

Research Paper

Identification and Evaluation of Urban Form Components with a Focus on Effective Utilization of Renewable Energy (Case Study: Tabriz City)

Parya Shafipour Yourdshahi^{*1}, Pantea Khezerlou²

1. Department of Architecture and Urban Planning, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.
2. Master of Architecture and Energy, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

PP: 130-149

Use your device to scan and read
the article online



Keywords: *Urban form components, renewable energy, Tabriz city, MARCOS method*

Abstract

The growing attention to renewable energy sources, which serve as a suitable alternative to non-renewable fossil fuels, has led societies to shift towards renewable energies such as solar energy. The form and spatial structure of a city are crucial dimensions in understanding and analyzing urban environments and are significant factors influencing energy consumption within them. The aim of this research is to identify and evaluate the dimensions, components, and indicators of urban form. This is an applied study with a descriptive-analytical research method. The study's statistical population consists of 30 experts in the relevant field, from which 28 were selected as the sample using Cochran's formula. The data collection methods include surveys and documentary studies, while the data analysis method used is the MARCOS method (Measuring And Ranking Options Based On Solutions) in Excel software. The results of the study indicate that, in terms of dimensions, climate with a score of 0.922, building architecture with 0.837, and spatial structure and urban form with 0.734 have the most influence, respectively. Regarding criteria, the results show that sunny hours with a score of 0.991, temperature with 0.981, building block orientation and optimal façade orientation with 0.841 have the highest impact, respectively. In terms of indicators, solar radiation intensity and direction with a score of 0.991, and solar hour coefficients with 0.961 have the most significant effect on the effective utilization of solar energy in Tabriz city.

Citation: Shafipour Yourdshahi, P. and Khezerlou, P. (2025). **Identification and Evaluation of Urban Form Components with a Focus on Effective Utilization of Renewable Energy (Case Study: Tabriz City)**. *Geography (Regional Planning)*, 15(60), 130-149

DOI: 10.22034/jgeoq.2025.525629.4278

*. **Corresponding author:** Parya Shafipour Yourdshahi, **Email:** pshafipour@nus.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The necessity of utilizing renewable energy sources has increased the demand for solar energy. In fact, renewable energy sources serve as suitable alternatives to non-renewable fossil fuels, prompting societies to shift toward renewable energies such as solar energy. The urban form and spatial structure are crucial dimensions in understanding and analyzing cities, significantly influencing energy consumption. They have a profound impact on various sectors, including residential and non-residential buildings, transportation, services, commercial activities, and industry. Urban form directly affects energy consumption, with a positive correlation between city size and energy use. Therefore, leveraging urban planning and design components to optimize the use of renewable energy sources can enhance the comfort and sustainability of urban life. The main issue addressed in this research is the identification and analysis of the dimensions, components, and indicators of urban form, such as slope and slope orientation, building and population density, accessibility types, proximity to land uses (buffer zones), and transportation. The primary objective of this study is to identify research gaps in previous studies and answer two key research questions:

1. What are the components of urban form that contribute to the effective utilization of renewable energy in Tabriz?
2. To what extent do urban form components influence the efficient use of renewable energy in Tabriz?

In this study, influential urban form components affecting energy consumption were identified across five key dimensions: spatial structure and urban form, building architecture, transportation networks, natural factors, and climate. Additionally, the specific criteria and indicators within each dimension were extracted and analyzed.

Methodology

The present study is applied research with a descriptive-analytical methodology. Data collection methods include documentary studies, field observations, and questionnaires. Given the specialized nature of the subject, 30 experts in the relevant field were selected as the statistical population, and from this group, 28 individuals were chosen as the sample using Cochran’s formula to complete the questionnaires.

In this study, content analysis, library research, and interviews were employed to extract urban form components influencing the efficient utilization of renewable energy. To prioritize the impact of urban form components with an emphasis on the effective utilization of solar energy, the MARCOS method (Measurement and Ranking Options Based on Compromise Solution) was applied.

The research methodology follows the six-layer Saunders model, commonly known as the "Saunders Research Onion," which is detailed in Table 1.

Table 1. Research Methodology Based on the Saunders Research Onion Model

Research Philosophy	Research Approach	Research Strategies	Research Choice	Time Horizon	Data Collection Methods
Positivism	Deductive	Applied – Descriptive (Survey, Correlation, Case Study)	Mixed (Quantitative & Qualitative) – Positivist Paradigm - Interpretivist Paradigm	Cross-sectional & Longitudinal	Questionnaire, Interview, Observation, Library Research

Results and Discussion

In the dimension's section, the climate, with a score of 0.922, buildings' architecture with 0.837, and the spatial structure and urban form with 0.734, are related to the criteria. The respective scores for the criteria are as follows: sunshine hours with 0.991, temperature with 0.981, building block orientation and optimal orientation of building facades with 0.841. In terms of indicators, the intensity and direction of solar radiation with a score of 0.991 and sunshine hours coefficients with 0.961 have the most significant impact on the effective utilization of solar energy in Tabriz. The ranking of the impact of each urban form indicator on energy consumption can be seen in Table (2).

Table 2. Ranking of Urban Form Indicators with Emphasis on Solar Energy

Indicator	Rankings
Average plot area	25
Building density and coverage ratio	12
Building height	11
Distance between blocks	18
Solar radiation angle	2
Building density percentage	7
Population density	4
Building height	6
Shading effect of buildings	4
Wall orientation angle	12
Building materials type	15
Façade material	24
Façade color	29
Façade shape (concave, convex, flat)	23
Opening orientation	10
Optimal opening percentage in building façade	15
Access to roads	35
Access to vacant land and open spaces	25
Road width to façade height ratio	31
Main façade orientation angle	20
Slope size	18
Slope direction	21
Topography	8
Height above sea level	9

Distribution of green spaces and vegetation cover	27
Solar radiation intensity and direction	1
Humidity percentage	34
Sunshine hours coefficients	2
Precipitation	31
Number of cloudy days	17

Conclusion

Cities account for approximately 60 to 80 percent of the total energy consumption globally, and urban form is one of the factors influencing effective energy efficiency, particularly renewable energy. The development of new energy sources is an essential indicator of economic development, and there are significant strengths and reasons for utilizing solar energy in terms of economic, social, cultural, environmental, and organizational aspects. In recent years, the global energy crisis, the limitation of fossil fuels, the increase in greenhouse gases, and the rising temperatures of the Earth have led to the widespread use of renewable energy, especially solar energy, not only in large power plants for public consumption but also in homes for personal use. This article evaluates the components of urban form, including dimensions, criteria, and indicators, in relation to their role and impact on the effective utilization of renewable solar energy using the Markus method. The research findings in the solar energy section indicate that in the dimensions section, climate with a score of 0.922, building architecture with 0.837, and spatial structure and urban form with 0.734, in the criteria section, sunshine hours with a score of 0.991, temperature with 0.981, building block orientation and optimal facade orientation with 0.841, and in the indicators section, intensity and direction of solar radiation with a score of 0.991 and sunshine hours coefficients with 0.961 have the most significant impact on effective energy utilization in Tabriz.

