارزیابی دقیقی از گزینه های موجود در اختیار قرار می دهد. هدف اصلی این مطالعه، ارائه یک مدل جامع و قابل اعتمادی برای مکان یابی نیروگاه ها است که با در نظر گرفتن ابعاد اجتماعی و اقتصادی، به بهبود کیفیت هوای منطقه و سلامت عمومی جامعه کمک کند (Huang et al., 2017).

روش شناسی پژوهش

موقعیت منطقه مورد بررسی: دشت یزد- اردکان با مساحت ۱۱۷۷۵ کیلومتر بین طول های ۵۳ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و بین عرض های ۳۱ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۵۵ دقیقه در مرکز استان یزد قرار دارد. از طرف شمال به کویر سیاه کوه از سمت شرق به زیر حوضه خرانق و سمت جنوب به ارتفاعات شیرکوه و از غرب به زیر حوزه طاقستان و ندوشن محدود می شود. بلندترین نقطه حوضه قله شیرکوه با ۴۰۷۵ متر و گودترین نقطه دارای ۱۷۰۰ متر است. ارتفاع متوسط حوزه ۱۵۶۵ متر از سطح دریا است. دشت یزد- اردکان در بخش مرکزی استان یزد قرار دارد و این حوزه در برگیرنده شهرستان های یزد، اردکان، میبد و مهریز است که بیشترین جمعیت را در استان به خود اختصاص داده است این حوزه از شمال به حوضه های آبخیز ریگ زرین و عقدا و جنوب و غرب به حوضه آبخیز کویر ابرقو و شرق به حوضه های آبخیز کویر در آنجیر و بهادران منتهی می گردد (Abdollahi and Balaje, 2019). شکل ۱ منطقه مطالعه را بر روی استان یزد نشان می دهد.

تولید لایه های معیار: معیارهای پژوهش براساس مطالعه های قبلی و نظر کارشناسی، با توجه به شرایط موجود بودن داده ها در محدوده مورد مطالعه، تعیین گردید. این معیارها طبق تحقیقات انجام شده توسط Shau و همکاران (۲۰۲۰)، Karimi Pour و همکاران (۲۰۲۰)، Koulak و همکاران (۲۰۲۰)، Dashti و Dasht Bozorgi (۲۰۲۱)، Roos و Dorat (۲۰۲۰)، Lotfi و همکاران (۲۰۲۱)، Pounse و همکاران (۲۰۲۲)، Jahangiri و همکاران (۲۰۲۲) و Mirzaei (۲۰۲۲) جمع آوری و تنظیم شد. تعیین معیارهای مناسب برای انتخاب مکان نصب مزرعه خورشیدی مستلزم فهم کامل و صحیح از عوامل مؤثر و نحوه انتخاب آنها می باشد. معیارهای مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

ارتفاع: ارتفاع به عنوان یک عامل مؤثر در جذب انرژی خورشیدی شناخته می شود. هرچه ارتفاع افزایش یابد، غلظت مواد جذب کننده و بازتاب دهنده در اتمسفر کاهش می یابد. بنابراین، نواحی مرتفع پتانسیل بیشتری برای دریافت انرژی خورشیدی دارند، زیرا این مناطق با کاهش رطوبت و آلودگی، کارایی سیستم های فتوولتائیک را بهبود می بخشد. انتخاب موقعیت های مناسب با در نظر گرفتن ارتفاع، در توسعه پروژه های انرژی خورشیدی اهمیت دارد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

شیب به عنوان یکی از عوامل مهم در انتخاب مکان مزارع خورشیدی شناخته می‌شود. با افزایش شیب زمین، پتانسیل آن برای استفاده صنعتی کاهش می‌یابد. مناطق با شیب کم نسبت به مناطق با شیب زیاد، هزینه‌های ساخت و ساز کمتری دارند و به همین دلیل، زمین‌های صاف برای مزارع خورشیدی بزرگ مقیاس ضروری هستند. زمین‌های با شیب بالا به دلیل هزینه‌های اقتصادی از لحاظ ساخت و بهره‌برداری مقرون به صرفه نیستند؛ بنابراین برای پروژه‌های خورشیدی مناسب نمی‌باشند.

جهت شیب: شیب‌های جنوبی انرژی بیشتری نسبت به شیب‌های شمالی دریافت می‌کنند، چراکه تابش نور خورشید به طور مستقیم بر روی آنها می‌افتد. به همین دلیل، شیب‌های جنوبی گزینه‌ای ایده‌آل برای مکان‌های خورشیدی به شمار می‌روند. از نظر اقتصادی، استفاده از این شیب‌ها می‌تواند به افزایش تولید انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود بازگشت سرمایه پروژه‌های خورشیدی کمک کند.

ساعات آفتابی: ساعات آفتابی به طور مستقیم با ساعت کارکرد پنل‌های خورشیدی ارتباط دارد و هر چه میزان آن بیشتر باشد نشان‌دهنده این است که سیستم‌های خورشیدی بیشتر در معرض نور قرار دارند هرچه ساعات آفتابی بیشتر باشد روزهای ابری آن کمتر و تناسب بیشتری برای مکان‌گزینی نیروگاه‌های خورشیدی دارد.

دما: دما عامل مهمی در برآورد تابش خورشیدی است، به ویژه در غیاب ساعات آفتابی. در این شرایط، دما می‌تواند به عنوان معیاری برای تخمین پتانسیل تولید انرژی خورشیدی استفاده شود. از دیدگاه اقتصادی، شناخت تأثیر دما بر تابش، به بهینه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک و کاهش هزینه‌ها در پروژه‌های خورشیدی کمک می‌کند.

رطوبت نسبی: بخار آب و دی‌اکسید کربن جذب‌کننده‌های اصلی انرژی خورشیدی هستند. در نواحی با رطوبت بالا، به دلیل جذب بالای انرژی توسط این گازها، استفاده مؤثر از انرژی خورشیدی کاهش می‌یابد. از نظر اقتصادی، انتخاب مناطق با رطوبت پایین برای پروژه‌های خورشیدی می‌تواند به افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک کند.

بارش: باران اثرات نامطلوبی از جمله اشکالات فنی گرفته تا کثیف شدن سطح فتوولتائیک را سبب می شود اما مناطق با بارش بسیار کم به دلیل فقر پوشش گیاهی و هم زیادی غبار آلودگی آن مناطق مطلوب نیست. فاصله از شهر: 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 و هرچه فاصله این مزارع از نواحی شهری کمتر باشد، مقرون به صرفه تر است و در ادامه محدودیت های استفاده شده در مدل شامل: مناطق شهری: مناطق شهری به دلیل برخی قوانین شهرداری ها و همچنین پیش بینی رشد شهرها در آینده برای احداث مزارع خورشیدی در مناطق بسیار نزدیک به آنها امکان پذیر نیست. گسل ها: گسل های فعال هم از مواردی هستند که از نظر ایمنی صحیح نیست که تسهیلاتی مانند نیروگاه خورشیدی در آن بنا شود.

