

Designing a Framework for Solar Power Plant Development Using a Multi-Criteria Decision-Making Approach and Data Envelopment Analysis

Fatemeh Moslemi¹, Nasser Safaie^{2,*}

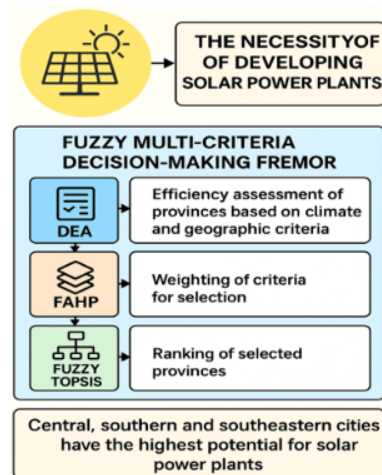
¹ M.Sc., Faculty of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Faculty of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Identifying optimal locations for solar power plants with a multi-criteria decision-making framework
- Helping data envelopment analysis, relying on climatic and geographical indicators, to screen potential provinces
- Using fuzzy logic and expert judgments to weight criteria more accurately and manage uncertainties

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 July 2025

Revised: 30 August 2025

Accepted: 30 September 2025

Available online: 1 October 2025

*Correspondence: nsafaie@kntu.ac.ir

How to cite this article:

Moslemi, F., & Safaie, N. (2026). Designing a framework for solar power plant development using a multi-criteria decision-making approach and data envelopment analysis. *System Engineering and Productivity*, 6 (2), 37-62.

Keywords:

Renewable Energy

Data Envelopment Analysis (DEA)

Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

Geographical Prioritization

Fuzzy logic

ABSTRACT

In recent years, Iran has faced increasing challenges in meeting its energy demands, as evidenced by frequent power outages in both residential and industrial sectors. This situation underscores the urgent need for sustainable and reliable energy solutions. This study proposes a hybrid multi-criteria decision-making framework to identify and rank the most suitable regions for developing solar power plants across the country. The study employs a fuzzy logic-based approach to integrate multiple methods while accounting for the inherent uncertainty in data and expert opinions. In the first stage, Data Envelopment Analysis (DEA) was utilized to evaluate the efficiency of all provinces based on climatic and geographical indicators, including solar radiation, sunshine hours, precipitation, cloud cover, and altitude, using data from the Iran Meteorological Organization. This process facilitated the screening and identification of provinces more suitable for establishing solar power plants. Subsequently, key and influential criteria for optimal site selection were determined and weighted using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) based on expert judgments. Finally, by integrating the results of the previous stages, the selected provinces were ranked using the Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (FTOPSIS). The results indicate that the central, southern, and southeastern provinces of Iran possess the highest potential for solar energy development. The findings of this research can assist decision-makers, planners, and investors in the energy sector to take a significant step toward advancing Iran's transition to a more sustainable future and reducing its dependency on oil and gas.

1. Introduction

The global energy landscape is facing unprecedented challenges due to the rapid increase in population growth and industrial expansion, which have led to a surge in electricity demand (Fararu, 2024). Fossil fuel dependency has resulted in environmental degradation and long-term economic vulnerabilities. Iran, despite possessing vast reserves of oil and natural gas, remains heavily reliant on fossil fuels for electricity generation—95% of power was generated from fossil resources between July 2023 and June 2024. However, with more than 300 sunny days annually, Iran is among the most favorable regions worldwide for solar power development (Avazpour et al., 2025). Previous studies on solar site selection in Iran have often focused on limited provinces, relied primarily on climatic indicators, or neglected socio-economic and infrastructural dimensions. This study addresses these gaps by designing a comprehensive multi-criteria framework that integrates climatic, technical, economic, environmental, and social dimensions to identify optimal locations for solar power plants at a national scale. The novelty of this research lies in combining DEA, FAHP, and Fuzzy TOPSIS into a sequential framework, supported by real meteorological and expert judgment data, to enhance both theoretical rigor and practical applicability.

2. Methodology

The research methodology follows a three-stage hybrid multi-criteria decision-making (MCDM) approach. In the first phase, Data Envelopment Analysis (DEA) using the BCC model (Banker et al., 1984) was applied to evaluate the relative efficiency of 68 cities across 31 provinces based on five input variables (temperature, wind speed, humidity, precipitation, cloudiness) and three output indicators (sunshine hours, solar irradiation, elevation). This screening eliminated inefficient provinces and identified high-potential candidates. In the second phase, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) was employed to determine the relative weights of selection criteria. Four dimensions—technical, economic, environmental, and social—were decomposed into 14 sub-criteria. Expert opinions from 21 professionals active in the renewable energy sector were collected through structured questionnaires, and the fuzzy pairwise comparison method was used to address uncertainty and linguistic vagueness.

In the final phase, Fuzzy TOPSIS was applied to rank the screened provinces. Ten domain experts assessed the provinces using linguistic variables mapped to triangular fuzzy numbers, enabling aggregation into a comprehensive decision matrix (Hwang & Yoon, 1981). DEA Solver and Excel software were used for computational analysis.

3. Results and Discussion

The FAHP results indicated that the economic dimension (0.42) and technical dimension (0.35) were the most significant factors in solar site selection, followed by environmental (0.17) and social (0.06) dimensions. This ranking highlights that financial feasibility, infrastructure proximity, and technical viability dominate decision-making, while social acceptance remains a lower priority in the Iranian context.

The Fuzzy TOPSIS stage produced a clear ranking of provinces. Yazd achieved the highest priority with a closeness coefficient (CCi) of 0.9913, followed by Kerman (0.9639), South Khorasan (0.8585), Isfahan (0.8423), and Fars (0.7903). Provinces with weaker climatic or infrastructural conditions, such as Chaharmahal and Bakhtiari and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad, ranked significantly lower. These findings align with prior regional research but extend their scope nationally with more robust integration of multi-criteria models.

A sensitivity analysis confirmed that the model results were stable under moderate changes in weights, though economic factors exhibited the highest influence on ranking variability. This demonstrates the robustness of the proposed framework and its practical adaptability to decision-making environments with uncertainty.

4. Conclusions

This study developed a comprehensive and integrated DEA-FAHP-Fuzzy TOPSIS framework for national-scale solar power plant site selection in Iran. The framework effectively combines quantitative climatic data with qualitative expert input under uncertainty. The results underscore that central and southeastern province, particularly Yazd, Kerman, and South Khorasan, represent the most promising investment zones. Policymakers and energy planners can utilize these rankings to allocate resources efficiently, prioritize infrastructure upgrades, and reduce dependence on fossil fuels. Future research should incorporate high-resolution GIS layers, life-cycle cost analysis, and emerging solar technologies to refine the framework and ensure long-term sustainability.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Fatemeh Moslemi: Conceptual research model, Literature review and theoretical background, data analysis, Statistical analysis draft, Drafting the manuscript, Preliminary report review, Research methodology development, and Text revision. **Nasser Safaie:** Preliminary report review, research methodology development, Conceptual research model, Supervision, Text revision.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the executive team and reviewers of the System and Productivity Engineering. Additionally, heartfelt thanks and appreciation are extended to all individuals who contributed to this research, particularly the consulting firms and contractors of the Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA), who diligently and patiently responded to the research questionnaires.

References

- Avazpour, M., Zarei, J., & Alinezhad, E. (2025). Evaluation and prioritization of electricity generation technologies in Iran using a multi-criteria decision-making approach. *System Engineering and Productivity*, 5(3), 179–198. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2063697.1333>
- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078–1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- Fararu. (2024). Iran's electricity blackout crisis under sanctions: Why not use solar energy? *Fararu News*. Retrieved October 1, 2025, from (In Persian). <https://fararu.com/fa/news/798652>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>

طراحی چارچوب مدلی برای احداث نیروگاه خورشیدی با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل پوششی داده‌ها

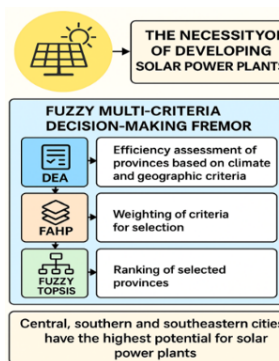
فاطمه مسلمی^۱، ناصر صفایی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

برجسته‌ها

- شناسایی مکان‌های بهینه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی با چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره
- کمک کردن تحلیل پوششی داده‌ها با تکیه بر شاخص‌های اقلیمی و جغرافیایی به غربالگری استان‌های مستعد
- بهره‌گیری از منطق فازی و قضاوت‌های خبرگان برای وزندهی معیارها با دقت بیشتر و مدیریت عدم قطعیت‌ها

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

*نویسنده مسئول:

nsafaie@kntu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

انرژی‌های تجدیدپذیر

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

اولویت‌بندی جغرافیایی

منطق فازی

چکیده

ایران در سال‌های اخیر با چالش‌های فزاینده‌ای در تأمین نیازهای انرژی خود مواجه شده که این امر با قطعی‌های مکرر برق در بخش‌های خانگی و صنعتی مشهود است. این وضعیت ضرورت یافتن راه‌حل‌های پایدار و قابل‌اعتماد انرژی را برجسته می‌کند. این مطالعه چارچوبی ترکیبی برای تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه می‌دهد تا مناسب‌ترین مناطق برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در سراسر کشور شناسایی و رتبه‌بندی شوند. این مطالعه از رویکرد مبتنی بر منطق فازی برای انتخاب ترکیبی از روش‌ها استفاده کرده، درحالی‌که عدم قطعیت ذاتی در داده‌ها و نظرات خبرگان را در نظر گرفته است. در مرحله اول، تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) برای ارزیابی کارایی تمامی استان‌ها بر اساس شاخص‌های اقلیمی و جغرافیایی مانند تابش خورشیدی، ساعات آفتابی، بارندگی، میزان ابرناکی و ارتفاع، با استفاده از داده‌های سازمان کل هواشناسی کشور به کار گرفته شد. این فرایند به غربالگری و شناسایی استان‌های مناسب‌تر برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی کمک کرد. سپس، معیارهای کلیدی و مؤثر برای انتخاب بهینه مکان با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)، بر اساس قضاوت‌های خبرگان تعیین و وزندهی شدند. در نهایت، با تلفیق نتایج مراحل قبلی، استان‌های منتخب با استفاده از تکنیک رتبه‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل در محیط فازی (FTOPSIS) رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهند که استان‌های مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی ایران بالاترین پتانسیل را برای توسعه انرژی خورشیدی دارند. یافته‌های پژوهش می‌تواند به تصمیم‌گیران، برنامه‌ریزان و سرمایه‌گذاران در حوزه انرژی کمک کند تا گامی کلیدی در راستای حرکت ایران به سوی آینده‌ای پایدارتر و کاهش وابستگی به نفت و گاز باشد.

۱- مقدمه

فناوری خورشیدی فتولتائیک، با توجه به تابش بالای خورشید در ایران و قابلیت بهره‌برداری گسترده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایران با بیش از ۳۰۰ روز آفتابی در سال، یکی از کشورهای با ظرفیت بالا برای توسعه این نوع انرژی است. نصب آسان، هزینه پایین نگهداری، و امکان استفاده در مناطق دورافتاده از مزایای این فناوری محسوب می‌شوند. بنابراین، فناوری خورشیدی فتولتائیک به‌عنوان بهترین گزینه تجدیدپذیر برای تولید برق در ایران شناخته می‌شود (Avazpour et al., 2025).

با توجه به بحران ناترازی انرژی در ایران، حرکت به سمت منابع تجدیدپذیر به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. با وجود پتانسیل عظیم انرژی خورشیدی، ایران تاکنون بهره‌برداری مؤثری از این منبع نداشته است. رفع این شکاف نیازمند استراتژی جامع و برنامه‌ریزی شده‌ای است که دو مؤلفه کلیدی را شامل می‌شود: نخست، توسعه پایگاه داده‌ای قابل‌اعتماد از تابش خورشیدی و سایر شاخص‌های اقلیمی؛ و دوم، طراحی چارچوبی علمی و کارآمد برای حمایت از برنامه‌ریزی و اجرای موفق پروژه‌های نیروگاه خورشیدی.

هدف این مطالعه، طراحی ابزاری نظام‌مند برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در شناسایی مکان‌های مناسب برای تولید مؤثر انرژی خورشیدی است. این پژوهش به دنبال پاسخ به چند پرسش کلیدی است: نخست، مهم‌ترین معیارها و عوامل مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی کدامند و چگونه می‌توان آن‌ها را به‌صورت علمی و نظام‌مند اولویت‌بندی کرد؟ دوم، با در نظر گرفتن شرایط متنوع اقلیمی، اقتصادی و زیرساختی ایران، کدام مناطق از بالاترین پتانسیل برای احداث نیروگاه برخوردار هستند؟ و نهایتاً، آیا بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند دقت و اعتبار نتایج مکان‌یابی را بهبود بخشد؟ پاسخ به این پرسش‌ها زمینه‌ساز ارائه چارچوبی جامع برای انتخاب مکان بهینه و توسعه پایدار انرژی خورشیدی در ایران خواهد بود.

