



Investigating the Smart Pattern of Urban Energy Consumption Reduction with a Sustainable Development Approach: A case study of Najafabad City

Faramarz Eidivandi ¹ , Ebrahim Taghavi ²

1. Department of Geography and Urban Planning, Mara.C., Islamic Azad University, Marand, Iran

Email: faramarz.eidivandi@iau.ir

2. (Corresponding Author) Department of Geography and Urban Planning, Mara.C., Islamic Azad University, Marand, Iran

Email: 1532654227@iau.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received:

13 March 2026

Received in revised form:

4 June 2026

Accepted:

29 June 2026

Available online:

2 August 2026

Keywords:

Smartification,
Urban Energy
Consumption Reduction,
Sustainable Development,
Najafabad City.

ABSTRACT

In recent decades, unbridled urbanization and escalating energy demand have posed critical environmental and economic challenges globally. Cities, as primary energy consumption hubs, account for over 70% of greenhouse gas emissions. The concept of sustainable development, emphasizing a balance between present needs and resource preservation for future generations, necessitates a transition from traditional consumption patterns toward the smart city paradigm. Najafabad, a significant developing city in Isfahan Province, faces serious energy resource management challenges due to its specific climatic conditions, industrial status, and population growth. This study aims to investigate the smart pattern of urban energy consumption reduction in Najafabad with a sustainable development approach. Employing the Analytic Hierarchy Process (AHP) to prioritize energy optimization indicators and the SWOT analysis to evaluate strengths, weaknesses, opportunities, and threats, the findings revealed that the "Infrastructural and Physical" criterion (weight: 0.632) and the "Environmental and Sustainability" criterion (weight: 0.502) were identified as the most significant factors. The SWOT analysis yielded a total internal factors score of -0.199 and a total external factors score of +0.181. Consequently, energy consumption optimization in Najafabad is feasible only through an integrated smart city and sustainable development approach, adopting a defensive (W-O) strategy that emphasizes overcoming weaknesses by leveraging opportunities, including the modernization of deteriorated infrastructure, synchronization with renewable energy technologies, and enhancement of public awareness to reform consumption patterns.

Citation: Eidivandi, F., & Taghavi, E. (2026). Investigating the Smart Pattern of Urban Energy Consumption Reduction with a Sustainable Development Approach: A case study of Najafabad City. *Journal of Geography and Spatial Development*, 3 (2), 37-52.

<http://doi.org/10.22098/gsd.2026.20367.1146>



© The Author (s)

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

Extended Abstract

Introduction

In recent decades, unbridled urbanization and escalating energy demand have emerged as one of the most critical environmental and economic challenges worldwide. Cities, as primary hubs of energy consumption, account for over 70 percent of global greenhouse gas emissions. Within this context, the concept of "sustainable development" serves as a fundamental strategy, emphasizing a balance between present needs and the preservation of resources for future generations—a balance that necessitates a transition from traditional consumption patterns toward the "smart city" paradigm. Najafabad, as one of the significant and developing cities of Isfahan Province, faces serious challenges in energy resource management due to its specific climatic conditions, industrial status, and population growth. Preliminary investigations indicate that the absence of smart patterns in urban infrastructure, heating and cooling systems, and distribution network management has resulted in considerable energy waste within the city. Despite existing potentials, no coherent, scientific, and technology-driven model has yet been formulated for optimal energy management in Najafabad. Accordingly, the central research question of the present paper is: How can an indigenous and practical pattern for energy consumption reduction in Najafabad be designed through the integration of smart technologies and sustainable development indicators? The absence of such a model at the urban management level perpetuates inefficient practices and renders the city more vulnerable to energy price fluctuations and environmental crises. Consequently, this study seeks to provide a pattern that, through precise recognition of the current situation and analysis of strengths and weaknesses, not only reduces energy costs but also enhances citizens' quality of life and safeguards sustainable resources for future generations in Najafabad.

Methodology

This research is applied in terms of purpose and descriptive-analytical in nature,

conducted through a multi-criteria decision-making approach and strategic planning. The research process comprised four main stages: (1) identification of indicators affecting urban energy consumption reduction; (2) prioritization of indicators using the Analytic Hierarchy Process (AHP); (3) analysis of the internal and external environment utilizing the SWOT model; and (4) formulation of smart city development strategies. Data were collected from two sources: library-based and field-based. In the library-based section, scientific articles, urban development documents, Najafabad Municipality reports, and studies related to smart cities, sustainable development, and energy management were reviewed. In the field-based section, required information was gathered through AHP pairwise comparison questionnaires and SWOT internal and external factor evaluation questionnaires. The statistical population of the study comprised experts in the fields of urban planning, urban management, energy, architecture, and faculty members from relevant universities. The research sample was selected through purposive sampling, as only individuals possessing specialized knowledge and executive experience in the domains of smart cities and energy management were eligible to participate in the decision-making process. The number of participating experts was 20.

Results and Discussion

The findings of this research demonstrated that infrastructural and physical criteria carried the greatest weight in designing the smart pattern for energy consumption reduction in Najafabad. This outcome indicates that the realization of a smart city is not feasible solely through the deployment of information and communication technologies; rather, it necessitates the modernization of urban infrastructure, enhancement of building energy efficiency, development of smart electricity grids, and establishment of an integrated urban data management system. In effect, technology can lead to energy consumption reduction only when applied within a context of adequate infrastructure,

efficient governance, and coherent spatial planning.

Field investigations and available documentation reveal that extensive areas of Najafabad's urban fabric, particularly in central and historic neighborhoods such as Abbasabad and Mahmudabad, comprise deteriorated structures with inadequate thermal insulation (windows, walls, and roofs), resulting in substantial energy waste during both cold and hot seasons. Furthermore, electricity and water distribution networks in certain parts of the city are dilapidated, and energy loss during transmission is clearly observable. These realities substantiate the high priority assigned to the infrastructural and physical criterion in designing the energy consumption reduction pattern.

Conclusion

The integration of analytical findings with the objective realities of Najafabad indicates that the W-O strategic pattern, based on overcoming structural weaknesses through the utilization of existing opportunities—particularly solar energy potential, a young population, and the city's developing structure—can be proposed as the most effective strategy for reducing energy consumption in this city. Its implementation necessitates the simultaneous modernization of physical infrastructure, integration of information systems, investment in smart technologies, and enhancement of public awareness through educational and incentive programs.

The research findings indicate that the realization of a smart city in Najafabad should not be confined solely to the development of information technology infrastructure; rather, this process must be pursued within the framework of integrated urban planning. Within this framework, the development of smart transportation, optimization of energy consumption in public buildings, deployment of smart consumption monitoring systems, utilization of renewable energy sources, and enhancement of citizen participation must be simultaneously placed on the urban management agenda. This approach aligns with the recommendations of UN-Habitat

(2024) and the ISO 37122 standard, which conceptualize the smart city as the product of interaction among technology, governance, environment, economy, and social participation.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



بررسی الگوی هوشمند کاهش مصرف انرژی شهرها با رویکرد توسعه پایدار

مطالعه موردی: شهر نجف آباد

فرامرز عیدی وندی^۱، ابراهیم تقوی^۲

۱- گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، مرند، ایران. رایانامه: fbabaei@tabrizu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، مرند، ایران. رایانامه: iraj-teymuri@tabrizu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در دهه‌های اخیر، رشد بی‌رویه شهرنشینی و افزایش تقاضای انرژی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در سطح جهان تبدیل شده است. شهرها به‌عنوان کانون‌های اصلی مصرف انرژی، بیش از ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. مفهوم توسعه پایدار به‌عنوان راهبردی اساسی، بر ایجاد تعادل میان نیازهای امروز و حفظ منابع برای نسل‌های آینده تأکید دارد که لازمه تحقق آن، گذار از الگوهای سنتی مصرف به‌سوی شهر هوشمند است. شهر نجف‌آباد به‌عنوان یکی از شهرهای مهم و درحال توسعه استان اصفهان، به دلیل موقعیت خاص اقلیمی، صنعتی و رشد جمعیت، با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت منابع انرژی مواجه است. هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی الگوی هوشمند کاهش مصرف انرژی شهرها با رویکرد توسعه پایدار در شهر نجف‌آباد است. این مطالعه با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای اولویت‌بندی شاخص‌های بهینه‌سازی انرژی و روش تحلیل SWOT برای ارزیابی نقاط قوت، ضعف، فرصت و تهدید انجام شده است. نتایج AHP نشان داد که معیار «زیرساختی و کالبدی» با وزن ۰/۶۳۲ مهم‌ترین معیار و معیار «زیست‌محیطی و پایداری» با وزن ۰/۵۰۲ در رتبه دوم قرار دارند. تحلیل SWOT نیز مجموع عوامل داخلی را معادل ۰/۱۹۹- و مجموع عوامل خارجی را معادل ۰/۱۸۱+ نشان داد. بدین ترتیب، بهینه‌سازی مصرف انرژی در شهر نجف‌آباد تنها با رویکرد تلفیقی شهر هوشمند و توسعه پایدار و با اتخاذ استراتژی محافظتی W-O (غلبه بر ضعف‌ها با بهره‌گیری از فرصت‌ها) امکان‌پذیر است. این استراتژی بر نوسازی زیرساخت‌های فرسوده، همگام‌سازی با فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و ارتقای آگاهی عمومی برای اصلاح الگوی مصرف تأکید دارد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱ واژگان کلیدی: هوشمند سازی، کاهش مصرف انرژی شهری، توسعه پایدار، شهر نجف‌آباد.

