



Scientific Journal of

Sustainable Development of Geographical Environment



Vol. ??, No. ??, ????

Original Article

Optimal Site Selection of Potential Zones for Solar Power Plant Development in Peri-Urban Areas for Regional Sustainable Development: A Case Study of Bojnord County

Mehdi Zangeneh¹ , Zahra Khani

¹. Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. m.zanganeh@hsu.ac.ir

Abstract

Introduction: The growing demand for energy, the depletion of fossil fuel resources, and the increasing environmental impacts associated with conventional energy production, including greenhouse gas emissions, climate change, and air pollution, have intensified the global transition toward renewable energy resources. Among various renewable energy alternatives, solar energy has received considerable attention because of its abundance, environmental compatibility, and long-term sustainability. Iran is recognized as one of the countries with significant solar energy potential due to its favorable geographical location, high annual solar radiation, and extensive areas suitable for photovoltaic development. Nevertheless, the successful implementation of solar power projects depends largely on selecting appropriate locations that satisfy technical, environmental, economic, and infrastructural requirements. Improper site selection may increase construction and operational costs, reduce energy generation efficiency, and create environmental conflicts. Consequently, scientific site selection has become one of the fundamental stages in renewable energy planning. Geographic Information Systems (GIS), combined with Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques, have proven to be effective tools for evaluating spatial suitability by integrating numerous criteria simultaneously. Accordingly, the present study aims to identify, evaluate, and map suitable areas for solar power plant development in Bojnord County using GIS-based spatial analysis and multi-criteria evaluation in order to support sustainable energy planning and facilitate optimal utilization of the region's solar energy potential.

Materials and Methods: This study is an applied research conducted using a descriptive-analytical approach based on Geographic Information Systems. Twelve effective criteria representing climatic, environmental, technical, and infrastructural conditions were considered in the site selection process. These criteria included solar radiation, slope, distance from urban population centers, distance from rural settlements, distance from roads, distance from power transmission lines, distance from industrial centers, distance from wells, distance from gas transmission lines, distance from agricultural lands, distance from faults, and distance from rivers. The required spatial data were collected from relevant governmental organizations and reliable spatial databases and were processed to produce thematic GIS layers. Since the selected criteria possessed different measurement scales and units, all layers were standardized using fuzzy membership functions to transform them into a common suitability scale ranging from minimum to maximum suitability. The relative importance of each criterion was determined through the Analytic Hierarchy Process (AHP) based on pairwise comparison matrices completed by seventeen experts with relevant professional experience. The weighted criteria were subsequently integrated using the weighted overlay method within the GIS environment to produce the final land suitability map. This integrated framework enabled simultaneous consideration of multiple influencing factors and provided a comprehensive spatial evaluation for identifying the most appropriate locations for solar power plant construction.

Results and Discussion: The spatial analysis revealed considerable variation in land suitability across Bojnord County. The final suitability map indicated that the central parts of the county and several areas with appropriate access to technical infrastructure, particularly electricity transmission lines and transportation networks, possess the highest suitability for solar power plant development. These areas benefit from favorable solar radiation conditions, relatively gentle slopes, and appropriate spatial accessibility, making them more suitable for investment in photovoltaic energy projects. The results further demonstrated that solar radiation, distance from power transmission lines, and slope were the most influential criteria affecting the final suitability pattern, highlighting their critical role in determining optimal locations. Conversely, proximity to rivers, faults, agricultural lands, wells, and other environmentally sensitive areas reduced the suitability of several locations because of environmental protection requirements and technical limitations. The findings indicate that high solar radiation alone cannot guarantee the suitability of a site for photovoltaic development. Instead, a balanced consideration of climatic, environmental, technical, and infrastructural factors is necessary to achieve reliable site selection. The integration of GIS, AHP, fuzzy standardization, and weighted overlay analysis provided a systematic and efficient decision-support framework capable of improving the accuracy and reliability of spatial suitability assessment while reducing uncertainty associated with single-criterion evaluations.

Conclusion: The results of this research demonstrate that Bojnord County possesses considerable potential for solar energy development and contains several highly suitable areas for future photovoltaic power plant construction. The integrated GIS-based multi-criteria evaluation framework employed in this study successfully identified priority locations by simultaneously considering environmental, technical, climatic, and infrastructural factors. The generated suitability map can serve as a practical decision-support tool for planners, policymakers, and investors involved in renewable energy development by facilitating more informed site selection, reducing implementation costs, minimizing environmental impacts, and improving investment efficiency. Furthermore, the methodological framework adopted in this research can be applied to other regions with similar geographical and climatic characteristics to support renewable energy planning and sustainable regional development. The findings contribute to expanding the application of spatial decision-support techniques in renewable energy planning and provide a scientific basis for promoting clean energy production, enhancing energy security, and reducing dependence on fossil fuels in accordance with sustainable development objectives.

Keywords: Solar Power Plant, Site Selection, Regional Sustainable Development, Bojnord

Citation: Zangeneh, M. , Khani, Z. (2026). Locating a solar power plant using GIS techniques (Case study: Bojnord city)



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



مقاله پژوهشی

مکان یابی بهینه پهنه های مستعد استقرار نیروگاه خورشیدی در پیرامون شهرها در راستای توسعه پایدار منطقه ای (مطالعه موردی: شهرستان بجنورد)

مهدی زنگنه^۱ ID، زهرا خانی^۲ ID

۱. گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

چکیده

مقدمه: رشد روزافزون مصرف انرژی، محدودیت منابع سوخت های فسیلی، افزایش هزینه های تأمین انرژی و پیامدهای زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر را به یکی از مهم ترین راهبردهای دستیابی به توسعه پایدار تبدیل کرده است. در میان منابع تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی، پاک بودن، قابلیت دسترسی گسترده و هزینه های بهره برداری پایین، از جایگاه ویژه ای برخوردار است. با این حال، بهره برداری مؤثر از این منبع مستلزم انتخاب مکان هایی است که از نظر اقلیمی، محیطی، فنی و زیرساختی دارای شرایط مطلوب باشند. از این رو، مکان یابی علمی نیروگاه های خورشیدی با استفاده از ابزارهای نوین تحلیل مکانی، نقش مهمی در افزایش بهره وری، کاهش هزینه های سرمایه گذاری، جلوگیری از تعارضات زیست محیطی و ارتقای کارایی پروژه های انرژی ایفا می کند. هدف این پژوهش، شناسایی، ارزیابی و پهنه بندی اراضی مستعد احداث نیروگاه خورشیدی در شهرستان بجنورد با بهره گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ارزیابی چندمعیاره مکانی است تا زمینه استفاده بهینه از ظرفیت انرژی خورشیدی و پشتیبانی از تصمیم گیری های مدیریتی در حوزه توسعه انرژی های تجدیدپذیر فراهم شود.

مواد و روش ها: پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده است. در این مطالعه، دوازده معیار مؤثر در مکان یابی نیروگاه خورشیدی شامل میزان تابش خورشیدی، شیب زمین، فاصله از مراکز جمعیتی شهری و روستایی، راه های ارتباطی، خطوط انتقال برق، مراکز صنعتی، چاه ها، خطوط انتقال گاز، اراضی کشاورزی، گسل ها و رودخانه ها انتخاب شد. این معیارها با توجه به مطالعات پیشین، ویژگی های منطقه مورد مطالعه و نقش آن ها در افزایش بازدهی فنی، کاهش هزینه های اجرایی و رعایت ملاحظات زیست محیطی تعیین شدند. داده های مورد نیاز از سازمان ها و پایگاه های اطلاعاتی معتبر گردآوری و پس از آماده سازی، پردازش و یکسان سازی، لایه های اطلاعاتی متناظر در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تولید شد. به منظور ایجاد قابلیت مقایسه میان معیارهای ناهمگون، تمامی لایه ها با استفاده از توابع استانداردسازی فازی به مقیاس یکسان تبدیل شدند. سپس وزن هر یک از معیارها بر اساس دیدگاه ۱۷ نفر از کارشناسان و متخصصان حوزه های مرتبط تعیین شد و در نهایت، لایه های استاندارد شده با استفاده از روش همپوشانی وزنی (Weighted Overlay) در محیط GIS تلفیق شدند تا نقشه نهایی تناسب اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی استخراج و طبقه بندی شود.

نتایج و بحث: نتایج تحلیل های مکانی نشان داد که بخش هایی از نواحی مرکزی شهرستان بجنورد و مناطقی با دسترسی مناسب به زیرساخت های فنی، به ویژه خطوط انتقال برق، از بیشترین تناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی برخوردار هستند. همچنین، معیارهای تابش خورشیدی، فاصله از خطوط انتقال برق و شیب زمین بیشترین تأثیر را بر الگوی نهایی تناسب اراضی داشته اند، در حالی که نزدیکی به گسل ها، رودخانه ها، اراضی کشاورزی و سایر کاربری های حساس موجب کاهش مطلوبیت برخی نواحی شده است. یافته ها نشان می دهد که انتخاب مکان مناسب مستلزم توجه هم زمان به عوامل محیطی، فنی و زیرساختی است و تلفیق این معیارها در قالب ارزیابی چندمعیاره، دقت شناسایی اراضی مستعد را افزایش می دهد.

نتیجه گیری: یافته های پژوهش نشان داد که شهرستان بجنورد از ظرفیت مناسبی برای توسعه نیروگاه های خورشیدی برخوردار است و به کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) همراه با ارزیابی چندمعیاره و استانداردسازی فازی، روشی کارآمد برای شناسایی اراضی مستعد احداث این



Scientific Journal of

Sustainable Development of Geographical Environment



Vol. ??, No. ??, ????

نیروگاه‌ها به شمار می‌رود. نوآوری این پژوهش در تلفیق هم‌زمان معیارهای اقلیمی، محیطی، فنی و زیرساختی در قالب یک چارچوب مکانی یکپارچه است. نقشه نهایی حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در شهرستان بجنورد و مناطق با شرایط جغرافیایی و اقلیمی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه خورشیدی، مکان یابی، توسعه پایدار منطقه ای، بجنورد

استناد: زنگنه، م. و خانی، ز. ۱۴۰۵. مکان یابی بهینه پهنه های مستعد استقرار نیروگاه خورشیدی در پیرامون شهرها در راستای توسعه پایدار منطقه

ای (مطالعه موردی: شهرستان بجنورد)، توسعه پایدار محیط جغرافیایی: دوره ۹، شماره ۹، ۹۹-۹۹.