در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، گزینه‌ها بر اساس شاخص‌های متعدد ارزیابی می‌شوند تا بهترین گزینه انتخاب شود (Eghbali, 2022). از میان کاربردهای متنوع این روش‌ها، مکان‌یابی یکی از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین موارد است، زیرا ابزارهایی مناسب برای مدیریت شرایط برنامه‌ریزی چندبعدی فراهم می‌کنند

جمعیت جهانی به‌سرعت در حال رشد است و فعالیت‌های صنعتی نیز به‌طور فزاینده‌ای گسترش یافته‌اند. این دو عامل به افزایش تقاضای انرژی منجر شده‌اند که در گذشته، دسترسی به آن سنگ‌بنای پیشرفت اجتماعی محسوب می‌شد. با این حال، امروزه چالش اصلی تأمین نیازهای روبه‌رشد انرژی از طریق روش‌هایی است که نه تنها پاک و مقرون‌به‌صرفه باشند، بلکه پایداری بلندمدت را نیز تضمین کنند. این تغییر رویکرد، به دلیل الزامات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، بسیاری از کشورها را به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است (Fararu, 2024). با کاهش مداوم ذخایر محدود انرژی‌های تجدیدناپذیر و افزایش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزینی پایدار و روبه‌رشد مطرح شده‌اند.

با وجود پتانسیل عظیم انرژی خورشیدی، تولید برق در ایران همچنان عمدتاً به ذخایر سوخت‌های فسیلی وابسته است. ایران با در اختیار داشتن چهارمین ذخایر بزرگ نفت و دومین ذخایر بزرگ گاز طبیعی در جهان، به‌ترتیب ۹٪ و ۱۵/۸٪ از کل ذخایر جهانی را به خود اختصاص داده است. با این حال، این منابع به‌جای تبدیل شدن به موتور رشد اقتصادی، به‌نوعی تهدید بدل شده‌اند. وابستگی شدید به درآمدهای نفتی و گازی و مدیریت ناکارآمد این منابع، بحران‌هایی نظیر ناترازی در عرضه و تقاضای انرژی را به دنبال داشته است.

از جولای ۲۰۲۳ تا ژوئن ۲۰۲۴، تقریباً ۹۵٪ از برق ایران از سوخت‌های فسیلی تولید شده است که گاز طبیعی به‌تنهایی بیش از ۸۰٪ از این میزان را تشکیل می‌دهد. در مقابل، تنها حدود ۵٪ از برق از منابع انرژی کم‌کربن یا تجدیدپذیر، عمدتاً از نیروی برق‌آبی (هیدروپاور)، تأمین شده است. این آمار نشان‌دهنده شکاف قابل‌توجه بین پتانسیل و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران است. وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی، همراه با رشد سریع شهرنشینی و افزایش فعالیت‌های صنعتی، به آلودگی شدید هوا و مشکلات زیست‌محیطی منجر شده است. علاوه بر این، مشکلات اقتصادی ناشی از تحریم‌ها و کاهش ذخایر گاز طبیعی، به قطعی مکرر برق دامن زده است (Sadeghi et al., 2024).

اتخاذ کرده و دو تا سه شهر از هر استان (متناسب با وسعت جغرافیایی) را مورد ارزیابی قرار داده است. این راهبرد، امکان تحلیل دقیق‌تر و چندبعدی‌تری از ظرفیت‌های متنوع مناطق کشور را فراهم کرده و زمینه‌ساز ارائه نتایجی قابل‌تعمیم و کاربردی‌تر در سطح ملی شده است.

علاوه بر این، این پژوهش از رویکرد ترکیبی نوینی بهره می‌گیرد که شامل استفاده هم‌زمان از سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این ترکیب، نقاط ضعف هر روش را با استفاده از سایر روش‌ها پوشش داده و چارچوبی جامع و منعطف برای مکان‌یابی ارائه می‌دهد. همچنین، تمرکز بر داده‌های واقعی از ویژگی‌های متمایز این تحقیق است. استفاده از داده‌های واقعی هواشناسی و تحلیل‌های میدانی، قابلیت اجرایی و عملیاتی‌شدن نتایج را افزایش داده است.

۲- مرور ادبیات

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در ایران انجام شده است که هر یک از منظری خاص به این موضوع پرداخته‌اند. برخی مطالعات با تمرکز بر یک استان یا منطقه خاص، تلاش کرده‌اند چارچوب‌های تصمیم‌گیری مکانی را به کار گیرند. برای نمونه، اسماعیل‌پور و خیری‌زاده عروق (۲۰۲۴) با استفاده از تئوری فاجعه در محیط GIS، استان آذربایجان شرقی را برای شناسایی مکان‌های بهینه نیروگاه‌های خورشیدی بررسی کردند (Esmailpour & Kheirizadeh Arouq, 2024). به همین ترتیب، هستی و همکاران (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از روش‌های AHP، ANP و TOPSIS در محیط GIS، مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه در استان کردستان را شناسایی کردند (Hasti et al., 2023). خواجوی‌پور و همکاران (۲۰۲۱) مدلی مبتنی بر GIS-FFDEA برای مکان‌یابی در استان سیستان و بلوچستان توسعه دادند (Khajavi Pour et al., 2021). همچنین، ذوقی و همکاران (۲۰۱۷) از منطق فازی و ترکیب خطی وزنی (WLC) برای مکان‌یابی بهینه در استان اصفهان استفاده کردند (Zoghi et al., 2017). گرچه این مطالعات از نظر روش‌شناسی ارزشمند هستند، اما به دلیل تمرکز بر

(Wang et al., 2018). روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به دلیل ساختار شهودی و قابلیت استفاده در حوزه‌های علمی و صنعتی، از محبوبیت فراوانی برخوردار است. توانایی این روش در ساده‌سازی تصمیمات پیچیده از طریق مقایسه‌های زوجی، پذیرش گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف به دنبال داشته است (Sindhu et al., 2017).

در این راستا، سه روش به‌صورت مرحله‌ای و تلفیقی به کار گرفته شده‌اند تا پیچیدگی‌های ذاتی تصمیم‌گیری و عدم قطعیت‌های موجود در فرایند ارزیابی به‌درستی مدیریت شوند. در گام نخست، از تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) استفاده شد تا با بهره‌گیری از شاخص‌های اقلیمی نظیر تابش خورشید و شرایط آب‌وهوایی، شهرهایی با پتانسیل بالای انرژی خورشیدی شناسایی شده و گزینه‌های نامناسب حذف شوند. این روش، علاوه بر غربالگری مکان‌ها، با ارزیابی کارایی نسبی آن‌ها در تبدیل عوامل ورودی به شرایط مطلوب برای توسعه انرژی خورشیدی، امکان رتبه‌بندی علمی و دقیق گزینه‌ها را فراهم می‌کند. در ادامه، روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) برای تعیین وزن معیارهای تصمیم‌گیری به کار گرفته شد. در این مرحله، نظرات کارشناسان در قالب منطق فازی تحلیل شد تا اثر ابهام و عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های انسانی کاهش یابد و نتایج واقع‌گرایانه‌تری حاصل شود. نهایتاً، با استفاده از روش تاپسیس فازی (FTOPSIS)، مکان‌های منتخب بر اساس میزان نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل فازی اولویت‌بندی شدند. ادغام این سه روش مکمل، چارچوبی منسجم، متوازن و قابل‌اتکا برای انتخاب مکان نیروگاه خورشیدی فراهم می‌آورد که هم از نظر تئوری مستحکم است و هم از نظر اجرایی قابلیت بالایی دارد.

بررسی مطالعات داخلی نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی از نظر جغرافیایی محدود بوده و عمدتاً تنها یک یا دو استان خاص را پوشش داده‌اند. این تمرکز محدود، قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج به کل کشور را کاهش داده و امکان ارائه تصویری جامع از ظرفیت‌های ملی را سلب کرده است. علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات، بررسی‌ها به مراکز استان‌ها محدود شده و از تحلیل سایر شهرها و نواحی با ظرفیت بالقوه صرف‌نظر شده است. برای رفع این محدودیت‌ها، پژوهش حاضر رویکردی جامع

مطالعات پیشین به تفکیک کشورها ارائه می‌دهد تا تصویر جامع‌تری از رویکردها و یافته‌های پژوهشی در این حوزه فراهم شود.

۲-۱- شکاف‌های تحقیقاتی

مرور ادبیات نشان می‌دهد که با وجود انجام مطالعات متعدد در ایران با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، منطق فازی و الگوریتم‌های داده‌محور برای مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی، همچنان شکاف‌های اساسی وجود دارد. نخست، بسیاری از پژوهش‌ها از نظر جغرافیایی محدود بوده و تنها بر استان‌ها یا مناطق خاصی تمرکز داشته‌اند؛ در نتیجه، تعمیم‌پذیری یافته‌های آن‌ها در مقیاس ملی با چالش مواجه است. دوم، حتی در مواردی که رویکردی ملی اتخاذ شده است، تمرکز عمدتاً بر شاخص‌های اقلیمی بوده و معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیرساختی اغلب نادیده گرفته شده‌اند. سوم، برخی مطالعات کاربردهای خاصی مانند تأمین انرژی برای شیرین‌سازی آب را هدف قرار داده‌اند که این امر استفاده از نتایج آن‌ها را برای سایر حوزه‌های توسعه انرژی خورشیدی محدود کرده است. بنابراین، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها یا بیش از حد بر مناطق محلی متمرکز بوده‌اند که مانع تعمیم‌پذیری یافته‌ها می‌شود، یا جنبه‌های کاربردی مسئله، مانند دسترسی به شبکه انتقال برق، توسعه شهری و زیرساخت‌های موجود، را در نظر نگرفته‌اند.

۳- عوامل کلیدی در انتخاب مکان

نیروگاه‌های خورشیدی

برای انتخاب بهینه مکان احداث نیروگاه‌های خورشیدی، لازم است با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط خاص هر منطقه، معیارها و عوامل تأثیرگذار شناسایی شده و بر اساس آن‌ها، برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و اصولی برای توسعه پروژه‌های خورشیدی تدوین شود. این امر مستلزم در نظر گرفتن مجموعه‌ای متنوع از مؤلفه‌ها، شامل ویژگی‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، الگوهای اقلیمی و تابش خورشیدی، شاخص‌های اقتصادی و هزینه‌ای، زیرساخت‌های فنی، و همچنین الزامات حقوقی و مقررات

استان‌های خاص، نتایج آن‌ها قابلیت تعمیم به سطح ملی را ندارند. علاوه بر این، در برخی موارد، دامنه محدود معیارها، از جمله بی‌توجهی به عوامل اقتصادی و زیرساختی، کاربرد عملی نتایج را محدود کرده است.

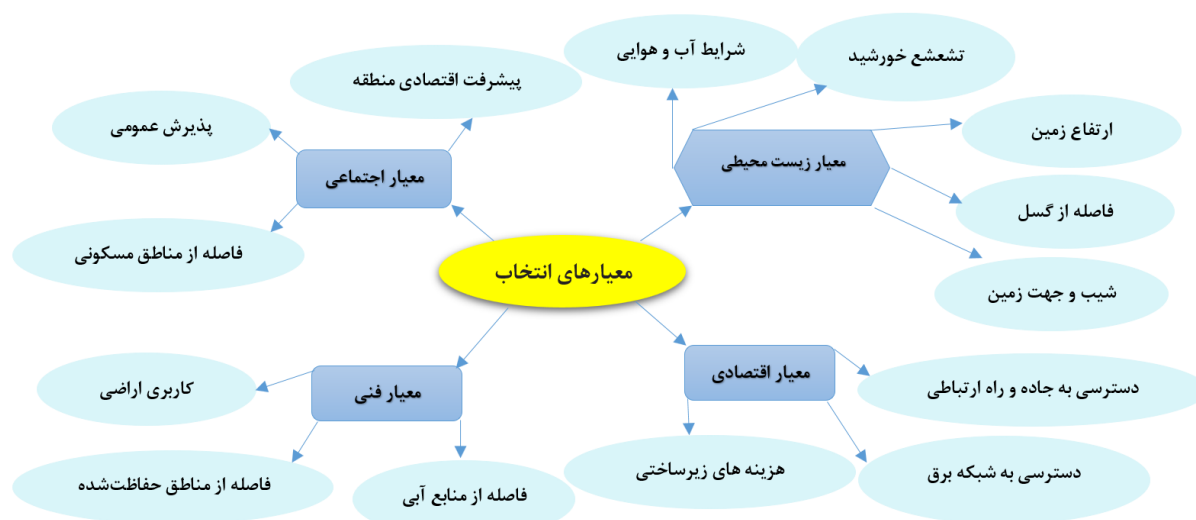
در مقابل، برخی پژوهش‌ها رویکردی کلان‌تر اتخاذ کرده‌اند. برای مثال، مهریان و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از GIS و سیستم استنتاج فازی (FIS)، پتانسیل انرژی خورشیدی ایران را در سطح ملی ارزیابی کردند (Mehrian et al., 2025). با وجود پوشش کشوری، این مطالعه عوامل زیرساختی و اقتصادی کلیدی را نادیده گرفته است. به‌طور مشابه، احدی و همکاران (۲۰۲۳) شاخص‌های اقلیمی تمامی استان‌ها را با تمرکز بر مراکز استانی بررسی کردند (Ahadi et al., 2023). این مطالعه، گرچه از نظر پوشش جغرافیایی جامع است، به دلیل اتکا صرف به عوامل اقلیمی و روش AHP، بدون در نظر گرفتن عوامل فنی، اقتصادی و زیرساختی و عدم استفاده از رویکردهای ترکیبی مانند AHP+TOPSIS، از جامعیت کافی برخوردار نیست.