استناد: عیدی وندی، فرامرز و تقوی، ابراهیم. (۱۴۰۵). بررسی الگوی هوشمند کاهش مصرف انرژی شهرها با رویکرد توسعه پایدار مطالعه موردی: شهر نجف‌آباد. *مجله جغرافیا و توسعه فضایی*، ۳ (۲)، ۳۷-۵۲.

<http://doi.org/10.22098/gsd.2026.20367.1146>



مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد بی‌رویه شهرنشینی و افزایش تقاضای انرژی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در سطح جهان تبدیل شده است. شهرها به‌عنوان کانون‌های اصلی مصرف انرژی، بیش از ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. در این میان، مفهوم «توسعه پایدار» به‌عنوان راهبردی اساسی، بر ایجاد تعادل میان نیازهای امروز و حفظ منابع برای نسل‌های آینده تأکید دارد که لازمه تحقق آن، گذار از الگوهای سنتی مصرف به‌سوی «شهر هوشمند» است (شمس نجفی و همکاران، ۱۴۰۱). شهرهای هوشمند گرایشی نوین در زمینه برنامه‌ریزی شهری هستند که برای مدیریت جامع شهری و کیفیت بالای زندگی تلاش می‌کنند. مؤلفه‌های اصلی شهرهای هوشمند، فناوری پیشرفته‌ای مانند فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT)، اینترنت اشیا (IoT)، تجزیه و تحلیل کلان داده، محاسبات ابری، شبکه‌های اجتماعی و هوش مصنوعی است. شهرهای هوشمند با بهره‌گیری از این فناوری‌ها مزایایی را برای شهروندان فراهم می‌کنند. فناوری تعبیه‌شده در شهرهای هوشمند امکان جمع‌آوری، پردازش و به اشتراک‌گذاری کلان داده‌ها را فراهم می‌کند تا تصمیم‌گیری آگاهانه امکان‌پذیر باشد، که در نهایت کارایی خدمات شهری را افزایش می‌دهد. در همین حال، این فن‌آوری‌های اصلی در حال حاضر در بخش‌های مختلف شهری نظیر کاهش مصرف انرژی شهری کاربرد قابل‌توجهی دارند. به‌عنوان مثال، اینترنت اشیا برای جمع‌آوری داده‌های مصرف انرژی استفاده می‌شود تا بتواند به بهینه‌سازی توزیع و مصرف انرژی کمک کند (پرویزی و همکاران، ۱۴۰۱).

از آنجاکه شهرهای هوشمند یک رویکرد جامع برای ایجاد شهرها به مکانی بهتر است، به‌کارگیری توسعه شهرهای هوشمند برای انرژی هوشمند بسیار مهم است. سیستم انرژی شهری باید به سمت سیستم کم‌کربن حرکت کند زیرا شهرها مسئول عمده مصرف انرژی و انتشار CO₂ هستند. این حرکت انتقال انرژی نامیده می‌شود، که نیاز به تغییر در تأمین انرژی و تقاضا دارد. فناوری‌ها می‌توانند از انتقال انرژی سود ببرند (شمس نجفی و همکاران، ۱۴۰۱). به‌عنوان مثال، CO₂ را می‌توان با کنترل بی‌سیم به سوخت‌های تمیز تبدیل کرد (Akadiri et al, 2018).

همچنین استفاده از فناوری‌های هوشمند (مانند اینترنت اشیا، سیستم‌های مدیریت یکپارچه انرژی و تحلیل داده‌های کلان) بستری را فراهم می‌کند تا مدیریت مصرف انرژی از رویکردی منفعلانه به رویکردی پیش‌دستانه و مبتنی بر تقاضا تبدیل شود. در جوامع در حال توسعه، به دلیل فقدان زیرساخت‌های یکپارچه و الگوی مصرف غیراستاندارد، هدر رفت انرژی در بخش‌های خانگی، حمل‌ونقل و روشنایی معابر بسیار بالا است که نه تنها فشار اقتصادی سنگینی بر بدنه مدیریت شهری وارد می‌کند، بلکه تاب‌آوری محیط‌زیستی شهرها را کاهش می‌دهد (Mathor et al, 2020).

از طرفی یک سیستم انرژی ترکیبی که از چندین منبع انرژی تجدید پذیر استفاده می‌کند انفورماتیک می‌تواند برای کاهش انتشار CO₂ استفاده شود، که می‌تواند توسط یک شبکه عصبی که خودآموزی را امکان‌پذیر می‌کند خودکار شود. در سمت تقاضا، ساختمان‌های غیرفعال از همان ابتدا با کمترین انرژی برای کاهش مصرف انرژی طراحی می‌شوند. از ICT می‌توان برای حسگری و نظارت بر مصرف انرژی در ساختمان استفاده کرد تا افراد بتوانند کاهش مصرف انرژی شهری را از خانه‌های خود شروع کنند (Sadiq et al, 2020).

برای حمل‌ونقل، می‌توان برای کاهش مصرف سوخت و زمان سفر، از سیستم مکان‌یابی خودکار خودرو که توسط سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) فعال است، استفاده کرد و اشتراک داده‌های حمل‌ونقل می‌تواند از ازدحام بکاهد. استفاده از فن‌آوری‌های اصلی در یک شهر هوشمند می‌تواند بهره‌وری انرژی را افزایش داده و به کاهش مصرف انرژی و انتشار CO₂ کمک کند که در پایان، از انتقال انرژی پشتیبانی می‌کند. از آنجاکه شهر هوشمند و کاهش مصرف انرژی

دارای برخی جنبه‌های مشترک هستند، توسعه شهر هوشمند می‌تواند به انتقال انرژی و صرفه‌جویی در مصرف آن کمک کند (پرویزی و همکاران، ۱۴۰۱).

در واقع زیرساخت‌های انرژی به‌عنوان یکی از عناصر اصلی یک شهر هوشمند هستند، خصوصاً به دلیل اینکه وضعیت و ساختار آن تعیین می‌کند که آیا اصول توسعه پایدار اجرا می‌شود و آیا کیفیت بالای زندگی برای ساکنین در یک محیط تمیز شهری فراهم می‌شود. شهرها به‌طور فزاینده‌ای در اجرای انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر منابع درون‌زا بازیگران مهمی هستند. با توجه به مقدمات شهر هوشمند، سیستم انرژی باید کاملاً در محله‌ها ادغام شود. علاوه بر تقاضای انرژی، پتانسیل تولید انرژی بر اساس منابع درون‌زا - منابع تجدیدپذیر انرژی محلی با هدف نهایی دستیابی به استقلال از منابع سوخت فسیلی خارجی باید موردتوجه قرار گیرد (Sadiq et al, 2020).

از سوی دیگر صنعت ساختمان نیز، یک عنصر حیاتی برای هر جامعه است. اما تأثیر قابل‌توجهی بر محیط‌زیست و کاهش مصرف انرژی دارد (Mathor et al, 2020). با توجه به‌اندازه آن، یکی از بزرگ‌ترین کاربران انرژی و منابع مادی و آب به شمار می‌آید. همچنین این صنعت، آلوده‌کننده توانمندی است. در پاسخ به این اثرات، اجماع رو به رشدی میان سازمان‌های متعهد به عملکرد زیست‌محیطی، در مورد استراتژی‌های هدف‌دار در راستای کاهش مصرف انرژی و برای ایجاد ساختمان‌های سازگار با محیط‌زیست وجود دارد. با نظر به قابل‌توجه بودن تأثیرات ساخت‌وساز، رویکرد ساخت‌وساز پایدار با پتانسیل بالا، به‌عنوان سهمی ارزشمند برای توسعه پایدار مدنظر قرار گرفته است. در حالت کلی توسعه پایدار، مفهوم گسترده و پیچیده‌ای است که به‌عنوان یکی از مسائل مهم در صنعت ساخت‌وساز رشد کرده و ایده‌ای از پایداری، شامل بالا بردن کیفیت زندگی شهری می‌باشد، که در نتیجه اجازه می‌دهد مردم در یک محیط سالم با بهبود شرایط اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی زندگی کنند (Tahmasebi et al, 2011).

تعدادی از اهداف خاص این ایده عبارت‌اند از: بهره‌وری مناسب از انرژی و منابع، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، جلوگیری از آلودگی، کاهش سروصدا، بهبود کیفیت هوا، هماهنگی با محیط‌زیست (Taleb et al, 2011). در همین راستا امروزه با توجه به قیمت روزافزون مصرف انرژی، هوشمند سازی شهری در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش آن، یکی از محوری‌ترین گزینه‌های مطرح‌شده در مباحث شهری به شمار می‌آید.