مناطق حفاظت شده: از جمله مناطقی که باید در احداث نیروگاه ها به عنوان محدودیت از آن یاد برد. برای استخراج مطلوب جهت استقرار نیروگاه خورشیدی لازم است که مناطق دارای محدودیت از معیارها حذف شوند. بدین منظور از ابزار بافر استفاده گردید. لایه های مربوط به معیارهای ذکر شده، از سایت های مختلف و سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. برای ارتفاع از مدل ارتفاعی رقومی سنجنده^۷ ASTER دریافت شد و شیب و جهت شیب با استفاده از همین مدل ارتفاعی رقومی در نرم افزار آرک جی آی اس تهیه گردید. مقادیر مربوط به معیارهای اقلیمی هم از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد و سپس مقاردهی اولیه برای کل منطقه مورد نظر با استفاده از درون یابی به روش وزن دهی معکوس فاصله انجام شد. روش های مختلفی برای درون یابی داده های مکانی وجود دارد، در این مقاله از روش وزن دهی معکوس فاصله استفاده گردید. رابطه کلی درون یابی خطی در یک نقطه فاقد اندازه گیری به صورت رابطه زیر می باشد:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n W_i \cdot Z_i$$

که در آن Z_0 : مقدار برآوردی متغیر در نقطه فاقد اندازه گیری با مختصات معلوم، W_i : وزن نقطه^۸ ام مشاهده ای (یا اندازه گیری شده)، Z_i : مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه^۸ i (با مختصات معلوم) و n : تعداد نقاط مشاهده ای می باشد به نحوی که $i=1,2,3,\dots,n$ تفاوت روش های مختلف درون یابی در نحوه محاسبه وزن ها (W) می باشد. درون یابی با کمک نرم افزار ARCGIS10.8 انجام و نقشه ها در محیط این نرم افزار تهیه گردیدند. در این مطالعه، به منظور مکان یابی دقیق نیروگاه های خورشیدی در دشت یزد-اردکان، از پیش شرط های بافری استفاده گردید. این پیش شرط ها براساس دستورالعمل های تدوین شده توسط سازمان نیرو برای مکان یابی استقرار نیروگاه های خورشیدی (IRENA, 2019; REN21^۸, 2021; NREL, 2016) و همچنین مرور منابع مربوطه، شامل مطالعات انجام شده توسط Shau و همکاران (۲۰۲۰)، Karimi Pour و همکاران (۲۰۲۰)، Koulak و همکاران (۲۰۲۰)، Dashti و Dasht Bozorgi (۲۰۲۱)، Roos و Dorat (۲۰۲۰)، Lotfi و همکاران (۲۰۲۱)، Pounse و همکاران (۲۰۲۲)، Jahangiri و همکاران (۲۰۲۲) و Mirzaei (۲۰۲۲) طراحی شده است.

نرمال سازی داده ها: به دلیل اینکه معیارهای مورد استفاده در این پژوهش دارای واحدهای مختلفی هستند مثل دما (درجه سانتی گراد) و یا بارش (میلی متر) باید ابتدا آنها را نرمال سازی نمود. به عبارت دیگر، هر لایه ورودی باید در مقیاس صفر تا یک استاندارد سازی شود. نرمال سازی داده ها با معادلات مختلفی انجام می گردد. برای نرمال کردن معیارهای مانند ساعت آفتابی از روش نرمال سازی استاندارد استفاده شد.

وزن دهی به معیارها: به منظور تعیین وزن ها و اهمیت معیارهای یک ماتریس مقایسه زوجی تشکیل و در قالب یک جدول بیان خواهد شد.

جهت تعیین وزن ها، از روش AHP Fuzzy به منظور ساختاردهی سلسله مراتبی، انجام مقایسات زوجی فازی و محاسبه وزن های فازی استفاده شد. روش (AHP (Analytic Hierarchy Process) و مجموعه های فازی (Fuzzy Sets) دو تکنیک قدرتمند هستند که در تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) به کار می روند. ترکیب این دو روش، تحت عنوان AHP Fuzzy، به

^۷Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

^۸Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که به شکلی دقیق‌تر و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها، انتخاب‌های بهتری داشته باشند.

ترکیب و روی هم‌گذاری لایه‌ها: پس از نرمال‌سازی داده‌ها و لایه‌ها و محاسبه وزن‌ها با استفاده از ابزار رستر کلکتور که در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 وجود دارد، نقشه اولیه تناسب ایجاد شد که در این نقشه مشخص گردید که کدام مناطق تناسب بیشتری برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی را دارند و درجه مطلوبیت آنها چقدر است و همچنین مساحت اولیه آنها نیز استخراج شد. در این مرحله ابتدا بدون در نظر گرفتن محدودیت‌ها، نقشه تناسب تهیه شد و سپس با در نظر گرفتن محدودیت‌ها، نقشه تناسب ایجاد گردید.

تحلیل حساسیت: در قسمت تحلیل حساسیت به ارزیابی میزان تأثیر یک متغیر بر خروجی مدل کلی با دستکاری متغیرها پرداخته شد. برای تحلیل حساسیت سناریوهای مختلفی از تغییر معیارها و نتیجه کلی آن بر میزان تناسب اراضی اعمال می‌شود. در ابتدا برای همه معیارها وزن یکسان در نظر گرفته شد. در سناریوی بعدی ۵۰ درصد وزن به معیارهای مربوط به شکل زمین و داده و وزن بقیه معیارها یکسان در نظر گرفته می‌شود. در سری آخر معیارهای مهم دیگر وزن ۵۰ درصدی دیگری می‌گیرد. تحلیل حساسیت و مقایسه زوجی در نرم‌افزار EXPERCHOICE11 انجام شده است.