References

1. Ahadi, Pedram, Fakhraabadi, Farbod, Pourshaghghi, Alireza, & Kowsari, Farshad. (2021). Optimal site selection of solar power plants in Iran using the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Mechanical Engineering and Vibrations*, 4(2), 12–24. [In Persian]
2. Ahmadian, Ehsan, Behzad Sodagar, Chris Bingham, Amira Elnokaly and Glen Mills. (2021). Effect of urban built form and density on building energy performance in temperate climates, *Energy and Buildings*, Volume 236: 110762.
3. Colak, H. Ebru, Memisoglu, Tugba, Gercek, Yasin. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey, *Renewable Energy*, Volume 149, Pages 565-576.
4. Ebadi Hossein, Safaeipour, Masoud, Mohammadi Dehcheshmeh, Mostafa, & Sajadian, Nahid. (2023). Developing scenarios for renewable energy development in Ahvaz metropolis. *Future Cities Outlook Quarterly*, 4, 59–79. [In Persian]
5. Elisa Fusco, Bernardo Maggi, Livia Rizzuto. (2022). Alternative indicators for the evaluation of renewables in Europe: An efficiency approach, *Renewable Energy*, Volume 190, 48-65.
6. Gorji, Mostafa, Khoshnood Motlagh, Sajad, Omrani, Hossein, & Hashemi, Morteza. (2017). Site selection of suitable areas for solar power plants under climatic parameters using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Case Study: Fars Province). *Remote Sensing and GIS in Natural Resources*, 8(1), 66–84. [In Persian]
7. Hassaan, M. A., Hassan, A., & Al-Dashti, H. (2021). GIS-based suitability analysis for siting solar power plants in Kuwait, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3),51-70.
8. Karami, Mokhtar, & Sarvestani, Rasoul. (2022). Site selection of solar panels using climatic parameters and GIS (Case Study: Khuzestan Province). *Environmental Science and Technology*, 24(2), 169–180. [In Persian]
9. Kazemian, Gholamreza, Rasouli, Afshin, & Khazaei, Mohammad Mahdi. (2017). The role of new and renewable energies in making cities more livable: Case study of Tehran. *Scientific and Research Journal of Urban Research and Planning*, 8(29), 99–118. [In Persian]
10. 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.
11. 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.
12. Li, Y., Jing, K., Liu, F., & Zhao, F. (2021). A Quantitative Study of the Influence of Urban Form on Large-Scale Application of Rooftop Photovoltaics Using Simplified Method, *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 10(2), 63-75,
13. Liu, Z. (2021). A comprehensive study of feasibility and applicability of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in regions with high solar irradiance. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127240.
14. Mohammadi Dehcheshmeh, Mostafa, Safaeipour, Masoud, Sajadian, Nahid, & Ebadi, Hossein. (2024). Feasibility of renewable urban energy development in Ahvaz with a passive defense approach. *Geography and Environmental Planning*, 35(1), 19–44. [In Persian]
15. Momenzadeh, Zohreh, Kalantari, Saeideh, Tazeh, Mahdi, & Taghizadeh Mehrjerdi, Rouhollah. (2020). Zoning and site selection of solar power plants using AHP and GIS in Yazd Province. *Environmental Science and Technology*, 22(12). [In Persian]
16. Monjezi, Narges, Afrous, Ali, Davoodbaharvandi, Maryam, & Moradi Motlagh, Ehsan. (2023). Site selection of solar power plants using Analytic Hierarchy Process and GIS techniques (Case Study: Andimeshk County). *Quarterly Journal of Energy Policy and*

- Planning Research, 9(1), 23–63. [In Persian]
17. Nadizadeh Shourabeh, Saman, Neisani Samani, Najmeh, & Abdali, Yaghoob. (2019). Mapping the potential of solar power plants based on the concept of risk: Case study of Razavi Khorasan Province. *Geographic Information*, 28(111), 129–147. [In Persian]
 18. Rafieian, Mojtaba, Fath Jalali, Arman, & Dadashpour, Hashem. (2011). Feasibility study on the impact of the form and density of residential blocks on urban energy consumption (Case Study: Hashtgerd New Town). *Armanshahr Architecture and Urban Development*, 4(6), 107–116. [In Persian]
 19. Sahin, G., Akkus, I., Koc, A., & van Sark, W. (2024). Multi-criteria solar power plant siting problem solution using a GIS-Taguchi loss function based interval type-2 fuzzy approach: The case of Kars Province/Turkey, *Heliyon*, 10 (10), 215–240.
 20. Sahragard, Nasrollah, Aryanejad, Heydar, & Kamangar, Mohammad. (2016). Site selection of solar thermal power plants for sustainable energy supply using fuzzy logic. *Iranian Journal of Energy*, 19(1), 1–849. [In Persian]
 21. Shah Porun Rena, M.M., & Moniruzzaman, Md. (2024). Demarcation of suitable site for solar photovoltaic power plant installation in Bangladesh using geospatial techniques, *Next Energy*, 3.
 22. Shoja, Saeedeh, Pourjafar, Mohammad Reza, & Tabibian, Manouchehr. (2019). Meta-analysis of the relationship between urban form and energy: A review of approaches, methods, scales, and variables. *Urban Planning Knowledge*, 3(1), 85–101. [In Persian]
 23. Subbian, L. (2023). GIS-Based suitability analysis for siting solar power plants in Salem district, Tamil Nadu, INDIA, *International Journal of Advance and Applied Research*, 2(22), 95-120, 95-110.
 24. Tang, Shui-Yan. (2021). Rethinking local and regional governance in China: An institutional design and development perspective. *Urban Governance*, 1(1), 51-58.
 25. Tavakkoli, Hanieh, Khadem-Hosseini, Ahmad, Gandomkar, Amir, & Azani, Mehri. (2023). Feasibility study of establishing a grid-connected photovoltaic power plant with an urban environmental sustainability approach (Case Study: District 22 of Tehran). *Geographical Sciences (Applied Geography)*, 5(19). [In Persian]
 26. Toth, Aniko, Lund, John, Hutterer, Gerry & Fenerty, David (2022). Current world situation for geothermal energy production, based on WGC2020+ 1 reports from 88 countries. Conference: European Geothermal Congress At: Berlin, Germany, 28(236,745), 0.259 .
 27. Wei, L. J., M.M. Islam, M. H., & Erdem C. (2024). Energy consumption, power generation and performance analysis of solar photovoltaic module based building roof, *Journal of Building Engineering*, 90, 340-361.
 28. Zanganeh, Mehdi, Haji Shamsaei, Mojtaba, & Zanganeh, Yaghoob. (2024). Feasibility of using solar power plants in cities of arid regions (Case Study: Sabzevar City). *Geographical Engineering of the Land*, 8(3), 141–156. [In Persian]
 29. Zhang, N., Yu, Y., Wu, J., Du, E., Zhang, Sh., & Xiao, J. (2024). Optimal configuration of concentrating solar power generation in power system with high share of renewable energy resources, *Renewable Energy*, 220, 503-535.

مقاله پژوهشی

شناسایی و ارزیابی مؤلفه‌های فرم شهری با رویکرد بهره‌وری مؤثر از انرژی‌های تجدیدپذیر
(نمونه موردی شهر تبریز)

پریا شفیق پور یوردشاهی* - گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.
پانته آ خضولو - کارشناس ارشد معماری و انرژی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>توجه به منابع تجدیدپذیر انرژی که جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر هستند، سبب شده است که جوامع به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر، نظیر انرژی خورشیدی سوق پیدا کنند. فرم و ساختار فضایی شهر از ابعاد مهم شناخت و تحلیل شهر می‌باشد و از عوامل مؤثر بر مصرف انرژی در آنها است. هدف از این پژوهش شناسایی و ارزیابی ابعاد، مؤلفه‌ها و شاخص‌های فرم شهر و نوع تحقیق، کاربردی و روش تحقیق توصیفی-تحلیلی بوده و جامعه آماری تحقیق ۳۰ نفر از کارشناسان حوزه‌ی مرتبط که با استفاده از فرمول کوکران، تعداد ۲۸ نفر به عنوان نمونه‌ی آماری انتخاب شدند. روش‌های گردآوری اطلاعات شامل؛ پرسشنامه و مطالعات اسنادی بوده و روش تجزیه و تحلیل اطلاعات نیز روش MARCOS (سنجش و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس راه‌حل) در نرم‌افزار Excel می‌باشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد در بخش ابعاد به ترتیب اقلیم با امتیاز ۰.۹۲۲، معماری ساختمان‌ها با ۰.۸۳۷ و ساختار فضایی و فرم شهر با ۰.۷۳۴، در ارتباط با معیارها، به ترتیب ساعات آفتابی با امتیاز ۰.۹۹۱، دما با ۰.۹۸۱، جهت‌گیری بلوک‌های ساختمانی و جهت‌گیری بهینه‌نمای ساختمان‌ها با ۰.۸۴۱، در ارتباط شاخص‌ها، به ترتیب شدت و جهت تابش با امتیاز ۰.۹۹۱، ضرایب ساعات آفتابی با ۰.۹۶۱ بیشترین اثر را در بهره‌وری مؤثر از انرژی خورشیدی را در شهر تبریز دارند.</p>	<p>شماره صفحات: ۱۴۹-۱۳۰</p> <p>از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید</p>  <p>واژه‌های کلیدی: مؤلفه‌های فرم شهری، انرژی تجدیدپذیر، شهر تبریز، روش MARCOS</p>

استناد: شفیق پور یوردشاهی، پریا و خضولو، پانته آ. (۱۴۰۴). شناسایی و ارزیابی مؤلفه‌های فرم شهری با رویکرد بهره‌وری مؤثر از انرژی‌های تجدیدپذیر (نمونه موردی شهر تبریز). فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۵(۶۰)، ۱۳۰-۱۴۹.