شهر نجف‌آباد به‌عنوان یکی از شهرهای مهم و در حال توسعه استان اصفهان، به دلیل موقعیت خاص اقلیمی، صنعتی و رشد جمعیت، با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت منابع انرژی مواجه است. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که عدم استفاده از الگوهای هوشمند در زیرساخت‌های شهری، سیستم‌های گرمایشی/سرمایشی و مدیریت شبکه توزیع، منجر به اتلاف قابل‌توجه انرژی در این شهر شده است. با وجود پتانسیل‌های موجود، هنوز الگوی منسجم، علمی و مبتنی بر فناوری‌های نوین برای مدیریت بهینه انرژی در نجف‌آباد تدوین نشده است. بنابراین مسئله اصلی مقاله حاضر این است که چگونه می‌توان با تلفیق فناوری‌های هوشمند و شاخص‌های توسعه پایدار، الگوی بومی و کاربردی برای کاهش مصرف انرژی در نجف‌آباد طراحی کرد؟ فقدان چنین الگویی در سطح مدیریت شهری، منجر به تداوم رویه‌های ناکارآمد شده و شهر را در برابر نوسانات قیمت انرژی و بحران‌های زیست‌محیطی آسیب‌پذیرتر می‌کند. از این رو، این مطالعه در پی آن است تا با شناخت دقیق وضعیت فعلی و تحلیل نقاط ضعف و قوت، الگوی را ارائه دهد که علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی، به ارتقای کیفیت زندگی شهروندان و حفاظت از منابع پایدار برای نسل‌های آتی در شهر نجف‌آباد منجر گردد.

در دهه اخیر، مفهوم شهر هوشمند از رویکردی فناورانه به چارچوبی یکپارچه برای تحقق توسعه پایدار شهری تحول‌یافته است. مطالعات جدید نشان می‌دهد که موفقیت شهرهای هوشمند صرفاً به استقرار فناوری‌های اطلاعات و

ارتباطات وابسته نیست، بلکه حکمرانی شهری، مشارکت شهروندان، کیفیت زیرساخت‌ها، سیاست‌های انرژی و ملاحظات محیط‌زیستی نیز در تحقق اهداف آن نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. مرور نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که تلفیق این مؤلفه‌ها می‌تواند زمینه کاهش مصرف انرژی، افزایش تاب‌آوری شهری و ارتقای کیفیت زندگی را فراهم کند.

در مطالعات داخلی، صابری و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، اولویت‌های توسعه شهری را بررسی کردند و نشان دادند که شاخص‌های مرتبط با هوشمند سازی شهری از مهم‌ترین عوامل ارتقای عملکرد مدیریت شهری هستند. همچنین شمس‌نجفی و همکاران (۱۴۰۱) در طراحی الگوی شهر هوشمند، بر اهمیت حکمرانی هوشمند، زیرساخت دیجیتال و مشارکت شهروندان تأکید کردند. با وجود ارزش علمی این پژوهش‌ها، تمرکز آن‌ها بیشتر بر ابعاد مفهومی شهر هوشمند بوده و راهبردهای کاهش مصرف انرژی با استفاده هم‌زمان از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و برنامه‌ریزی راهبردی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

در مطالعات خارجی، مرور نظام‌مند سانی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) بر چارچوب‌های شهر هوشمند نشان داد که اغلب مدل‌های موجود از نظر فناوری، حکمرانی، مشارکت شهروندان و پایداری محیطی دارای نقاط قوت هستند، اما در زمینه بومی‌سازی برای شهرهای کشورهای در حال توسعه و انطباق با ویژگی‌های محیطی هر شهر با محدودیت مواجه‌اند. نویسندگان تأکید می‌کنند که یک چارچوب هوشمند پایدار باید بر چهار مؤلفه اصلی شامل فناوری، حکمرانی، شهروندان و پایداری محیط‌زیست استوار باشد. در پژوهش دیگری، تومادون^۲ و همکاران (۲۰۲۴) با مرور کتاب‌سنجی مطالعات شهر هوشمند و شاخص‌های پایداری نشان دادند که پژوهش‌های اخیر به سمت یکپارچه‌سازی شاخص‌های انرژی، محیط‌زیست، کیفیت زندگی، حکمرانی و نوآوری حرکت کرده‌اند و استفاده از شاخص‌های ترکیبی برای ارزیابی عملکرد شهرهای هوشمند رو به افزایش است. این مطالعه همچنین بیان می‌کند که همچنان خلأ قابل‌توجهی در زمینه بومی‌سازی این شاخص‌ها برای شهرهای کشورهای در حال توسعه وجود دارد. همچنین بیبری^۳ (۲۰۲۴) در مرور نظام‌مند خود درباره کاربرد هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال در شهرهای هوشمند پایدار نتیجه گرفت که ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، تحلیل کلان‌داده و دوقلوی دیجیتال می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی، مدیریت زیرساخت‌های شهری و تصمیم‌گیری هوشمند ایفا کند، اما تحقق این مزایا مستلزم وجود حکمرانی یکپارچه، داده‌های قابل اعتماد و برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر شواهد است.

از سوی دیگر، گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) نشان می‌دهد که بخش شهری سهم عمده‌ای از مصرف نهایی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده و توسعه ساختمان‌های هوشمند، شبکه‌های برق هوشمند، سامانه‌های مدیریت انرژی و استفاده از فناوری‌های دیجیتال از مؤثرترین راهکارهای افزایش بهره‌وری انرژی در شهرها محسوب می‌شوند. همچنین گزارش UN-Habitat بر نقش برنامه‌ریزی شهری هوشمند در تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات تغییر اقلیم تأکید دارد.

بررسی انتقادی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها یا بر ارزیابی شاخص‌های شهر هوشمند تمرکز داشته‌اند یا صرفاً راهبردهای توسعه پایدار را بررسی کرده‌اند. همچنین در مطالعات انجام‌شده، استفاده هم‌زمان از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای اولویت‌بندی معیارهای مؤثر و تحلیل SWOT برای تدوین راهبردهای اجرایی در مقیاس شهرهای متوسط ایران کمتر مشاهده می‌شود. افزون بر این، تاکنون پژوهشی که الگوی هوشمند کاهش مصرف

^۱ Sony

^۲ Tomadon

^۳ Bibri

انرژی را با اتکا بر واقعیت‌های محیطی شهر نجف‌آباد و ویژگی‌های کالبدی، مدیریتی و زیرساختی آن طراحی کرده باشد، گزارش نشده است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ و ارائه چارچوبی بومی برای کاهش مصرف انرژی شهری انجام شده است.

مبانی نظری

شهر هوشمند به عنوان یک پارادایم نوین در حوزه شهرسازی برآمده است که از ادغام فناوری‌های پیشرفته، به‌ویژه فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) با هوش مصنوعی، به‌منظور بهبود کارایی و کیفیت زندگی شهروندان بهره می‌برد (Vileniske et al, 2012). سیستم‌های هوشمند در یک شهر باید میزان مصرف انرژی در بخش‌های مختلف را زیر نظر قرار داده و کنترل کنند. اطلاعات جمع‌آوری شده از سیستم‌های هوشمند مختلف می‌توانند در بلندمدت تا ۳۰ درصد بازدهی انرژی را افزایش دهند. یکی از راه‌های اساسی کاهش مصرف انرژی، استفاده از سیستم مدیریت انرژی هوشمند است (شیرین نیا و همکاران، ۱۴۰۰). توسعه پایدار، توسعه‌ای است که نیازهای زمان حال را برآورده سازد بدون آنکه توانایی نسل‌های آینده در برآورده سازی نیازهایشان را به خطر اندازد به تعبیر دیگر توسعه‌ای که تضمین دهد استفاده از منابع و محیط‌زیست در زمان کنونی هیچ آسیبی به دورنمای استفاده نسل آینده وارد نمی‌سازد (Ozlam Guzy, 2022). مبنای نظری مفهوم پایداری در شهر و ناحیه در یک دید اجمالی به موارد ذیل اشاره می‌نماید (Ozlam Guzy, 2022):

کاهش آلودگی، نگهداری منابع طبیعی، کاهش حجم ضایعات شهری، افزایش بازیافت‌ها، کاهش انرژی مصرفی، افزایش بیش‌ازحد جانداران مفید در شهر و روستا با ایجاد جامعه جنگلی و درختان شهری و نواحی سبز، عدم تمرکز شهری و کاهش پراکندگی‌ها، افزایش تراکم متوسط در حومه‌های شهری و شهرهای کوچک، کاهش فواصل ارتباطی، ایجاد اشتغال محلی، توسعه متنوع مساکن در مراکز اشتغال، توسعه شهرهای کوچک برای کاهش اتکا به شهرهای بزرگ، ساختار اجتماع متعادل، حمل‌ونقل عمومی و کاهش ترافیک جاده‌ای، مدیریت ضایعات بازیافت نشدنی و تهیه غذای پایدار محلی. بدین ترتیب اولاً؛ با جایگزینی منابع، هوشمند سازی و نوسازی آن‌ها اتخاذ سیاست کاربری صحیح محافظت از زمین و کاهش مصرف انرژی ارتقاء می‌یابد. ثانیاً؛ با توجه به برنامه‌ریزی شهری و ناحیه‌ای و سامان‌دهی فضا، توسعه پایدار شهری حاصل می‌شود (Lee et al, 2021).