علاوه بر این، برخی مطالعات بر اولویت‌بندی شهری یا موضوعات خاص کاربردی متمرکز بوده‌اند. وفایی‌پور و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از رویکرد ترکیبی SWARA-WASPAS، ۲۵ شهر منتخب ایران را از نظر اولویت اجرای پروژه‌های خورشیدی رتبه‌بندی کردند (Vafaeipour et al., 2014). با وجود نوآوری در روش، فقدان برخی استان‌ها و عدم انجام تحلیل حساسیت، جامعیت و پایداری نتایج را محدود کرده است. رسائی و همکاران (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از GIS و AHP، مکان‌یابی مناسب برای نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز را به‌منظور پشتیبانی از شیرین‌سازی آب در استان هرمزگان بررسی کردند (Rasaee et al., 2025). همچنین، رازقی و همکاران (۲۰۲۳) مدلی برای مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی به‌منظور پشتیبانی از واحدهای شیرین‌سازی اسمز معکوس طراحی کردند (Razeghi et al., 2023). این پژوهش‌ها، هرچند ارزشمند هستند، به دلیل تمرکز خاص بر پیوند آب و انرژی، انعطاف لازم برای توسعه کاربردهای عمومی‌تر انرژی خورشیدی را ندارند.

مطالعات متنوعی در کشورهای مختلف به بررسی روش‌های به‌کاررفته و معیارهای مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی پرداخته‌اند. جدول ۱ مروری بر

زیرمعیارهای مرتبط با هر یک و شرح مختصری از آن‌ها را ارائه می‌دهد. مقالات مندرج در جدول ۱ به‌عنوان بخشی از مراجع منتخب برای تعیین معیارهای پژوهش حاضر در نظر گرفته شده‌اند.

زیست‌محیطی است. توجه جامع به این عوامل، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های اجرایی و تضمین پایداری پروژه‌ها دارد. در همین راستا، شکل ۱ عوامل کلیدی مورد استفاده در این پژوهش،



شکل ۱. معیارها و عوامل مؤثر در بهینه‌سازی انتخاب مکان نیروگاه‌های خورشیدی.

Figure 1. Criteria and factors affecting the optimization of solar power plant location selection.

جدول ۱. مروری بر مطالعات پیشین

Table 1. Review of previous studies

شماره	نویسنده	انرژی	موقعیت	روش‌های کاربردی	معیارها
۱	Charabi & Gastli, 2011	CSP, PV	عمان	AHP & Fuzzy OWA	تثبیت خورشید / آب‌وهوا / شیب / فاصله از جاده، خطوط برق، منابع آبی، منطقه حفاظت‌شده / کاربری اراضی
۲	Sánchez-Lozano et al., 2013	PV	اسپانیا	GIS, AHP & TOPSIS	تثبیت خورشید / آب‌وهوا / شیب / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده / کاربری اراضی / تأثیر بر اقتصاد
۳	Chen et al., 2014	PV	چین	GIS, DEMATEL & DANP	تثبیت خورشید / آب‌وهوا / شیب / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده / ارتفاع / کاربری اراضی / تأثیر بر اقتصاد
۴	Borgogno Mondino, 2015	PV	ایتالیا	GIS & ANN	تثبیت خورشید / آب‌وهوا / شیب / فاصله از منابع آبی، شهر / منطقه حفاظت‌شده / کیفیت خاک / کاربری اراضی
۵	Noorollahi et al., 2016	PV	ایران	GIS & AHP	تثبیت خورشید / آب‌وهوا / شیب / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده / ارتفاع / کاربری اراضی
۶	Sindhu et al., 2017	PV	هند	AHP & Fuzzy TOPSIS	تثبیت خورشیدی / آب‌وهوا / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، مناطق حفاظت‌شده / هزینه زیرساختی / کاربری اراضی / تأثیر بر اقتصاد، پذیرش عمومی
۷	Wang et al., 2018	PV	ویتنام	DEA, FAHP & TOPSIS	تثبیت خورشید / آب‌وهوا / ارتفاع / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، هزینه زیرساختی / کیفیت خاک و پوشش گیاه
۸	Solangi et al., 2019	PV	پاکستان	AHP & Fuzzy VIKOR	تثبیت خورشید / آب‌وهوا / ارتفاع / شیب / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، مناطق حفاظت‌شده / هزینه زیرساختی / کاربری اراضی / تأثیر بر اقتصاد / کیفیت خاک و پوشش گیاهی، پذیرش عمومی

ادامه جدول ۱.

Table 1. Continued.

شماره	نویسنده	انرژی	موقعیت	روش‌های کاربردی	معیارها
۹	Yankiv-Vitkovska et al., 2020	PV	اوکراین	QGIS & AHP	تشعشع خورشید / آب‌وهوا / ارتفاع / شیب / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، منابع آبی / مناطق حفاظت شده / کاربری اراضی
۱۰	Goh et al., 2022	PV	آمریکا	CBA, TOPSIS, PROMETHEE	تشعشع خورشید / آب‌وهوا / گسل / فاصله از خطوط برق، جاده، منابع آبی / کاربری اراضی / تأثیر بر اقتصاد / کیفیت خاک و پوشش گیاهی
۱۱	Shorabeh et al., 2022	PV	ایران	Decision tree & PSO	تشعشع خورشیدی / آب‌وهوا / ارتفاع / شیب / گسل / فاصله از شهر، جاده، کیفیت خاک و پوشش گیاهی
۱۲	Razeghi et al., 2023	PV	ایران	GIS & AHP	تشعشع خورشید / گسل / شیب / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، منابع آبی / کیفیت خاک و پوشش گیاهی
۱۳	de Luis-Ruiz et al., 2024	PV	اسپانیا	GIS & AHP	تشعشع خورشید / آب‌وهوا / شیب / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، منابع آبی، مناطق حفاظت شده / کاربری اراضی
۱۴	Esmailpour & Kheirizadeh Arouq, 2024	PV	ایران	GIS & Catastrophe Theory	تشعشع / آب‌وهوا / شیب / گسل / ارتفاع / فاصله از شهر، خطوط برق، منابع آبی، مناطق حفاظت شده / کاربری اراضی، کیفیت خاک و پوشش گیاهی
۱۵	Flora, 2025	CSP	کامرون	AHP & GIS	تشعشع خورشیدی / آب‌وهوا / شیب / ارتفاع / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، منابع آبی / کاربری اراضی
۱۶	Onuoha et al., 2025	PV	نیجریه	AHP & GIS	تشعشع خورشیدی / آب‌وهوا / شیب / ارتفاع / فاصله از شهر، خطوط برق، جاده، منابع آبی / کیفیت خاک و پوشش گیاهی
۱۷	پژوهش حاضر	PV	ایران	DEA, FAHP, FTOPSIS	تشعشع خورشیدی، آب‌وهوا / شیب / ارتفاع / گسل / فاصله از شهر، جاده، خطوط برق، منابع آبی، مناطق حفاظت شده / کاربری اراضی / تأثیر بر اقتصاد / پذیرش عمومی / هزینه‌های زیرساختی

۳-۱- معیار اجتماعی^۱

توجه به ابعاد اجتماعی در پروژه‌های خورشیدی نقش مهمی در افزایش مشارکت محلی و کاهش مقاومت اجتماعی ایفا می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که با وجود نگرش مثبت بسیاری از افراد نسبت به محیط‌زیست و انرژی‌های تجدیدپذیر، همچنان شکاف قابل توجهی بین دیدگاه‌ها و رفتار واقعی آن‌ها وجود دارد. عواملی مانند هزینه‌های بالا یا تصور پرهزینه بودن، الگوهای مصرفی تثبیت شده، بی‌اعتمادی به ادعاهای زیست‌محیطی و کمبود اطلاعات کافی و قابل فهم، از موانع اصلی انتخاب برق سبز توسط مصرف‌کنندگان هستند

^۱ Social Aspect - SA

(Mousavi Ramezanzadeh & Nazari, 2025). بنابراین،

حمایت جوامع میزبان یکی از عوامل کلیدی در موفقیت بلندمدت این پروژه‌ها محسوب می‌شود. مهم‌ترین مؤلفه‌های اجتماعی شامل نگرش زیست‌محیطی ساکنان، ظرفیت ایجاد اشتغال محلی، به‌ویژه در مناطق با نرخ بیکاری بالا، و تأثیر پروژه بر ارزش‌های فرهنگی و منظر بصری منطقه است.

- SA1: تأثیر بر اشتغال، گردشگری و پیشرفت اقتصادی منطقه

احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌تواند فرصت‌های شغلی مستقیم و غیرمستقیم در حوزه‌های ساخت، بهره‌برداری و نگهداری ایجاد کند و زمینه رشد اقتصادی منطقه را

- TA2: شرایط اقلیمی

شرایط جوی نقش مهمی در مکان‌یابی پروژه‌های خورشیدی دارند. ابرهای متراکم می‌توانند تا ۲۱٪ از تابش موج‌کوتاه خورشید را بازتاب دهند و روزهای بارانی یا برفی به دلیل رطوبت بالا، جذب و پراکندگی بیشتری از انرژی خورشیدی ایجاد می‌کنند. همچنین، گردوغبار تا ۱۵٪ از تابش خورشیدی را جذب کرده و کارایی سیستم‌های خورشیدی را کاهش می‌دهد. مناطق با رطوبت و گردوغبار کمتر، گزینه‌های مناسب‌تری برای احداث نیروگاه خورشیدی هستند (Zoghi et al., 2017).

- TA3: ارتفاع از سطح دریا

ارتفاع زمین تأثیر قابل‌توجهی بر کارایی نیروگاه‌های خورشیدی دارد و با دما و بارش همبستگی معناداری در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان می‌دهد (Bunruamkaew & Murayama, 2011). در ارتفاعات بالا، کاهش ضخامت جو باعث افزایش تابش خورشیدی و بهبود عملکرد پنل‌ها می‌شود، اما عواملی مانند فشار هوای کمتر، وزش باد شدید و تجمع برف می‌توانند مشکلات فنی ایجاد کنند. همچنین، هزینه‌های حمل‌ونقل، ملاحظات زیست‌محیطی و دشواری نصب باید در انتخاب این مناطق مدنظر قرار گیرند.

- TA4: فاصله از گسل‌های زمین

قرارگیری نیروگاه در نزدیکی گسل‌های فعال، خطرات لرزه‌ای را افزایش داده و هزینه‌های اضافی برای تقویت سازه و ایمنی ایجاد می‌کند. بنابراین، انتخاب مکان‌هایی با فاصله مناسب از نواحی لرزه‌خیز توصیه می‌شود (Bunruamkaew & Murayama, 2011).

- TA5: شیب و جهت زمین

زمین‌های با شیب زیاد، بهره‌برداری صنعتی را دشوار کرده، پایداری سازه‌ها را کاهش می‌دهند و هزینه‌های تسطیح را افزایش می‌دهند. برای حفظ ایمنی و بهره‌وری نیروگاه‌های فتوولتائیک، شیب بهینه زمین بین ۰ تا ۴ درصد است (Solangi et al., 2019). جهت تابش نیز عامل مؤثری در افزایش دریافت تابش خورشیدی است. در نیمکره شمالی، بهترین جهت نصب پنل‌ها رو به جنوب است تا بیشترین نور خورشید در طول روز دریافت شود (Colak et al., 2020).

فراهم آورد. استفاده از زمین‌های بایر یا غیرقابل‌استفاده برای کشاورزی توصیه می‌شود (Uyan, 2013).

- SA2: پذیرش عمومی

سطح آگاهی و نگرش مثبت مردم نسبت به انرژی خورشیدی نقش بسزایی در موفقیت پروژه دارد. ایجاد کمپین‌های اطلاع‌رسانی و شفاف‌سازی مزایای پروژه می‌تواند اعتماد عمومی را افزایش داده و موانع فرهنگی یا ذهنی را کاهش دهد (Goel, 2016).

- SA3: فاصله از مناطق مسکونی

نیروگاه‌های خورشیدی نباید در مجاورت مستقیم مناطق شهری یا روستایی احداث شوند. رعایت حداقل فاصله ۵۰۰ متر از نواحی مسکونی ضروری است. فاصله بیش از حد نیز هزینه انتقال انرژی را افزایش می‌دهد پس یافتن تعادل در فاصله جغرافیایی اهمیت دارد (Uyan, 2013).

۳-۲- معیار فنی^۱

عوامل فنی مانند شدت تابش خورشیدی، شرایط اقلیمی (دما، رطوبت، باد و گردوغبار) و ویژگی‌های زمین‌شناسی نظیر شیب، ارتفاع و بافت خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در راندمان و پایداری نیروگاه‌های خورشیدی دارند. این مؤلفه‌ها بر طراحی، انتخاب تجهیزات، نصب و نگهداری سیستم‌ها تأثیر مستقیم می‌گذارند. تطابق بین شرایط محیطی و قابلیت‌های فنی تجهیزات، بهره‌وری را افزایش داده، هزینه‌های بلندمدت را کاهش می‌دهد و عملکرد کلی نیروگاه را بهبود می‌بخشد.

- TA1: تابش خورشیدی و تعداد ساعات آفتابی

تابش خورشیدی و تعداد ساعات آفتابی از عوامل اصلی تولید انرژی خورشیدی هستند، زیرا مستقیماً میزان انرژی دریافتی در سطح زمین را تعیین می‌کنند. شاخص تابش خورشیدی کل (GHI)، که شامل تابش مستقیم (DNI)، تابش پراکنده (DHI) و تابش بازتاب‌شده از سطح زمین است، معیار کلیدی برای برآورد پتانسیل تولید انرژی محسوب می‌شود. ترکیب این مؤلفه‌ها همراه با شرایط جوی و توپوگرافی، نقش مهمی در ارزیابی مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی ایفا می‌کند (Al Garni & Awasthi, 2017).

^۱ Technical Aspect - TA

۳-۳- معیار اقتصادی^۱

مکان‌یابی مناسب باید هزینه‌های سرمایه‌گذاری، اجرا و بهره‌برداری را کاهش داده و بازده اقتصادی پروژه را افزایش دهد. اگرچه احداث نیروگاه خورشیدی در ابتدا نیازمند سرمایه‌گذاری بالایی است، اما در بلندمدت از مزایای اقتصادی قابل توجهی برخوردار است. هزینه پایین نگهداری و بهره‌برداری، عدم وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش مستمر هزینه تولید انرژی خورشیدی، این فناوری را به گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه، به‌ویژه برای کشورهای در حال توسعه، تبدیل کرده است.

