



Research Paper

Site Selection of Construction Area for Solar Thermal Power Plants (Case Study: Malayer Township)

Hassan Ahmadzadeh ^{1*}, Mostafa Hedayati Katooli ²

¹ Department of Geography and Urban Planning, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

² M.Sc. in Geographic Information Systems, Mamaghan Branch, Islamic Azad University, Mamaghan, Iran.

ARTICLE INFO

Keywords:

*Spatial Decision
Making,
Site Selection,
Solar Thermal Power
Plant,
Malayer Township.*

Received:

14 Jan 2025

Received in revised

form:

23 Feb 2025

Accepted:

25 Feb 2025

pp.53-73

ABSTRACT

Introduction: Air pollution and environmental degradation are major global challenges caused largely by dependence on fossil fuels and their environmental impacts. Consequently, greater attention has been given to renewable energy, particularly solar energy. Identifying suitable locations is the first step toward efficient solar power plant development.

Purpose: This study aims to identify and evaluate suitable areas for the establishment of solar power plants.

Geographical Area: The research was conducted in Malayer County, Hamadan Province, Iran.

Methodology: A quantitative spatial analysis approach was employed. The Boolean logic model and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) were applied to evaluate land suitability for solar power plant development.

Results and Discussion: The results showed that the Gamma operator ($\gamma = 0.3$) identified the largest proportion of suitable areas (27.17%), whereas the Fuzzy Algebraic Product produced the smallest proportion (9.74%). The Fuzzy Intersection, Fuzzy Union, Fuzzy Algebraic Sum, and Gamma operator ($\gamma = 0.9$) identified suitable areas of 18.19%, 22.54%, 23.17%, and 23.17%, respectively.

Conclusion: Malayer County has substantial potential for solar thermal power development. The most suitable sites are mainly located in the northern part of the county and Jokar District, while the central area and Samen District also provide favorable conditions for future solar power plant development.

Highlights:

1. Renewable energy, particularly solar energy, is essential for addressing air pollution and environmental degradation.
2. Northern Malayer and Jokar District are the most suitable areas for solar thermal power plant development.

*Corresponding author : h_ahmadzadeh@iaut.ac.ir

How to cite this article: Hedayati Katooli, M., & Ahmadzadeh, H. (2026). Site Selection of Construction Area for Solar Thermal Power Plants (A Case Study: Malayer Township). *Journal of Geographical Engineering of Territory*, 10 (1), 53-73. <https://doi.org/10.22034/jget.2025.499862.1605>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

English Extended Abstract

Introduction

Air pollution and environmental degradation are among the most pressing global challenges, largely resulting from the continued dependence on fossil fuels and their adverse environmental impacts. These concerns have increased the global demand for renewable and clean energy resources, particularly solar energy. Although Iran possesses substantial oil and natural gas reserves, excessive reliance on fossil fuels is not a sustainable long-term strategy. Owing to its favorable geographical location and high solar radiation, Iran has considerable potential for solar energy utilization. Conventional photovoltaic technology converts solar radiation directly into electricity through semiconductor cells. However, solar thermal power plants, which generate electricity by concentrating solar radiation to produce high temperatures, have recently attracted increasing attention because of their high efficiency and ability to generate electricity on a large scale. Consequently, many countries have invested heavily in research and development of concentrated solar power technologies. Selecting appropriate sites is one of the most critical stages in the development of solar power plants. Site selection requires the integration of environmental, technical, economic, and social criteria to identify locations that maximize energy production while minimizing environmental impacts and development costs. Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques have become effective tools for supporting this process. Considering the importance of renewable energy development and the high solar potential of western Iran, this study evaluates the suitability of Malayer County for the establishment of solar thermal power plants using GIS-based spatial analysis and fuzzy decision-making techniques.

Purpose

The main objective of this study is to identify and evaluate suitable locations for solar thermal power plant development in Malayer County using GIS and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP).

Geographical area

The study was conducted in Malayer County, located in Hamadan Province in western Iran. Because of its climatic conditions, topography, and relatively high solar radiation, the county has considerable potential for solar energy development.

Methodology (Material and Methods)

This research is quantitative in nature, applied in purpose, and based on spatial analysis. Spatial datasets, including slope, geology, faults, groundwater resources, hydrography, wells, land use, transportation networks, power transmission lines, protected areas, and population centers, were collected from relevant governmental organizations. Criterion weights were determined through expert judgment using the Delphi technique. Fifteen specialists in renewable energy, environmental planning, and GIS participated in the weighting process. The FAHP method was applied to calculate criterion weights, while Boolean logic was used to identify unsuitable areas by applying spatial constraints. To evaluate land suitability, six fuzzy overlay operators were employed: Fuzzy Intersection, Fuzzy Union, Fuzzy Algebraic Product, Fuzzy Algebraic Sum, Gamma Operator ($\gamma = 0.3$), and Gamma Operator ($\gamma = 0.9$). All spatial analyses and suitability assessments were performed within a GIS environment.

Results and Discussion

The results indicate that Malayer County has considerable potential for solar thermal power plant development, particularly in its northern areas. Among the fuzzy overlay methods, the Gamma operator ($\gamma = 0.3$) identified the largest proportion of suitable land (27.17%), whereas the Fuzzy Algebraic Product identified the smallest proportion (9.74%). The proportions of suitable land identified by the Fuzzy Intersection, Fuzzy Union, Fuzzy Algebraic Sum, and Gamma operator ($\gamma = 0.9$) were 18.19%, 22.54%, 23.17%, and 23.17%, respectively. Model evaluation demonstrated differences in the performance of the applied fuzzy operators. The relative error values for Gamma ($\gamma = 0.3$), Gamma ($\gamma = 0.9$), Fuzzy Algebraic Sum, Fuzzy Algebraic Product, Fuzzy Intersection, and Fuzzy Union were 6.75%, 12.97%, 11.06%, 9.87%, 30.06%, and 7.74%, respectively. Similarly, the corresponding relative success rates were 70.06%, 42.07%, 67.57%, 39.87%, 46.70%, and 66.22%. These findings indicate that the Gamma operator ($\gamma = 0.3$) provides the most reliable results for identifying suitable sites in the study area.

Conclusion

The findings confirm that GIS integrated with FAHP and fuzzy overlay techniques provides an effective framework for solar power plant site selection. Appropriate site selection is essential because it directly influences environmental sustainability, economic feasibility, and long-term operational efficiency. The analysis demonstrates that suitable areas for solar thermal power plants are mainly concentrated in the northern part of Malayer County and the Jokar District, while the central area and Samen District also offer favorable conditions for future development. Utilizing these locations could contribute to meeting part of the electricity demand of Hamadan Province while reducing dependence on fossil fuels and supporting sustainable energy development. The proposed methodology can serve as a practical decision-support framework for planners, policymakers, and energy authorities involved in renewable energy planning. Furthermore, the approach can be adapted to other regions with similar environmental and geographical characteristics, providing a reliable basis for future solar energy investments.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی (مطالعه موردی: شهرستان ملایر)

حسن احمدزاده^۱؛ مصطفی هدایتی کتولی^۲

^۱ گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.
^۲ کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد ممقان، دانشگاه آزاد اسلامی، ممقان، ایران.

چکیده

مقدمه: آلودگی هوا و تخریب محیط‌زیست از مهم‌ترین چالش‌های جهانی هستند که عمدتاً ناشی از وابستگی به سوخت‌های فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها است. از این‌رو، توجه بیشتری به انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، معطوف شده است. شناسایی مکان‌های مناسب، نخستین گام در توسعه کارآمد نیروگاه‌های خورشیدی به شمار می‌رود.

هدف: این پژوهش با هدف شناسایی و ارزیابی مناطق مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی انجام شده است.

قلمرو جغرافیایی: پژوهش در شهرستان ملایر، استان همدان، ایران انجام شده است.

روش‌شناسی: در این پژوهش از رویکرد کمی مبتنی بر تحلیل‌های مکانی استفاده شد. به‌منظور ارزیابی تناسب اراضی برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی، مدل منطق بولین و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) به‌کار گرفته شدند.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که عملکرد گاما ($\gamma = 0.3$) بیشترین سهم مناطق مناسب (۲۷/۱۷ درصد) را شناسایی کرد، درحالی‌که عملکرد حاصل‌ضرب جبری فازی کمترین سهم (۹/۷۴ درصد) را نشان داد. همچنین، روش‌های اشتراک فازی، اجتماع فازی، مجموع جبری فازی و عملکرد گاما ($\gamma = 0.9$) به‌ترتیب ۱۸/۱۹، ۲۲/۵۴، ۲۳/۱۷ و ۲۳/۱۷ درصد از مناطق را به‌عنوان پهنه‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی معرفی کردند.

نتیجه‌گیری: شهرستان ملایر از ظرفیت قابل‌توجهی برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی برخوردار است. مناسب‌ترین مکان‌ها عمدتاً در بخش شمالی شهرستان و بخش جوکار قرار دارند و بخش مرکزی و بخش سامن نیز شرایط مطلوبی برای توسعه آتی نیروگاه‌های خورشیدی دارند.

نکات برجسته:

۱. انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا و تخریب محیط‌زیست دارند.
۲. شمال شهرستان ملایر و بخش جوکار مناسب‌ترین مناطق برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی هستند.

استناد: هدایتی کتولی، م و احمدزاده، ح (۱۴۰۵). مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی (مطالعه موردی: شهرستان ملایر). *مجله مهندسی جغرافیایی سرزمین*، دوره (۱۰)، شماره (۱)، ۷۳-۵۳.