DOI:10.22034/jgeoq.2025.525629.4278

مقدمه

انرژی از عوامل اصلی رشد اقتصادی کشورها بوده و یکی از شروط توسعه‌ی جوامع استفاده بهینه از انرژی می‌باشد و در مقابل کشورهایی که بهره‌ی کمتری از انرژی دارند در زمره‌ی جوامع فقیر محسوب می‌شوند (Khajavi Pour, Shahraki & Hosseinzadeh Saljooghi, 2021, 30). ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، تقاضا برای انرژی خورشیدی را افزایش داده و در واقع منابع تجدیدپذیر انرژی جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر بوده و سبب شده است که جوامع به سمت انرژی‌هایی نظیر انرژی خورشیدی سوق پیدا نماید (Wei, Islam, Hasanuzzaman, & Cuce, 2024, 345). فرم و ساختار فضایی شهر از ابعاد مهم شناخت و تحلیل شهر می‌باشد و از عوامل مؤثر بر مصرف انرژی در آنهاست که تأثیر به‌سزایی در بخش ساختمان (خانگی و غیر خانگی)، حمل و نقل، خدمات و فعالیت‌های تجاری و صنعت دارد (محمدی ده‌چشمه و همکاران، ۱۴۰۳: ۲۳). انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشید، باد، زمین‌گرایی، زیست‌توده، آبی و امواج دریایی از جمله انرژی‌های بی‌پایانی هستند که می‌توانند نقش مؤثری در کاهش اثرات و آلودگی‌های زیست‌محیطی و بهبود شرایط داشته باشند. بدیهی است انجام این امر مستلزم به‌کارگیری فناوری‌ها، ابزارها و روش‌هایی در ادغام و تبیین ارتباط بین مولفه‌های فرم شهری و انرژی می‌باشد (منجری و همکاران، ۱۴۰۲: ۴۲). فرم شهر دارای تأثیر مستقیم بر مصرف انرژی است و همبستگی مثبتی بین اندازه شهر و مصرف آن وجود دارد. لذا بهره‌برداری از مولفه‌های برنامه‌ریزی و طراحی شهری در خصوص استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند، آسایش را برای زندگی شهروندان فراهم نماید (زنگنه و همکاران، ۱۴۰۳: ۱۴۸).

چالش‌های موجود در تأمین انرژی، عدم وابستگی به سوخت‌های فسیلی، بهینه‌سازی مصرف سوخت و بهره‌وری مؤثر از انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین رشد شتابان و فزاینده‌ی شهرنشینی و در پی آن، افزایش جمعیت شهرها پیامدهای مختلفی را در زمینه‌های گوناگون به دنبال داشته است (Li et al, 2021: 67). از جمله مهم‌ترین این پیامدها می‌توان به افزایش مصرف و تقاضا برای منابع انرژی اشاره نمود، که خود از دو جنبه محدود بودن منابع انرژی مورد مصرف و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی از دلایل ضرورت تحقیق حاضر می‌باشد. در این میان یکی از مولفه‌های مهم در مبحث بهینه‌سازی مصرف انرژی در شهر فرم شهری می‌باشد که تأثیر آن بر مصرف انرژی در بخش ساختمان و حمل‌ونقل به‌طور گسترده‌ای در مطالعات انجام شده است. به طوری که درک جامع از رابطه فرم شهری و مصرف انرژی نقشی کلیدی در ایجاد سیاست‌های کاهش اثرات تغییر اقلیم در مقیاس‌های مختلف به‌ویژه مقیاس شهری و در دستیابی به پایداری شهری ایفا می‌نماید (شجاع و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۵). یکی از عوامل اصلی دستیابی به پایداری از طریق کاهش مصرف انرژی، درک چگونگی تأثیر مولفه‌های فرم شهر بر مصرف انرژی و اصلاح فرم شهر است (Zhang et al, 2024: 515).

کشور ایران با وجود ۳۰۰ روز آفتابی در بیش از دو سوم آن و متوسط تابش ۵.۵ - ۴.۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز یکی از کشورهای با پتانسیل بالا در زمینه‌ی انرژی خورشیدی است (احدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۷). در استان‌های شمالی و شمال‌غرب کشور، امکان احداث نیروگاه خورشیدی و بهره‌برداری مناسب و منطقی از انرژی خورشیدی وجود دارد؛ همان‌طور که بسیاری از کشورهای اروپایی مانند انگلیس، فرانسه، ایتالیا که آب و هوایی شبیه مناطق مذکور ایران دارند، سالهاست در حال استفاده‌ی بهینه از انرژی خورشیدی می‌باشند و بازدهی نیروگاه خورشیدی در مناطقی که دارای روزهای آفتابی قابل قبول در طول سال بوده و از سوی دیگر هوایی خنک دارند، نسبت به نقاط گرم و کوبری بیشتر است؛ زیرا هوای خنک باعث طول عمر بیشتر پنل‌های خورشیدی و سایر تجهیزات نیروگاهی می‌شود. بنابراین بهترین مکان برای بهره‌برداری نیروگاه خورشیدی می‌تواند نقاط مرتفع کوهستانی با آفتاب مناسب و هوای خنک باشد. در کنار موارد فوق، استفاده از انرژی خورشیدی در شهر تبریز، سبب کاهش تخریب مراتع و جنگل‌ها نیز می‌شود و در ماه‌های فصل زمستان درصد ساعات آفتابی بین ۳۵ تا ۵۵ درصد و در فصل تابستان این درصد به حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد می‌رسد که برای استفاده از انرژی‌های خورشیدی مناسب است.

مسئله اصلی تحقیق حاضر عبارت است از شناسایی و تبیین ابعاد، مولفه‌ها و شاخص‌های فرم شهر مانند شیب و جهت شیب، تراکم ساختمانی و جمعیتی، انواع دسترسی‌ها، فاصله از کاربری اراضی (حرایم)، حمل و نقل، تا خلأهای موجود در تحقیقات پیشین شناسایی شود تا به دو سؤال اصلی پژوهش که عبارت است از این‌که؛ مولفه‌های فرم شهری با تأکید بر بهره‌وری مؤثر از انرژی‌های

تجدیدپذیر در شهر تبریز کدامند؟ و این که میزان اثرگذاری مؤلفه‌های فرم شهری با تأکید بر بهره‌وری مؤثر از انرژی‌های تجدیدپذیر در شهر تبریز تا چه میزان است؟، پاسخ داده شود.

در ادامه به ذکر چند مورد از تحقیقات داخلی و خارجی پرداخته می‌شود:

عبادی و همکاران (۱۴۰۲) "تدوین سناریوی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کلان شهر اهواز" نتایج این مقاله نشان می‌دهد مجموع امتیاز سناریوهای سازگار یا به عبارتی تأثیر کل سناریوها ۱۲۶ است که نتایج اهمیت آن‌ها نشان می‌دهد سناریوهای توسعه مزارع انرژی خورشیدی جهت تأمین انرژی، توسعه انرژی خورشیدی در محدوده صنایع، توسعه پنل‌های خورشیدی در سطح ادارات و سازمانها، توسعه پنل‌های خورشیدی در سطح مناطق مسکونی بیشترین سازگاری و سناریوهای ادامه استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت تولید انرژی و توسعه و تأسیس نیروگاه‌های هسته‌ای در منطقه کمترین سازگاری را برای توسعه در سطح شهر اهواز دارند. (عبادی و همکاران، ۱۴۰۲: ۵۹).

شجاع و همکاران (۱۳۹۸) در مقاله "فرا تحلیل رابطه فرم شهر و انرژی: مروری بر رویکردها، روش‌ها، مقیاس‌ها و متغیرها" این مقاله در پی آن است با مرور مطالعات انجام شده در خصوص رابطه فرم شهری و انرژی (۱۱۹ مقاله)، به مقایسه و تحلیل متغیرها و روش‌ها در مقیاس‌ها و رویکردهای به کار گرفته شده بپردازد. تحلیل مقالاتی که بین سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۹ در این حوزه انتشار یافته‌اند، نشان داد مطالعات صورت گرفته عمدتاً در قالب ۷ دسته کلی به موضوع "رابطه فرم شهری و انرژی" پرداخته‌اند: ۱- فرم شهری (با تأکید بر بخش ساختمان و یا یکی از شاخص‌های مربوطه به ویژه تراکم) و انرژی ۲- فرم شهری (با تأکید بر کاربری زمین) و انرژی ۳- فرم شهری (با تأکید بر بخش حمل و نقل) و انرژی ۴- فرم شهری (ترکیبی از بخش ساختمان و حمل‌ونقل) و انرژی ۵- فرم شهری و رابطه آن با تغییر اقلیم، جزایر حرارتی، آسایش اقلیمی و پایداری ۶- فرم شهری و بارهای حرارتی ۷- فرم شهری و مدیریت انرژی، یا برنامه‌ریزی و سیاست‌های انرژی. در نهایت علیرغم متنوع بودن رویکردها، روش‌ها، مقیاس‌ها و متغیرهای استفاده شده، چالش‌ها و فرصت‌های مشترک و قابل استنتاج ارائه شده است. نتایج این مقاله حاکی از آن است که موضوع رابطه فرم شهری و انرژی امکان آن را دارد که فراتر از رویکردها، مقیاس‌ها و روش‌های تک‌رشته‌ای به دیدگاهی یکپارچه و پویا دست یابد (شجاع و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۵).

