

به نام خداوند جان و خرد



هنرمدیریت سبز

فصلنامه دانشگاه هنر ایران

سال سوم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴

زمینه انتشار هنر و معماری

شاپا چاپی ۰۷۵۶-۲۷۱۷

شاپا الکترونیکی ۲۹۸۰-۹۶۷۳

صاحب امتیاز دانشگاه هنر ایران

مدیر مسئول سید حسن سلطانی

سردبیر مریم محمدی

هیأت تحریریه به ترتیب حروف الفبا

بهنود برمایه‌ور- دانشیار گروه فنون معماری و مدیریت پروژه، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران

سیدعلی جوژی- استاد گروه محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال

سید بهشید حسینی- استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران

مهدی خاک‌زند- دانشیار گروه معماری منظر، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران

اسماعیل صالحی- دانشیار گروه برنامه‌ریزی محیط‌زیست، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تهران

منصوره طاهباز- دانشیار ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

ریما فیاض- دانشیار گروه فنون معماری و مدیریت پروژه، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران

پرویز قدوسی- استاد گروه عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

اصغر محمد مرادی- استاد گروه مرمت بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران

مدیر داخلی معصومه عبیدی

طراح گرافیک سارا عسگری

ویراستار ادبی و فنی مریم محمدی

لیتوگرافی چاپ و صحافی دانشگاه هنر ایران

نشانی نشریه خیابان حافظ، خیابان سرهنگ سخایی، بعد از تقاطع سی‌تیر، پلاک ۵۸

پردیس باغ ملی دانشگاه هنر، معاونت پژوهش و فناوری، دفتر فصلنامه «هنر مدیریت سبز»

کدپستی ۱۱۳۶۸۱۳۵۱۸

پست الکترونیک agm.journal@art.ac.ir

پایگاه اینترنتی نشریات دانشگاه هنر ایران <http://journal.art.ac.ir>

پایگاه اینترنتی دانشگاه هنر ایران www.art.ac.ir

سخن سردبیر

نویسندگان و پژوهشگران نشریه هنر مدیریت سبز، بدین وسیله به پاس همراهی شما سروران این نشریه مترصد است به انتشار دستاوردهای علمی و پژوهش‌های حوزه‌ی مد نظر نشریه بپردازد. همان‌طور که در اهداف و چشم‌اندازهای نشریه نیز بیان شده، این نشریه پژوهش‌های مرتبط با توسعه‌ی پایدار محیطی را مدنظر قرار داده است. اهمیت موضوع پایداری و مدیریت سبز که کاهش کربن، استفاده بهینه از انرژی، مدیریت پسماند و عرصه‌های مختلف را دربرمی‌گیرد، مباحث کلیدی و منتخب این نشریه برای انتشار مقالات هستند. طیف این مباحث در علوم مختلفی قابل ردیابی است. برای مثال رشته‌های شهرسازی، معماری، مدیریت پروژه، رشته‌های مرتبط با هنر چون سینما، انیمیشن و... که می‌توانند به بررسی تأثیرگذاری‌های تولیدات رسانه‌ای و تأثیر آنها در مباحث مربوطه بپردازند و یا طراحی صنعتی که برای نمونه هدف استفاده از مصالح سبز را در دستورکار خود دارد و سایر رشته‌ها که بدون شک مرتبط با اهداف این نشریه هستند. از همین رو است که این نشریه با عنوان هنر مدیریت سبز، در تلاش است طیف متعددی از پژوهش‌های مرتبط با مباحث را به انتشار برساند تا ضمن بازشناسی اهمیت موضوع، ابعاد پنهان و نهفته‌ای این رویکرد را نیز بیش از پیش آشکار نماید. این امر جز به یاری پژوهشگران میسر نخواهد شد و امید است این نشریه نقش موثری در ترویج این نگاه و جریان‌سازی آن در پژوهش، جامعه و صنعت داشته باشد.

فهرست

ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی ساختمان اداری مبتنی بر مبحث ۱۹ با ئی.اس.جی.بی و گرین مارک ۷

صفحه رضا عبادی؛ مهران گل صنم لو

عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری؛ تحلیلی مبتنی بر نظریه کنشگر-شبکه ۲۹

معصومه عبدی

تدوین مدل مفهومی-عملیاتی تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی (نمونه مطالعاتی: منطقه ۶ شهرداری

تهران) ۵۱

نیلوفر میرزاخانی؛ سمانه جلیلی صدرآباد

مطالعه کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی در حوزه کالبد معماری به منظور دست‌یابی به وجوه اشتراک و افتراق

آنها ۸۱

تورج خسروی جاوید

بازخوانی معماری خانه‌های سنتی ایرانی با رویکرد طراحی راهبردی (مطالعه خانه‌های شاخص در اقلیم گرم و خشک)

۱۱۳

مصطفی کیانی؛ فاطمه خسروی

شناسایی و تحلیل پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران با رویکرد مدیریت سبز ۱۳۳

محمد زارع آبندانسری؛ اعظم خلیل پور؛ ناصر رسول زاده جدی



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Comparative Assessment of the Energy Performance of an Office Building Based on Chapter 19 with ESGB and Green Mark

Reza Ebadi ⁽¹⁾ , Mehran Golsanamlou ^{(2)*} 

1. M.A of Architecture Technology, Department of construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0009-0003-2060-5955>)

2. M.A of Architectural and Energy, Department of construction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Arts University, Tabriz, Iran. (<https://orcid.org/0009-0009-9191-306X>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 16/09/2025 Revised: 22/10/2025 Accepted: 07/11/2025 PP.7-28 Keywords: <i>Comparative Assessment, nearly Zero Energy Building, Topic 19, ESGB, Green Mark.</i>  Use your device to scan and read the article online	Introduction: The building sector is a major contributor to global energy consumption and energy-related carbon emissions, making the improvement of building energy performance an important component of climate and sustainability policies. In Iran, Chapter 19 of the National Building Regulations (2020 edition) provides the principal regulatory framework for reducing building energy demand and improving the thermal and energy performance of buildings. However, its scope is mainly focused on minimum requirements for the building envelope and technical systems, while several aspects addressed by contemporary green building assessment systems, including renewable energy, air infiltration, mechanical ventilation, and operational energy management, receive limited attention. This issue is particularly relevant in hot-arid cities such as Kashan, where high cooling loads, solar radiation, envelope characteristics, and the potential for solar energy generation simultaneously influence building energy performance. International assessment systems such as China's ESGB and Singapore's Green Mark consider a broader range of energy and environmental criteria and establish different levels of performance. Despite numerous studies comparing green building assessment systems, limited research has directly evaluated the performance of an office building designed according to Iran's Chapter 19 against both ESGB and Green Mark within the climatic context of Iran. The present study addresses this gap by linking the requirements of the Iranian regulation to quantitative building-energy performance indicators and comparable criteria within two Asian assessment frameworks. The Purpose of the Research: The study aims to comparatively evaluate the energy performance of a representative office building in Kashan according to Chapter 19 and examine its alignment with the relevant requirements of China's ESGB and Singapore's Green Mark 2021. The research also evaluates the contribution of a photovoltaic system to reducing energy consumption and electricity purchased from the grid. Accordingly, the study seeks to determine the effectiveness of Chapter 19 as a basis for energy reduction and identify the regulatory areas that require further development to approach the broader scope of international green building assessment systems. Methodology: The research follows a quantitative approach and is applied in purpose, with a descriptive-analytical method based on building energy modeling and simulation. A two-story office building with a total useful floor area of 480 m², located in Kashan's hot-arid climate, was selected as the case study. A three-dimensional model was developed in SketchUp and transferred through OpenStudio to EnergyPlus version 23.2. Annual energy simulations were performed using a six-minute time step and considering climatic conditions, envelope properties, occupancy schedules, internal loads, lighting, equipment, and HVAC systems. Three simulation scenarios were developed. The Base Case represented the building without energy optimization measures and included uninsulated walls and roof, single-glazed windows, a conventional heating system, conventional cooling equipment, and higher air-infiltration rates. The Optimized Scenario incorporated the requirements of Chapter 19, including a 15-degree adjustment in building orientation, improved

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	thermal insulation, Low-E windows, more efficient heating and cooling systems, reduced air infiltration, and horizontal shading. The third scenario combined the optimized building with a 40 kWp photovoltaic system consisting of 114 polycrystalline 350 W panels with a total area of 228 m². Because measured operational data were not available, model verification was performed using three complementary procedures: annual energy-balance checking, sensitivity analysis of key parameters, and comparison of the resulting energy-use intensity with values reported for comparable office buildings in hot-arid climates. The simulated energy indicators were subsequently compared with relevant ESGB and Green Mark criteria. A sequential parametric analysis was also used to determine the relative contribution of individual optimization measures to the reduction in annual energy consumption. Findings and Discussion: The annual simulation results showed that energy consumption decreased from 75,823 kWh in the Base Case to 58,301 kWh in the Chapter 19-compliant Optimized Scenario, corresponding to a 23.11% reduction. The largest individual contributions to this reduction were associated with optimal building orientation (7.03%) and continuous thermal insulation of the envelope (5.08%), followed by improved heating and cooling systems (4.52%), Low-E windows (3.36%), and horizontal shading (3.12%). These results indicate that reducing the building's energy demand through coordinated envelope and system improvements is more influential than relying solely on renewable energy generation. The integration of the 40 kWp photovoltaic system produced approximately 40,500 kWh annually and reduced electricity purchased from the grid to 17,850 kWh per year. The resulting net energy use intensity reached 37.19 kWh/m²/year. Nevertheless, photovoltaic generation was insufficient to fully offset the building's annual energy demand; therefore, the building did not achieve a true near-zero-energy condition. The comparative assessment revealed that the building performed relatively well against the energy-saving requirements of ESGB. It achieved the required energy-saving improvement, complied with the assessed envelope and window-to-wall-ratio criteria, and satisfied the requirement for energy simulation. However, deficiencies remained in air-infiltration testing, operational energy management and monitoring, mechanical ventilation with heat recovery, and the extent of renewable-energy integration. Based on the eight shared criteria considered in the study, the project's alignment with ESGB was 50%. The comparison with Green Mark 2021 revealed a more substantial gap. The calculated Envelope Thermal Transfer Value remained below the 50 W/m² limit for non-residential buildings, indicating acceptable overall envelope performance according to this indicator. However, the project did not satisfy the prescribed U-value requirements for individual envelope components and lacked several measures associated with advanced building performance, including mechanical ventilation with heat recovery, air-infiltration testing, continuous energy management, and sufficient renewable-energy contribution. The resulting alignment index with Green Mark was only 12.5% (1 of 8 criteria). These findings indicate that the principal difference between Chapter 19 and the two international systems is not limited to the stringency of thermal requirements. More importantly, the international systems cover a broader range of operational and environmental performance dimensions. Chapter 19 can therefore provide an effective regulatory basis for reducing operational energy consumption, but compliance with its requirements alone does not ensure comprehensive green-building performance or near-zero-energy operation. Conclusion: The study demonstrates that applying the energy-efficiency measures of Chapter 19 can substantially improve the performance of office buildings in hot-arid climates. In the case study, the optimized configuration reduced annual energy consumption by 23.11%, while the photovoltaic system further reduced dependence on grid electricity. However, the building remained above the near-zero-energy threshold because renewable generation did not completely offset annual demand. The comparative assessment also shows that the main limitation of Chapter 19 is not simply insufficiently stringent thermal requirements, but its narrower scope compared with comprehensive green building assessment systems. Greater alignment with ESGB and Green Mark would require further development of requirements for envelope performance, air-infiltration control and testing, mechanical ventilation with heat recovery, renewable-energy integration, and

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	operational energy monitoring and management. The findings are limited to a single office building in the hot-arid climate of Kashan and rely on simulation-based verification rather than measured operational data. Future studies should therefore examine additional building typologies and Iranian climate zones and incorporate field measurements, air-infiltration testing, and long-term operational monitoring. Developing a locally adapted green building assessment framework that integrates energy performance, renewable energy, indoor environmental quality, operational management, life-cycle carbon, and Iran's climatic conditions could also provide a basis for future revisions of national building regulations. Funding: There is no funding support. Authors' Contribution: Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. 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. AI Usage Declaration: The authors declare that ChatGPT was used for language polishing. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the authors. Acknowledgments: We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

Highlight

- Chapter 19 reduced energy use by 23.11%;
- A 40 kWp PV system reduced grid dependence;
- Chapter 19 has a narrower green-building scope.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Ebadi, R., & Golsanamlou, M. (2025). Comparative Assessment of the Energy Performance of an Office Building Based on Chapter 19 with ESGB and Green Mark. *The Art of Green Management*, 3(3), 7-28. [10.30480/agm.2026.6574.1083](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1548.html

*. Corresponding Author (Email: me.golsanamlou@tabriziau.ac.ir) / (Phone: +989363395653)



ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی ساختمان اداری مبتنی بر مبحث ۱۹ با ئی.اس.جی.بی و گرین مارک^۲

رضا عبادی^(۱)، مهران گل صنم^(۲)

۱- کارشناس ارشد فناوری معماری، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. (<https://orcid.org/0009-0003-2060-5955>)

۲- کارشناس ارشد معماری و انرژی، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. (<https://orcid.org/0009-0009-9191-306X>)

ناشر: دانشگاه هنر ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶ صص: ۲۸-۷	مقدمه: افزایش الزامات کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد زیست محیطی ساختمان‌ها، ضرورت بازنگری چارچوب‌های مقرراتی و مقایسه آن‌ها با استانداردهای بین‌المللی را برجسته کرده است. در ایران، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۹) چارچوب اصلی مدیریت مصرف انرژی را ارائه می‌دهد، اما میزان انطباق آن با استانداردهای بین‌المللی نیازمند بررسی است.
واژگان کلیدی: ارزیابی تطبیقی، ساختمان نزدیک به صفر انرژی، مبحث ۱۹، ئی.اس.جی.بی، گرین مارک	هدف پژوهش: ژوهرش حاضر با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری دوطبقه در شهر کاشان بر اساس الزامات مبحث ۱۹ و مقایسه آن با استانداردهای انرژی و پایداری ساختمان در چین و سنگاپور، یعنی ئی.اس.جی.بی و گرین مارک، انجام شده است.
	روش‌شناسی: این پژوهش با رویکرد کمی و روش شبیه‌سازی انرژی انجام شد. عملکرد ساختمان با استفاده از نرم‌افزارهای این‌استودیو ^۴ و انرژی‌پلاس ^۴ در سناریوهای مختلف بررسی شد. پس از اعمال الزامات مبحث ۱۹ و راهکارهای بهبود عملکرد انرژی، سامانه فتوولتائیک با ظرفیت ۴۰ کیلووات‌پیک نیز به مدل افزوده و نتایج با معیارهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک مقایسه شد.
	یافته‌ها و بحث: نتایج نشان داد مصرف سالانه انرژی با اجرای راهکارهای بهینه‌سازی از ۷۵۸۲۳ به ۵۸۳۰۱ کیلووات‌ساعت کاهش یافت که معادل ۱۱/۲۳ درصد است. همچنین، سامانه فتوولتائیک متشکل از ۱۱۴ پنل با سطح ۲۲۸ مترمربع، مصرف نهایی برق از شبکه را به ۱۷۸۵۰ کیلووات‌ساعت در سال کاهش داد و شدت مصرف انرژی خالص به مقدار ۳۷/۱۹ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال رسید. مقایسه تطبیقی نشان داد ساختمان از نظر صرفه‌جویی انرژی عملکرد قابل‌قبولی دارد، اما در زمینه نفوذپذیری هوا، تهویه مکانیکی، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری با برخی الزامات ئی.اس.جی.بی و گرین مارک فاصله دارد.
	نتیجه‌گیری: در نتیجه تقویت الزامات مبحث ۱۹ در زمینه عملکرد حرارتی پوسته، کنترل نفوذپذیری هوا، تهویه مکانیکی، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری می‌تواند به همگرایی بیشتر مقررات ملی با استانداردهای بین‌المللی ساختمان‌های کم‌مصرف و پایدار کمک کند.
	نکات برجسته: - کاهش ۲۳/۱۱ درصدی مصرف انرژی با اجرای مبحث ۱۹ - فتوولتائیک ۴۰ کیلوواتی وابستگی به شبکه را کاهش داد؛ - مبحث ۱۹ پوشش الزامات سبز، دامنه محدودتری دارد.

ارجاع به این مقاله: عبادی، رضا و گل‌صنملو، مهران (۱۴۰۴). ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی ساختمان اداری مبتنی بر مبحث ۱۹ با ئی.اس.جی.بی و گرین‌مارک. هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۲۸-۷. [10.30480/agm.2026.6574.1083](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6574.1083>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1548.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز
استفاده است. [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) قابل

©2024, UST. All rights reserved.

* نویسنده مسئول (رایانامه: me.golsanamlou@tabriziau.ac.ir) / (تلفن: +۹۸۹۳۶۳۳۹۵۶۵۳)

بخش ساختمان با سهم حدود ۳۶ درصد از مصرف نهایی انرژی و ۳۹ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن مرتبط با انرژی در سطح جهانی، یکی از محوری‌ترین بخش‌ها برای سیاست‌گذاری در جهت کاهش مصرف انرژی و مقابله با تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود (Chen et al., 2023). در پاسخ به این چالش، کشورهای مختلف علاوه بر تدوین الزامات حداقلی انرژی، به توسعه استانداردها و نظام‌های ارزیابی عملکرد ساختمان روی آورده‌اند تا عملکرد ساختمان‌ها را از منظر مصرف انرژی، کیفیت محیط داخلی، انرژی‌های تجدیدپذیر و سایر ابعاد پایداری ارزیابی کنند (Filippini & Obrist, 2022). در ایران، بخش ساختمان به دلیل وابستگی قابل‌توجه مصرف انرژی به سوخت‌های فسیلی و همچنین تفاوت شرایط اقلیمی، کالبدی و الگوی بهره‌برداری ساختمان‌ها با بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، با چالش‌های ویژه‌ای در زمینه بهبود بهره‌وری انرژی مواجه است (یارمحمد و مهدیزاده سراج، ۱۴۰۱). مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، به‌عنوان چارچوب اصلی قانونی در این حوزه، الزامات مربوط به کاهش نیاز و مصرف انرژی ساختمان را تعیین می‌کند (احمدنژاد و یکتا خشک‌وایی، ۱۴۰۳). ویرایش ۱۳۹۹ این مبحث، موضوعاتی همچون عملکرد حرارتی پوسته، تأسیسات مکانیکی و الکتریکی و روش‌های ارزیابی کارایی انرژی ساختمان را پوشش می‌دهد. با این حال، چارچوب آن عمدتاً بر تعیین الزامات عملکردی و حداقل‌های موردنیاز برای کاهش مصرف انرژی متمرکز است و ارتباط آن با برخی رویکردهای جدید در ارزیابی ساختمان‌های پایدار، از جمله توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، ارزیابی جامع عملکرد ساختمان و الزامات بهره‌برداری، نیازمند بررسی بیشتر است.

این موضوع در شهرهایی با اقلیم گرم و خشک، مانند کاشان، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا شرایط اقلیمی، بارهای سرمایشی و گرمایشی، ویژگی‌های پوسته ساختمان و ظرفیت استفاده از انرژی خورشیدی می‌توانند به‌طور هم‌زمان بر عملکرد انرژی ساختمان اثرگذار باشند (Ibrahim et al., 2025). بنابراین، صرف بررسی انطباق ساختمان با الزامات حداقلی مبحث ۱۹ نمی‌تواند تصویر کاملی از سطح عملکرد انرژی و ظرفیت آن برای دستیابی به عملکردهای بالاتر ارائه کند.

از سوی دیگر، استانداردها و نظام‌های ارزیابی بین‌المللی، به‌ویژه در کشورهای آسیایی، الزامات گسترده‌تری را برای ارزیابی عملکرد ساختمان دنبال می‌کنند. نظام گرین مارک سنگاپور علاوه بر عملکرد انرژی، معیارهایی مرتبط با عملکرد پوسته، سامانه‌های مکانیکی، کیفیت محیط داخلی و سایر ابعاد پایداری را در ارزیابی ساختمان مورد توجه قرار می‌دهد (Jangyoung & Kwok Wai, 2016). همچنین استاندارد ئی.اس.جی.بی.چین، رویکردی چندبعدی به عملکرد ساختمان دارد و در نسخه‌های جدیدتر خود توجه بیشتری به مصرف انرژی، انتشار کربن و عملکرد زیست‌محیطی نشان داده است (Wang et al., 2024). تفاوت در دامنه، ساختار و سطح الزامات این نظام‌ها با مبحث ۱۹، این پرسش را مطرح می‌کند که یک ساختمان اداری منطبق با الزامات مبحث ۱۹ در مقایسه با معیارهای انرژی و پایداری این دو نظام چه سطحی از عملکرد را نشان می‌دهد.

با وجود مطالعات متعدد درباره عملکرد انرژی ساختمان، ساختمان‌های سبز و نظام‌های رتبه‌بندی بین‌المللی، مقایسه مستقیم عملکرد یک ساختمان اداری در بستر اقلیمی ایران که بر اساس الزامات مبحث ۱۹ ویرایش ۱۳۹۹ طراحی شده باشد، با معیارهای ئی.اس.جی.بی.چین و گرین مارک سنگاپور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات تطبیقی موجود عمدتاً به مقایسه ساختار، معیارها و وزن‌دهی نظام‌های رتبه‌بندی مختلف پرداخته‌اند و کمتر به ارزیابی عملکرد انرژی یک نمونه ساختمان در شرایط اقلیمی ایران و بررسی میزان انطباق آن با الزامات این دو نظام آسیایی توجه کرده‌اند. از این رو، شکاف اصلی پژوهش حاضر در پیوند دادن الزامات مقررات ملی ایران با شاخص‌های عملکردی دو نظام ارزیابی آسیایی و سنجش این ارتباط در یک ساختمان اداری واقع در اقلیم گرم و خشک ایران است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری نمونه در شهر کاشان، ابتدا عملکرد انرژی ساختمان را بر اساس الزامات مبحث ۱۹ ویرایش ۱۳۹۹ ارزیابی کرده و سپس میزان انطباق آن را با معیارهای مرتبط در استاندارد ئی.اس.جی.بی و نظام گرین مارک بررسی می‌کند. همچنین، اثر افزودن سامانه فتوولتائیک بر عملکرد انرژی ساختمان و ظرفیت آن برای کاهش مصرف برق از شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از این رو، پرسش اصلی پژوهش حاضر این است که: ساختمان اداری منطبق با الزامات مبحث ۱۹ در مقایسه با معیارهای انرژی و پایداری استانداردهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک چه سطحی از عملکرد و انطباق را نشان می‌دهد، و افزودن سامانه فتوولتائیک تا چه میزان می‌تواند این شکاف عملکردی را کاهش داده و ساختمان را به شرایط نزدیک به صفر انرژی نزدیک‌تر کند؟



۲- مبانی نظری

پژوهش حاضر بر پایه سه حوزه اصلی دانش شکل گرفته است: نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز، مفهوم ساختمان‌های صفر انرژی و رویکردهای کربن‌خشی. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که سیستم‌های رتبه‌بندی مختلف (لید، برییم، کاسی، گرین مارک، ئی.اس.جی.بی) با وجود اشتراک در اهداف کلی پایداری، در وزن‌دهی معیارها، سطح سخت‌گیری و تناسب اقلیمی-فرهنگی تفاوت‌های معناداری دارند. از سوی دیگر، ادبیات پژوهش بر لزوم ترکیب راهکارهای غیرفعال، فعال و تجدیدپذیر برای کاهش مصرف انرژی تأکید می‌کند. این مبانی نظری، چارچوب لازم برای مقایسه تطبیقی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران با استانداردهای آسیایی را فراهم می‌آورد.

۲-۱- نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز و مطالعات تطبیقی

پژوهش‌های متعددی به مقایسه نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز پرداخته‌اند. لی با مقایسه پنج نظام ارزیابی از جمله ئی.اس.جی.بی نشان داد که لید سخت‌گیرانه‌ترین الزامات را دارد و همه سیستم‌ها بر اساس عملکرد نسبی عمل می‌کنند (Lee, 2012). در مقابل، آگاروال و همکاران با بررسی ساختمان‌های مسکونی دارای گواهی گرین مارک در سنگاپور، پدیده‌ای موسوم به «اثر ثروت» را شناسایی کردند که طی آن ساکنان به دلیل صرفه‌جویی در هزینه انرژی، مصرف آب و برق خود را افزایش می‌دهند (Agarwal et al., 2024). این یافته با نتایج گنگ و همکاران هم‌راستاست که نشان دادند حدود ۲۵ درصد ساختمان‌های دارای گواهی سبز عملکردی ضعیف‌تر از طراحی اولیه دارند (Geng et al., 2019).

در سطح تطبیقی، دوآن و همکاران تفاوت‌های معنادار سیستم‌های رتبه‌بندی را در وزن‌دهی معیارها و سطح سخت‌گیری نشان دادند (Doan et al., 2017)، در حالی که وارما و پالانیپان دریافتند سیستم‌های آسیایی مانند کاسی و گرین مارک تناسب بیشتری با شرایط اقلیمی و فرهنگی منطقه خود دارند (Varma & Palaniappan, 2019). ماتونی و همکاران نیز ناهمگونی معیارها و وزن‌دهی میان ابزارهایی چون کاسی، گرین استار، برییم، لید و ایتاکازا تأیید کردند (Mattoni et al., 2018). در حوزه آسیا، کاسی ژاپن با استفاده از شاخص نسبت کیفیت محیط ساخته‌شده به بار محیطی^۱ ساختمان‌ها را در پنج سطح اس تا سی طبقه‌بندی می‌کند (MURAKAMI et al., 2004)، و در اروپا استاندارد مینرژ۱^۲ سوئیس، به‌ویژه سطح مینرژ۱ آ، به مفهوم صفر انرژی بسیار نزدیک است (Hall et al., 2014). برای مقایسه فشرده نظام‌های مطرح‌شده در ادبیات، جدول ۱ ساختار، ابعاد ارزیابی و سطوح گواهینامه شش نظام بین‌المللی پرکاربرد را در کنار هم نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه تطبیقی نظام‌های بین‌المللی ارزیابی ساختمان سبز

سیستم ارزیابی (کشور مبدأ)	نوع رویکرد ارزیابی	ابعاد کلیدی ارزیابی	درجات گواهینامه
لید (ایالات متحده)	رتبه‌بندی چندسطحی داوطلبانه	سایت پایدار، بهره‌وری آب، انرژی و اتمسفر، مصالح و منابع، کیفیت محیط داخلی، نوآوری	گواهینامه، نقره، طلا، پلاتینیوم
برییم (بریتانیا)	رتبه‌بندی چندسطحی داوطلبانه	مدیریت، بهداشت و سلامت، انرژی، آب، مصالح، زمین و بوم‌شناسی، آلودگی و حمل‌ونقل، پسماند	قابل قبول، خوب، خیلی خوب، عالی، ممتاز
کاسی (ژاپن)	نسبت کیفیت محیط به بار محیطی	کیفیت داخلی، عملکرد، محیط‌زیست خرد، انرژی، منابع، محیط‌زیست کلان	C (ضعیف) تا S (عالی)
گرین استار (استرالیا)	رتبه‌بندی ستاره‌ای	مدیریت، کیفیت محیط داخلی، انرژی و حمل‌ونقل، آب و مصالح، زمین و بوم‌شناسی، آلودگی و نوآوری	۴ تا ۶ ستاره
ای.اس.جی.بی (چین)	رتبه‌بندی ستاره‌ای (۱ تا ۳ ستاره)	صرفه‌جویی زمین، صرفه‌جویی انرژی، صرفه‌جویی آب، صرفه‌جویی مصالح، کیفیت محیط داخلی، مدیریت بهره‌برداری	۱ تا ۳ ستاره
گرین مارک (سنگاپور)	رتبه‌بندی چندسطحی داوطلبانه	سایت پایدار، بهره‌وری آب، انرژی و اتمسفر، مصالح و منابع، کیفیت محیط داخلی، نوآوری	گواهینامه، گلد، گلد پلاس، پلاتینیوم
مبحث ۱۹ مقررات ملی (ایران)	کد حداقلی عملکرد انرژی	مدیریت، بهداشت و سلامت، انرژی، آب، مصالح، زمین و بوم‌شناسی، آلودگی و حمل‌ونقل، پسماند	تطبیق/عدم تطبیق با آستانه حداقلی مصرف انرژی

۲-۲- جایگاه مبحث ۱۹ در چارچوب نظری مقررات حداقلی

از منظر نظری، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران در دسته کدهای حداقلی عملکرد انرژی قرار می‌گیرد؛ رویکردی که بر خلاف نظام‌های رتبه‌بندی چندسطحی (مانند گرین مارک و ئی.اس.جی.بی)، به‌جای تعریف طیفی از سطوح عملکرد، صرفاً یک آستانه حداقلی تعیین می‌کند (Soltan Ahmadi et al., 2024). این تفاوت پارادایمی پیامد مهمی دارد: کدهای حداقلی به‌طور ذاتی فاقد سازوکار تشویقی برای فراتر رفتن از آستانه هستند و معمولاً بعد پایش عملکرد در دوره بهره‌برداری را پوشش نمی‌دهند (Heravi et al., 2016)؛ در حالی‌که نظام‌های رتبه‌بندی با تعریف سطوح رقابتی مانند (طلایی تا پلاتینیوم) در گرین مارک انگیزه بهبود مستمر ایجاد می‌کنند. کاظمی نیز نشان داد که در غیاب چنین انگیزه‌ای، عواملی مانند مسائل اقتصادی و ضعف اجرا مانع از تحقق کامل بهره‌وری انرژی می‌شوند (Kazemi, 2023). بنابراین، مقایسه مبحث ۱۹ با ئی.اس.جی.بی و گرین مارک صرفاً مقایسه دو عدد یا آستانه نیست، بلکه مقایسه دو پارادایم مقرراتی متفاوت (حداقلی در برابر رتبه‌بندی چندسطحی) است که این پژوهش در پی سنجش فاصله میان آن‌هاست.