<https://doi.org/10.22034/jget.2025.499862.1605>

ناشر: آبادگران شهر و روستا

© نویسنده (گان) - این مقاله با دسترسی آزاد است



مقدمه

انرژی منشأ کلیه فرآیندهای طبیعی و انسانی است. استفاده از انرژی‌های پایدار به‌خصوص انرژی خورشیدی می‌تواند یکی از بهترین گزینه‌ها برای تأمین انرژی پایدار باشد (Peng, Yao, Root & Maravelias, 2020; Tregambi et al., 2020). انرژی خورشیدی رایگان است و استفاده از آن فناوری ساده‌ای می‌خواهد، از طرف دیگر اثرات محیط‌زیستی نامطلوبی که سوخت‌های فسیلی و حتی سوخت‌های هسته‌ای به جا می‌گذارند را ندارد (Li, Klemes, Wang & Zeng, 2022). کشور ایران با وجود اینکه از سوخت‌های فسیلی غنی است، خوشبختانه یکی از کشورهای پرافتاب دنیا نیز می‌باشد. روشی که تاکنون برای استفاده از انرژی خورشیدی رایج بوده تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به برق توسط سلول‌های نیمه‌هادی است و شاید به همین زودی آن را روش کلاسیک یا سنتی بنامند. روش جدید انباشت یا متمرکزسازی نیروی گرمای خورشیدی است که آن را گرمانباشی نامیده‌اند (Steinmann, 2021). این روش که با ایجاد نیروگاه حرارتی خورشیدی امکان‌پذیر می‌باشد، شامل تأسیساتی است که انرژی تابشی خورشیدی را جمع کرده و با متمرکز نمودن آن درجه‌ی حرارت‌های بالا ایجاد می‌کند (Carrillo, Gonzalez-Aguilar, Romero & Coronado, 2019; Moghtaderi, 2010). با توجه به مزایای این نوع نیروگاه‌ها، کشورهای صنعتی جهان توجه ویژه و بودجه‌های دولتی کلانی به امر تحقیق و توسعه در این حوزه اختصاص داده‌اند (Silakhori, 2019; Wu & Long, 2015). گام اول برای توسعه‌ی استفاده از انرژی خورشیدی پتانسیل‌سنجی و بعد از آن مکان‌یابی نواحی است که در آن انرژی خورشیدی در حد مطلوب و دیگر شرایط لازم احداث نیروگاه را دارا باشد، است (Dizaji & Hosseini, 2018). در هر مرحله از مکان‌یابی مطالعات مختلف از لحاظ محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی بررسی می‌گردد و با تلفیق نتایج در هر مرحله، محدوده‌ی مورد مطالعه کوچکتر می‌گردد و مکان بهینه برای احداث معرفی می‌گردد (Abedin & Rosen, 2011).

با توجه به ضرورت و مزایای ایجاد نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی و نقش اساسی مکان‌یابی در این حوزه، پژوهش حاضر با هدف مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی در شهرستان ملایر نگارش شده است. به‌طور کلی می‌توان عنوان کرد که ایران در منطقه‌ای واقع شده که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی بین کشورها در بالاترین رده‌ها قرار دارد. شهرستان ملایر نیز در شمال غربی ایران قرار گرفته و با توجه به این که ملایر در عرض جغرافیایی پایینی قرار دارد، پتانسیل بالایی برای استفاده از انرژی خورشیدی دارا می‌باشد. ملایر رشد رو به جلویی را شروع کرده است ولی با مشکل تأمین انرژی برق مواجه است، پژوهش حاضر در پی آن است تا با به کارگیری روش‌های مختلف تصمیم‌گیری در سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی به مکان‌یابی نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی در شهرستان ملایر بپردازد که با احداث آنها بتوان برق مورد نیاز ملایر را تأمین نمود.

به‌طور کلی می‌توان عنوان کرد که خورشید به‌عنوان منبع انرژی و سرآغاز حیات و منشأ تمام انرژی‌های دیگر شناخته شده است. طبق برآوردهای علمی در حدود ۶ میلیارد سال از عمر خورشید می‌گذرد و در هر ثانیه $4/2$ میلیون تن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می‌شود. بنابراین با توجه به وزن خورشید که حدود ۳۳۳ هزار برابر وزن زمین است، این کره‌ی نورانی را می‌توان به‌عنوان منبع عظیم انرژی تا ۵ میلیارد سال آینده به حساب آورد (Zimbabwe Power Company, 2022). قطر خورشید $106 \times 1/39$ کیلومتر است و از گازهایی نظیر هیدروژن $8/8$ درصد، هلیوم ۱۳ درصد و ۶۳ عنصر دیگر که مهمترین آنها اکسیژن، کربن، نئون و نیتروژن است، تشکیل شده است. میزان دما در مرکز خورشید ۱۰ تا ۱۴ میلیون درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد که از سطح آن با حرارتی نزدیک به ۵۶۰۰ درجه و به‌صورت امواج الکترومغناطیسی در فضا منتشر می‌شود. زمین یک دومیلیاردم از کل انرژی تابشی خورشید را دریافت می‌کند. سوخت‌های فسیلی ذخیره‌شده در اعماق زمین، انرژی باد، آبشار و امواج دریاها و بسیاری موارد دیگر ازجمله نتایج همین مقدار اندک انرژی دریافتی زمین از خورشید می‌باشند. همچنین میزان انرژی‌ای که خورشید در مدت‌زمان یک ساعت به زمین ارزانی می‌دارد، معادل انرژی مورد نیاز تمام انسان‌ها در طول یک سال است. این واقعیت که انرژی مورد نیاز سالیانه‌ی ۷ میلیارد انسان برای گرمایش، سرمایش، حمل‌ونقل و ... در طی یک ساعت از خورشید به زمین می‌رسد، اما ما برای تأمین انرژی، زمین را کاویده و در جستجوی سوخت‌های فسیلی آن را جستجو می‌کنیم که غیرمنطقی به‌نظر می‌رسد شکل این واقعیت را به‌خوبی به تصویر می‌کشد.

بعلاوه در میان انرژی‌های پایدار نیز، انرژی خورشیدی فراوان‌ترین انرژی محسوب می‌شود (SOLARGIS, 2022). همچنین می‌توان بیان داشت که انرژی خورشیدی به دو صورت کاربرد غیرنیروگاهی و کاربرد نیروگاهی قابل دسترسی است:

الف) کاربردهای غیرنیروگاهی: کاربردهای غیرنیروگاهی از انرژی حرارتی خورشید شامل موارد متعددی می‌باشد که اهم آنها عبارتند از: آبگرمکن و حمام خورشیدی، سرمایش و گرمایش خورشیدی، آب شیرین‌کن خورشیدی، خشک‌کن خورشیدی، اجاق خورشیدی، کوره‌های خورشیدی و ... (Giamalaki & Tsoutsos, 2019).

ب) کاربردهای نیروگاهی: یک نیروگاه خورشیدی شامل تأسیساتی است که انرژی تابشی خورشید را جمع کرده و با متمرکز کردن آن، درجه‌ی حرارت‌های بالا ایجاد می‌کند. انرژی جمع‌آوری شده از طریق مبدل‌های حرارتی، به انرژی الکتریکی تبدیل خواهد شد. در نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی، وظیفه‌ی اصلی بخش‌های خورشیدی تولید بخار مورد نیاز برای تغذیه‌ی توربین‌ها است. بدین ترتیب انرژی حرارتی به جنبشی و سپس به الکتریکی تبدیل می‌شود. سایت‌های مناسب برای ساخت نیروگاه‌های خورشیدی از تابش خورشید ۲۰۰۰ کیلووات ساعت بر هر مترمربع سالانه برخوردار هستند. سایت‌های مناسب‌تر جهت احداث این نوع نیروگاه‌ها از تابش بیش از ۲۸۰۰ کیلووات ساعت بر هر مترمربع سالانه برخوردار هستند (Samu, Fahrioglu & Ozansoy, 2019). از مناطق مستعد کاربردهای نیروگاهی انرژی خورشیدی می‌توان به جنوب غربی ایالات متحده آمریکا، کشورهای مدیترانه‌ای اروپا، خاورمیانه و خاور نزدیک، ایران و صحرای هند، پاکستان، چین و استرالیا اشاره نمود. همچنین در بسیاری از مناطق جهان می‌توان با استفاده از تکنولوژی‌های حرارتی خورشیدی در مساحت یک کیلومتر مربع از زمین، ۱۰۰ الی ۳۰۰ گیگاوات ساعت الکتریسیته خورشیدی تولید نمود. این مقدار معادل تولید سالانه‌ی نیروگاه‌های متداول فسیلی، زغال‌سنگ یا گازی با ظرفیت ۵۰ مگاوات در بار متوسط است. این تأسیسات بر اساس انواع متمرکز کننده‌های موجود و بر حسب اشکال هندسی متمرکز کننده‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند (SOLARGIS, 2022).

نیروگاه‌های حرارتی خورشید از نوع سهموی خطی

در این نیروگاه‌ها، از منعکس‌کننده‌هایی که به‌صورت سهموی خطی می‌باشند جهت تمرکز پرتوهای خورشید در خط کانونی آنها استفاده می‌شود و گیرنده به‌صورت لوله‌ای در خط کانونی منعکس‌کننده‌ها قرار دارد. در داخل این لوله روغن مخصوصی در جریان است که بر اثر حرارت پرتوهای خورشید گرم و داغ می‌گردد. روغن داغ از مبدل حرارتی عبور کرده و آب را به بخار تبدیل و به مدارهای مرسوم در نیروگاه‌های حرارتی انتقال داده می‌شود تا به کمک توربین بخار و ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل گردد. در این نیروگاه‌ها یک سیستم ردیاب خورشید نیز وجود دارد که به‌وسیله‌ی آن آینه‌های شلجمی دائماً خورشید را دنبال می‌کنند و پرتوهای آن را روی لوله‌ی دریافت‌کننده متمرکز می‌نمایند (Rashayi & Chikuni, 2012). تغییرات تابش خورشید در این نیروگاه‌ها توسط منبع ذخیره و گرم‌کن سوخت فسیلی جبران می‌شوند. در چند کشور نظیر ایالات متحده آمریکا، اسپانیا، مصر، مکزیک، هند و مراکش از نیروگاه‌های سهموی خطی استفاده شده است که این نیروگاه‌ها یا در مرحله‌ی ساخت و یا در مرحله‌ی بهره‌برداری قرار دارند. در ایران نیز تحقیقات و مطالعاتی در زمینه‌ی این نیروگاه‌ها انجام شده و پروژه‌ی یک نیروگاه تحقیقاتی با ظرفیت ۳۵۰ کیلووات توسط سازمان انرژی‌های نو ایران در شیراز انجام شده است. محققان ایران در زمینه‌ی ساخت این نیروگاه‌ها به توانایی‌های فراوانی دست یافته‌اند (Zimbabwe Power Company, 2022).