• EC1: هزینه‌های زیرساختی

هزینه‌های ساخت شامل آماده‌سازی زمین، نصب تجهیزات برقی، اتصال به شبکه و سیستم‌های امنیتی است که تحت تأثیر کیفیت تجهیزات و شرایط زمین قرار دارند. هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری شامل تعمیرات، شست‌وشوی پنل‌ها، بازرسی‌ها و تعویض قطعات است. استفاده از تجهیزات باکیفیت، هزینه‌های بلندمدت را کاهش داده و بهره‌وری را افزایش می‌دهد (Colak et al., 2020).

• EC2: فاصله از خطوط انتقال برق

افزایش فاصله از خطوط انتقال برق، هزینه‌های ایجاد زیرساخت‌های جدید را افزایش داده، راندمان را کاهش می‌دهد و تلفات انرژی را بالا می‌برد. نزدیکی به شبکه برق موجود، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های اقتصادی یک مکان است (Colak et al., 2020).

• EC3: فاصله از جاده و مسیرهای حمل‌ونقل

دسترسی آسان به جاده‌های اصلی برای حمل تجهیزات و عملیات نصب و نگهداری اهمیت زیادی دارد. در صورت عدم دسترسی، احداث جاده‌های فرعی هزینه و زمان پروژه را افزایش می‌دهد (Günen, 2021).

۳-۴- معیار زیست‌محیطی^۲

در پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر، ملاحظات زیست‌محیطی نقش مهمی در ارتقای پایداری اکولوژیکی و جلب حمایت اجتماعی ایفا می‌کنند. انرژی خورشیدی با کاهش

وابستگی به سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده و کیفیت هوا را بهبود می‌بخشد. گرچه ساخت نیروگاه‌های خورشیدی ممکن است اثرات زیست‌محیطی محدودی مانند تغییر کاربری زمین یا تولید زباله صنعتی داشته باشد، این اثرات در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی ناچیز و کوتاه‌مدت هستند. به‌طور کلی، توسعه نیروگاه‌های خورشیدی به حفظ منابع طبیعی، تنوع زیستی و پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کند.

• EA1: کاربری زمین

استفاده از اراضی بایر یا بدون استفاده به دلیل کاهش هزینه‌ها و اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی، گزینه‌ای مناسب است. زمین‌های کشاورزی به دلیل تداخل با تولید غذا ممکن است مشکل‌ساز باشند. اراضی صنعتی یا معدنی متروکه نیز مناسب هستند، مشروط بر اینکه پوشش گیاهی متراکم نداشته باشند تا به اکوسیستم‌ها آسیب نرسد. شفافیت مالکیت زمین و دریافت مجوزهای رسمی برای تغییر کاربری نیز الزامی است (Bunruamkaew & Murayama, 2011).

• EA2: فاصله از مناطق حفاظت‌شده

مناطق دارای ارزش‌های زیست‌محیطی و زیستگاه‌های حساس، به دلیل نقش حیاتی در حفظ تنوع زیستی و گونه‌های در معرض انقراض، برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی کاملاً نامناسب هستند. حفاظت از این نواحی، منابع طبیعی را حفظ کرده و پذیرش پروژه‌ها را از سوی جوامع محلی و نهادهای زیست‌محیطی افزایش می‌دهد (Bunruamkaew & Murayama, 2011).

• EA3: فاصله از منابع آبی

نیروگاه‌های خورشیدی بسته به نوع فناوری، نیازهای متفاوتی به منابع آب دارند. نیروگاه‌های فتوولتائیک (PV) آب بسیار کمی، عمدتاً برای شست‌وشوی پنل‌ها، مصرف می‌کنند و در مناطق خشک نیز قابل بهره‌برداری هستند. در مقابل، نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز (CSP) برای خنک‌سازی و تولید بخار به آب بیشتری نیاز دارند. نزدیکی به منابع آبی می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد، اما ممکن است به اکوسیستم‌های آبی آسیب برساند. انتخاب مکان مناسب به نوع فناوری، شرایط محیطی و ضوابط قانونی بستگی دارد، با این تفاوت که سیستم‌های

¹ Economic Aspect - EC

² Environmental Aspect - EA

روش‌های FAHP و FTOPSIS بهره‌گرفته شده است. این رویکرد ترکیبی، امکان ارزیابی جامع و بهینه مکان‌های مناسب را بر اساس ابعاد فنی، اقلیمی و تصمیم‌گیری فراهم می‌کند. شکل ۲ چارچوب کلی تحقیق را نمایش می‌دهد.

۴-۱- معیارهای ورودی و خروجی مدل DEA

در فاز نخست تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، به منظور سنجش کارایی نسبی شهرهای منتخب، از پنج معیار ورودی و سه معیار خروجی استفاده شده است. انتخاب این شاخص‌ها بر اساس مطالعات پیشین، دسترسی به داده‌های معتبر هواشناسی و تأثیر آن‌ها بر عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی انجام شده است. در این مرحله، تمرکز بر شاخص‌های طبیعی و فنی بوده تا ارزیابی پایه‌ای از ظرفیت خورشیدی ایران فراهم شود. از آنجا که روش DEA نیازمند داده‌های قابل کمی‌سازی و هم‌مقیاس است، معیارهای اقتصادی یا اجتماعی (مانند هزینه زمین یا سیاست‌های حمایتی) به دلیل فقدان داده‌های یکدست و مقایسه‌پذیر در سطح ملی در این مرحله لحاظ نشده‌اند. بر این اساس، پژوهش وانگ و همکاران (Wang et al., 2022) به‌عنوان مبنای انتخاب شاخص‌ها در نظر گرفته شده است.

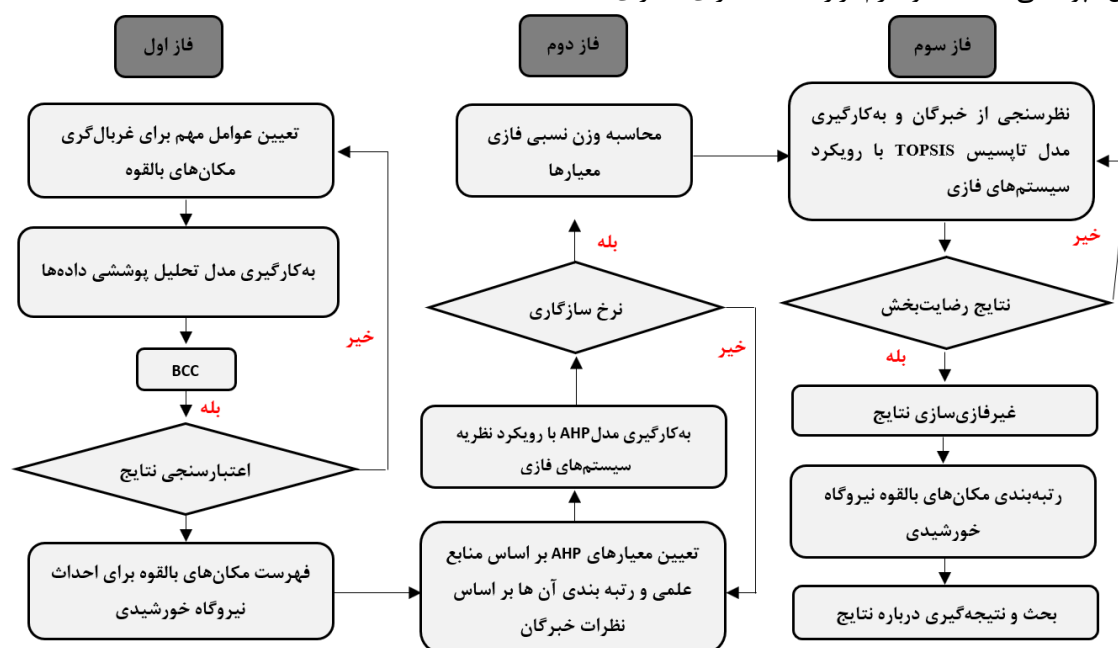
فتوولتائیک از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردارند (Bunruamkaew & Murayama, 2011).

۴- روش‌شناسی

این پژوهش با رویکرد ترکیبی کمی و تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی انجام شده و در سه مرحله اصلی پیش رفته است:

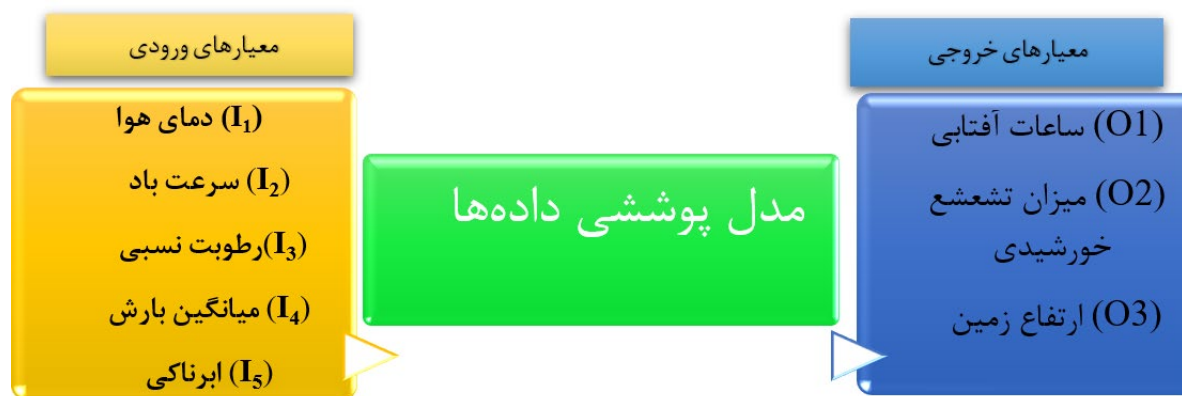
- ۱) شناسایی مکان‌های با کارایی بالا برای احداث نیروگاه خورشیدی: در این مرحله، از تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) استفاده شده است. این تحلیل بر اساس داده‌های اقلیمی به‌روز، شامل دما، رطوبت، باد، بارش، ابرناکی و تابش خورشیدی از سراسر ایران، انجام شده است.
- ۲) تعیین وزن معیارهای مؤثر بر مکان‌یابی: وزن معیارها با بهره‌گیری از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و نظرات خبرگان تعیین شده است.
- ۳) رتبه‌بندی استان‌های منتخب: در این مرحله، از روش تاپسیس فازی (FTOPSIS) برای رتبه‌بندی استان‌های منتخب و انتخاب بهینه مکان احداث نیروگاه استفاده شده است.

برای انجام تحلیل‌ها، از نرم‌افزار BT DEA Solver برای تحلیل پوششی داده‌ها و نرم‌افزار Excel برای اجرای



شکل ۲. چارچوب کلی تحقیق.

Figure 2. General research framework.



شکل ۳. عوامل ورودی و خروجی مورد استفاده در مدل DEA.

Figure 3. Input and output factors used in the DEA model.

• I3: رطوبت نسبی

رطوبت نسبی یکی از ورودی‌های مؤثر در ارزیابی انرژی خورشیدی است، زیرا رطوبت بالا پتانسیل انرژی خورشیدی را کاهش می‌دهد. بخار آب موجود در جو پرتوهای خورشیدی کوتاه‌موج را جذب می‌کند (Doorga et al., 2019). علاوه بر این، تشکیل شبنم در شرایط رطوبت بالا موجب تجمع گردوغبار روی سطح پنل‌ها شده و توان خروجی آن‌ها را کاهش می‌دهد (Wang et al., 2022).

• I4: بارندگی

بارندگی اثری دوگانه بر عملکرد پنل‌های خورشیدی دارد. از یک سو، باران با شست‌وشوی گردوغبار و آلودگی‌ها از سطح پنل‌ها، کارایی آن‌ها را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، کاهش میزان تابش خورشیدی در مناطق با بارش زیاد یا پوشش ابری مداوم، تولید انرژی را کاهش می‌دهد. همچنین، تجمع آب یا برف روی سطح پنل‌ها می‌تواند عملکرد آن‌ها را مختل کند. بنابراین، طراحی مناسب سیستم در مناطق با بارندگی بالا ضروری است (Wang et al., 2022).

• I5: میزان ابرناکی

ابرها حدود ۲۱ درصد از پرتوهای خورشیدی کوتاه‌موج را بازتاب می‌دهند (Zoghi et al., 2017)، که این امر میزان انرژی در دسترس برای تولید برق را کاهش می‌دهد. همچنین، خروجی انرژی سیستم در روزهای ابری، بسته به شدت و فراوانی پوشش ابری، می‌تواند بین ۱۰ تا ۲۵ درصد کاهش یابد (Paradise Solar Energy).

این چارچوب به دلیل جامعیت نسبی و انطباق با داده‌های اقلیمی و جغرافیایی ایران، مبنای مناسبی برای مدل‌سازی حاضر فراهم کرده است. معیارهای ورودی و خروجی مورد استفاده در DEA در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

۴-۱-۱- معیارهای ورودی

• I1: دمای هوا

دمای هوا یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد پنل‌های خورشیدی است. پنل‌ها در محیط‌های خنک‌تر عملکرد بهتری دارند و برق بیشتری تولید می‌کنند. در مقابل، دمای بالا باعث کاهش ولتاژ پنل‌ها و در نتیجه کاهش خروجی انرژی می‌شود. از این رو، دمای هوا به‌عنوان یکی از ورودی‌های مهم در ارزیابی انرژی خورشیدی در نظر گرفته شده است، زیرا محیط‌های خنک‌تر به بهبود عملکرد سامانه‌های خورشیدی کمک می‌کنند (Yelmen & Çakir, 2016).