۲-۳- ساختمان نزدیک به صفر انرژی

مفهوم صفر انرژی را می‌توان نقطه تلاقی نظری دو رویکرد پیشین دانست: از یک‌سو معیار کمی و قابل سنجش ارائه می‌دهد (سهم تولید تجدیدپذیر از مصرف)، و از سوی دیگر به‌جای صرفاً کاهش بار مصرف، بر توازن میان مصرف و تولید تمرکز دارد. مارسزال و همکاران نشان دادند که به‌دلیل محدودیت‌های اقتصادی و فضایی، اغلب پروژه‌ها به‌جای صفر مطلق، به بازه ۵۰ تا ۹۰ درصد پوشش تجدیدپذیر می‌رسند (Marszal et al., 2011)؛ این یافته نشان می‌دهد که صفر انرژی یک طیف است، نه یک نقطه، و همین ویژگی آن را به چارچوبی مناسب برای مقایسه سیستم‌های رتبه‌بندی که خود چندسطحی هستند، تبدیل می‌کند. سارتوری و همکاران با تأکید بر تعامل ساختمان شبکه (Sartori et al., 2012) و عمرانی و همکاران با تفکیک این حوزه به سه محور بهینه‌سازی مصرف، تولید، ذخیره‌سازی و روش‌شناسی (Omran et al., 2022)، عملاً چارچوبی تحلیلی فراهم کرده‌اند که در این پژوهش برای ساختاردهی به مقایسه مبحث ۱۹ (که عمدتاً بر بهینه‌سازی مصرف تمرکز دارد) با ابعاد گسترده‌تر ئی.اس.جی.بی و گرین مارک (که تولید تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری را نیز پوشش می‌دهند) به کار گرفته می‌شود. وی و اسکای نیز نشان دادند دستیابی به این هدف نیازمند اقدام هم‌زمان در چند لایه پوسته است، نه یک راهکار منفرد (Wu & Skye, 2021)؛ نکته‌ای که توجیه نظری ترکیب هم‌زمان الزامات مبحث ۱۹ با سامانه فتوولتائیک^۳ به خصوص در اقلیم گرم و خشک در طرح پژوهش حاضر است (جعفری و صلواتیان، ۱۴۰۲). همچنین، مطالعاتی درباره استفاده از سایبان و جهت‌گیری ساختمان صورت گرفته که در آن بر نقش کنترل تابش خورشیدی و ویژگی‌های هندسی ساختمان در بهبود عملکرد انرژی تأکید کرده‌اند (آرام و ایرجی، ۱۴۰۱؛ شیخی نسلجی و مهدیزاده سراج، ۱۴۰۱).

۲-۴- کربن و انرژی تجدیدپذیر

بررسی ادبیات در کربن و چرخه حیات نشان می‌دهد نابرابری نظری دیگری در نظام‌های ارزیابی وجود دارد: اولانرو و همکاران دریافتند اعتبارات کربن عملیاتی سه برابر بیشتر از کربن نهفته مورد توجه سیستم‌های گواهی‌دهی قرار می‌گیرد (Olanrewaju et al., 2024)، که نشان می‌دهد این نظام‌ها عمدتاً بر مرحله بهره‌برداری متمرکزند، نه کل چرخه حیات؛ همین سوگیری در مبحث ۱۹ نیز به‌طور مشابه دیده می‌شود، چرا که این مبحث نیز عمدتاً معطوف به مصرف دوره بهره‌برداری است. از سوی دیگر، ژانگ و همکاران نشان دادند روش‌های ارزیابی انرژی تجدیدپذیر در نظام‌هایی مانند لید و برییم هنوز جای بهبود دارد (Zhang et al., 2019)، و حسن و همکاران نشان دادند ترکیب راهکارهای غیرفعال و فعال می‌تواند ۳۰ تا ۵۰ درصد مصرف را کاهش دهد (A.H. et al., 2026). علاوه بر این در حوزه ابزارهای خط و مشی گذاری توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر سلیمانخانی نشان داد برای تعیین سهم انرژی‌های نو از سبد انرژی باید مجموعه از ابزارهای خط مشی گذاری بکار گرفته شود، تا روند استفاده از انرژی‌های نو در ایران بهبود یابد و با توجه به قیمت ارزان نفت و گاز در ایران برای توسعه هر چه بیشتر انرژی‌های تجدیدپذیر باید با کمک تکنولوژی قیمت تمام شده تولید انرژی از طریق انرژی‌های تجدید پذیر، قابل رقابت با انرژی‌های فسیلی شود (سلیمانخانی، ۱۴۰۱). این شواهد در کنار هم نشان می‌دهند که وزن‌دهی به انرژی تجدیدپذیر، برخلاف وزن‌دهی به کاهش مصرف، هنوز در بسیاری از نظام‌ها از جمله مبحث ۱۹ جایگاه نظری روشنی ندارد؛ خلأیی که مبنای فرضیه ضمنی این پژوهش درباره فاصله مبحث ۱۹ از استانداردهای آسیایی در بعد تجدیدپذیرهاست.

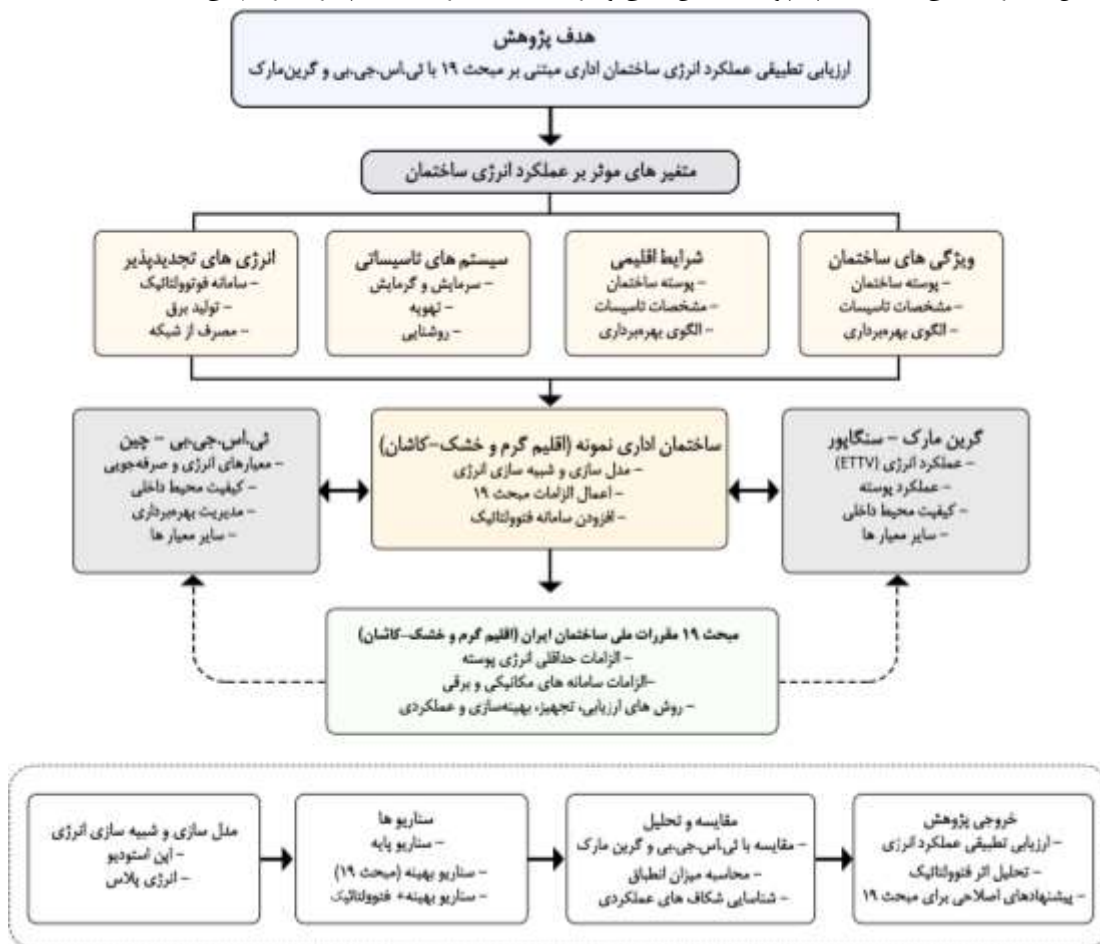
مرور نظری فوق سه شکاف مفهومی را آشکار می‌کند که چارچوب تحلیلی این پژوهش را شکل می‌دهند: (۱) شکاف میان انطباق طراحی و عملکرد واقعی، که ضرورت شبیه‌سازی به‌جای صرفاً تطبیق چک‌لیستی را توجیه می‌کند؛ (۲) شکاف پارادایمی میان



کدهای حداقلی (مبحث ۱۹) و نظام‌های رتبه‌بندی چندسطحی (ئی.اس.جی.بی، گرین مارک)، که چارچوب مقایسه را تعیین می‌کند؛ و (۳) شکاف وزن‌دهی در بعد انرژی تجدیدپذیر و چرخه حیات، که محور اصلی تحلیل تطبیقی این پژوهش خواهد بود. تجربه استاندارد مینرژئ سوئیس (Hall et al., 2014) و کاسی ژاپن با شاخص ترکیبی نسبت کیفیت محیط ساخته‌شده به بار محیطی؛ نشان می‌دهد که عبور از رویکرد حداقلی به رویکرد چندسطحی و ترکیبی، مسیری است که استانداردهای پیشرو طی کرده‌اند؛ مسیری که در پژوهش ماهان و خرم رویی در خصوص سامانه ارزیابی کازی دریافتند که مبحث ۱۹ هنوز در ابتدای آن قرار دارد (ماهان و خرم رویی، ۱۴۰۲).

۲-۵- مدل مفهومی پژوهش

در چارچوب مفهومی پژوهش (تصویر ۱)، شرایط اقلیمی و مشخصات ساختمان به‌عنوان ورودی‌های پایه، بر عملکرد انرژی ساختمان اثر می‌گذارند؛ مبحث ۱۹ چارچوب مقرراتی طراحی و ارزیابی را تعیین می‌کند؛ شبیه‌سازی انرژی شاخص‌های کمی عملکرد ساختمان را استخراج می‌کند؛ سپس این شاخص‌ها با معیارهای متناظر ئی.اس.جی.بی و گرین مارک مقایسه می‌شوند. در مرحله بعد، سامانه فتوولتائیک به‌عنوان راهکار تولید انرژی تجدیدپذیر وارد مدل شده و تأثیر آن بر مصرف نهایی انرژی و برق دریافتی از شبکه ارزیابی می‌شود. بدین ترتیب، چارچوب پژوهش امکان بررسی هم‌زمان عملکرد ساختمان در وضعیت پایه، انطباق با مقررات ملی، مقایسه با چارچوب‌های بین‌المللی و اثر یک راهکار انرژی تجدیدپذیر را فراهم می‌کند.



تصویر ۱- مدل مفهومی پژوهش

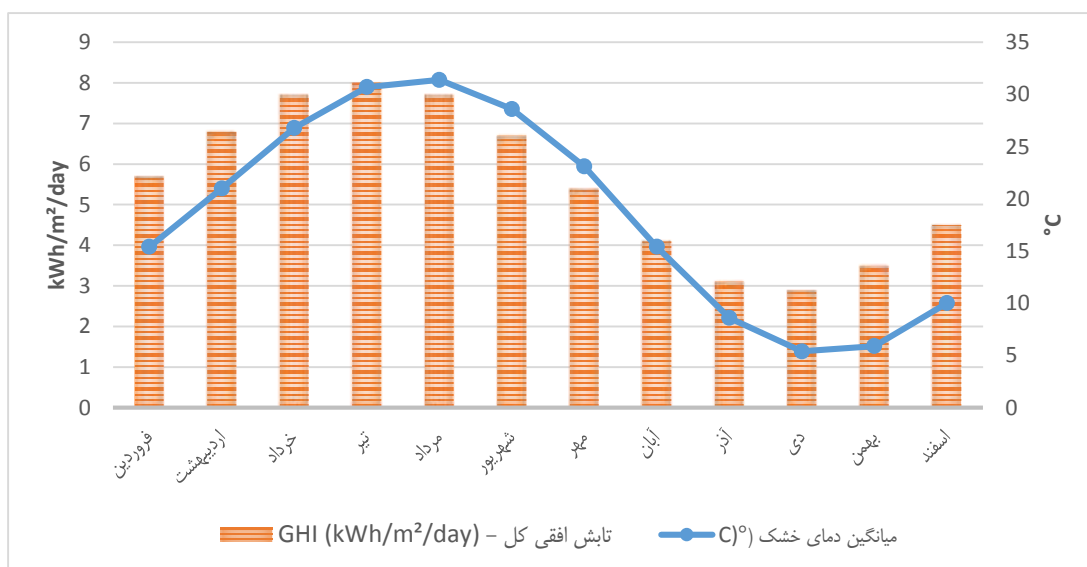
۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر رویکرد، کمی، از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی تحلیلی و مبتنی بر مدل سازی و شبیه‌سازی انرژی است. هدف پژوهش، ارزیابی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری نمونه در اقلیم گرم و خشک کاشان و بررسی میزان انطباق آن با الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۹) و معیارهای مرتبط در استاندارد ارزیابی ساختمان سبز

چین (ئی.اس.جی.بی) و نظام گرین مارک سنگاپور است. همچنین، تأثیر افزودن سامانه فتوولتائیک بر عملکرد انرژی ساختمان به صورت کمی ارزیابی می شود. بنابراین، روش پژوهش بر پایه ایجاد مدل انرژی ساختمان، شبیه سازی سناریوهای مختلف، استخراج شاخص های کمی عملکرد انرژی و در نهایت مقایسه نتایج با معیارهای سه چارچوب مورد بررسی است. جزئیات هر یک از مراحل و نحوه اجرای آن ها در بخش های بعدی به تفصیل ارائه خواهد شد.

۳-۱- اقلیم و داده های اقلیمی

شهر کاشان به عنوان نمونه اقلیمی پژوهش انتخاب شد. این شهر در مختصات جغرافیایی $59^{\circ}33'$ عرض شمالی و $26^{\circ}51'$ طول شرقی و در ارتفاع ۹۴۰ متر از سطح دریا قرار دارد و بر اساس طبقه بندی کوپن گایگر دارای اقلیم گرم و خشک است. میانگین دمای سالانه حدود ۲۰ درجه سانتی گراد، حداکثر دمای تابستان ۴۲ درجه سانتی گراد، حداقل دمای زمستان صفر درجه سانتی گراد، میانگین بارش سالانه حدود ۱۰۰ میلی متر و رطوبت نسبی متوسط ۳۶ درصد است. بر اساس داده های اقلیمی شهر کاشان، تصویر ۲ میانگین ماهانه دمای خشک بیرون و شدت تابش افقی کل را نشان می دهد. این دو شاخص به ترتیب بیانگر نیاز گرمایشی/سرمایشی و پتانسیل تولید انرژی خورشیدی در منطقه هستند.

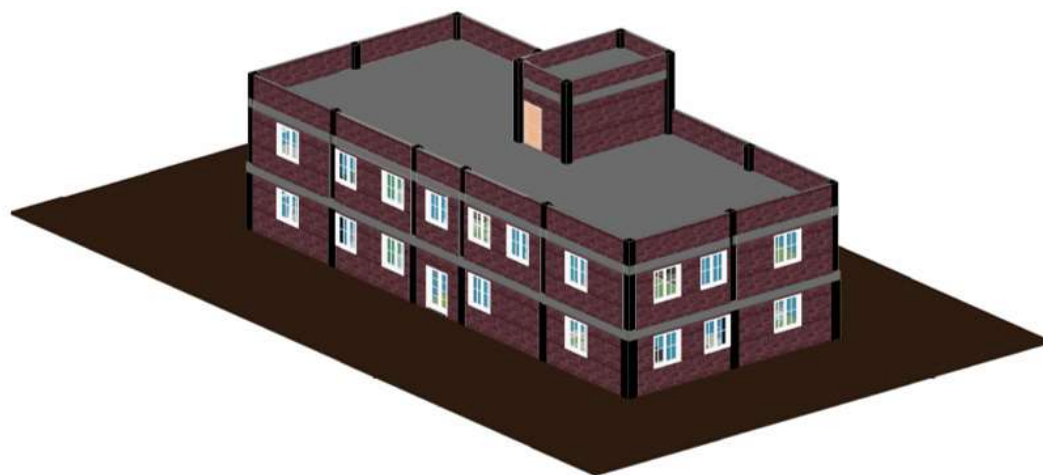


تصویر ۲- داده های میانگین ماهانه دمای خشک و تابش افقی کل براساس اطلاعات اقلیمی شهر کاشان

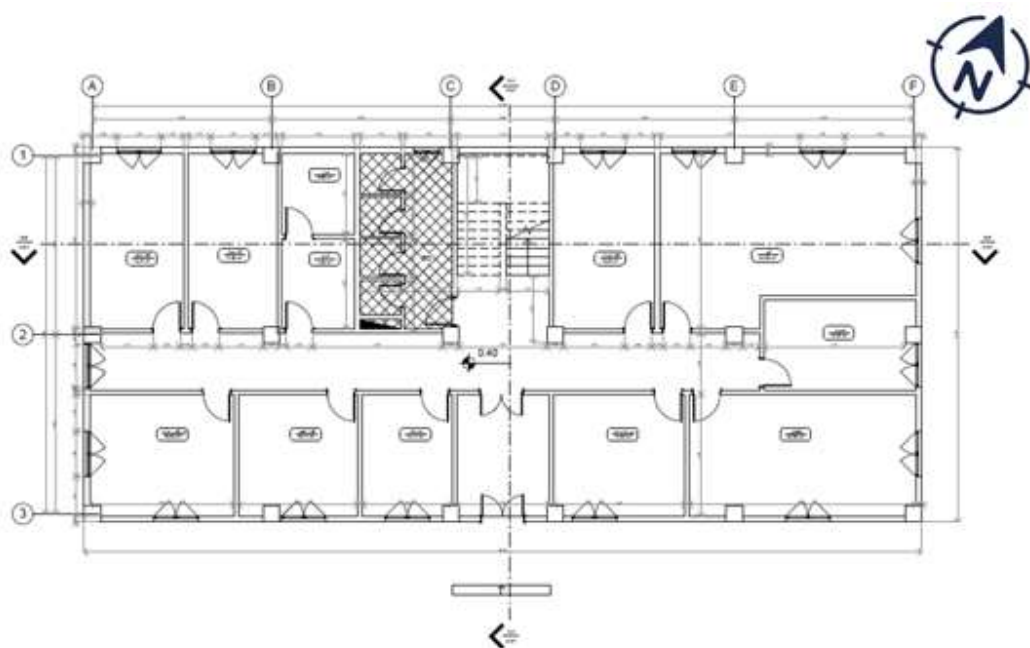
۳-۲- نمونه مورد مطالعه

نمونه مورد مطالعه (تصویر ۳ الف))، یک ساختمان اداری دوطبقه با زیربنای مفید ۴۸۰ مترمربع (۲۴۰ مترمربع در هر طبقه) است که پلان تیپ آن شامل فضاهای اداری باز، اتاق های مدیریت، سالن جلسات و فضاهای خدماتی است (تصویر ۳ ب)). در این پژوهش، سه سناریوی جداگانه تعریف و شبیه سازی شد:

- سناریوی پایه: ساختمان بدون اعمال هرگونه راهکار بهینه سازی انرژی؛ دیوارها و بام فاقد عایق حرارتی پنجره ها تک جداره، سیستم گرمایش شامل پکیج معمولی با راندمان ۷۵٪، سیستم سرمایش کولر گازی با ضریب عملکرد ۱۴/۵ و ۲/۵ و نرخ نفوذ هوا ۰/۸ تعویض هوا در ساعت.
- سناریوی منطبق با مبحث ۱۹ (ویرایش ۱۳۹۹): اعمال تمام الزامات حداقلی مبحث ۱۹ شامل چرخش ۱۵ درجه ای جهت گیری ساختمان، عایق کاری جداره ها دیوار و بام، پنجره های کم گسیل ۵ با ضریب انتقال حرارت $2.0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ، سیستم های تأسیساتی کارآمد پکیج چگالشی با راندمان ۹۰٪ و اسپلیت اینورتر با ضریب بهره وری انرژی فصلی ۴/۲ و کاهش نفوذ هوا به ۰/۵ تعویض در ساعت.
- سناریوی تجدیدپذیر: سناریوی شماره ۲ به همراه سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک (شامل ۱۱۴ پنل پلی کریستال با توان ۳۵۰ وات) بر روی بام ساختمان.
- نسبت پنجره به دیوار در نماهای جنوبی و شرقی ۳۰ درصد و در نماهای شمالی و غربی ۲۰ درصد لحاظ شد.



(الف)

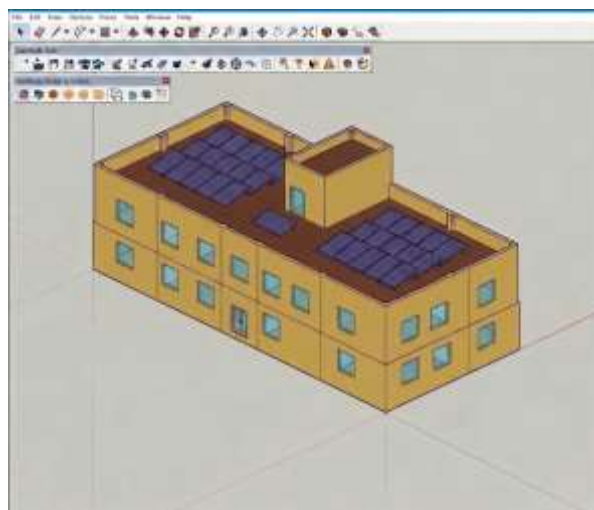


(ب)

تصویر ۳- نمونه مورد مطالعه (الف) مدل سه بعدی (ب) پلان تیپ طبقات

۳-۳- مدل سازی و شبیه سازی انرژی

مدل سه بعدی ساختمان در نرم افزار اسکچاپ^۷ تهیه و از طریق افزونه اُبن استودیو به موتور شبیه سازی انرژی پلاس نسخه ۲۳/۲ متصل شد (تصویر ۴). شبیه سازی با گام زمانی ۶ دقیقه و بر اساس داده های اقلیمی، مشخصات مصالح، برنامه زمانی بهره برداری و بارهای داخلی انجام گرفت. علاوه بر مدل پایه، سناریوی بهینه مطابق الزامات مبحث ۱۹ شامل بهبود مشخصات حرارتی پوسته ساختمان، استفاده از پنجره های کم گسیل، ارتقای سیستم های سرمایش و گرمایش، کاهش نفوذ هوا و نصب سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک نیز تعریف و شبیه سازی شد تا امکان مقایسه عملکرد انرژی ساختمان در شرایط مختلف فراهم شود. تنظیمات و فرضیات کلیدی در جدول ۲ ارائه شده است.



تصویر ۴- هندسه ساختمان مدل شده در اسکچاپ و واسطه اپن استودیو

جدول ۲- تنظیمات و فرضیات کلیدی در شبیه سازی

گروه پارامتر	حالت پایه	حالت بهینه
نرم افزار و گام زمانی	اپن استودیو ۳۰۷ - انرژی پلاس ۲۳۰۲ - گام زمانی: ۶ دقیقه	بدون تغییر
جهت یابی ساختمان	جهت گیری اولیه (محور طولی شرقی - غربی)	چرخش ۱۵ درجه نسبت به جنوب بهینه (به گونه ای که جبهه های جنوبی و شرقی بیشترین دریافت تابش مفید را در زمستان و کمترین دریافت را در تابستان داشته باشند)
ضریب انتقال حرارت دیوار خارجی	$1.089 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، بدون عایق	$0.048 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، با عایق پلی استایرن
ضریب انتقال حرارت بام	$1.05 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، بدون عایق	$0.035 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، با عایق پلی استایرن
ضریب انتقال حرارت پنجره	$5.7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، تک جداره شفاف	$2 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، شیشه کم گسیل
نسبت پنجره به دیوار ۱۸	جنوب و شرق: ۳۰٪ - شمال و غرب: ۲۰٪	بدون تغییر (همراه با سایه بان افقی به عمق ۰.۰۸ متر برای جبهه های جنوبی)
سیستم گرمایش	پکیج معمولی با راندمان ۷۰٪	پکیج چگالشی با راندمان ۹۰٪ (بازده جزئی در ۷۵٪ بار: ۰.۰۸۵)
سیستم سرمایش	کولر گازی با ضریب عملکرد ۲.۰۵	اسپلیت اینورتر با ضریب بهره دوری انرژی فصلی ۴.۰۴۹
تهویه و هوای تازه	۱۰ لیتر بر ثانیه به ازای هر نفر (مطابق اشره ۶۲/۱)	بدون تغییر
نفوذ هوا	۰.۰۸ نرخ تعویض هوا در ساعت	۰.۰۵ نرخ تعویض هوا در ساعت
زون بندی حرارتی	۵ زون حرارتی	بدون تغییر
شرایط مرزی زمین (کف)	دمای ثابت ۱۸ درجه سانتی گراد در عمق ۱ متری	بدون تغییر
الگوی اشغال	روزهای کاری (شنبه تا چهارشنبه) ۸ تا ۱۷؛ تراکم ۰.۰۱ نفر بر مترمربع	بدون تغییر
تعطیلات	آخر هفته (پنجشنبه و جمعه) + ۲۲ روز تعطیل رسمی در سال	بدون تغییر
روشنایی	۸ W/m^2 با حسگر حضور و کنترل نور روز	بدون تغییر
تجهیزات اداری	رایانه، مانیتور، پرینتر 6 W/m^2 با ضریب همزمانی ۰.۰۷	بدون تغییر
ترموستات گرمایش	21°C (اشغال) / 16°C (غیر اشغال)	بدون تغییر
ترموستات سرمایش	24°C (اشغال) / 32°C (غیر اشغال)	بدون تغییر
ضریب انتشار کربن دی اکسید	$0.050 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$	بدون تغییر
سامانه فتوولتائیک	-	۱۱۴ عدد سامانه فتوولتائیک 40 kWp پنل پلی کریستال 350 واتی، سطح کل 228 m^2 ، راندمان مازول 17.05% ، راندمان اینورتر 96% ، تلفات سیستم



۱۲٪ (گردوغبار، کابل، تطابق)، زاویه ۲۵° رو به جنوب، شبیه‌سازی با مازول فتوولتائیک در انرژی پلاس		
بررسی بیلان انرژی سالانه با خطای کمتر از ۰.۵٪ و آزمون حساسیت پارامترهای کلیدی (ضرب انتقال حرارت و نفوذ هوا) جهت تأیید همبستگی منطقی نتایج	راستی آزمایشی مدل	

۳-۴- راستی آزمایشی مدل شبیه‌سازی

راستی آزمایشی مدل شبیه‌سازی در این پژوهش با رویکردی چندمرحله‌ای و کمی انجام شده است تا اطمینان از صحت و دقت نتایج حاصل از انرژی پلاس فراهم شود. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده از ساختمان نمونه، راستی آزمایشی بر اساس سه روش مکمل انجام شده است:

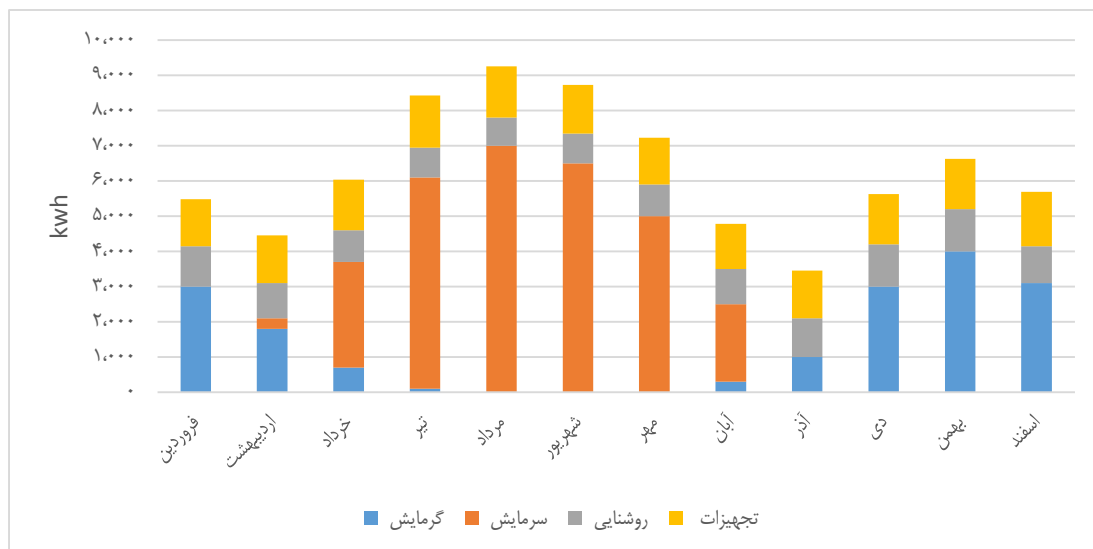
- بیلان انرژی سالانه: در هر دو سناریوی پایه و بهینه، خطای بیلان انرژی سالانه کمتر از ۰.۵٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده همگرایی عددی مناسب حلگرهای انرژی پلاس است.
- آزمون حساسیت پارامترهای کلیدی: نتایج آزمون حساسیت نشان داد که تغییرات $\pm 10\%$ در ضریب انتقال حرارت دیوارها، به ترتیب منجر به تغییرات $\pm 4\%/2$ و $\pm 3\%/8$ در مصرف سالانه انرژی در حالت پایه شد. همچنین، تغییرات $\pm 1\%$ در نرخ نفوذ هوا، مصرف سالانه را به ترتیب $\pm 2\%/1$ و $\pm 1\%/9$ تغییر داد.
- مقایسه با مطالعات مشابه: شدت مصرف انرژی در حالت پایه ($157/96$ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال) و در حالت بهینه ($37/19$ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال) در محدوده‌ی گزارش شده برای ساختمان‌های اداری مشابه در اقلیم‌های گرم و خشک ایران و جهان قرار دارد (Fatemi et al., 2023).