با کاهش ذخایر فسیلی، نگرانی‌های بسیاری به وجود آمده است. اثر گازهای گلخانه‌ای روی شرایط جو جهانی در حال افزایش می‌باشد. بنابراین باید برای کاهش مصرف انرژی، افزایش راندمان و استفاده از منابع قابل تجدید در تأسیسات، راه‌حلی یافت. ساختن ساختمان‌های مناسب، بستگی زیادی به انتخاب صحیح محل ساخت دارد. حتی‌الامکان باید از مصالح ساختمان‌های قدیمی استفاده نمود. تعیین موقعیت، جهت‌گیری و چشم‌انداز یک ساختمان می‌تواند روی اکوسیستم محلی، نوع حمل‌ونقل و مصرف انرژی تأثیر بگذارد. بهتر است این موارد در فاز اولیه طراحی در نظر گرفته شود. در ادامه متغیرهای تأثیرگذار در زمینه کاهش مصرف انرژی با رویکرد هوشمند سازی شهری و با تأکید بر مفاهیم توسعه پایدار شامل موارد ذیل خواهد بود (Ren et al, 2021):

- ۱) دقت و به‌روز بودن: برخلاف روش‌های سنتی که مصرف انرژی را به‌صورت کلی مدیریت می‌کنند، رویکرد هوشمند اجازه می‌دهد مصرف را در سطح «واحد» یعنی هر خانه یا هر بلوک، به‌صورت لحظه‌ای پایش و مدیریت کرد.
- ۲) پیش‌بینی‌گری: استفاده از هوش مصنوعی در این الگو، امکان پیش‌بینی دوره‌های اوج مصرف را فراهم می‌کند، که باعث جلوگیری از فشار به شبکه و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود.

۳) هم‌افزایی اقتصادی و محیط‌زیستی: رویکرد توسعه پایدار باعث می‌شود که کاهش مصرف انرژی تنها یک هدف زیست‌محیطی نباشد، بلکه از طریق کاهش هزینه‌های دولت و شهروندان، به یک هدف اقتصادی تبدیل شود تا باعث پذیرش بیشتر مردم می‌شود.

۴) کاهش ردپای کربن: این رویکرد مستقیماً با اهداف جهانی کاهش گازهای گلخانه‌ای همسو است و می‌تواند جایگاه شهر را در رتبه‌بندی شهرهای سبز ارتقا دهد.

ارتباط میان مؤلفه‌های اصلی پژوهش را نشان می‌دهد. در این مدل، «شهر هوشمند» و «توسعه پایدار» به‌عنوان دو رکن اساسی در نظر گرفته شده‌اند که کاهش مصرف انرژی شهری محصول تعامل این دو حوزه است. تحلیل SWOT به‌عنوان حلقه اتصال، نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها را شناسایی کرده و موقعیت راهبردی WO را تعیین می‌نماید.

بر اساس مرور ادبیات، کاهش مصرف انرژی در شهرهای هوشمند نتیجه تعامل میان ابعاد کالبدی، فناوری، مدیریت شهری، محیط‌زیست و مشارکت شهروندان است. در پژوهش حاضر، ابتدا معیارهای مؤثر بر کاهش مصرف انرژی بر اساس ادبیات پژوهش و نظر خبرگان شناسایی شدند. سپس اهمیت نسبی این معیارها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) تعیین شد. در ادامه، با تحلیل عوامل داخلی و خارجی شهر نجف‌آباد در قالب ماتریس SWOT، راهبردهای مناسب برای استقرار الگوی شهر هوشمند استخراج گردید. در نهایت، تلفیق نتایج حاصل از AHP و SWOT به ارائه الگوی پیشنهادی کاهش مصرف انرژی شهری منجر شد. بنابراین، مدل مفهومی پژوهش نشان‌دهنده ارتباط میان شاخص‌های شهر هوشمند، شرایط محیطی شهر نجف‌آباد و راهبردهای تحقق توسعه پایدار است.

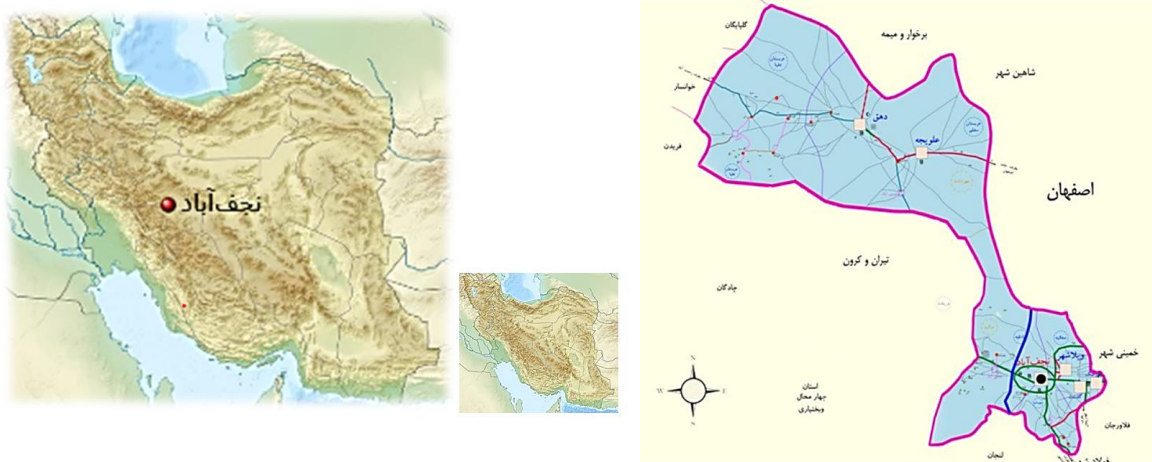
روش پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است و با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و برنامه‌ریزی راهبردی انجام شده است. فرآیند پژوهش در چهار مرحله اصلی شامل شناسایی شاخص‌های مؤثر بر کاهش مصرف انرژی شهری، اولویت‌بندی شاخص‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، تحلیل محیط داخلی و خارجی با مدل SWOT و در نهایت تدوین راهبردهای توسعه شهر هوشمند انجام شد. داده‌های پژوهش از دو منبع کتابخانه‌ای و میدانی گردآوری شد. در بخش کتابخانه‌ای، مقالات علمی، اسناد توسعه شهری، گزارش‌های شهرداری نجف‌آباد، مطالعات مرتبط با شهر هوشمند، توسعه پایدار و مدیریت انرژی موردبررسی قرار گرفت. در بخش میدانی، اطلاعات مورد نیاز از طریق پرسشنامه مقایسات زوجی AHP و پرسشنامه ارزیابی عوامل داخلی و خارجی SWOT جمع‌آوری شد. جامعه آماری پژوهش را خبرگان حوزه برنامه‌ریزی شهری، مدیریت شهری، انرژی، معماری و اعضای هیئت علمی دانشگاه‌های مرتبط تشکیل دادند. نمونه پژوهش به روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شد؛ زیرا تنها افرادی که دارای دانش تخصصی و تجربه اجرایی در حوزه شهر هوشمند و مدیریت انرژی بودند، امکان مشارکت در فرآیند تصمیم‌گیری را داشتند. تعداد خبرگان مشارکت‌کننده (۲۰ نفر) بود. برای سنجش روایی ابزار، پرسشنامه‌ها در اختیار چند نفر از اعضای هیئت علمی متخصص در حوزه برنامه‌ریزی شهری و تصمیم‌گیری چندمعیاره قرار گرفت و پس از اعمال اصلاحات پیشنهادی، نسخه نهایی تدوین شد. همچنین برای بررسی پایایی قضاوت‌های خبرگان در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، نرخ ناسازگاری (Consistency Ratio) مطابق روش ساعتی محاسبه شد. مقدار نرخ ناسازگاری کمتر از ۰,۱۰ به‌عنوان معیار پذیرش سازگاری قضاوت‌ها در نظر گرفته شد (Saaty, 1980). در مرحله نخست تحلیل، ماتریس

مقیاسات زوجی معیارها بر اساس طیف ۹ درجه‌ای ساعتی تشکیل شد و وزن نسبی هر معیار با استفاده از بردار ویژه محاسبه گردید. محاسبات مربوط به فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice انجام شد. در مرحله دوم، بر اساس نتایج مطالعات اسنادی، بازدیدهای میدانی و نظر خبرگان، عوامل داخلی شامل نقاط قوت و ضعف و عوامل خارجی شامل فرصت‌ها و تهدیدهای مرتبط با توسعه شهر هوشمند و کاهش مصرف انرژی استخراج شد. سپس با تشکیل ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE) و ماتریس ارزیابی عوامل خارجی (EFE)، وزن و امتیاز هر عامل محاسبه گردید. در ادامه، با استفاده از ماتریس SWOT، موقعیت راهبردی شهر نجف‌آباد تعیین و راهبردهای مناسب در قالب چهار گروه SO، WO، ST و WT تدوین شد. به‌منظور افزایش قابلیت اتکای نتایج، یافته‌های حاصل از تحلیل AHP مبنای تعیین اهمیت نسبی معیارها قرار گرفت و خروجی آن در تحلیل SWOT مورد استفاده قرار گرفت تا چارچوبی منسجم برای طراحی الگوی هوشمند کاهش مصرف انرژی شهری ارائه شود.