• I2: سرعت باد

سرعت باد تأثیرات مثبت و منفی بر ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های خورشیدی دارد. باد از طریق خنک‌سازی پنل‌ها می‌تواند راندمان آن‌ها را افزایش دهد، اما وزش بادهای شدید ممکن است به پنل‌ها و سازه‌های نگهدارنده آسیب برساند. همچنین، ذرات گردوغبار ناشی از باد می‌توانند کارایی پنل‌ها را کاهش دهند. بنابراین، در طراحی و نصب نیروگاه‌های خورشیدی، سرعت باد در منطقه باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که سازه‌ها در برابر بادهای شدید مقاوم باشند (Yelmen & Çakir, 2016).

۴-۱-۲- معیارهای خروجی

- O1: ساعات آفتابی

ساعات آفتابی به مدت‌زمانی گفته می‌شود که یک مکان مشخص در طول یک بازه زمانی معین (مانند یک سال) تحت تابش آفتاب با شدت حداقل ۱۲۰ وات بر مترمربع قرار دارد (Wang et al., 2022). این معیار یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی پتانسیل تولید انرژی خورشیدی است.

- O2: تابش خورشیدی

مقدار تابش خورشیدی دریافتی در یک منطقه، مهم‌ترین عامل در تولید برق خورشیدی محسوب می‌شود. این عامل به موقعیت جغرافیایی سایت، زاویه تابش خورشید، شرایط آب‌وهوایی و حتی آلودگی هوا وابسته است. در مناطقی با تابش کمتر، می‌توان با تنظیم زاویه پنل‌ها و استفاده از سیستم‌های با بازده بالاتر، بهره‌وری را افزایش داد (Wang et al., 2022).

- O3: ارتفاع از سطح دریا

مناطق با ارتفاع بالاتر معمولاً تابش مستقیم خورشید بیشتری دریافت می‌کنند، زیرا چگالی هوا در این نواحی کمتر بوده و جذب پرتوهای خورشیدی کاهش می‌یابد. همچنین، دمای پایین‌تر در ارتفاعات به بهبود عملکرد پنل‌های خورشیدی کمک می‌کند. با این حال، شرایط آب‌وهوایی سخت و وزش بادهای شدید در ارتفاعات بالا می‌تواند نصب و نگهداری سیستم‌های خورشیدی را با چالش‌هایی مواجه کند (Wang et al., 2022).

۴-۲- مدل DEA

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) یک روش برنامه‌ریزی ریاضی برای ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده همگن است. در این روش، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها از ارزش و اهمیت یکسانی برخوردارند. در نسخه‌های متعارف DEA، داده‌ها به صورت مثبت و معلوم فرض می‌شوند، هرچند در عمل امکان وجود مقادیر منفی نیز وجود دارد (Gholamian, 2025; Alavi et al., 2024; Yeganeh, 2025). واحدهای تصمیم‌گیری که به کارایی کامل (نمره کارایی برابر با ۱) می‌رسند، در این روش شناسایی می‌شوند. مدل CCR، که توسط چارلز و همکاران (۱۹۷۸) معرفی شد،

فرض بازدهی ثابت نسبت به مقیاس (CRS) دارد، به این معنا که با دو برابر شدن ورودی‌ها، خروجی‌ها نیز دو برابر می‌شوند. با این حال، در بسیاری از شرایط واقعی، واحدها با محدودیت‌ها و تغییرات محیطی مواجه‌اند و بازدهی آن‌ها ممکن است با مقیاس تولید متفاوت باشد. از این رو، در این مطالعه از مدل BCC، که توسط بنکر و همکاران (۱۹۸۴) ارائه شد و فرض بازدهی متغیر نسبت به مقیاس (VRS) دارد، استفاده شده است. این مدل انعطاف‌پذیری بیشتری برای ارزیابی عملکرد واحدها در شرایط پیچیده و متغیر فراهم می‌کند و امکان تفکیک اثرات بازدهی از کارایی فنی را دارد. بنابراین، این مدل قادر است عملکرد واقعی واحدها را بهتر منعکس کرده و نتایج قابل‌اعتمادتری برای انتخاب مکان‌های بهینه ارائه دهد. نمادها و علائم به کاررفته در مدل در ادامه توضیح داده شده‌اند.

- مدل ورودی محور (BCC-I) با قید:

$$\max_{u,v,v_0} \delta = \frac{v^T b_0 - v_0}{u^T a_0} \quad (1)$$

$$\frac{v^T b_e - v_0}{u^T a_e} \leq 1, e = 1, 2, \dots, n$$

$$u \geq 0, v \geq 0$$

- مدل خروجی محور (BCC-O) با قید:

$$\min_{u,v,u_0} \phi = \frac{u^T a_0 - u_0}{v^T b_0} \quad (2)$$

$$\frac{u^T a_e - u_0}{v^T b_e} \geq 1, e = 1, 2, \dots, n$$

$$u \geq 0, v \geq 0$$

۴-۳- روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) شامل هشت مرحله اصلی است که در این پژوهش برای تعیین وزن معیارها به کار گرفته شده است (Wang et al., 2018). در این روش، پس از انجام مقایسه‌های زوجی بین معیارها توسط خبرگان از طریق پرسشنامه، اعداد حاصل با استفاده از جدول تبدیل به اعداد فازی متناظر تبدیل می‌شوند (جدول ۲).

این مراحل به شرح زیر هستند:

- محاسبه اعداد فازی مثلثی (TFNs): در این

مرحله، معیارها از طریق مقایسه‌های زوجی توسط خبرگان ارزیابی می‌شوند. به جای استفاده از اعداد قطعی، از بازه‌های عددی استفاده

$$W_{ad} = \gamma \times W_{au} + (1 - \gamma) \times W_{ai}; \gamma \in [0,1]; \quad (12)$$

$$a = 1, 2, \dots, i$$

- محاسبه W_{az} : مقادیر حاصل از غیرفازی سازی نهایی نرمال سازی شده و وزن قطعی هر معیار محاسبه می شود.

$$W_{az} = \frac{W_{ad}}{\sum_{a=1}^i W_{ad}}; a = 1, 2, \dots, i \quad (13)$$

جدول ۲. مقیاس تبدیل در منطق فازی

Table 2. Conversion scale in fuzzy logic

مقیاس فازی مثلی	مقیاس فازی مثلی	شدت اهمیت	شدت اهمیت
(۱، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۱)	۱/۱	۱
(۱/۳، ۱/۲، ۱/۱)	(۱، ۲، ۳)	۱/۲	۲
(۱/۴، ۱/۳، ۱/۲)	(۲، ۳، ۴)	۱/۳	۳
(۱/۵، ۱/۴، ۱/۳)	(۳، ۴، ۵)	۱/۴	۴
(۱/۶، ۱/۵، ۱/۴)	(۴، ۵، ۶)	۱/۵	۵
(۱/۷، ۱/۶، ۱/۵)	(۵، ۶، ۷)	۱/۶	۶
(۱/۸، ۱/۷، ۱/۶)	(۶، ۷، ۸)	۱/۷	۷
(۱/۹، ۱/۸، ۱/۷)	(۷، ۸، ۹)	۱/۸	۸
(۱/۹، ۱/۹، ۱/۹)	(۹، ۹، ۹)	۱/۹	۹

۴-۴- روش تاپسیس فازی (Fuzzy TOPSIS)

روش تاپسیس (TOPSIS) یکی از روش های پرکاربرد در تصمیم گیری چندمعیاره است که برای اولین بار توسط هوانگ و یون (۱۹۸۱) معرفی شد (Hwang & Yoon, 1981). این روش بر این اصل استوار است که راه حل بهینه باید بیشترین فاصله را از راه حل منفی ایده آل و کمترین فاصله را از راه حل مثبت ایده آل داشته باشد (Zare et al., 2015). این تکنیک به دلیل ساختار ساده و قدرت تفکیک مناسب در بسیاری از مسائل تصمیم گیری به کار گرفته شده است. با این حال، یکی از محدودیت های اصلی روش تاپسیس کلاسیک، ناتوانی در مدیریت ابهام، عدم قطعیت و داده های زبانی در موقعیت های واقعی است (Sindhu et al., 2017). برای رفع این چالش، ترکیب این روش با نظریه مجموعه های فازی پیشنهاد شده است که به جای استفاده از مقادیر عددی قطعی، از عبارات زبانی مانند «زیاد»، «متوسط» و «کم» برای ارزیابی گزینه ها استفاده می کند. این رویکرد انعطاف پذیری بیشتری در مواجهه با اطلاعات ناقص، مبهم

می شود تا عدم قطعیت و انعطاف پذیری موجود در فرایند تصمیم گیری بهتر منعکس گردد.

- محاسبه \bar{P}_a : مقایسه های زوجی و امتیازهای نسبی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می شوند.

$$\bar{P}_a = (l_a, m_a, u_a) \quad (3)$$

$$l_a = (l_{a1} \otimes l_{a2} \otimes \dots \otimes l_{ai})^{1/i}, a = 1, 2, \dots, i \quad (4)$$

$$m_a = (m_{a1} \otimes m_{a2} \otimes \dots \otimes m_{ai})^{1/i}, a = 1, 2, \dots, i \quad (5)$$

$$u_a = (u_{a1} \otimes u_{a2} \otimes \dots \otimes u_{ai})^{1/i}, a = 1, 2, \dots, i \quad (6)$$

- محاسبه \bar{P}_Y : میانگین هندسی فازی با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$\bar{P}_Y = \left(\sum_{a=1}^i l_a, \sum_{a=1}^i m_a, \sum_{a=1}^i u_a \right) \quad (7)$$

- محاسبه \bar{R} : میانگین هندسی فازی برای هر معیار محاسبه شده و به عنوان بردار \bar{R} تعیین می گردد.

$$\bar{R} = \frac{\bar{P}_a}{\bar{P}_Y} = \frac{(l_a + m_a + u_a)}{\sum_{a=1}^i l_a, \sum_{a=1}^i m_a, \sum_{a=1}^i u_i} = \left[\frac{l_a}{\sum_{a=1}^i l_a}, \frac{m_a}{\sum_{a=1}^i m_a}, \frac{u_a}{\sum_{a=1}^i u_a} \right] \quad (8)$$

- محاسبه $W_{a\beta l}$: وزن های معیارها بر اساس مقدار β تعریف می شوند. برای هر مقدار β ، کران های پایین و بالا برای اولویت های فازی لحاظ می گردند.

$$W_{a\beta l} = (W_{al\beta l}, W_{au\beta l}); \quad a = 1, 2, \dots, i; l = 1, 2, \dots, L \quad (9)$$

- محاسبه W_{al} و W_{au} : مقادیر کران پایین و بالا با یکدیگر ترکیب شده و بر مجموع مقادیر β تقسیم می شوند تا وزن نهایی فازی برای هر معیار به دست آید.

$$W_{al} = \frac{\sum_{a=1}^i \beta (W_{al})_l}{\sum_{l=1}^L \beta_l}; \quad a = 1, 2, \dots, i; l = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

$$W_{au} = \frac{\sum_{a=1}^i \beta (W_{au})_l}{\sum_{l=1}^L \beta_l}; \quad a = 1, 2, \dots, i; l = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

- محاسبه W_{ad} : برای غیرفازی سازی، از ترکیب مقادیر کران بالا و پایین با استفاده از شاخص خوش بینی (g) استفاده می شود.

$$P_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right); c_j^* = \max c_{ij} \quad (16)$$

$$P_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right); a_j^- = \min a_{ij}$$

- محاسبه ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده وزنی: این ماتریس با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = [v_{ij}]_{m \times n}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$v_{ij} = P_{ij} \times w_j \quad \text{که در آن}$$

- شناسایی راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی فازی:

$$A^+ = \{v_1^+ \dots v_n^+\} \quad (18)$$

$$v_j^+ = \{ \max(v_{ij}) \text{ if } j \in J; \min(v_{ij}) \text{ if } j \in J'; j = 1, 2, \dots, n$$

$$A^- = \{v_1^- \dots v_n^-\} \quad (19)$$

$$v_j^- = \{ \max(v_{ij}) \text{ if } j \in J; \min(v_{ij}) \text{ if } j \in J'; j = 1, 2$$

- محاسبه فاصله هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی فازی:

$$d_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^+) \right\}^{1/2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$$d_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^-) \right\}^{1/2}; i = 1, 2$$

- محاسبه ضریب نزدیکی (CC_i): ضریب نزدیکی که بیانگر فاصله هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی فازی است، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (21)$$

- رتبه‌بندی گزینه‌ها: گزینه‌ها بر اساس مقادیر ضریب نزدیکی (CC_i) به صورت نزولی مرتب می‌شوند. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی فازی و کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت فازی داشته باشد.

یا ذهنی دارد. مراحل روش تاپسیس فازی به شرح زیر است:

- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی: گروه خبرگان هر گزینه (استان) را بر اساس چهار معیار اصلی (اجتماعی، فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی) ارزیابی کردند. برای ارزیابی‌ها از پنج متغیر زبانی «بسیار ضعیف»، «ضعیف»، «متوسط»، «خوب» و «عالی» استفاده شد. این ارزیابی‌ها مطابق جدول ۳ به اعداد فازی مثلثی (TFN) تبدیل شده و ماتریس تصمیم‌گیری فازی برای هر گزینه تشکیل شد.