یافته‌های پژوهش

تولید لایه‌های معیار: ارتفاع منطقه از ۹۷۳ متر در نواحی شمالی که شامل شهرهای میبد و یزد است تا ۳۳۰۷ متر در نواحی غربی و شرقی منطقه تغییر می‌کند (شکل ۲). نواحی مرتفع منطبق بر نقاط کوهستانی در منطقه مطالعه می‌باشد. نواحی جنوبی نیز شامل نقاط مرتفع می‌باشد که از ۲۰۰۰ متر تا بیش از ۳۳۰۰ متر متغیر است. ارتفاع عامل مؤثری در مکان‌یابی‌ها می‌باشد. ارتفاع در حقیقت با ضخامت جو در ارتباط است؛ هر چه جو ضخیم‌تر باشد غلظت عامل‌ها جذب و بازتاب افزایش پیدا می‌کند و بنابراین نواحی مرتفع تابش بیشتری از خورشید را جذب می‌نمایند. شیب عاملی دیگر است که برای تعبیه مزارع خورشیدی کاربرد دارد. هرچه شیب بیشتر باشد توانایی زمین برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی کاهش می‌یابد. مناطق مسطح هزینه‌های کمتری را برای احداث نیروگاه‌ها به‌خود اختصاص می‌دهند و بنابراین شیب‌های کمتر برای احداث نیروگاه‌ها مناسب‌تر است. هرچه جهت شیب با جهات جنوبی منطبق باشد برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب‌تر است (شکل ۲). مطابق نتایج به‌دست آمده قسمت اعظمی از منطقه؛ به‌ویژه در نواحی غربی شیب‌های شمال‌شرقی دارند اما در قسمت‌های شرقی شیب‌ها بیشتر جنوبی می‌باشند. دمای حداقل در یزد به حداقل خود می‌رسد و دمای حداکثر در میبد به حداکثر خود می‌رسد. مطابق با شکل ۲ حداقل‌های مطلق و حداکثرهای مطلق نیز به‌ترتیب در یزد و میبد اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی با توجه به دمای میانگین که در شکل ۲ نمایش داده شده، بیشترین دماها که تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد طی ۱۲ ماه سال می‌رسد، در میبد و عقدا رخ می‌دهد. هرچه دمای منطقه بیشتر باشد برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب‌تر است. هرچه بارش در نقاط کمتر باشد برای احداث نیروگاه‌ها مناسب‌تر است. مطابق شکل ۲، بیشترین بارش در مهریز و کمترین آن در میبد رخ می‌دهد. نواحی یزد و اطراف آن در ناحیه بینابینی قرار دارند. بیشترین ساعات آفتابی در یزد و مهریز (تا ۲۸۴ ساعت) و سپس میبد (تا ۲۸۲ ساعت) می‌باشد (شکل ۲). هرچه ساعات آفتابی بیشتر باشد برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب‌تر است. به‌طور متوسط مهریز و اطراف آن دارای رطوبت نسبی کمتری نسبت به دیگر نقاط می‌باشد. در صورتی که یزد دارای رطوبت نسبی بیشتری است (شکل ۲). بخار آب و دی‌اکسید کربن به‌عنوان جاذب‌های طول موج خورشید عمل می‌کنند، نواحی با رطوبت بالا به‌دلیل جذب بالای انرژی خورشیدی برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب نیستند. مکان‌هایی که دارای سرعت باد کمتر باشند برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب‌ترند. کمترین سرعت باد در نواحی میبد و اطراف آن مشاهده می‌گردد، جهت باد هم در بیشتر نقاط منطقه شمال‌غربی می‌باشد (شکل ۲). هرچه تعداد روزهای یخبندان کمتر باشد برای احداث نیروگاه‌ها مناسب‌تر است. مطابق شکل ۲ کمترین تعداد روزهای یخبندان در مهریز و نواحی اطراف آن مشاهده می‌گردد. بیشترین روزهای ابری در میبد و کمترین آنها در مهریز رخ می‌دهد. هرچه تعداد روزهای ابری کمتر باشد یعنی ساعات آفتابی بیشتری بر منطقه حکم‌فرماست و برای احداث نیروگاه مناسب‌تر است. بیشترین روزهای گردو خاکی در میبد و

کمترین آن در مهریز و نواحی اطراف آن می باشد (شکل ۲). هر چه روزهای گردو خاکی در منطقه ای کمتر باشد به دلیل کمتر صدمه زدن به نیروگاه ها و همچنین اخلاص کمتر در نظم آن، برای احداث نیروگاه ها مناسب تر است. در این مطالعه برای مکان یابی دقیق نیروگاه های خورشیدی در دشت یزد- اردکان از پیش شرط های بافری استفاده شده است. این بافرها عبارتند از:

- ارتفاعات بالاتر از ۲۰۰۰ متر باید از نقشه ارتفاعی به صفر تبدیل شوند.
 - شیب های بیش از ۱۰ درجه در نقشه درجه شیب یا درصد شیب باید به صفر تبدیل شوند.
 - در معیار فاصله از شهر، فواصل بیش از ۱۴ کیلومتر باید به صفر تبدیل شوند.
 - در معیار فاصله از جاده، فواصل بیش از پنج کیلومتر باید به صفر تبدیل شوند.
 - برای معیار مکان های حفاظتی، این مکان ها باید به صفر تبدیل شوند.
 - برای معیار گسل ها، فواصل بیش از پنج کیلومتر تبدیل شوند.
- که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است.

نرمال سازی داده ها: تمامی لایه های استفاده شده در پژوهش حاضر با استفاده از روش نرمال سازی استاندارد مطابق فرمول زیر استاندارد شدند:

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

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + (\frac{x}{m})^s}$$

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

X: مقدار معیار، m: نقطه میانی و s: گستره هستند.

نرمال سازی عددی بین صفر و یک است و چون تمامی لایه ها واحدهای مختلفی دارند با این کار تمامی آن در واحدی بین صفر و یک توزیع می شوند و بدین ترتیب می توان آنها را در وزن مخصوص خود ضرب نمود تا محاسبات به درستی انجام شود. شکل ۵ نرمال سازی را در بخش های مختلف نشان می دهد.