محدوده مورد مطالعه

شهر نجف‌آباد، مرکز شهرستان نجف‌آباد، در موقعیت جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی عرض از خط استوا و ۵۱ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی طول از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. محدوده مورد مطالعه این پژوهش، شهر نجف‌آباد به‌عنوان مرکز شهرستان نجف‌آباد در استان اصفهان است. شهرستان نجف‌آباد از شمال با شهرستان شاهین‌شهر و میمه، از شرق با شهرستان‌های خمینی‌شهر و اصفهان، از جنوب با شهرستان‌های فلاورجان و لنجان و از غرب با شهرستان‌های تیران و کرون، فریدن، خوانسار و گلپایگان هم‌مرز است. شهر نجف‌آباد در بخش مرکزی این شهرستان قرار گرفته و به دلیل تمرکز جمعیت، خدمات شهری، فعالیت‌های صنعتی و مراکز آموزشی، مهم‌ترین کانون توسعه منطقه به شمار می‌آید. بر همین اساس، تحلیل‌های این پژوهش بر محدوده قانونی شهر نجف‌آباد متمرکز است، درحالی‌که برخی داده‌های زمینه‌ای و آمارهای رسمی در مقیاس شهرستان ارائه شده‌اند. انتخاب شهر نجف‌آباد به‌عنوان محدوده مطالعه به دلیل جایگاه آن به‌عنوان یکی از شهرهای میانی استان اصفهان، برخورداری از فعالیت‌های صنعتی، رشد سریع شهرنشینی، افزایش تقاضای انرژی و ضرورت حرکت به‌سوی مدیریت هوشمند شهری صورت گرفته است. همچنین وجود ظرفیت‌های مناسب در حوزه آموزش عالی، زیرساخت‌های شهری و برنامه‌های مدیریت شهری، این شهر را به نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی الگوی هوشمند کاهش مصرف انرژی تبدیل کرده است.



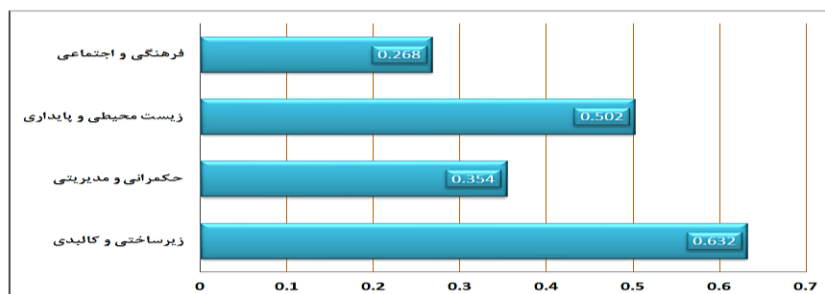
شکل ۱. محدوده جغرافیایی شهر نجف‌آباد

یافته‌های

به‌منظور تعیین اهمیت نسبی معیارهای پژوهش، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد. پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی و محاسبه بردار ویژه، وزن نسبی هر یک از معیارها استخراج شد. از آنجا که ساختار سلسله‌مراتب پژوهش تنها شامل یک سطح از معیارهای اصلی بوده و زیر معیار مستقلی برای معیارهای اصلی تعریف نشده است، وزن استخراج‌شده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، وزن نهایی معیارها نیز محسوب می‌شود. بنابراین، مقادیر ستون «وزن اولیه» و «وزن نهایی» یکسان است و تفاوتی میان آن‌ها وجود ندارد. در واقع، در این پژوهش مرحله‌ای برای تجمع وزن معیارها و زیرمعیارها انجام نشده است.

جدول ۱. وزن نسبی و نهایی معیارهای اصلی

نام معیار	وزن	وزن نهایی	اولویت
زیرساختی و کالبدی	۰/۶۳۲	۰/۶۳۲	۱
حکمرانی و مدیریتی	۰/۳۵۴	۰/۳۵۴	۳
زیست‌محیطی و پایداری	۰/۵۰۲	۰/۵۰۲	۲
فرهنگی و اجتماعی	۰/۲۶۸	۰/۲۶۸	۴



شکل ۲. وزن نسبی و نهایی معیارهای اصلی

امتیازات نهایی معیارهای اصلی نشان می‌دهد که معیار زیرساختی و کالبدی با امتیاز ۰/۶۳۲ به‌عنوان مهم‌ترین شاخص در طراحی الگوی کاهش مصرف انرژی در شهر نجف‌آباد با رویکرد شهر هوشمند و توسعه پایدار انتخاب‌شده و پس‌از آن به ترتیب معیار زیست‌محیطی و پایداری با امتیاز ۰/۵۰۲ در رتبه دوم، حکمرانی و مدیریتی با امتیاز ۰/۳۵۴ در رتبه سوم و فرهنگی و اجتماعی با امتیاز ۰/۲۶۸ در رتبه چهارم قرار دارند (جدول (۱)).

جدول ۲. وزن نسبی و نهایی زیرمعیارها

نام زیر معیار	وزن	وزن نهایی	اولویت
بافت فرسوده و ناکارآمد	۰/۴۷۹	۰/۱۸۷	۱
شبکه‌های توزیع فرسوده	۰/۴۶۸	۰/۱۷۶	۲
عدم یکپارچگی زیرساخت‌های هوشمند	۰/۳۹۶	۰/۱۵۱	۵
فقدان داده‌های یکپارچه	۰/۴۲۰	۰/۱۶۴	۴
بودجه‌بندی سنتی	۰/۳۸۷	۰/۱۴۳	۶
مقاومت در برابر تغییرات ساختاری	۰/۳۶۵	۰/۱۳۹	۷
تغییر اقلیم و تقاضای انرژی	۰/۴۱۱	۰/۱۶۹	۳
وابستگی به سوخت‌های فسیلی	۰/۳۴۲	۰/۱۰۷	۸
فقدان آگاهی عمومی	۰/۲۵۴	۰/۰۷۰	۱۰
الگوی مصرف	۰/۳۲۲	۰/۰۹۶	۹

$$CI = \frac{L - n}{n - 1} = \frac{4.848 - 4}{4 - 1} = 0.025$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.025}{0.9} = 0.027$$

چون ۰/۰۲۷ کمتر از ۰/۱ است پس سازگاری در قضاوت‌ها رعایت شده است.

نحوه محاسبه ضرایب ماتریس ارزیابی عوامل داخلی و خارجی

پس از شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای مؤثر بر توسعه شهر هوشمند و کاهش مصرف انرژی در شهر نجف‌آباد، برای هر عامل دو مقدار شامل وزن و رتبه تعیین شد. وزن هر عامل بیانگر میزان اهمیت نسبی آن در تحقق اهداف پژوهش است و بر اساس نظر خبرگان تعیین گردید؛ به‌گونه‌ای که مجموع وزن عوامل داخلی و مجموع وزن عوامل خارجی هر کدام برابر با یک است. سپس هر عامل بر اساس وضعیت موجود شهر نجف‌آباد توسط خبرگان امتیازدهی شد.

در ماتریس ارزیابی عوامل داخلی (IFE)، رتبه هر عامل در مقیاس ۱ تا ۴ تعیین شد؛ به‌طوری‌که برای نقاط قوت، رتبه ۴ نشان‌دهنده قوت بسیار زیاد و رتبه ۳ بیانگر قوت متوسط است، درحالی‌که برای نقاط ضعف، رتبه ۲ نشان‌دهنده ضعف متوسط و رتبه ۱ بیانگر ضعف شدید است. در ماتریس ارزیابی عوامل خارجی (EFE) نیز رتبه ۴ نشان‌دهنده واکنش بسیار مناسب به فرصت‌ها، رتبه ۳ واکنش مناسب، رتبه ۲ واکنش ضعیف و رتبه ۱ واکنش بسیار ضعیف در برابر تهدیدها است. امتیاز نهایی هر عامل از حاصل ضرب وزن در رتبه آن به دست آمد:

امتیاز نهایی = وزن × رتبه

سپس مجموع امتیازهای عوامل داخلی و خارجی محاسبه شد و بر اساس آن، موقعیت راهبردی شهر در ماتریس SWOT تعیین گردید. در ادامه، با توجه به موقعیت به‌دست‌آمده، مناسب‌ترین راهبردهای توسعه شهر هوشمند استخراج شد.

جدول ۳. عوامل راهبردی داخلی در بهینه‌سازی مصرف انرژی

ردیف	عوامل راهبردی داخلی	وزن نرمال	ضریب	وزن نهایی
نقاط قوت (S)				
S1	دقت و به‌روز بودن (برخلاف روش‌های سنتی که مصرف انرژی را به‌صورت کلی مدیریت می‌کنند، رویکرد هوشمند اجازه می‌دهد مصرف را در سطح «واحد» یعنی هر خانه یا هر بلوک، به‌صورت لحظه‌ای پایش و مدیریت کرد)	۰/۰۵۱	۲	۰/۱۰۲
S2	پیش‌بینی‌گری (به‌کارگیری هوش مصنوعی امکان پیش‌بینی دوره‌های اوج مصرف را فراهم نموده و باعث جلوگیری از فشار به شبکه و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود)	۰/۰۹۲	۲	۰/۱۸۴
S3	هم‌افزایی اقتصادی و محیط‌زیستی (رویکرد توسعه پایدار باعث می‌شود که کاهش مصرف انرژی تنها یک هدف زیست‌محیطی نباشد، بلکه از طریق کاهش هزینه‌های دولت و شهروندان، به یک هدف اقتصادی تبدیل شود)	۰/۸۴	۲	۰/۱۶۸
S4	کاهش ردپای کربن (این رویکرد مستقیماً با اهداف جهانی کاهش گازهای گلخانه‌ای همسو است و می‌تواند جایگاه شهر را در رتبه‌بندی شهرهای سبز ارتقا دهد)	۰/۰۳۳	۱	۰/۰۳۳
نقاط ضعف (W)				
W1	بافت فرسوده و ناکارآمد (بخش‌های زیادی از نجف‌آباد دارای بافت‌های قدیمی است که از نظر عایق‌بندی حرارتی «پنجره‌ها، دیواره‌ها و سقف‌ها» بسیار ضعیف هستند. این موضوع باعث اتلاف شدید انرژی در فصول سرد و گرم می‌شود و بهینه‌سازی آن نیازمند بازسازی‌های پرهزینه است)	۰/۰۴۳	-۱	-۰/۰۴۳
W2	شبکه‌های توزیع فرسوده (شبکه‌های توزیع برق و آب در برخی نقاط قدیمی شهر فرسوده هستند که منجر به هدر رفت انرژی در طول انتقال می‌شود)	۰/۰۵۹	-۱	-۰/۰۵۹