نیروگاه‌های آینه‌ی مرکزی

در این نیروگاه‌ها پرتوهای خورشیدی توسط مزرعه‌ای متشکل از تعداد زیادی آینه‌ی منعکس‌کننده بنام هلیوستات بر روی یک دریافت‌کننده که در بالای برج نسبتاً بلندی استقرار یافته است متمرکز می‌گردد. در نتیجه روی محل تمرکز پرتوها انرژی گرمایی زیادی به‌دست می‌آید که این انرژی به‌وسیله‌ی سیال عامل که داخل دریافت‌کننده در حرکت است، جذب می‌شود و به‌وسیله‌ی مبدل حرارتی به سیستم آب و بخار مرسوم در نیروگاه‌های سنتی منتقل شده و بخار فوق گرم در فشار و دمای طراحی شده برای استفاده در توربین ژنراتور تولید می‌گردد. این سیال عامل در مبدل‌های حرارتی در کنار آب قرار گرفته و موجب تبدیل آن به بخار با فشار و

حرارت بالا می‌گردد. در برخی از سیستم‌ها سیال عامل آب است و مستقیماً در داخل دریافت‌کننده به بخار تبدیل می‌شود. برای استفاده‌ی دائمی از این نوع نیروگاه در زمانی که تابش خورشید وجود ندارد مثلاً ساعات ابری یا شب‌ها از سیستم‌های ذخیره‌کننده‌ی حرارت و یا احیاناً از تجهیزات پشتیبانی که ممکن است از سوخت فسیلی استفاده کنند جهت ایجاد بخار برای تولید برق کمک گرفته می‌شود (Concentrating solar power projects, 2023).

نیروگاه‌های حرارتی از نوع بشقابی

در این نیروگاه‌ها از منعکس‌کننده‌هایی که به‌صورت شلجمی بشقابی می‌باشد جهت تمرکز نقطه‌ای پرتوهای خورشیدی استفاده می‌گردد (Achkari & El Fadar, 2022) و گیرنده‌هایی که در کانون شلجمی قرار می‌گیرند به کمک سیال جاری در آن انرژی گرمایی را جذب نموده و به کمک یک ماشین حرارتی و ژنراتور آن را به نوع مکانیکی و الکتریکی تبدیل می‌نمایند.

برج‌های خورشیدی

روش دیگر برای تولید الکتریسیته از انرژی خورشید استفاده از برج نیرو یا دودکش‌های خورشیدی می‌باشد. در این سیستم از خاصیت دودکش‌ها استفاده می‌شود به این صورت که با استفاده از یک برج بلند به ارتفاع حدود ۲۰۰ متر و تعداد زیادی گرمخانه‌های خورشیدی که در اطراف آن است هوای گرمی که به‌وسیله‌ی انرژی خورشیدی در یک گرمخانه تولید می‌شود و به طرف دودکش یا برج که در مرکز گلخانه‌ها قرار دارد، هدایت می‌شود (Wang, 2019). این هوای گرم به علت ارتفاع زیاد برج با سرعت زیاد صعود کرده و باعث چرخیدن پروانه و ژنراتوری که در پایین برج نصب شده است می‌گردد و به‌وسیله‌ی این ژنراتور برق تولید می‌شود.



شکل ۱. نیروگاه‌های خورشیدی
Figure 1. Solar power plants

در راستای مکان‌یابی محل مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی در طی سال‌های گذشته مطالعات متعددی انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌گردد.

احمدی مرشدی و عظیمی (۱۳۹۵)، در پژوهش خود به مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از داده‌های اقلیمی و سامانه‌ی اطلاعات مکانی در شهرستان ایلام پرداخته‌اند. نتایج پژوهش با استفاده از معیارهای اقلیم (دما، تابش، بارش، ساعت آفتابی، تبخیر)، توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل)، محیط‌زیست (کاربری اراضی، رودخانه‌ها) و محیط انسانی (محدوده‌ی مسکونی، راه‌ها)، نشان می‌دهد پهنه‌هایی که در منطقه با توان خیلی‌خوب برای احداث نیروگاه خورشیدی شناسایی شده‌اند، مساحتی حدود

۱۵۱۰۸۱۲۵۰۰ مترمربع را به خود اختصاص داده و مناطق جنوبی و غربی شهرستان ایلام را شامل می‌شوند. شیرزاد، مینائی و مینائی (۱۳۹۷)، در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی فضایی پتانسیل نصب صفحات خورشیدی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، بخشی از ناحیه‌ی ۲ منطقه ۸ کلان‌شهر مشهد را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که از مجموع مساحت ۹۲۳ قطعه‌ی ارزیابی‌شده در محدوده‌ی مورد مطالعه، نزدیک به ۱۹ هزار مترمربع از فضای پشت‌بام‌ها در بهترین شرایط جهت نصب صفحات خورشیدی قرار گرفته‌اند. این پتانسیل ارزشمند با توجه به سابقه‌ی تجاری-مسکونی منطقه‌ی موردنظر و میزان مصرف بالای انرژی برق می‌تواند در تأمین و پایداری تولید انرژی موردنیاز محدوده و حتی بیشتر از آن بسیار مؤثر باشد.

مؤمن‌زاده، و همکاران (۱۳۹۹)، در پژوهشی تحت عنوان پهنه‌بندی و مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در استان یزد به این نتایج دست یافته‌اند که ساعات آفتابی سالانه، مهمترین فراسنج اقلیمی است که میزان انرژی دریافتی از خورشید را نشان می‌دهد. در این راستا، بهترین مکان برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی شهرستان رباط، پشت، بادام، مهریز، میبد و مروست در اولویت اول، پس از آن شهرستان یزد در اولویت دوم، شهرستان ابرکوه و هرات در اولویت سوم تشخیص داده شدند. همچنین از لحاظ استقرار نیروگاه خورشیدی ۱۳/۶۳ درصد از مساحت استان در محدوده‌ی بسیار مطلوب، ۲۳/۰۶ درصد در محدوده‌ی مطلوب، ۳۶/۷۸ درصد در محدوده‌ی متوسط و ۲۶/۵۳ درصد در محدوده‌ی نامطلوب قرار دارد. چارابی و گاستلی^۱ (۲۰۱۱)، در پژوهشی تحت عنوان تجزیه و تحلیل تناسب زمین برای اجرای مزارع CPV^۲ در عمان به این نتایج دست یافته‌اند که ۰/۵ درصد از کل مساحت سطح زمین از تناسب بالایی برای اجرای این نوع نیروگاه‌های خورشیدی برخوردار هستند. همچنین اگر تمام زمین‌های بسیارمناسب به‌طور کامل برای اجرای CPV مورد بهره‌برداری قرار گیرد، می‌توان تقریباً ۴۵/۵ برابر کل تقاضای فعلی در عمان برق تولید کرد. داوسون و شلایتر^۳ (۲۰۱۲)، در پژوهش خود با بررسی مکان‌های بهینه‌ی استقرار نیروگاه حرارتی خورشیدی در منطقه‌ی استرالیای غربی، مهمترین عامل در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی حرارتی را تابش مستقیم خورشید بیان کرده‌اند. همچنین معیارهای مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی حرارتی در این پژوهش تابش خورشید و حداقل بودن ۲۰۰۰ کیلووات ساعت در مترمربع در سال، شیب زمین کمتر از دو درصد، حداقل زمین در دسترس ۲۰۰۰۰ هزار مترمربع، نزدیکی به شبکه‌های زیربنایی راه و خطوط انتقال نیرو، نزدیکی به منبع جایگزین برای ادامه کار نیروگاه و مقدار مصرف انرژی عنوان شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد تنها ۰/۶ از مساحت محدوده‌ی مورد مطالعه پتانسیل استقرار نیروگاه حیارتی خورشیدی را دارا می‌باشند. حداد^۴ و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهش خود به مکان‌یابی پهنه‌های بهینه برای بهره‌مندی از انرژی خورشیدی متمرکز (CSP)^۵ در الجزایر پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بیش از ۵۱ درصد از خاک کشور الجزایر برای اجرای CSP غیرممکن است که عمدتاً به دلیل معیارهای مربوط به جنبه‌های توپوگرافی، در دسترس بودن آب و فاصله از شبکه است. همچنین تنها تکیه بر مقادیر تابش عادی مستقیم (DNI)^۶ ممکن است منجر به یک دیدگاه تقلیل‌گرایانه برای برنامه‌ریزی انرژی شود و در این راستا، معیارهای دیگر می‌توانند نقش اساسی در فرآیند تصمیم‌گیری داشته باشند. موتوم^۷ (۲۰۲۳)، در پژوهشی تحت عنوان امکان‌سنجی استفاده از انرژی خورشیدی متمرکز (CSP) در مناطق هوانگ^۸ و لوپان^۹ زیمبابوه به این نتایج دست یافته‌اند که لوپان یک مکان عالی برای تأسیسات CSP است و از سیاست‌گذاران در ایجاد تعرفه‌های انرژی تجدیدپذیر حمایت می‌کند و در نتیجه توسعه‌ی اقتصادی و پایدار ایجاد می‌شود.

^۱ Charabi & Gastli

^۲ - فتوولتائیک کنسانتره (CPV) (که به‌عنوان فتوولتائیک غلظتی نیز شناخته می‌شود) یک فناوری فتوولتائیک است که از نور خورشید برق تولید می‌کند.

^۳ Dawson & Schlyter

^۴ Haddad

^۵ Concentrated solar power

^۶ Direct Normal Irradiation

^۷ Mutume

^۸ Hwange

^۹ Lupane

روش شناسی (مواد و روش‌ها)

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) معمولی روشی خوب برای کسب نظر خبرگان و متخصصان می‌باشد، اما به درستی نحوه‌ی تفکر انسانی را منعکس نمی‌کند. زیرا خبره‌ای که در حال پاسخگویی است، می‌بایست نظر خود را با اعداد دقیق بیان کند. درحالی‌که طبیعت مقایسه‌های زوجی، فازی است و خبره مایل است در قضاوت‌های خود یک بازه را به جای یک عدد ثابت و قطعی بیان کند. در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی اکثر اصول همانند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) معمولی است، با این تفاوت که به جای اعداد ثابت برای قضاوت، از اعداد فازی استفاده می‌شود. در این روش پس از تهیه‌ی نمودار سلسله مراتبی، از تصمیم‌گیرندگان خواسته می‌شود تا عناصر هر سطح را نسبت به هم مقایسه کنند و اهمیت نسبی عناصر را با استفاده از اعداد فازی بیان کنند. در منطق بولین، عضویت یک عنصر در یک مجموعه به صورت صفر (عدم عضویت) و یک (عضویت) بیان می‌شود. به منظور استفاده از مدل بولین در تحلیل، ابتدا به ازاء هر عامل، یک نقشه‌ی ورودی به صورت باینری بر اساس ضوابط تهیه می‌شود؛ به این صورت که مقدار یک در هر واحد پیکسلی از یک نقشه‌ی ورودی نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن و مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی نامناسب موقعیت مکانی آن پیکسل جهت فعالیت مورد نظر با توجه به مفهوم آن نقشه (عامل) می‌باشد. در خصوص نمایش عددی عبارات فازی، این توضیح لازم است که یک عدد فازی ممکن است به صورت مثلثی یا دوزنقه‌ای بیان شود (Alhadidi & Alomari, 2024). در حالت مثلثی عدد مربوطه را به صورت رابطه‌ی ۱ نمایش می‌دهند.

$$M = (a, b, c) \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

در این فرمول پارامترهای a و b و c به ترتیب بیانگر کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بیشترین مقدار ممکن برای عدد مورد نظر هستند و عدد مورد نظر می‌تواند بین a و c تغییر کند. در تحلیل‌های تحقیق حاضر از اعداد فازی مثلثی استفاده خواهد شد. تحلیل سلسله مراتبی فازی دو روش شناخته شده دارد که عبارتند از روش چانگ^۱ و روش یاجر^۲. روش چانگ معروف‌ترین و متداول‌ترین روش در ایران است (در پژوهش حاضر از این روش استفاده شده است) که شامل مراحل همچون رسم نمودار سلسله مراتبی، تعریف اعداد فازی برای مقایسه‌ی زوجی، تشکیل و محاسبه‌ی ماتریس فازی زوجی و محاسبه‌ی اوزان نهایی معیارها می‌باشد (Cavallaro, 2009). بنابراین در ابتدا لازم است اعداد فازی برای انجام مقایسه‌های زوجی تعریف شود تا خبرگان طبق آن نسبت به ارائه‌ی پاسخ‌های خود اقدام نمایند. اعداد فازی معمول به شرح جدول شماره ۱ می‌باشد.