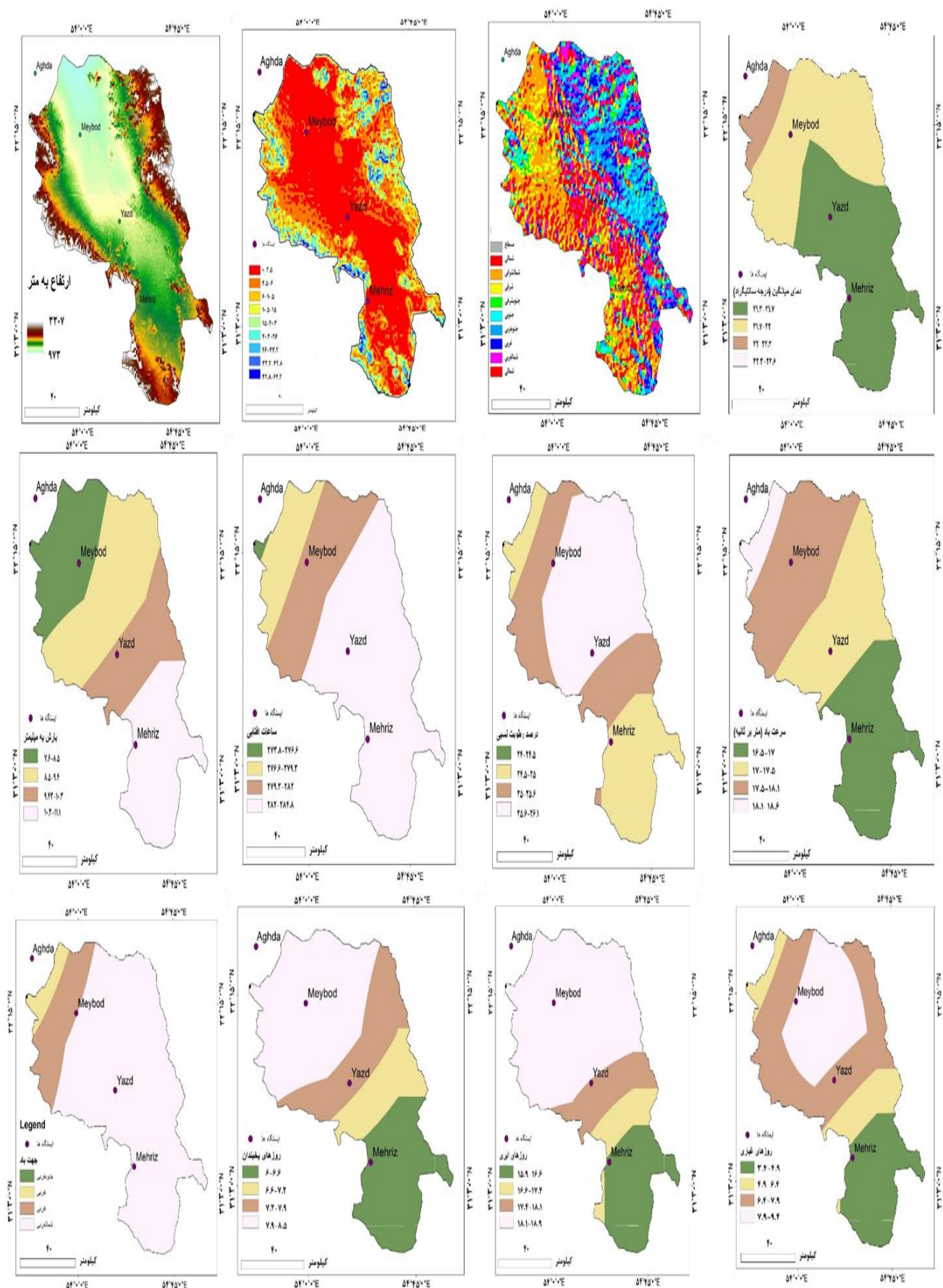
وزن دهی به معیارها: برای تعیین و اهمیت نسبی پارامترها بر همدگر ماتریس زوجی تشکیل داده شد و محاسبات زوجی صورت گرفت. جدول ۱ ماتریس زوجی و نتیجه نهایی این مقایسه ها را نشان می دهد. در ادامه پارامترهای مربوط به محدودیت های مورد استفاده در این مطالعه مطابق با شکل ۳ می باشد. همچنین در این مرحله پس از مقایسه زوجی، باید مقدار CR محاسبه می شد که نشان دهنده سازگاری یا عدم سازگاری متغیرها با یکدیگر است.

$$CR = CI/RI$$

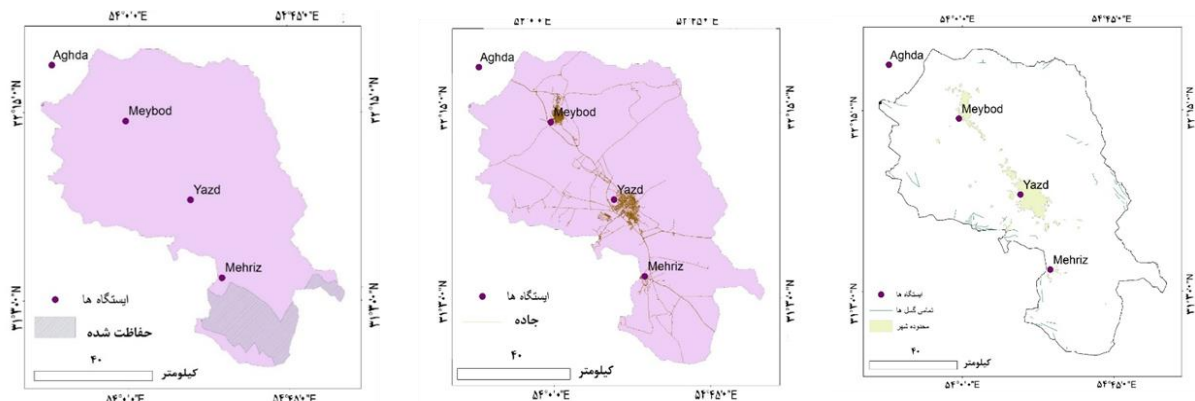
RI: شاخصی تصادفی است و براساس جدول ۲ محاسبه می گردد. CI براساس رابطه زیر محاسبه می شود:

پس از انجام مقایسات زوجی و همچنین به دست آوردن شاخص CR، اولویت بندی پارامترها مشخص شد و وزن هر کدام نیز به دست آمد. جدول ۳ رتبه پارامترها و همچنین وزن آنها را نشان می دهد.

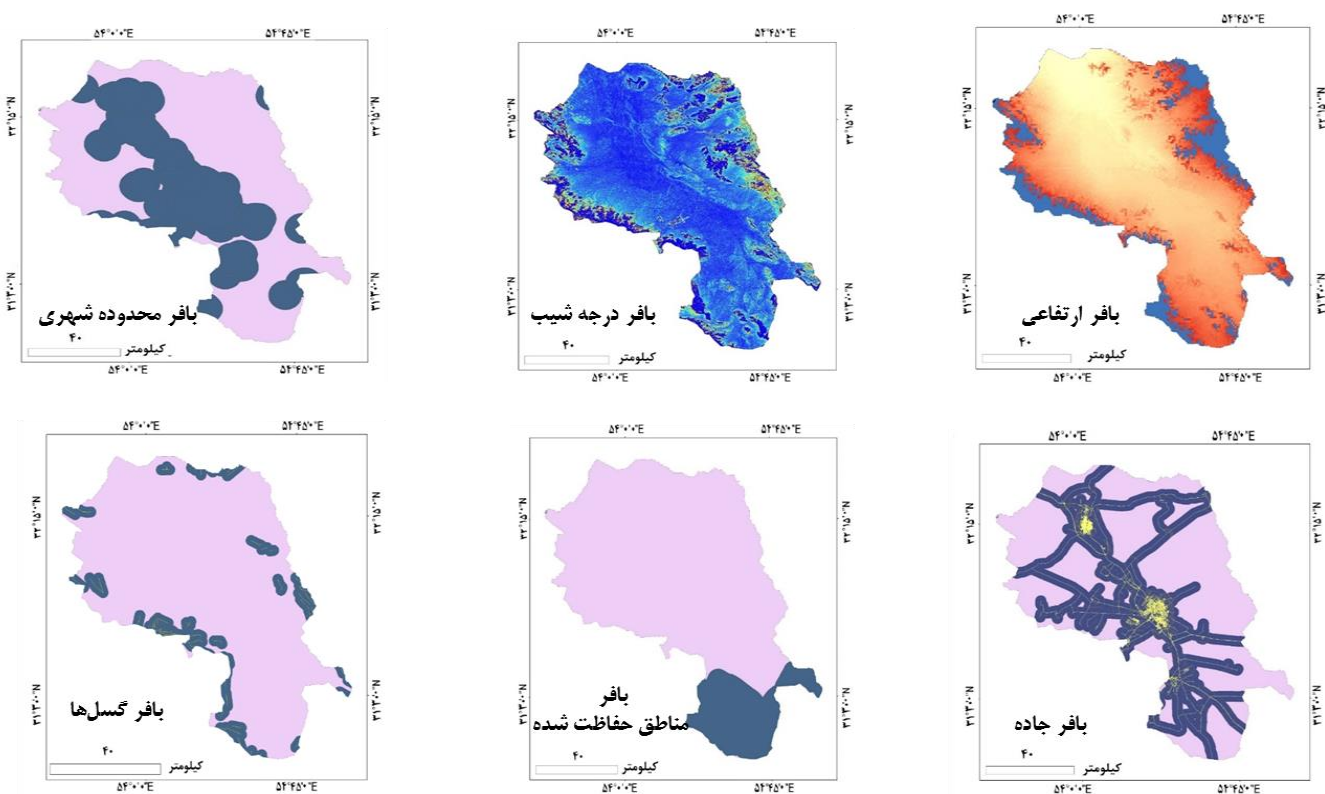
ترکیب و روی هم گذاری لایه ها و درجه تناسب بدون لایه های محدودیت و با لایه های محدودیت: در بررسی تناسب اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی در دشت یزد- اردکان، بدون در نظر گرفتن لایه های محدودیت، ۱۹/۲ درصد از این مناطق مناسب شناخته شدند. نسبت ها شامل ۲۳/۵ درصد تناسب ضعیف، ۲۳/۷ درصد متوسط، ۳۰/۷ درصد خوب و ۱۹/۲۴ درصد عالی است (شکل ۶). اما با در نظر گرفتن لایه های محدودیت، مانند سیل، جاده، محدوده های شهری و مناطق حفاظت شده، ۷۳/۶۲ درصد از نواحی دارای تناسب ضعیف، ۱۵/۵ درصد متوسط و تنها ۲/۸ درصد دارای تناسب عالی برای احداث نیروگاه خورشیدی هستند (شکل ۷). نواحی مناسب عمدتاً در بخش های حاشیه ای شرقی و غربی میبد و یزد واقع شده اند و باید در اولویت برنامه ریزی قرار گیرند.