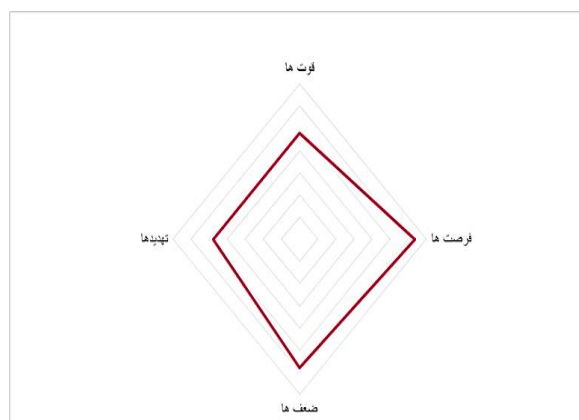
W3	عدم یکپارچگی زیرساخت‌های هوشمند (در بسیاری از پروژه‌های شهری، زیرساخت‌های لازم برای سنسورهای اینترنت اشیا (IoT) که لازمه شهر هوشمند است «مانند چراغ‌های خیابانی هوشمند، کنتورهای هوشمند و سیستم‌های پایش ترافیک»، پیش‌بینی نشده است)	۰/۰۶۳	-۲	-۰/۱۲۶
W4	فقدان داده‌های یکپارچه (برای پیاده‌سازی شهر هوشمند، نیاز به تحلیل داده‌های لحظه‌ای از مصرف انرژی است. در نجف‌آباد، جزیره‌ای بودن اطلاعات بین ادارات (برق، آب، شهرداری) مانع از ایجاد داشبورد مدیریتی واحد برای کنترل بهینه انرژی می‌شود)	۰/۰۳۵	-۱	-۰/۰۳۵
W5	بودجه‌بندی سنتی (بودجه‌های شهرداری اغلب صرف پروژه‌های عمرانی کالبدی «آسفالت، جدول کشی» می‌شود و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نرم‌افزاری و هوشمند سازی انرژی همچنان در اولویت نیست)	۰/۰۳۹	-۱	-۰/۰۳۹
W6	مقاومت در برابر تغییرات ساختاری (تغییر از مدیریت سنتی به مدیریت هوشمند نیازمند تغییرات سازمانی گسترده است که معمولاً با مقاومت در بدنه اداری مواجه می‌شود)	۰/۰۸۹	-۲	-۰/۱۷۸
W7	فقدان آگاهی عمومی (شهروندان نجف‌آباد ممکن است از پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی و مزایای اقتصادی استفاده از سیستم‌های هوشمند (مانند خانه‌های هوشمند) آگاهی کافی نداشته باشند)	۰/۰۵۲	-۲	-۰/۱۰۴
مجموع عوامل راهبردی داخلی				-۰/۱۹۹

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که مجموع امتیاز عوامل داخلی و خارجی بیانگر غلبه نسبی ضعف‌های داخلی بر نقاط قوت و در مقابل، وجود فرصت‌های قابل توجه در محیط بیرونی است. این وضعیت نشان می‌دهد که اگرچه شهر نجف‌آباد از ظرفیت‌های مناسبی برای توسعه فناوری‌های هوشمند، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال و ارتقای بهره‌وری انرژی برخوردار است، اما برخی محدودیت‌های مدیریتی، مالی و زیرساختی مانع بهره‌برداری کامل از این ظرفیت‌ها شده‌اند. بنابراین، اتخاذ راهبردهایی که بر کاهش ضعف‌های داخلی از طریق استفاده از فرصت‌های بیرونی متمرکز باشند، می‌تواند اثربخش‌ترین مسیر برای توسعه شهر هوشمند و کاهش مصرف انرژی باشد.

جدول ۴. عوامل راهبردی خارجی در بهینه‌سازی مصرف انرژی

ردیف	عوامل راهبردی خارجی	وزن نرمال	ضریب	وزن نهایی
نقاط فرصت (O)				
O1	پتانسیل انرژی‌های تجدید پذیر (با توجه به اقلیم منطقه (اصفهان)، میزان تابش خورشید در نجف‌آباد بسیار بالا است. این یک نقطه قوت بزرگ برای ادغام پل‌های خورشیدی هوشمند در الگوی پیشنهادی است)	۰/۰۷۸	+۲	۰/۱۵۶
O2	ساختار شهری و توسعه در حال جریان (نجف‌آباد شهری درحال توسعه است. این یعنی برخلاف شهرهای بسیار قدیمی و متراکم، امکان طراحی زیرساخت‌های هوشمند در بخش‌های جدید شهر بسیار راحت‌تر و با هزینه کمتر (از طریق طراحی اولیه) امکان‌پذیر است)	۰/۰۶۹	+۱	۰/۰۶۹
O3	تمرکز فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی (وجود صنایع در حومه یا نزدیکی نجف‌آباد، پتانسیلی برای اجرای طرح‌های «مدیریت هوشمند انرژی در بخش صنعت» ایجاد می‌کند که می‌تواند تأثیر بسیار بزرگی در کاهش کل مصرف انرژی شهر داشته باشد)	۰/۰۶۸	+۱	۰/۰۶۸
O4	پتانسیل پذیرش تکنولوژی در میان جمعیت جوان (اگر جمعیت شهر دارای نرخ مناسبی از تحصیل‌کردگان و جوانان باشد، یک نقطه قوت برای اجرای اپلیکیشن‌های مدیریت مصرف و سیستم‌های تعاملی محسوب می‌شود)	۰/۰۵۵	+۲	۰/۱۱۰
نقاط تهدید (T)				
T1	تغییر اقلیم و تقاضای انرژی (تغییرات اقلیمی و افزایش دما در فلات مرکزی ایران، فشار بر سیستم‌های سرمایشی نجف‌آباد را دوچندان کرده است که خود به افزایش مصرف انرژی دامن می‌زند)	۰/۰۵۴	-۱	-۰/۰۵۴
T2	وابستگی به سوخت‌های فسیلی (سهم انرژی‌های تجدید پذیر «مانند پل‌های خورشیدی در پشت‌بام منازل یا ساختمان‌های دولتی» در سید انرژی شهر بسیار اندک است و شهر همچنان به شبکه سراسری متکی است)	۰/۰۷۸	-۱	-۰/۰۷۸
T3	الگوی مصرف: (فرهنگ مصرف انرژی در ایران «به دلیل یارانه‌ای بودن قیمت‌ها» به گونه‌ای است که انگیزه کافی برای سرمایه‌گذاری شخصی شهروندان در جهت کاهش مصرف «مانند نوسازی تجهیزات» وجود ندارد)	۰/۰۴۵	-۲	-۰/۰۹۰
مجموع عوامل راهبردی خارجی				۰/۱۸۱

همان گونه که از نتایج بر می آید، مجموع عوامل خارجی بالاتر از صفر و برابر ۰/۱۸۱ به دست آمده و این امر حاکی از آن است که فرصت های پیش رو بالاتر از نقاط تهدید هستند (جدول (۴)).



شکل ۳. نمودار فرصت ها و چالش های پیش رو در کاهش مصرف انرژی

بر این اساس می توان الگوی راهبردی و استراتژی محافظتی (W-O) به معنای «غلبه بر ضعف ها به منظور استفاده از فرصت ها» را جهت بهینه سازی مصرف انرژی در شهر نجف آباد با رویکرد به مفاهیم شهر هوشمند و توسعه پایدار معرفی نمود. از این رو الگوهای راهبردی ذیل معرفی شده است (جدول (۵)):

جدول ۵. الگوی راهبردی و استراتژی محافظتی (W-O)

استراتژی WO	
۱	بازسازی بافت فرسوده و ناکارآمد و بهره‌وری از پتانسیل انرژی‌های تجدید پذیر
۲	نوسازی شبکه‌های توزیع فرسوده و ایجاد ساختار شهری هوشمند
۳	یکپارچگی زیرساخت‌های هوشمند و ایجاد تمرکز بر فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی
۴	عدم مقاومت در برابر تغییرات ساختاری و بهره‌گیری از پتانسیل پذیرش تکنولوژی در میان جمعیت جوان
۵	ایجاد آگاهی عمومی و اصلاح الگوی مصرف

نتایج این پژوهش نشان داد که استراتژی W-O غلبه بر ضعف ها برای بهره‌گیری از فرصت ها مناسب ترین رویکرد برای بهینه سازی مصرف انرژی در نجف آباد است. این یافته حاکی از آن است که شهر نجف آباد با وجود ضعف های ساختاری در زیرساخت های فرسوده و شبکه های توزیع قدیمی، از پتانسیل های بسیار بالایی نظیر جمعیت جوان و پذیرش بالای تکنولوژی برخوردار است. در واقع، کلید حل چالش انرژی در این شهر، نه در بازگشت به الگوهای سنتی، بلکه در استفاده از «انرژی های تجدید پذیر» و «تکنولوژی های هوشمند» برای جبران ناکارآمدی های زیرساختی است. این رویکرد نشان می دهد که هوشمند سازی نباید صرفاً یک هدف تکنولوژیک باشد، بلکه باید به عنوان ابزاری برای مدیریت ضعف های فیزیکی شهر به کار گرفته شود.