۴- تحلیل داده‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انرژی ساختمان در سناریوهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. تحلیل داده‌ها با هدف شناسایی میزان تأثیر راهکارهای بهینه‌سازی بر مصرف انرژی و مقایسه عملکرد ساختمان در شرایط پایه، حالت منطبق با الزامات مبحث ۱۹ و حالت مجهز به سامانه فتوولتائیک انجام شده است. ابتدا الگوی مصرف انرژی در مقیاس ماهانه و سالانه بررسی و تغییرات مصرف در دوره‌های مختلف سال تحلیل می‌شود. سپس سهم هر یک از راهکارهای بهینه‌سازی، شامل بهبود عملکرد حرارتی پوسته، جهت‌یابی، پنجره‌های کم‌گسیل، سایه‌بان و ارتقای سامانه‌های گرمایش و سرمایش، در کاهش مصرف انرژی ارزیابی خواهد شد. در ادامه، شاخص‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با معیارهای مرتبط در استاندارد ئی.اس.جی.بی چین و نظام گرین مارک سنگاپور مقایسه می‌شوند تا میزان انطباق و شکاف عملکردی ساختمان مشخص شود. در نهایت، اثر استفاده از سامانه فتوولتائیک بر تولید انرژی و کاهش وابستگی ساختمان به برق شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- تحلیل مصرف انرژی و کاهش‌ها

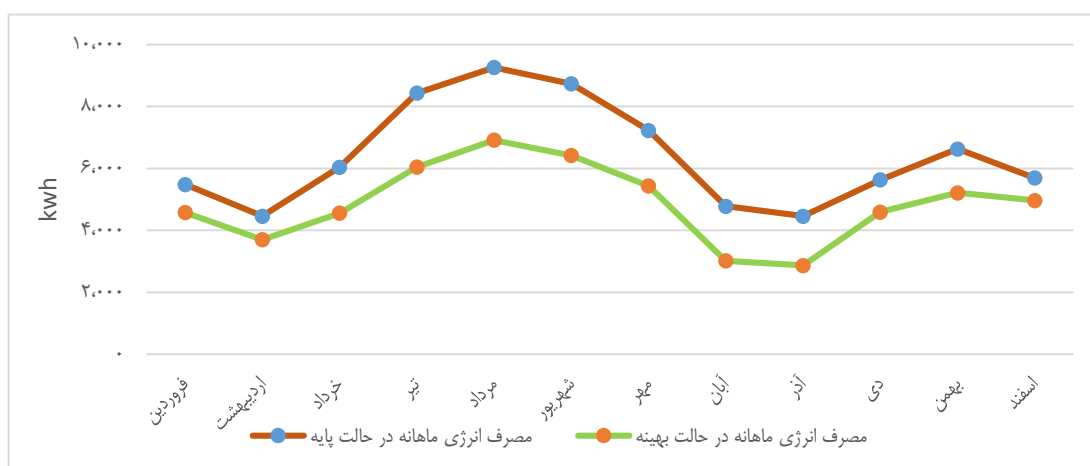
شبیه‌سازی سالانه انرژی در انرژی پلاس برای سناریوهای پایه، بهینه و بهینه + فتوولتائیک انجام شد. بررسی توزیع ماهانه مصرف نشان داد بیشترین مصرف در ماه‌های تیر و مرداد رخ داده که با اوج بار سرمایشی اقلیم گرم و خشک کاشان مطابقت دارد؛ پس از بهینه‌سازی، بیشترین میزان کاهش مربوط به همین دوره‌های اوج بار سرمایشی بود (تصویر ۵ (الف الی ج)). نتایج نشان داد مصرف سالانه انرژی از 75823 کیلووات ساعت در سناریوی پایه به 58301 کیلووات ساعت در سناریوی بهینه کاهش یافت که معادل کاهش $23/11$ درصدی است (تصویر ۶).



(الف)



(ب)

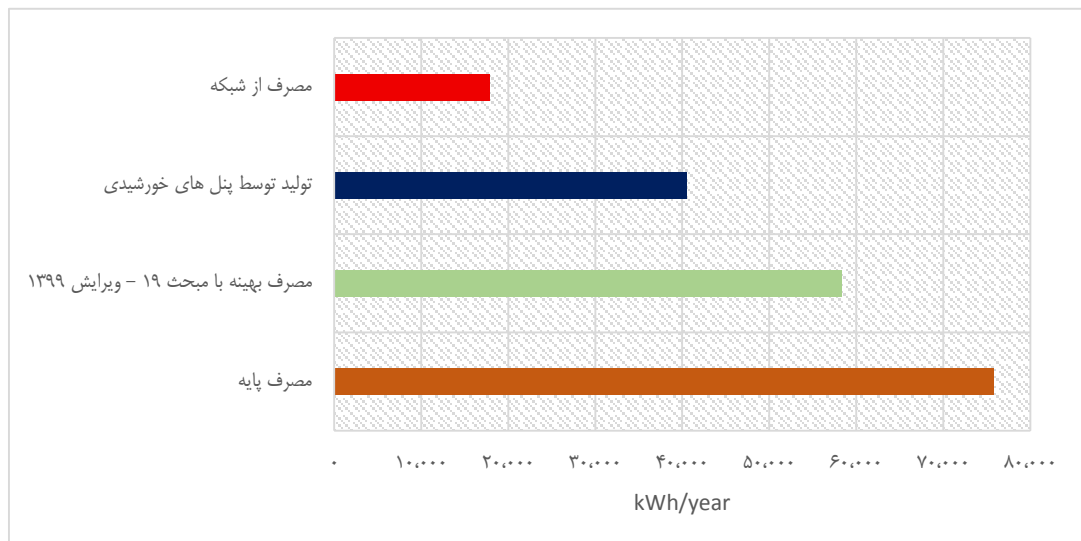


(ج)

تصویر ۵- مصرف ماهانه انرژی ساختمان در حالت (الف) پایه (ب) بهینه (ج) مقایسه پایه و بهینه

نتایج شبیه‌سازی نشان داد مصرف سالانه انرژی از ۷۵۸۲۳ کیلووات‌ساعت در سناریوی پایه به ۵۸۳۰۱ کیلووات‌ساعت در سناریوی بهینه کاهش یافت (۲۳٪/۱۱). افزودن سامانه‌ی فتوولتائیک ۴۰ کیلووات‌پیک با تولید سالانه ۴۰۴۵۱ کیلووات‌ساعت، مصرف

خالص از شبکه را به ۱۷۸۵۰ کیلووات ساعت رساند. بدین ترتیب، پنل‌ها حدود ۶۹/۴٪ از تقاضای انرژی ساختمان در سناریوی بهینه را تأمین کردند و تنها ۳۰/۶٪ از شبکه دریافت شد. هرچند این میزان تولید برای دستیابی کامل به شرایط نزدیک به صفر انرژی کافی نیست، اما وابستگی به شبکه را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است. ترکیب راهکارهای غیرفعال و بهبود تأسیسات با تولید تجدیدپذیر، رویکردی مؤثر در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت به‌سوی ساختمان‌های کم‌مصرف در اقلیم گرم و خشک محسوب می‌شود.



تصویر ۶- نمودار نتایج شبیه‌سازی انرژی سالانه

۴-۲- تحلیل سهم راهکارها در کاهش مصرف

برای تعیین سهم هر راهکار در کاهش ۲۳/۱۱ درصدی مصرف، تحلیل پارامتریک متوالی با افزودن گام‌به‌گام راهکارها به مدل پایه انجام شد (جدول ۳). نتایج نشان داد جهت‌یابی بهینه (۷/۰۳٪) و عایق‌کاری حرارتی پوسته (۵/۰۸٪) بیشترین سهم را دارند و پس از آن به‌ترتیب سامانه‌های گرمایش/سرمایش (۴/۵۲٪)، پنجره‌های کم‌گسیل (۳/۳۶٪) و سایه‌بان افقی (۳/۱۲٪) قرار می‌گیرند. تقدم سهم راهکارهای مرتبط با پوسته نشان می‌دهد در اقلیم گرم و خشک کاشان، بار حرارتی ورودی از جداره‌ها (به‌ویژه در تابستان) تعیین‌کننده‌ترین مؤلفه در مصرف سالانه انرژی است. سهم کمتر سایه‌بان نسبت به عایق‌کاری دیوارها نیز بیانگر آن است که در این اقلیم، مدیریت هدایت حرارتی از طریق کاهش ضریب انتقال حرارت جداره‌ها، اولویت بیشتری نسبت به مدیریت تابش خورشید از طریق سایه‌بان دارد. این ترتیب‌بندی سهم راهکارها با پژوهش‌های پیشین در اقلیم‌های مشابه هم‌راستا است (Hong et al., 2026).

جدول ۳- سهم هر راهکار در کاهش ۲۳/۱۱ درصدی مصرف انرژی (تحلیل پارامتریک متوالی)

راهکار	سهم در کاهش مصرف انرژی
جهت‌یابی بهینه	۷/۰۳
عایق‌کاری حرارتی پیوسته	۵/۰۸
سیستم گرمایش و سرمایش کارآمد	۴/۵۲
پنجره‌های کم‌گسیل	۳/۳۶
سایه‌بان افقی	۳/۱۲
جمع کل	۲۳/۱۱

۴-۳- ارزیابی بر اساس استاندارد ئی.اس.جی.بی چین

برای ارزیابی عملکرد ساختمان بر اساس استاندارد ئی.اس.جی.بی، شاخص‌های کلیدی مربوط به بخش انرژی و صرفه‌جویی در منابع مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه ئی.اس.جی.بی یک سیستم امتیازی با حداقل امتیاز مورد نیاز برای کسب سطوح مختلف گواهی (یک‌ستاره، دوستاره و سه‌ستاره) است، ارزیابی پروژه در این پژوهش صرفاً محدود به الزامات الزامی (پیش‌نیاز)

مرتبط با عملکرد انرژی، پوسته حرارتی، تهویه و انرژی تجدیدپذیر شده و معیارهای امتیازی مربوط به سایر حوزه‌ها نظیر آب، مصالح و کیفیت محیط داخلی، به دلیل عدم تناسب مستقیم با اهداف پژوهش حاضر، از دامنه بررسی خارج شده‌اند. انتخاب این زیرمجموعه از شاخص‌ها بر اساس امکان استخراج مستقیم آن‌ها از خروجی‌های شبیه‌سازی انرژی پلاس صورت گرفت تا امکان مقایسه کمی و مستند با نتایج بخش ۴-۱ فراهم شود. بر همین اساس، در جدول ۴ برای هر شاخص، الزام رسمی استاندارد، مقدار به‌دست‌آمده از پروژه، و وضعیت تطابق (کامل، نسبی یا عدم تطابق) به‌طور جداگانه گزارش شده است. بدین ترتیب، جدول ۳ نه‌تنها وضعیت کلی انطباق را نشان می‌دهد، بلکه مبنای روش‌شناختی محدودسازی دامنه ارزیابی را نیز برای خواننده شفاف می‌سازد.

جدول ۴- تطابق پروژه با الزامات استاندارد ئی.اس.جی.بی

شاخص ارزیابی	الزامات ئی.اس.جی.بی	پروژه	تطابق	شاخص ارزیابی
عملکرد حرارتی پوسته (ضریب انتقال حرارت)	مطابق با استانداردهای ملی چین	$0.48 = 0.35 / 0.74$ بام	✓ (نسبی)	عملکرد حرارتی پوسته (ضریب انتقال حرارت)
محدودیت (نسبت پنجره به دیوار)	حداکثر ۳۰٪ در اقلیم گرم	۳۰٪ (جنوب)، ۳۰٪ (شمال)	✓	محدودیت (نسبت پنجره به دیوار)
شبیه‌سازی انرژی	الزامی	انجام شده	✓	شبیه‌سازی انرژی
صرفه‌جویی در انرژی	حداقل ۱۵٪ بهبود نسبت به خط پایه	۲۳٪ بهبود	✓	صرفه‌جویی در انرژی
انرژی تجدیدپذیر	امتیاز تشویقی	۴۰۵۰۰ kWh/year	✓ جزئی	انرژی تجدیدپذیر
کنترل نفوذپذیری هوا	الزامات مشخص	تست نشده	X	کنترل نفوذپذیری هوا
مدیریت بهره‌برداری	پایش و بهینه‌سازی	فاقد سیستم	X	مدیریت بهره‌برداری
تهویه مکانیکی با بازیابی حرارت	توصیه شده	ندارد	X	تهویه مکانیکی با بازیابی حرارت

۴-۴- ارزیابی بر اساس استاندارد گرین‌مارک سنگاپور

ارزیابی بر اساس استاندارد گرین‌مارک ۲۰۲۱ با تمرکز بر معیارهای انرژی و عملکرد حرارتی پوسته انجام شد. شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان به‌عنوان یکی از معیارهای کلیدی این سیستم محاسبه شد. نتایج ارزیابی در جدول ۵ ارائه شده است. برای دقیق‌سازی ارزیابی این شاخص، محاسبه‌ای بر اساس فرمول رسمی ضوابط عملکرد حرارتی پوسته ساختمان و با استفاده از هندسه واقعی پروژه (ابعاد پلان 10×24 متر، ارتفاع کل $6/4$ متر) انجام شد. با در نظر گرفتن مساحت دقیق هر جبهه، ضرایب اصلاح تابش رسمی به تفکیک جهت، و ضریب مؤثر سایبان^۲ جنوبی (نسبت عمق سایبان به ارتفاع پنجره 0.53)، مقادیر شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان به تفکیک جبهه به‌ترتیب برابر $23/4$ (جنوب)، 39 (شرق)، $21/5$ (شمال) و $29/8$ (غرب) وات بر مترمربع به‌دست آمد.

جدول ۵- تطابق پروژه با الزامات استاندارد گرین‌مارک

معیار	الزامات گرین‌مارک ۲۰۲۱	پروژه	تطابق	معیار
شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان	حداکثر 50 Wh/m^2 (برای ساختمان‌های غیرمسکونی)	26 Wh/m^2 (محاسبه شده)	✓ (نسبی)	شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان
ضریب انتقال حرارت دیوار	$0.25 \text{ Wh/m}^2\text{K} \leq$	$0.48 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	X	ضریب انتقال حرارت دیوار
ضریب انتقال حرارت بام	$0.2 \text{ Wh/m}^2\text{K} \leq$	$0.35 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	X	ضریب انتقال حرارت بام
ضریب انتقال حرارت پنجره	$1.2 \text{ Wh/m}^2\text{K} \leq$	$2 \text{ Wh/m}^2\text{K}$	X	ضریب انتقال حرارت پنجره
تهویه مکانیکی	الزامی برای ساختمان‌های با تراکم بالا	ندارد	X	تهویه مکانیکی
انرژی تجدیدپذیر	حداقل ۲۰٪ برای سطوح بالاتر	تأمین جزئی	X	انرژی تجدیدپذیر
نفوذپذیری هوا	آزمون بلوتردور الزامی	انجام نشده	X	نفوذپذیری هوا
مدیریت انرژی	پایش و گزارش‌دهی مستمر	فاقد سیستم	X	مدیریت انرژی

۵- یافته‌ها و بحث

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اعمال مجموعه راهکارهای بهینه‌سازی منطبق با مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، شامل بهبود عملکرد حرارتی پوسته، استفاده از پنجره‌های کم‌گسیل، ارتقای سامانه‌های سرمایش و گرمایش و کاهش نفوذ هوا، موجب کاهش



۲۳/۱۱ درصدی مصرف سالانه انرژی ساختمان نسبت به حالت پایه شد. در میان این راهکارها، بهبود عملکرد حرارتی پوسته و کاهش انتقال حرارت از جداره‌ها بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی داشتند. این نتیجه با توجه به غلبه بار سرمایشی در ساختمان مورد مطالعه در اقلیم گرم و خشک کاشان قابل تبیین است؛ زیرا کاهش ورود حرارت از پوسته در دوره‌های گرم سال، بار مورد نیاز سامانه سرمایش را به‌طور مستقیم کاهش می‌دهد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که الزامات مبحث ۱۹، در صورت اجرای هم‌زمان مجموعه‌ای از راهکارهای پوسته و تأسیسات، می‌تواند به کاهش قابل توجه مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری این اقلیم منجر شود.

بر اساس مدل نهایی، کاهش ضریب انتقال حرارت اجزای اصلی پوسته، استفاده از شیشه کم‌گسیل، کاهش نرخ نفوذ هوا و بهبود بازده سامانه‌های سرمایش و گرمایش، در کنار استفاده از سامانه فتوولتائیک، به‌عنوان مؤثرترین مجموعه راهکارهای بهینه‌سازی شناسایی شدند. مقایسه حالت پایه و حالت بهینه نشان داد که بخش اصلی کاهش مصرف انرژی پیش از ورود سامانه فتوولتائیک حاصل می‌شود و تولید انرژی تجدیدپذیر عمدتاً در کاهش مصرف خالص و وابستگی ساختمان به شبکه نقش دارد. این تفکیک اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد دستیابی به عملکرد انرژی بهتر صرفاً از طریق تولید انرژی تجدیدپذیر امکان‌پذیر نیست و ابتدا باید تقاضای انرژی ساختمان از طریق راهکارهای غیرفعال و بهبود سامانه‌های تأسیساتی کاهش یابد.

سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات‌پیک نصب‌شده در ساختمان توانست سالانه ۴۰۵۰۰ کیلووات‌ساعت انرژی تولید کند. با وجود این، انرژی تولیدشده برای تأمین کامل تقاضای سالانه ساختمان کافی نبود و همچنان ۱۷۸۵۰ کیلووات‌ساعت انرژی از شبکه دریافت شد. بنابراین، ساختمان مورد مطالعه با وجود کاهش قابل توجه مصرف انرژی و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، هنوز به شرایط ساختمان نزدیک به صفر انرژی دست نیافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که در اقلیم گرم و خشک، ترکیب کاهش تقاضای انرژی با تولید انرژی تجدیدپذیر رویکرد مناسب‌تری نسبت به اتکای صرف بر تولید برق خورشیدی است. یافته حاضر با مطالعاتی که دستیابی به ساختمان‌های کم‌انرژی و صفر انرژی را حاصل تعامل راهکارهای غیرفعال، بهبود سامانه‌های فعال و تولید انرژی تجدیدپذیر می‌دانند، هم‌راستا است.

مقایسه عملکرد ساختمان با استانداردهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک (جدول ۶) نشان داد که رعایت الزامات مبحث ۱۹، اگرچه کاهش قابل توجه مصرف انرژی را به همراه دارد، به‌تنهایی برای تأمین تمام الزامات یک نظام جامع ارزیابی ساختمان سبز کافی نیست. ساختمان در ارزیابی ئی.اس.جی.بی در حوزه صرفه‌جویی انرژی عملکرد مطلوب‌تری داشت و شاخص هم‌راستایی آن با این استاندارد ۵۰ درصد (۴ از ۸ معیار) به دست آمد. در مقابل، شاخص هم‌راستایی ساختمان با گرین مارک ۱۲/۵ درصد (۱ از ۸ معیار) بود. این اختلاف نشان می‌دهد که فاصله ساختمان با ئی.اس.جی.بی نسبتاً محدودتر است، در حالی که الزامات گرین مارک در برخی حوزه‌ها فراتر از چارچوب متعارف مبحث ۱۹ قرار می‌گیرند.

در مورد گرین مارک، ساختمان در شاخص انتقال حرارتی پوسته عملکرد قابل قبولی داشت، اما در الزامات تجویزی مربوط به ضرایب انتقال حرارت اجزای منفرد پوسته، شامل دیوار، بام و پنجره، با محدودیت مواجه شد. این نتیجه از یک نکته مهم در مقایسه استانداردها پرده برمی‌دارد: عملکرد مناسب یک شاخص کلی پوسته لزوماً به معنای تأمین الزامات مستقل تمام اجزای پوسته نیست. به بیان دیگر، ساختمان مورد مطالعه توانست در ارزیابی کلی عملکرد حرارتی پوسته وضعیت مناسبی داشته باشد، اما به دلیل مقادیر بالاتر ضرایب انتقال حرارت برخی اجزاء، نتوانست الزامات تجویزی گرین مارک را به‌طور کامل تأمین کند.

جدول ۶- مقایسه جامع الزامات مبحث ۱۹ با استانداردهای ئی.اس.جی.بی و گرین مارک.

شاخص ارزیابی	مبحث ۱۹	ئی.اس.جی.بی	گرین مارک
الزامات ضریب انتقال حرارت	✓ (حداقلی)	✓ (سخت‌گیرانه‌تر)	✓ (بسیار سخت‌گیرانه)
محدودیت نسبت پنجره به دیوار	✓ ۳۰٪	✓ (۳۰٪ در اقلیم گرم)	✓ (توصیه‌شده)
شبیه‌سازی انرژی	✓ (الزامی)	✓ (الزامی)	✓ (الزامی)
کنترل نفوذپذیری هوا	X	✓ (الزامی)	✓ (الزامی)
تهویه مکانیکی با بازیابی حرارتی	X	✓ (توصیه‌شده)	✓ (الزامی)
انرژی تجدیدپذیر	X	✓ (امتیازی)	✓ (الزامی برای سطوح بالا)
مدیریت بهره‌برداری	X	✓	✓
ارزیابی کربن چرخه حیات	X	✓	✓ (در نسخه جدید)
شاخص تخصصی اقلیمی	X	✓ (منطقه‌بندی اقلیمی)	✓ شاخص انتقال حرارت پوسته ساختمان برای اقلیم گرمسیری

مهم‌تر از آن، مقایسه تطبیقی نشان داد که تفاوت اصلی میان مبحث ۱۹ و دو نظام مورد بررسی تنها در میزان سخت‌گیری الزامات حرارتی نیست، بلکه در دامنه موضوعات مورد ارزیابی نیز وجود دارد. مبحث ۱۹ عمدتاً بر کنترل مصرف انرژی و عملکرد حرارتی ساختمان تمرکز دارد، در حالی که ئی.اس.جی.بی و گرین مارک موضوعاتی مانند کنترل نفوذپذیری هوا، عملکرد سامانه‌های تهویه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت انرژی در مرحله بهره‌برداری و برخی جنبه‌های چرخه حیات را نیز در ارزیابی خود وارد می‌کنند. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که فاصله مبحث ۱۹ با نظام‌های پیشرفته‌تر صرفاً به افزایش یا کاهش یک حد عددی محدود نیست، بلکه به تفاوت در رویکرد کلی ارزیابی عملکرد ساختمان مربوط می‌شود.

این یافته با مطالعات تطبیقی نظام‌های ارزیابی ساختمان سبز در کشورهای آسیایی نیز هم‌راستا است که نشان داده‌اند این نظام‌ها، علاوه بر شاخص‌های انرژی، ابعاد گسترده‌تری از عملکرد ساختمان را در نظر می‌گیرند. کاهش ۲۳ درصدی مصرف انرژی در سناریوی بهینه با کاهش مصرف گزارش شده در پژوهش (Filippini & Obrist, 2022) که حدود ۲۵ درصد کاهش مصرف انرژی را در ساختمان‌های کم‌مصرف گزارش کردند، در یک محدوده قابل مقایسه قرار دارد، هرچند تفاوت در اقلیم و نوع کاربری ساختمان‌ها مانع از مقایسه مستقیم می‌شود. همچنین، تأثیر قابل توجه بهبود عملکرد پوسته بر کاهش مصرف انرژی با نتایج (Babu et al., 2017; Hong et al., 2026) هم‌راستا است. از سوی دیگر، نتیجه پژوهش حاضر درباره ضرورت ترکیب راهکارهای کاهش تقاضای انرژی با تولید انرژی تجدیدپذیر، با یافته‌های (Ahmed et al., 2022; Maghami et al., 2025) مطابقت دارد. بنابراین، اگرچه مقدار صرفه‌جویی انرژی در مطالعات مختلف به دلیل تفاوت اقلیم، کاربری، مشخصات ساختمان و ترکیب راهکارهای بهینه‌سازی متفاوت است، جهت کلی نتایج پژوهش حاضر با شواهد موجود در ادبیات موضوع سازگار است. با این حال، نکته قابل توجه در پژوهش حاضر آن است که مبحث ۱۹ حتی در محدوده اصلی تمرکز خود، یعنی کاهش مصرف انرژی، توانسته است عملکرد قابل قبولی ایجاد کند. بنابراین، مسئله اصلی را نمی‌توان صرفاً ناکارآمدی مبحث ۱۹ دانست؛ بلکه می‌توان آن را محدود بودن دامنه پوشش آن نسبت به نظام‌های جامع‌تر ارزیابی ساختمان سبز دانست.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مبحث ۱۹ می‌تواند به‌عنوان یک پایه مؤثر برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و خشک مورد استفاده قرار گیرد، اما برای دستیابی به چارچوبی جامع‌تر، لازم است الزامات آن از تمرکز صرف بر عملکرد حرارتی و انرژی عملیاتی فراتر رفته و موضوعاتی مانند کنترل نفوذپذیری هوا، تهویه با بازیابی حرارت، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت عملکرد ساختمان در مرحله بهره‌برداری را نیز پوشش دهد. از این منظر، یافته‌های پژوهش نه تنها عملکرد فعلی مبحث ۱۹ را ارزیابی می‌کند، بلکه حوزه‌هایی را که می‌توانند در بازنگری‌های آتی مقررات مورد توجه قرار گیرند نیز مشخص می‌سازد.