۲- معیارهای مورد استفاده در محدوده مورد مطالعه (نگارنده)



شکل ۳- محدودیت های مورد استفاده در محدوده مورد مطالعه (نگارنده)



شکل ۴- بافرهای مورد استفاده در محدوده مورد مطالعه (نگارنده)

جدول ۱- ماتریس مقایسه های زوجی معیارها

P16	P15	P14	P13	P12	P11	P10	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	
حفاظتی	جاده	گسل	شهر	گردوغبار	ایرناکی	یخبندان	جهت باد	سرعت باد	رطوبت نسبی	ساعات آفتابی	بارش	دما	جهت شیب	شیب	ارتفاع	
۱	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۱	P1 ارتفاع
۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۲	۲	۱	۱	۱	P2 شیب
۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	P3 جهت شیب
۰/۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۶	۱	۱	۰/۵	۰/۵	P4 دما
۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۱۷	۰/۵	۰/۵	۰/۵	P5 بارش
۰/۵	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۳	۱	۱	۱	۰/۵	۱	۰/۵	P6 ساعات آفتابی
۰/۵	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۰/۳۳	۱	۰/۲	۰/۵	۰/۳۳	۰/۵	P7 رطوبت نسبی
۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۰/۱۴	۱	۰/۲	۰/۵	۰/۳۳	۰/۵	P8 سرعت باد
۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۵	۱	۰/۱۴	۱	۰/۲	۰/۵	۰/۳۳	۰/۵	P9 جهت باد

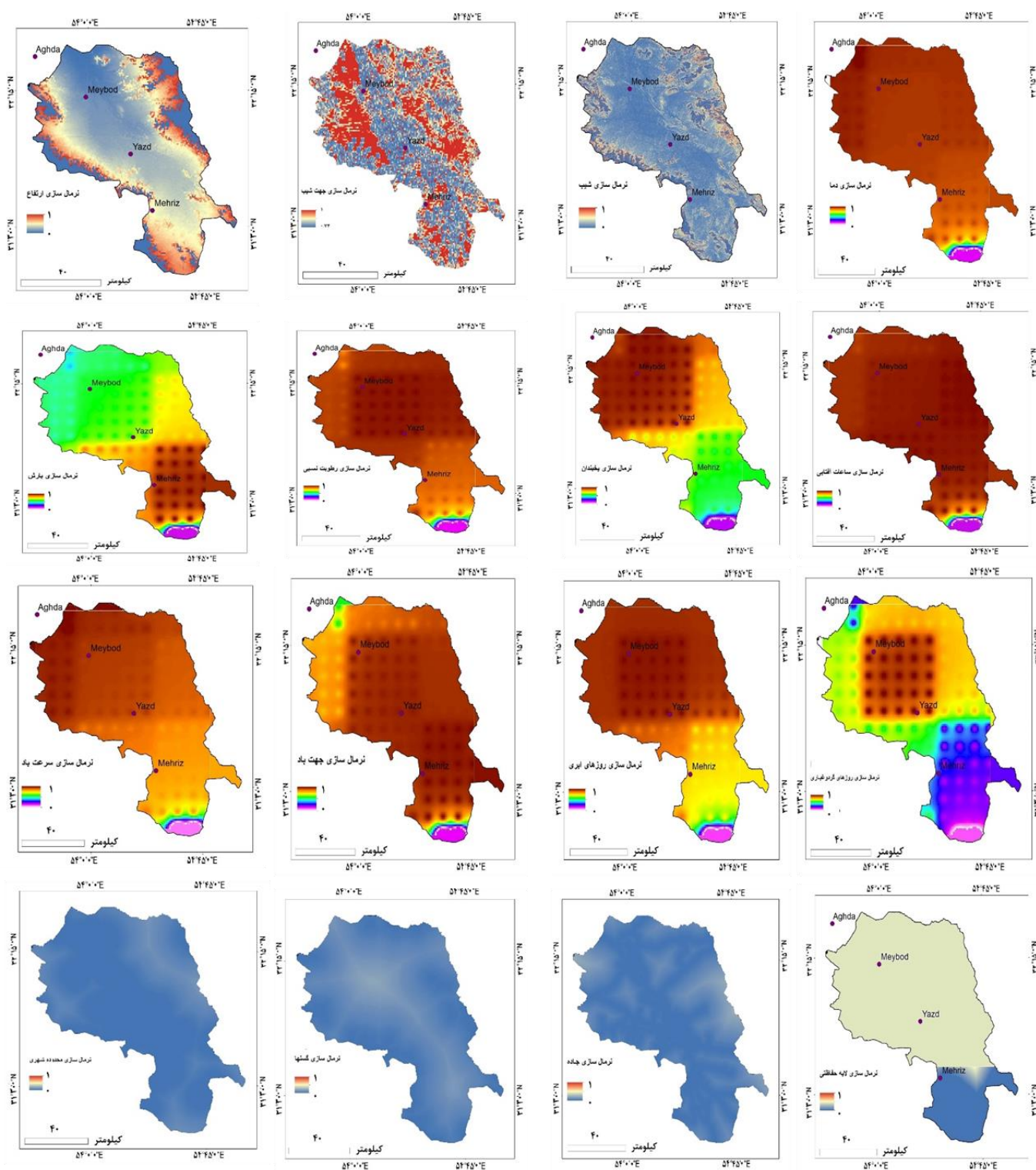
P16	P15	P14	P13	P12	P11	P10	P9	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1	
حفاظتی	جاده	گسل	شهر	گردوغبار	ابرنای	یخبندان	جهت باد	سرعت باد	رطوبت نسبی	ساعات آفتابی	بارش	دما	جهت شیب	شیب	ارتفاع	
-۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۰/۳۳	-۰/۱۴	۱	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳۳	-۰/۵	P10 یخبندان
-۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۰/۳۳	-۰/۱۴	۱	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳۳	-۰/۵	P11 ابرناکی
-۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۰/۳۳	-۰/۱۴	۱	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳۳	-۰/۵	P12 گردوغباری
-۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۰/۱۴	۱	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳۳	-۰/۵	P13 شهر
-۰/۳۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۰/۱۴	۱	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳۳	-۰/۳۳	P14 گسل
-۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۰/۱۴	۱	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳۳	-۰/۵	P15 جاده
-۰/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-۰/۱۴	۱	-۰/۲	-۰/۵	-۰/۳۳	-۰/۵	P16 حفاظتی