رفعیان و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله "بررسی امکان‌سنجی تاثیر فرم و تراکم بلوکهای مسکونی بر مصرف انرژی شهر، نمونه موردی: شهر جدید هشتگرد"، ابتدا بنیان‌های فکری و تحقیقات مختلف صورت گرفته در زمینه انرژی و شهر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته، سپس مؤلفه‌های مؤثر برنامه‌ریزی و طراحی شهری بر میزان مصرف انرژی در شهر به طور خلاصه بررسی شده و در نهایت با تمرکز بر بخش ساختمان، دستورالعمل‌هایی جهت کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی ارائه گردید. در مرحله بعد، برای ۳۵ هکتار از اراضی شهر جدید هشتگرد، سه سناریوی پیشنهادی ارائه شد و در انتها نیز با اندازه‌گیری شاخص‌های انرژی ساختمان توسط نرم افزارهای *Ecotect*، میزان مصرف انرژی ساختمان‌های سناریوهای مختلف ارزیابی شد. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که با اعمال تغییر در فرم، تراکم، جهت‌گیری و ارتفاع ساختمان‌های مسکونی، می‌توان تا حدود ۴۵ درصد از میزان مصرف انرژی ساختمان کاست (رفعیان و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۰۷).

الیسون و همکاران (۲۰۲۲) در مقاله "شاخص‌های جایگزین برای ارزیابی انرژی‌های تجدیدپذیر در اروپا: یک رویکرد اثربخش" با اشاره به بهره‌برداری از انرژی‌های خورشیدی بعنوان راهی برای جبران افزایش سرسام‌آور انرژی پس از تهاجم روسیه به اوکراین توجه نمودند. روند به کارگیری ۳۳۷۴۹۸ سیستم خورشیدی در سال ۲۰۲۳ در سراسر اروپا افزایش یافت. گرچه سیاست‌گذاری در این زمینه بر مبنای به کارگیری از این سلول‌ها در ابعاد بزرگ بود؛ اما تحولات قابل توجهی در ابعاد کوچک صورت گرفت. آنها براساس برنامه بسیار موفق طرح انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی در مقیاس کوچک و با تشویق مصرف کنندگان و مطالعه دقیق در این خصوص پنج پروژه بزرگ مقیاس را در کوئیزلند با ظرفیت ۸۰۰ مگا وات و همچنین بزرگترین مزرعه خورشیدی با ظرفیت ۴۰۰ مگاوات را مورد توجه خود قرار دادند (Elison et al, 2022: 48).

لی‌یو و همکاران (۲۰۲۲) در مجله ای سی اس نانو در پژوهشی تحت عنوان "سلول‌های خورشیدی کارآمد در شرایط بارانی" تحول جدیدی را در بحث سلول‌های خورشیدی منطبق بر شهرهای ساحلی و بارانی ارائه نمودند و به این نکته اشاره داشتند که یک سلول خورشیدی منطبق بر دریافت انرژی از قطرات باران در روزهای بارانی برای جمع‌آوری انرژی مکانیکی قطرات باران یا در

روزهای آفتابی برای برداشت انرژی خورشیدی کار کند که دارای بازده بالایی در شرایط بارانی نیز می‌باشد. در این سلول‌ها یک نانو ژنراتور تریبو الکتریک مبتنی بر الکتروود تری اکسید مول بیدن با راندمان بالای تبدیل انرژی قطرات باران ادغام شده با یک سلول خورشیدی پروسکایت از طریق الکترودهای مشترک پیشنهاد شده است. یک سلول خورشیدی مبتنی فناوری اشاره شده برای بهره‌وری انرژی بالا در قطرات باران از یک سو و بهره‌برداری از انرژی خورشیدی ساخته شده است. این فناوری یک استراتژی بسیار مؤثر بوده و سنگ بنای قدرتمندی برای ایجاد مکمل توزیع انرژی در آینده خواهد بود. این پژوهش می‌تواند پاسخ مناسبی برای تحقیقات بسیاری از اندیشمندان در عدم تحقق از انرژی‌های تجدیدپذیر در شهرهای بارانی باشد و خلاء دانشی که در این زمینه وجود دارد، پر نماید. امروزه این صفحات می‌تواند به راحتی به شکل تین فیلم‌ها در هر بخش از ساختمان نصب و مورد بهره‌برداری قرار گیرند. (Liu, et al., 2022:61)

لی و همکاران (۲۰۲۱) در مقاله‌ای تحت عنوان "بررسی کمی تأثیر فرم شهری بر کاربرد فتووالتائیک‌ها بر روی پشت‌بام در مقیاس وسیع با استفاده از روشی ساده شده"، ابتدا تأثیر شکل شهری را بر پتانسیل نصب فتووالتائیک سقف خورشیدی برای ۱۲ شهر در سراسر چین که مناطق مختلف آب و هوای خورشیدی را پوشش می‌دهد، بررسی نمودند. آنها دریافتند محیط‌های شهری متراکم توسعه یافته تأثیر مثبتی بر استفاده از انرژی خورشیدی دارد و استفاده در مقیاس بزرگ فتووالتائیک‌ها بر روی پشت‌بام‌ها یکی از راه‌حل‌های امیدوار کننده برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و توسعه شهر کم‌کربن است. همچنین رابطه سایه بین ساختمان‌ها بر میزان تابش دریافتی سقف ساختمان تأثیر به‌سزایی دارد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد تأثیر قابل توجه تراکم شهری بر پتانسیل نصب فتووالتائیک‌ها در شهرها در مکان‌هایی با عرض جغرافیایی بالا با تابش متوسط خورشید مشاهده می‌شود و با کاهش ارتفاع ساختمان می‌توان تأثیر منفی آن را کاهش داد (Li et al, 2021:63).

در پژوهش حاضر برخلاف سایر مطالعات، ارتباط بین مؤلفه‌های فرم شهری و مصرف انرژی منحصراً معطوف به حوزه حمل‌ونقل و ساختمان نمی‌باشد، بلکه شامل سایر حوزه‌ها و عملکردهای شهری نیز خواهد بود و همچنین توجه به فن آوری‌هایی که می‌تواند در فرم و ساختار شهر به کار گرفته شوند تا استفاده بهینه از انرژی‌های تجدیدپذیر، محقق شود، از موضوعات قابل توجهی می‌باشد.

مبانی نظری

انرژی خورشیدی

بهره‌گیری از انرژی از ابتدای تاریخ تمدن انسان مورد نظر بوده و دانشمندان از دیرباز در پی آن بوده‌اند که ابزار و ماشین‌هایی را اختراع کنند که انرژی پست‌تر را به انرژی بالاتر تبدیل کنند تا از آن بهره‌گیری بیشتری نمایند و در این رهگذر است که انگیزه‌ای قوی برای رشد صنعتی جوامع انسانی به‌وجود می‌آید (توکلی و همکاران، ۲۰۱۴، ۷۰). منابع انرژی به دو دسته‌ی منابع تجدیدناپذیر، مانند سوخت‌های فسیلی که بعد از مصرف، برای همیشه از دست می‌روند و منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، باد، زمین گرما، زیست‌توده و آب که می‌توانند در یک دوره‌ی زمانی کوتاه تجدید یا احیاء شوند، تقسیم می‌شوند (کرمی و سروستان، ۱۴۰۱: ۱۷۴). انرژی ستاره‌ی خورشید یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و از منابع عمده‌ی تأمین انرژی در منظومه‌ی شمسی است که در نتیجه‌ی گرما و نور تولید شده توسط خورشید تولید می‌شود (صحراگرد، آریانژاد، و کمانگر، ۱۳۹۵، ۸۵۶). میزان تابش انرژی خورشیدی در نقاط مختلف جهان متغیر بوده و کشور ایران در کمربند خورشیدی، بیشترین مقدار انرژی را دارا بوده و در نواحی پرتابش واقع است (Subbian, 2023, 100) و مطالعات نشان می‌دهد ایران در صورت تجهیز مساحت بیابانی خود به سامانه‌های دریافت انرژی تابشی می‌تواند انرژی مورد نیاز بخش‌های گسترده‌ای از منطقه را نیز تأمین و در زمینه‌ی صدور انرژی برق فعال شود (کاظمیان و همکاران، ۱۳۹۶، ۱۰۵).

فرم شهری

فرم کلی شهر به طرح فیزیکی و طراحی یک شهر اشاره دارد و شامل تراکم، طرح خیابان، بلوک‌های شهری، قطعات و بناها، حمل و نقل، اشتغال و طراحی شهر است. محصولی از عوامل متعدد مانند عوامل اقتصادی، منطقه‌ای و ترکیبی از عوامل سیاستی و قوانین و بازتاب‌دهنده ساختار اجتماعی و اقتصادی مسلط بر جامعه شهری است (Safirova & Gillingham, 2007). فرم

شهری اشاره به چیدمان فضایی کاربری‌های شهری در یک منطقه شهری دارد که تأثیرات عمیقی بر مصرف انرژی شهری دارد (Chen & Li, 2011).