دریافت: ۹۹/۹۹/۹۹ بازنگری: ۹۹/۹۹/۹۹ پذیرش: ۹۹/۹۹/۹۹

* رایانامه نویسنده مسئول: m.zanganeh@hsu.ac.ir

مقدمه

سوخت‌های فسیلی منابعی محدود هستند و استفاده از آن‌ها پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای را به همراه دارد. همچنین کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، تخریب لایه اوزون و افزایش بیماری‌های ناشی از آلودگی‌های زیست‌محیطی، تهدیدهای جدی برای جوامع انسانی ایجاد کرده است (Ahmadi et al., 2016). به طور کلی، مصرف سوخت‌های فسیلی آثار نامطلوب متعددی بر محیط‌زیست و جامعه دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به انتشار دی‌اکسید کربن و آلودگی هوا، افزایش دمای متوسط کره زمین، تشدید بحران‌های طبیعی، ناامنی غذایی، آبی و انرژی، تهدید رفاه انسانی، ایجاد مانع در مسیر توسعه پایدار و تسریع روند کاهش منابع طبیعی اشاره کرد. در نتیجه، طی سال‌های اخیر توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی افزایش یافته است؛ به گونه‌ای که میزان سرمایه‌گذاری جهانی در این حوزه در سال ۲۰۱۲ به بیش از ۲۶۹ میلیارد دلار رسیده است. از سوی دیگر، ایران در سال‌های اخیر با چالش تأمین برق پایدار مواجه بوده است. با توجه به گستردگی جغرافیایی سکونتگاه‌های انسانی در کشور، هزینه انتقال برق به بسیاری از مناطق نسبتاً بالا است. از این‌رو، توسعه نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای جبران کمبود برق و تأمین انرژی پایدار، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Taghvaei & Saboohi, 2017). علاوه بر این، استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه با بسیاری از روش‌های متداول انتقال انرژی به روستاها و مناطق دورافتاده، از نظر هزینه‌های اجرا، حمل‌ونقل، نگهداری و بهره‌برداری دارای مزایای قابل توجهی است (Ghasempour et al., 2022). ایران از نظر منابع انرژی در منطقه خاورمیانه جایگاه ویژه‌ای دارد. هرچند تراز انرژی کشور نشان‌دهنده تعادل نسبی میان تولید و مصرف انرژی است، اما این تعادل عمدتاً بر پایه سوخت‌های فسیلی شکل گرفته است. از این‌رو، به منظور کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و افزایش امنیت انرژی، توسعه و افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور به یکی از اهداف مهم سیاست‌گذاری انرژی تبدیل شده است (Khodkam, 2025). با وجود ظرفیت بالای کشور در زمینه بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، انتخاب مکان مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی همچنان یکی از چالش‌های اساسی در فرآیند توسعه این فناوری محسوب می‌شود. از آنجا که عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های توپوگرافی، شرایط اقلیمی، دسترسی به زیرساخت‌ها و محدودیت‌های محیطی در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی نقش دارند، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری مکانی و تحلیل‌های مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی ضروری است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی در منطقه مورد مطالعه، از تلفیق معیارهای مؤثر و روش ارزیابی چندمعیاره در محیط GIS بهره گرفته است تا زمینه لازم برای برنامه‌ریزی بهینه و توسعه پایدار انرژی خورشیدی فراهم شود. امروزه بیش از ۸۰ درصد انرژی مصرفی جهان از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. اگرچه این منابع به دلیل تراکم انرژی بالا و سهولت استفاده، نقش مهمی در توسعه جوامع ایفا کرده‌اند، اما پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها ضرورت بهره‌گیری از منابع



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

انرژی پاک را بیش از پیش آشکار ساخته است. از آنجا که حفظ سلامت اتمسفر یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای دستیابی به توسعه پایدار به شمار می‌رود، استفاده از منابع انرژی بدون کربن نظیر انرژی خورشیدی، زیست‌توده و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است (Ahmadi et al., 2016). ایران به دلیل برخورداری از شرایط اقلیمی مناسب، میزان قابل توجه تابش خورشیدی در اغلب مناطق کشور و همچنین وجود ظرفیت‌های بالقوه در سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، از قابلیت بالایی برای توسعه انرژی‌های نو برخوردار است (Taghvaei & Saboohi, 2017). سامانه‌های خورشیدی علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌توانند نقش مؤثری در افزایش امنیت انرژی، ایجاد فرصت‌های شغلی، توسعه زیرساخت‌های مناطق روستایی و ارتقای کیفیت زندگی ایفا کنند. در میان فناوری‌های مختلف انرژی خورشیدی، نیروگاه‌های فتوولتائیک به عنوان یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تأمین پایدار انرژی در آینده شناخته می‌شوند (Ghasempour et al., 2023). ایران با برخورداری از حدود ۳۰۰ روز آفتابی در سال و میانگین تابش سالانه حدود ۲۲۰۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع، از ظرفیت بسیار مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برخوردار است. با این حال، تفاوت‌های اقلیمی، جغرافیایی و توپوگرافی در نقاط مختلف کشور سبب می‌شود که انتخاب مکان مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های این حوزه تبدیل شود؛ زیرا میزان بهره‌وری و عملکرد نیروگاه به طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های مکانی محل استقرار آن قرار دارد. بنابراین، به منظور دستیابی به حداکثر تولید انرژی، افزایش بازده اقتصادی و کاهش هزینه‌های اجرایی، ارزیابی و شناسایی مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی ضروری است (Khodkam, 2025). بر این اساس، تعیین مکان بهینه برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی نیازمند بهره‌گیری از رویکردهای علمی و نظام‌مند است تا ضمن افزایش کارایی تولید انرژی، از اتلاف منابع مالی و فنی در فرآیند توسعه زیرساخت‌های تولید برق جلوگیری شود (Davoudbaharvandi et al., 2024). هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و پهنه‌بندی اراضی مستعد احداث نیروگاه‌های خورشیدی در شهر بجنورد با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش ارزیابی چندمعیاره فضایی است. در این راستا، معیارهای محیطی، فنی و زیرساختی مؤثر بر استقرار نیروگاه‌های خورشیدی شامل میزان تابش خورشیدی، شیب زمین، فاصله از شبکه انتقال برق، کاربری اراضی، فاصله از راه‌های ارتباطی و منابع آب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این پژوهش با هدف تعیین مناسب‌ترین پهنه‌ها برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی و ارائه چارچوبی علمی برای تصمیم‌گیری مکانی انجام شده است. نتایج حاصل می‌تواند در برنامه‌ریزی، مدیریت و سرمایه‌گذاری در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد و زمینه بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌های طبیعی منطقه را فراهم سازد.

در بررسی پیشینه‌ی پژوهش حاضر، چند پژوهش را می‌توان معرفی کرد؛ از جمله آن‌ها:

احمدی و همکاران^۱ (۲۰۱۶) در پژوهشی که با عنوان مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از داده‌های اقلیمی و سامانه اطلاعات مکانی استان ایلام انجام دادند، ۱۲ شاخص به‌عنوان معیار و محدودیت بررسی شده‌اند و میزان تأثیر هر یک با استفاده از روش AHP تعیین شده است. در نهایت، با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف و اعمال محدودیت‌ها، محدوده‌ی مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی تعیین گردید.

القارانی و الواستی^۲ (۲۰۱۷) در پژوهشی، یک تجزیه و تحلیل چهارمرحله‌ای برای تسهیل تصمیم‌گیری در انتخاب سایت مزرعه‌های خورشیدی ارائه کردند. این مراحل شامل: (۱) استفاده از روش AHP فازی برای وزن‌دهی معیارها، (۲) ارزیابی سایت‌های نامزد با استفاده از روش OWA در ArcGIS، (۳) حذف سایت‌های نامناسب، و (۴) اولویت‌بندی نهایی مکان‌های مناسب برای نیروگاه خورشیدی بود.

^۱. Ahmadi et al

^۲. Alqarni & Alwasti

عسکری (۲۰۱۷) از منطق فازی و توابع عضویت فازی برای ایجاد لایه‌های معیار در محیط GIS و از روش AHP برای وزن‌دهی معیارهای فناورانه و زیست‌محیطی استفاده کرده و در نهایت، نقشه‌ی نهایی مکان‌یابی مزارع خورشیدی را تهیه کردند.

مهاجری (۲۰۱۶) در مطالعه‌ی تأثیرات تراکم شهری بر پتانسیل انرژی خورشیدی در منطقه‌ی ۴ شهرستان اهواز را بررسی کردند. در این مطالعه با توجه به روند رو به افزایش انبوه‌سازی و ساخت مجتمع‌های مسکونی، تأکید شده که استفاده از انرژی طبیعی خورشید در طراحی تراکم شهری الزامی است.

یوسفی و همکاران (۲۰۱۸) پتانسیل انرژی خورشیدی استان مرکزی را بررسی کرده و پس از انتخاب محل مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی، جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی پروژه را نیز تحلیل کردند.

اولفمی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از معیارهایی نظیر جمعیت، شیب، گسل، مناطق زمین‌لغزشی، مناطق سیلابی، رودخانه‌ها، مناطق حفاظت‌شده محیط‌زیستی، نزدیکی به خطوط انتقال نیرو و تابش خورشیدی، به روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مکان‌های مستعد برای احداث انواع نیروگاه (خورشیدی، اتمی، ذغالی و سوخت فسیلی) را رتبه‌بندی و شناسایی کردند.

سلیمانی مقدم (۲۰۲۲) امکان استفاده از انرژی خورشیدی در روستاهای شهرستان جوبین (استان خراسان رضوی) را بررسی کرد. در این تحقیق، با استفاده از تحلیل تابش در محیط GIS، نقشه‌ی پهنه‌بندی تابش خورشیدی برای ۱۱۳ روستای فعال شهرستان تهیه شده و در نهایت، روستاهای حکم‌آباد و قلعه‌نو به‌عنوان پهنه‌های دارای پتانسیل عالی شناسایی شدند. مطالعه نشان داد که روستاهای کم‌جمعیت و صعب‌العبور پتانسیل بیشتری برای استفاده از انرژی خورشیدی دارند.

امامی و اسدزاده (۲۰۲۱) با هدف مکان‌یابی بهینه انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی، دو عامل اصلی یعنی فاصله از مراکز جمعیتی و صنعتی را تحلیل کرده و مناطق مناسب برای احداث نیروگاه را در پنج کلاس از نامناسب تا بسیار مناسب دسته‌بندی نمودند. نتایج نشان داد که به ترتیب ۵۱٪ و ۳۰٪ پتانسیل انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی در مناطق مناسب و بسیار مناسب قرار دارد.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) با روش‌های ارزیابی چندمعیاره، یکی از رویکردهای پرکاربرد در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی بوده است. مهم‌ترین نقاط قوت این مطالعات، استفاده از معیارهای متنوع محیطی، فنی و زیرساختی و ارائه چارچوب‌هایی برای شناسایی پهنه‌های مستعد توسعه انرژی خورشیدی است. با این حال، نتایج این پژوهش‌ها به دلیل تفاوت‌های اقلیمی، توپوگرافی و زیرساختی، قابلیت تعمیم یکسان به تمامی مناطق را ندارند. همچنین در برخی مطالعات، توجه بیشتری به عوامل طبیعی معطوف بوده و نقش برخی معیارهای فنی و زیرساختی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تاکنون ارزیابی جامعی برای مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در شهر بجنورد با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای محیطی، فنی و زیرساختی انجام نشده است. از این رو، خلأ اصلی، نبود یک تحلیل مکانی یکپارچه برای شناسایی اراضی مستعد احداث نیروگاه خورشیدی در محدوده مورد مطالعه است. در همین راستا، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، استانداردسازی فازی معیارها و تلفیق آن‌ها در قالب ارزیابی چندمعیاره مکانی، به شناسایی و پهنه‌بندی اراضی

^۱. Askari et al

^۲. Mohajeri et al.