۶- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد انرژی یک ساختمان اداری در شهر کاشان بر اساس الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران و مقایسه آن با چارچوب‌های ارزیابی ئی.اس.جی.بی چین و گرین مارک سنگاپور انجام شد. در پاسخ به پرسش اصلی پژوهش، یافته‌ها نشان داد ساختمان اداری منطبق با الزامات مبحث ۱۹ در بعد کاهش مصرف انرژی عملکرد قابل قبولی دارد و شاخص هم‌راستایی آن با ئی.اس.جی.بی و گرین مارک به ترتیب ۵۰ و ۵/۱۲ درصد است؛ اما در حوزه‌های نفوذپذیری هوا، تهویه مکانیکی، انرژی تجدیدپذیر و مدیریت بهره‌برداری با هر دو استاندارد فاصله معناداری دارد. همچنین افزودن سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک اگرچه وابستگی ساختمان به برق شبکه را کاهش داد، اما به‌تنهایی برای پوشش این شکاف و دستیابی به شرایط نزدیک به صفر انرژی کافی نبود. نتایج نشان داد که اجرای مجموعه راهکارهای بهینه‌سازی منطبق با مبحث ۱۹، شامل بهبود عملکرد حرارتی پوسته، استفاده از پنجره‌های کم‌گسیل، کاهش نفوذ هوا و ارتقای سامانه‌های سرمایش و گرمایش، توانست مصرف سالانه انرژی ساختمان را ۲۳/۱۱ درصد نسبت به حالت پایه کاهش دهد. همچنین افزودن سامانه فتوولتائیک ۴۰ کیلووات پیک، با تولید سالانه ۴۰۵۰۰ کیلووات ساعت، وابستگی ساختمان به شبکه را کاهش داد، اما برای دستیابی به شرایط نزدیک به صفر انرژی کافی نبود. بنابراین، پاسخ به پرسش اصلی پژوهش نشان می‌دهد که مبحث ۱۹ می‌تواند مبنای مؤثری برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و خشک باشد، اما تحقق سطوح بالاتر عملکرد انرژی نیازمند ترکیب الزامات پوسته و تأسیسات با تولید انرژی تجدیدپذیر و مدیریت عملکرد ساختمان در مرحله بهره‌برداری است.

مقایسه تطبیقی نشان داد که فاصله میان مبحث ۱۹ و نظام‌های ارزیابی مورد بررسی، تنها به سخت‌گیری بیشتر در الزامات حرارتی محدود نمی‌شود، بلکه به تفاوت در دامنه ارزیابی نیز مربوط است. در حالی که مبحث ۱۹ عمدتاً بر مصرف انرژی و



عملکرد حرارتی ساختمان تمرکز دارد، ئی.اس.جی.بی و به‌ویژه گرین مارک موضوعات گسترده‌تری مانند کنترل نفوذپذیری هوا، عملکرد سامانه‌های تهویه، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت انرژی در مرحله بهره‌برداری را مورد توجه قرار می‌دهند. از این رو، کاربرد اصلی یافته‌های پژوهش برای حوزه معماری و فناوری ساختمان، فراهم کردن مبنایی برای شناسایی نقاط قوت و خلأهای مقررات ملی در مقایسه با چارچوب‌های جامع‌تر ارزیابی ساختمان سبز است. نتایج می‌تواند در بازنگری الزامات میحث ۱۹ و همچنین در تدوین معیارهای ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم‌های مختلف ایران مورد استفاده قرار گیرد.

این پژوهش با چهار محدودیت اصلی مواجه است. نخست، تحلیل بر اساس یک ساختمان اداری در اقلیم گرم و خشک کاشان انجام شده و تعمیم نتایج به سایر تیپولوژی‌های ساختمانی و اقلیم‌های ایران نیازمند بررسی‌های بیشتر است. دوم، به دلیل نبود ساختمان ساخته‌شده مطابق سناریوی بهینه و فقدان داده‌های واقعی مصرف انرژی، امکان اعتبارسنجی کامل مدل با داده‌های میدانی فراهم نبود. سوم، نرخ نفوذ هوا بر اساس مقادیر فرضی و متعارف در نظر گرفته شد و آزمون میدانی نفوذپذیری هوا انجام نشد؛ بنابراین، نتایج مربوط به این پارامتر به صحت فرض اولیه وابسته است. چهارم، ارزیابی تطبیقی ئی.اس.جی.بی و گرین مارک بر اساس معیارها و اطلاعات فنی قابل دسترسی انجام شد و به دلیل عدم دسترسی به سامانه‌های رسمی امتیازدهی، نتایج نباید به‌عنوان گواهی رسمی ساختمان تلقی شوند.

پژوهش‌های آتی می‌توانند با بررسی ساختمان‌های اداری در چند اقلیم مختلف ایران، تعمیم‌پذیری نتایج را ارزیابی کنند. همچنین استفاده از داده‌های واقعی بهره‌برداری، آزمون میدانی نفوذپذیری هوا و پایش عملکرد سامانه‌های انرژی می‌تواند دقت مدل‌های شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد واقعی ساختمان را افزایش دهد. توسعه یک چارچوب بومی ارزیابی ساختمان سبز که علاوه بر مصرف انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، کیفیت محیط داخلی، عملکرد بهره‌برداری، کربن چرخه حیات و شرایط اقلیمی ایران را در نظر بگیرد نیز می‌تواند مسیر مناسبی برای مطالعات آینده و توسعه مقررات ملی باشد.

پی‌نوشت

- 1- ESGB
- 2- Green Mark
- 3- OpenStudio
- 4- EnergyPlus
- 5- nZEB (nearly Zero Energy Building)
- 6- LEED
- 7- BREEAM
- 8- CASBEE
- 9- Green Star
- 10- ITACA
- 11- BEE (Built Environment Efficiency)
- 12- Minergie
- 13- Photovoltaic
- 14- COP (Coefficient of Performance)
- 15- Low Emission
- 16- U-value
- 17- Sketchup
- 18- WWR (Window wall Ration)
- 19- SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)
- 20- ETTV (Envelope Thermal Transfer Value)
- 21- BCA (Code on Envelope Thermal Performance for Buildings)
- 22- Scef

حامیان مالی: این مقاله هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان: نویسندگان تایید می‌کنند مه همگی در مراحل مختلف پژوهش مشارکت داشته‌اند.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود

نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزارهای هوش مصنوعی ChatGPT برای ویرایش زبانی استفاده شده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است. **قدردانی:** ما از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاس‌گزاریم.

منابع

- احمدنژاد، فرهاد؛ یکتا حشکواپی، مریم. (۱۴۰۳). تطابق معیارهای مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان و سامانه ارزیابی DGNB در ارزیابی مجتمع مسکونی آسمان تبریز. معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۱۷(۴۶)، ۱۲۳-۱۴۲.
<https://doi.org/10.22034/aud.2023.395698.2784>
- آرام، تیم؛ ابراجی، جواد. (۱۴۰۱). جهت‌گیری بهینه ساختمان با هدف سایه‌افکنی بهینه و کاهش مصرف انرژی (مطالعه موردی: تالار موسیقی تهران). مطالعات فناوری‌های معماری، ۲(۲)، ۶۵-۸۰.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.28209818.1401.2.2.3.0>
- جعفری، لیلا؛ صلواتیان، سید مریم مامک. (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد فتوولتائیک یکپارچه با سیستم سایبان در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک (نمونه موردی ساختمان اداری در شهر شیراز). نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱۰(۱)، ۷۰-۸۵.
<https://doi.org/10.52547/jrenew.10.1.70>
- سلیمانخانی، علیرضا. (۱۴۰۱). شناسایی ابزارهای خط‌مشی‌گذاری در جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران. هنر مدیریت سبز، ۱(۱)، ۷۳-۸۶.
<https://doi.org/10.30480/agm.2021.3048.1008>
- شیخی نسلجی، مهدی؛ مهدیزاده سراج، فاطمه. (۱۴۰۱). طراحی سایبان هوشمند برای ساختمان اداری جهت کنترل ورود نور مستقیم خورشید مبتنی بر کاهش بار سرمایشی با الگوبرداری از گره‌های ایرانی اسلامی. پژوهش‌های معماری نوین، ۲(۱)، ۷-۲۶.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.28209818.1401.2.1.1.6>
- ماهان، امین؛ خرم رویی، ریحانه. (۱۴۰۲). سامانه ارزیابی کازی، رویکردی تکنیکی در ارزش‌گذاری پایداری زیست‌محیطی ساختمان‌های سبز در زاین. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱۰(۱)، ۱۷۷-۱۸۷.
<https://doi.org/10.52547/jrenew.10.1.177>
- یارمحمد، فاطمه؛ مهدیزاده سراج، فاطمه. (۱۴۰۱). امکان‌سنجی استفاده از راهکارهای بهینه‌سازی پوسته ساختمان‌های اداری در مناطق معتدل ایران با بهره‌گیری از نمونه بناهای صفر انرژی اجرا شده در اقلیم‌های مشابه. معماری و شهرسازی ایران (JIAU)، ۱۳(۲)، ۱۷۵-۱۹۵.
<https://doi.org/10.30475/isau.2022.225316.1384>
- Agarwal, S., Araral, E., Fan, M., Qin, Y., & Zheng, H. (2024). *The unintended effects of green building certification*. <https://ireus.nus.edu.sg/unintended-effects-green-building-certification/>
- A.H., H., Tarish, A. L., & Al-Mudhafar, A. H. N. (2026). Recent advances in nearly zero energy commercial and residential buildings: Innovations, challenges, and climate-specific solutions. *Green Technologies and Sustainability*, 4(2), 100330. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100330>
- Ahmed, A., Ge, T., Peng, J., Yan, W.-C., Tee, B. T., & You, S. (2022). Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. *Energy and Buildings*, 256, 111755. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111755>
- Babu, S., Lamano, A., & Pawar, P. (2017). Sustainability assessment of a laboratory building: case study of highest rated laboratory building in Singapore using Green Mark rating system. *Energy Procedia*, 122, 751-756. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.391>
- Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L., & Yap, P.-S. (2023). Green construction for low-carbon cities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1627-1657. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4>
- Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., & Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. *Building and Environment*, 123, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Fatemi, A., Heidarinejad, G., Zabetian Targhi, M., & Safarzadeh, M. (2023). Energy simulation and life cycle cost discussion for a novel fixed model in offices as a zero energy building in a country with hot and cold dry weather. *Energy Conversion and Management*, 277, 116604. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116604>
- Filippini, M., & Obrist, A. (2022). Are households living in green certified buildings consuming less energy? Evidence from Switzerland. *Energy Policy*, 161, 112724. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112724>

- Geng, Y., Ji, W., Wang, Z., Lin, B., & Zhu, Y. (2019). A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality and occupant satisfaction. *Energy and Buildings*, 183, 500–514. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.017>
- Hall, M., Geissler, A., & Burger, B. (2014). Two Years of Experience with a Net Zero Energy Balance – Analysis of the Swiss MINERGIE-A® Standard. *Energy Procedia*, 48, 1282–1291. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.145>
- Heravi, G., Nafisi, T., & Mousavi, R. (2016). Evaluation of energy consumption during production and construction of concrete and steel frames of residential buildings. *Energy and Buildings*, 130, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.067>
- Hong, D., Cheng, R., Lei, H., Zhou, X., Yang, L., Feng, C., & Gao, S. (2026). Comprehensive review on the impact of building envelopes on indoor thermal comfort in office buildings: Balancing occupant comfort and energy efficiency. *Building and Environment*, 289, 114018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.114018>
- Ibrahim, A. J., Zangana, D. D., Liu, S., Samuelson, H., & Yang, L. (2025). Impacts of climate change on energy-saving sensitivity of residential building envelope design parameters in three hot-dry cities. *Journal of Building Engineering*, 99, 111481. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111481>
- Jangyoung, L., & Kwok Wai, T. (2016). *The Evolution of the BCA Green Mark Scheme in Singapore: A Paradigm Shift from an Energy Focused Rating System to an Occupant Centric Criteria with Higher Emphasis on IAQ*. ASHRAE & AIVC. <https://ashraem.confex.com/ashraem/iaq16/webprogram/Paper20054.html>
- Kazemi, M. (2023). Behavioral barriers to the use of renewable and energy-efficient technologies in residential buildings in Iran. *Energy Efficiency*, 16(7), 79. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10162-0>
- Lee, W. L. (2012). Benchmarking energy use of building environmental assessment schemes. *Energy and Buildings*, 45, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.024>
- Maghami, M. R., Maghoul, A., Thang, K. F., & Sundaram, S. (2025). Net zero energy buildings: An overview of passive and active designs. *Energy Reports*, 14, 1327–1348. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.07.028>
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>
- Mattoni, B., Guattari, C., Evangelisti, L., Bisegna, F., Gori, P., & Asdrubali, F. (2018). Critical review and methodological approach to evaluate the differences among international green building rating tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 950–960. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.105>
- MURAKAMI, S., IWAMURA, K., SAKAMOTO, Y., YASHIRO, T., BOGAKI, K., SATO, M., IKAGA, T., & ENDO, J. (2004). CASBEE; COMPREHENSIVE ASSESSMENT SYSTEM FOR BUILDING ENVIRONMENTAL EFFICIENCY (Environmental Engineering). *AIJ Journal of Technology and Design*, 10(20), 199–204. <https://doi.org/10.3130/aijt.10.199>
- Olanrewaju, O. I., Enebuma, W. I., & Donn, M. (2024). Operational, embodied and whole life cycle assessment credits in green building certification systems: Desktop analysis and natural language processing approach. *Building and Environment*, 258, 111569. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111569>
- Omran, H., Chang, R., Soebarto, V., Zhang, Y., Ghaffarianhoseini, A., & Zuo, J. (2022). A bibliometric review of net zero energy building research 1995–2022. *Energy and Buildings*, 262, 111996. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111996>
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>
- Soltan Ahmadi, P., Khoshgard, A., & Ahmadi Danesh Ashtiani, H. (2024). Investigating Energy Performance Criteria in Compliance with Iranian National Building Regulations: The Role of Residential Building Envelope Adjacency. *Buildings*, 15(1), 44. <https://doi.org/10.3390/buildings15010044>
- Varma, C. R. S., & Palaniappan, S. (2019). Comparison of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia. *Habitat International*, 89, 101989. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.05.008>



-
- Wang, Q., Gao, W., Su, Y., & Zhang, Y. (2024). A Comparative Study of the Latest Editions of China–Japan–US Green Building Evaluation Standards. *Buildings*, 14(11), 3698. <https://doi.org/10.3390/buildings14113698>
- Wu, W., & Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110859. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110859>
- Zhang, C., Cui, C., Zhang, Y., Yuan, J., Luo, Y., & Gang, W. (2019). A review of renewable energy assessment methods in green building and green neighborhood rating systems. *Energy and Buildings*, 195, 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.040>



eISSN:2980-9673

The Art of Green Management

Homepage: <https://agm.journal.art.ac.ir/>

REVIEW PAPER

Algorithmic Agency in Smart Urban Green Infrastructure Design: An Analysis Based on Actor-Network Theory

Masoumeh Abdi ^{(1)*} 

1. PhD Candidate in Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran.
(<https://orcid.org/0009-0003-9449-9710>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 29/09/2025 Revised: 03/11/2025 Accepted: 05/11/2025 PP. 29-50	Introduction: Over the past two decades, urban green infrastructure (UGI) has evolved from isolated landscape elements into a complex socio-ecological system. Within this paradigm, parks, street trees, green roofs, corridors, and blue spaces form an interconnected network, positioning multifunctionality at its core — where a single spatial unit supports multiple ecological, social, and economic functions (Hansen & Pauleit, 2014). Consequently, UGI performance cannot be deduced solely from physical attributes. As Andersson et al. (2019) demonstrate, ecosystem service benefits emerge through "co-production," contingent upon three systemic filters: the interplay among green, blue, and built infrastructures; institutional and governance capacities; and individual and shared perceptions and values. UGI is thus fundamentally a network of relations rather than a mere spatial structure. Against this relational backdrop, the "smart" transformation gains significance. Remote sensing, sensor networks, spatial analytics, and artificial intelligence enable integrating environmental data, identifying latent patterns, and generating design alternatives (Lyu et al., 2022; Lee et al., 2024; Wang & Zhang, 2025). Crucially, this transcends mere efficiency. Algorithms do not merely process data; by selecting inputs, defining evaluation criteria, classifying phenomena, and prioritizing options, they actively shape the definition of the design problem itself. Despite this shift, the literature largely overlooks this critical juncture. Studies of AI applications in urban design often examine algorithms instrumentally, prioritizing predictive accuracy and computational speed. Conversely, algorithmic governance studies emphasize that these systems are non-neutral: Busuioc (2021) argues that accountability concerns the values embedded within model design, while Frost (2024) contends that integrating machine learning into public decision-making alters relationships among expert knowledge, public participation, and accountability mechanisms. These streams remain disconnected, leaving three distinct gaps: an ontological gap regarding when algorithms become decision mediators, a theoretical–applied gap in applying Actor–Network Theory (ANT) to UGI, and a normative gap linking transparency discourses to concrete design mechanisms such as green space siting and species selection. The Purpose of the Research: To address these gaps, this study conceptualizes algorithmic agency in smart UGI design using ANT (Latour, Callon, Law). The focal analytical lens is translation — comprising problematization, interessement, enrolment, and mobilization — used to trace actor-network formation (Callon, 1986). ANT is chosen comparatively: while structuration theory (Giddens, 1984) and the social construction of technology (Pinch & Bijker, 1984) ultimately reduce action to human agency or social consensus, and agential realism (Barad, 2007) or assemblage theory (DeLanda, 2006) acknowledge non-human agency without offering operational stepwise categories, ANT integrates both strengths. Additionally, Latour's (2005) continuum between "intermediaries" (transporting meaning without transformation) and "mediators" (transforming and translating what they convey) frames the algorithm's position. Methodology: Methodologically, this qualitative study adopts a theoretical–conceptual strategy, drawing on primary ANT texts and peer-reviewed articles (2010–2026) from Scopus, Web of Science, and PubMed Central across UGI, AI and smart cities, and algorithmic
Keywords: <i>Algorithmic agency; Actor–Network Theory; Smart urban green infrastructure; Translation; Graded agency.</i>	
 Use your device to scan and read the article online	



Use your device to scan and
read the article online

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	governance. Purposive sampling continued until conceptual saturation. Analysis followed four steps: (1) formulating guiding questions; (2) deriving analytical categories deductively from ANT; (3) re-reading five AI applications in UGI through the four translation moments a generative deep neural network framework for green space design optimization (Wang & Zhang, 2025), morphological spatial pattern analysis (MSPA) combined with random forest (Peng et al., 2026), the cumulative urban heat island (UHI)-hours metric (Oh et al., 2020), urban digital twins (Dawkins & Kitchin, 2025), and the SylvCiT tree-species recommender (Nicol et al., 2026); and (4) synthesizing findings into a conceptual framework. Cases were purposively selected for concrete UGI application, sufficient technical documentation to trace the translation chain, and deliberate variation in prescriptive degree. Findings and Discussion: Findings indicate that algorithmic agency manifests during problematization, prior to solution generation. UGI multifunctionality translates into a calculable multi-criteria structure; ecological morphology decomposes into machine-readable categories (core, edge, branch, islet); and metrics such as UHI-hours shift evaluation from instantaneous heat intensity to temporal exposure, redefining the problem itself. This supports Stinson's (2022) assertion that algorithmic bias stems from variable selection and model structure, not data alone. In the intersement phase, translation stabilizes relations: expert-environment interaction becomes data-mediated; decision credibility emerges from the combination of professional expertise, data quality, and model construction; and integrated monitoring systems, databases, and evaluation standards establish durable infrastructural dependencies. During enrolment, these dependencies solidify into stable roles across four actors: designers shift from sole option-generators to evaluators and moderators; algorithms move from analytical tools to co-generators of alternatives; ecological elements become translatable functional traits, marginalizing dimensions such as cultural meaning and lived experience that resist quantification; and regulatory institutions shift from ex-post arbiters to embedded design constraints. In mobilization, metrics such as NDVI, land surface temperature, and morphological indices transcend analysis to become a common language for coordination in environmental governance, though this stabilization remains contingent upon institutional acceptance. The study's central finding is that differences among systems depend on the position the algorithm secures within the decision network. This is governed by three moderators: model prescriptiveness (explanatory versus generative), integration with formal decision-making infrastructures, and the scope for reversibility and human intervention. Consequently, generative optimization frameworks exhibit strong algorithmic mediation by generating and ranking options within embedded regulatory constraints; MSPA-based morphological analysis provides an observational language without generating options; and recommender systems such as SylvCiT possess bounded, negotiable agency owing to their advisory role and capacity for human review. Conclusion: Synthesizing these findings yields a conceptual framework of algorithmic agency comprising three dimensions: procedural (the recursive translation cycle), network (interaction among technological, socio-institutional, and ecological domains), and intensity (the three moderators functioning as a diagnostic scale). Theoretically, the framework converts the intermediary/mediator dichotomy into a graded, assessable variable, distinguishing the mere presence of an algorithm from actual algorithmic agency and thereby resisting technological determinism. Practically, agency is constituted prior to model execution: initial choices determine which environmental attributes become calculable data at all. Algorithmic accountability must therefore extend beyond model outputs to the translational logic that defines the boundary of the calculable a logic with direct spatial consequences for green space siting, species selection, and intervention prioritization. Funding: There is no funding support. Conflict of Interest: Author declared no conflict of interest. AI Usage Declaration: The author declared that no AI tools were used in the preparation of this manuscript. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the author.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	Acknowledgments: I am grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

Highlight

- Conceptualizing algorithmic agency in smart urban green infrastructure design through Actor–Network Theory and the concept of translation.
- Converting Latour's intermediary/mediator dichotomy into a continuous variable based on three moderators: model prescriptiveness, institutional integration, and human intervention.
- Constitution of algorithmic agency from the problem-definition stage onward, not merely in model outputs.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Abdi, M. (2025). Algorithmic Agency in Smart Urban Green Infrastructure Design: An Analysis Based on Actor-Network Theory. *The Art of Green Management*, 3(3), 29-50. [10.30480/agm.2026.6540.1076](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1549.html

*. Corresponding Author (Email: m.abdi@student.art.ac.ir) / (Phone: +982166722740)



عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری؛ تحلیلی مبتنی بر نظریه کنشگر-شبکه

معصومه عبدی^(۱)

۱- پژوهشگر دکتری شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. (<https://orcid.org/0009-0003-9449-9710>)

ناشر: دانشگاه هنر ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
مقدمه: گسترش الگوریتم‌های هوش مصنوعی در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری، از پایش پوشش گیاهی تا جانمایی خودکار فضاهای سبز، روابط میان طراح، فناوری و محیط را دگرگون کرده است. با این حال، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود، الگوریتم را صرفاً ابزاری محاسباتی دانسته و کمتر به بازآرایی روابط میان طراح، داده، نهاد و محیط پرداخته است. هدف پژوهش: این پژوهش با هدف مفهوم‌پردازی عاملیت الگوریتمیک و تبیین چگونگی شکل‌گیری آن در بازآرایی روابط میان کنشگران انسانی، فناوریانه و اکولوژیک انجام می‌شود. روش‌شناسی: پژوهش از نظر ماهیت داده، کیفی و از حیث راهبرد، نظری-مفهومی است که نظریه کنشگر-شبکه، به‌ویژه مفهوم ترجمه را به‌عنوان لنز تحلیلی خود قرار می‌دهد. یافته‌ها و بحث: یافته‌ها نشان می‌دهد الگوریتم‌ها در فرایند ترجمه، ابتدا مسئله طراحی زیرساخت سبز را به چارچوبی چند معیاره و محاسبه‌پذیر تبدیل می‌کنند؛ سپس با باز تنظیم مسیرهای دسترسی به داده، پیوندهای شبکه را تثبیت می‌کنند؛ آنگاه جایگاه طراح، الگوریتم، عناصر اکولوژیک و نهاد تنظیم‌گر را بازتعریف کرده و در نهایت، سنجه‌های محاسباتی را به زبان مشترک ارزیابی تبدیل می‌کنند. با این حال، شدت این عاملیت به سه تعدیل‌گر بستگی دارد: تجویزگری مدل، پیوند با زیرساخت رسمی تصمیم‌گیری و امکان مداخله انسانی. بر این پایه، چارچوبی مفهومی با سه بعد فرآیندی، شبکه‌ای و شدت پیشنهاد می‌شود که تمایز واسطه/میانجی را از دوگانه‌ای مفهومی به متغیری پیوسته و قابل‌سنجش تبدیل می‌کند. نتیجه‌گیری: بر پایه یافته‌ها، پاسخ‌گویی الگوریتمی در طراحی زیرساخت سبز باید متوجه مرحله تعریف مسئله و انتخاب معیار باشد، نه صرفاً خروجی مدل. در این خوانش، عاملیت الگوریتمیک نه ویژگی درون ذات‌کد، بلکه اثری رابطه‌ای، موقعیت‌مند و مدرج است.	دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴ صص: ۲۹-۵۰ واژگان کلیدی: عاملیت الگوریتمیک، نظریه کنشگر-شبکه، زیرساخت سبز هوشمند شهری، ترجمه، عاملیت مدرج 
نکات برجسته: - مفهوم‌پردازی عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند بر پایه نظریه کنشگر-شبکه و مفهوم ترجمه. - تبدیل دوگانه واسطه/میانجی لاتور به متغیری پیوسته بر اساس سه تعدیل‌گر: تجویزگری مدل، پیوند نهادی، مداخله انسانی. - تاکید بر شکل‌گیری عاملیت الگوریتمی از مرحله تعریف مسئله، نه صرفاً در خروجی مدل.	

ارجاع به این مقاله: عبدی، معصومه. (۱۴۰۴). عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری؛ تحلیلی مبتنی بر نظریه کنشگر-شبکه. هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۵۰-۲۹. [10.30480/agm.2026.6540.1076](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076)



[http://doi.org/ 10.30480/agm.2026.6540.1076](http://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076)



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1549.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز
استفاده است. [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) قابل

©2024, UST. All rights reserved.

*. نویسنده مسئول (رایانامه: m.abdi@student.art.ac.ir) / (تلفن: +۹۸۲۱۶۶۷۲۲۷۴۰)

طی دو دهه گذشته، مفهوم زیرساخت سبز شهری از تلقی آن به عنوان مجموعه‌ای از عناصر منظرین، به درکی نظام‌مند از یک سامانه پیچیده اجتماعی-اکولوژیک تحول یافته است. در این رویکرد، پارک‌ها، درختان خیابانی، بام‌های سبز، پهنه‌های آبی و... اجزای یک شبکه پیوسته‌اند که از تعامل فرایندهای اکولوژیک، ساختار فضایی و نیازهای اجتماعی، خدماتی مانند تعدیل جزایر گرمایی، مدیریت رواناب، ذخیره کربن و ارتقای سلامت و رفاه شهروندان را فراهم می‌کند (Li & Hansen & Pauleit, 2014; Carter, 2025). این دیدگاه، ارائه خدمات اکوسیستمی را نیز حاصل عملکرد مستقیم عناصر سبز نمی‌داند، بلکه آن را فرایندی وابسته به تعامل میان اجزای طبیعی، ساختارهای فضایی و ترتیبات اجتماعی و نهادی تلقی می‌کند. اندرسون و همکاران این فرایند را در قالب «هم‌تولیدی» توضیح می‌دهند که طی آن، منافع اکوسیستمی از برهم‌کنش زیرساخت‌های سبز، آبی و ساخته‌شده با ظرفیت‌های نهادی، سازوکارهای حکمرانی و ادراک‌ها و ارزش‌های فردی و جمعی شکل می‌گیرند (Andersson et al., 2019). خدمات اکوسیستمی در نتیجه این تعاملات و در میان مجموعه‌ای از شرایط محیطی، اجتماعی و نهادی تحقق می‌یابند و زیرساخت سبز را به شبکه‌ای از روابط میان کنشگران و عناصر مختلف تبدیل می‌کنند؛ بستری که با ورود فناوری‌های داده‌محور، ابعاد جدیدی از میانجی‌گری و تنظیم روابط را به خود می‌گیرد.