جدول ۱. تعریف اعداد فازی به منظور مقایسه‌های زوجی

Table 1. Definition of fuzzy numbers for pairwise comparisons

ترجیحات	یکسان	نسبتاً زیاد	زیاد	بسیار زیاد	فوق العاده زیاد
اعداد فازی	(۱ و ۱)	(۲ و ۳ و ۴)	(۴ و ۵ و ۶)	(۶ و ۷ و ۸)	(۸ و ۹ و ۱۰)

مرحله‌ی بعد محاسبه ماتریس S برای هر یک از سطرها‌ی ماتریس مقایسه‌ی زوجی می‌باشد، S ها اعداد فازی مثلثی هستند که با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شوند.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

¹ Chang² Yager

در رابطه‌ی ۲، M اعداد فازی مثلثی داخل ماتریس و مقایسه‌های زوجی هستند. در حقیقت هنگام محاسبه‌ی ماتریس S ، هر یک از اجزاء اعداد فازی تک به تک جمع زده می‌شود و در معکوس فازی مجموع کل ضرب می‌شود (Janke, 2010). این مرحله شبیه محاسبه‌ی وزن‌های نرمال‌شده در روش AHP معمولی ولی با اعداد فازی است. در ادامه Si ها از نظر درجه‌ی بزرگی با یکدیگر بر اساس رابطه‌ی (۳) مقایسه می‌شوند.

رابطه‌ی (۳)

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, if \text{ } m_2 \geq m_1 \\ 0, if \text{ } I_1 \geq u_2 \\ \frac{I_1 - U_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - I_1)}, otherwise \end{cases}$$

در رابطه‌ی ۴، M_2, M_1 دو عدد فازی مثلثی هستند.

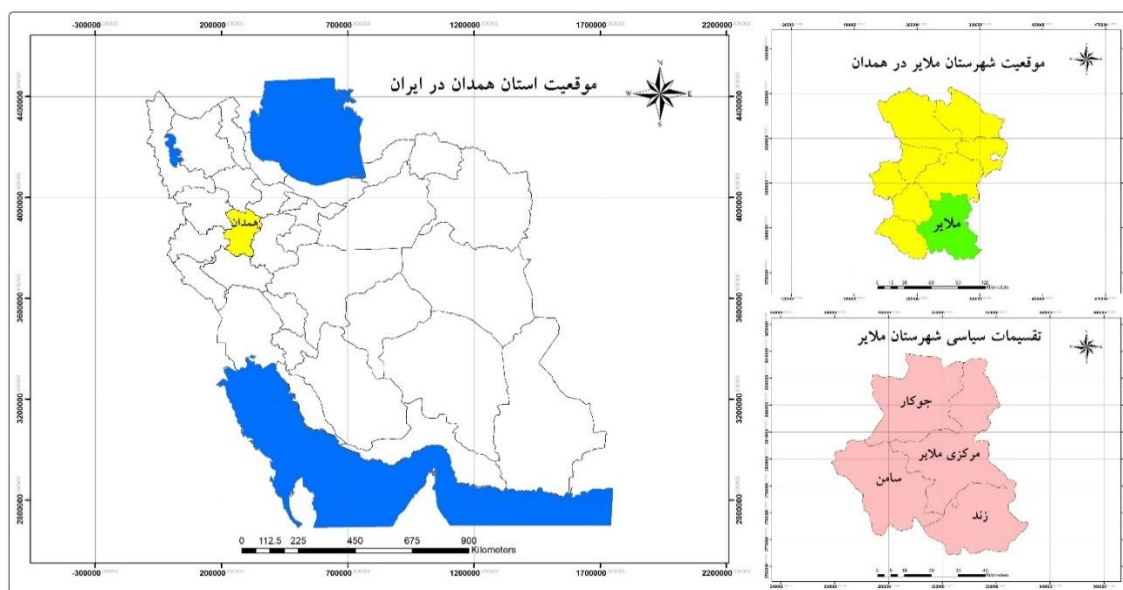
$$M_2 = (I_2, m_2, u_2), M_1 = (I_1, m_1, u_1) \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

سیس بردار وزن نرمالیزه نشده با محاسبه‌ی کمترین مقدار (مینیموم) V های محاسبه‌شده در مرحله‌ی قبل، بدست می‌آید. در مرحله‌ی آخر، بردار وزن بدست آمده از مرحله‌ی قبل که نرمال نشده بود، نرمالایزه می‌شود تا بردار وزن نهایی که هدف نهایی محاسبات فازی است، به‌دست آید (Kedir & Fayek, 2023).

همچنین در نقشه‌های همپوشانی فازی از روش‌های مختلفی استفاده می‌گردد که در پژوهش حاضر از ۶ روش اشتراک فازی، اجتماع فازی، ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی، عملگر گاما $0/3$ و $0/9$ استفاده شده است.

قلمرو جغرافیایی (محدوده مورد مطالعه)

شهرستان ملایر بزرگترین شهرستان استان همدان پس از شهرستان همدان می‌باشد. این شهرستان با وسعتی حدود ۳۲۱۰ کیلومتر مربع شامل ۳ شهر ملایر، سامن و ازندریان، سه بخش مرکزی، سامن و جوکار، ۱۵ دهستان و ۲۲۱ روستای دارای سکنه می‌باشد. شهرستان ملایر در ۴۸ و ۴۹ دقیقه‌ی طول جغرافیایی و ۳۴ و ۱۷ دقیقه‌ی عرض جغرافیایی قرار دارد و از شمال به همدان از شرق به اراک از جنوب به بروجرد و از طرف غرب به شهرهای تویسرکان و نهاوند محدود شده است. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۷۸۰ مترمربع و فاصله‌اش از همدان ۸۶ کیلومترمربع است. امتداد رشته‌کوه الوند از شمال و شمال شرق این شهرستان می‌گذرد.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی شهرستان ملایر

Figure 2. Geographical location of Malayer County

یافته‌ها و بحث

مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی شهرستان ملایر با استفاده از منطق بولین

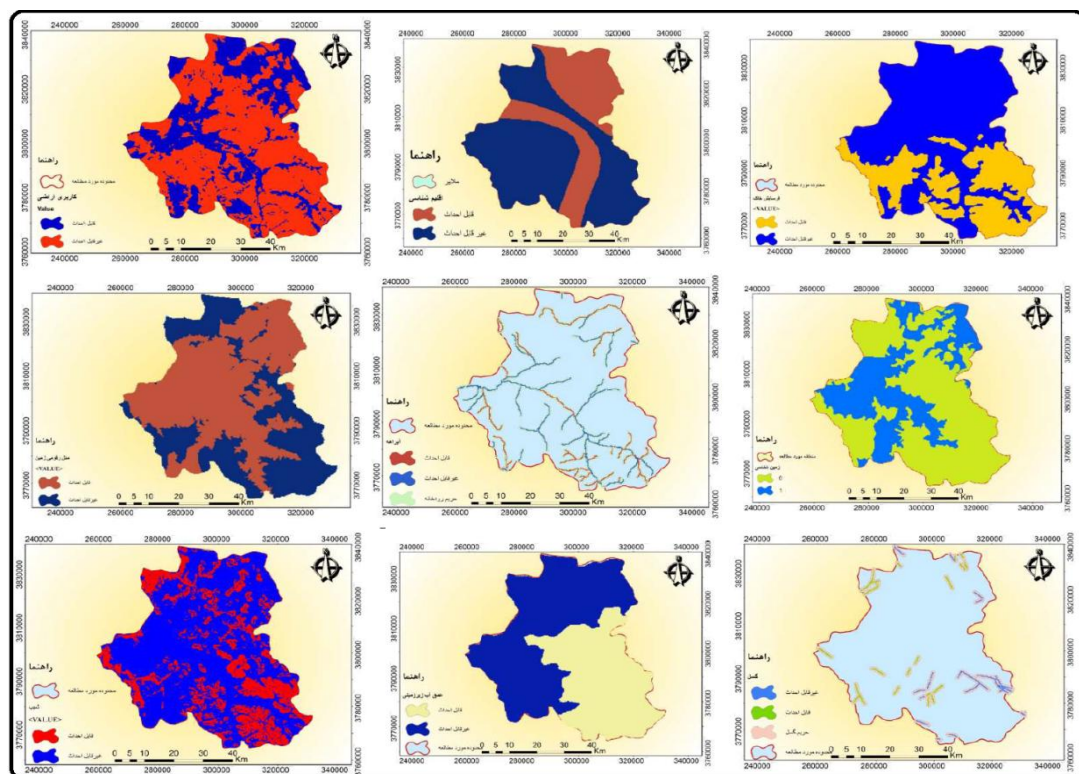
منطق بولین به صورت قطعی در مورد یک معیار اعمال می‌شود و بر مبنای اعداد صفر و یک می‌باشد. بدین معنی که نقشه‌های ملایر استاندارد شده فقط دو معیار صفر و یک خواهند داشت. عدد یک نشان‌دهنده وضعیت قابل قبول محل مورد نظر، و عدد صفر نشان‌دهنده نامطلوب بودن قطعی آن محل می‌باشد. همچنین استانداردسازی نقشه‌ها با توجه به حدود معیارهای مشخص شده به شرح جدول شماره ۲ می‌باشد.