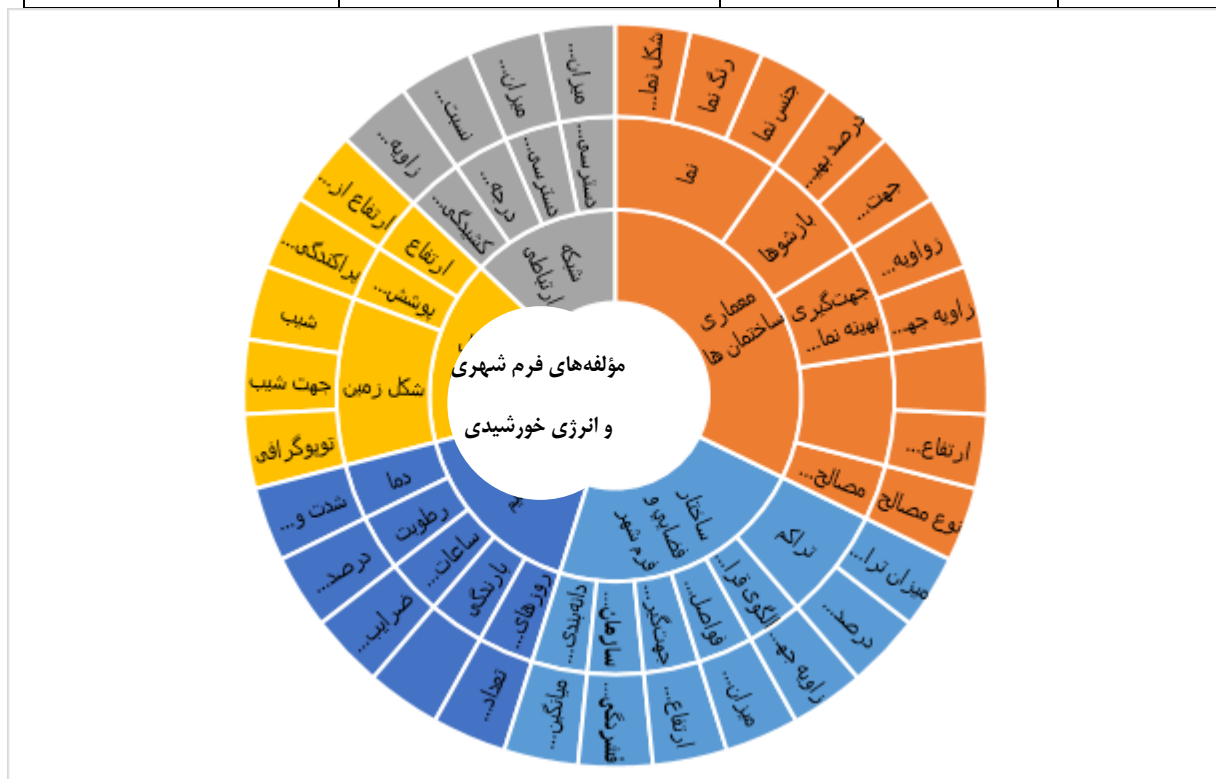
مؤلفه‌های فرم شهری و مصرف انرژی

در بحث مرتبط با مؤلفه فرم شهری می‌توان به مواردی از قبیل تراکم، تنوع و قابلیت دسترسی، طراحی محله، اختلاط کاربری و غیره را مورد توجه قرار داد. در جدول (۱) و شکل (۱) خلاصه مطالعات انجام شده در رابطه با انواع مؤلفه‌های فرم شهری و انرژی تجدیدپذیر، مشاهده می‌شود.

جدول ۱. شناسایی مؤلفه‌های فرم شهری و انرژی‌های تجدیدپذیر با تأکید بر انرژی خورشیدی

بُعد	معیار	شاخص	منابع	
ساختار فضایی و فرم شهر	دانه‌بندی قطعات	میانگین مساحت قطعات	Ahmadian et al, 2021; Shah Porun Rena, 2024; گرچی و همکاران، ۱۳۹۶	
	سازمان توده و فضا	میزان فاصله بلوک‌ها		
	جهت‌گیری بلوک‌های ساختمانی	فشرده‌گی و سطح اشغال		
	الگوی قرار گیری بلوک‌های ساختمانی	ارتفاع ساختمان		
	تراکم	زاویه جهت تابش		
معماری ساختمان‌ها	تعداد طبقات	ارتفاع ساختمان	Colak et al, 2020; مؤمن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹ احدی، پدram و همکاران، ۱۴۰۰	
		میزان سایه‌اندازی ساختمان‌ها		
	جهت‌گیری بهینه نمای ساختمان‌ها	زاویه جهت تابش		
		زاویه جهت دیوار		
	مصالح ساختمانی	نوع مصالح		
	نما	جنس نما		
		رنگ نما		
	بازشوها	شکل نما (مقعر، محدب، مسطح)		جهت بازشوها
				درصد بهینه بازشوها به نمای ساختمان
شبکه ارتباطی	دسترسی به شبکه ارتباطی	میزان دسترسی به راه	Khajavi Pour et al, 2021; نادی‌زاده شورابه و همکاران، ۱۳۹۸ توکلی و همکاران، ۱۴۰۲	
	دسترسی به زمین‌های بایر و فضاهای باز	میزان دسترسی به زمین‌های بایر و فضاهای باز		
	درجه محصوریت	نسبت عرض راه به ارتفاع جداره		
	کشیدگی خیابان‌ها و معابر	زاویه استقرار نمای اصلی ساختمان‌ها		
عوامل طبیعی	شکل زمین	اندازه شیب		

بُعد	معیار	شاخص	منابع
	ارتفاع	جهت شیب	Hassaan et al,2021; Tang,2021; کرمی و سروستان، ۱۴۰۱
		توپوگرافی	
	پوشش گیاهی	ارتفاع از سطح دریا	
		پراکندگی فضاهای سبز و پوشش گیاهی	
اقلیم	دما	شدت و جهت تابش	Sahin et al,2024; Toth et al,2022; کاظمیان و همکاران، ۱۳۹۶
	رطوبت	درصد رطوبت	
	ساعات آفتابی	ضرایب ساعات آفتابی	
	بارندگی	میزان بارش	
	روزهای ابری	تعداد روزهای ابری	



شکل ۱. مؤلفه‌های فرم شهری با تأکید بر بهره‌وری از انرژی خورشیدی

روش پژوهش

نوع تحقیق حاضر کاربردی و روش تحقیق توصیفی-تحلیلی می‌باشد و از مطالعات اسنادی، مشاهدات میدانی و پرسش‌نامه برای گردآوری اطلاعات استفاده شده‌است. با توجه به تخصصی بودن موضوع، تعداد ۳۰ نفر از خبرگان به‌عنوان جامعه آماری و از این تعداد ۲۸ نفر با استفاده از فرمول کوکران به‌عنوان نمونه آماری، جهت تکمیل پرسش‌نامه‌ها انتخاب شد. روش‌شناسی پژوهش حاضر بر مبنای الگوی شش‌لایه ساندرز معروف به پیاز ساندرز^۱ می‌باشد که در جدول (۲) مشاهده می‌شود.

^۱ Onion 's Saunders'

جدول ۲. روش شناسی تحقیق بر اساس الگوی پیاز ساندروز

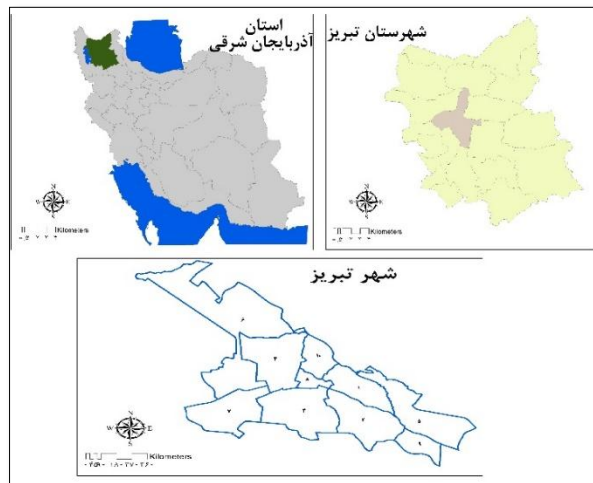
روشن گردآوری اطلاعات	بازه زمانی	انتخاب پژوهش	استراتژی‌های پژوهش	رویکرد پژوهش	فلسفه پژوهش
پرسشنامه، مصاحبه، مشاهده، مطالعات کتابخانه‌ای	مقطعی و طولی	ترکیبی (کمی و کیفی) پارادایم اثبات‌گرایی پارادایم تفسیرگرایی	کاربردی توصیفی (پیمایشی، همبستگی و نمونه مورد بررسی)	قیاسی	اثبات‌گرایی

در تحقیق حاضر از روش تحلیل محتوا و و ابزار مطالعات کتابخانه‌ای و روش مصاحبه برای استخراج مؤلفه‌های فرم شهری در بهره‌وری مؤثر از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده گردید که نتایج در جدول (۱) ارائه گردید.