^۳. Yousefi et al

^۴. Olufemi et al

^۵. Soleimani Moghaddam

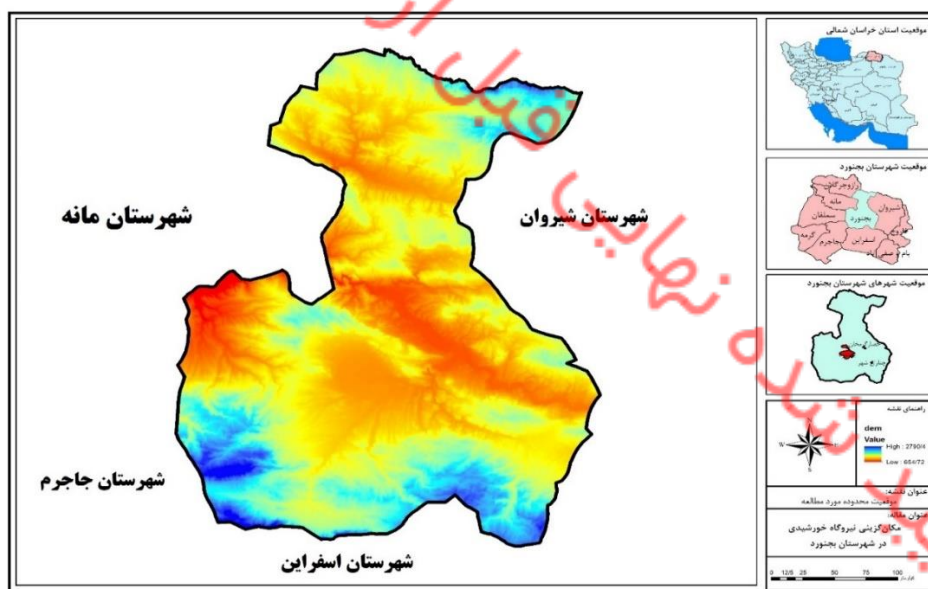
^۶. Emami & Asadzadeh

مناسب برای احداث نیروگاه های خورشیدی در شهر بجنورد می پردازد. نتایج این پژوهش می تواند مبنایی علمی برای برنامه ریزی، مدیریت و سرمایه گذاری در توسعه انرژی خورشیدی در منطقه فراهم آورد.

مواد و روش ها

محدوده مورد مطالعه

شهرستان بجنورد به مرکزیت شهر بجنورد که یکی از شهرستان های تابع استان خراسان شمالی است. این شهرستان از شمال با ترکمنستان، از جنوب با اسفراین و جاجرم، از شرق با شیروان و از غرب با مانه و سملقان مرز مشترک دارد. شهرستان بجنورد مساحتی در حدود ۶۵۶۳ کیلومتر مربع دارد. این مساحت شامل ۳ شهر، ۳ بخش، ۸ دهستان و ۲۳۲ آبادی است. جمعیت این شهرستان ۳۲۴۰۸۳ نفر (سرشماری ۹۵) می باشد. شهرستان بجنورد بر روی دشتی نسبتاً پهناور بین کوه های آلاداغ در جنوب و غرب و کوه های کپه داغ (بابا موسی) در شمال و شرق واقع شده است. وسعت دشت بجنورد، حدود یکصد کیلومتر مربع و متوسط ارتفاع آن از سطح دریا ۱۱۰۰ متر می باشد. کل جمعیت شهرستان بجنورد براساس آمار سرشماری سال ۱۳۹۵، تعداد ۲۳۳۸۱۰ نفر ساکن سه نقطه شهری بجنورد، حصارگرخان و چناران شهر که ۷۲،۱۴ درصد از کل جمعیت را شامل می شوند و تعداد ۹۰۲۷۳ نفر برابر با ۲۷،۸۶ درصد ساکن ۱۵۲ نقطه روستایی هستند. شهر بجنورد نیز پرجمعیت ترین شهر استان می باشد. شهرستان بجنورد دارای ۹۴۴۵۷ خانوار، که از این تعداد ۶۸۷۵۳ خانوار ساکن در نقاط شهری و ۲۵۷۰۴ خانوار ساکن در نقاط روستایی و ۰ خانوار نیز به صورت غیرساکن می باشد. (منبع: وب سایت شهرداری بجنورد)

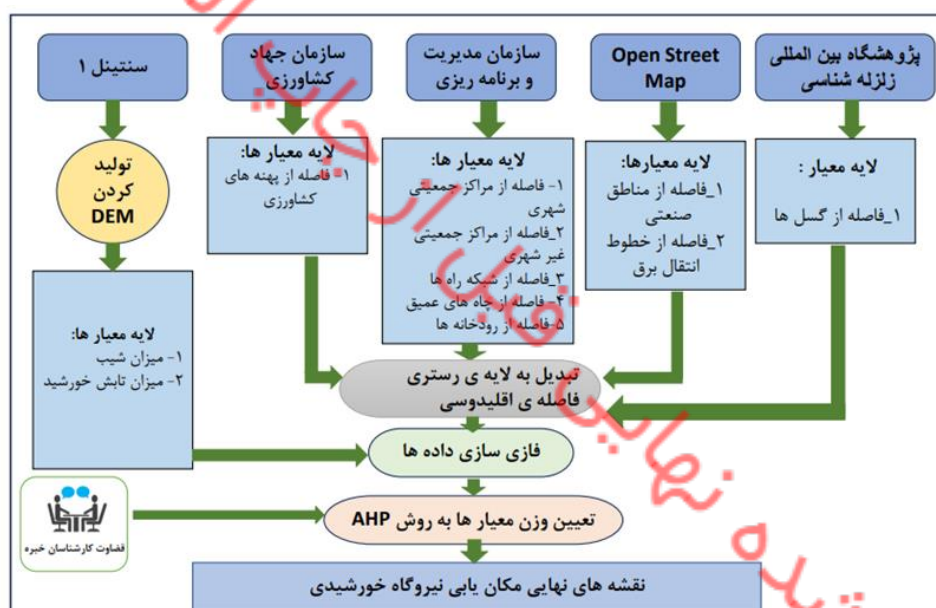


شکل ۱. موقعیت شهرستان بجنورد (منبع: یافته های پژوهش، ۱۴۰۴)

روش پژوهش

مراحل انجام پژوهش در فلوچارت تحقیق ارائه شده است. در گام نخست، معیارهای مؤثر بر مکان یابی نیروگاه خورشیدی بر اساس مطالعات پیشین و نظر متخصصان انتخاب شدند. این معیارها شامل میزان تابش خورشیدی، شیب، فاصله از خطوط انتقال برق، فاصله از راه های ارتباطی، فاصله از مراکز جمعیتی، فاصله از منابع آب، فاصله از گسل ها، فاصله از پهنه های کشاورزی و سایر معیارهای مؤثر بر استقرار نیروگاه خورشیدی بودند. به منظور تهیه لایه های اطلاعاتی، داده های مورد نیاز از سازمان ها و پایگاه های اطلاعاتی معتبر گردآوری شد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) از پردازش تصاویر راداری

ماهواره Sentinel-1 تهیه گردید و بر اساس آن لایه شیب در محیط نرم افزار ArcGIS 10.6.1 تولید شد. همچنین نقشه تابش خورشیدی با استفاده از ابزار Solar Radiation و بر پایه مدل رقومی ارتفاع منطقه تهیه گردید. لایه‌های مراکز جمعیتی شهری و روستایی، راه‌ها و منابع آب از سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان خراسان شمالی، پهنه‌های کشاورزی از سازمان جهاد کشاورزی استان، خطوط انتقال برق و مناطق صنعتی از پایگاه OpenStreetMap و لایه گسل‌ها از پایگاه IIEES دریافت شدند. پس از آماده‌سازی داده‌ها، به منظور ایجاد قابلیت مقایسه میان معیارهای مختلف، تمامی لایه‌ها استانداردسازی شدند. لایه‌های رستری نظیر شیب و تابش خورشیدی با استفاده از توابع عضویت فازی استاندارد شدند. همچنین لایه‌های برداری پس از محاسبه فاصله اقلیدوسی (Euclidean Distance) و تبدیل به فرمت رستری، با استفاده از توابع فازی مناسب از نوع کمینه‌سازی و بیشینه‌سازی به مقیاس یکسان تبدیل شدند. در این پژوهش، استانداردسازی فازی صرفاً با هدف هم‌مقیاس‌سازی معیارها و تبدیل مقادیر آن‌ها به بازه صفر تا یک انجام شد. در مرحله بعد، وزن معیارها بر اساس نظر ۱۷ نفر از کارشناسان و متخصصان حوزه‌های مرتبط تعیین گردید. سپس لایه‌های استاندارد شده با اعمال وزن هر معیار در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تلفیق شدند و از طریق تحلیل همپوشانی وزنی، نقشه نهایی تناسب اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی در محدوده مورد مطالعه استخراج شد.



شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام پژوهش

سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی GIS

سیستم‌های اطلاعاتی جغرافیایی سامانه ای کامپیوتری است که به تولید پردازش تحلیل و مدیریت داده ها و اطلاعات جغرافیایی می پردازد. به عبارت دیگر GIS یک سامانه کامپیوتری برای مدیریت و واکاوی اطلاعات جغرافیایی بوده که توانایی گردآوری، ذخیره واکاوی و نمایش اطلاعات جغرافیایی را دارد. (Ahmadi et al., 2016). مکان استقرار نیروگاه ای خورشیدی می تواند اقتصادی بودن آنها را تحت الشعاع قرار دهد؛ لذا برای تعیین مکان های بالقوه استقرار نیروگاه خورشیدی یافتن یک فضای شدنی از نظر محدودیت های عوارض طبیعی و غیر طبیعی شرط اولیه خواهد بود. داده های GIS از جمله داده های عوارض طبیعی و غیر طبیعی، شیب زمین و تابش خورشید منطقه مورد مطالعه و همچنین شناسایی معیارهای تأثیر گذار بر احداث نیروگاه های خورشیدی از نوع کتابخانه ای است که در قالب نقشه های جغرافیایی از سازمان های مختلف تهیه می شوند.

انرژی خورشیدی

انرژی ستاره خورشید یکی از منابع انرژیهای تجدید پذیر و از منابع عمده تأمین انرژی در منظومه شمسی است که در نتیجه گرما و نور تولید شده توسط خورشید تولید می شود. انرژی متصادم شده از خورشید در حدود ۳/۸ در ۱۰۲۳ کیلووات در ثانیه است که یک سوم آنها در فضا پخش می شوند و بقیه به صورت انرژی گرما و نور به زمین می رسند؛ بنابراین سهم زمین در دریافت انرژی از خورشید میزان کمی از کل انرژی تابشی آن است. (Gunerhan, ۲۰۰۷)

انرژی های تجدید پذیر

انواعی از انرژی ها وجود دارند که قابلیت برگشت پذیری در یک مدت زمان کوتاه دارند زیرا منبع اصلی تولید آنها امکان تولید مجدد دارد این انرژی اشکال مختلفی دارد مثل انرژی خورشیدی، باد، انرژی سوخت های گیاهی، انرژی هیدروژن، انرژی اقیانوسی، انرژی امواج دریاها و اقیانوسها، انرژی جزر و مد دریاها و اقیانوسها، و انرژی برق آبی میباشد که به صورت رایگان و به وفور در طبیعت یافت می شوند (Ghaed et al., 2019)

نتایج و بحث

کیفیت و نتایج هر فرآیند تصمیم گیری به معیارهای استفاده شده وابسته است و این معیارها باید تا حد ممکن کامل و حداقل باشد. در این پژوهش بر اساس پژوهش های پیشین تعداد ۱۲ معیار شامل جدول ۱ انتخاب شده است. در انتخاب معیار ها با توجه به محدوده ی مورد مطالعه از پراهمیت ترین آنها استفاده شده است. همچنین برای انتخاب معیار ها در دسترس بودن داده نیز مورد توجه بوده است

جدول (۱): معیار های استفاده شده در پژوهش (منابع مختلف)