در چنین شبکه‌ای از روابط، گسترش فناوری‌های سنجش‌ازدور، شبکه‌های حسگر شهری، تحلیل داده‌های مکانی و هوش مصنوعی، شیوه‌های شناخت، ارزیابی و طراحی زیرساخت سبز را نیز دگرگون کرده است. این فناوری‌ها با فراهم کردن امکان تلفیق داده‌های متنوع محیطی و فضایی، شناسایی الگوهای پیچیده و تولید گزینه‌های طراحی، لایه‌ای محاسباتی به روابط پیشین میان محیط، دانش تخصصی و تصمیم‌گیری افزوده‌اند (Lyu et al., 2022; Lee et al., 2024) که افزوده شدن این لایه محاسباتی، صرفاً ظرفیت پردازش اطلاعات را افزایش نمی‌دهد، بلکه نحوه صورت‌بندی مسئله طراحی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. انتخاب داده‌های ورودی، تعریف معیارهای ارزیابی، طبقه‌بندی پدیده‌ها، اولویت‌بندی گزینه‌ها و تولید سناریوهای مداخله، در تعیین آنچه به عنوان مسئله، معیار یا راه‌حل قابل قبول شناخته می‌شود نقش دارند. از این رو، الگوریتم در این فرایند تنها تولیدکننده پاسخ نیست، بلکه در سازمان‌دهی مسیر شناخت و تصمیم نیز مشارکت می‌کند (Wang & Zhang, 2025). از این منظر، ارزیابی سامانه‌های الگوریتمی را نمی‌توان به عملکرد فنی آن‌ها محدود کرد؛ چراکه ارزش‌ها و انتخاب‌های نهفته در تعیین معیارهای ارزیابی، اولویت‌های عملکردی و نحوه طبقه‌بندی داده‌ها، بخشی از فرایند تصمیم‌گیری را شکل می‌دهند (Busuioc, 2021). ورود مدل‌های یادگیری ماشین به تصمیم‌گیری عمومی نیز می‌تواند روابط میان دانش تخصصی، مشارکت عمومی و سازوکارهای پاسخ‌گویی را بازتنظیم کند (Frost, 2024)؛ بنابراین، تحلیل الگوریتم مستلزم توجه هم‌زمان به عملکرد محاسباتی آن و جایگاهی است که در سازمان‌دهی روابط میان کنشگران و توزیع نقش‌ها در شبکه تصمیم‌گیری پیدا می‌کند.

با وجود اهمیت این مباحث، همچنان تبیین نظری روشی از چگونگی شکل‌گیری نقش الگوریتم‌ها در شبکه طراحی زیرساخت سبز هوشمند، آن گونه که باید وجود ندارد و تا زمانی که سازوکار تبدیل الگوریتم از ابزاری برای تحلیل به عنصری مؤثر در تعریف مسئله و تعیین معیارهای طراحی صورت‌بندی نشود، ارزیابی نقش آن در تصمیم‌های طراحی و نیز تمایز میان سامانه‌هایی که صرفاً اطلاعات تولید می‌کنند و سامانه‌هایی که فضای گزینه‌های طراحی را شکل می‌دهند، امکان‌پذیر نخواهد بود. از همین خلاء، دو پرسش پژوهش شکل می‌گیرد: الگوریتم‌های هوش مصنوعی در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری، از خلال چه فرایندی با طراحان، داده‌های محیطی، نهادهای تصمیم‌گیر و عناصر اکولوژیک درگیر می‌شوند و روابط میان این کنشگران را بازآرایی می‌کنند؟ و در ادامه شدت این نقش تحت چه شرایطی تغییر می‌کند؟

بر این اساس مقاله حاضر با هدف مفهوم‌پردازی عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری، این مسئله را با تکیه بر نظریه کنشگر-شبکه و مفهوم ترجمه دنبال کرده و چارچوبی مفهومی برای تحلیل جایگاه الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بازآرایی روابط میان کنشگران انسانی، فناورانه و اکولوژیک ارائه می‌دهد. در این چارچوب، الگوریتم نه ابزاری منفعل برای پردازش داده و نه عاملی مستقل از شبکه، بلکه میانجی ترجمه‌ای است که از طریق انتخاب، تفسیر و سازمان‌دهی داده‌ها، در صورت‌بندی مسئله، جهت‌دهی به تصمیم‌های طراحی و تثبیت شبکه کنشگران مداخله می‌کند.

۱-۱- پیشینه پژوهش

ادبیات طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری در سال‌های اخیر در امتداد سه مسیر مرتبط توسعه یافته است: مسیر نخست بر توسعه قابلیت‌های فنی هوش مصنوعی تمرکز دارد؛ مسیر دوم جایگاه فناوری را در تصمیم‌گیری و تولید فضا بازاندیشی می‌کند؛ و مسیر سوم پیامدهای حکمرانی ناشی از گسترش تصمیم‌گیری الگوریتمی، به‌ویژه در شفافیت، پاسخ‌گویی و عدالت را بررسی می‌کند.

در جریان نخست، پژوهش‌ها عمدتاً بر ارتقای قابلیت‌های محاسباتی الگوریتم‌ها برای شناخت، تحلیل و بهینه‌سازی سامانه‌های سبز شهری متمرکز بوده‌اند. در این مطالعات، الگوریتم‌ها عمدتاً به‌عنوان ابزارهایی برای استخراج الگوهای فضایی، پیش‌بینی عملکرد محیطی و بهینه‌سازی گزینه‌های طراحی به کار گرفته شده‌اند. لی و همکاران^(۲۰۲۴) نشان داده‌اند که توسعه روش‌های یادگیری عمیق و بخش‌بندی معنایی امکان سنجش دقیق‌تر پوشش سبز، ساختار منظر و ویژگی‌های فضایی را فراهم کرده است، اگرچه محدودیت‌هایی مانند کاهش تبیین‌پذیری مدل‌ها همچنان به‌عنوان یک چالش مطرح است. در حوزه اقلیم شهری نیز مدل‌های یادگیری ماشین برای تحلیل روابط پیچیده میان پوشش گیاهی، ساختار کالبدی و شرایط حرارتی توسعه یافته‌اند. برای نمونه، او و همکاران^(۲۰۲۰) با معرفی شاخص ساعات حرارتی نشان دادند که ارزیابی تجمعی ساعات مواجهه با جزیره گرمایی می‌تواند نسبت به سنج‌های متعارف، تصویر دقیق‌تری از عملکرد اقلیمی ارائه دهد. همچنین پنگ و همکاران^(۲۰۲۶) نشان دادند که ویژگی‌های ریخت‌شناختی منظر مانند هسته، شاخه، جزیره و لبه می‌توانند در تبیین الگوهای حرارتی شهری نقش مهمی ایفا کنند.

با این حال، توسعه این رویکردها به تدریج نقش الگوریتم را از تحلیل وضعیت موجود به مشارکت در تولید آینده‌های فضایی تغییر داده است. ظهور مدل‌های مولد و سامانه‌های توصیه‌گر نشان می‌دهد که الگوریتم‌ها دیگر صرفاً به پرسش «وضعیت موجود چگونه است؟» پاسخ نمی‌دهند، بلکه در تعیین «چه گزینه‌هایی امکان تصور و انتخاب دارند؟» نیز مشارکت می‌کنند. در این زمینه تانگ و چانگ^(۲۰۲۴) مدلی را برای تولید و ارزیابی خودکار طرح‌های منظر شهری ارائه کردند؛ وانگ و ژانگ^(۲۰۲۵) نیز چارچوبی مبتنی بر شبکه عصبی عمیق برای تولید چیدمان‌های فضای سبز منطبق با محدودیت‌های طراحی توسعه دادند. با وجود اهمیت این مطالعات، تمرکز غالب آن‌ها همچنان بر معیارهای عملکردی مانند دقت، کارایی و بهیمنی بوده و اینکه الگوریتم چگونه در تعریف مسئله طراحی، تعیین معیارهای ارزیابی و شکل‌دهی به روابط میان کنشگران مداخله می‌کند کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

پاسخ به این پرسش نیازمند عبور از نگاه صرفاً ابزارمحور و ورود به جریان دوم پژوهش، یعنی مطالعات علم و فناوری است. نظریه کنشگر-شبکه با نقد دوگانه انسان/فناوری، فناوری را نه ابزاری منفعل، بلکه بخشی از شبکه‌ای از روابط انسانی و غیرانسانی می‌داند که در شکل‌گیری کنش اجتماعی و فضایی مشارکت دارد. در این زمینه کرسول و همکاران^(۲۰۱۰) نشان می‌دهند که نظریه کنشگر شبکه امکان تحلیل چگونگی نقش‌آفرینی فناوری در فرآیندهای اجتماعی و شناسایی روابط میان کنشگران مختلف را فراهم می‌کند. گاندرسون و همکاران^(۲۰۲۴) نیز با طرح مفهوم «موقعیت بینایی ماشین» نشان می‌دهند که فناوری‌های بینایی ماشین صرفاً ابزار مشاهده نیستند، بلکه در موقعیت‌های خاص به‌عنوان بخشی از شبکه کنش مشارکت می‌کنند و عاملیت در آن‌ها میان کنشگران انسانی و غیرانسانی توزیع می‌شود. بر این اساس، الگوریتم را می‌توان نه فقط واسطه انتقال داده، بلکه میانجی‌ای دانست که داده‌های محیطی را به بازنمایی، معیار و تصمیم طراحی ترجمه می‌کند.

با وجود ظرفیت نظری این تئوری برای تحلیل این فرآیند، استفاده تجربی از آن در پژوهش‌های فناوری هنوز با چالش‌هایی همراه است. مرور رایان و همکاران^(۲۰۲۴) بر مطالعات مبتنی بر نظریه کنشگر-شبکه نشان می‌دهد که کاربرد این چارچوب اغلب پراکنده بوده و مفاهیم بنیادینی مانند ترجمه و شکل‌گیری شبکه کمتر به‌صورت منسجم عملیاتی شده‌اند. از این رو، مفهوم ترجمه در نظریه کالن می‌تواند امکان تحلیل دقیق‌تری فراهم کند؛ زیرا به‌جای پرسش از اینکه فناوری چه اثری بر جامعه دارد، بررسی می‌کند که چگونه روابط، نقش‌ها و منافع در جریان ورود یک فناوری بازآرایی می‌شوند.

در امتداد این جریان، ادبیات مرتبط با دوقلوی دیجیتال شهری نیز برای فهم جایگاه الگوریتم در طراحی هوشمند اهمیت ویژه‌ای یافته است. داوکیوز و کیچین^(۲۰۲۵) استدلال می‌کنند که دوقلوی دیجیتال را نباید صرفاً مجموعه‌ای از فناوری‌ها، بلکه باید سازوکاری برای تولید، پردازش و بازخورد اطلاعات دانست. از این منظر، بازنمایی دیجیتال شهر خنثی نیست، چراکه



برخی ویژگی‌ها را برجسته و برخی دیگر را به حاشیه می‌راند. با این حال، این دیدگاه الزاماً به جبرگرایی فناورانه منجر نمی‌شود؛ بلکه نشان می‌دهد که جهت‌گیری پیامدهای فناوری به معماری نهادی و شیوه سازمان‌دهی داده و مشارکت وابسته است. پذیرش چنین برداشتی از نقش الگوریتم، به جریان سوم یعنی ادبیات حکمرانی الگوریتمی، پاسخ‌گویی و شفافیت پیوند می‌خورد. بوسویوک (۲۰۲۱) معتقد است که ورود هوش مصنوعی به تصمیم‌گیری عمومی، الگوهای سنتی مسئولیت‌پذیری را با چالش مواجه می‌کند، زیرا عملکرد فنی الگوریتم الزاماً امکان توضیح و ارزیابی عمومی آن را تضمین نمی‌کند. در همین راستا، دلات (۲۰۱۸) مفهوم شفافیت طراحی‌محور را مطرح می‌کند که بر آشکارسازی اهداف، داده‌ها، معیارها و مفروضات نهفته در طراحی الگوریتم تأکید دارد؛ استینسون (۲۰۲۲) نیز نشان می‌دهد که سوگیری الگوریتمی صرفاً از داده‌های ورودی ناشی نمی‌شود و انتخاب متغیرها و ساختار مدل نیز در شکل‌گیری پیامدهای نابرابر نقش دارند. علاوه بر موارد بیان شده، در پژوهش‌های داخلی نیز توجه به رویکردهای رابطه‌ای زمینه مناسبی برای این بحث فراهم کرده است. حاتمی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) و کانونی و همکاران (۱۴۰۲) با طرح مفهوم «فضا به مثابه شبکه» بر نقش کنشگران انسانی و مادی در تولید فضا تأکید کرده‌اند؛ فارابی‌اصل و همکاران (۱۴۰۲) نیز نشان داده‌اند که شبکه‌های قدرت نهادی چگونه مسیرهای تصمیم‌گیری فضایی را شکل می‌دهند. این مطالعات، امکان تحلیل فناوری‌های هوشمند را در قالب شبکه‌هایی از قدرت، دانش و ماده فراهم می‌کنند؛ با این حال توجه به این امر در بستر زیرساخت‌های سبز چندان مورد توجه نبوده است. در مجموع، مرور ادبیات سه شکاف اصلی را آشکار می‌سازد: شکاف هستی‌شناختی درباره شرایط تبدیل الگوریتم به میانجی تصمیم؛ شکاف نظری-کاربردی در به کارگیری کامل نظریه کنشگر-شبکه در حوزه زیرساخت سبز هوشمند؛ و شکاف هنجاری در پیوند شفافیت و پاسخ‌گویی به سازوکارهای مشخص طراحی مانند جانمایی فضای سبز و انتخاب گونه؛ که توجه به آن‌ها وجه تمایز پژوهش حاضر است (جدول ۱).

جدول ۱- جمع‌بندی سه جریان ادبیات طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری

جریان پژوهش	مطالعات شاخص	نکات قابل توجه	خلا پژوهشی
توسعه قابلیت‌های فنی هوش مصنوعی در شناخت، پایش و تولید گزینه‌های طراحی	Lee et al., 2024; Oh et al., 2020; Peng et al., 2026; Tang & Chung, 2024; Wang & Zhang, 2025 و ...	نقش الگوریتم از تحلیل وضع موجود به تولید و رتبه‌بندی گزینه‌های طراحی گسترش یافته است.	معیار ارزیابی همچنان عملکردی (دقت، کارایی، بهینگی) است و مشارکت الگوریتم در تعریف مسئله و معیارها چندان بررسی نمی‌شود ← شکاف هستی‌شناختی
مطالعات مرتبط با فناوری و نظریه کنشگر-شبکه	Cresswell et al., 2010; Gunderson et al., 2024; Ryan et al., 2024; Dawkins & Kitchin, 2025; حاتمی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲؛ کانونی و همکاران، ۱۴۰۲؛ فارابی‌اصل و همکاران، ۱۴۰۲ و ...	چارچوبی برای فهم عاملیت به مثابه اثری رابطه‌ای و توزیع‌شده میان کنشگران فراهم می‌کند.	کاربست این ظرفیت پراکنده بوده و مفهوم ترجمه به‌ویژه در حوزه زیرساخت سبز هوشمند، آنگونه که باید به‌طور منسجم عملیاتی نشده است ← شکاف نظری-کاربردی
حکمرانی پاسخ‌گویی و شفافیت الگوریتمی	Busuioc, 2021; De Laat, 2018; Loi et al., 2021; Stinson, 2022; Bellanova & De Goede, 2022 و ...	الگوریتم سازوکاری خنثی نیست و انتخاب‌های نهفته در طراحی مدل، ابعاد هنجاری دارند.	مباحث شفافیت و پاسخ‌گویی در سطح کلی باقی‌مانده و به سازوکارهای انضمامی طراحی شهری (جانمایی فضای سبز، انتخاب گونه، اولویت‌بندی مداخلات) چندان پیوند نخورده است ← شکاف هنجاری

۲- روش پژوهش

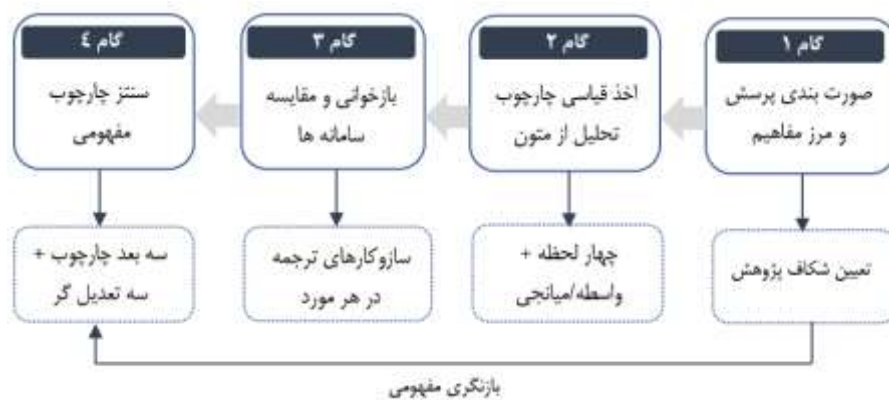
پژوهش حاضر، از نظر ماهیت داده‌ها کیفی و از حیث راهبرد، نظری-مفهومی است و هدف آن، صورت‌بندی چارچوبی مفهومی برای تبیین جایگاه الگوریتم‌های هوش مصنوعی در شبکه طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری است. برای این منظور، نظریه کنشگر-شبکه به عنوان لنز نظری برگزیده شد و چهار لحظه ترجمه (پروبلما تیزه کردن، جلب علاقه، عضوگیری و هم‌آوایی کنشگران) ابزار تحلیلی اصلی قرار گرفت.

گردآوری داده‌ها مبتنی بر متون دست‌اول نظریه کنشگر-شبکه (بدون قید زمانی) و مقالات داوری همتای بازه ۲۰۱۰-۲۰۲۶ از پایگاه‌های اسکوپوس^۴، وب آو ساینس^۵ و پایاب^۶ بود؛ بر این اساس سه خوشه کلیدواژه جست‌وجو شد: زیرساخت سبز شهری و خدمات اکوسیستمی؛ هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و شهر هوشمند؛ و نظریه کنشگر-شبکه، عاملیت و حکمرانی



الگوریتمی. معیارهای ورود عبارت بودند از ارتباط مستقیم با یکی از سه مسیر پژوهشی و گزارش جزئیات کافی برای ردیابی نحوه مشارکت الگوریتم در تعریف مسئله یا معیارها؛ مطالعاتی که تنها عملکرد فنی مدل را بدون اشاره به زمینه تصمیم‌گیری گزارش می‌کردند کنار گذاشته شدند. نمونه‌گیری به صورت هدفمند و تا اشباع مفهومی ادامه یافت.

تحلیل در چهار گام پیوسته صورت گرفت (تصویر ۱): نخست، پرسش راهبر صورت‌بندی و مرزهای مفهومی سه ستون نظری پژوهش تعیین شد. دوم، چارچوب تحلیل به صورت قیاسی از متون دست‌اول اخذ شد (چهار لحظه ترجمه و تمایز واسطه/میانجی به عنوان معیار تشخیص جایگاه الگوریتم). سوم، پنج سامانه به صورت جداگانه از خلال چهار لحظه بازخوانی و با معیارهای مشترک مقایسه شدند. چهارم، برآیند این مقایسه در قالب چارچوبی مفهومی سنتز شد. به طور کلی به منظور تضمین اعتبار یافته‌ها، در فرایند تحلیل، چند ملاحظه روش شناختی مورد توجه قرار گرفت. مفاهیم بنیادی بر اساس متون دست‌اول استخراج شدند تا از اتکا به خوانش‌های واسطه‌ای کاسته شود. مرور ادبیات در سه مسیر مرتبط انجام گرفت و گزاره‌های تحلیلی درباره هر سامانه بر مبنای شواهد گزارش‌شده در منابع اصلی آن تنظیم شد؛ به گونه‌ای که میان داده‌های منبع و تفسیر تحلیلی پژوهش تمایز گذاشته شود. همچنین، موارد بررسی شده با معیارهای مشترک مقایسه شدند تا از سجام تحلیل حفظ شود. بالاین‌حال، تحلیل حاضر بر گزارش‌های منتشر شده استوار است و نه مشاهده مستقیم فرایند طراحی؛ محدودیتی که در بخش نتیجه‌گیری به آن پرداخته شده است.



تصویر ۱- فرایند کلی پژوهش

۳- مبانی نظری

مبانی نظری این پژوهش بر سه محور استوار است: نخست، تبیین مفهوم زیرساخت سبز هوشمند شهری و تمایز آن از مفاهیم مجاور؛ دوم، معرفی نظریه کنشگر-شبه به عنوان چارچوب تحلیلی؛ و سوم، صورت‌بندی مفهوم عاملیت الگوریتمیک بر پایه این چارچوب. ترتیب این سه محور بر این اساس بوده است که فهم عاملیت الگوریتمیک، هم به شناخت ابژه پژوهش و هم به در اختیار داشتن چارچوب تحلیل روابط وابسته است.

۳-۱- زیرساخت سبز هوشمند شهری

مفهوم زیرساخت سبز شهری طی دهه‌های اخیر دستخوش تحول مفهومی مهمی شده است. در برداشت‌های متعارف، فضاهای سبز عمدتاً به عنوان عناصر کالبدی منفرد با کارکردهای زیبایی‌شناختی، تفریحی یا خدماتی تلقی می‌شدند؛ برداشتی که از نظر منطق برنامه‌ریزی به زیرساخت «خاکستری» نزدیک است، زیرا هر عنصر برای تأمین یک کارکرد مشخص طراحی می‌شود. در مقابل، رویکرد زیرساخت سبز، عناصر طبیعی و نیمه‌طبیعی را اجزای یک شبکه فضایی-اکولوژیک پیوسته می‌داند که در مقیاس‌های مختلف عمل کرده و مجموعه‌ای از خدمات اکوسیستمی، از تعدیل جزیره گرمایی و مدیریت رواناب تا بهبود کیفیت هوا و ارتقای سلامت شهروندان، فراهم می‌آورد (Jia & Turcu, 2025). محور این تمایز، مفهوم چندعملکردی است؛ یعنی توانایی یک پهنه واحد برای تأمین هم‌زمان کارکردهای اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی، در مقابل منطق تک‌عملکردی زیرساخت خاکستری (Hansen & Pauleit, 2014).

در این چارچوب، ویژگی‌های ساختاری شبکه، از جمله پیوستگی و اندازه لکه‌های سبز، با ظرفیت چندعملکردی آن ارتباط دارند (Li & Carter, 2025)؛ بنابراین، ارزش زیرساخت سبز صرفاً به حضور عناصر گیاهی وابسته نیست، بلکه به ظرفیت آن‌ها برای ایجاد هم‌افزایی میان اهدافی مانند تنظیم خرداقلیم، مدیریت رواناب و حفاظت از تنوع زیستی مربوط می‌شود. از این رو، ارزش زیرساخت سبز را باید در کیفیت روابط میان اجزای شبکه اجتماعی-اکولوژیک جست‌وجو کرد (Andersson et al., 2019). نه صرفاً در ویژگی‌های کالبدی عناصر منفرد آن. در امتداد این تحول، ورود فناوری‌های داده‌محور و سامانه‌های هوشمند مرحله جدیدی در فهم و مدیریت زیرساخت سبز شهری ایجاد کرده است؛ اما پیش از آن، لازم است سه مفهوم مرتبط از یکدیگر تفکیک شوند: زیرساخت سبز، زیرساخت هوشمند شهری و زیرساخت سبز هوشمند شهری. این سه نه سطوح یک مفهوم واحد، بلکه سه صورت‌بندی متفاوت با واحد تحلیل و منطق تصمیم‌گیری متمایزند (جدول ۲).

جدول ۲- تمایز مفهومی زیرساخت سبز، زیرساخت هوشمند شهری و زیرساخت سبز هوشمند شهری

مفهوم	تعریف	نکات و ویژگی‌های مهم	منبع
زیرساخت سبز	شبکه‌ای راهبردی و برنامه‌ریزی شده از پهنه‌های طبیعی و نیمه‌طبیعی به همراه سایر عناصر محیطی که برای ارائه طیف گسترده‌ای از خدمات اکوسیستمی طراحی و مدیریت می‌شود.	- در تقابل با زیرساخت «خاکستری» که به صورت تک عملکردی برنامه‌ریزی می‌شود. - چند عملکردی به معنای ترکیب کارکردهای اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی در یک پهنه واحد. - پیوستگی و اندازه لکه‌های سبز با ظرفیت چند عملکردی شبکه مرتبط است. - منافع خدمات اکوسیستمی «هم‌تولید» می‌شوند و از سه صافی زیرساختی، نهادی و ادراکی-ارزشی عبور می‌کنند.	Hansen & Pauleit, 2014؛ Li & Carter, 2025؛ Andersson et al., 2019؛ نوروزی و سوزنجی، ۱۴۰۰؛ شیرگیر و همکاران، ۱۳۹۸
زیرساخت هوشمند شهری	زیرساختی که در آن مؤلفه‌های شهری از طریق اینترنت اشیاء در یک معماری یکپارچه به هم متصل می‌شوند و داده‌های کلان شهری در برنامه‌ریزی، مدیریت و ارتقای کیفیت خدمات شهری به کار گرفته می‌شود.	- اینترنت اشیاء و رشد دستگاه‌های متصل، خاستگاه مفهوم شهر هوشمند است. - مؤلفه‌هایی نظیر حمل‌ونقل هوشمند، اجتماع هوشمند، سلامت هوشمند، شبکه انرژی هوشمند و ... با هدف ارتقای کیفیت زندگی یکپارچه می‌شوند. - معماری سه‌لایه: تجمیع داده، مدیریت بلادرنگ داده و ارائه خدمات. - موضوع آن کل سامانه شهری است و لزوماً بر عناصر اکولوژیک متمرکز نیست.	Silva et al., 2018
زیرساخت سبز هوشمند شهری	زیرساخت سبزی که سنجش مستمر، مدل‌سازی محاسباتی و پشتیبانی از تصمیم مبتنی بر داده در آن ادغام شده و از این رو به‌مثابه پیکربندی اجتماعی-اکولوژیک-فناورانه فهم می‌شود.	- در سطح پایش: سنجش‌ازدور و بینایی ماشین امکان رصد خودکار وضعیت پوشش گیاهی را در تفکیک تک‌درخت به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌کند. - در سطح طراحی: مدل‌هایی مانند یادگیری عمیق بر پایه تصاویر ماهواره‌ای و داده حسگر، چیدمان فضای سبز منطبق با ضوابط تولید می‌کنند. - در سطح انتخاب: سامانه‌های توصیه‌گر گونه‌های درختی را بر پایه صفات کارکردی پیشنهاد می‌دهند.	Fuentes et al., 2021؛ Wang & Zhang, 2025؛ Nicol et al., 2026؛ Helmrich et al., 2023؛ کاظمی و رضایی، ۱۴۰۳

چنان‌که جدول ۲ نشان می‌دهد، تفاوت میان این سه مفهوم نه در دامنه یا حضور فناوری، بلکه در واحد تحلیل و منطق تصمیم‌گیری آن‌هاست: زیرساخت سبز بر منطق اکولوژیک و چندعملکردی استوار است، زیرساخت هوشمند شهری بر منطق داده و بلادرنگ بودن و زیرساخت سبز هوشمند شهری در تقاطع این دو منطق شکل می‌گیرد. توسعه فناوری‌هایی مانند سنجش‌ازدور، شبکه‌های حسگر و اینترنت اشیاء، امکان رصد و مدل‌سازی پویاتر فرایندهای محیطی را فراهم کرده و زیرساخت سبز را از سامانه‌ای عمدتاً ایستا به سامانه‌ای قابل پایش تبدیل کرده است. در سامانه‌های داده‌محور، جریان مستمر داده‌ها چرخه مشاهده، تحلیل و تصمیم را به فرایندی پیوسته‌تر بدل می‌کند؛ همان‌گونه که بتی (۲۰۱۳) بر نقش افزایش ظرفیت داده در نزدیک‌تر شدن این فرایندها تأکید می‌کند. در این چارچوب، معماری‌های چندلایه شهر هوشمند، ارتباط میان داده و تصمیم را سازمان‌دهی می‌کنند (Silva et al., 2018). با ادغام این دو منطق، نقش فناوری نیز از پایش و تحلیل به تولید دانش و پشتیبانی از تصمیم گسترش می‌یابد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای سبزینگی و عملکرد اکولوژیک و نیز مشارکت در تولید و رتبه‌بندی گزینه‌های طراحی را فراهم کرده‌اند (Peng et al., 2026; Wang et al., 2026).



(2025؛ بنابراین، اهمیت این تحول صرفاً به دقت پیش‌بینی محدود نیست، بلکه به تغییر رابطه میان داده، مدل و تصمیم طراحی مربوط می‌شود؛ به گونه‌ای که الگوریتم از ابزار تحلیلی فراتر رفته و در فرایند تولید گزینه‌های طراحی نیز مشارکت می‌کند. از این رو، هوشمندسازی زیرساخت سبز را می‌توان بازآرایی شیوه تولید دانش، تعریف مسئله و سازمان‌دهی فرایند تصمیم‌گیری طراحی دانست (Cook & Karvonen, 2024).