جدول ۲. حدود معیارها، جهت استانداردسازی نقشه‌ها (منطق بولین)

Table 2. Criteria limits, map standardization direction (Boolean logic)

ردیف	لایه‌ی نقشه	حد قابل قبول برای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی	ارزش
۱	شیب	$< 15\%$	۱
۲	فرسایش	< 100	۱
۳	فاصله از گسل‌ها	< 100	۱
۴	فاصله از شهر ملایر	بین ۳۰-۵۰ کیلومتر مربع	۱
۵	عمق آب‌های زیرزمینی	< 20 مترمربع	۱
۶	فاصله از آب‌های سطحی	< 30 مترمربع	۱
۷	فاصله از چاه‌ها	< 100 مترمربع	۱
۸	فاصله از فرودگاه	< 2000 مترمربع	۱
۹	فاصله از مراکز جمعیتی	< 1000 مترمربع	۱
۱۰	فاصله از مناطق حفاظت‌شده	< 150 مترمربع	۱
۱۱	فاصله از اراضی زراعی و باغ‌ها	< 200 مترمربع	۱
۱۲	فاصله از جاده‌ها	< 300 مترمربع	۱
۱۳	فاصله از خطوط انتقال نیرو	< 100 مترمربع	۱

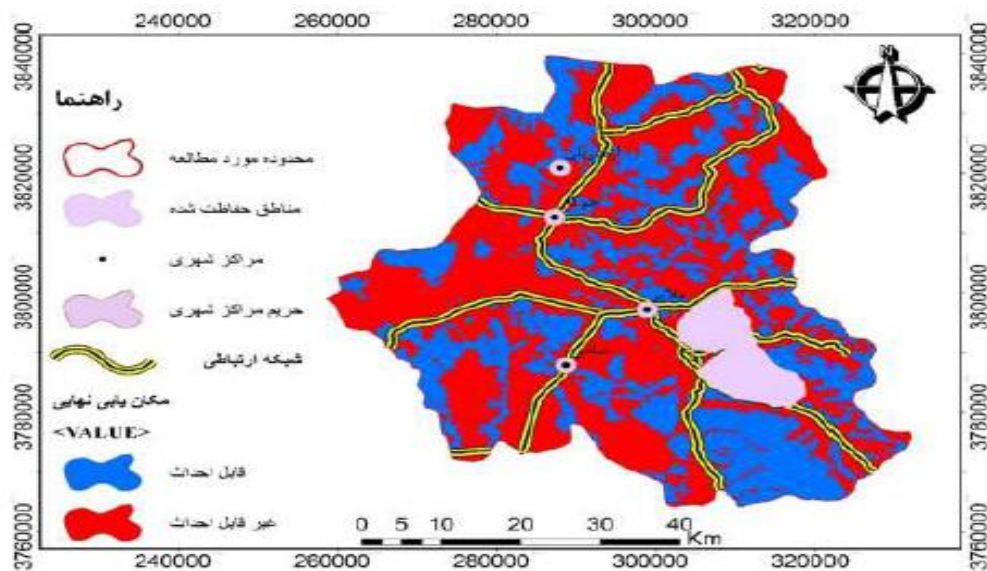
برگرفته از: یافته‌های تحقیق



شکل ۳. نقشه‌های استاندارد شده به روش منطق بولین؛ برگرفته از: یافته‌های تحقیق

Figure 3. Standardized maps using Boolean logic method

با توجه به استانداردسازی لایه‌ها با توجه به حدود معیارها، نقشه‌ی نهایی مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی شهرستان ملایر به شرح شکل شماره ۴ می‌باشد.



شکل ۴. نقشه‌ی نهایی مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی به روش منطق بولین؛ برگرفته از: یافته‌های تحقیق

Figure 4. Final map for locating zones for construction of solar thermal power plants using Boolean logic method

مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی شهرستان ملایر با استفاده از روش فازی (الف) بررسی نوع توابع مورد استفاده

انتخاب تابع برای فازی‌سازی با توجه به ماهیت، اهمیت و رابطه‌ی هرکدام از معیارها با هدف انتخاب می‌شود. چون استفاده از مدل منطق فازی در مکان‌یابی محل نیروگاه خورشید بر مبنای تحلیل‌های رستری (شبکه‌ای) است، باید هر پیکسل در هر معیار با توجه به تابع ایده‌آل، ارزش عضویتی از صفر تا یک را به خود بگیرد.

نوع توابع عضویت فازی که برای فازی کردن هریک از معیارها استفاده گردیده با توجه به ماهیت پارامتر مورد استفاده به شرح جدول ۳ می‌باشد. فازی‌سازی با استفاده از توابع فازی برای هر معیار نشان می‌دهد که انتخاب یک تابع به منظور فازی‌سازی باید با توجه به هدف (مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی)، ماهیت معیار در منطقه‌ی مورد مطالعه و رابطه‌ی معیار با هدف موردنظر صورت گیرد.

جدول ۳. نوع تابع فازی جهت استانداردسازی نقشه‌های معیار در منطق فازی

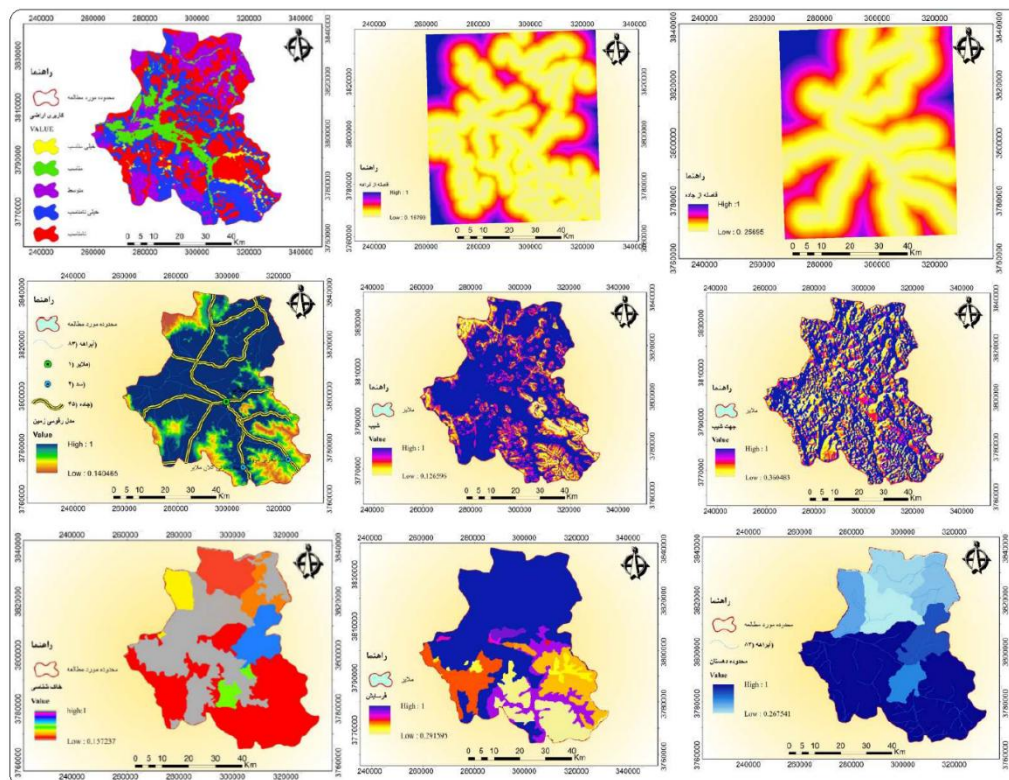
Table 3. Type of fuzzy function for standardizing criteria maps in fuzzy logic

ردیف	نام معیار (لایه‌ی نقشه)	نقاط کنترل (مقادیر ملایر)		نوع تابع فازی	نام تابع فازی
		a یا c	b یا d		
۱	شیب (درصد)	۴۰	۳	کاهشی	Sigmodial
۲	فاصله از گسل (متر)	۱۰۰۰	۱۰۰	افزایشی	Sigmodial
۳	فاصله از شهر (کیلومتر)	۳۲	۵	کاهشی	J Shape
۴	فاصله از آب‌های سطحی (متر)	۶۰۰	۱۵۰	افزایشی	Sigmodial
۵	فاصله از جاده‌ها (متر)	۱۰۰۰	۱۰۰	کاهشی	Sigmodial
۶	فاصله از مراکز جمعیتی (متر)	۳۰۰۰	۵۰۰	افزایشی	J Shape
۷	فاصله از فرودگاه (کیلومتر)	۷	۱	افزایشی	J Shape
۸	فاصله از چاه‌ها (متر)	۶۰۰	۱۵۰	افزایشی	Sigmodial
۹	فاصله از مناطق حفاظت‌شده (متر)	۱۰۰۰	۱۰۰	افزایشی	J Shape
۱۰	فاصله از اراضی زراعی و باغ‌ها (متر)	۲۵۰	۰	افزایشی	J Shape
۱۱	عمق آب‌های زیرزمینی (متر)	۳۰	۱۰	افزایشی	Sigmodial
۱۲	فاصله از خطوط انتقال نیرو (متر)	۱۰۰۰	۱۰۰	افزایشی	Sigmodial

برگرفته از: یافته‌های تحقیق

(ب) استخراج نقشه‌های فازی شده

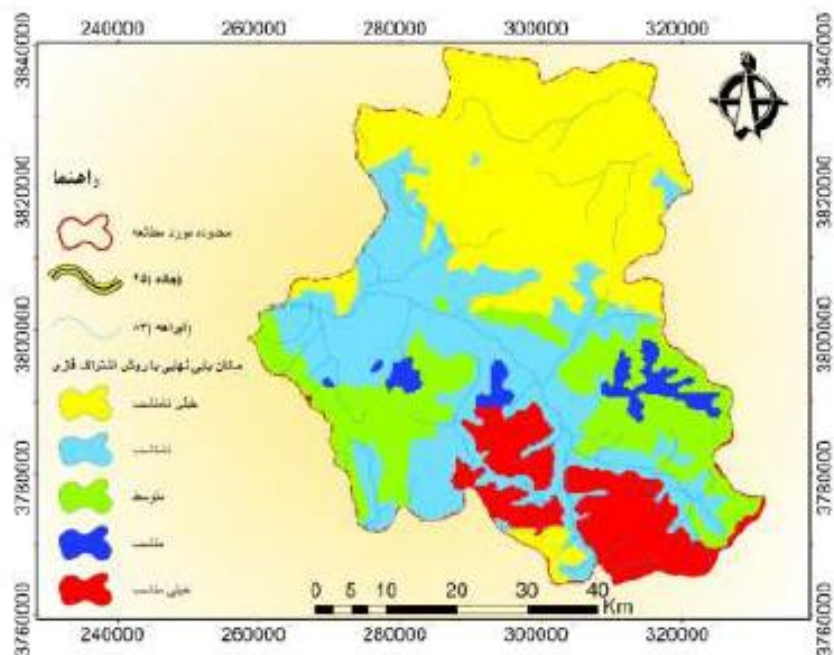
نتایج فازی‌سازی هریک از عوامل مؤثر بر محل بهینه‌ی نیروگاه خورشیدی با استفاده از توابع عضویت فازی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نقشه‌های فازی‌شده‌ی معیارهای مورد بررسی؛ برگرفته از: یافته‌های تحقیق