جدول ۲- مقادیر RI

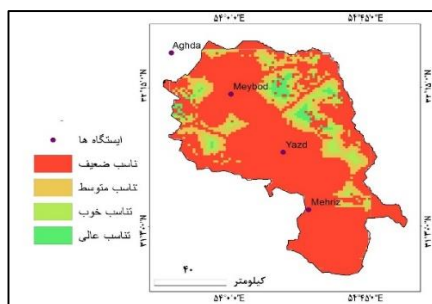
N	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۳۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

جدول ۳- رتبه‌بندی اولویت‌ها

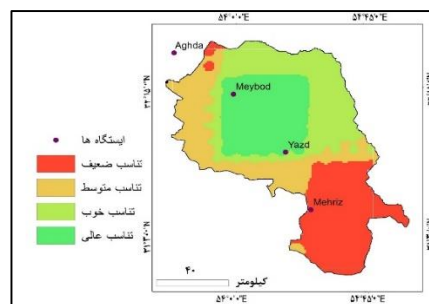
وزن‌ها	(-)	(+)	رتبه	اولویت	گروه
۰/۱۰۳۷۴۶	%۷/۶	%۷/۶	۴	%۱۰/۲	ارتفاع
۰/۱۰۸۳۱۳	%۴/۸	%۴/۸	۳	%۱۱/۰	شیب
۰/۰۸۹۲۳۲	%۶/۲	%۶/۲	۵	%۹/۱	جهت شیب
۰/۱۳۹۰۱۵	%۵/۰	%۵/۰	۲	%۱۴/۶	دما
۰/۰۴۲۳۶۷	%۳/۱	%۳/۱	۷	%۴/۳	بارش
۰/۱۵۴۰۶۱	%۷/۱	%۷/۱	۱	%۱۶/۴	ساعات آفتابی
۰/۰۴۸۶۴۴	%۲/۲	%۲/۲	۶	%۴/۷	رطوبت نسبی
۰/۰۳۷۷۰۳	%۱/۰	%۱/۰	۸	%۳/۶	سرعت باد
۰/۰۳۴۶۲۷	%۰/۸	%۰/۸	۱۳	%۳/۳	جهت باد
۰/۰۳۳۹۴۱	%۰/۸	%۰/۸	۱۴	%۳/۲	یخبندان
۰/۰۳۳۹۴۱	%۰/۸	%۰/۸	۱۴	%۳/۲	ابرنای
۰/۰۳۳۹۴۱	%۰/۸	%۰/۸	۱۴	%۳/۲	گردوغباری
۰/۰۳۵۶۸۷	%۰/۷	%۰/۷	۹	%۳/۴	شهر
۰/۰۳۳۴۰۹	%۰/۶	%۰/۶	۱۲	%۳/۳	گسل
۰/۰۳۵۶۸۷	%۰/۷	%۰/۷	۹	%۳/۴	جاده
۰/۰۳۵۶۸۷	%۰/۷	%۰/۷	۹	%۳/۴	حفاظتی



شکل ۵- نتایج نرمال سازی لایه ها (نگارنده)

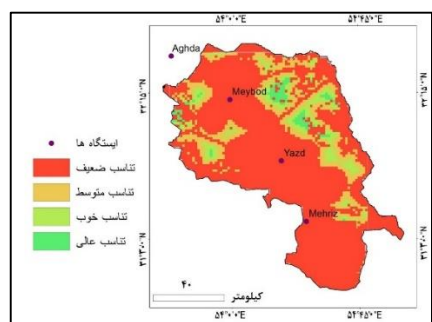


شکل ۷- نواحی با درجات مختلف تناسب برای استقرار نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن لایه‌های محدودیت

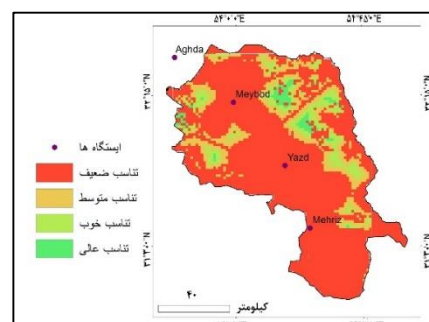


شکل ۶- نواحی با درجات مختلف تناسب برای استقرار نیروگاه خورشیدی بدون در نظر گرفتن لایه‌های محدودیت

تحلیل حساسیت: با تنظیم وزن‌های برابر برای تمامی پارامترها، ۷۶/۱۷ درصد نواحی دشت یزد-اردکان تناسب ضعیف، ۱۴/۲۲ درصد تناسب متوسط و تنها ۱/۸ درصد تناسب عالی دارند (شکل ۸). زمانی که وزن‌های بیشتری به پارامترهای آب و هوایی اختصاص داده شود، این اعداد به همان نسبت باقی می‌ماند و تنها ۱/۹۵ درصد از نواحی برای احداث نیروگاه خورشیدی مناسب خواهند بود (شکل ۹). این نتایج، ضرورت اولویت‌بندی نواحی با تناسب عالی را برای برنامه‌ریزی ساخت نیروگاه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۹- نواحی با درجات مختلف تناسب برای استقرار نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن وزن‌های بیشتر برای پارامترهای اقلیمی



شکل ۸- نواحی با درجات مختلف تناسب برای استقرار نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن وزن‌های برابر

بحث و نتیجه‌گیری

انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شود. فناوری‌های خورشیدی فعال، شامل سیستم‌های فتوولتائیک، انرژی خورشیدی متمرکز و گرمایش آب خورشیدی هستند که توانایی تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی را دارند (Moussa et al., 2023). انتخاب مکان مناسب برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی به‌دلیل چالش‌های محیطی و اقتصادی از اهمیت بالایی برخوردار است.