نتایج تحلیل SWOT زمانی قابلیت بهره‌برداری در برنامه‌ریزی شهری را خواهند داشت که در بستر ویژگی های واقعی شهر مورد مطالعه تفسیر شوند. در شهر نجف آباد، توسعه شهر هوشمند و کاهش مصرف انرژی تحت تأثیر مجموعه ای از شرایط کالبدی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی قرار دارد که بر نحوه تدوین راهبردهای توسعه اثرگذار هستند. از نظر کالبدی، توسعه افقی شهر طی سال های گذشته موجب افزایش طول شبکه های خدماتی، افزایش وابستگی به خودروهای شخصی و در نتیجه افزایش مصرف انرژی در بخش حمل و نقل و خدمات شهری شده است. همچنین بخشی

از بافت‌های مسکونی شهر دارای ساختمان‌هایی با عمر نسبتاً زیاد و بهره‌وری پایین انرژی هستند که موجب افزایش مصرف برق و گاز، به‌ویژه در دوره‌های اوج مصرف، می‌شود. این ویژگی‌ها یکی از مهم‌ترین مصادیق نقاط ضعف داخلی محسوب می‌شوند و ضرورت اجرای برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها را نشان می‌دهند.

از منظر اقتصادی، وجود شهرک‌های صنعتی و فعالیت‌های تولیدی در شهرستان نجف‌آباد فرصت مناسبی برای توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت انرژی، شبکه‌های برق هوشمند و سامانه‌های پایش مصرف انرژی فراهم کرده است. با این حال، محدودیت منابع مالی مدیریت شهری و هزینه بالای نوسازی زیرساخت‌های دیجیتال از مهم‌ترین موانع اجرایی محسوب می‌شوند.

در بعد مدیریتی، استقرار سامانه‌های الکترونیکی در شهرداری و توسعه تدریجی خدمات غیرحضوری، زمینه مناسبی برای حرکت به سوی حکمرانی هوشمند ایجاد کرده است، اما پراکندگی داده‌های شهری، نبود پایگاه داده یکپارچه و ضعف هماهنگی میان دستگاه‌های اجرایی، اثربخشی تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را محدود کرده است. این موضوع با یافته‌های پژوهش‌های اخیر درباره ضرورت حکمرانی داده محور در شهرهای هوشمند همخوانی دارد.

از منظر محیط‌زیستی نیز قرارگیری نجف‌آباد در اقلیم نیمه‌خشک، افزایش دمای هوا در فصل تابستان، کاهش منابع آب و رشد مصرف انرژی برای سرمایش، ضرورت استفاده از فناوری‌های هوشمند در مدیریت انرژی، ساختمان‌های کم‌مصرف و انرژی‌های تجدیدپذیر را دوچندان می‌کند. از این رو، فرصت‌هایی مانند توسعه سامانه‌های خورشیدی، هوشمندسازی شبکه توزیع برق و مدیریت هوشمند مصرف می‌توانند نقش مؤثری در افزایش تاب‌آوری انرژی شهر داشته باشند.

بر این اساس، نتایج ماتریس SWOT نشان می‌دهد که راهبردهای گروه WO برای شهر نجف‌آباد مناسب‌تر هستند؛ زیرا این راهبردها با هدف کاهش ضعف‌های موجود از طریق بهره‌گیری از فرصت‌های بیرونی، بیشترین انطباق را با شرایط کالبدی، مدیریتی و محیطی شهر دارند. اجرای این راهبردها می‌تواند زمینه ارتقای بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های مدیریت شهری و حرکت تدریجی به سوی شهر هوشمند پایدار را فراهم سازد.

جدول ۶. انطباق مؤلفه‌های SWOT با واقعیت‌های شهر نجف‌آباد

مؤلفه SWOT	شواهد عینی در شهر نجف‌آباد	دلالت برنامه‌ریزی
ضعف	فرسودگی بخشی از ساختمان‌ها	افزایش مصرف انرژی
ضعف	نبود سامانه یکپارچه مدیریت داده	کاهش کارایی مدیریت شهری
فرصت	تابش مناسب خورشیدی	توسعه انرژی خورشیدی
فرصت	توسعه خدمات الکترونیکی شهرداری	تقویت حکمرانی هوشمند
تهدید	افزایش دمای تابستان	رشد مصرف برق
قوت	ظرفیت دانشگاهی و نیروی متخصص	پشتیبانی از نوآوری

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که معیارهای زیرساختی و کالبدی بیشترین وزن را در طراحی الگوی هوشمند کاهش مصرف انرژی شهر نجف‌آباد به خود اختصاص داده‌اند. این نتیجه بیانگر آن است که تحقق شهر هوشمند صرفاً با توسعه فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات امکان‌پذیر نیست، بلکه مستلزم نوسازی زیرساخت‌های شهری، ارتقای بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها، توسعه شبکه‌های هوشمند برق و ایجاد نظام یکپارچه مدیریت داده‌های شهری است. در واقع، فناوری زمانی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی منجر شود که در بستری از زیرساخت‌های مناسب، حکمرانی کارآمد و برنامه‌ریزی

فضایی منسجم به کار گرفته شود. این یافته با نتایج (Bibri 2024) همخوانی دارد که نشان می‌دهد تلفیق هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و دوقلوی دیجیتال، بدون اصلاح ساختارهای مدیریتی و زیرساختی، اثر پایداری بر بهره‌وری انرژی نخواهد داشت.

نتایج تحلیل SWOT نیز نشان داد که اگرچه شهر نجف‌آباد از ظرفیت‌هایی نظیر وجود مراکز دانشگاهی، نیروی انسانی متخصص، موقعیت مناسب در شبکه شهری استان اصفهان و قابلیت توسعه زیرساخت‌های دیجیتال برخوردار است، اما محدودیت‌هایی همچون فرسودگی بخشی از زیرساخت‌های شهری، نبود سامانه یکپارچه مدیریت اطلاعات، محدودیت منابع مالی و هماهنگی ناکافی میان نهادهای اجرایی، مهم‌ترین موانع تحقق شهر هوشمند هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مسئله اصلی نجف‌آباد کمبود ظرفیت‌های بالقوه نیست، بلکه نحوه بهره‌برداری از این ظرفیت‌ها در چارچوب حکمرانی هوشمند است.

برتری راهبردهای WO در این پژوهش نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری شهری باید بر کاهش ضعف‌های داخلی از طریق استفاده از فرصت‌های بیرونی متمرکز شود. به‌عنوان نمونه، استفاده از حمایت‌های ملی در حوزه توسعه دولت هوشمند، جذب سرمایه‌گذاری برای نوسازی زیرساخت‌های انرژی، توسعه نیروگاه‌های خورشیدی مقیاس کوچک و استقرار سامانه‌های هوشمند مدیریت مصرف انرژی، می‌تواند بخشی از ضعف‌های موجود را جبران کند. این نتیجه با یافته‌های (Mupfumira, Mutingi و Sony 2024) نیز همسو است که تأکید می‌کنند در شهرهای کشورهای درحال توسعه، موفقیت شهر هوشمند بیش از آنکه به فناوری وابسته باشد، به اصلاح ساختارهای نهادی، حکمرانی و ظرفیت‌سازی سازمانی وابسته است.

یافته‌های این پژوهش همچنین با گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA, 2024) مطابقت دارد. این گزارش بیان می‌کند که بخش ساختمان، حمل‌ونقل و خدمات شهری بیشترین سهم را در مصرف نهایی انرژی شهرها دارند و بهبود عملکرد این بخش‌ها از طریق توسعه شبکه‌های هوشمند، سامانه‌های مدیریت انرژی و بهینه‌سازی ساختمان‌ها، نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند. با توجه به شرایط اقلیمی نجف‌آباد، که با تابستان‌های گرم و نیاز بالای سرمایشی همراه است، اجرای این سیاست‌ها می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش بار شبکه برق و افزایش بهره‌وری انرژی داشته باشد.

از منظر برنامه‌ریزی شهری، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تحقق شهر هوشمند در نجف‌آباد نباید صرفاً به توسعه زیرساخت‌های فناوری اطلاعات محدود شود، بلکه لازم است این فرایند در چارچوب برنامه‌ریزی یکپارچه شهری دنبال شود. در این چارچوب، توسعه حمل‌ونقل هوشمند، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های عمومی، استقرار سامانه‌های پایش هوشمند مصرف، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و ارتقای مشارکت شهروندان باید به‌صورت هم‌زمان در دستور کار مدیریت شهری قرار گیرد. این رویکرد با توصیه‌های UN-Habitat (2024) و استاندارد ISO 37122 نیز همخوانی دارد که شهر هوشمند را حاصل تعامل فناوری، حکمرانی، محیط‌زیست، اقتصاد و مشارکت اجتماعی می‌دانند.