ردیف	معیار ها	توضیحات	منبع
۱	تابش خورشیدی	نقشه ی تابش خورشیدی پتانسیل تابش در یک منطقه را نشان میدهد هرچقدر میزان تابش خورشیدی رسیده به یک متر مربع از سطح زمین در طول یکسال بیشتر باشد اهمیت بیشتری دارد	Charabi, Y. and A. Gastli (2011)
۲	شیب	نسبت تغییرات ارتفاع به فواصل افقی شیب نامیده می شود و هر چقدر شیب بیشتر باشد هزینه ی ساخت بالاتر میرود	Emami, H.; Asadzadeh, S. A.; (2021)
۳	مراکز جمعیتی شهری	نزدیکی نیروگاه به مراکزی که مصرف بالایی دارند بسیار مهم است به علاوه توجه به پراکندگی مکانی مصرف کننده ها هم ضروری میباشد چون هدف از نزدیک بودن نیروگاه به مراکز مصرف، کاستن از هزینه ی انتقال نیرو به آن مراکز و کاهش اتلاف انرژی است. محدوده ی شهر بجنورد بیشتر جمعیت منطقه ی مورد مطالعه را در خود جای داده است در نتیجه نزدیک بودن نیروگاه خورشیدی به آن از اهمیت زیادی برخوردار است.	Nohegar, A., et al. (2016)
۴	راه ها	نزدیکی نیروگاه به راه ها باعث کاهش هزینه های حمل و نقل تجهیزات نیروگاه، رفت و آمد کارکنان و پشتیبانی از نیروگاه می شود. به همین دلیل نقشه ی راه ها و جاده ها در احداث نیروگاه خورشیدی اهمیت بالایی دارد.	Ayough, A., Boshruai, S., & Khorshidvand, B. (2022).
۵	مراکز جمعیتی غیر شهری	مراکز جمعیتی غیر شهری که روستاهای شهرستان را در بر میگیرد. یکی از مهم ترین اهداف نیروگاه های خورشیدی تأمین برق مورد نیاز ساکنین روستاها و نیز به خدمت گرفتن این برق برای تاسیسات کشاورزی و آبیاری است و هر چه نیروگاه خورشیدی به این اماکن نزدیک تر باشد بهره وری بیش تری به همراه خواهد داشت.	Monjezi et al, (۲۰۲۳)
۶	خطوط انتقال برق	برق تولیدی هر نیروگاه برای توزیع در شبکه نیاز به خطوط انتقال نیرو دارد. فاصله نیروگاه از خطوط برق شبکه که بتواند خروجی نیروگاه را قبول کند بسیار اهمیت دارد؛ زیرا که افزایش این خطوط علاوه بر بالا بردن هزینه پروژه باعث تلفات برق تولید شده در شبکه نیز می شود.	Nohegar, et al. (۲۰۱۶)
۷	مراکز صنعتی	شهرک های صنعتی از مهمترین عوامل مصرف بار به حساب می آیند لذا ضرورت دارد که مراکز تولید انرژی به آن ها نزدیک باشند؛ اما به علت تولید آلودگی های احتمالی برخی کارخانه ها در شهرک های صنعتی باید فاصله ی مناسب را رعایت کرد.	Monjezi et al, (۲۰۲۳)

Monjezi et al, (۲۰۲۳)	چاه‌های عمیق بیش تر در اراضی کشاورزی واقع در بخش مرکزی شهر بجنورد منطقه مورد مطالعه و در بین زمین های حاصلخیز کشاورزی دایر شده اند. با توجه به اینکه این چاه ها برای استخراج آب از برق استفاده میکنند و بیشتر آنها دارای خانه های ویلایی هستند و نیاز به برق دارند، لذا هر چه نیروگاه خورشیدی به آنها نزدیک تر باشد، مناسب تر خواهد بود.	چاه ها	۸
Monjezi et al, (۲۰۲۳)	نیروگاه خورشیدی نیاز به سوخت های فسیلی ندارد هر چقدر دور تر از این تاسیسات قرار گیرد مناسب تر است.	خطوط انتقال گاز	۹
Sindhu et al, 2017	با توجه به اهمیت زمین های کشاورزی در محدوده ی مورد مطالعه تبدیل کردن این زمین ها به محل احداث نیروگاه آسیب جدی به کشاورزی منطقه وارد میکند لذا دور بودن از زمین های کشاورزی مناسب تر خواهد بود.	پهنه های کشاورزی	۱۰
Besharatifard et al, 2022	نیروگاههای خورشیدی نباید در مجاورت گسل استقرار یابند، جایی که گسل ها در صورت لغزش گل یا زمین لغزش آسیب ها و با توجه خسارت های زیادی به تأسیسات نیروگاه وارد میکنند.	گسل ها	۱۱
Solangi et al, 2019	وجود ابراهه های متعدد و پرشیب خطر وقوع سیلاب های شدید را گوشزد می کند، داشتن فاصله مناسب از شبکه زهکشی و آبراهه های فصلی برای در امان ماندن نیروگاه از سیلاب و تخریب اهمیت فوق العاده دارد، لذا هر چه فاصله از آبراهه ها و شبکه های زهکشی بیش تر باشد مکان یابی مناسب تر است.	رودخانه ها	۱۲

بعد از انتخاب معیار های مناسب داده های مکانی لازم برای مکان یابی نیروگاه خورشیدی و تهیه ی لایه ی مکانی معیار ها جمع آوری می شود در ادامه، برای تهیه ی لایه ی فضایی هر معیار از تحلیل های فضایی مناسب شامل Slope, Euclidian Distance و Extract by Mask در محیط ArcGIS ۱۰٫۶٫۱ استفاده شده است.

جدول (۲): داده های مکانی لازم برای تهیه ی لایه فضایی آنها

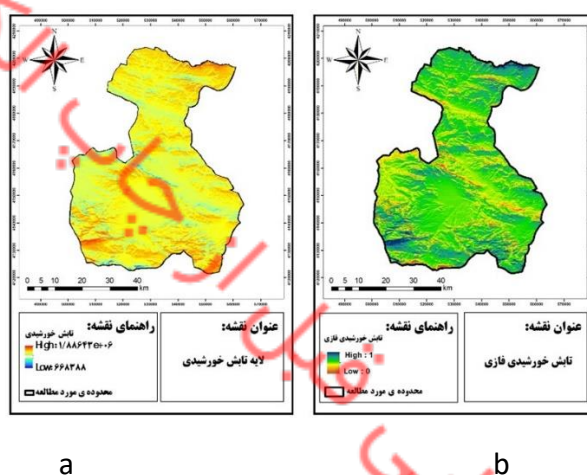
ردیف	معیار	داده ی مکانی	منبع داده
۱	تابش خورشیدی	تلفیق لایه های مدل ارتفاع رقومی DEM، نقشه شیب و نقشه جهت شیب	تلفیق لایه های ذکر شده در ArcGIS ۱۰٫۶٫۱
۲	شیب	مدل ارتفاع رقومی DEM	ساخت با ابزار Slope در ArcGIS ۱۰٫۶٫۱
۳	مراکز جمعیتی شهری	مراکز شهری استان خراسان شمالی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان شمالی
۴	راه ها	راه های استان خراسان شمالی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان شمالی
۵	مراکز جمعیتی غیر شهری	روستاهای استان خراسان شمالی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان شمالی
۶	خطوط انتقال برق	خطوط انتقال	https://www.openstreetmap.org
۷	مراکز صنعتی	مراکز صنعتی استان خراسان شمالی	https://www.openstreetmap.org
۸	چاه ها	چاه های استان خراسان شمالی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان شمالی
۹	خطوط انتقال گاز	خطوط انتقال گاز استان خراسان شمالی	https://www.openstreetmap.org
۱۰	پهنه های کشاورزی	پهنه های کشاورزی استان خراسان شمالی	سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان شمالی
۱۱	گسل ها	گسل های استان خراسان شمالی	https://www.iiees.ac.ir
۱۲	رودخانه ها	رودخانه های استان خراسان شمالی	سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان خراسان شمالی

نقشه ی معیار های مورد استفاده

میزان تابش خورشیدی

میزان تابش خورشیدی یکی از مهم ترین معیارهای مؤثر در مکان یابی نیروگاه های خورشیدی محسوب می شود؛ زیرا عملکرد و بازده سامانه های فتوولتائیک به طور مستقیم به مقدار انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین وابسته است. هرچه میزان تابش خورشیدی بیشتر باشد، انرژی الکتریکی تولید شده توسط پنل های خورشیدی نیز افزایش یافته و بهره وری اقتصادی نیروگاه بهبود می یابد. از این رو، این معیار در اغلب مطالعات مکان یابی نیروگاه های خورشیدی به عنوان

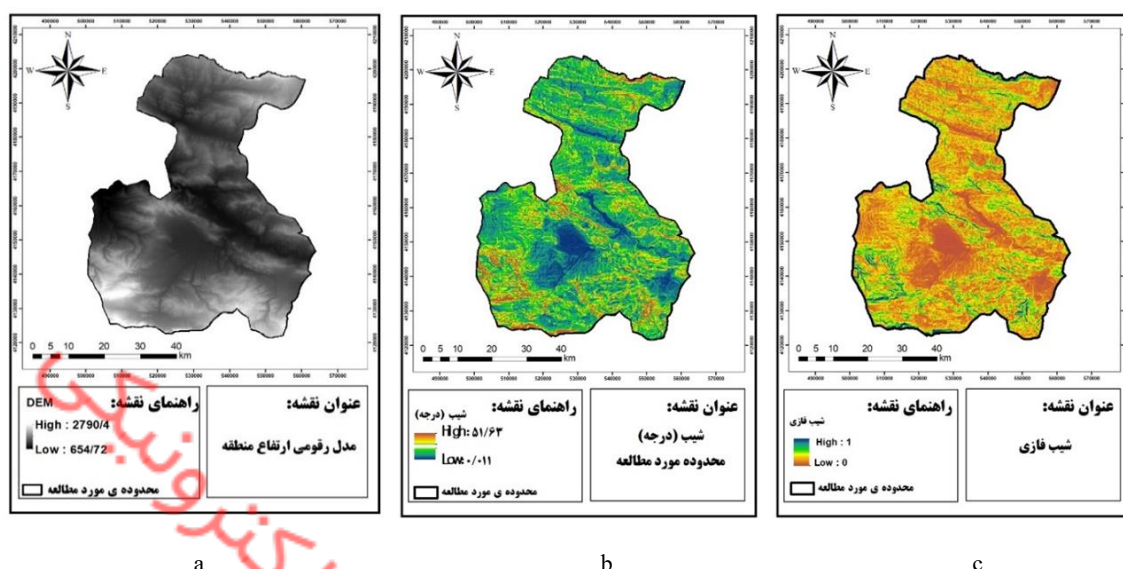
یکی از عوامل اصلی تصمیم‌گیری مورد توجه قرار می‌گیرد. مقدار تابش خورشیدی معمولاً بر حسب وات‌ساعت بر مترمربع (Wh/m^2) یا کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز ($\text{kWh/m}^2/\text{day}$) بیان می‌شود. (Ahmadi et al., 2016) در این پژوهش، نقشه تابش خورشیدی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و با در نظر گرفتن عوامل توپوگرافی مؤثر شامل شیب و جهت شیب تهیه شد. در این فرایند، تأثیر ویژگی‌های ناهمواری زمین بر میزان دریافت انرژی خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت؛ زیرا جهت قرارگیری سطوح و میزان شیب آن‌ها می‌تواند مقدار تابش دریافتی را تغییر دهد. بدین ترتیب، با تلفیق لایه‌های مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه پراکنش فضایی تابش خورشیدی در محدوده مورد مطالعه تولید شد. با توجه به نقش تعیین‌کننده تابش خورشیدی در میزان تولید انرژی، این معیار در فرایند فازی‌سازی به‌صورت افزایشی (Max) استاندارد شد؛ به‌طوری‌که مناطق دارای مقادیر بیشتر تابش خورشیدی، امتیاز مطلوبیت بالاتری دریافت کردند. در نتیجه، نواحی برخوردار از تابش بیشتر به‌عنوان گزینه‌های مناسب‌تر برای استقرار نیروگاه خورشیدی شناسایی شدند.