جدول ۳. درجه‌بندی متغیرهای زبانی

Table 3. Linguistic variable ratings

متغیر زبانی	عدد فازی مثلثی تخصیص یافته (TFN)
خیلی کم	(۱، ۱، ۳)
کم	(۱، ۳، ۵)
متوسط	(۳، ۵، ۷)
زیاد	(۵، ۷، ۹)
خیلی زیاد	(۷، ۹، ۹)

- محاسبه وزن‌های فازی تجمیعی: وزن‌های فازی تجمیعی برای تمام معیارها محاسبه شده و ماتریس تصمیم‌گیری فازی تجمیعی به دست می‌آید. اگر رتبه‌بندی فازی تصمیم‌گیرنده N ام به صورت $X_{abN} = (l_{abN}, p_{abN}, u_{abN})$ باشد که در آن $a = 1, 2, 3, \dots, m$ و $b = 1, 2, 3, \dots, n$ هستند، رتبه‌بندی فازی تجمیعی گزینه‌ها مطابق با هر معیار به صورت $X_{ab} = (l_{ab}, p_{ab}, u_{ab})$ تعریف می‌شود که در آن:

$$a = \min\{l_{abN}\} \quad (14)$$

$$b = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N p_{abN}$$

$$c = \max\{u_{abN}\}$$

- نرمال‌سازی ماتریس فازی تجمیعی: این مرحله با استفاده از تبدیل خطی مقیاس انجام شده و با نماد B نمایش داده می‌شود:

$$B = [P_{ij}]_{m \times n}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

برای معیارهای سودمند (Benefit Criteria) و معیارهای هزینه‌ای (Cost Criteria) به ترتیب:

۵- محاسبات و تحلیل‌ها

قرار دارد. در مقابل، معیار اجتماعی با وزن پایین‌تر نشان‌دهنده توجه کمتر به جنبه‌هایی مانند پذیرش عمومی یا اشتغال‌زایی در اولویت‌های فعلی تصمیم‌گیرندگان است، هرچند این معیار در بلندمدت برای توسعه پایدار اهمیت خواهد داشت. برای بررسی میزان سازگاری قضاوت‌های انجام‌شده در ماتریس‌های مقایسه زوجی، شاخص سازگاری (CI) توسط ساعتی (Saaty, 2008) معرفی شده است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (22)$$

در این رابطه، n تعداد معیارها (اندازه ماتریس $n \times n$) و λ_{\max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه است. نسبت سازگاری (CR) نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (23)$$

در این فرمول، RI شاخص تصادفی است که مقادیر آن بسته به اندازه ماتریس در جدول استاندارد (جدول ۶) ارائه شده است. در این پژوهش، اندازه ماتریس مقایسه برابر با ۴ بوده و مقدار $\lambda_{\max} = 4.04$ محاسبه شده است. با استفاده از مقدار $RI = 0.9$ برای ماتریس 4×4 ، مقادیر $CI = 0.0133$ و $CR = 0.0148$ هستند.

مقدار CR کمتر از ۰/۱۰ نشان‌دهنده سطح قابل قبول سازگاری در مقایسه‌های زوجی است. در صورتی که $CR > 0.1$ باشد، قضاوت‌های اولیه باید بازنگری شوند. در این پژوهش، از آنجا که $CR = 0.0148$ به دست آمده است، مقایسه‌های انجام‌شده کاملاً سازگار ارزیابی می‌شوند. در مرحله نهایی، اولویت کلی معیارها و زیرمعیارها از طریق ضرب وزن جهانی هر بعد در وزن محلی زیرمعیارهای متناظر محاسبه شد. سپس، این وزن‌ها بر اساس اهمیت مرتب شده و رتبه‌بندی نهایی معیارها و زیرمعیارها در جدول ۷ ارائه شده است.

۵-۲- تحلیل حساسیت بر نتایج روش FAHP

برای بررسی پایداری و قابلیت اطمینان مدل تصمیم‌گیری و ارزیابی تأثیر تغییرات در وزن معیارهای فرعی بر نتایج نهایی، تحلیل حساسیت انجام شد. اشکال ۴ و ۵ نمایی مقایسه‌ای از دو سناریوی به‌کاررفته در چارچوب FAHP برای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی ارائه می‌دهد.

این مرحله با هدف شناسایی واحدهای تصمیم‌گیری (DMU) با نمره کارایی برابر یا نزدیک به یک انجام شد. برای افزایش دقت تحلیل، داده‌های هواشناسی از ۶۸ شهر واقع در ۳۱ استان کشور جمع‌آوری شد. با توجه به وسعت جغرافیایی استان‌ها، از هر استان چند شهر انتخاب شد تا تنوع اقلیمی هر منطقه به‌درستی منعکس شده و اعتبار نتایج افزایش یابد. داده‌ها عمدتاً از مناطق غیرمسکونی انتخاب شدند تا نمایانگر شرایط مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی باشند و نتایج پژوهش تا حد امکان با شرایط واقعی هم‌خوانی داشته باشند. نمرات کارایی به‌دست‌آمده از تحلیل DEA در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

۵-۱- وزن‌دهی به معیارها با استفاده از مدل FAHP

در این مطالعه، از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) برای تعیین وزن فازی هر معیار استفاده شد. چهار بعد اصلی شامل معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شد که هر یک به ۱۴ زیرمعیار تقسیم شدند. برای ارزیابی اهمیت این معیارها، پرسشنامه‌ای ساختارمند طراحی و در اختیار کارشناسان قرار گرفت. این کارشناسان شامل مشاوران و پیمانکاران فعال در حوزه احداث نیروگاه‌های خورشیدی، همکار با سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران (ساتبا) بودند. مشارکت کارشناسان در دو مرحله انجام شد: در مرحله نخست، ۲۱ کارشناس برای تعیین وزن معیارها با روش FAHP و در مرحله دوم، ۱۰ کارشناس واجد شرایط برای تکمیل پرسشنامه FTOPSIS جهت ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها انتخاب شدند. نتایج رتبه‌بندی چهار معیار اصلی، که از ماتریس مقایسه‌های زوجی به دست آمده‌اند، در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

نتایج نشان داد که معیار اقتصادی با وزن ۰/۴۲ در رتبه نخست و معیار فنی با وزن ۰/۳۵ در رتبه دوم قرار دارد. این الگو بیانگر آن است که در شرایط کنونی ایران، تصمیم‌گیری برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی عمدتاً تحت تأثیر ملاحظات اقتصادی، مانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بازگشت اقتصادی و زیرساخت شبکه برق،

پایداری نسبی مناسبی دارد. این موضوع به‌ویژه در مدل‌هایی که مبتنی بر نظرات خبرگان هستند، اهمیت بالایی دارد، زیرا نشان‌دهنده قابلیت اطمینان فرایند تصمیم‌گیری حتی با وجود عدم قطعیت‌های ورودی است.

در سناریوی اول، تغییرات جزئی در وزن معیارهای اصلی اعمال شد تا پایداری مدل در برابر نوسانات کوچک بررسی شود (شکل ۴). نتایج این سناریو نشان داد که مدل FAHP حتی در برابر تغییرات جزئی در وزن معیارها

جدول ۴. امتیاز کارایی مکان‌ها در مدل تحلیل پوششی داده‌ها

Table 4. Efficiency score of locations in the data envelopment analysis model

استان	شهر	کد شهر	کارایی	استان	شهر	کد شهر	کارایی
آذربایجان غربی	ارومیه	۰۱	۰/۹۳	کردستان	مریوان	۳۵	۰/۹۵
	سلماس	۰۲	۰/۸۷		سنندج	۳۶	۰/۹۳
آذربایجان شرقی	تبریز	۰۳	۱/۰	کرمان	بم	۳۷	۱/۰
	سراب	۰۴	۰/۸۸		رفسنجان	۳۸	۱/۰
اردبیل	اردبیل	۰۵	۰/۹۰		کرمان	۳۹	۱/۰
	سرعین	۰۶	۰/۸۹	کرمانشاه	کرمانشاه	۴۰	۰/۹۱
البرز	کرج	۰۷	۰/۹۳	گلستان	گرگان	۴۱	۰/۶۹
	طالقان	۰۸	۰/۹۲		مینودشت	۴۲	۰/۷۲
اصفهان	خوانسار	۰۹	۱/۰	گیلان	رشت	۴۳	۰/۶۲
	اصفهان	۱۰	۱/۰		آستارا	۴۴	۰/۶۴
	کاشان	۱۱	۱/۰	لرستان	سپیددشت	۴۵	۰/۹
ایلام	ایلام	۱۲	۰/۹۷		خرم‌آباد	۴۶	۰/۹۵
	دهلران	۱۳	۱/۰	قزوین	قزوین	۴۷	۰/۹۶
بوشهر	بوشهر	۱۴	۰/۹۹		تاکستان	۴۸	۰/۹۵
	بندر گناوه	۱۵	۰/۹۱	قم	قم	۴۹	۰/۹۶
چهارمحال و بختیاری	کوهرنگ	۱۶	۱/۰		سلفچگان	۵۰	۰/۹۵
	شهرکرد	۱۷	۱/۰	فارس	کازرون	۵۱	۱/۰
تهران	تهران	۱۸	۰/۹۳		شیراز	۵۲	۱/۰
خراسان شمالی	بجنورد	۱۹	۰/۹۱		صفاشهر	۵۳	۱/۰
خراسان رضوی	سبزوار	۲۰	۰/۹۳	مرکزی	اراک	۵۴	۰/۹۹
	مشهد	۲۱	۰/۸۶		تفرش	۵۵	۱/۰
	نیشابور	۲۲	۰/۹۰	مازندران	ساری	۵۶	۰/۶۶
خراسان جنوبی	فردوس	۲۳	۱/۰		آمل	۵۷	۰/۶۳
	بیرجند	۲۴	۱/۰		بابلسر	۵۸	۰/۷۴
	طبس	۲۵	۱/۰	کهگیلویه و بویراحمد	یاسوج	۵۹	۱/۰
خوزستان	بهبهان	۲۶	۱/۰	زنجان	زنجان	۶۰	۱/۰
	آبادان	۲۷	۱/۰	همدان	همدان	۶۱	۱/۰
	بندر ماهشهر	۲۸	۱/۰		ملایر	۶۲	۹۸/۰
سمنان	میامی	۲۹	۱/۰	هرمزگان	بندر لنگه	۶۳	۱/۰
	شاهرود	۳۰	۰/۹۸		بندرعباس	۶۴	۱/۰
	سمنان	۳۱	۱/۰		جزیره قشم	۶۵	۱/۰
سیستان و بلوچستان	زاهدان	۳۲	۱/۰	یزد	مهریز	۶۶	۱/۰
	خاش	۳۳	۱/۰		بافق	۶۷	۱/۰
	سراوان	۳۴	۱/۰		هرات	۶۸	۱/۰

جدول ۵. رتبه‌بندی معیارهای انتخاب مکان نیروگاه خورشیدی در ایران

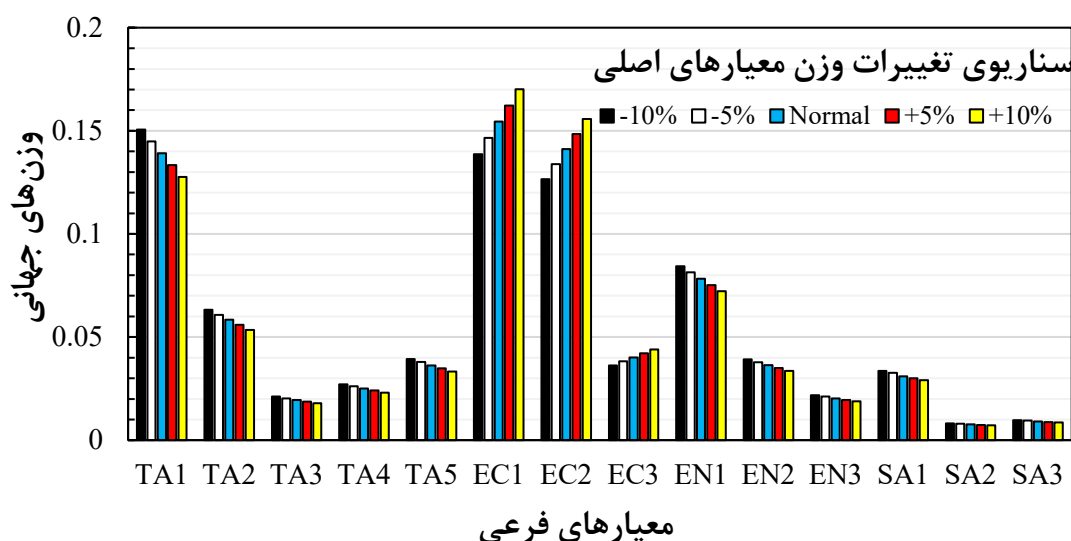
Table 5. Ranking of criteria for selecting a solar power plant location in Iran

رتبه	وزن نهایی	معیار اجتماعی (SA)	معیار زیست‌محیطی (EN)	معیار اقتصادی (EC)	معیار فنی (TA)	دسته معیار
۲	۰/۳۵	(۴/۶۴، ۶/۰۹، ۷/۰۹)	(۱/۶، ۲/۰۷، ۲/۵۴)	(۰/۶۸، ۰/۸۸، ۱/۱۲)	(۱، ۱، ۱)	فنی
۱	۰/۴۲	(۵/۴۱، ۶/۶۱، ۷/۷۶)	(۲/۲، ۲/۷۶، ۳/۳)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۸۹، ۱/۱۴، ۱/۴۷)	اقتصادی
۳	۰/۱۷	(۲/۴۱، ۳/۱۹، ۳/۹)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۳، ۰/۳۶، ۰/۴۶)	(۰/۳۹، ۰/۴۸، ۰/۶۳)	زیست‌محیطی
۴	۰/۰۶	(۱، ۱، ۱)	(۰/۲۶، ۰/۳۱، ۰/۴۱)	(۰/۱۳، ۰/۱۵، ۰/۱۸)	(۰/۱۴، ۰/۱۶، ۰/۲۲)	اجتماعی