با این حال، این تحول به معنای جایگزینی قضاوت انسانی با تصمیم الگوریتمی نیست، زیرا سامانه‌های محاسباتی در بستری عمل می‌کنند که داده‌ها، مدل‌ها، متخصصان، نهادها و عناصر محیطی بر یکدیگر اثر می‌گذارند. بر این اساس، زیرساخت سبز هوشمند را می‌توان پیکربندی‌ای اجتماعی-اکولوژیک-فناورانه دانست که در آن فرایندهای محیطی، روابط اجتماعی و زیرساخت‌های داده‌ای در تعامل با یکدیگر سازمان می‌یابند (McPhearson et al., 2022). چنین برداشتی، این سامانه را نه صرفاً موضوعی طبیعی و نه صرفاً فناورانه، بلکه ایذه‌ای پیوندی میان کنشگران انسانی و غیرانسانی نشان می‌دهد. در نتیجه، تحلیل چگونگی شکل‌گیری روابط میان این کنشگران، از جمله جایگاه الگوریتم در شبکه تصمیم، نیازمند چارچوبی است که این روابط و فرایندهای ترجمه میان آن‌ها را در برگیرد؛ از این منظر، نظریه کنشگر-شبکه و مفهوم ترجمه چارچوبی مناسب برای تبیین شکل‌گیری عاملیت الگوریتمی در طراحی زیرساخت سبز هوشمند فراهم می‌کنند که در ادامه بدان می‌پردازد.

۳-۲- نظریه کنشگر-شبکه: چارچوبی برای تحلیل عاملیت رابطه‌ای

نظریه کنشگر-شبکه در دهه ۱۹۸۰ و با آثار برونو لاتور^۶، میشل کالن^۷ و جان لاک^۸ شکل گرفت. این نظریه در واکنش به دوگانه‌های رایج میان جامعه و فناوری، انسان و طبیعت و عامل انسانی و ساختارهای مادی، بر این دیدگاه استوار است که پدیده‌های اجتماعی نه صرفاً محصول کنش انسان‌ها و نه نتیجه جبر فناوری، بلکه حاصل شبکه‌هایی از روابط میان کنشگران انسانی و غیرانسانی هستند. در این چارچوب، فناوری‌ها، داده‌ها، اسناد، زیرساخت‌ها و عناصر طبیعی صرفاً ابزارهای منفعل نیستند، بلکه از طریق امکان‌پذیر کردن، محدود کردن یا جهت‌دهی به کنش‌ها، در شکل‌گیری پیامدهای اجتماعی مشارکت می‌کنند (Callon, 1986; Latour, 2005). با این حال، این نظریه، یکی از چند رویکرد نظری برای تحلیل رابطه انسان، فناوری و محیط است و تفاوت آن با رویکردهای نزدیک را می‌توان بر اساس واحد تحلیل، جایگاه فناوری و نحوه تبیین روابط میان کنشگران بررسی کرد (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه نظریه کنشگر-شبکه با رویکردهای نزدیک به تحلیل عاملیت

نظریه/رویکرد	نکات کلیدی نظری	مآخذ
ساخت یابی	عاملیت را دوسویه میان کنش انسانی و ساختار می‌داند؛ فناوری در این چارچوب عمدتاً قاعده یا ساختاری است که کنش انسانی را قالب‌بندی می‌کند، نه کنشگری مستقل.	Giddens, 1984
ساخت اجتماعی فناوری	معنای یک مصنوع فناورانه را حاصل تفسیرها و مذاکرات گروه‌های اجتماعی ذی‌نفع می‌داند؛ تمرکز اصلی این رویکرد بر فرایند «بسته‌شدن تفسیری» فناوری از طریق شکل‌گیری توافق اجتماعی است.	Pinch & Bijker, 1984
کنشگر-شبکه	عاملیت را اثری رابطه‌ای و متقارن میان کنشگران انسانی و غیرانسانی می‌داند؛ برخلاف رویکردهای دیگر، ابزار تحلیلی مرحله‌ای (چهار لحظه ترجمه) برای پیگیری این فرایند ارائه می‌دهد.	Callon, 1986; Latour, 2005
نظریه تجمع ^{۱۹}	اجزای ناهمگن انسانی، مادی و نهادی را در ترکیبی موقت و قابل فروپاشی می‌بیند که عاملیت از ظرفیت رابطه‌ای میان آن‌ها برمی‌خیزد.	DeLanda, 2006
واقع‌گرایی عاملیتی	عاملیت را نه ویژگی از پیش موجود کنشگران، بلکه امری تولیدشده در دل «درون‌کنش» می‌داند؛ سوژه و ایژه پیشاپیش وجود ندارند و در همان لحظه کنش شکل می‌گیرند.	Barad, 2007

چنان‌که جدول ۳ نشان می‌دهد، تفاوت این رویکردها را می‌توان در میزان و نوع عاملیتی که برای عناصر غیرانسانی قائل‌اند دنبال کرد. ساخت‌یابی و ساخت اجتماعی فناوری در یک قطب قرار می‌گیرند؛ هر دو، هرچند از مسیرهای متفاوت، منشأ نهایی کنش را به عامل انسانی یا توافق اجتماعی بازمی‌گردانند و برای عناصر مادی و اکولوژیک نقشی عمدتاً زمینه‌ای در نظر می‌گیرند. در مقابل، واقع‌گرایی عاملیتی و نظریه تجمع عاملیت غیرانسانی را می‌پذیرند، اما فاقد مقوله‌های تحلیلی مشخصی برای ردیابی گام‌به‌گام فرایندی هستند که طی آن یک کنشگر، برای نمونه الگوریتم، به میانجی تصمیم تبدیل می‌شود. نظریه کنشگر-شبکه این دو محدودیت را هم‌زمان پوشش می‌دهد؛ از یک سو، همانند واقع‌گرایی عاملیتی و نظریه تجمع، عاملیت را از انحصار انسانی خارج می‌کند و از سوی دیگر، با مفهوم ترجمه و چهار لحظه آن، سازوکاری برای ردیابی چگونگی شکل‌گیری و تثبیت این عاملیت فراهم می‌آورد. مبنای این ویژگی، یعنی امکان تحلیل عاملیت انسانی و غیرانسانی در یک چارچوب واحد، در اصل «تقارن تحلیلی» توضیح داده می‌شود.

به‌طور کلی اصل «تقارن تحلیلی» یکی از مبانی هستی‌شناختی این رویکرد است؛ بر اساس آن، تحلیلگر نباید عاملیت را صرفاً به کنشگران انسانی نسبت دهد، بلکه باید نقش عناصر غیرانسانی را نیز در شکل‌گیری شبکه‌های کنش بررسی کند (Latour, 2005). بر این اساس، الگوریتم، داده و مدل‌های محاسباتی نه به دلیل ویژگی‌های فنی خود، بلکه از طریق اثری که در سازمان‌دهی روابط میان کنشگران و جهت‌دهی به فرایند تصمیم‌یجاد می‌کنند، اهمیت تحلیلی می‌یابند. الگوریتم در شبکه‌ای قرار می‌گیرد که داده‌ها، استانداردها، نهادها، متخصصان و عناصر محیطی را به یکدیگر پیوند می‌دهد؛ از این‌رو، تحلیل تصمیم‌های طراحی مستلزم توجه به روابطی است که طی آن مسئله تعریف، معیارها انتخاب و گزینه‌های مداخله تولید می‌شوند. در این چارچوب، عاملیت الگوریتمیک نه ویژگی ذاتی مدل، بلکه اثری برآمده از جایگاه آن در شبکه روابط است. پذیرش این اصل، نظریه کنشگر-شبکه را با نقدی مهم نیز مواجه کرده است: احتمال کم‌رنگ شدن نقش قصدها، ارزش‌ها، منافع و زمینه‌های اخلاقی کنشگران انسانی برای رفع این ابهام، باید میان «تقارن تحلیلی» و «هم‌ارزی هنجاری» تمایز قائل شد؛ تقارن، اصلی‌ترین روش شناختی برای بررسی نقش عناصر مختلف شبکه است و به معنای برابر دانستن مسئولیت اخلاقی انسان و فناوری نیست. بر این اساس، توزیع نقش و مسئولیت میان کنشگران، نتیجه تحلیل شبکه است و نه پیش‌فرض آن (Cresswell et al., 2010).

در امتداد این مبنا، «ترجمه» نیز سازوکار اصلی نظریه کنشگر-شبکه برای توضیح چگونگی شکل‌گیری، تثبیت و تحول شبکه‌ها است. ترجمه، انتقال ساده اطلاعات نیست، بلکه فرایندی است که طی آن هویت کنشگران، نقش‌های آن‌ها، روابط قدرت و تعریف مسئله به‌طور هم‌زمان بازسازی می‌شود. کالن (۱۹۸۶) این فرایند را در قالب چهار لحظه تحلیلی صورت‌بندی می‌کند:

- مسئله‌مندسازی: تعریف مسئله مشترک و ایجاد نقطه‌گذار اجباری که سایر کنشگران برای دستیابی به اهداف خود ناگزیر از عبور از آن هستند؛
 - جلب علاقه: مجموعه اقداماتی که از طریق آن پیوندهای پیشنهادی میان کنشگران تثبیت و روابط رقیب تضعیف می‌شوند. در این مرحله، ابزارهای مادی، فناوری‌ها و استانداردها نیز نقش دارند؛
 - عضوگیری/پذیرش، مذاکره و تثبیت نقش‌های تعریف شده برای کنشگران و شکل‌گیری مجموعه‌ای از انتظارات و روابط نسبتاً پایدار؛
 - هم‌آوایی کنشگران: مرحله‌ای که در آن برخی کنشگران، مدل‌ها، شاخص‌ها یا بازنمایی‌ها می‌توانند به نام شبکه سخن بگویند و در مشروعیت بخشی به تصمیم‌ها نقش ایفا کنند (Callon, 1986).
- باین‌حال، ترجمه همواره موفقیت‌آمیز نیست و شبکه‌ها ممکن است در هر مرحله با مقاومت، شکست یا بازآرایی مواجه شوند؛ زیرا کنشگران ممکن است نقش‌های پیشنهادی را نپذیرند یا مسیرهای پیش‌بینی شده را دنبال نکنند (Callon, 1986)، از این‌رو، تحلیل شبکه نه تنها باید شرایط تثبیت روابط، بلکه امکان مقاومت و شکست ترجمه را نیز بررسی کند.

۳-۳- عاملیت الگوریتمیک: از ابزار تا میانجی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، گسترش سامانه‌های هوش مصنوعی در حوزه‌هایی مانند طراحی و مدیریت زیرساخت‌های سبز شهری، جایگاه الگوریتم را در فرایندهای طراحی و تصمیم‌گیری از یک ابزار محاسباتی صرف فراتر برده است. در برداشت متعارف، الگوریتم سازوکاری است که داده‌های ورودی را بر اساس قواعد از پیش تعریف‌شده پردازش و خروجی مشخصی تولید می‌کند؛ در این نگاه، الگوریتم نقش مستقلی در تولید معنا ندارد و مسئولیت تصمیم‌نهایی به کنشگر انسانی نسبت داده می‌شود. باین‌حال، این برداشت برای توضیح سامانه‌های پیچیده معاصر کافی نیست؛ چراکه الگوریتم‌ها از طریق انتخاب و سازمان‌دهی داده‌ها، تعریف معیارها، طبقه‌بندی پدیده‌ها و اولویت‌بندی گزینه‌ها، انتخاب‌هایی ارزشی را در کنار فرایندهای فنی خود در برمی‌گیرند (Busuioc, 2021).

بر همین مبنا، «عاملیت الگوریتمیک» به عملیات محاسباتی یا توانایی فنی مدل در پردازش داده اشاره ندارد، بلکه به جایگاهی مربوط است که الگوریتم در شبکه روابط تصمیم‌گیری به دست می‌آورد و از طریق سازمان‌دهی اطلاعات، تعریف معیارها و محدود یا گسترش دادن دامنه گزینه‌ها، در صورت‌بندی مسئله اثر می‌گذارد؛ اثری رابطه‌ای و شبکه‌ای که نه ویژگی انحصاری کنشگر انسانی است و نه محصول ساختارها (Cresswell et al., 2010). از این‌رو، عاملیت الگوریتمیک نه بر قصد، آگاهی یا خودآیینی فناوری دلالت دارد و نه ویژگی ذاتی کد یا مدل است، بلکه در تعامل با داده‌ها، کاربران، زیرساخت‌های فناورانه، نهادهای تصمیم‌گیر و اهداف طراحی شکل می‌گیرد. توزیع این عاملیت میان انسان و فناوری نیز رابطه‌ای جمع صفر



نیست؛ افزایش نقش یک کنشگر الزاماً به کاهش نقش سایرین منجر نمی‌شود (زهرانی و همکاران، ۱۴۰۰)؛ بنابراین، فناوری نه باید به ابزار خنثی فروکاسته شود و نه به عاملی مستقل و تعیین‌کننده تقلیل یابد؛ پذیرش الگوریتم به‌عنوان کنشگر غیرانسانی نیز به معنای جایگزینی نقش طراح یا نهاد تنظیم‌گر نیست، بلکه به بازتنظیم روابط میان این کنشگران اشاره دارد (رستمی و همکاران، ۱۴۰۰).

این برداشت، تصور الگوریتم به‌عنوان ابزاری خنثی را به چالش می‌کشد؛ زیرا اثرگذاری آن صرفاً به داده‌های ورودی یا دقت محاسباتی محدود نیست، بلکه به انتخاب‌های نهفته در طراحی، از جمله گزینش متغیرها، ساختار مدل، معیارهای ارزیابی و منطق تصمیم‌گیری، وابسته است (Stinson, 2022). از این رو، پاسخ‌گویی الگوریتمی تنها با اصلاح داده‌ها یا افزایش دقت مدل تحقق نمی‌یابد، بلکه مستلزم توجه به کل زنجیره تبدیل ویژگی‌های محیطی به بازنمایی‌های محاسباتی و گزینه‌های تصمیم است. در حکمرانی الگوریتمی، بخشی از تصمیم‌سازی به مدل‌هایی واگذار می‌شود که منطق عملکردشان ممکن است برای همه کنشگران آشکار نباشد؛ وضعیتی که میان ظرفیت فنی سامانه‌ها و سازوکارهای سنتی پاسخ‌گویی شکاف ایجاد می‌کند (Busuioc, 2021). این مسئله در پدیده «جعبه سیاه» نیز نمود می‌یابد، زیرا مسیر تبدیل داده ورودی به خروجی نهایی ممکن است حتی برای توسعه‌دهندگان کاملاً آشکار نباشد. با این حال، شفافیت الگوریتمی به آشکارسازی کد محدود نمی‌شود؛ لوی و همکاران تأکید می‌کنند که تقلیل شفافیت به تفسیرپذیری پسینی خروجی، تصویری ناقص ارائه می‌دهد و اهداف طراحی، دامنه کاربرد و معیارهای ارزیابی را نیز در برمی‌گیرد (Loi et al., 2021). بدین ترتیب، شفافیت از پرسش «مدل چگونه تصمیم گرفت؟» فراتر رفته و به اهداف و معیارهای طراحی آن معطوف می‌شود. در عین حال، شفافیت کامل عمومی همواره امکان‌پذیر یا مطلوب نیست؛ زیرا پیچیدگی مدل‌ها، مالکیت فکری، حریم خصوصی و امکان دست‌کاری سامانه محدودیت‌هایی ایجاد می‌کنند. از این رو، مسئله اصلی نه دستیابی به شفافیت مطلق، بلکه تعیین این است که چه اطلاعاتی، برای چه کنشگری و در چه مرحله‌ای باید در دسترس باشد (De Laat, 2018).

بر این مبنا، عاملیت الگوریتمیک را می‌توان در سه بُعد به هم پیوسته صورت‌بندی کرد: موقعیت‌مندی در زمینه اجتماعی، نهادی و فناورانه؛ رابطه‌ای بودن در تعامل با سایر کنشگران شبکه (Cresswell et al., 2010)؛ و زیرساختی بودن از طریق پیوند با جریان‌های داده، استانداردها و سازوکارهای تصمیم‌گیری (Bellanova & de Goede, 2022). در همین چارچوب، تمایز واسطه و میانجی نزدلاتور اهمیت می‌یابد؛ واسطه صرفاً حامل است و رابطه ورودی-خروجی آن قابل پیش‌بینی باقی می‌ماند، درحالی‌که میانجی معنا، روابط و هویت کنشگران را دگرگون می‌کند (Latour, 2005). الگوریتم در مقام واسطه به پردازش داده محدود می‌شود، اما در مقام میانجی در ترجمه داده‌های محیطی و بازتعریف مسئله طراحی مشارکت می‌کند (جدول ۴). این دو وضعیت، دو قطب یک پیوستارند، نه دو حالت منفصل؛ یک سامانه الگوریتمی ممکن است در موقعیتی صرفاً انتقال‌دهنده باشد و در موقعیتی دیگر، با تعیین معیارها و پیشنهاد مسیرهای مداخله، در بازآرایی شبکه طراحی اثرگذار شود. از این رو، عاملیت الگوریتمیک پیوستاری از شدت‌های متفاوت است که به تجویزگری مدل، پیوند آن با زیرساخت تصمیم‌گیری و امکان مداخله انسانی وابسته است.

جدول ۴- تمایز واسطه و میانجی در نظریه کنشگر-شبکه (بر اساس Latour, 2005)

ویژگی	واسطه	میانجی
رابطه ورودی-خروجی	خطی و قابل پیش‌بینی	غیرخطی و رخدادی
اثر بر معنا	حامل خنثی، بدون دگرگونی	بازپیکربندی معنا و روابط
نقش در شبکه	انتقال‌دهنده	ترجمه‌گر
قابلیت جعبه سیاه سازی	بالا؛ می‌توان از تحلیل حذف کرد	پایین؛ باید ردیابی شود
نمود در طراحی الگوریتمیک	ابزار محاسباتی ساده (مثلاً مبدل داده)	مدل یادگیرنده که مسئله را بازتعریف می‌کند
جایگاه در طیف عاملیت	تجویزگری پایین، برگشت‌پذیری بالا	تجویزگری بالا، برگشت‌پذیری پایین

۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌ها

یافته‌های پژوهش بر اساس چارچوب نظریه کنشگر-شبکه و از خلال چهار لحظه ترجمه سازمان‌دهی شده‌اند. در این خوانش، تمرکز بر چگونگی شکل‌گیری و جایگاه‌یابی عاملیت الگوریتمیک در شبکه‌ای از روابط میان کنشگران انسانی و غیرانسانی است؛ شبکه‌ای که در آن داده‌ها، مدل‌های محاسباتی، نهادهای تصمیم‌گیر، متخصصان و عناصر اکولوژیک در فرایند تعریف

مسئله، ارزیابی گزینه‌ها و سازمان‌دهی تصمیم‌های طراحی با یکدیگر پیوند می‌یابند. در ادامه، هر یک از لحظات ترجمه و نحوه تبیین نقش الگوریتم در بازآرایی این روابط بررسی می‌شود.

۴-۱- مسئله‌مندی‌سازی: ترجمه زیرساخت سبز به چارچوب محاسباتی

مرور مطالعات نشان می‌دهد که در مرحله مسئله‌مندی‌سازی، سه سازوکار اصلی در شکل‌گیری رابطه الگوریتم، داده و مسئله طراحی قابل مشاهده است. نخست، چندهمگرایی بودن زیرساخت سبز از مفهومی تفسیری به ساختاری چندمعیاره تبدیل می‌شود؛ به این معنا که ابعاد اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی حذف نمی‌شوند، بلکه در قالب معیارهای قابل ارزیابی بازنمایی می‌شوند. برای نمونه، در چارچوب مولد بهینه‌سازی طراحی فضای سبز مبتنی بر شبکه عصبی عمیق، گزینه‌های طراحی بر اساس شاخص‌های کمی در حوزه‌های مختلف ارزیابی می‌شوند (Wang et al., 2025). در این فرایند، چندهمگرایی از یک اصل برنامه‌ریزی به منطق ارزیابی محاسباتی منتقل می‌شود؛ الگوریتم این مفهوم را ایجاد نمی‌کند، بلکه شیوه بیان و سنجش آن را تغییر می‌دهد. در سامانه موردبررسی نیز قیود پهنه‌بندی، حداقل نسبت فضای سبز و الزامات اقلیمی در ساختار مدل وارد شده و از عوامل بیرونی به بخشی از منطق تولید گزینه تبدیل شده‌اند؛ بنابراین، نقش الگوریتم در این مرحله نه وضع ضابطه جدید، بلکه تثبیت و عملیاتی کردن ضوابط موجود است.

در همین چارچوب، ریخت‌شناسی اکولوژیک نیز در زبان الگوریتمی به ویژگی‌های قابل‌شناسایی و قابل‌سنجش تبدیل می‌شود. در تحلیل ساختار فضایی پوشش گیاهی، مفاهیمی مانند هسته، لبه، شاخه، جزیره، حلقه و منفذ به ویژگی‌های محاسبه‌پذیر تبدیل می‌شوند. یافته‌های پنگ و همکاران نشان می‌دهد که پیوستگی و ارتباط فضایی لکه‌های سبز در تبیین عملکرد اکولوژیک اهمیت دارند (Peng et al., 2026). از این‌رو، تغییر حاصل صرفاً افزایش دقت اندازه‌گیری نیست، بلکه به تغییر شیوه توصیف محیط نیز مربوط می‌شود؛ به گونه‌ای که مفاهیمی مانند انسجام منظر از زبان توصیفی به مجموعه‌ای از شاخص‌های محاسبه‌پذیر درمی‌آیند.

این فرایند در انتخاب سنج‌ها نیز ادامه پیدا می‌کند. در مدل‌سازی جزیره گرمایی سول، شاخص ساعات جزیره گرمایی برای سنجش مدت مواجهه پیشنهاد شده و نسبت سطح سبز و معابر در آن اهمیت دارد (Oh et al., 2020). تغییر معیار از شدت لحظه‌ای به تداوم زمانی، صرفاً یک انتخاب فنی نیست، بلکه بر نحوه صورت‌بندی مسئله طراحی نیز اثر می‌گذارد و توجه را از اصلاح نقاط بحرانی به توزیع فضایی ظرفیت‌های تعدیل‌کننده معطوف می‌کند.

برآیند این سازوکارها آن است که الگوریتم در مرحله مسئله‌مندی‌سازی صرفاً به مسئله‌ای از پیش تعریف‌شده پاسخ نمی‌دهد، بلکه در تعیین آنچه قابل مشاهده، اندازه‌گیری و مداخله تلقی می‌شود نیز مشارکت دارد. استینسون نشان می‌دهد که سوگیری الگوریتمی تنها به داده‌های ورودی محدود نیست و می‌تواند از انتخاب متغیرها و ساختار مدل نیز ناشی شود (Stinson, 2022). در اینجا، این منطق به مرحله پیش از ورود داده به مدل امتداد می‌یابد. از این‌رو، نخستین سطح عاملیت الگوریتمیک در جایی شکل می‌گیرد که زیرساخت سبز به متغیرها و اهداف محاسباتی تبدیل می‌شود. در این سطح، الگوریتم جایگزین قضاوت انسانی نیست، بلکه نحوه شناخت و ارزیابی مسئله را سازمان‌دهی می‌کند. دامنه این اثرگذاری نیز یکسان نیست: در مدل‌های تبیینی، ممکن است به توصیف و سنجش محیط محدود بماند، درحالی‌که در مدل‌های مولد، به شکل‌دهی فضای گزینه‌های طراحی نیز گسترش می‌یابد.

۴-۲- جلب علاقه: بازآرایی دسترسی، اعتبار و وابستگی در شبکه تصمیم‌گیری

پس از تعریف مسئله، جلب علاقه به تثبیت روابط میان کنشگران مربوط می‌شود؛ بنابراین، تمرکز از «چه چیزی مسئله تلقی می‌شود» به «چگونه مسیرهای شناخت و تصمیم‌تثبیت می‌شوند» منتقل می‌گردد. تحلیل موارد بررسی شده، سه سازوکار را نشان می‌دهد. نخست، رابطه متخصص و محیط از طریق داده میانجی‌گری می‌شود. در برنامه‌ریزی متعارف، شناخت محیط بر مشاهده میدانی متکی است؛ در سامانه‌های داده‌محور، این شناخت از طریق حسگرها و مدل‌های تحلیلی سازمان می‌یابد. این تغییر به معنای جایگزینی محیط با داده نیست، بلکه مسیر دسترسی به آن را تغییر می‌دهد؛ زیرا داده از طریق انتخاب و اولویت‌بندی، برخی ویژگی‌های محیطی را برجسته و برخی را کمرنگ می‌کند.

دوم، اعتبار تصمیم از ترکیب اشکال مختلف دانش شکل می‌گیرد. در سامانه‌هایی مانند دوقلوهای دیجیتال شهری، مدل‌ها صرفاً ابزار نمایش نیستند، بلکه در تولید بازخورد و سازمان‌دهی تصمیم نقش دارند؛ باین‌حال، بازنمایی دیجیتال بازتابی خنثی نیست، زیرا هر مدل بر پایه انتخاب داده و هدفی مشخص ساخته می‌شود (Dawkins & Kitchin, 2025)؛ بنابراین، اعتبار تصمیم از تعامل میان کیفیت داده، دانش تخصصی و ساختار مدل حاصل می‌شود، نه از خروجی مدل به تنهایی؛ نقش متخصص



حذف نمی‌شود، بلکه در ترکیب و مذاکره اشکال دانش بازتعریف می‌شود و الگوریتم بخشی از شبکه اعتباردهی است، نه جایگزین تصمیم‌گیر انسانی.

سوم، جلب علاقه از طریق وابستگی‌های زیرساختی تثبیت می‌شود. هنگامی که سامانه‌های پایش، پایگاه‌های داده و استانداردهای ارزیابی در معماری مشترکی قرار می‌گیرند، تغییر تصمیم نیازمند باز تنظیم روابط فنی و نهادی است. این وابستگی می‌تواند هماهنگی را افزایش دهد، اما ممکن است نابرابری‌های موجود را نیز بازتولید کند، زیرا داده‌های نابرابر همان الگوها را تقویت می‌کنند؛ حتی داده‌های متوازن نیز بی‌طرفی را تضمین نمی‌کنند، زیرا انتخاب متغیرها و ساختار مدل در نتایج نقش دارند (Stinson, 2022). بر این اساس، جلب علاقه‌ی الگوریتمی، فرایندی شبکه‌ای است که در آن جایگاه الگوریتم نه از خود فناوری، بلکه از استقرار آن در روابط انسانی، نهادی و مادی شکل می‌گیرد و درهم‌تنیدگی سامانه با زیرساخت رسمی تصمیم، عاملی تعیین‌کننده در این جایگاه است.

۴-۳- عضوگیری: بازتعریف جایگاه کنشگران در طراحی زیرساخت سبز هوشمند

در عضوگیری، روابطی که از طریق تعریف مسئله و ایجاد وابستگی شکل گرفته‌اند، به نقش‌ها و انتظارات نسبتاً پایدار تبدیل می‌شوند. تحلیل موارد نشان می‌دهد ورود سامانه‌های الگوریتمی، جایگاه چهار کنشگر اصلی را باز تنظیم می‌کند. نخست، نقش طراح از تولیدکننده انحصاری گزینه به ارزیاب و اصلاح‌کننده گزینه‌های تولیدشده تغییر می‌یابد. در چارچوب مولد، سامانه گزینه‌ها را بر اساس قیود اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی تولید و ارزیابی می‌کند (Wang et al., 2025)؛ بنابراین، قضاوت طراح حذف نمی‌شود، بلکه از تولید مستقیم به انتخاب و تعدیل گزینه‌ها منتقل می‌شود؛ باین‌حال، این انتخاب در فضایی کاملاً باز رخ نمی‌دهد، زیرا دامنه گزینه‌ها پیش‌تر تحت تأثیر داده‌ها و ساختار مدل قرار گرفته است.

هم‌زمان، الگوریتم از ابزار تحلیل وضع موجود به بخشی از فرایند تولید گزینه تبدیل می‌شود و در سازمان‌دهی مسیرهای مداخله مشارکت می‌کند (Wang et al., 2025). در چارچوب مولد، این نقش در تولید و رتبه‌بندی گزینه‌ها آشکار است؛ باین‌حال، خروجی آن همچنان از داده‌ها و مفروضات مراحل پیشین تأثیر می‌پذیرد. سوم، عناصر اکولوژیک از موضوعات صرفاً طبیعی به ویژگی‌های قابل ترجمه تبدیل می‌شوند. در سامانه سیلوسیت (توصیه‌گر گونه‌های درختی شهری)، ویژگی‌های عملکردی درختان، مانند سطح ویژه برگ، تراکم چوب و تحمل خشکی، برای انتخاب گونه به کار می‌روند (Nicol et al., 2026). این فرایند ارزیابی نظام‌مند را ممکن می‌کند، اما حضور طبیعت در شبکه محاسباتی را به ویژگی‌های کمی وابسته می‌سازد؛ ازاین‌رو، ابعدی مانند معنای فرهنگی یا تجربه زیسته، در نبود شاخص مناسب، ممکن است کم‌رنگ‌تر شوند.