شکل (۳): a لایه تابش خورشیدی بر حسب وات ساعت بر متر مربع، b لایه تابش خورشیدی فازی شده خطی

شیب (درجه)

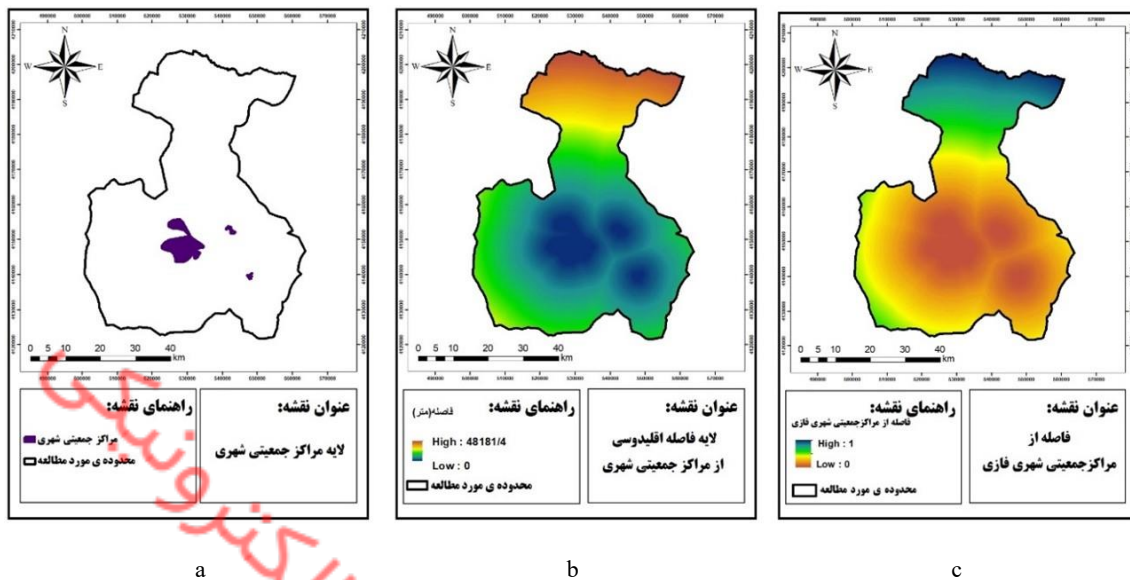
شیب یکی از مهم‌ترین عوامل توپوگرافی مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی است و به میزان انحراف سطح زمین از سطح افق اطلاق می‌شود. این معیار نقش مهمی در هزینه‌های آماده‌سازی زمین، عملیات اجرایی و بهره‌برداری از نیروگاه دارد. به‌طور کلی، با افزایش شیب زمین، هزینه‌های تسطیح، خاک‌برداری، احداث زیرساخت‌ها و نصب تجهیزات افزایش می‌یابد که می‌تواند توجیه اقتصادی پروژه را تحت تأثیر قرار دهد. (Taghvayi & Sabouhi, 2017) از آنجا که استقرار پنل‌های خورشیدی در اراضی نسبتاً هموار از نظر فنی و اقتصادی مطلوب‌تر است، مناطق دارای شیب کم برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب‌تر شناخته می‌شوند. همچنین، زمین‌های کم‌شیب امکان استقرار منظم پنل‌ها، دسترسی آسان‌تر به تجهیزات و کاهش هزینه‌های نگهداری را فراهم می‌کنند. در مقابل، افزایش شیب زمین علاوه بر تحمیل هزینه‌های اجرایی بیشتر، می‌تواند محدودیت‌هایی در طراحی و آرایش پنل‌های خورشیدی ایجاد کند. (Ghasempour et al., 2022) در این پژوهش، نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج و بر حسب درجه تهیه شد. سپس به منظور استفاده در فرایند ارزیابی تناسب مکانی، این معیار به صورت کاهشی (Min) فازی‌سازی گردید؛ به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار شیب، میزان مطلوبیت اراضی برای استقرار نیروگاه خورشیدی کاهش می‌یابد. بنابراین، نواحی دارای شیب کمتر در مقایسه با مناطق پرشیب، امتیاز تناسب بیشتری برای احداث نیروگاه خورشیدی کسب کردند.



شکل (۴): a: مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه، b: لایه شیب برحسب درجه، c: شیب فازی شده خطی

فاصله از مراکز جمعیتی شهری

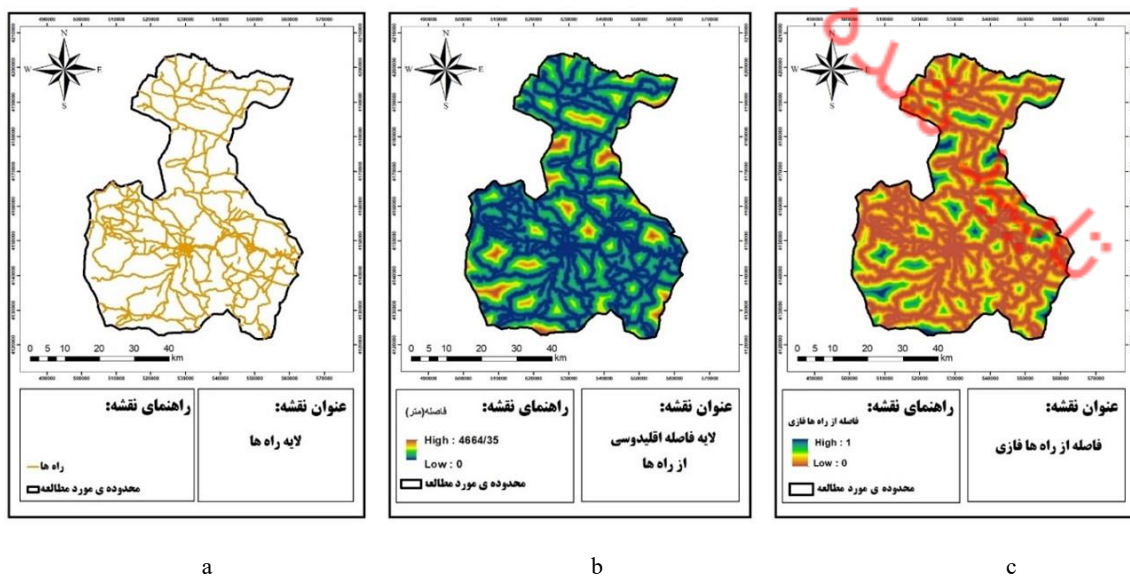
فاصله از مراکز جمعیتی شهری یکی از معیارهای مهم در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی محسوب می‌شود؛ زیرا این مراکز به‌عنوان کانون‌های اصلی مصرف انرژی شناخته می‌شوند. احداث نیروگاه در نزدیکی مراکز جمعیتی می‌تواند موجب کاهش طول خطوط انتقال، کاهش هزینه‌های احداث و نگهداری شبکه و همچنین کاهش تلفات انرژی در فرآیند انتقال برق شود. از این رو، نزدیکی به مراکز شهری از دیدگاه فنی و اقتصادی یکی از عوامل مؤثر در افزایش کارایی و توجیه‌پذیری پروژه‌های انرژی خورشیدی به شمار (Ghasempour et al., 2022). در محدوده مورد مطالعه، شهر بجنورد به‌عنوان بزرگ‌ترین مرکز جمعیتی شهرستان و مهم‌ترین مصرف انرژی در نظر گرفته شد. بنابراین، اراضی واقع در فاصله کمتر از مراکز جمعیتی، به دلیل دسترسی مناسب‌تر به بازار مصرف و زیرساخت‌های موجود، از مطلوبیت بیشتری برای استقرار نیروگاه خورشیدی برخوردار هستند. در مقابل، افزایش فاصله از مراکز شهری موجب افزایش هزینه‌های انتقال برق، توسعه زیرساخت‌های شبکه و تلفات انرژی شده و در نتیجه از میزان تناسب مکانی این مناطق می‌کاهد. در این پژوهش، نقشه فاصله از مراکز جمعیتی شهری با استفاده از ابزار فاصله‌سنجی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شد. سپس این معیار به صورت کاهش (Min) فازی‌سازی گردید؛ به‌گونه‌ای که با افزایش فاصله از مراکز جمعیتی، میزان مطلوبیت اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی کاهش می‌یابد. در نتیجه، مناطق نزدیک‌تر به مراکز جمعیتی شهری امتیاز تناسب بیشتری در فرآیند مکان‌یابی کسب کردند.



شکل (۵): a مراکز جمعیتی شهری، b فاصله اقلیدوسی نقاط شهری برحسب متر، c فاصله از نقاط شهری فازی شده خطی

فاصله از راه ها

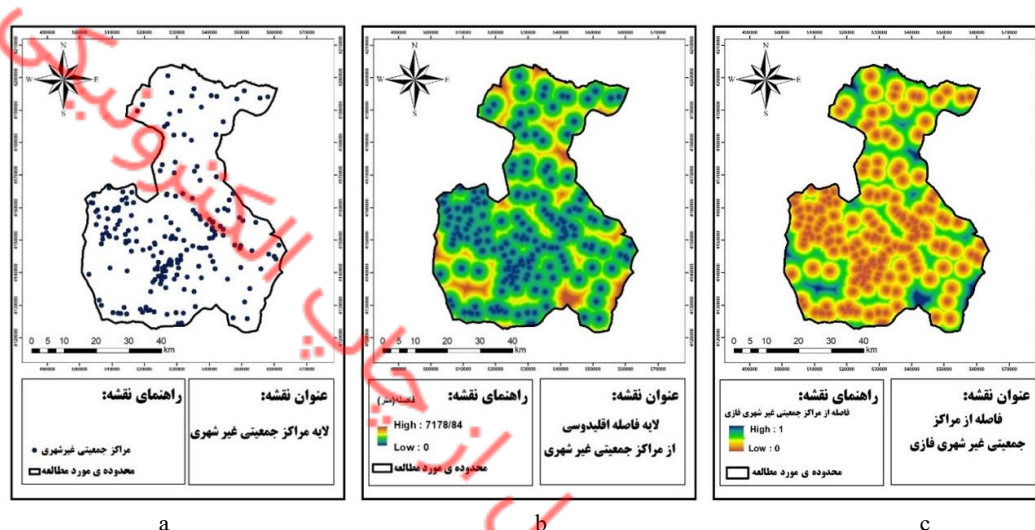
دسترسی به شبکه راه های ارتباطی یکی از عوامل مؤثر در مکان یابی نیروگاه های خورشیدی است. نزدیکی به راه ها موجب تسهیل حمل و نقل تجهیزات، دسترسی نیروی انسانی و کاهش هزینه های اجرایی و نگهداری پروژه می شود (Khodkam, ۲۰۲۴). از این رو، اراضی واقع در فاصله کمتر از راه های ارتباطی از مطلوبیت بیشتری برای احداث نیروگاه خورشیدی برخوردار هستند. در این پژوهش، نقشه فاصله از راه ها با استفاده از شبکه راه های موجود در محدوده مورد مطالعه و ابزارهای تحلیل فاصله در محیط GIS تهیه شد. سپس این معیار به صورت کاهشی (Min) فازی سازی گردید؛ به گونه ای که با افزایش فاصله از راه ها، میزان مطلوبیت اراضی برای استقرار نیروگاه خورشیدی کاهش می یابد. بنابراین، مناطق نزدیک تر به راه های ارتباطی امتیاز تناسب بیشتری کسب کردند.