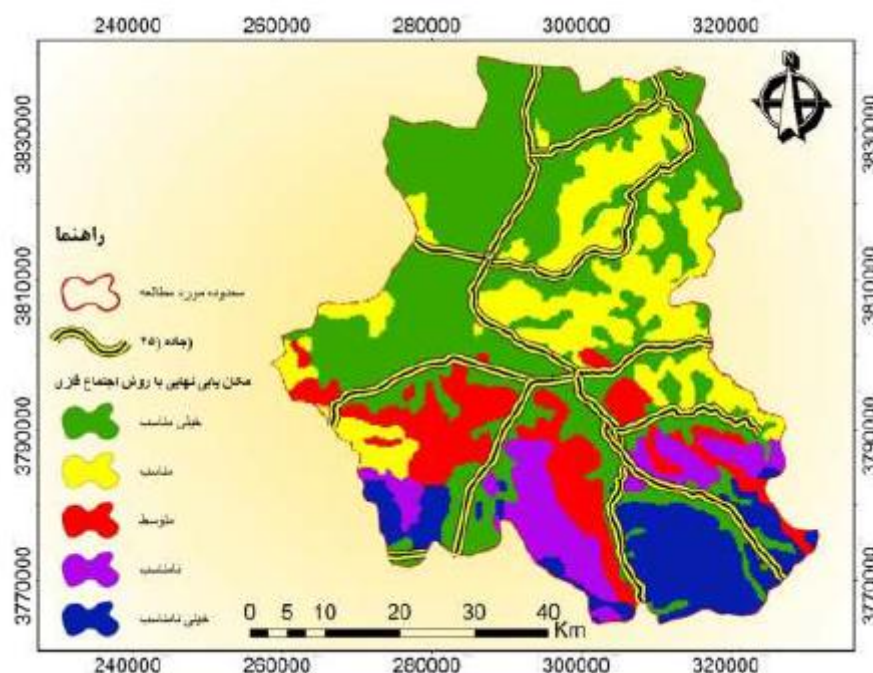
Figure 5. Fuzzified maps of the studied criteria

همچنین نقشه‌های نهایی مکان‌یابی حاصل از ۶ روش اشتراک فازی، اجتماع فازی، ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی، عملگر گاما 0.3 و 0.9 به شرح شکل‌های ۶ تا ۱۱ است.



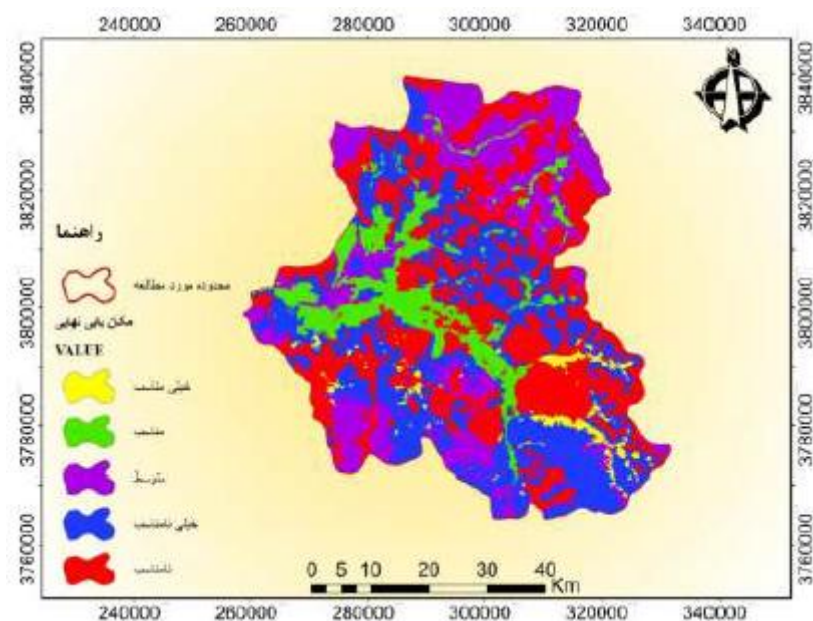
شکل ۶. مکان‌یابی محل بهینه‌ی نیروگاه خورشیدی به روش اشتراک فازی؛ برگرفته از: یافته‌های تحقیق

Figure 6. Locating the optimal site for solar power plant using fuzzy intersection method



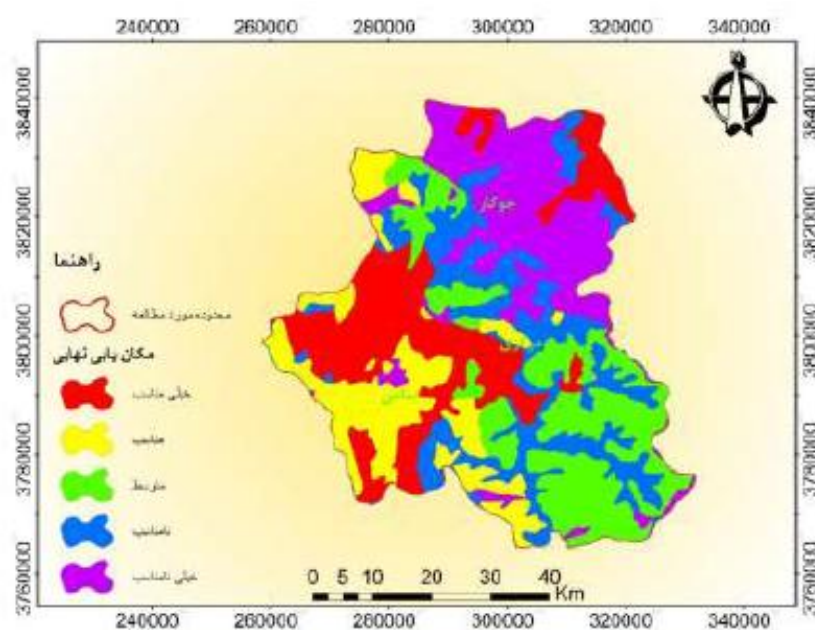
شکل ۷. مکان یابی محل بهینه ی نیروگاه خورشیدی به روش اجتماع فازی؛ برگرفته از: یافته های تحقیق

Figure 7. Locating the optimal site for solar power plant using fuzzy union method



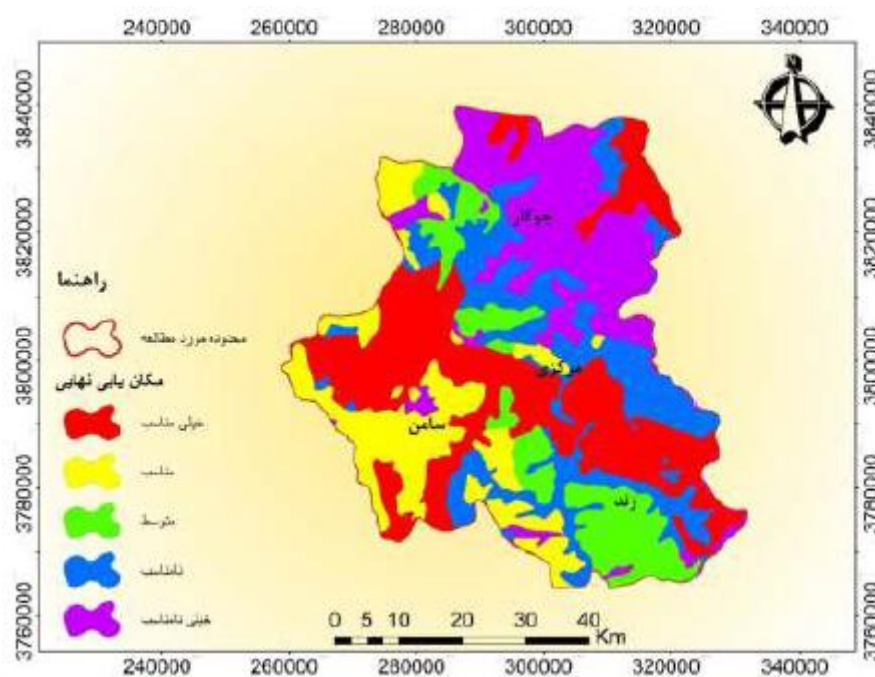
شکل ۸. مکان یابی محل بهینه ی نیروگاه خورشیدی به روش ضرب جبری فازی؛ برگرفته از: یافته های تحقیق

Figure 8. Locating the optimal site for solar power plant using fuzzy algebraic product method