این مطالعه نشان می‌دهد که دما، بارش، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی تأثیر قابل توجهی بر شرایط مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی دارند. نتایج نشان داد که میبد و عقدا با دماهای بالای ۲۲ درجه سانتی‌گراد، مناسب‌ترین مکان‌ها برای توسعه سیستم‌های فتوولتائیک هستند. مطالعات Goh و همکاران (۲۰۲۲) نیز تأیید می‌کند که دما بر کارایی پنل‌های خورشیدی تأثیر دارد و افزایش دما می‌تواند تولید انرژی را در مناطق گرم بهبود بخشد. در بررسی پارامترهای آب‌وهوایی، بیشترین بارش در مهریز و کمترین آن در میبد ثبت شد. این یافته با دیدگاه Jahangiri و همکاران (۲۰۲۳) همراستا است که تأکید می‌کند، بارش مناسب می‌تواند به بهینه‌سازی فعالیت‌های انرژی خورشیدی کمک کند. همچنین، ساعات آفتابی بالا در یزد و مهریز نشان‌دهنده ظرفیت این مناطق برای تولید انرژی خورشیدی است. Koolak و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیان می‌کند که افزایش ساعات آفتابی می‌تواند به‌طور قابل توجهی تولید انرژی فتوولتائیک را افزایش دهد. تحلیل داده‌های رطوبت نسبی نشان می‌دهد که مهریز رطوبت کمتری نسبت به سایر نواحی دارد، در حالی که یزد با رطوبت بالا مواجه است. Mirzaei (۲۰۲۲) تأکید می‌کند که رطوبت بالا می‌تواند تأثیر منفی بر کارایی پنل‌ها داشته باشد، بنابراین انتخاب مناطق با رطوبت پایین برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی حائز اهمیت است.

این تحقیق همچنین با در نظر گرفتن لایه های محدودیتی شامل ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر، شیب های بیش از ۱۰ درجه و فاصله بیش از ۱۴ کیلومتر از محدوده های شهری، نشان می دهد که براساس این محدودیت ها تنها ۲/۸ درصد از نواحی دشت یزد- اردکان برای نصب نیروگاه های خورشیدی در مقیاس وسیع مناسب تشخیص داده شده اند (Arefi et al., 2023). این یافته با تأکید Beyazoglu و Gokoz (۲۰۲۳) بر اهمیت شناسایی عوامل کلیدی در مکان یابی نیروگاه های خورشیدی همخوانی دارد. تحلیل حساسیت در این مطالعه نشان داد که با تغییر اوزان پارامترهای اقلیمی، تناسب ضعیف اراضی سه درصد افزایش و تناسب عالی کاهش یافته است (Zarifkar et al., 2023). این موضوع به تغییرات محیطی و تأثیر آن بر انتخاب مکان های مناسب مرتبط است و بر لزوم توجه بیشتر به این نقاط تأکید می کند.

نتایج مطالعه حاضر نشان می دهند که تنها درصد کمی از اراضی دشت یزد- اردکان دارای تناسب عالی یا بسیار خوب برای استقرار نیروگاه های خورشیدی هستند. براساس داده های لایه محدودیت و سایر پارامترهای اقلیمی، تنها ۹ درصد از کل دشت یزد- اردکان برای این منظور مناسب تشخیص داده شده است. این یافته ها حاکی از وجود عوامل محدودکننده بسیاری هستند که می توانند تناسب اراضی را برای احداث نیروگاه ها کاهش دهند. با توجه به اینکه بدون در نظر گرفتن لایه های محدودیت، تناسب ضعیف برای ۲۳/۵ درصد، تناسب متوسط برای ۲۶/۷ درصد و تناسب خوب و عالی به ترتیب برای ۳۰/۷ و ۱۹/۲۴ درصد مناطق دشت یزد- اردکان وجود دارد، می توان نتیجه گیری کرد که برق خورشیدی در این منطقه پتانسیل راه اندازی را دارد. به طوری که اگر لایه های محدودیت در نظر گرفته نشوند، ۱۹/۲ درصد از دشت یزد- اردکان، به ویژه در نواحی میبد و یزد، برای احداث نیروگاه خورشیدی مناسب است. با در نظر گرفتن لایه های محدودیت، تنها ۱۵/۵ درصد از اراضی دارای تناسب متوسط و ۸ و ۲/۸ درصد دارای تناسب خوب و عالی هستند. این نتایج به وضوح نشان می دهند که با اضافه کردن لایه های محدودیت، تنها ۲/۸ درصد از نواحی دشت یزد- اردکان برای احداث نیروگاه خورشیدی عالی هستند و باید این نواحی به ویژه در بخش های حاشیه ای شرقی و غربی شهرستان های میبد و یزد در اولویت برنامه ریزی برای احداث نیروگاه ها قرار گیرند. همچنین، طبق آنالیز حساسیت انجام شده، مشخص شد که با تغییر اوزان برای پارامترهای اقلیمی به اوزان برابر یا اوزان بیشتر، میزان تناسب ضعیف اراضی ۳ درصد افزایش یافته و در عوض اراضی با تناسب عالی کاهش یافته اند. این موضوع تأکید می کند که تغییرات در پارامترهای اقلیمی می توانند تأثیرات قابل توجهی بر انتخاب مکان های مناسب برای نیروگاه های خورشیدی داشته باشند، که با یافته های Zarifkar و همکاران (۲۰۲۳) نیز همخوانی دارد.

نصب نیروگاه های خورشیدی با چالش ها و محدودیت هایی همراه است که می تواند تأثیر قابل توجهی بر روند توسعه این فناوری داشته باشد. یکی از مهم ترین چالش ها، نیاز به فضای وسیع برای نصب پنل های خورشیدی است که در مناطق پرجمعیت و با کاربری های مختلف، محدودیت هایی ایجاد می کند (Zheng et al., 2020). همچنین، نوسانات در تولید انرژی خورشیدی به دلیل تغییرات آب و هوایی و شب و روز می تواند به عدم پایداری در تأمین انرژی منجر شود، و این موضوع نیاز به سیستم های ذخیره سازی انرژی را بیشتر می کند (Ali and Kamali, 2021). علاوه بر این، هزینه های اولیه نصب و چالش های مرتبط با تأمین مالی پروژه ها می تواند مانعی برای سرمایه گذاری در این بخش باشد (Fatemi et al., 2022). پایش و ردیابی تغییرات محیطی و اقلیمی در طول زمان برای استقرار نیروگاه های خورشیدی امری ضروری است. این فرآیند به تحلیل دقیق شرایط جوی، از جمله تابش خورشید و دما، کمک می کند و می تواند به بهینه سازی کارایی سیستم کمک کند (Moussa et al., 2021). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی می توانند بر پایداری و طول عمر فناوری های خورشیدی تأثیر بگذارند؛ از این رو، درک این تغییرات برای برنامه ریزی مدل های بهره برداری و اعمال سیاست های انرژی پایدار اهمیت دارد (Kalogirou, 2020). همچنین، داده های جمع آوری شده می توانند به بهبود طراحی و جانمایی نیروگاه ها کمک کرده و ریسک ها را کاهش دهند (Shafiee and Topal, 2019). نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه عوامل مؤثر بر عملکرد نیروگاه های خورشیدی و شناسایی مناطق جدید برای استقرار این فناوری ضروری است. بررسی تأثیر متغیرهای محلی و پژوهش در زمینه تکنولوژی های نوین، مانند پنل های قابل انعطاف، می تواند به بهینه سازی بهره وری و کاهش هزینه ها کمک کند (Hossain et al., 2020; Zhao et al., 2021). این تحقیقات افق های جدیدی برای پذیرش انرژی های تجدیدپذیر در سطح جهانی ایجاد می کنند.