شکل (۶): a لایه راه ها در منطقه مورد مطالعه، b فاصله اقلیدوسی راه ها برحسب متر، c فاصله از راه ها فازی شده خطی

فاصله از مراکز جمعیتی غیر شهری

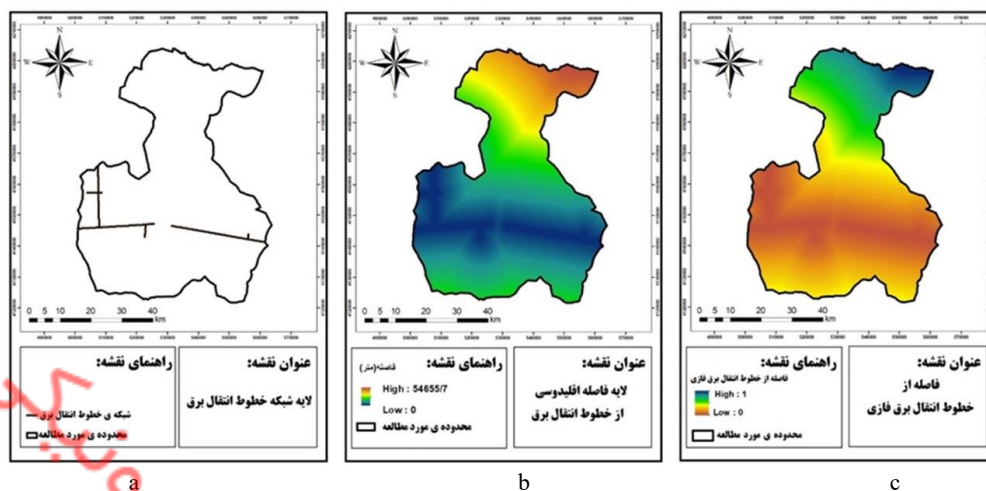
مراکز جمعیتی غیر شهری شامل روستاها و سکونتگاه‌های پراکنده هستند که در فرآیند مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی باید مورد توجه قرار گیرند. رعایت فاصله مناسب از این مراکز می‌تواند از بروز تعارضات کاربری زمین و محدودیت‌های توسعه آتی سکونتگاه‌ها جلوگیری کند. از این رو، مناطق دورتر از مراکز جمعیتی غیر شهری برای استقرار نیروگاه خورشیدی مناسب‌تر تلقی می‌شوند. در این پژوهش، نقشه فاصله از مراکز جمعیتی غیر شهری با استفاده از موقعیت روستاهای محدوده مورد مطالعه تهیه و این معیار به صورت افزایشی (Max) فازی‌سازی شد؛ به گونه‌ای که با افزایش فاصله از سکونتگاه‌های روستایی، میزان مطلوبیت اراضی افزایش می‌یابد.



شکل (۷) a مراکز جمعیتی غیر شهری، b فاصله اقلیدوسی از نقاط غیر شهری برحسب متر، c فاصله از نقاط غیر شهری فازی شده خطی

فاصله از خطوط انتقال برق

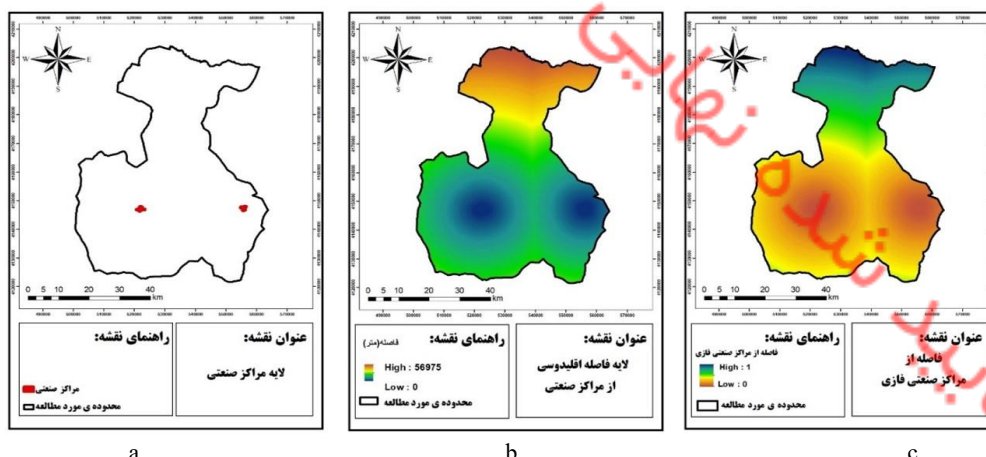
فاصله از خطوط انتقال برق یکی از معیارهای مهم در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی است؛ زیرا برق تولیدی نیروگاه برای ورود به شبکه نیازمند اتصال به خطوط انتقال و توزیع برق است. نزدیکی به خطوط انتقال موجب کاهش هزینه‌های اتصال به شبکه، کاهش تلفات انرژی و جلوگیری از احداث زیرساخت‌های جدید و پرهزینه می‌شود (Davodbaharvandi, ۲۰۲۳). در این پژوهش، نقشه فاصله از خطوط انتقال برق در محیط GIS تهیه و این معیار به صورت کاهش (Min) فازی‌سازی شد؛ به گونه‌ای که با کاهش فاصله از خطوط انتقال، مطلوبیت اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی افزایش می‌یابد. بنابراین، مناطق نزدیک‌تر به خطوط انتقال برق امتیاز تناسب بیشتری کسب کردند.



شکل (۸): a لایه خطوط انتقال برق، b فاصله اقلیدوسی از خطوط انتقال برق برحسب متر، c فاصله از خطوط انتقال برق فازی شده خطی

فاصله از مراکز صنعتی

مراکز و شهرک های صنعتی از مهم ترین کانون های مصرف برق در محدوده مورد مطالعه به شمار می روند. نزدیکی نیروگاه خورشیدی به این مراکز می تواند ضمن تأمین بخشی از نیاز انرژی آن ها، موجب کاهش تلفات انتقال و هزینه های توزیع برق شود. از این رو، اراضی واقع در فاصله کمتر از مراکز صنعتی از مطلوبیت بیشتری برای احداث نیروگاه خورشیدی برخوردار هستند. در این پژوهش، نقشه فاصله از مراکز صنعتی در محیط GIS تهیه و این معیار به صورت کاهشی (Min) فازی سازی شد؛ به گونه ای که با افزایش فاصله از مراکز صنعتی، میزان مطلوبیت اراضی کاهش می یابد. بنابراین، مناطق نزدیک تر به مراکز صنعتی امتیاز تناسب بیشتری برای استقرار نیروگاه خورشیدی کسب کردند.

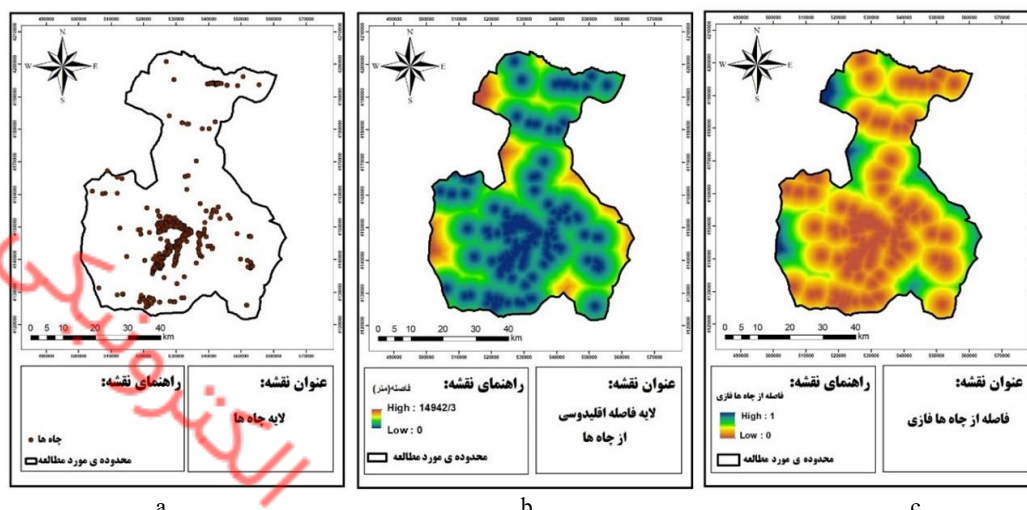


شکل (۹): a لایه مراکز صنعتی، b فاصله اقلیدوسی از مراکز صنعتی برحسب متر، c فاصله از مراکز صنعتی فازی شده خطی

فاصله از چاه ها

چاه های آب موجود در محدوده مورد مطالعه نقش مهمی در تأمین آب شرب و آب مورد نیاز بخش کشاورزی دارند و برای بهره برداری به انرژی الکتریکی وابسته هستند. نزدیکی نیروگاه خورشیدی به این تأسیسات می تواند موجب تأمین انرژی مورد نیاز آن ها با هزینه کمتر و کاهش تلفات انتقال برق شود. از این رو، اراضی واقع در فاصله کمتر از چاه ها از مطلوبیت بیشتری برای استقرار نیروگاه خورشیدی برخوردار هستند. در این پژوهش، نقشه فاصله از چاه ها تهیه و این

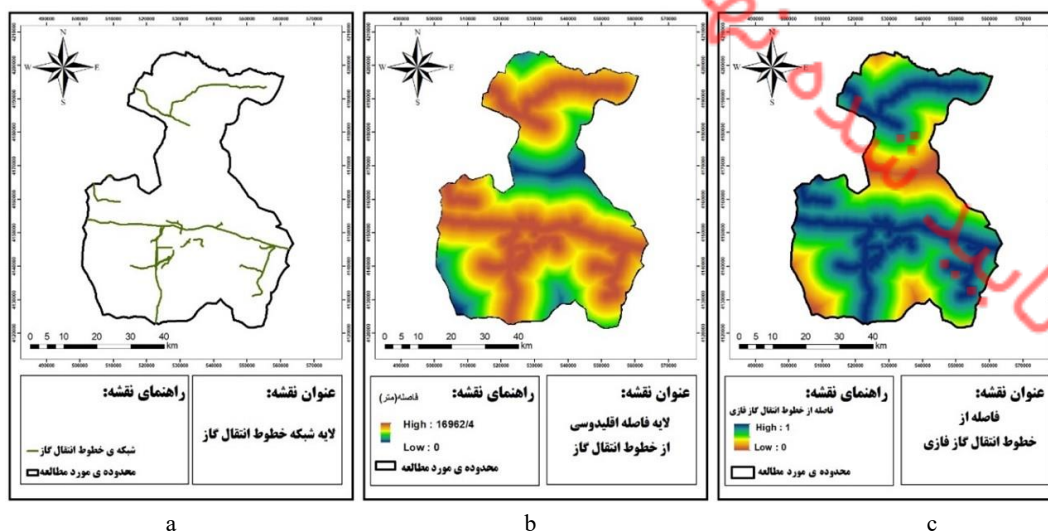
معیار به صورت کاهشی (Min) فازی سازی شد؛ به گونه ای که با افزایش فاصله از چاه ها، میزان مطلوبیت اراضی کاهش می یابد. بنابراین، مناطق نزدیک تر به چاه ها امتیاز تناسب بیشتری کسب کردند.