جدول ۶. شاخص تصادفی

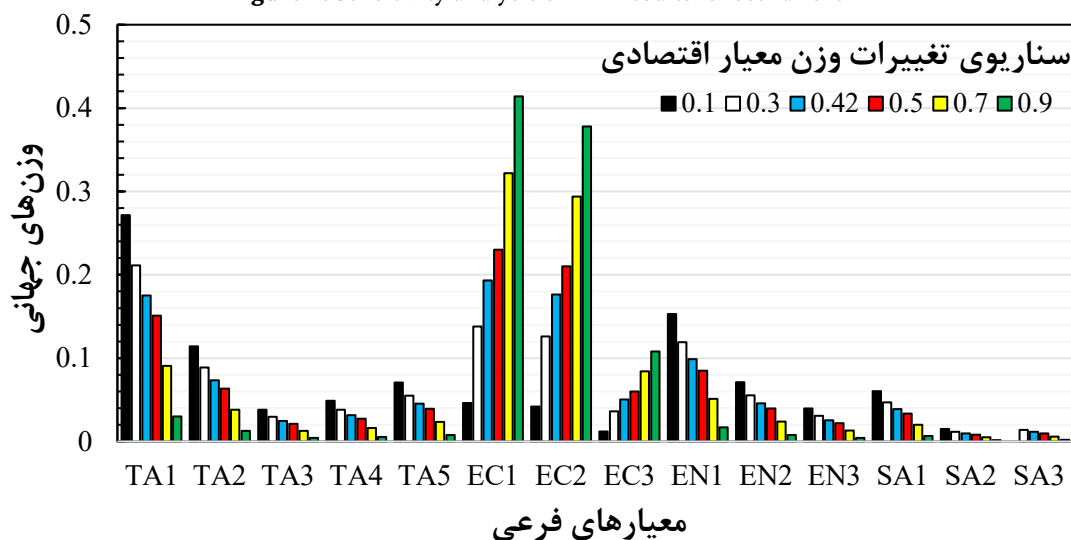
Table 6. Random index

تعداد معیار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
شاخص تصادفی	۰/۰	۰/۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹



شکل ۴. تحلیل حساسیت نتایج AHP برای سناریوی ۱.

Figure 4. Sensitivity analysis of AHP results for scenario 1.



شکل ۵. تحلیل حساسیت نسبت به وزن معیار اقتصادی در سناریوی ۲.

Figure 5. Sensitivity analysis of economic criterion weight in scenario 2.

جدول ۷. وزن‌ها و رتبه‌بندی عوامل مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی

Table 7. Weights and rankings of factors affecting the location of solar power plants

معیارهای اصلی	وزن جهانی معیار اصلی	معیارهای فرعی	وزن محلی معیار فرعی	معیار جهانی معیارها	رتبه معیارها	نهایی
فنی (TA)	۰/۳۵	TA1	۰/۵	۰/۱۷۵۰	۳	
	۰/۳۵	TA2	۰/۲۱	۰/۰۷۳۵	۵	
	۰/۳۵	TA3	۰/۰۷	۰/۰۲۴۵	۱۲	
	۰/۳۵	TA4	۰/۰۹	۰/۰۳۱۵	۱۰	
	۰/۳۵	TA5	۰/۱۳	۰/۰۴۵۵	۸	
اقتصادی (EC)	۰/۴۲	EC1	۰/۴۶	۰/۱۹۳۲	۱	
	۰/۴۲	EC2	۰/۴۲	۰/۱۷۶۴	۲	
	۰/۴۲	EC3	۰/۱۲	۰/۰۵۰۴	۶	
زیست‌محیطی (EN)	۰/۱۷	EN1	۰/۵۸	۰/۰۹۸۶	۴	
	۰/۱۷	EN2	۰/۲۷	۰/۰۴۵۹	۷	
	۰/۱۷	EN3	۰/۱۵	۰/۰۲۵۵	۱۱	
اجتماعی (SA)	۰/۰۶	SA1	۰/۶۵	۰/۰۳۹۰	۹	
	۰/۰۶	SA2	۰/۱۶	۰/۰۰۹۶	۱۴	
	۰/۰۶	SA3	۰/۱۹	۰/۰۱۱۴	۱۳	

محاسبات روش FTOPSIS اعمال شدند. نتایج اصلی در جدول ۸ ارائه شده‌اند.

بر اساس نتایج نهایی، استان‌های یزد، کرمان و خراسان جنوبی در صدر رتبه‌بندی قرار گرفتند و به‌عنوان مناسب‌ترین مناطق کشور برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی معرفی شدند. تحلیل جغرافیایی نتایج نشان می‌دهد که پهنه‌های مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی کشور به دلیل برخورداری از تابش خورشیدی فراوان، ساعات آفتابی طولانی، شرایط اقلیمی پایدار و دسترسی نسبی به زیرساخت‌ها، بیشترین قابلیت را برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی دارند. در مقابل، استان‌های واقع در نواحی شمالی و غربی کشور به دلیل کاهش شدت تابش خورشیدی، بارندگی‌های بیشتر و محدودیت‌های زیرساختی، اولویت پایین‌تری دارند. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین در زمینه مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در ایران هم‌خوانی دارد. برای اعتبارسنجی، نتایج این پژوهش با سه مطالعه دیگر در جدول ۹ مقایسه شده است. مهریان و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل ترکیبی GIS و سیستم استنتاج فازی (FIS)، پتانسیل کلیه استان‌های ایران را برای احداث نیروگاه خورشیدی ارزیابی کردند. همچنین، مطالعه احدی و همکاران (۲۰۲۳) با روش AHP و پژوهش وفایی‌پور و همکاران (۲۰۱۴) با

در سناریوی دوم، حساسیت نتایج نسبت به تغییرات عمده بررسی شد. در این سناریو، وزن معیار اقتصادی به‌طور چشمگیری افزایش یافت (شکل ۵). تحلیل حساسیت جهانی نشان داد که افزایش وزن معیار اقتصادی منجر به افزایش قابل‌توجه وزن جهانی زیرمعیارهای مرتبط با آن شد و در نتیجه، اهمیت سایر معیارها به‌طور نسبی کاهش یافت. این تحلیل همچنین نشان داد که تغییرات حتی جزئی در اولویت‌دهی معیارها می‌تواند جابجایی‌های قابل‌توجهی در رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها ایجاد کند.

۵-۳- رتبه‌بندی مناسب‌ترین استان‌ها با استفاده از روش FTOPSIS

با توجه به ابهام ناشی از قضاوت‌های کیفی و تعدد معیارهای تصمیم‌گیری، که محاسبات را پیچیده می‌کند، در برخی موارد محققان با حذف تعدادی از معیارها به ساده‌سازی فرایند اقدام می‌کنند (Eghbali, 2022). در این پژوهش، برای افزایش دقت پاسخ‌های کارشناسان و کاهش بار شناختی ناشی از تعدد زیرمعیارها، پرسشنامه تنها بر اساس چهار معیار اصلی (فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) طراحی شد. سپس، وزن‌های محلی و جهانی زیرمعیارها، که با روش FAHP به‌دست آمده بودند، در

روش‌شناسی، برخی مناطق کشور به‌طور مداوم شرایط مطلوبی برای توسعه انرژی خورشیدی دارند. تفاوت‌های موجود در رتبه‌بندی‌ها معمولاً ناشی از اختلاف در وزن‌دهی معیارها، منابع داده یا شیوه‌های ارزیابی بوده است.

استفاده از مدل SWARA-WASPAS انجام شده‌اند. هم‌پوشانی نتایج این مطالعات، علی‌رغم تفاوت در رویکردهای تحلیلی، نشان‌دهنده اعتبار بالای استان‌های منتخب در این پژوهش است. این هم‌پوشانی قابل‌توجه، اعتبار و پایداری انتخاب استان‌های معرفی‌شده را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که صرف‌نظر از تفاوت در جدول ۸. رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

Table 8. Final ranking of options

رتبه	ضریب نزدیکی (CCi)	فاصله از راه‌حل مثبت (d _i ⁺)	فاصله از راه‌حل منفی (d _i ⁻)	استان
چهارم	۰/۸۴۲۳	۰/۱۵۹۷	۰/۸۵۳	اصفهان
ششم	۰/۷۶۸	۰/۲۳۳۲	۰/۷۷۲	سمنان
نهم	۰/۶۳۵۲	۰/۳۶۵۷	۰/۶۳۶۹	خوزستان
سوم	۰/۸۵۸۵	۰/۱۴۲۶	۰/۸۶۵	خراسان جنوبی
پنجم	۰/۷۹۰۳	۰/۲۱۱۹	۰/۷۹۸۳	فارس
هفتم	۰/۷۵۸۴	۰/۲۴۲۳	۰/۷۶۰۵	سیستان و بلوچستان
پانزدهم	۰/۰۴۲۷	۰/۹۷۲۱	۰/۰۴۳۳	چهارمحال و بختیاری
دوم	۰/۹۶۳۹	۰/۰۳۶۳	۰/۹۶۹۴	کرمان
اول	۰/۹۹۱۳	۰/۰۰۸۷	۰/۹۹۸۲	یزد
چهاردهم	۰/۱۷۲۱	۰/۸۳۵۱	۰/۱۷۳۶	کهگیلویه و بویراحمد
دهم	۰/۵۵۸۴	۰/۴۴۳۳	۰/۵۶۰۶	هرمزگان
دوازدهم	۰/۴۱۹۶	۰/۵۸۲۲	۰/۴۲۰۹	ایلام
هشتم	۰/۷۱۹۸	۰/۲۸۱۸	۰/۷۲۴	مرکزی
سیزدهم	۰/۳۶۴۳	۰/۶۴	۰/۳۶۶۸	زنجان
یازدهم	۰/۴۲۴۳	۰/۵۷۷۷	۰/۴۲۵۷	همدان

جدول ۹. اعتبارسنجی نتایج پژوهش با مطالعات مشابه

Table 9. Validation of research results with similar studies

استان	پژوهش حاضر	Vafaiepour et al., 2014	Ahadi et al., 2023	Mehriani et al., 2025
یزد	۱	۱	۹	۱۳
کرمان	۲	۶	۳	۳
خراسان جنوبی (بیرجند)	۳	۳	۷	۱۲
اصفهان	۴	۱۰	۸	۱
فارس (شیراز)	۵	۷	۲	۴
سمنان	۶	۱۲	۱۴	۱۱
سیستان و بلوچستان (زاهدان)	۷	۳	۱	۱۶
مرکزی (اراک)	۸	۱۵	۲۰	۶
خوزستان (اهواز)	۹	۲	۲۵	۲۵
هرمزگان (بندرعباس)	۱۰	۵	۹	۲۲
همدان	۱۱	۱۳	۱۹	۷
ایلام	۱۲	۱۱	۱۱	۲۶
زنجان	۱۳	۱۸	۱۸	۸
کهگیلویه و بویراحمد (یاسوج)	۱۴	۱۵	۴	۲۷
چهارمحال و بختیاری (شهرکرد)	۱۵	-	۵	۲۰

۶- نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش نشان داد که ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی دقت و اعتبار نتایج مکان‌یابی را افزایش دهد. در مرحله نخست، به‌کارگیری مدل تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) این امکان را فراهم کرد که تنها استان‌های کارا وارد فرایند تحلیل شوند و از خطا یا سوگیری ناشی از اتکای صرف به قضاوت‌های ذهنی جلوگیری شود. با توجه به اینکه تصمیم‌گیری در دنیای واقعی همواره با عدم قطعیت همراه است، نسخه‌های مختلفی مانند تاپسیس فازی و تاپسیس خاکستری برای لحاظ کردن عدم قطعیت توسعه یافته‌اند (Kalashi et al., 2025). در ادامه، استفاده از منطق فازی در روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و تاپسیس فازی (FTOPSIS) موجب شد تا عدم قطعیت و ابهام موجود در قضاوت‌های خبرگان، که اغلب به‌صورت کیفی و زبانی بیان می‌شوند، در فرایند تصمیم‌گیری لحاظ گردد. در محیط‌های واقعی، به‌ویژه در مسائل پیچیده و ملی، داده‌ها همیشه دقیق و قطعی نیستند. از این رو، به‌کارگیری منطق فازی کمک می‌کند تا نتایج به‌جای تکیه صرف بر داده‌های قطعی، منعکس‌کننده طیف واقعی دیدگاه‌ها باشند و ارزیابی‌ها واقع‌بینانه‌تر و منطبق‌تر با شرایط کشور انجام شوند.

ادغام داده‌های عینی (مانند میزان تابش خورشیدی، بارش و ارتفاع) با داده‌های ذهنی (قضاوت‌های خبرگان) به خروجی‌های تحقیق اعتبار بیشتری بخشید. با وجود محدودیت‌هایی مانند کمبود داده‌های معتبر تابش خورشیدی و چالش‌های مرتبط با ارزیابی دقیق همه معیارها، این پژوهش با استفاده از داده‌های معتبر جهانی و ساده‌سازی پرسشنامه‌ها توانست نتایج قابل‌قبولی ارائه دهد. چارچوب این پژوهش می‌تواند در چندین سطح به سیاست‌گذاران کمک کند و جهت‌گیری‌های مشخصی برای توسعه انرژی خورشیدی ارائه دهد:

- **توجه ویژه به استان‌های برتر:** سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان باید اولویت سرمایه‌گذاری را به استان‌های دارای رتبه‌های بالاتر اختصاص دهند و این مناطق را به‌عنوان قطب‌های انرژی خورشیدی کشور تقویت کنند.