وجه تمایز پژوهش حاضر با مطالعات پیشین در آن است که به‌جای تمرکز صرف بر شناسایی شاخص‌های شهر هوشمند یا ارزیابی وضعیت انرژی، از تلفیق فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل راهبردی SWOT برای ارائه یک الگوی بومی کاهش مصرف انرژی در شهر نجف‌آباد استفاده کرده است. این رویکرد، علاوه بر تعیین اهمیت نسبی معیارها، امکان تدوین راهبردهای اجرایی متناسب با ویژگی‌های کالبدی، مدیریتی و محیط‌زیستی شهر را فراهم کرده و از این نظر می‌تواند مبنای مناسبی برای تدوین برنامه‌های مدیریت هوشمند انرژی در شهرهای متوسط ایران باشد.

نتیجه گیری

به منظور عینی سازی نتایج و انطباق آن با شرایط موجود در شهر نجف آباد، در این بخش به بررسی مصادیق عینی هر یک از معیارها و مؤلفه های مستخرج از تحلیل های AHP و SWOT پرداخته می شود. مطابق با اولویت بندی انجام شده، معیار زیرساختی و کالبدی با وزن ۰/۶۳۳ در رتبه نخست قرار گرفته است. بررسی های میدانی و اسناد موجود نشان می دهد که بخش های وسیعی از بافت شهری نجف آباد، به ویژه در محلات مرکزی و قدیمی نظیر محله های عباس آباد و محمودآباد، دارای بافت های فرسوده با عایق بندی حرارتی نامناسب (پنجره ها، دیوارها و سقف ها) هستند که این مسئله باعث اتلاف شدید انرژی در فصول سرد و گرم سال می گردد. همچنین شبکه های توزیع برق و آب در برخی نقاط شهر فرسوده بوده و هدر رفت انرژی در طول انتقال به وضوح قابل مشاهده است و این واقعیت ها، اولویت بالای معیار زیرساختی و کالبدی را در طراحی الگوی کاهش مصرف انرژی توجیه می کند. در رتبه دوم، معیار زیست محیطی و پایداری با وزن ۰/۵۰۲ قرار دارد که با توجه به موقعیت اقلیمی شهر نجف آباد با میانگین بارش سالانه ۱۲۰ میلی متر و حداکثر مطلق دمای ۳۸ درجه سانتی گراد در منطقه ای با اقلیم گرم و خشک، تقاضای بالایی برای سیستم های سرمایشی در فصول گرم ایجاد کرده و فشار بر شبکه انرژی را دوچندان می سازد، اما از سوی دیگر، میانگین بالای تابش خورشید در این منطقه پتانسیل قابل توجهی برای بهره گیری از انرژی های تجدید پذیر به ویژه پنل های خورشیدی فراهم می آورد که این امر می تواند در کنار نوسازی بافت های فرسوده، به عنوان یک فرصت راهبردی مورد استفاده قرار گیرد. معیار حکمرانی و مدیریتی با وزن ۰/۳۵۴ در رتبه سوم قرار گرفته است و شواهد موجود حاکی از آن است که بودجه های شهرداری نجف آباد عمدتاً صرف پروژه های عمرانی کالبدی نظیر آسفالت و جدول کشی می شود و سرمایه گذاری در فناوری های نرم افزاری و هوشمند سازی انرژی در اولویت چندانی قرار ندارد، ضمن اینکه جزیره ای بودن اطلاعات میان ادارات مختلف از جمله برق، آب و شهرداری، مانع از ایجاد داشبورد مدیریتی واحد برای کنترل بهینه انرژی شده است. در نهایت، معیار فرهنگی و اجتماعی با وزن ۰/۲۶۸ در رتبه چهارم قرار گرفته که با توجه به جمعیت نسبتاً جوان شهر نجف آباد، این امر پتانسیل بالایی برای پذیرش فناوری های نوین از جمله اپلیکیشن های مدیریت مصرف و سیستم های هوشمند خانگی ایجاد کرده و در تحلیل SWOT با ضریب ۲+ و وزن ۰/۱۱۰ به عنوان یک فرصت مهم مورد تأکید قرار گرفته است، در حالی که مشاهدات میدانی و مصاحبه با شهروندان نجف آبادی نشان می دهد که فرهنگ مصرف انرژی در این شهر به دلیل یارانه ای بودن قیمت های انرژی، انگیزه کافی برای سرمایه گذاری شخصی در جهت کاهش مصرف مانند نوسازی تجهیزات ایجاد نکرده است و این موضوع به عنوان یکی از مهم ترین تهدیدها با ضریب ۲- و وزن ۰/۰۹۰ در تحلیل SWOT شناسایی شده است. همچنین وجود چهار شهرک صنعتی در حومه شهر، پتانسیل اجرای طرح های مدیریت هوشمند انرژی در بخش صنعت را فراهم می آورد که می تواند تأثیر بسیار بزرگی در کاهش کل مصرف انرژی شهر داشته باشد. بنابراین، تلفیق یافته های تحلیلی با واقعیت های عینی شهر نجف آباد نشان می دهد که الگوی راهبردی W-O مبتنی بر غلبه بر ضعف های ساختاری از طریق بهره گیری از فرصت های موجود، به ویژه پتانسیل انرژی خورشیدی، جمعیت جوان و ساختار در حال توسعه شهر، می تواند به عنوان مؤثرترین راهبرد برای کاهش مصرف انرژی در این شهر مطرح باشد و اجرای آن مستلزم نوسازی همزمان زیرساخت های فیزیکی، یکپارچه سازی سیستم های اطلاعاتی، سرمایه گذاری در فناوری های هوشمند و ارتقای آگاهی عمومی از طریق برنامه های آموزشی و تشویقی است.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه مدیران عالی سازمان اوقاف و امور خیریه، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- پرویزی، علی‌رضا؛ شایان فر، سامان و فرهادی، رضا. (۱۴۰۱). مبانی طراحی پایدار در راستای اهداف توسعه پایدار، ماهنامه بین‌المللی برنامه‌ریزی شهری، ص ۲۳.
- شیرین نیا، شیدا؛ روشن، محسن و پرویزی، رضا. (۱۴۰۰). ضرورت توجه به اجرای بام سبز در مجتمع‌های مسکونی کلان‌شهرها نمونه موردی شهر رشت. دومین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران، کنفدراسیون بین‌المللی مخترعان جهان (IFIA)، دانشگاه جامع علمی کاربردی.
- شجاعی زاده، مهدی و یزدان‌پرست، محمد. (۱۳۹۹). بررسی اصول و مبانی معماری پایدار، ماهنامه پیام مهندس، ص ۵۰.
- کرمانی، منصوره. (۱۳۹۹). بررسی روش‌های صرفه‌جویی انرژی در مسکن روستایی و شهری استان گیلان. بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، تهران. ایران.

References

- Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., & Olomolaiye, P. O. (2018). Design of a sustainable building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector. *Buildings*, 2(2), 126-152. <https://doi.org/10.3390/buildings2020126>
- Bibri, S. E. (2024). The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 20, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100433>
- International Energy Agency. (2024). *Energy efficiency 2024*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
- International Organization for Standardization. (2019). *ISO 37122:2019 - Sustainable cities and communities — Indicators for smart cities*. <https://www.iso.org/standard/61850.html>
- Lee, J., Je, H., & Byun, J. (2011). Well-being index of super tall residential buildings in Korea. *Building and Environment*, 46(5), 1184-1194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.010>
- Mathor, S. D., & Ramachandran, M. (2008). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365-381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.006>
- Mupfumira, P., Mutingi, M., & Sony, M. (2024). Smart city frameworks SWOT analysis: A systematic literature review. *Frontiers in Sustainable Cities*, 6, 1449983. <https://doi.org/10.3389/frsc.2024.1449983>
- Ozlam Guzy, M. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 186(1), 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.004>
- Ren, H., Gao, W., Zhou, W., & Nakagami, K. (2009). Multi-criteria evaluation for the optimal adoption of distributed residential energy systems in Japan. *Energy Policy*, 37(12), 5484-5493. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.014>

- Reza, B., Sadiq, R., & Hewage, K. (2011). Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2053-2066. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.041>
- Tahmasebi, M. M., Banihashemi, S., & Shakouri Hassanabadi, M. (2011). Assessment of the variation impacts of window on energy consumption and carbon footprint. *Procedia Engineering*, 21, 820-828. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2083>
- Taleb, H. M., & Sharples, S. (2011). Developing sustainable residential buildings in Saudi Arabia: A case study. *Applied Energy*, 88(11), 3831-3837. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.029>
- Tomadon, L. S., de Vries, W. T., et al. (2024). Smart city and sustainability indicators: A bibliometric literature review. *Discover Sustainability*, 5, 143.
- United Nations Human Settlements Programme. (2024). *World cities report 2024*. <https://unhabitat.org/wcr/>
- Vang, S., Shimoda, Y., Yamaguchi, Y., Okamura, T., Taniguchi, A., & Yamaguchi, Y. (2010). Prediction of greenhouse gas reduction potential in Japanese residential sector by residential energy end-use model. *Applied Energy*, 87(6), 1944-1952. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.018>
- Vileniske, I. G., & Narvydas, A. (2012). Environmental ethics and sustainability in housing design. *Environmental Research, Engineering and Management*, 62(4), 68-80. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.62.4.2358>
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593-605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>