شکل (۱۰): a: لایه چاه ها، b: فاصله اقلیدوسی از چاه ها بر حسب متر، c: فاصله از چاه ها فازی شده خطی

فاصله از خطوط انتقال گاز

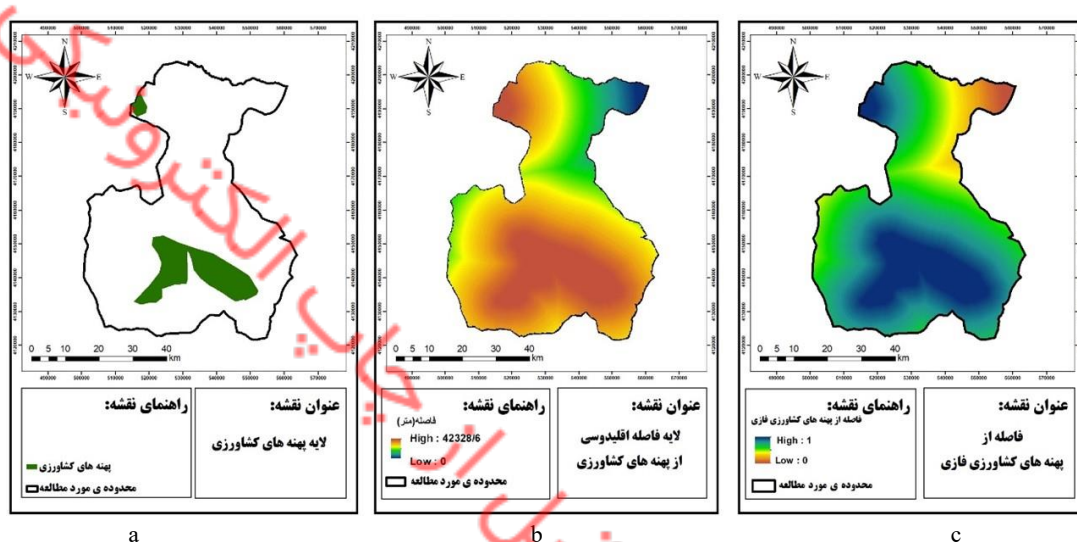
خطوط انتقال گاز از زیرساخت های مهم منطقه محسوب می شوند که رعایت حریم ایمنی آن ها در مکان یابی نیروگاه های خورشیدی ضروری است. استقرار نیروگاه در مجاورت این خطوط می تواند محدودیت های فنی و ایمنی ایجاد کند؛ بنابراین، فاصله بیشتر از خطوط انتقال گاز مطلوبیت بیشتری برای احداث نیروگاه خورشیدی دارد. در این پژوهش، نقشه فاصله از خطوط انتقال گاز تهیه و این معیار به صورت افزایشی (Max) فازی سازی شد؛ به گونه ای که با افزایش فاصله از خطوط انتقال گاز، میزان مطلوبیت اراضی برای استقرار نیروگاه خورشیدی افزایش می یابد. بنابراین، مناطق دورتر از این خطوط امتیاز تناسب بیشتری کسب کردند.



شکل (۱۱): a: لایه خطوط انتقال گاز، b: فاصله اقلیدوسی از خطوط انتقال گاز بر حسب متر، c: فاصله از خطوط انتقال گاز فازی شده خطی

فاصله از پهنه های کشاورزی

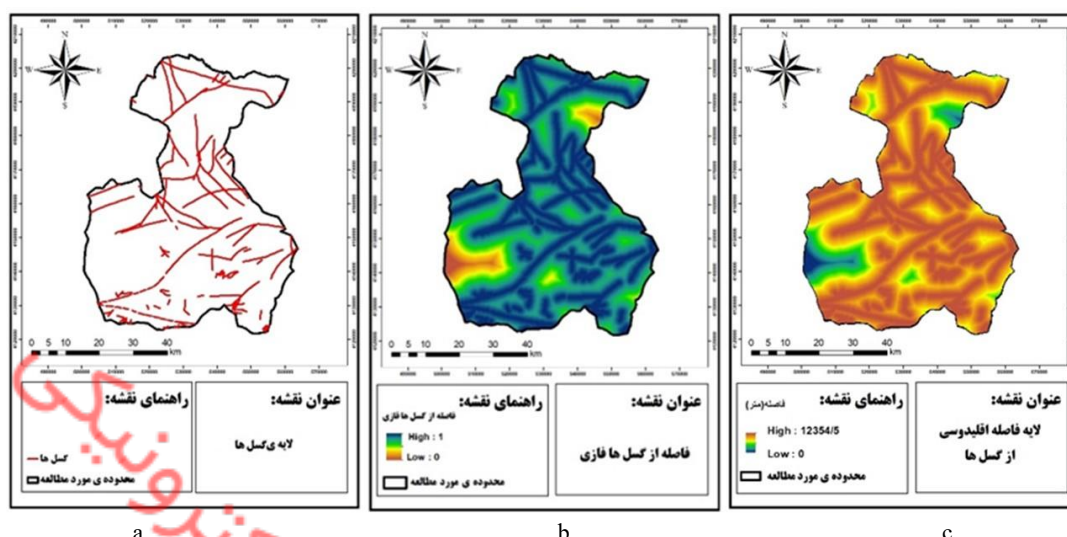
پهنه های کشاورزی از ارزشمندترین کاربری های اراضی در محدوده مورد مطالعه محسوب می شوند و حفظ آن ها از نظر امنیت غذایی و پایداری فعالیت های کشاورزی ضروری است. استقرار نیروگاه های خورشیدی در این اراضی می تواند منجر به تغییر کاربری زمین های حاصلخیز و کاهش ظرفیت تولیدات کشاورزی شود؛ از این رو، مناطق دورتر از پهنه های کشاورزی برای احداث نیروگاه خورشیدی مناسب تر هستند. در این پژوهش، نقشه فاصله از پهنه های کشاورزی تهیه و این معیار به صورت افزایشی (Max) فازی سازی شد؛ به گونه ای که با افزایش فاصله از اراضی کشاورزی، میزان مطلوبیت اراضی برای استقرار نیروگاه خورشیدی افزایش می یابد. بنابراین، مناطق دورتر از پهنه های کشاورزی امتیاز تناسب بیشتری کسب کردند.



شکل (۱۲): a: لایه پهنه های کشاورزی، b: فاصله اقلیدوسی از پهنه های کشاورزی برحسب متر، c: فاصله از پهنه های کشاورزی فازی شده خطی

فاصله از گسل ها

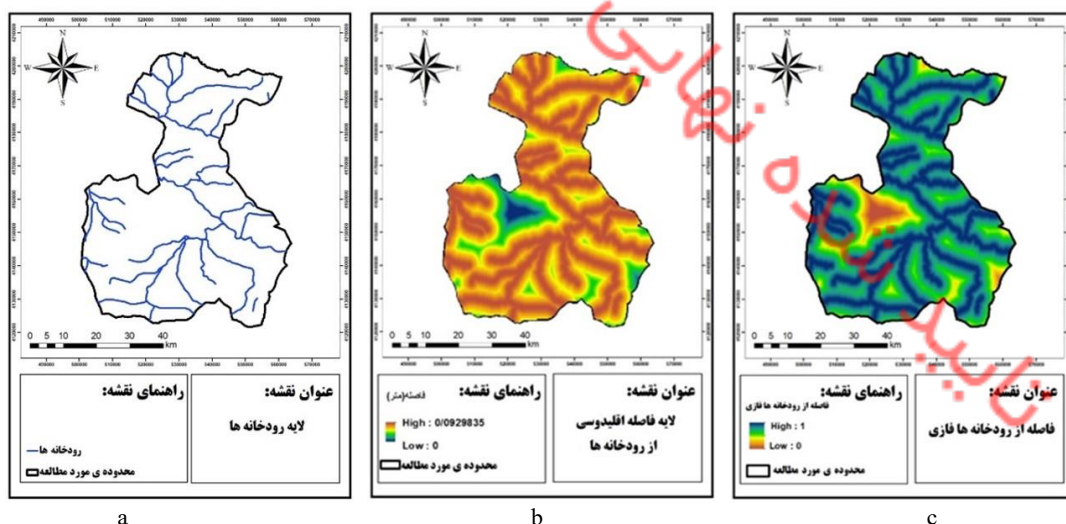
گسل ها از مهم ترین عوامل مخاطره آمیز طبیعی به شمار می روند که می توانند ایمنی و پایداری زیرساخت های انرژی را تحت تأثیر قرار دهند. احداث نیروگاه های خورشیدی در نزدیکی گسل ها، خطر آسیب پذیری تأسیسات در برابر زمین لرزه و سایر مخاطرات زمین ساختی را افزایش می دهد؛ از این رو، رعایت فاصله مناسب از گسل ها در فرآیند مکان یابی ضروری است (Atabati & Arabi, 2024). در این پژوهش، نقشه فاصله از گسل ها تهیه و این معیار به صورت افزایشی (Max) فازی سازی شد؛ به گونه ای که با افزایش فاصله از گسل ها، میزان مطلوبیت اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی افزایش می یابد. بنابراین، مناطق دورتر از گسل ها امتیاز تناسب بیشتری کسب کردند.



شکل (۱۳): a لایه گسل ها در منطقه مور مطالعه، b فاصله اقلیدوسی از گسل ها برحسب متر، c فاصله از گسل ها فازی شده خطی

فاصله از رودخانه ها

نزدیکی به رودخانه ها می تواند محدودیت هایی را برای احداث نیروگاه های خورشیدی ایجاد کند؛ بنابراین، رعایت فاصله مناسب از آن ها در فرآیند مکان یابی ضروری است. به همین دلیل، فاصله از رودخانه ها به عنوان یکی از معیارهای مؤثر در انتخاب مکان مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی در نظر گرفته شد. در این پژوهش، نقشه فاصله از رودخانه ها تهیه و این معیار به صورت افزایشی (Max) فازی سازی شد؛ به گونه ای که با افزایش فاصله از رودخانه ها، میزان مطلوبیت اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی افزایش می یابد. بنابراین، مناطق دورتر از رودخانه ها امتیاز تناسب بیشتری کسب کردند.



شکل (۱۴): a لایه رودخانه ها در منطقه مور مطالعه، b فاصله اقلیدوسی از رودخانه ها برحسب متر، c فاصله از رودخانه ها فازی شده خطی

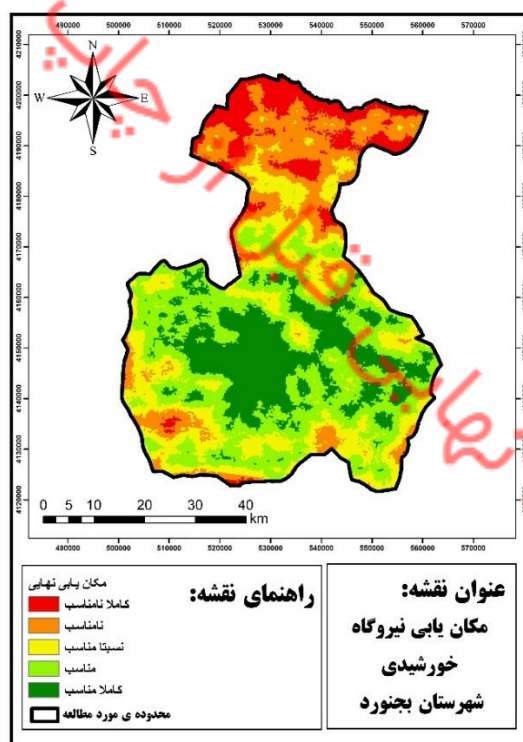
محاسبه وزنهای کارشناسی توسط مدل AHP

جدول (۳): وزن معیارها (وزن نسبی)