جهت اولویت‌بندی میزان اثرگذاری مؤلفه‌های فرم شهری با تأکید بر بهره‌وری مؤثر از انرژی خورشیدی نیز از روش مارکوس (MARCOS¹) (سنجش و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس راه‌حل سازشی) استفاده شده است. این روش شامل ۶ گام می‌شود؛ گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم؛ گام دوم: تعیین ایده‌آل و ضد ایده‌آل؛ گام سوم: نرمال‌سازی؛ گام چهارم: وزن دهی؛ گام پنجم: درجه‌ی مطلوبیت گزینه‌ها؛ گام ششم: تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها. تصمیم‌گیری چند معیاره به معنی سنجش و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس راه حل سازشی می‌باشد که در سال ۲۰۲۰ ارائه شد و این روش برای رتبه‌بندی گزینه‌های پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد (تاجمیری رستمی و فرهادی، ۱۴۰۰، ۱۸۰).

محدوده مورد مطالعه

شهر تبریز به‌عنوان بزرگ‌ترین کلان‌شهر در شمال غرب ایران واقع شده است که در شکل (۲) موقعیت نمونه موردی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. موقعیت محدوده مورد مطالعه

بحث و یافته‌ها

با توجه به شناسایی ابعاد، مؤلفه‌ها و معیارهای فرم شهری در خصوص استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با تأکید بر انرژی خورشیدی، در این بخش میزان اثرگذاری هر کدام از ابعاد، مؤلفه‌ها و معیارهای فرم شهری در ارتباط با موضوع تحقیق بررسی می‌شود. با توجه به طولانی بودن محاسبات روش مارکوس دوگام آخر در جداول (۳) تا (۸) بعنوان نتایج بحث ارائه می‌شود.

گام پنجم: درجه مطلوبیت گزینه‌ها

² Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution

جدول ۳. درجه مطلوبیت ابعاد فرم شهری با تأکید بر انرژی خورشیدی

ابعاد	S_i	Sa_i	Saa_i	K_i^+	K_i^-
ساختار فضایی و فرم شهر	۱/۰۲۶	۱/۲۹۰	۰/۴۳۴	۰/۷۹۵۹	۲/۳۶۳۶
معماری ساختمان‌ها	۱/۱۷۱	-	-	۰/۹۰۸۲	۲/۶۹۷۰
شبکه ارتباطی	۰/۷۶۳	-	-	۰/۵۹۱۸	۱/۷۵۷۶
عوامل طبیعی	۰/۴۳۴	-	-	۰/۳۳۶۷	۱
اقلیم	۱/۲۹۰	-	-	۱	۲/۹۶۹۷

جدول ۴. درجه مطلوبیت معیارهای فرم شهری با تأکید بر انرژی خورشیدی

معیار	S_i	Sa_i	Saa_i	K_i^+	K_i^-
دانه بندی قطعات	۲/۱۰۰	۱۰	۱	۰/۲۱	۲/۱
سازمان توده و فضا	۲/۷۰۰	-	-	۰/۲۷	۲/۷
جهت گیری بلوک‌های ساختمانی	۳/۴۰۰	-	-	۰/۳۴	۳/۴
الگوی قرار گیری بلوک‌های ساختمان‌ها	۳/۵۰۰	-	-	۰/۳۵	۳/۵
تراکم	۴/۱۰۰	-	-	۰/۴۱	۴/۱
تعداد طبقات	۵/۲۰۰	-	-	۰/۵۲	۵/۲
جهت گیری بهینه نمای ساختمان‌ها	۲/۱۰۰	-	-	۰/۲۱	۲/۱
مصالح ساختمانی	۱	-	-	۰/۱	۱
نما	۱	-	-	۰/۱	۱
بازشوها	۱	-	-	۰/۱	۱
دسترسی به شبکه ارتباطی	۱	-	-	۰/۱	۱
دسترسی به زمین‌های بایر و فضاهای باز	۶/۳۰۰	-	-	۰/۶۳	۶/۳
درجه محصوریت	۳/۸۰۰	-	-	۰/۳۸	۳/۸
کشیدگی خیابان‌ها و معابر	۳/۷۰۰	-	-	۰/۳۷	۳/۷
جهت گیری بهینه خیابان‌ها	۳	-	-	۰/۳	۳
شکل زمین	۲/۲۰۰	-	-	۰/۳۲	۳/۲
ارتفاع	۶/۱۰۰	-	-	۶۱	۶/۱

پوشش گیاهی	۴/۵۰۰	-	-	۰/۴۵	۴/۵
دما	۳/۳۰۰	-	-	۰/۳۳	۳/۳
رطوبت	۱	-	-	۰/۱	۱
ساعات آفتابی	۱	-	-	۰/۱	۱
بارندگی	۱	-	-	۰/۱	۱
روزهای ابری	۱	-	-	۰/۱	۱

جدول ۵. درجه مطلوبیت شاخص‌های فرم شهری با تأکید بر انرژی خورشیدی

شاخص	S_i	Sa_i	Saa_i	K_i^+	K_i^-
میانگین مساحت قطعات	۱/۵۲	۴/۲۹۹	۰/۴۳۴	۰/۳۵۳۵	۳/۵
فشرده‌گی و سطح اشغال	۲/۲۱۵	-	-	۰/۵۱۵۲	۵/۱
ارتفاع ساختمان	۲/۳۰۱	-	-	۰/۵۲۵۴	۵/۳
میزان فاصله بلوک‌ها	۱/۸۶۷	-	-	۰/۴۳۴۳	۴/۳
زاویه جهت تابش	۴/۱۶۹	-	-	۰/۹۶۹۷	۹/۶
درصد تراکم ساختمانی	۲/۹۰۹	-	-	۰/۶۷۶۸	۶/۷
میزان تراکم جمعیتی	۳/۲۸۷	-	-	۰/۷۸۷۹	۷/۸
ارتفاع ساختمان	۳/۳	-	-	۰/۷۶۷۷	۷/۶
میزان سایه‌اندازی ساختمان‌ها	۳/۲۸۷	-	-	۰/۷۸۷۹	۷/۸
زاویه جهت دیوار	۲/۲۱۵	-	-	۰/۵۱۵۲	۵/۱
نوع مصالح	۲/۰۸۴	-	-	۰/۴۸۴۸	۴/۸
جنس نما	۱/۵۶۳	-	-	۰/۳۶۳۶	۳/۶
رنگ نما	۱/۲۱۶	-	-	۰/۲۸۲۸	۲/۸
شکل نما (مقعر، محدب، مسطح)	۱/۶۰۷	-	-	۰/۳۷۳۷	۳/۷
جهت بازشوها	۲/۳۴۵	-	-	۰/۵۴۵۵	۵/۴
درصد بهینه بازشوها به نمای ساختمانی	۲/۰۸۴	-	-	۰/۴۸۴۸	۴۸۰۰۰
میزان دسترسی به راه	۰/۶۵۱	-	-	۰/۱۵۱۵	۱/۵
میزان دسترسی به زمین‌های بایر و فضاهای باز	۱/۵۲	-	-	۰/۳۵۳۵	۳/۵
نسبت عرض راه به ارتفاع جداره	۱/۰۸۶	-	-	۰/۲۵۲۵	۲/۵

زاویه استقرار نمای اصلی ساختمان‌ها	۱/۷۸	-	-	-/۴۱۴۱	۴/۱
اندازه شیب	۱/۸۶۷	-	-	-/۴۳۴۳	۴/۳
جهت شیب	۱/۶۵	-	-	-/۳۸۳۸	۳/۸
توپوگرافی	۲/۷۷۹	-	-	-/۶۴۶۵	۶/۴
ارتفاع از سطح دریا	۲/۳۸۸	-	-	-/۵۵۵۶	۵/۵
پراکندگی فضاهای سبز و پوشش گیاهی	۱/۴۳۳	-	-	-/۳۳۳۳	۳/۳
شدت و جهت تابش	۴/۲۹۸۹	-	-	۱	۹/۹
درصد رطوبت	-/۹۵۵۳	-	-	-/۲۲۲۲	۲/۲
ضرایب ساعات آفتابی	۴/۱۶۸۷	-	-	-/۹۶۹۷	۹/۶
میزان بارش	۱/۰۸۵	-	-	-/۲۵۲۵	۲/۵
تعداد روزهای ابری	۱/۹۹۷۵	-	-	-/۴۶۴۶	۴/۶
فاصله از پمپ بنزین و شبکه نفت و گاز و...	۱/۲۱۵۹	-	-	-/۲۸۲۸	۲/۸
فاصله از کارخانه‌ها و معادن و مزارع	۱/۶۵۰۱	-	-	-/۳۸۳۸	۳/۸
فاصله از زیرساخت آب و فاضلاب، برق و...	۱/۰۸۵۶	-	-	-/۲۵۲۵	۲/۵
فاصله از گسل و نقاط زمین لغزش	۲/۲۱۴۶	-	-	-/۵۱۵۲	۵/۱
فاصله از رودخانه، مسیل و...	۱/۳۴۶۱	-	-	-/۳۱۳۱	۱/۳