چهارم، نهادهای تنظیم‌گر از ارزیابی نهایی به مراحل پیشین منتقل می‌شوند؛ زیرا با ورود ضوابط برنامه‌ریزی به ساختار مدل، این ضوابط دیگر صرفاً معیار پذیرش نیستند، بلکه فضای امکان‌های طراحی را نیز شکل می‌دهند (Wang et al., 2025). این امر هماهنگی را افزایش می‌دهد، اما می‌تواند برخی گزینه‌ها را پیش از ارزیابی عمومی محدود کند. باین‌حال، این بازتعریف در همه سامانه‌ها یکسان نیست. سیلوسیت نشان می‌دهد سامانه‌های توصیه‌گر می‌توانند به جای جایگزینی متخصص، نقش پشتیبان را حفظ کنند (Nicol et al., 2026)؛ بنابراین، جایگاه الگوریتم به معماری سامانه، تجویزگری مدل و نحوه تنظیم رابطه انسان-محاسبه وابسته است؛ عضوگیری، بازآرایی جایگاه چهار کنشگر است که شدت آن با همین عوامل تغییر می‌کند.

۴-۴- هم‌آوایی کنشگران: تثبیت بازنمایی‌های محاسباتی در حکمرانی محیطی

در مرحله هم‌آوایی کنشگران، شبکه‌ای که پیش‌تر از طریق تعریف مسئله، ایجاد پیوند و تثبیت نقش‌ها شکل گرفته، به وضعیتی می‌رسد که برخی عناصرش می‌توانند به نمایندگی از کل شبکه عمل کنند. در زیرساخت سبز هوشمند، این نمایندگی عمدتاً از طریق سنج‌ها و بازنمایی‌های محاسباتی شکل می‌گیرد؛ معیارهایی مانند شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی، دمای سطح زمین، شاخص ساعات جزیره گرمایی و سنج‌های ریخت‌شناختی، امکان مقایسه و هماهنگی میان گروه‌های تصمیم‌گیر را فراهم می‌کنند.

باین‌حال، تبدیل یک سنج علمی به مبنای تصمیم صرفاً فرایندی فنی نیست. برای نمونه، شاخص جزیره گرمایی ابتدا برای سنجش بهتر مواجهه حرارتی پیشنهاد شد (Oh et al., 2020)، اما با پذیرش در چارچوب‌های مدیریتی می‌تواند به معیار ارزیابی عملکرد مداخلات شهری بدل شود؛ در این حالت، سنج نه تنها وضع موجود را می‌سنجد، بلکه بر اینکه کدام ویژگی‌های محیطی در تصمیم برجسته شوند نیز اثر می‌گذارد.

زیر ساخت داده نیز در تثبیت شبکه نقش مهمی دارد. وقتی سامانه‌های پایش، پایگاه‌های داده و ابزارهای مدیریتی در معماری مشترکی قرار می‌گیرند، تصمیم‌گیری به مجموعه‌ای از روابط فنی و نهادی وابسته می‌شود؛ این وابستگی مسئله پاسخ‌گویی را برجسته می‌کند، چون خروجی مدل‌ها در تخصیص منابع یا اولویت‌بندی مداخلات به کار می‌رود، درحالی‌که هر مدل حاصل انتخاب‌هایی درباره داده، متغیر و وزن‌دهی است. بر این اساس، هم‌آوایی کنشگران مرحله‌ای است که در آن بازنمایی‌های محاسباتی از ابزار تحلیلی فراتر رفته و به عناصر هماهنگ‌کننده شبکه بدل می‌شوند؛ جایگاه الگوریتم نه از ویژگی ذاتی فناوری، بلکه از نقش آن در روابط داده، نهاد، متخصص و محیط ناشی می‌شود، تثبیتی که پیامدی خودکار نبوده و به پذیرش نهادی سنجه‌ها وابسته است.

۴-۵- شرایط مرزی و شدت عاملیت الگوریتمی

چهار بخش پیشین ابعاد مختلف ظهور ترجمه الگوریتمی را نشان دادند؛ اما پرسش باقی‌مانده این است که چرا جایگاه الگوریتم در همه سامانه‌ها به یک میزان تثبیت نمی‌شود. ترجمه الگوریتمی همواره به تثبیت موفق و بی‌مناقشه یک شبکه نمی‌انجامد، چون کنشگران ممکن است نقش‌های پیشنهادی را نپذیرند یا روابط ایجاد شده را تغییر دهند؛ از این رو، تحلیل ترجمه به‌عنوان فرایندی خطی و قطعی نمی‌تواند پیچیدگی شکل‌گیری عاملیت الگوریتمی را توضیح دهد.

مقایسه پنج مورد بررسی‌شده نشان می‌دهد که تفاوت میان آن‌ها نه در وجود یا نبود الگوریتم، بلکه در جایگاهی است که الگوریتم در فرآیند شناخت، طراحی و تصمیم‌گیری به دست می‌آورد. این تفاوت را می‌توان بر پایه سه عامل تعدیل‌کننده صورت‌بندی کرد (جدول ۵). نخست، میزان تجویزگری مدل؛ الگوریتم ممکن است صرفاً اطلاعات تحلیلی تولید کند، یا فراتر از آن در تولید، رتبه‌بندی و محدودسازی گزینه‌های تصمیم مشارکت داشته باشد. هرچه نقش الگوریتم از توصیف به پیشنهاد و محدودسازی نزدیک‌تر شود، میزان مشارکت آن در شکل‌دهی تصمیم افزایش می‌یابد. این تفاوت در بخش ۴-۱ نیز آشکار بود «تحلیل ریخت‌شناختی زبان توصیف محیط را می‌سازد، درحالی‌که مدل مولد افزون بر آن فضای گزینه را نیز شکل می‌دهد». دوم، میزان پیوند با زیر ساخت رسمی تصمیم‌گیری؛ خروجی یک مدل زمانی اثرگذاری بیشتری پیدا می‌کند که در فرآیندهای سازمانی، مقرراتی یا بودجه‌ای وارد شود. الگوریتمی که صرفاً در مرحله آزمایشی یا مشورتی باقی می‌ماند، جایگاه متفاوتی از الگوریتمی دارد که معیار رسمی تخصیص منابع یا ارزیابی طرح‌ها شده است. همین سازوکار در بخش ۴-۴ درباره سرنوشت نهادی سنجه‌ها توضیح داده شد.

سوم، امکان بازگشت و مداخله انسانی؛ میزان باز بودن فرایند برای بررسی و رد خروجی الگوریتمی، تعیین می‌کند تصمیم تا چه اندازه مذاکره‌پذیر می‌ماند. این همان تمایزی است که در بخش ۴-۳ میان سامانه مولد و سامانه توصیه‌گر مشاهده شد؛ بنابراین عاملیت الگوریتمیک را باید پدیده‌ای پیوسته و وابسته به شرایط دانست، نه ویژگی ثابت یا دوگانه سامانه‌های هوشمند. این صورت‌بندی، امکان تحلیل انتقادی فناوری را بدون جبرگرایی فناورانه فراهم می‌کند.

جدول ۵- مقایسه موارد پژوهش بر پایه سه تعدیل‌گر شدت عاملیت الگوریتمیک

مورد	تجویزگری مدل	پیوند زیرساختی	امکان مداخله انسان	تفسیر تحلیلی	منبع
چارچوب بهینه‌سازی طراحی فضای سبز مبتنی بر شبکه عصبی عمیق	بالا؛ تولید و رتبه‌بندی گزینه	بالا؛ ادغام قیود مقرراتی در ساختار مدل	محدود؛ فضای گزینه پیش از انتخاب شکل می‌گیرد	میانجی‌گری الگوریتمی قوی	Wang & Zhang, 2025
تحدیل الگوی فضایی ریخت‌شناختی و جنگل تصادفی	پایین؛ تبیینی، بدون تولید گزینه	محدود	بالا	تولید زبان تحلیلی برای مشاهده محیط	Peng et al., 2026
شاخص ساعات جزیره گرمایی	متوسط؛ از رهگذر تعریف معیار	وابسته به پذیرش نهادی	قابل بازتعریف	عاملیت از مسیر معیارسازی	Oh et al., 2020
دوقلوی دیجیتال شهری	متغیر؛ وابسته به معماری	بالقوه بالا	وابسته به ساختار حکمرانی	ظرفیت دوگانه؛ تمرکز یا مشارکت	Dawkins & Kitchin, 2025
سامانه سیلوپسیت	متوسط؛ توصیه‌گر نه تصمیم‌گیر	محدودتر	بالا	عاملیت محدود و مذاکره‌پذیر	Nicol et al., 2026



۵- بحث

یافته‌های پژوهش را می‌توان در قالب یک چارچوب مفهومی سنتز نمود. در این چارچوب، زیرساخت سبز هوشمند به‌عنوان یک آرایش اجتماعی-فنی-اکولوژیک در نظر گرفته می‌شود که در آن الگوریتم‌ها، داده‌ها، متخصصان، نهادهای تصمیم‌گیر و عناصر محیطی از طریق فرآیندهای ترجمه‌ای به یکدیگر پیوند می‌یابند. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی عاملیت الگوریتمی را نه ویژگی مستقل فناوری، بلکه پیامد تعامل میان سه بُعد فرآیندی، شبکه‌ای و شدت در نظر می‌گیرد (تصویر ۲).

— **بعد فرآیندی:** چرخه ترجمه است؛ چهار لحظه ترجمه به‌عنوان فرآیندی خطی و پایان‌یافته در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه چرخه‌ای بازگشتی را شکل می‌دهند: در مسئله‌مند سازی، ویژگی‌های محیطی و طراحی به متغیرها و معیارهای قابل محاسبه ترجمه می‌شوند؛ در جلب علاقه، پیوند میان داده، مدل، متخصصان و نهادهای تثبیت می‌شود؛ در عضوگیری، جایگاه کنشگران بازتعریف می‌گردد؛ و در هم‌آوایی کنشگران، برخی بازنمایی‌های محاسباتی به نمایندگان شبکه بدل می‌شوند. باین‌حال، این مراحل به معنای پایان فرآیند ترجمه نیستند؛ تغییر در دانش تخصصی، الزامات نهادی، شرایط اکولوژیک یا اهداف طراحی می‌تواند به بازنگری در داده‌ها، معیارها و ساختار مدل منجر شود؛ بنابراین، شبکه طراحی همواره در معرض ترجمه مجدد و بازتنظیم قرار دارد.

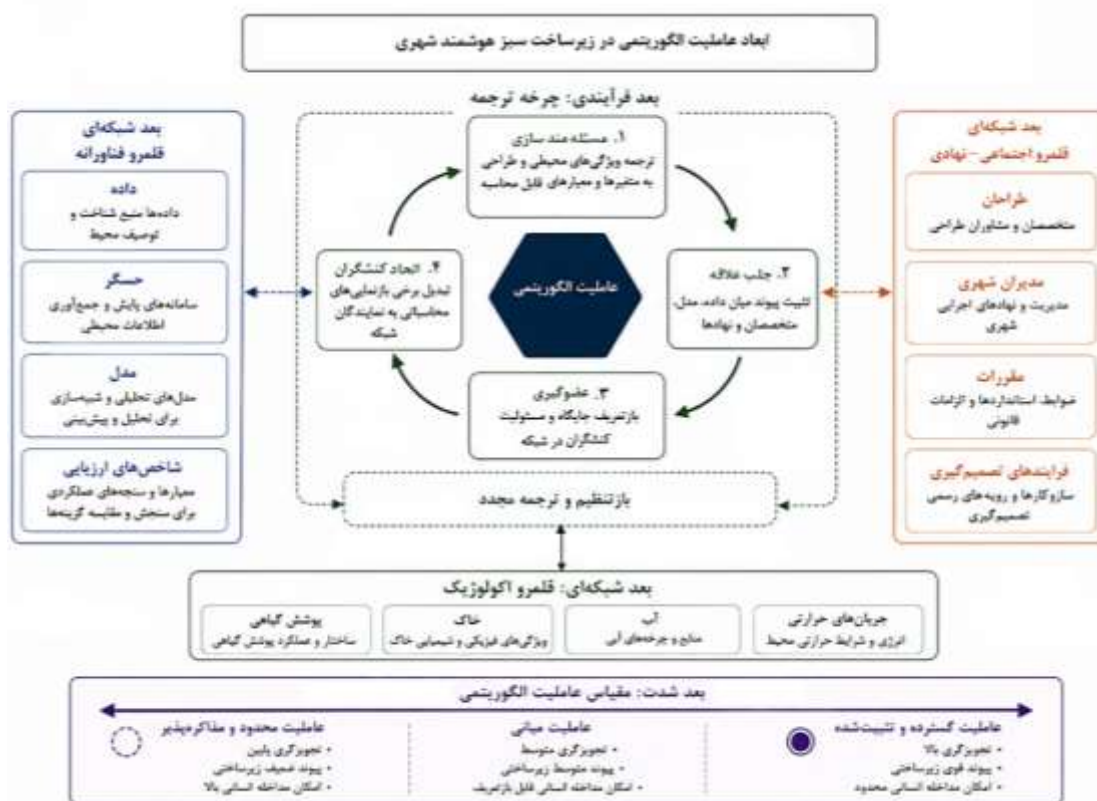
— **بعد شبکه‌ای:** تعامل سه قلمرو است، قلمرو فناورانه شامل داده‌ها، حسگرها، مدل‌ها و شاخص‌های ارزیابی است و تعیین می‌کند کدام ویژگی‌های محیطی قابلیت تبدیل به داده و معیار را پیدا می‌کنند. قلمرو اجتماعی-نهادی شامل طراحان، مدیران شهری، مقررات و سازوکارهای تصمیم‌گیری است و تعیین می‌کند خروجی محاسباتی چگونه تفسیر، اعتبارسنجی و در فرآیندهای رسمی وارد شود؛ در این سطح، مسئله اصلی نه جایگزینی تصمیم انسانی، بلکه بازتعریف رابطه میان دانش تخصصی، بازنمایی محاسباتی و مسئولیت تصمیم است. قلمرو اکولوژیک شامل پوشش گیاهی، خاک، آب و جریان‌های حرارتی و ... است؛ عناصر اکولوژیک صرفاً موضوع مداخله نیستند، بلکه از طریق ویژگی‌های عملکردی و محدودیت‌های مادی خود بر مسیرهای ممکن طراحی اثر می‌گذارند. این برداشت به معنای نسبت دادن عاملیت مستقل به عناصر طبیعی نیست، بلکه بر نقش شرایط مادی محیط در سازمان‌دهی روابط شبکه تأکید دارد.

— **بعد شدت:** سومین بعد چارچوب، سه تعدیل‌گر را به‌عنوان یک مقیاس تحلیلی وارد مدل می‌کند. ارزش این بعد آن است که چارچوب را از یک طبقه‌بندی توصیفی به ابزاری تشخیصی ارتقا می‌دهد: به‌جای آنکه هر سامانه هوشمند را به‌طور یکسان «میانجی» بنامد، امکان موقعیت‌یابی سامانه‌های مختلف را بر پیوستاری از عاملیت محدود و مذاکره‌پذیر تا عاملیت گسترده و تثبیت‌شده فراهم می‌کند.

بر مبنای آنچه ارائه شد، یکی از دلالت‌های اصلی تحلیل حاضر، تبدیل تمایز واسطه/میانجی از یک دوگانه مفهومی به متغیری پیوسته و قابل سنجش است. در صورت‌بندی اولیه لاتور (Latour, 2005)، این تمایز وضعیتی دوگانه دارد: یک فناوری یا واسطه است یا میانجی؛ اما مقایسه پنج مورد نشان می‌دهد که تحقق این دو وضعیت، بسته به سه شرط یادشده، شدت‌های متفاوتی دارد. تحلیل ریخت‌شناختی، زبان توصیف محیط را می‌سازد، اما فضای گزینه را محدود نمی‌کند (Peng et al., 2026)؛ سامانه توصیه‌گر گزینه پیشنهاد می‌دهد، اما امکان رد آن را حفظ می‌کند (Nicol et al., 2026)؛ و چارچوب مولد، هم‌زمان معیار و فضای گزینه را شکل می‌دهد (Wang et al., 2025)؛ بنابراین، حتی یک سامانه واحد نیز با تغییر جایگاه نهادی خود می‌تواند در موقعیت دیگری از این پیوستار قرار گیرد.

این صورت‌بندی، ارزیابی سامانه‌های الگوریتمی بر پایه دقت، کارایی و بهینگی را نیز از نظر جایگاه آن‌ها در شبکه تصمیم‌گیری محدود می‌کند؛ زیرا سامانه‌هایی با عملکرد محاسباتی مشابه ممکن است نقش‌های متفاوتی در تعریف مسئله و توزیع نقش‌ها داشته باشند. در نتیجه، سنجش‌های عملکردی به‌تنهایی برای توصیف میزان مشارکت یک سامانه در فرایند تصمیم‌گیری کافی نیستند و سه تعدیل‌گر پیشنهادی، بُعد دیگری از ارزیابی را آشکار می‌کنند. این تفاوت همچنین با تبیین جبرگرایانه عاملیت الگوریتمیک سازگار نیست؛ زیرا اگر این عاملیت پیامد خودکار به‌کارگیری فناوری هوشمند بود، انتظار می‌رفت موارد بررسی‌شده الگوی مشابهی نشان دهند. درحالی‌که تفاوت میان آن‌ها به معماری سامانه و جایگاه نهادی آن مربوط بود. بر این اساس، شدت و

جهت اثرگذاری الگوریتم را می‌توان متغیری وابسته به طراحی سامانه و ترتیبات نهادی در نظر گرفت، نه ویژگی‌ای برخاسته از فناوری به‌تنهایی.



تصویر ۲- چارچوب مفهومی عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری

محل شکل‌گیری عاملیت نیز از دیگر دلالت‌های این تحلیل است. ادبیات موجود، منشأ سوگیری الگوریتمی را از داده‌های ورودی به انتخاب متغیرها، ساختار مدل و معیارهای ارزیابی و مفهوم شفافیت را از تفسیرپذیری پسینی خروجی به اهداف و معیارهای طراحی گسترش داده است (Stinson, 2022; Loi et al., 2021; De Laat, 2018). بازخوانی موارد، این بحث را به مرحله‌ای پیش‌تر منتقل می‌کند: پیش از انتخاب متغیر یا ساخت مدل، درباره اینکه کدام ویژگی محیطی قابلیت تبدیل به داده و معیار را دارد تصمیم‌گیری می‌شود. در سنجه تجمعی مواجهه حرارتی، تغییر معیار از شدت لحظه‌ای به تداوم زمانی، نوع مسئله طراحی را نیز تغییر داد (Oh et al., 2020)؛ در چارچوب مولد نیز ورود قیود مقرراتی به ساختار ارزیابی، ضوابط نهادی را از عاملی بیرونی به بخشی از منطق تولید گزینه تبدیل کرد (Wang et al., 2025). در هر دو مورد، مسئله صرفاً سوگیری در پردازش نیست، بلکه شکل‌گیری مرز میان امر قابل‌مشاهده و امر نامرئی در فرایند تصمیم است. از این منظر، شکاف پاسخ‌گویی مورد تأکید ادبیات حکمرانی الگوریتمی (Busuioc, 2021) در طراحی زیرساخت سبز به سطحی پیش از پردازش داده می‌رسد؛ یعنی به سازوکاری که دامنه امر قابل‌محابه را تعیین می‌کند و می‌تواند در جانمایی فضای سبز، انتخاب گونه و اولویت‌بندی مداخلات فضایی پیامد داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تکیه بر نظریه کنشگر-شبکه، جایگاه الگوریتم در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری را در قالب رابطه‌ای میان کنشگران انسانی و غیرانسانی بررسی کرد. یافته‌ها نشان داد نقش الگوریتم را نمی‌توان به ابزاری خنثی یا عاملی مستقل و تعیین‌کننده فروکاست؛ بلکه این نقش در شبکه‌ای از روابط، معیارها و فرایندهای تصمیم‌گیری شکل می‌گیرد. بر این اساس، پاسخ دو پرسش پژوهش را می‌توان در دو سطح مرتبط، یعنی چگونگی شکل‌گیری این نقش و شرایط تغییر شدت آن، جمع‌بندی کرد.



در سطح نخست، پاسخ به پرسش درباره چگونگی درگیر شدن الگوریتم با طراحان، داده‌های محیطی، نهادها و عناصر اکولوژیک، در قالب چهار لحظه پیوسته ترجمه صورت‌بندی شد: از تبدیل مفاهیم چندبعدی به متغیرهای محاسباتی در مسئله‌مندی تا تبدیل سنج‌ها به زبان مشترک ارزیابی در هم‌آوایی کنشگران. در این فرایند، الگوریتم نه جایگزین قضاوت انسانی می‌شود و نه صرفاً مجری آن باقی می‌ماند؛ بلکه از طریق تعیین آنچه قابل مشاهده، اندازه‌گیری و مداخله تلقی می‌شود، از همان مرحله تعریف مسئله در شبکه تصمیم مشارکت می‌کند. این نحوه ورود به فرایند تصمیم، مبنای تمایز میان صرف حضور یک سامانه الگوریتمی و شکل‌گیری عاملیت الگوریتمیک است. به کارگیری فناوری هوشمند به‌خودی‌خود به معنای تغییر ماهیت تصمیم‌گیری شهری نیست؛ الگوریتم زمانی در جایگاه میانجی قرار می‌گیرد که از تولید اطلاعات فراتر رود و در تعریف مسئله، تعیین معیار و محدودسازی فضای گزینه نقش پیدا کند. باین‌حال، این نقش ثابت نیست و شدت آن با شرایط استقرار سامانه تغییر می‌کند. از این‌رو، پاسخ پرسش دوم بر این مبنای صورت‌بندی شد که عاملیت الگوریتمیک پیوستاری از شدت‌هاست که به سه شرط وابسته است: تجویزگری مدل، پیوند با ساختار رسمی تصمیم و امکان مداخله انسانی؛ صورت‌بندی‌ای که تمایز سامانه‌های صرفاً اطلاعاتی از سامانه‌های شکل‌دهنده به فضای گزینه را ممکن می‌سازد.

ترکیب این دو سطح، ارتباط یافته‌های پژوهش با سه شکاف ادبیات را نیز روشن می‌کند. در ارتباط با شکاف هستی‌شناختی، شرایط میانجی‌شدن الگوریتم در قالب سه تعدیل‌گر ارائه شد؛ در ارتباط با شکاف نظری-کاربردی، چهار لحظه ترجمه به سازوکارهای انضمامی طراحی، از قیود پهنه‌بندی تا صفات کارکردی گونه‌های درختی، پیوند خورد؛ و در ارتباط با شکاف هنجاری، شفافیت و پاسخ‌گویی به مراحل مشخص طراحی، شامل تعریف مسئله، انتخاب معیار و شکل‌گیری فضای گزینه، مرتبط شدند. از این پیوند می‌توان دلالت‌هایی عملی برای طراحی و برنامه‌ریزی شهری استخراج کرد. به گونه‌ای که اگر اثرگذاری الگوریتم از مرحله تعریف مسئله آغاز شود، پاسخ‌گویی صرفاً با ارزیابی خروجی مدل حاصل نمی‌شود و فرایند شکل‌گیری داده‌ها، معیارها و قیود طراحی نیز باید قابل‌بررسی باشد. در این راستا، «شنا سنامه ترجمه الگوریتمیک» می‌تواند سازوکاری مفهومی برای ثبت مفروضات و روشن کردن مسئولیت میان تولیدکنندگان داده، توسعه‌دهندگان مدل، طراحان و نهادهای سیاست‌گذار باشد. همچنین، سه تعدیل‌گر می‌توانند برای ارزیابی سامانه‌های هوشمند پیش از استقرار به کار روند و طراح با بررسی میزان نقش مدل در تولید و محدودسازی گزینه‌ها، اثرگذاری خروجی بر تصمیم نهایی و امکان بازبینی، جایگاه سامانه را ارزیابی کند. این چارچوب همچنین می‌تواند در تدوین دستورالعمل‌های به کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت فضای سبز و تقویت نگاه انتقادی در آموزش طراحی شهری مورد استفاده قرار گیرد.

باین‌حال، پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه است. تحلیل بر مطالعات منتشرشده تکیه داشته و فرایند طراحی به‌صورت مستقیم مشاهده نشده است؛ بنابراین، ممکن است بخشی از مقاومت‌ها و مذاکراتی که در گزارش‌های فنی ثبت نشده‌اند، در تحلیل بازتاب نیافته باشند. از سوی دیگر، بی‌توجهی به روابط قدرت در تحلیل شبکه‌ای می‌تواند نقش کنشگران انسانی را کم‌رنگ کند؛ هرچند مسئله نابرابری فضایی در تحلیل مورد توجه قرار گرفت، بررسی دقیق‌تر عدالت فضایی در شبکه‌های الگوریتمی به مطالعات بیشتری نیاز دارد. همچنین، موارد بررسی‌شده عمدتاً در زمینه‌هایی با ظرفیت داده‌ای و نهادی توسعه‌یافته شکل گرفته‌اند و تعمیم نتایج به زمینه‌های متفاوت باید با احتیاط انجام شود. بر همین مبنای پژوهش‌های آینده می‌توانند چارچوب پیشنهادی را در پروژه‌های واقعی آزمون کرده و سنجش‌پذیری سه مؤلفه شدت عاملیت را بررسی کنند؛ همچنین مطالعه نحوه ترجمه ارزش‌های اجتماعی، فرهنگی و اکولوژیک منظر به معیارهای محاسباتی می‌تواند رابطه میان فناوری، محیط و تصمیم‌گیری شهری را دقیق‌تر تبیین کند.

در مجموع، می‌توان گذار به طراحی هوشمند زیرساخت سبز را نه جایگزینی ابزار سنتی با فناوری دیجیتال، بلکه تغییری در شیوه تولید دانش، سازمان‌دهی تصمیم و توزیع عاملیت در فرایند طراحی شهری در نظر گرفت. در این چارچوب، بهره‌گیری از ظرفیت پیش‌بینی و بهینه‌سازی هوش مصنوعی می‌تواند مستلزم توجه به سه شرط شدت عاملیت باشد؛ به گونه‌ای که این شرایط قابل‌مشاهده و قابل‌ارزیابی باقی بمانند و در کنار آن، امکان بازنگری در تصمیم، توجه به عدالت فضایی و حفظ تنوع اکولوژیک نیز در فرایند طراحی حفظ شود.

- 1- Lee et al
- 2- Oh et al
- 3- Peng et al
- 4- Tang & Chung
- 5- Wang & Zhang
- 6- Cresswell et al.
- 7- Gunderson et al.
- 8- Ryan et al.
- 9- Dawkins & Kitchen
- 10- Busuioc
- 11- De Laat
- 12- Stinson
- 13- Scopus
- 14- Web of Science
- 15- PubMed
- 16- Latour
- 17- Callon
- 18- Law
- 19- Assemblage
- 20- Problematization
- 21- Intersement
- 22- Enrollment
- 23- Mobilization
- 24- Deep Neural Network-based Green Space Design Optimization Framework (DNN-GSOF)
- 25- Urban Heat Island-Hours (UHI-hours)
- ۲۶- SylviCiT: سامانه‌ای متن‌باز مبتنی بر یادگیری ماشین و بهینه‌سازی که گونه‌های درختی مناسب و متنوع را بر پایه صفات کارکردی، موقعیت کاشت و درختان مجاور توصیه می‌کند و هدف آن بیشینه‌سازی تنوع کارکردی در مقیاس‌های فضایی مختلف است.
- 27- Morphological Spatial Pattern Analysis

حامیان مالی: مقاله حامی مالی نداشته است.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارد که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کند که در نگارش مقاله از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله برعهده نویسنده است.

قدردانی: اینجانب از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاسگزارم.