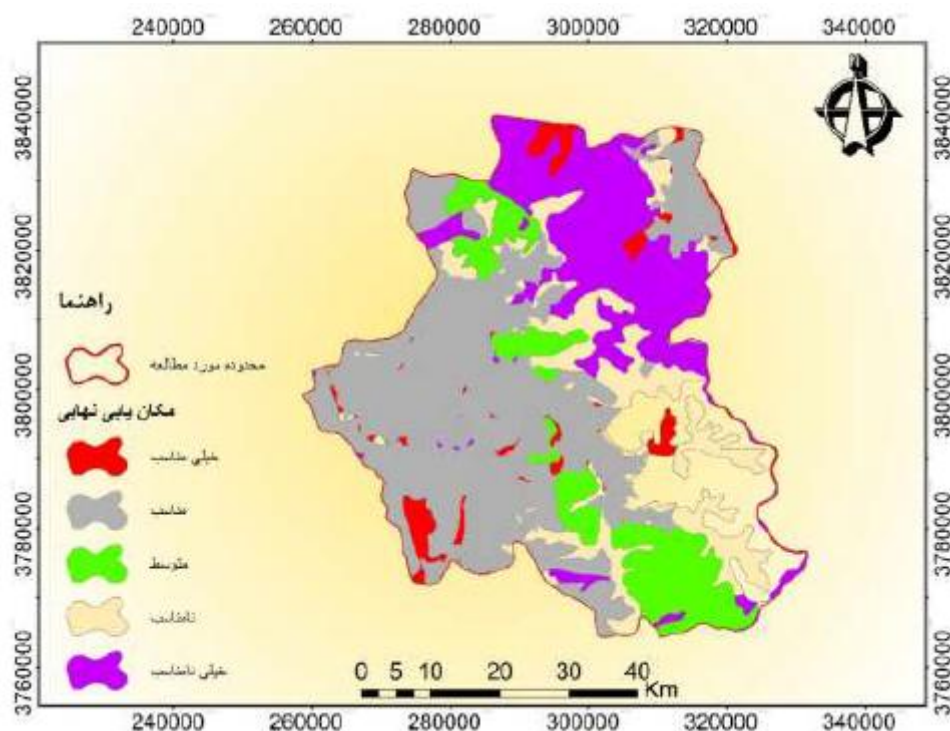
شکل ۹. مکان‌یابی محل بهینه‌ی نیروگاه خورشیدی به روش جمع جبری فازی؛ برگرفته از: یافته‌های تحقیق

Figure 9. Locating the optimal site for solar power plant using fuzzy algebraic sum method



شکل ۱۰. مکان‌یابی محل بهینه‌ی نیروگاه خورشیدی بر اساس عملگر گاما ۰/۳؛ برگرفته از: یافته‌های تحقیق

Figure 10. Locating the optimal site for solar power plant based on Gamma 0.3 operator



شکل ۱۱. مکان یابی محل بهینه‌ی نیروگاه خورشیدی بر اساس عملگر گاما ۰/۹؛ برگرفته از: یافته‌های تحقیق

Figure 11. Locating the optimal site for solar power plant based on Gamma 0.9 operator

در جدول شماره ۴، پهنه‌های مطلوب احداث نیروگاه‌های خورشیدی در شهرستان ملایر مشخص شده است. بر اساس نتایج شهرستان ملایر از پهنه‌های مطلوبی برای احداث نیروگاه خورشیدی به‌ویژه در بخش شمالی برخوردار است. بیشترین پهنه‌های مطلوب با ۲۷/۱۷ درصد با عملگر گاما ۰/۳ و کمترین پهنه‌های مطلوب با عملگر جبری فازی ۹/۷۴ درصد مشخص شده است. همچنین پهنه‌های مطلوب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی بر اساس روش‌های اشتراک فازی، اجتماع فازی، جمع جبری فازی و عملگر گامای ۰/۹ به ترتیب ۱۸/۱۹، ۲۲/۵۴، ۲۳/۱۷ و ۲۳/۱۷ درصد محاسبه شده است.

جدول ۴. وضعیت پهنه‌های بهینه برای مکان احداث نیروگاه‌های خورشیدی در عملگرهای مختلف فازی

Table 4. Status of optimal zones for solar power plant construction sites using different fuzzy operators

مکان یابی	طبقات	اشتراک فازی		اجتماع فازی		ضرب جبری فازی		جمع جبری فازی		عملگر گاما ۰/۳		عملگر گاما ۰/۹	
		درصد	مساحت (هکتار)	درصد	مساحت (هکتار)	درصد	مساحت (هکتار)	درصد	مساحت (هکتار)	درصد	مساحت (هکتار)	درصد	مساحت (هکتار)
بسیار مناسب	۷۵۵	۱۸/۱۹	۶۵۵	۲۲/۵۴	۱۷۹	۹/۷۴	۶۰۰	۲۳/۱۷	۹۶۶	۲۷/۱۷	۷۱۰	۲۳/۱۷	۷۱۰
مناسب	۸۴۶	۲۵/۷۱	۹۴۶	۲۷/۲۸	۴۸۲	۱۶	۹۵۶	۲۷/۷۸	۷۱۰	۲۳/۷۸	۱۰۶۶	۲۷/۷۸	۱۰۶۶
متوسط	۱۰۴۸	۲۶/۶۴	۱۰۴۸	۳۱/۳۶	۶۶۵	۲۴/۷۹	۶۵۵	۲۲/۰۱	۶۵۵	۲۲/۰۱	۶۵۵	۲۲/۰۱	۶۵۵
نامناسب	۳۸۲	۱۹/۶۴	۴۸۲	۱۷/۷۶	۹۴۶	۲۷/۵۶	۴۸۹	۱۷/۶۹	۵۸۹	۱۸/۶۹	۲۷۸	۷/۶۹	۲۷۸
بسیار نامناسب	۲۷۹	۹/۸۰	۱۷۹	۱۰/۰۵	۶۰۶	۲۱/۷۴	۱۷۸	۸/۷۸	۲۷۸	۷/۷۸	۴۸۹	۱۸/۷۸	۴۸۹

برگرفته از: یافته‌های تحقیق

نتایج همچنین حاکی از آن است که مقدار خطای نسبی برای روش‌های گامای فاز ۰/۳، گامای فاز ۰/۹، جمع جبری فاز ۰/۹، اشتراک فاز ۰/۹ و اجتماع فاز ۰/۹ به ترتیب ۶/۷۵، ۱۲/۹۷، ۱۱/۰۶، ۹/۸۷، ۳۰/۰۶ و ۷/۷۴ درصد محاسبه شده است. از طرفی مقدار موفقیت نسبی هر کدام نیز به ترتیب ۷۰/۰۶، ۴۲/۰۷، ۶۷/۵۷، ۳۹/۸۷، ۴۶/۷ و ۶۶/۲۲ درصد محاسبه گردیده است. نیروگاه‌های خورشیدی در واقع انواع نیروگاه‌های تولید برق، با استفاده از انرژی و گرمای خورشید هستند. به نیروگاه‌هایی که در آن از انرژی فوتون‌های خورشید برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود، نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک گفته می‌شود. در مقابل به نیروگاه‌های برق خورشیدی که در آن با استفاده از حرارت خورشید، برق تولید می‌گردد، نیروگاه خورشیدی حرارتی گفته می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که نیروگاه‌ها و سیستم‌های حرارتی خورشیدی به‌عنوان نیروگاه‌های تجدیدپذیر، از انرژی متمرکز شده‌ی خورشید استفاده می‌کنند.

سیستم‌های حرارتی خورشیدی سیستم‌های دنبال‌کننده هستند. این سیستم‌ها با تغییر موقعیت خورشید در آسمان آن را دنبال کرده و نور خورشید را روی گیرنده متمرکز می‌کنند. سیستم‌های حرارتی خورشیدی همچنین سیستم ذخیره‌کننده‌ی انرژی حرارتی دارند که به کلکتورها این اجازه را می‌دهد که در طول روز این پروسه گرم کردن را ادامه دهند و این حرارت برای تولید الکتریسیته حتی در زمانی که هوا ابری باشد استفاده می‌گردد. از طرفی نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی ممکن است سیستم‌های ترکیبی باشند که از سوخت‌های دیگر (معمولاً گاز طبیعی) برای تأمین انرژی در زمانی که تابش خورشید کم است استفاده نمایند.

رول، جین، گایکواد و ساها^۱ (۲۰۱۸)، بیان داشته‌اند که انرژی حرارتی را می‌توان برای استفاده‌ی بعدی به‌صورت گرمای محسوس، گرمای نهان یا گرمای حرارتی شیمیایی ذخیره کرد. بر اساس دیدگاه آچکری و الفدار^۲ (۲۰۲۰)، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر همچون حرارت خورشید می‌تواند به کاهش پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از استفاده‌ی انرژی‌های تجدیدناپذیر و آلاینده منجر گردد. بدین منظور نیاز است که به شناسایی مکان‌های مستعد برای احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی اقدام نمود. در این راستا بر مبنای دیدگاه چیتکا و انورمادو^۳ (۲۰۱۶)، شاخص‌های مختلفی همچون شیب، فاصله از گسل، فاصله از خطوط انتقال نیرو و توپوگرافی زمین برای مکان‌یابی نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی بیان گردیده است. با این حال پژوهش حاضر با استفاده از شاخص‌های مختلف و جامع‌تر اقدام به شناسایی پهنه‌های احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی در شهرستان ملایر پرداخته است. این شاخص‌ها عبارتند از: شیب، فاصله از گسل، فاصله از شهر، فاصله از آب‌های سطحی، فاصله از جاده‌ها، فاصله از مراکز جمعیتی، فاصله از فرودگاه، فاصله از چاه‌ها، فاصله از مناطق حفاظت‌شده، فاصله از اراضی زراعی و باغ‌ها، عمق آب‌های زیرزمینی، فاصله از خطوط انتقال نیرو. با استفاده از این شاخص‌ها و مکان‌های شناسایی‌شده می‌توان به احداث نیروگاه‌های حرارتی اقدام نمود.

درنهایت می‌توان گفت که از نظر استفاده از شاخص‌های مختلف توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل)، محیط‌زیست (کاربری اراضی، رودخانه‌ها) و محیط انسانی (محدوده‌ی مسکونی، راه‌ها)، پژوهش حاضر همسو با پژوهش‌های احمدی و همکاران (۱۳۹۵) و شیرزاد و همکاران (۱۳۹۷) و از نظر مکان‌یابی نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی متمرکز (CSP) همسو با پژوهش‌های حداد و همکاران (۲۰۲۱) و موتومه (۲۰۲۳) می‌باشد. از طرفی بهره‌مندی از روش‌ها، توابع و عملگرهای مختلف فاز ۰/۹ برای مکان‌یابی تفاوت پژوهش حاضر با پیشینه‌ی مطالعاتی می‌باشد. از منظر نتایج نیز با توجه به تفاوت‌های جغرافیایی نتایج مشابهی بین پژوهش‌های مختلف وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

برای کاهش پیامدهای منفی زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی، استفاده از ابزارها و فناوری‌های جدید برای یافتن مکان مناسب نیروگاه خورشیدی ضروری به‌نظر می‌رسد. امروزه، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، به‌طور گسترده در برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی فرآیندی پیچیده است زیرا باید تمامی پارامترهای اجتماعی، زیست‌محیطی