گام ششم: تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها

جدول ۶. تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی ابعاد فرم شهری با تأکید بر انرژی خورشیدی

رتبه‌ها	$f(k_i)$	$f(k_i^-)$	$f(k_i^+)$	ابعاد
۳	-/۷۳۳۷	-/۲۵۱۹	-/۷۴۸۱	ساختار فضایی و فرم شهر
۲	-/۸۳۷۲	-/۲۵۱۹	-/۷۴۸۱	معماری ساختمان‌ها
۴	-/۵۴۵۶	-/۲۵۱۹	-/۷۴۸۱	شبکه ارتباطی
۶	-/۳۱۰۴	-/۲۵۱۹	-/۷۴۸۱	عوامل طبیعی
۱	-/۹۲۱۸	-/۲۵۱۹	-/۷۴۸۱	اقلیم

جدول ۷. تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی معیارهای فرم شهری با تأکید بر انرژی خورشیدی

رتبه‌ها	$f(k_i)$	$f(k_i^-)$	$f(k_i^+)$	معیار
۱۸	-/۲۰۸۱	-/۰۹۰۹	-/۰۹۰۹	دانه‌بندی قطعات
۱۶	-/۲۶۷۶	-/۰۹۰۹	-/۰۹۰۹	سازمان توده و فضا

جهت‌گیری بلوک‌های ساختمانی	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۳۳۶۹	۱۱
الگوی قرار گیری بلوک‌های ساختمان‌ها	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۳۴۶۸	۹
تراکم	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۴۰۶۳	۶
تعداد طبقات	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۵۱۵۳	۴
جهت‌گیری بهینه‌نمای ساختمان‌ها	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۲۰۸۱	۱۸
مصلح ساختمانی	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
نما	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
بازشوها	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
دسترسی به شبکه ارتباطی	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
دسترسی به زمین‌های بایر و فضاهای باز	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۶۲۴۳	۲
درجه محصوریت	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۳۷۶۶	۷
کشیدگی خیابان‌ها و معابر	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۳۶۶۷	۸
جهت‌گیری بهینه‌نمای خیابان‌ها	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۲۹۷۳	۱۴
شکل زمین	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۳۱۷۱	۱۳
ارتفاع	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۶۰۴۵	۳
پوشش گیاهی	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۴۴۵۹	۵
امواج دریایی	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
دما	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۳۲۷۰	۱۲
رطوبت	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
ساعات آفتابی	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
بارندگی	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
روزهای ابری	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۰۹۹۱	۲۰
حرایم تأسیسات خطرزا، صنایع و زیرساخت‌ها	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۲۷۷۵	۱۵
حریم زلزله	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۴۳۶۸	۹
حریم محدوده‌های آبی، مزارع و باغات	۰/۹۰۹۱	۰/۰۹۰۹	۰/۲۱۸۰	۱۷

جدول ۸. تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی شاخص‌های فرم شهری با تأکید بر انرژی خورشیدی

معیار	$f(k_i^+)$	$f(k_i^-)$	$f(k_i)$	رتبه‌ها
میانگین مساحت قطعات	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۳۵۰۵	۲۵

فشرده‌گی و سطح اشغال	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۵۱۰۴	۱۲
ارتفاع ساختمان	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۵۳۰۴	۱۱
میزان فاصله بلوک‌ها	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۴۳۰۴	۱۸
زاویه جهت تابش	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۹۶۰۸	۲
درصد تراکم ساختمانی	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۶۷۰۶	۷
میزان تراکم جمعیتی	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۷۸۰۶	۴
ارتفاع ساختمان	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۷۶۰۶	۶
میزان سایه اندازی ساختمان‌ها	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۷۸۰۶	۴
زوایه جهت دیوار	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۵۱۰۴	۱۲
نوع مصالح	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۴۸۰۴	۱۵
جنس نما	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۳۶۰۳	۲۴
رنگ نما	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۲۸۰۲	۲۹
شکل نما (مقعر، محدب، مسطح)	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۳۷۰۳	۲۳
جهت بازشوها	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۵۴۰۴	۱۰
درصد بهینه بازشوها به نمای ساختمان	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۴۸۰۴	۱۵
میزان دسترسی به راه	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۱۵۰۱	۳۵
میزان دسترسی به زمین‌های بایر و فضاهای باز	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۳۵۰۳	۲۵
نسبت عرض راه به ارتفاع جداره	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۳۵۰۲	۳۱
زاویه استقرار نمای اصلی ساختمان‌ها	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۴۱۰۳	۲۰
اندازه شیب	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۴۳۰۴	۱۸
جهت شیب	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۳۸۰۳	۲۱
توپوگرافی	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۶۴۰۵	۸
ارتفاع از سطح دریا	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۵۵۰۵	۹
پراکندگی فضاهای سبز و پوشش گیاهی	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۳۳۰۳	۲۷
شدت و جهت تابش	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۹۹۰۸	۱
درصد رطوبت	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۲۲۰۲	۳۴
ضرایب ساعات آفتابی	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۹۶۰۸	۲
میزان بارش	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۲۵۰۲	۳۱
تعداد روزهای ابری	۰/۹۰۸۳	۰/۰۹۱۷	۰/۴۶۰۴	۱۷

همانطور که مشاهده گردید در بخش ابعاد به ترتیب اقلیم با امتیاز ۰.۹۲۲، معماری ساختمان‌ها با ۰.۸۳۷ و ساختار فضایی و فرم شهر با ۰.۷۳۴، در ارتباط با معیارها، نتایج نشان می‌دهد به ترتیب ساعات آفتابی با امتیاز ۰.۹۹۱، دما با ۰.۹۸۱، جهت گیری بلوک‌های ساختمانی و جهت گیری بهینه نمای ساختمان‌ها با ۰.۸۴۱، در ارتباط شاخص‌ها، نتایج نشان می‌دهد به ترتیب شدت و جهت تابش با امتیاز ۰.۹۹۱، ضرایب ساعات آفتابی با ۰.۹۶۱ بیشترین اثر را در بهره‌وری مؤثر از انرژی خورشیدی را در شهر تبریز دارند.

نتیجه‌گیری

شهرها حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد کل انرژی مصرفی جهان را به خود اختصاص داده است و فرم شهری نیز از عوامل تأثیرگذار بر بهره‌وری مؤثر از انرژی بخصوص انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. توسعه انرژی نو یکی از شاخص‌های مهم در توسعه اقتصادی بوده و به لحاظ بُعد اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، زیست‌محیطی و سازمانی نقاط قوت و دلایل مهمی برای استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد. در سال‌های اخیر بحران جهانی انرژی، محدودیت سوخت‌های فسیلی افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمای روزافزون کره زمین موجب شده که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی نه تنها در نیروگاه‌های بزرگ برای مصارف عمومی بلکه در خانه‌ها برای استفاده شخصی رواج یابد. در این مقاله مؤلفه‌های فرم شهری شامل: بُعد، معیار و شاخص در ارتباط با نقش و تأثیر آن‌ها در بهره‌وری مؤثر از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی با استفاده از روش مارکوس ارزیابی شد که نتایج تحقیق در بخش انرژی خورشیدی نشان می‌دهد در بخش ابعاد به ترتیب اقلیم با امتیاز ۰.۹۲۲، معماری ساختمان‌ها با ۰.۸۳۷ و ساختار فضایی و فرم شهر با ۰.۷۳۴، در بخش معیارها به ترتیب ساعات آفتابی با امتیاز ۰.۹۹۱، دما با ۰.۹۸۱، جهت گیری بلوک‌های ساختمانی و جهت گیری بهینه نمای ساختمان‌ها با ۰.۸۴۱، در بخش شاخص‌ها به ترتیب شدت و جهت تابش با امتیاز ۰.۹۹۱، ضرایب ساعات آفتابی با ۰.۹۶۱ بیشترین اثر را در بهره‌وری مؤثر در شهر تبریز دارند.