- **کاهش ریسک تصمیم‌گیری:** ترکیب داده‌های عینی (اقلیمی و جغرافیایی) و داده‌های ذهنی (نظرات خبرگان) همراه با لحاظ عدم قطعیت از طریق منطق فازی، پایداری و اعتمادپذیری تصمیمات را افزایش می‌دهد.
 - **تسهیل سیاست‌گذاری کلان:** نتایج این چارچوب می‌تواند مبنایی برای تدوین نقشه راه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی زیرساختی برای جذب سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی باشد.
 - **تقویت زیرساخت‌ها:** توسعه شبکه انتقال برق، بهبود دسترسی جاده‌ای و ارتقای خدمات پشتیبان در مناطق منتخب برای تسهیل اجرای پروژه‌ها ضروری است.
 - **تشویق سرمایه‌گذاران خصوصی:** ارائه مشوق‌های مالی، اعطای تسهیلات بانکی و تسهیل فرایندهای صدور مجوز می‌تواند جذابیت سرمایه‌گذاری در پروژه‌های خورشیدی را افزایش دهد.
 - **ارتقای نظام پایش تابش خورشیدی:** گسترش و به‌روزرسانی ایستگاه‌های اندازه‌گیری تابش خورشیدی در سراسر کشور، همراه با ارتقای تجهیزات هواشناسی و استفاده از سامانه‌های نوین، زمینه تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و پایش مستمر پروژه‌ها را فراهم می‌کند.
- برای ادامه مسیر تحقیق، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با جزئیات بیشتری در مقیاس‌های منطقه‌ای انجام شوند و معیارهای متنوع‌تری مانند ظرفیت اتصال به شبکه، امکان ترکیب با سایر منابع تجدیدپذیر و معیارهای سیاسی بررسی گردند. همچنین، بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند و تحلیل سناریوهای توسعه ملی می‌تواند به تدوین سیاست‌های دقیق‌تر و کارآمدتر در حوزه انرژی خورشیدی کمک کند. این پژوهش گامی مهم در طراحی چارچوبی علمی و کاربردی برای حمایت از تصمیم‌گیری در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر به شمار می‌رود و می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی بلندمدت کشور در مسیر توسعه پایدار انرژی باشد.

فهرست علائم

مراجع

- Ahadi, P., Fakhrabadi, F., Pourshaghagh, A., & Kowsary, F. (2023). Optimal site selection for a solar power plant in Iran via the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Renewable Energy*, 215, 118944. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118944>
- Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225–1240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>
- Alavi, S., Janatyan, N., & Zeinalnezhad, M. (2024). Benchmarking of fifteen urban services units of Isfahan Municipality by using aggressive data envelopment analysis. *System Engineering and Productivity*, 4(3), 63–81 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2040865.1227>
- Avazpour, M., Zarei, J., & Alinezhad, E. (2025). Evaluation and prioritization of electricity generation technologies in Iran using a multi-criteria decision-making approach. *System Engineering and Productivity*, 5(3), 179–198 (In Persian) <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2063697.1333>
- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078–1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- Borgogno Mondino, E., Fabrizio, E., & Chiabrando, R. (2015). Site selection of large ground-mounted photovoltaic plants: A GIS decision support system and an application to Italy. *International Journal of Green Energy*, 12(5), 515–525. <https://doi.org/10.1080/15435075.2013.858047>
- Bunruamkaew, K., & Murayam, Y. (2011). Site suitability evaluation for ecotourism using GIS & AHP: A case study of Surat Thani province, Thailand. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 21, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.07.024>
- 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>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Chen, C. R., Huang, C. C., & Tsuei, H. J. (2014). A hybrid MCDM model for improving GIS-based solar farms site selection. *International Journal*
- n تعداد واحدهای تصمیم‌گیری (DMUs)
- DMU_i واحد تصمیم‌گیری i ام برای $i = 1, 2, \dots, n$
- DMU_0 واحد تصمیم‌گیری هدف
- a_0 بردار ورودی‌های واحد تصمیم‌گیری هدف
- b_0 بردار خروجی‌های واحد تصمیم‌گیری هدف
- a_i بردار ورودی‌های واحد تصمیم‌گیری i ام
- b_i بردار خروجی‌های واحد تصمیم‌گیری i ام
- $u \in R^{p \times 1}$ بردار وزن‌های ورودی
- $v \in R^{q \times 1}$ بردار وزن‌های خروجی
- u_0 متغیر آزاد (اسکالر) در مدل خروجی محور، برای لحاظ‌کردن بازده به مقیاس متغیر
- v_0 متغیر آزاد (اسکالر) در مدل ورودی محور، برای لحاظ‌کردن بازده به مقیاس متغیر

مشارکت‌های نویسندگان

فاطمه مسلمی: تهیه پیش‌نویس خطی، بازنگری اولیه گزارش، روش‌شناسی پژوهش، مدل مفهومی پژوهش، بررسی ادبیات نظری و پیشینه مرتبط، تجزیه و تحلیل داده‌ها، پیش‌نویس تحلیل آماری و بازبینی متن؛ **ناصر صفایی:** بازنگری اولیه گزارش، روش‌شناسی پژوهش، مدل مفهومی پژوهش، راهنمایی، بازبینی متن.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی و داوران نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری قدردانی می‌کنند. همچنین، از تمامی افرادی که در این پژوهش همراهی کرده‌اند، به‌ویژه شرکت‌های مشاور و پیمانکاران سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) که با دقت و حوصله به پرسشنامه‌های تحقیق پاسخ داده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

- Productivity*, 4(1), 1-13. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2025845.1198>
- Goel, M. (2016). Solar rooftop in India: Policies, challenges and outlook. *Green Energy & Environment*, 1(2), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2016.08.003>
- Goh, H. H., Li, C., Zhang, D., Dai, W., Lim, C. S., Kurniawan, T. A., & Goh, K. C. (2022). Application of choosing by advantages to determine the optimal site for solar power plants. *Scientific Reports*, 12(1), 4113. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08193-1>
- Günen, M. A. (2021). Determination of the suitable sites for constructing solar photovoltaic (PV) power plants in Kayseri, Turkey using GIS-based ranking and AHP methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40), 57232–57247. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14622-x>
- Hasti, F., Mamkhezri, J., McFerrin, R., & Pezhooli, N. (2023). Optimal solar photovoltaic site selection using geographic information system-based modeling techniques and assessing environmental and economic impacts: The case of Kurdistan. *Solar Energy*, 262, 111807. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111807>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Kalashi, F., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Rezaeian, J. (2025). Evaluation and Selection of Suppliers in a Viable Closed-Loop Supply Chain under Mixed Uncertainty. *System Engineering and Productivity* (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2066007.1355>
- Khajavi Pour, A., Shahraki, M. R., & Hosseinzadeh Saljooghi, F. (2021). Solar PV power plant site selection using GIS-FFDEA based approach with application in Iran. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(1), 28–43. <https://doi.org/10.30501/jree.2020.230490.1110>
- Mehrian, M. R., Qelichi, M. M., & Tahouri, H. (2025). Solar power plant site selection using fuzzy inference system: a case study in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(5), 3617-3640. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06047-z>
- Mousavi Ramezanzadeh, A., & Nazari, M. (2025). Identifying and Prioritizing Effective Nudges for Social Acceptance of Green Electricity: A Fuzzy Delphi Study. *System Engineering and Productivity* (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2065794.1352>
- of *Photoenergy*, 2014, 925370. <https://doi.org/10.1155/2014/925370>
- Colak, H. E., Memisoglu, T., & Gercek, Y. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, 149, 565–576. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078>
- De Luis-Ruiz, J. M., Salas-Menocal, B. R., Pereda-García, R., Pérez-Álvarez, R., Sedano-Cibrián, J., & Ruiz-Fernández, C. (2024). Optimal location of solar photovoltaic plants using geographic information systems and multi-criteria analysis. *Sustainability*, 16(7), 2895. <https://doi.org/10.3390/su16072895>
- Doorga, J. R., Rughooputh, S. D., & Boojhawon, R. (2019). Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy*, 133, 1201–1219. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105>
- Eghbali, M. A. (2022). Increasing the Accuracy of Calculations and Reducing Pairwise Comparisons Based on Clustering Decision Criteria and the Fuzzy Best-worst Method. *System Engineering and Productivity*, 2(2), 25-48 (In Persian) <https://doi.org/10.22034/sep.2022.243409>
- Ershadi, M. J., Kianmehr, N., Nabatchian, M., & Dinmohammadi, L. (2024). Designing a Productivity assessment model to identify and prioritize influential factors and examine obstacles facing Iranian research organizations. *System Engineering and Productivity*, 4(2), 31-46 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2019692.1171>
- Esmailpour, M., & Kheirizadeh Arouq, M. (2024). A GIS-based catastrophe approach for optimal site selection for installation of solar power plants, East Azerbaijan province case study, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(24), 35835–35852. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33639-6>
- Fararu. (2024). Iran's electricity blackout crisis under sanctions: Why not use solar energy? *Fararu News*. Retrieved August 25, 2025, from (In Persian). <https://fararu.com/fa/news/798652>
- Flora, F. M. I. (2025). Assessment of concentrated solar power (CSP) generation potential in Cameroon using a Multi-Criteria Analysis Method and Geographic Information System (GIS). *Heliyon*, 11(1), Article e41094. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41094>
- Gholamian, S. A. (2025). Evaluation and selection of sustainable suppliers by providing a decision support system based on a new data envelopment analysis model and cumulative star utility. *System Engineering and*

- 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>
- Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>
- Vafaeipour, M., Zolfani, S. H., Varzandeh, M. H. M., Derakhti, A., & Eshkalag, M. K. (2014). Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach. *Energy Conversion and Management*, 86, 653–663. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.083>
- Wang, C. N., Dang, T. T., & Wang, J. W. (2022). A combined Data Envelopment Analysis (DEA) and Grey Based Multiple Criteria Decision Making (G-MCDM) for solar PV power plants site selection: A case study in Vietnam. *Energy Reports*, 8, 1124–1142. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.045>
- Wang, C. N., Nguyen, V. T., Thai, H. T. N., & Duong, D. H. (2018). Multi-criteria decision making (MCDM) approaches for solar power plant location selection in Viet Nam. *Energies*, 11(6), 1504. <https://doi.org/10.3390/en11061504>
- Yankiv-Vitkovska, L., Peresunko, B., Wyczalek, I., & Papis, J. (2020). Site selection for solar power plant in Zaporizhia city (Ukraine). *Geodesy and Cartography*, 69(1), 97–116. <https://doi.org/10.24425/gac.2020.131076>
- Yeganeh, S. (2025). Performance evaluation of organizational innovation creation system by network data envelopment analysis with random input and output. *System Engineering and Productivity*, 4(4), 31–44 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2031849.1214>
- Yelmen, B., & Çakir, M. T. (2016). Influence of temperature changes in various regions of Turkey on powers of photovoltaic solar panels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(4), 542–550. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.551925>
- Zare, K., Mehri-Tekmeh, J., & Karimi, S. (2015). A SWOT framework for analyzing the electricity
- Noorollahi, E., Fadai, D., Akbarpour Shirazi, M., & Ghodsipour, S. H. (2016). Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)—A case study of Iran. *Energies*, 9(8), 643. <https://doi.org/10.3390/en9080643>
- Onuoha, H., Denwigwe, I., Babatunde, O., Abdulsalam, K. A., Adebisi, J., Emezirinwune, M., & Hamam, Y. (2025). Integrating GIS and AHP for photovoltaic farm site selection: A case study of Ikorodu, Nigeria. *Processes*, 13(1), 164. <https://doi.org/10.3390/pr13010164>
- Paradise Solar Energy. (n.d.). How does weather affect solar panels' production? Retrieved July 25, 2025, from <https://www.paradisesolarenergy.com/blog/how-does-weather-affect-solar-panels-production>
- Rasaei, F., Yousefi, H., Razeghi, M., Naseri, A., Abdoos, M., & Ghasempour, R. (2025). Optimal selection of CSP site for desalination system using GIS and AHP method in Hormozgan province, Iran. *Energy Reports*, 13, 2255–2268. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.082>
- Razeghi, M., Hajinezhad, A., Naseri, A., Noorollahi, Y., & Moosavian, S. F. (2023). Multi-criteria decision-making for selecting a solar farm location to supply energy to reverse osmosis devices and produce freshwater using GIS in Iran. *Solar Energy*, 253, 501–514. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.029>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Sadeghi, S., Mohibi, A., Lotf, J. J., Shams, A., & Arabnia, H. R. (2024). Multi-criteria decision making for sustainable energy solutions: A hybrid approach. In *Proceedings of the International Conference on Sustainability and Renewable Energy (ICSRE 2024)* (pp. 1–15). Civilica (In Persian).
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & García-Cascales, M. S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>
- Shorabeh, S. N., Samany, N. N., Minaei, F., Firozjaei, H. K., Homae, M., & Bolorani, A. D. (2022). A decision model based on decision tree and particle swarm optimization algorithms to identify optimal locations for solar power plants construction in Iran. *Renewable Energy*, 187, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.011>

supply chain using an integrated AHP methodology combined with fuzzy-TOPSIS. *International Strategic Management Review*, 3(1-2), 66-80.
<https://doi.org/10.1016/j.ism.2015.07.001>

Zoghi, M., Ehsani, A. H., Sadat, M., Amiri, M. J., & Karimi, S. (2017). Optimization of solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid regions: A case study of Isfahan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 986-996.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.014>