معیار	نوع فازی سازی	وزن نسبی
میزان تابش خورشیدی	Max	۰,۱۸

میزان شیب	Min	۰,۱۱
فاصله از مراکز جمعیتی شهری	Min	۰,۱۵
فاصله از راه ها	Min	۰,۱۱
فاصله از مراکز جمعیتی غیر شهری	Min	۰,۱۹
فاصله خطوط انتقال برق	Min	۰,۰۴
فاصله از مراکز صنعتی	Min	۰,۱۳
فاصله از چاه ها	Max	۰,۰۲
فاصله از خطوط انتقال گاز	Max	۰,۰۱
فاصله از پهنه های کشاورزی	Max	۰,۰۱
فاصله از گسل ها	Max	۰,۰۲
فاصله از رودخانه ها	Max	۰,۰۳

نقشه ی نهایی مکان یابی



شکل (۱۴): نقشه مکان یابی نیروگاه خورشیدی در شهرستان بجنورد

نتایج حاصل از تلفیق معیارهای مؤثر در مکان یابی نیروگاه خورشیدی در شهرستان بجنورد (شکل ۱۴) نشان می دهد که میزان تناسب اراضی در سطح منطقه دارای پراکنش فضایی ناهمگن است. بر اساس نقشه نهایی، بخش های مرکزی و جنوبی شهرستان بیشترین میزان تناسب را برای استقرار نیروگاه خورشیدی دارا هستند و در طبقات «مناسب» و «کاملاً مناسب» قرار گرفته اند. تمرکز این نواحی در مرکز منطقه بیانگر هم پوشانی مطلوب عوامل مؤثر از جمله شرایط توپوگرافی مناسب، دسترسی مطلوب، فاصله مناسب از محدودیت های محیطی و برخورداری از شرایط لازم برای بهره برداری از انرژی خورشیدی است. در مقابل، بخش های شمالی شهرستان، به ویژه نواحی شمال غربی و شمال شرقی، عمدتاً در طبقات «نامناسب» و «کاملاً نامناسب» قرار گرفته اند. گستردگی این مناطق نشان می دهد که محدودیت های موجود در این

بخش‌ها موجب کاهش قابلیت استقرار نیروگاه خورشیدی شده است. همچنین در نوار میانی شهرستان، اراضی با تناسب متوسط مشاهده می‌شوند که به‌عنوان مناطق انتقالی میان پهنه‌های بسیار مناسب و بسیار نامناسب شناخته می‌شوند. الگوی فضایی حاصل بیانگر آن است که با حرکت از نواحی شمالی به سمت مرکز و جنوب شهرستان، میزان مطلوبیت اراضی برای احداث نیروگاه خورشیدی افزایش می‌یابد. تمرکز پهنه‌های با اولویت بالا در بخش‌های مرکزی و جنوبی، این مناطق را به مناسب‌ترین گزینه‌ها برای سرمایه‌گذاری و توسعه زیرساخت‌های تولید انرژی خورشیدی تبدیل کرده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بخش عمده‌ای از ظرفیت بالقوه شهرستان برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در اراضی مرکزی و جنوبی متمرکز بوده و این نواحی از منظر معیارهای مورد بررسی، شرایط مطلوب‌تری نسبت به سایر قسمت‌های منطقه دارند.

نتیجه‌گیری

توسعه روزافزون مصرف انرژی، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از بهره‌برداری گسترده از این منابع، ضرورت توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، انرژی خورشیدی به دلیل پاک بودن، دسترسی گسترده و هزینه‌های نسبتاً پایین بهره‌برداری، به عنوان یکی از مهم‌ترین گزینه‌های تأمین انرژی پایدار مطرح است. ایران به دلیل قرارگیری در کمربند خورشیدی جهان و برخورداری از ساعات آفتابی فراوان، ظرفیت بالایی برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی دارد (Ahmadi, 2016). با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این ظرفیت مستلزم شناسایی مکان‌های مناسب و برنامه‌ریزی مبتنی بر معیارهای علمی و فضایی است. در پژوهش حاضر، مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در شهرستان بجنورد با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) انجام شد. در این راستا، معیارهای مؤثر بر استقرار نیروگاه شامل عوامل محیطی، اقتصادی و زیرساختی مورد بررسی قرار گرفتند. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، محاسبه فواصل اقلیدسی، فازی‌سازی داده‌ها و تعیین وزن معیارها، نقشه نهایی تناسب اراضی تهیه شد. نتایج نشان داد که الگوی توزیع فضایی اراضی مناسب در سطح شهرستان یکنواخت نبوده و تفاوت محسوس میان بخش‌های مختلف منطقه وجود دارد. بررسی نقشه نهایی بیانگر آن است که بخش‌های مرکزی و تا حدودی جنوبی شهرستان بجنورد از بالاترین میزان تناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی برخوردار هستند. استقرار پهنه‌های مناسب در این نواحی نشان می‌دهد که شرایط مطلوب از نظر دسترسی، محدودیت‌های کمتر محیطی، ویژگی‌های مناسب توپوگرافی و سایر معیارهای مؤثر، به‌صورت هم‌زمان در این مناطق فراهم شده است. در مقابل، بخش‌های شمالی شهرستان عمدتاً در طبقات نامناسب و کاملاً نامناسب قرار گرفته‌اند که بیانگر تأثیر محدودیت‌های طبیعی و مکانی در کاهش قابلیت استقرار نیروگاه خورشیدی در این نواحی است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری فضایی چندمعیاره می‌تواند ابزاری کارآمد برای شناسایی پهنه‌های مستعد توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر باشد. تلفیق قابلیت‌های GIS با روش AHP امکان ارزیابی هم‌زمان معیارهای متعدد و تعیین اهمیت نسبی هر یک از آن‌ها را فراهم می‌کند و در نتیجه، دقت تصمیم‌گیری در انتخاب مکان‌های مناسب افزایش می‌یابد. از این رو، نتایج حاصل می‌تواند مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در حوزه توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در شهرستان بجنورد و سایر مناطق دارای شرایط مشابه باشد.

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که شهرستان بجنورد از ظرفیت مناسبی برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی برخوردار است و پهنه‌های مرکزی شهرستان به عنوان اولویت نخست برای استقرار این تأسیسات شناخته می‌شوند. بهره‌برداری از این ظرفیت می‌تواند علاوه بر افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین برق منطقه، به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، ایجاد فرصت‌های سرمایه‌گذاری و اشتغال و تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها، بررسی ظرفیت اتصال به شبکه برق و مطالعات میدانی دقیق در مناطق دارای اولویت بالا نیز انجام شود تا زمینه اجرای عملی نیروگاه‌های خورشیدی در شهرستان فراهم گردد.

سپاسگزاری: مقاله حاضر یک تحقیق مستقل است، بدین وسیله از همکاری مشارکت‌کنندگان در این مقاله که سهم موثری در جمع‌آوری داده‌ها داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

حامی مالی: بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش: همه نویسندگان، در نگارش و تنظیم مقاله حاضر نقش و سهم برابر دارند.

تضاد منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Ahmadi, H., Marshadi, J., & Azimi, F. (2016). Site selection of solar power plants using climatic data and geographic information systems (Case study: Ilam Province) <https://civilica.com/doc/871777/>(In Persian)
- Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). A fuzzy AHP and GIS-based approach to prioritize utility-scale solar PV sites in Saudi Arabia. In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 1244–1249) <https://doi.org/10.22052/9.4.10>
- Asakereh, A., Soleymani, M., & Sheikhdavoodi, M. J. (2017). A GIS-based fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan Province, Iran. *Solar Energy*, 155, 342–353 <https://10.1016/j.solener.2017.08.058>(In Persian)
- Atabati, V. R., & Arabi, M. (2024). Application of geographic information systems and multi-criteria decision-making methods (SWARA, EDAS, and TOPSIS) for solar power plant site selection in Fars Province. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 35(4), 113–136. <https://magiran.com/p>(In Persian)
- Ayough, A., Boshruai, S., & Khorshidvand, B. (2022). A new interactive method based on multicriteria preference degree functions for solar power plant site selection. *Renewable Energy*, 195, 1165–1173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.087>(In Persian)
- Bahrevandi, M., Monjezi, N., & Afroos, A. (2023). Site selection of solar power plants using fuzzy AHP-OWA model and GIS techniques (Case study: Andimeshk County). <https://civilica.com/doc/1950059>(In Persian)
- Besharatifard, M., Moradian, P., Emarati, M., Ebadi, M., Chofreh, A. G., & Klemeš, J. J. (2022). Ground-mounted photovoltaic power station site selection and economic analysis based on a hybrid fuzzy best-worst method and geographic information system: A case study of Guilan Province. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112923 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112923>(In Persian)
- Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554–2561 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037>
- Emami, H., & Asadzadeh, S. A. (2021). Synthesis approach for optimal determination of solar and geothermal locations considering economic, environmental, and demographic criteria using RS and GIS data. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 11(2), 6. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100192> (In Persian)
- Ghaed Ebrahim, A., Dehghani, A., & Fattahi, M. (2019). Investigating the impact of different types of renewable energy on Iran's economic growth. <https://doi.org/10.30473/egdr.2019.43208.4991>(In Persian)
- Ghasempour, R., Sadat Tayebi, M., Salmanpour, F., & Kargarzadeh, A. (2022). Solar energy potential assessment (Case study: North Khorasan Province). In Proceedings of the 8th International Conference on Energy Technology and Management, Babolsar. <https://civilica.com/doc/1607732>(In Persian)

- Gunerhan, H., & Hepbasli, A. (2007). Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*, 42, 779–783. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.012>
- Khodakam, H. (2024). The best approach for constructing solar power plants to increase efficiency and site selection in various climatic regions of Iran using AHP software. *Journal of Renewable and New Energy*, 11(1), 148–157. <https://doi.org/10.22034/jrenew.2023.185722> (In Persian)
- Moeini, S., Javadi, S., Dehghan Manshadi, M., & Esmaeili, R. (2010). Estimation of solar radiation potential in Yazd City. <https://civilica.com/doc/1437376> (In Persian)
- Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kampf, J., & Scartezzini, J. S. (2016). Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, 469–482. <https://10.1016/j.renene.2016.02.053> (In Persian)
- Nohegar, A., et al. (2016). Locating sustainable energy power plant through TOPSIS decision-making procedure. *Environmental Based Territorial Planning (Amayesh)*, 9(33), 25–44. <https://sanad.iau.ir/en/Journal/ebtp/Article/988263>
- Noorollahi, Y., Mohammadi, H., Yousefi, H., & Anvari-Moghaddam, A. (2020). A spatial-based integration model for regional-scale solar energy technical potential. *Sustainability*, 12. <https://doi.org/10.3390/su12051890> (In Persian)
- Olufemi, A., Omitaomu, K., Blevins, R., Gary, C. T., Stanton, W., Hadley, J., Harrison, J., & Rose, A. N. (2012). Adapting a GIS-based multicriteria decision analysis approach for evaluating new power generating sites. *Applied Energy*, 96, 292–301. <https://10.1016/j.apenergy.2011.11.087>
- Sindhu, S., Nehra, V., & 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*, 73, 496–511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.135>
- Solangi, Y. A., Shah, S. A. A., Zameer, H., Ikram, M., & Saracoglu, B. O. (2019). Assessing the solar PV power project site selection in Pakistan based on AHP-fuzzy VIKOR approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(29), 30286–30302. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06172-0> (In Persian)
- Soleimani Moghadam, H. (2022). Assessing the feasibility of using solar energy in arid villages: Case study of villages in Joveyn County. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (Sepehr)*, 31(122), 221–235. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2022.254791> (In Persian)
- Taghvaei, M., Saboohi, A., & Effat, A. (2017). Zoning and site selection of solar power plants in Isfahan Province. *Research and Urban Planning Quarterly*, 8(28), 61–82. <https://doi.org/10.1001.1.22285229.1396.8.28.4.6> (In Persian)