References

- Akçay, M., Atak, M., 2018. Optimal site selection for a solar power plant in Turkey using a hybrid AHP-TOPSIS method. *Celal Bayar University Journal of Science* 14(4), 413-420.
- Ali, A. Kamali, M., 2021. Impact of climate change on solar energy production: A global perspective. *Renewable Energy Review* 58, 245-257.
- Arefi, A., Mohammadian, A., Rahimi, N., 2023. The assessment of suitable locations for solar power plants in Yazd-Ardakan region. *Journal of Renewable Energy* 45(2), 123-135.
- Bahrami, A., Motevali, A., Katibeh, M., 2020. A hybrid approach for solar energy plants site selection using ANP and TOPSIS methods. *Environmental Science and Pollution Research* 27(15), 18486-18499.
- Bardhan, S. K., Tan, S., Babu, M. S. R., 2021. Decision-making in renewable energy systems: A review of multi-criteria decision-making techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149, 111373.
- Beyazoglu, M., Gokoz, A., 2023. Evaluation of environmental and economic aspects of solar energy utilization in arid regions. *Environmental Science and Policy* 72, 245-259.
- Colak, H.E., Memisoglu, T., Gercek, Y., 2020. Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy* 149, 565-576.
- Dashti, A., Arjmand, H., Ramazani, A., 2021. Evaluation of site selection criteria for renewable energy power plants: The case of Iran. *Energy Reports* 7, 789-805.
- Dashti, A., Arjmand, H., Ramazani, A., 2021. Evaluation of site selection criteria for renewable energy power plants: The case of Iran. *Energy Reports* 7, 789-805.
- Goh, H., Li, A., Chang, W., 2022. Site selection for solar power plants using cost-benefit analysis in California. *Energy Policy* 156, 112384.
- Goh, H. H., Li, C., Zhang, D., Dai, W., Lim, C. S., Kurniawan, T. A., 2022. Application of choosing by advantages to determine the optimal site for solar power plants. *Scientific Reports* 12, 4113.
- Huang, Y., Wu, J., Li, B., 2017. A multi-criteria decision-making approach for renewable energy site selection: A case study for urban areas. *Applied Energy* 185, 1130-1138.
- IEA (International Energy Agency), 2021. *World Energy Outlook 2021*. International Energy Agency.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2020. *Renewable Power Generation Costs in 2020*. Available at: IRENA Report 2020.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2019. International Renewable Energy Agency. Available at: www.irena.org.
- Jahangiri, M., Zare, S., Kharazi, M., 2022. Potential of solar energy production in Iran's capital cities: A multi-criteria decision-making approach. *International Journal of Solar Energy Research* 16(1), 45-59.
- Jahangiri, S., Fadaei, S., Zare, A., 2022. Exploring barriers to solar energy development in desert areas. *Sustainable Energy Reviews* 30(6), 250-263.
- Karimi Pour, M., Aliabadi, M., Rahmani, K., 2020. Assessment of solar energy technologies in Iran. *Iranian Journal of Energy* 15(2), 45-60.
- Koolak, H., Celik, M., Yilmaz, O., 2022. Optimal site selection for photovoltaic solar power plants using GIS and AHP: A case study in Malatya, Turkey. *Journal of Cleaner Production* 348, 131214.
- Koulak, J., Das, P., Kumar, S., 2020. Optimization of solar power generation in desert areas. *International Journal of Energy Studies* 11(1), 88-100.
- Kumar, P., Sharma, S., Singh, D., 2020. Multi-criteria decision-making approach for solar power plant site selection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 130, 109917.
- Lelieveld, J., Crutzen, P.J.H.G.H.K., 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371.
- Lotfi, S., Ahmadi, S., Khosravi, H., 2021. Identification of suitable locations for solar power plants in Iran using multi-criteria decision-making methods. *Journal of Renewable Energy Research* 11(2), 123-134.
- Lotfi, M., Nikdel, A., Ranjbar, H., 2021. Evaluating solar energy resources in central Iran. *Journal of Environmental Studies* 12(3), 32-47.
- Malczewski, J., 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: Wiley.

- Mirzaei, A., 2022. Fuzzy logic and multi-criteria decision-making for the suitable location of solar power plants in Turkey. *Renewable Energy* 170, 74-82.
- Mirzaei, S., 2022. Advancements in solar technology for arid climates. *Journal of Solar Applications* 14(1), 55-70.
- Moussa, T., Shaltout, M., Mahmoud, M., 2021. Solar radiation assessment and its impact on solar power generation. *Energy Reports* 7, 120-128.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2016. Available at: www.nrel.gov.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2021. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Available at: www.ren21.net
- Pounse, S., Chaharmahali, A., 2022. The impact of climate conditions on solar energy output. *Renewable Energy Journal* 19(1), 100-115.
- REN21, 2021. Renewable energy policy network for the 21st century. Available at: <https://www.ren21.net>.
- Roos, J., Dorat, A., 2020. Integrating solar energy into urban planning. *Urban Renewable Energy Journal* 5(3), 89-104.
- Sadat, M., Mahmoudi, M., Asadi, A., 2021. Barriers to the development of renewable energy systems in Iran: A comprehensive study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, 110183.
- Shafiee, S., Topal, E., 2019. Solar energy storage systems: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage* 25, 100-113.
- Shau, H., Smith, R., Lee, J., 2020. A study on solar energy potential in arid regions. *Journal of Renewable Energy* 45(3), 123-135.
- Zanakis, S. H., Solomon, A., Wishart, N., Drezner, T., 1998. Multi-attribute decision making: A review of the methods. *European Journal of Operational Research* 107(3), 387-427.
- Zarifkar, A., Hosseini, S., Zare, M., 2023. Sensitivity analysis of climatic parameters in solar power plant site selection. *Energy Conversion and Management* 268, 116968.
- Zhao, Y., Wu, J., Zhang, X., 2021. Flexible solar panels: Innovations and applications in renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 136, 110-123.
- Zheng, Y., Wang, L., Li, J., 2020. Space requirements for solar farms: An assessment and recommendations. *Renewable Energy* 153, 225-233.
- WHO (World Health Organization), 2018. Air Pollution and Health. Available at: WHO Air Pollution.