¹ Raul, Jain, Gaikwad & Saha

² Achkari & El Fadar

³ Chiteka & Enweremadu

و فنی را دارا باشد. همچنین هدف از پروسه‌ی مکان‌یابی این است که مناطقی با حداقل خطر برای سلامت عموم و محیط‌زیست شناسایی گردند و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه باشند. یک مکان مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی باید بتواند معیارهای مختلف محیط‌زیستی، سیاسی، اقتصادی، هیدرولوژی، توپوگرافی و دیگر معیارها را برآورده سازد. متأسفانه در ایران دستورالعمل مدونی در ارتباط با ضوابط و معیارهای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی وجود ندارد. با این حال انتخاب محل مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی یکی از مراحل مهم طراحی و ساخت نیروگاه‌های خورشیدی است و باتوجه به اثرات مخرب محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی، انتخاب محل باید با دقت و طی یک فرآیند علمی صورت گیرد. با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی از جمله شیب، زمین‌شناسی، گسل‌ها، آب‌های زیرزمینی، هیدروگرافی، چاه‌ها، کاربری اراضی، خطوط ارتباطی، خطوط انتقال نیرو، مناطق حفاظت‌شده و مراکز جمعیتی و همچنین تحلیل‌های فضایی مشخص گردید که در شهرستان ملایر مناطق مناسبی برای احداث نیروگاه خورشیدی حرارتی وجود دارد و می‌توان بخشی از نیاز برق استان را با شناسایی مکان مناسب جهت احداث تأمین نمود. این مکان‌ها بیشتر در قسمت شمالی و بخش جوکار قرار دارند. همچنین بخش‌های مرکزی و سامن نیز از وضعیت نسبتاً مطلوبی برای احداث نیروگاه خورشیدی برخوردارند. از طرفی بررسی میزان مطلوبیت پهنه‌های احداث نیروگاه خورشیدی با استفاده از روش‌های مختلف فازی مورد ارزیابی قرار گرفته و بیشترین پهنه‌های مطلوب با ۲۷/۱۷ درصد با عملکرد گاما ۰/۳ و کمترین پهنه‌های مطلوب با عملکرد جبری فازی ۹/۷۴ درصد مشخص شده است.

پیشنهادهای کاربردی منطبق با نظریه راهبرد مهندسی جغرافیایی فضا

- در نهایت به‌منظور تحقق مطلوبیت در حوزه‌ی مکان‌یابی پهنه‌های احداث نیروگاه خورشیدی می‌توان پیشنهادهای زیر را ارائه کرد:
- ۱- مطالعات دقیق‌تر با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی با مقیاس بزرگ‌تر؛
 - ۲- تبدیل لایه‌های اطلاعاتی به لایه‌های هزینه کرد برای برآورد هزینه احداث در مکان‌های مستعد؛
 - ۳- بررسی تطبیقی نتایج با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری مکانی؛
 - ۴- استفاده از تصاویر ماهواره‌ای جدید با قدرت تفکیک مکانی بیشتر و بروز برای مقایسه‌ی سیر تحول جایگاه کنونی در گذشته و حال و تلفیق آن با مدل‌های جدید سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، برای شناسایی و ارزیابی خطر در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی منطقه‌ی مورد مطالعه.

References

- Abedin, A.H., & Rosen, M.A. (2011). A critical review of thermochemical energy storage systems. *The Open Renewable Energy Journal*, 8(4), 1-11. Doi: [10.2174/1876387101004010042](https://doi.org/10.2174/1876387101004010042)
- Achkari, O., & El Fadar, A. (2020). Latest developments on TES and CSP technologies – energy and environmental issues, applications and research trends. *Applied Thermal Engineering*, 167, 1-17. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2019.114806](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114806)
- Ahmadi, H., Morshedi, J., Azimi, Farideh. (2016). Site selection of solar power plant using Geospatial Information System and climatic data (Case study: Ilam province). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, vol. 7, no. 1, 41-57. [In Persian] URL: <https://sanad.iau.ir/Journal/girs/Article/901911>
- Alhadidi, T.I., & Alomari, A.H. (2024). A FAHP-VIKOR model for evaluating single point interchange operational performance. *Expert Systems with Applications*, 248, 123386. Doi: [10.1016/j.eswa.2024.123386](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123386)
- Carrillo, A.J., Gonzalez-Aguilar, J., Romero, M., & Coronado, J.M. (2019). Solar energy on demand: a review on high temperature thermochemical heat storage systems and materials. *Chemical Reviews*, 119(7), 4777–4816. Doi: [10.1021/acs.chemrev.8b00315](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00315)
- Cavallaro, F. (2009). Multicriteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 34(7), 1678–1685. Doi: [10.1016/j.renene.2008.12.034](https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.034)
- Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554-2561. Doi: [10.1016/j.renene.2010.10.037](https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037)

- Chiteka, K., & Enweremadu, C.C. (2016). Development of a solar photovoltaic system sizing application for Zimbabwe. In: *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, March 2016, pp. 1018–1023. Doi: [10.1109/ICEEOT.2016.7754840](https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7754840)
- Concentrating solar power projects. (2023). NREL. URL: <https://solarpaces.nrel.gov>
- Dawson, L., & Schlyter, P. (2012). Less is more: Strategic scale site suitability for concentrated solar thermal power in Western Australia. *Energy Policy*, 47, 91-101. Doi: [10.1016/j.enpol.2012.04.025](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.025)
- Dizaji, H.B., & Hosseini, H. (2018). A review of material screening in pure and mixed-metal oxide thermochemical energy storage (TCES) systems for concentrated solar power (CSP) applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 9–26. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v98y2018icp9-26.html>
- Giamalaki, M., & Tsoutsos, T. (2019). Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach. *Renewable Energy*, 141, 64–75. Doi: [10.1016/j.renene.2019.03.100](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.100)
- Haddad, B., Diaz-Cuevas, P., Ferreira, P., Djebli, A., & Perez, J.P. (2021). Mapping concentrated solar power site suitability in Algeria. *Renewable Energy*, 838-853. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/renene/v168y2021icp838-853.html>
- Hemedan, A.A., Niarakis, A., Schneider, R., & Ostaszewski, M. (2022). Boolean modelling as a logic-based dynamic approach in systems medicine. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 20, 3161-3172. Doi: [10.1016/j.csbj.2022.06.035](https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.06.035)
- Janke, J. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35, 1-16. Doi: [10.1016/j.renene.2010.03.014](https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.014)
- Kedir, N., & Fayek, A.R. (2023). Integrated FAHP-FDEMATEL for determining causal relationships in construction crew productivity modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 50(11), 923-935. Doi: [10.1139/cjce-2022-0425](https://doi.org/10.1139/cjce-2022-0425)
- Li, W., Klemes, J.J., Wang, Q., & Zeng, M. (2022). Salt hydrate-based gas-solid thermochemical energy storage: current progress, challenges, and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 1-20. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v154y2022ics1364032121011138.html>
- Moghtaderi, B. (2010). Application of chemical looping concept for air separation at high temperatures. *Energy Fuels*, 24(1), 190–198. Doi: [10.1021/ef900553j](https://doi.org/10.1021/ef900553j)
- Momenzadeh, Z., Kalantari, S., Tazeh, M., Taghizadeh, R. (2021). Zoning and locating solar power station using AHP and GIS in Yazd province.” *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 22, no. 12, pp. 259-271. [In Persian] Doi: [10.22034/jest.2020.37606.4373](https://doi.org/10.22034/jest.2020.37606.4373)
- Mutume, B. (2023). A feasibility assessment of utilizing concentrated solar power (CSP) in the Zimbabwean regions of Hwange and Lupane. *Heliyon*, 9, 1-20. Doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e18210](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18210)
- Peng, X., Yao, M., Root, T.W. & Maravelias, C.T. (2020). Design and analysis of concentrating solar power plants with fixed-bed reactors for thermochemical energy storage. *Applied*, 262, 1-18. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v262y2020ics0306261920300556.html>
- Rashayi, E., & Chikuni, E. (2012). The potential of grid connected photovoltaic arrays in Zimbabwe. In: *2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, March 2012, pp. 285–288. Doi: [10.1109/MELCON.2012.6196434](https://doi.org/10.1109/MELCON.2012.6196434)
- Raul, A., Jain, M., Gaikwad, S., & Saha, S.K. (2018). Modelling and experimental study of latent heat thermal energy storage with encapsulated PCMs for solar thermal applications. *Applied Thermal Engineering*, 143, 415–428. Doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.07.123](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.123)
- Samu, R., Fahrioglu, M., & Ozansoy, C. (2019). The potential and economic viability of wind farms in Zimbabwe. *International Journal of Green Energy*, 16(15), 1539–1546. Doi: [10.1080/15435075.2019.1671424](https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1671424)
- Santiago Suárez, J.M., & Viale, M. (2024). Boolean valued semantics for infinitary logics. *Annals of Pure and Applied Logic*, 175(1), 103333. Doi: [10.1016/j.apal.2023.103333](https://doi.org/10.1016/j.apal.2023.103333)
- Shirzad, Z., Minaei, M., Minaei, F. (2019). Spatial Assessment of the Potential for Solar Panel Installation using Multi-criteria Decision-making Methods (Case Study: A Section of Zone 2 in District 8 of Mashhad Metropolitan City). *Journal of Geography and Regional Development*, 16(2), 103-124. [In Persian] Doi: [10.22067/geography.v16i2.68945](https://doi.org/10.22067/geography.v16i2.68945)
- Silakhori, M. (2019). *Application of Chemical Looping for Solar Thermal Energy Storage*. PhD thesis, University of Adelaide, South Australia.
- SOLARGIS. (2022). Solar Irradiance data. URL: <https://solargis.com>

- Steinmann, W.D. (2021). *Thermal energy storage systems for concentrating solar power plants*. In: Concentrating Solar Power Technology, Elsevier, 399–440. Doi: [10.1016/B978-0-12-819970-1.00008-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00008-6)
- Tregambi, C., Padula, S., Galbusieri, M., Coppola, G., Montagnaro, F., Salatino, P., Troiano, M., & Solimene, R. (2020). Directly irradiated fluidized bed reactor for thermochemical energy storage and solar fuels production. *Powder Technology*, 366, 460–469. Doi: [10.1016/j.powtec.2020.02.045](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.045)
- Wang, Z. (2019). *Chapter 7- site selection, power load, and power generation procedures*. In: Z. Wang (Ed.), *Design of Solar Thermal Power Plants*, Academic Press, 417–424.
- Wu, J., & Long, X.F. (2015). Research progress of solar thermochemical energy storage. *International Journal of Energy Research*, 39(7), 869–888. Doi: [10.1002/er.3259](https://doi.org/10.1002/er.3259)
- Zimbabwe Power Company. (2022). Powering Zimbabwe into the future. URL: <https://www.zpc.co.zw>