منابع

۱. احدی، پدram، فخرآبادی، فرید، پورشقای، علیرضا، کوثری، فرشاد. (۱۴۰۰). مکان یابی بهینه نیروگاه خورشیدی در ایران با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، ۴(۲)، ۱۲-۲۴. <https://sanad.iau.ir/Journal/jvibme/Article/934395>
۲. توکلی، هانیه، خادم‌الحسینی، احمد، گندمکار، امیر، اذانی، مهری. (۱۴۰۲). امکان سنجی احداث یک نیروگاه متصل به شبکه فتوولتائیک بارویکرد پایداری محیط زیست شهری (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ تهران)، علوم جغرافیایی (جغرافیای کاربردی)، ۵(۱۹)، <https://sanad.iau.ir/fa/Article/1120169>
۳. رفیعیان، مجتبی، فتح جلالی، آرمان و داداش پور، هاشم. (۱۳۹۰). بررسی امکان سنجی تأثیر فرم و تراکم بلوکهای مسکونی بر مصرف انرژی شهر، نمونه موردی: شهر جدید هشتگرد. معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۴(۶)، ۱۰۷-۱۱۶. https://www.armanshahrjournal.com/article_32676.html
۴. زنگنه، مهدی، حاجی شمسانی، مجتبی، زنگنه، یعقوب. (۱۴۰۳). قابلیت سنجی استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی در شهرهای مناطق خشک (مطالعه موردی: شهر سبزوار، مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۸(۳)، ۱۴۱-۱۵۶. <https://doi.org/10.22034/JGET.2023.341989.14220>
۵. شجاع، سعیده، پورجعفر، محمد رضا و طیبیان، منوچهر. (۱۳۹۸). فراتحلیل رابطه فرم شهر و انرژی: مروری بر رویکردها، روش‌ها، مقیاس‌ها و متغیرها. دانش شهرسازی، ۳(۱)، ۸۵-۱۰۱. <https://doi.org/10.22124/UPK.2019.13602.1220>
۶. صحراگرد، نصرالله، آریا نژاد، حیدر. (۱۳۹۵). کمانگر محمد. مکان یابی نیروگاه خورشیدی حرارتی جهت تامین انرژی پایدار با استفاده از منطق فازی. نشریه انرژی ایران. ۱۹(۱)، ۸۴۹. [URL: http://necjournals.ir/article-1-849-fa.html](http://necjournals.ir/article-1-849-fa.html)
۷. عبادی حسین، صفایی پور مسعود، محمدی ده چشمه مصطفی، سجادیان ناهید. (۱۴۰۲). تدوین سناریوی توسعه انرژی های تجدیدپذیر در کلانشهر اهواز. فصلنامه چشم‌انداز شهرهای آینده، ۴(۵۹-۷۹). <https://doi.org/10.61186/jvfc.4.4.6>

۸. کاظمیان، غلامرضا، رسولی، افشین و خزایی، محمد مهدی. (۱۳۹۶). جایگاه انرژی‌های نو و تجدیدپذیر در زیست پذیرانه کردن شهرها، مطالعه موردی شهر تهران. فصلنامه علمی و پژوهشی پژوهش و برنامه ریزی شهری، ۸(۲۹)، ۹۹-۱۱۸. <https://doi.org/20.1001.1.22285229.1396.8.29.6.0>
۹. کرمی، مختار، سروستان، رسول. (۱۴۰۱). مکانیابی صفحه‌های خورشیدی با استفاده از فراسنج های اقلیمی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: استان خوزستان)، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۴(۲) (پیاپی ۱۱۷): ۱۶۹-۱۸۰. <https://doi.org/10.30495/JEST.2022.27496.3652>
۱۰. گرجی، مصطفی، خشنودمطلق، سجاده، عمرانی، حسین، و هاشمی، مرتضی. (۱۳۹۶). مکانیابی مناطق مستعد نیروگاه خورشیدی تحت تاثیر پارامترهای اقلیمی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: استان فارس)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)، ۸(۱) (پیاپی ۲۶): ۸۴-۶۶. <http://dori.net/dor/20.1001.1.26767082.1396.8.1.5.8>
۱۱. محمدی ده چشمه، مصطفی، صفایی پور، مسعود، سجادیان، ناهید و عبادی، حسین. (۱۴۰۳). امکان سنجی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر شهری اهواز با رویکرد دفاع غیرعامل، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۵(۱)، ۱۹-۴۴. <https://doi.org/10.22108/GEP.2023.137813.1587>
۱۲. منجزی، نرگس، افروس، علی، داودبهاروندی، مریم، مرادی مطلق، احسان. (۱۴۰۲). مکان یابی نیروگاه خورشیدی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک‌های GIS (مطالعه موردی: شهرستان اندیمشک)، فصلنامه پژوهش های سیاست گذاری و برنامه ریزی انرژی، ۹(۱)، ۲۳-۶۳. <http://epprjournal.ir/article-1-1116-fa.html>
۱۳. مؤمن زاده، زهره، کلاتری، سعیده، تازه، مهدی، تقی زاده مهرجردی، روح ... (۱۳۹۹). پهنه بندی و مکانیابی نیروگاه های خورشیدی با استفاده از AHP و GIS در استان یزد، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۱۲) (پیاپی ۱۰۳)، <https://doi.org/10.22034/jest.2020.37606.4373>
۱۴. نادى زاده شورابه، سامان، نیسانی سامانی، نجمه، ابدالی، یعقوب. (۱۳۹۸). تهیه نقشه پتانسیل نیروگاه های خورشیدی مبتنی بر مفهوم ریسک مطالعه موردی: استان خراسان رضوی. اطلاعات جغرافیایی، ۲۸(۱۱۱)، ۱۲۹-۱۴۷. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.37512>
15. Ahmadian, Ehsan, Behzad Sodagar, Chris Bingham, Amira Elnokaly and Glen Mills. (2021). Effect of urban built form and density on building energy performance in temperate climates, *Energy and Buildings*, Volume 236: 110762, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110762>.
16. Colak, H. Ebru, Memisoglu, Tugba, Gercek, Yasin. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey, *Renewable Energy*, Volume 149, Pages 565-576, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078>.
17. Elisa Fusco, Bernardo Maggi, Livia Rizzuto. (2022). Alternative indicators for the evaluation of renewables in Europe: An efficiency approach, *Renewable Energy*, Volume 190, 48-65. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.007>.
18. Hassaan, M. A., Hassan, A., & Al-Dashti, H. (2021). GIS-based suitability analysis for siting solar power plants in Kuwait, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 51-70. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.11.004>.
19. 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>
20. 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>
21. Li, Y., Jing, K., Liu, F., & Zhao, F. (2021). A Quantitative Study of the Influence of Urban Form on Large-Scale Application of Rooftop Photovoltaics Using

- Simplified Method, *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 10(2), 63-75, DOI: [10.11648/j.ijrse.20211002.14](https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20211002.14).
22. Liu, Z. (2021). A comprehensive study of feasibility and applicability of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in regions with high solar irradiance. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127240>
 23. Sahin, G., Akkus, I., Koc, A., & van Sark, W. (2024). Multi-criteria solar power plant siting problem solution using a GIS-Taguchi loss function based interval type-2 fuzzy approach: The case of Kars Province/Turkey, *Heliyon*, 10 (10),215-240 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30993>.
 24. Shah Porun Rena, M.M., & Moniruzzaman, Md. (2024). Demarcation of suitable site for solar photovoltaic power plant installation in Bangladesh using geospatial techniques, *Next Energy*, 3, <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100109>.
 25. Subbian, L. (2023). GIS-Based suitability analysis for siting solar power plants in Salem district, Tamil Nadu, INDIA, *International Journal of Advance and Applied Research*, 2(22), 95-120, 95-110, <https://doi.org/10.5281/zenodo.2023.7057099>.
 26. Tang, Shui-Yan. (2021). Rethinking local and regional governance in China: An institutional design and development perspective. *Urban Governance*, 1(1), 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2021.11.002>.
 27. Toth, Aniko, Lund, John , Hutterer, Gerry & Fenerty, David (2022). Current world situation for geothermal energy production, based on WGC2020+ 1 reports from 88 countries. Conference: European Geothermal Congress At: Berlin, Germany, 28(236,745), 0.259 .
 28. Wei, L. J., M.M. Islam, M. H., & Erdem C. (2024). Energy consumption, power generation and performance analysis of solar photovoltaic module based building roof, *Journal of Building Engineering*, 90, 340-361, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109361>.
 29. Zhang, N., Yu, Y., Wu, J., Du, E., Zhang, Sh., & Xiao, J. (2024). Optimal configuration of concentrating solar power generation in power system with high share of renewable energy resources, *Renewable Energy*, 220, 503-535, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119535>.