منابع

- حاتمی نژاد، حسین؛ پوراحمد، احمد؛ زنگنه شهرکی، سعید و کانونی، رضا. (۱۴۰۲). کاربست نظریه کنشگر- شبکه برونو لاتور در خوانش مفهوم فضا. *برنامه‌ریزی فضایی*، ۱۳ (۳)، ۹۷-۱۲۵. <https://doi.org/10.22108/sppl.2023.137926.173>
- رستمی، حمیدرضا؛ الهی، شعبان؛ معینی، علی و حسن زاده، علیرضا. (۱۴۰۵). همزیستی انسان و فناوری معنایی از منظر نظریه کنشگر- شبکه. *تعامل انسان و اطلاعات*، ۸ (۴)، ۱-۱۴. <http://hii.khu.ac.ir/article-1-3020-fa.html>
- زهرانی، داود؛ ربانی خوراسگانی، علی؛ شریف‌زاده، رحمان و قنبری برزبان، علی. (۱۴۰۰). عاملیت‌های نامتجانس در جامعه‌شناسی بیش از انسان: واکاوی جایگاه عاملیت در رویکردهای بیش از انسان در جامعه‌شناسی، با تأکید بر نظریه کنشگر-شبکه. *جامعه پژوهی فرهنگی*، ۱۲ (۲)، ۸۱-۱۱۰. <https://doi.org/10.30465/scs.2021.35214.2372>
- شیرگیر، المیرا؛ خیرالدین، رضا و بهزادفر، مصطفی. (۱۳۹۸). تبیین الگوی مداخله در زیرساخت‌های سبز شهری با هدف ایجاد تاب‌آوری اکولوژیک شهری با تأکید بر تغییرات اقلیمی (نمونه موردی: محله یوسف‌آباد شهر تهران). *محیط‌شناسی*، ۴۵ (۳)، ۵۴۵-۵۶۵. <https://doi.org/10.22059/jes.2020.290829.1007933>



- فارابی اصل، نیر؛ رفیعیان، مجتبی و علیزاده، بهرام. (۱۴۰۲). تحلیل تولید فضاهای شهری از منظر امر سیاسی با رویکرد نظریه شبکه کنشگر (نمونه مطالعاتی: اراضی عباس آباد تهران). *مطالعات جامعه‌شناسی شهری*، ۱۳ (۴۸)، ۱۱۱-۱۴۱. <https://doi.org/10.30495/uss.2023.709490>
- کاظمی، رضا و رضایی، مریم (۱۴۰۳). نقش زیرساخت‌های سبز و فناوری‌های هوشمند در تاب‌آوری شهری تهران. *فصلنامه فناوری و توسعه شهری*، ۹ (۲)، ۹۸-۱۲۰. <https://doi.org/10.22108/jtud.2024.139561.1286>
- کانونی، رضا؛ حاتمی نژاد، حسین؛ پوراحمد، احمد و زنگنه شهرکی، سعید. (۱۴۰۲). دلالت‌های نظریه کنشگر-شبکه برونو لاتور در برنامه‌ریزی شهری با تأکید بر سکو نگاه‌های غیررسمی. *دانش‌پهرسازی*، ۷ (۱)، ۲۸-۵۱. <https://doi.org/10.22124/UPK.2023.22901.1802>
- نوروزی، مریم و سوزنجی، کیانوش. (۱۴۰۱). بررسی و مقایسه نقش زیرساخت‌های شهری در تشکیل شبکه سبز شهری. *معماری و شهرسازی آرمان‌شهر*، ۱۵ (۴۰)، ۲۲۱-۲۴۲. <https://doi.org/10.22034/aaud.2022.269053.2429>
- Andersson, E., Langemeyer, J., Borgström, S., McPhearson, T., Haase, D., Kronenberg, J., Barton, D. N., Davis, M., Naumann, S., Röschel, L., & Baró, F. (2019). Enabling green and blue infrastructure to improve contributions to human well-being and equity in urban systems. *BioScience*, 69(7), 566–574. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz058>
- Barad, K. (2007). *Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning*. Duke University Press.
- Batty, M. (2013). Big data, smart cities and city planning. *Dialogues in Human Geography*, 3(3), 274–279. <https://doi.org/10.1177/2043820613513390>
- Bellanova, R., & de Goede, M. (2022). The algorithmic regulation of security: An infrastructural perspective. *Regulation & Governance*, 16(1), 102–118. <https://doi.org/10.1111/rego.12338>
- Busuioc, M. (2021). Accountable artificial intelligence: Holding algorithms to account. *Public Administration Review*, 81(5), 825–836. <https://doi.org/10.1111/puar.13293>
- Callon, M. (1986). Some elements of a sociology of translation: Domestication of the scallops and the fishermen of St Brieuc Bay. In J. Law (Ed.), *Power, action and belief: A new sociology of knowledge?* (pp. 196–233). Routledge.
- Caprotti, F., Chang, I.-C. C., & Joss, S. (2022). Beyond the smart city: A typology of platform urbanism. *Urban Transformations*, 4, 4. <https://doi.org/10.1186/s42854-022-00033-9>
- Cresswell, K. M., Worth, A., & Sheikh, A. (2010). Actor-Network Theory and its role in understanding the implementation of information technology developments in healthcare. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 10, 67. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-10-67>
- Dawkins, O., & Kitchin, R. (2025). Urban digital twins: Digital twins for participatory steering. *New Media & Society*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/14614448251338280>
- de Laat, P. B. (2018). Algorithmic decision-making based on machine learning from big data: Can transparency restore accountability? *Philosophy & Technology*, 31(4), 525–541. <https://doi.org/10.1007/s13347-017-0293-z>
- Frost, N. (2024). The impoverished publicness of algorithmic decision making. *Oxford Journal of Legal Studies*, 44(4). <https://doi.org/10.1093/ojls/ggae027>
- Fuentes, S., Tongson, E., & Gonzalez Viejo, C. (2021). Urban green infrastructure monitoring using remote sensing from integrated visible and thermal infrared cameras mounted on a moving vehicle. *Sensors*, 21(1), 295. <https://doi.org/10.3390/s21010295>
- Giddens, A. (1984). *The constitution of society: Outline of the theory of structuration*. Polity Press.
- Gunderson, M., Solberg, R., Kronman, L., De Seta, G., & Rettberg, J. W. (2024). Machine vision situations: Tracing distributed agency. *Open Research Europe*, 4, 12. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.16112.2>
- Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *Ambio*, 43(4), 516–529. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0510-2>
- Helmrich, A., Kuhn, A., Roque, A., Santibanez, A., Kim, Y., Grimm, N. B., & Chester, M. (2023). Interdependence of social-ecological-technological systems in Phoenix, Arizona: Consequences of

- an extreme precipitation event. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4, 21. <https://doi.org/10.1186/s43065-023-00085-6>
- Jia, Y., & Turcu, C. (2025). Climate, health, and urban green infrastructure: The evidence base and implications for urban policy and spatial planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(12), 1842. <https://doi.org/10.3390/ijerph22121842>
- Latour, B. (2005). *Reassembling the social: An introduction to actor-network-theory*. Oxford University Press.
- Lee, D. H., Park, H. Y., & Lee, J. (2024). A review on recent deep learning-based semantic segmentation for urban greenness measurement. *Sensors*, 24(7), 2245. <https://doi.org/10.3390/s24072245>
- Li, L., & Carter, J. (2025). Exploring the relationship between urban green infrastructure connectivity, size and multifunctionality: A systematic review. *Landscape Ecology*, 40, 60. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02069-1>
- Loi, M., Ferrario, A., & Viganò, E. (2021). Transparency as design publicity: Explaining and justifying inscrutable algorithms. *Ethics and Information Technology*, 23(3), 253–263. <https://doi.org/10.1007/s10676-020-09564-w>
- Lyu, F., Wang, S., Han, S. Y., Catlett, C., & Wang, S. (2022). An integrated cyberGIS and machine learning framework for fine-scale prediction of urban heat island using satellite remote sensing and urban sensor network data. *Urban Informatics*, 1, 6. <https://doi.org/10.1007/s44212-022-00002-4>
- Nicol, M., St-Denis, A., Belbahar, R. M., Maure, F., Gascon-Afriat, A., Messier, C., & Meurs, M.-J. (2026). SylvCIT: An AI-based support to urban forest resilience. *PLOS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0339173>
- Oh, J. W., Ngarambe, J., Duhirwe, P. N., Yun, G. Y., & Santamouris, M. (2020). Using deep-learning to forecast the magnitude and characteristics of urban heat island in Seoul Korea. *Scientific Reports*, 10, 3559. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60632-z>
- Peng, J., Zhang, S., Li, X., Chen, R., & Huang, X. (2026). Research on the coupling mechanism between green space morphology and the urban heat island effect based on machine learning: A case study of Dali City, China. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30327-4>
- Pinch, T. J., & Bijker, W. E. (1984). The social construction of facts and artefacts: Or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other. *Social Studies of Science*, 14(3), 399–441. <https://doi.org/10.1177/030631284014003004>
- Ryan, T., Ryan, N., & Hynes, B. (2024). The integration of human and non-human actors to advance healthcare delivery: Unpacking the role of actor-network theory, a systematic literature review. *BMC Health Services Research*, 24, 1337. <https://doi.org/10.1186/s12913-024-11866-4>
- Silva, B. N., Khan, M., Jung, C., Seo, J., Muhammad, D., Han, J., Yoon, Y., & Han, K. (2018). Urban planning and smart city decision management empowered by real-time data processing using big data analytics. *Sensors*, 18(9), 2994. <https://doi.org/10.3390/s18092994>
- Stinson, C. (2022). Algorithms are not neutral: Bias in collaborative filtering. *AI and Ethics*, 2(4), 763–770. <https://doi.org/10.1007/s43681-022-00136-w>
- Tang, X., & Chung, W.-J. (2024). Automated urban landscape design: An AI-driven model for emotion-based layout generation and appraisal. *PeerJ Computer Science*, 10, e2426. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2426>



eISSN:2980-9673

The Art of Green Management

Homepage: <https://agm.journal.art.ac.ir/>



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Development of a Conceptual–Operational Model of Environmental Resilience with a Carbon-Neutral City Approach (Case Study: District 6 of Tehran Municipality)

Niloofer Mirzakhani⁽¹⁾ , Samaneh Jalilisadrabad^{(2)*} 

1. MA of Urban Planning, Department of Urban Planning, School of Architecture & Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0009-0009-8482-0164>)

2. Associate Professor, Department of Urban Planning, School of Architecture & Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0000-0003-1816-7610>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 23/09/2025 Revised: 01/11/2025 Accepted: 03/11/2025 PP. 51-80 Keywords: <i>Environmental Resilience; Carbon-Neutral City; Systematic Review; Indicator Localization; District 6 of Tehran Municipality.</i> Use your device to scan and read the article online	Introduction: Climate change, increasing greenhouse gas emissions, and the growing intensity of environmental hazards have created major challenges for contemporary urban planning. Cities are both important sources of carbon emissions and highly vulnerable to the environmental consequences of climate change. Therefore, achieving carbon neutrality requires not only reducing greenhouse gas emissions but also strengthening the capacity of urban systems to adapt to environmental stresses and climatic disturbances. In this context, environmental resilience and the carbon-neutral city represent complementary approaches to sustainable urban development. Environmental resilience emphasizes the capacity of urban and ecological systems to maintain functions, adapt to changing conditions, and recover from environmental stresses, while the carbon-neutral city focuses on reducing greenhouse gas emissions and balancing emissions with carbon absorption. Integrating these approaches can create synergies, as strategies such as green infrastructure, sustainable transportation, energy efficiency, and ecological resource management can simultaneously reduce carbon emissions and strengthen environmental resilience. However, previous studies have identified related indicators in a fragmented manner, with differences in definitions, spatial scales, data requirements, and measurement approaches. Moreover, many theoretically relevant indicators cannot be operationalized at the local urban scale because of data availability and spatial measurability limitations. Consequently, a context-sensitive and spatially measurable framework is needed to translate the theoretical dimensions of environmental resilience and carbon neutrality into operational indicators. District 6 of Tehran Municipality, characterized by high building and population density, intensive urban activities, major transportation corridors, and significant environmental pressures, provides an appropriate context for developing such a framework. The Purpose of the Research: The purpose of this research was to develop a conceptual–operational model of environmental resilience based on the carbon-neutral city approach, with emphasis on localizing and spatially measuring indicators in District 6 of Tehran Municipality. The study sought to identify and organize indicators associated with environmental resilience and carbon-neutral cities in the international literature and subsequently determine which indicators could be operationalized within the specific spatial and data conditions of the study area. Rather than selecting indicators solely according to their frequency of occurrence in previous studies, the research considered their theoretical relevance, spatial measurability, data accessibility, compatibility with the local context, and suitability for quantitative and computational analysis. The final framework was intended to provide a spatially explicit basis for assessing environmental resilience and supporting monitoring, prioritization of interventions, and data-driven urban planning toward resilient and carbon-neutral urban development. Methodology:

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	The research employed a systematic literature review combined with qualitative content analysis and descriptive analysis of the identified indicators. The review process followed the PRISMA 2020 framework to increase transparency and reproducibility. Searches were conducted in international databases using combinations of the terms “Environmental Resilience,” “Ecological Resilience,” “Carbon-Neutral City,” and “Carbon Neutral City.” Following the identification and screening stages, 56 relevant studies were ultimately selected for detailed analysis. The full texts of the selected studies were systematically examined to identify indicators related to environmental resilience and carbon-neutral cities. This process resulted in the extraction of 81 initial indicators. The indicators were subsequently organized into five dimensions: physical, environmental, economic, social, and institutional–governance. To develop an operational framework for District 6, the 81 indicators were evaluated using five criteria: theoretical repeatability and relevance, spatial and quantitative measurability, availability of data at the parcel scale, compatibility with the local context, and suitability for computational modeling. Accordingly, frequency was considered as supporting evidence rather than an independent selection threshold. After applying these criteria, 12 indicators were selected as the final operational indicators. These indicators were transformed into spatial, raster, or parcel-scale information layers within a GIS environment, allowing their application in spatial analysis of environmental resilience. Findings and Discussion: The findings demonstrated that environmental resilience and the carbon-neutral city are interconnected through interactions between urban pressures and ecological regulating capacities. The systematic review identified 81 indicators across five dimensions. The physical and environmental dimensions included indicators related to urban form, building density, transportation accessibility, vegetation, air pollution, water resources, climatic conditions, albedo, energy efficiency, and carbon processes, while the economic, social, and institutional dimensions incorporated indicators associated with energy consumption, population, quality of life, participation, governance, and environmental policies. The localization process resulted in 12 operational indicators structured into two groups. The first comprised urban drivers and pressure indicators, including building density, population density, accessibility to metro and bus stations, nighttime light intensity, and air pollution. Public transportation accessibility can reduce private vehicle dependence and transportation-related emissions, while nighttime light intensity serves as a proxy for urban activity and energy consumption. The second group included ecological and environmental regulating indicators, namely vegetation density, sky-view factor, land surface temperature, water resources, albedo, and annual precipitation, representing capacities that support climatic regulation and adaptation. The selected indicators showed direct and indirect relationships. Vegetation density, water resources, annual precipitation, and albedo had positive direct effects on environmental resilience. Vegetation contributes through carbon sequestration, shading, and evapotranspiration; water resources support thermal regulation and ecological capacity; precipitation contributes to moisture and water availability; and albedo influences solar radiation reflection. Conversely, air pollution and land surface temperature act as environmental stressors with negative direct effects on resilience. Other indicators operate through indirect or mediated relationships. Public transportation accessibility can influence resilience by changing mobility behavior and reducing private vehicle use, thereby decreasing traffic-related emissions and air pollution. Higher building and population densities can increase energy demand and urban activity, with effects reflected in nighttime light intensity. Dense development may also reduce the sky-view factor, restrict natural ventilation, and increase heat retention, contributing to urban heat island effects. These interactions indicate that environmental resilience emerges not from isolated indicators but from interconnected physical, demographic, environmental, and functional processes. Conclusion: The research concludes that integrating environmental resilience with the carbon-neutral city approach provides a comprehensive framework for understanding and managing urban environmental conditions. The systematic review demonstrated substantial conceptual and functional overlap between the two approaches, particularly in reducing environmental pressures, carbon emissions, and climatic vulnerability while strengthening ecological capacities. Although 81 indicators were identified from the international literature, their direct local application was constrained by differences in spatial context, data availability, and analytical requirements. The selection of 12 operational indicators therefore represents a transition from a broad theoretical framework toward a spatially measurable and context-sensitive model.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	The proposed conceptual–operational model represents the relationships between urban pressures and environmental regulating capacities in District 6 of Tehran. Its main contribution is transforming theoretically identified indicators into measurable spatial variables that can be represented as GIS-based raster or parcel-scale datasets. This reduces the gap between theoretical discussions of environmental resilience and practical urban planning applications, providing a foundation for spatial monitoring, vulnerability identification, intervention prioritization, and evidence-based decision-making. Moreover, the computational compatibility of the selected indicators provides an appropriate data foundation for subsequent quantitative and machine-learning analyses. Ultimately, resilient and carbon-neutral urban development requires an integrated approach that reduces anthropogenic pressures, strengthens ecological capacities, improves environmental quality, and supports carbon reduction. The framework provides a localized methodological basis for these objectives and can be adapted to other urban contexts following appropriate local assessment and validation. Funding: This article was derived from the first author’s master’s thesis, which was conducted with the support of the Tehran Urban Research and Planning Center. Authors’ Contribution: In this section, the authors confirm that they have all contributed to the article. Conflict of Interest: Authors declared no conflict of interest. AI Usage Declaration: The authors declare that the AI tool ChatGPT was used for text editing. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the authors. Acknowledgments: We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

Highlight:

- Integrating environmental resilience and carbon-neutral cities through a context-specific approach to indicator identification and localization
- Translating theoretical concepts into an operational, spatially explicit, and measurable model at the parcel scale for spatial planning.
- Developing a data-driven framework based on machine learning to support urban decision-making and intelligent monitoring.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Mirzakhani, N. & Jalilasadrabad, S. (2025). Development of a Conceptual–Operational Model of Environmental Resilience with a Carbon-Neutral City Approach (Case Study: District 6 of Tehran Municipality). *The Art of Green Management*, 3(3), 51-80. [10.30480/agm.2026.6568.1081](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6568.1081)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6568.1081>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1552.html



*. Corresponding Author (Email: s_jalili@iust.ac.ir) / (Phone: +989190831587)

This article is derived from the first author’s master’s thesis entitled “Assessment of Environmental Resilience in Relation to the Carbon-Neutral City Approach Using Machine Learning (Case Study: District 6 of Tehran)”, which was conducted under the supervision of the second author and defended at Iran University of Science and Technology.



تدوین مدل مفهومی-عملیاتی تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی (نمونه‌ی مطالعاتی: منطقه‌ی ۶ شهرداری تهران)

نیلوفر میرزاخانی^(۱)، سمانه جلیلی صدرآباد^(۲)

۱- کارشناسی ارشد، گروه برنامه‌ریزی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0009-0009-8482-0164>

۲- دانشیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0000-0003-1816-7610>

ناشر: دانشگاه هنر ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ صص: ۵۱-۸۰ واژگان کلیدی: تاب‌آوری زیست‌محیطی، شهر کربن‌خنثی، مرور نظام‌مند، بومی‌سازی شاخص‌ها، منطقه ۶ شهرداری تهران	مقدمه: تغییرات اقلیمی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، شهرها را با چالش‌های فزاینده‌ای در زمینه کاهش انتشار کربن و افزایش ظرفیت سازگاری با مخاطرات محیطی مواجه کرده است. تلفیق تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن‌خنثی به‌عنوان رویکردی نوین در برنامه‌ریزی شهری مورد توجه قرار گرفته است؛ با این حال، تبدیل این مفاهیم به چارچوب‌های عملیاتی، مکان‌مند و قابل سنجش همچنان با چالش‌های روش‌شناختی و اجرایی مواجه است. هدف پژوهش: پژوهش حاضر با هدف استخراج، سازمان‌دهی و بومی‌سازی شاخص‌های تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی و تدوین چارچوب مفهومی-عملیاتی متناسب با ویژگی‌های فضایی منطقه ۶ شهرداری تهران انجام شد. روش‌شناسی: پژوهش با رویکرد ترکیبی و در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله نخست، با استفاده از مرور نظام‌مند ادبیات بر اساس دستورالعمل پریسما ۲۰۲۰ و تحلیل محتوای ۵۶ مقاله منتخب، ۸۱ شاخص در پنج بعد کالبدی، زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی-حکمرانی استخراج و طبقه‌بندی شد. در مرحله دوم، شاخص‌ها طی فرآیندی پنج‌مرحله‌ای و بر اساس معیارهایی شامل قابلیت سنجش فضایی، دسترسی به داده‌های پارسل‌مقیاس، قابلیت مدل‌سازی و سازگاری با شرایط محلی منطقه ۶ ارزیابی و ۱۲ شاخص عملیاتی انتخاب شدند. یافته‌ها و بحث: نتایج نشان داد تاب‌آوری زیست‌محیطی منطقه ۶ حاصل تعامل میان فشارهای انسان‌ساخت و ظرفیت‌های تعدیل‌کننده طبیعی است. تراکم کالبدی-جمعیتی و دسترسی حمل‌ونقلی به‌عنوان عوامل فشارزا و پوشش گیاهی، آلوده، ضریب دید آسمان و دمای سطح زمین به‌عنوان عوامل تعدیل‌کننده و ارتقادهنده تاب‌آوری شناسایی شدند. شاخص‌های منتخب می‌توانند همزمان ابعاد کاهش انتشار کربن و افزایش ظرفیت سازگاری محیطی را پوشش داده و امکان ارزیابی فضایی تاب‌آوری را در مقیاس خرد شهری فراهم کنند. نتیجه‌گیری: چارچوب مفهومی-عملیاتی بومی‌شده پژوهش، شکاف میان مباحث نظری تاب‌آوری زیست‌محیطی و کاربردهای اجرایی آن را کاهش داده و بستری برای پایش مکان‌مند، اولویت‌بندی مداخلات و تصمیم‌گیری داده‌محور در مسیر تحقق شهرهای تاب‌آور و کربن‌خنثی فراهم می‌کند. نکات برجسته: - تلفیق تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن‌خنثی از طریق ارائه رویکردی بومی برای شناسایی و بومی‌سازی شاخص‌ها؛ - تبدیل مفاهیم نظری به مدلی عملیاتی، مکان‌مند و قابل سنجش در مقیاس پارسل برای برنامه‌ریزی فضایی؛ - ارائه چارچوب داده‌محور مبتنی بر یادگیری ماشین برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری و پایش هوشمند شهری. ارجاع به این مقاله: میرزاخانی، نیلوفر و جلیلی صدرآباد، سمانه. (۱۴۰۴). تدوین مدل مفهومی-عملیاتی تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی (نمونه مطالعاتی: منطقه ۶ شهرداری تهران). هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۵۱-۸۰.
10.30480/agm.2026.6568.1081	





<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6568.1081>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1552.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز
استفاده است. [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) قابل

©2024, UST. All rights reserved.

*. نویسنده مسئول (رایانامه: s_jalili@iust.ac.ir) / (تلفن: +۹۸۹۱۹۰۸۳۱۵۸۷)

تغییرات اقلیمی، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم، توسعه پایدار جهانی را با تهدیدهای بی‌سابقه‌ای مواجه ساخته است (Miao et al., 2024; Han et al., 2025). جامعه بین‌المللی با تصویب توافق‌نامه پاریس بر ضرورت محدود کردن افزایش دمای متوسط زمین به ۱.۵ و حداکثر ۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره پیشاصنعتی تأکید کرده است (O'Regan & Nyhan, 2023; Chuenwong et al., 2022). تحقق این هدف مستلزم گذار سریع و بنیادین به اقتصاد کم‌کربن و دستیابی به وضعیت کربن‌خنثی تا میانه قرن حاضر است (Huovila et al., 2022). با این حال، افزایش فراوانی و شدت مخاطرات اقلیمی نظیر سیلاب‌های گسترده، موج‌های گرمای بی‌سابقه و خشکسالی‌های طولانی‌مدت، نشان می‌دهد که اقدامات کنونی برای دستیابی به اهداف توافق‌نامه پاریس کافی نبوده و همچنان شکاف قابل توجهی میان سیاست‌های موجود و میزان کاهش انتشار مورد نیاز وجود دارد (UNFCCC, 2022; Dong & Zhang, 2023).

در این میان، شهرها به عنوان کانون اصلی فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، نقشی تعیین‌کننده در تشدید و همچنین کاهش پیامدهای تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. اگرچه شهرها تنها بخش کوچکی از سطح زمین را اشغال کرده‌اند، اما حدود ۷۰ درصد از مصرف جهانی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهند (Luqman et al., 2023; Aparisi-Cerdá et al., 2024; Mirzakhani & Jalilisadrabad, 2026). از این رو، گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی بر ضرورت اجرای راهبردهای مؤثر کاهش انتشار و افزایش ظرفیت سازگاری شهرها به عنوان یکی از ارکان اصلی مقابله با تغییرات اقلیمی تأکید کرده‌اند (IPCC, 2023).

در پاسخ به این چالش جهانی، مفهوم شهر کربن‌خنثی^۱ به عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای برنامه‌ریزی شهری مطرح شده است. این رویکرد با هدف دستیابی به انتشار خالص صفر گازهای گلخانه‌ای، بر راهبردهایی نظیر بهبود بهره‌وری انرژی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، گسترش حمل‌ونقل پاک، ارتقای زیرساخت‌های سبز و استفاده از راهکارهای مبتنی بر طبیعت تأکید دارد (Tan et al., 2017; Miao et al., 2024; Lee & Jung, 2023). هم‌زمان، مفهوم تاب‌آوری زیست‌محیطی^۲ نیز به عنوان توانایی سیستم‌های شهری در جذب، سازگاری، مقاومت و بازیابی در برابر تنش‌ها و شوک‌های اقلیمی، جایگاه ویژه‌ای در ادبیات برنامه‌ریزی شهری یافته است (Meerow et al., 2016). سیاست‌های شهرهای کم‌کربن، علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ظرفیت سازگاری اکوسیستم‌های شهری، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری زیست‌محیطی را نیز تقویت می‌کنند (Bi et al., 2026).

با وجود آنکه این دو مفهوم اغلب به صورت مستقل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، با این حال میان راهبردهای کربن‌خنثی‌سازی و ارتقای تاب‌آوری زیست‌محیطی هم‌افزایی قابل توجهی وجود دارد. بسیاری از اقداماتی که با هدف کاهش انتشار کربن اجرا می‌شوند، از جمله توسعه زیرساخت‌های سبز، افزایش بهره‌وری انرژی، مدیریت هوشمند منابع، گسترش حمل‌ونقل پایدار و استفاده از راهکارهای مبتنی بر طبیعت، به طور هم‌زمان موجب افزایش ظرفیت سازگاری شهرها در برابر مخاطرات اقلیمی نیز می‌شوند (Ulpiani et al., 2024; Miao et al., 2024; Ekaterina & Li, 2024; Omar, 2025). بنابراین، یکپارچه‌سازی این دو رویکرد می‌تواند منجر به سیاست‌هایی شود که به صورت هم‌زمان اهداف کاهش انتشار، افزایش تاب‌آوری و توسعه پایدار شهری را محقق سازند (Sharifi, 2023; Meerow et al., 2016).

با وجود این هم‌افزایی، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که شاخص‌های مرتبط با تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن‌خنثی در مطالعات پیشین به صورت پراکنده و با تعاریف، ابعاد، مقیاس‌های تحلیل و روش‌های سنجش متفاوت ارائه شده‌اند و ارتباط میان آن‌ها در قالب یک چارچوب یکپارچه و قابل‌عملیاتی‌شدن در مقیاس خرد شهری به روشنی تبیین نشده است. افزون بر این، بخشی از شاخص‌های مطرح‌شده در ادبیات بین‌المللی به داده‌ها، ساختارهای نهادی یا زیرساخت‌هایی وابسته‌اند که ممکن است در شرایط شهرهای ایران و به‌ویژه در مقیاس خرد شهری قابل دسترس یا قابل سنجش نباشند. بنابراین، شکاف موجود تنها به شناسایی شاخص‌ها محدود نمی‌شود، بلکه تبدیل شاخص‌های نظری و عمومی به شاخص‌هایی قابل سنجش، مکان‌مند و متناسب با ویژگی‌های یک محدوده واقعی شهری نیز یک چالش مهم پژوهشی محسوب می‌شود.

این مسئله در منطقه ۶ شهرداری تهران اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این منطقه یکی از محدوده‌های متراکم و برخوردار از تمرکز فعالیت‌های اداری، تجاری، آموزشی و خدماتی در ساختار شهری تهران است و ویژگی‌هایی نظیر تراکم ساختمانی بالا، اختلاط کاربری‌ها، جمعیت شناور روزانه و حضور شریان‌های اصلی ترافیکی را در خود جای داده است. از سوی دیگر، کمبود فضاهای سبز یکپارچه و میزان بالای سطوح نفوذناپذیر، این محدوده را در معرض فشارها و مخاطرات محیطی نظیر جزیره حرارتی شهری



و سیلاب‌های معابر قرار می‌دهد (Aghazadeh et al., 202; 5Pour et al., 2024). بنابراین، منطقه ۶ شهرداری تهران به دلیل هم‌زمانی فشارهای ناشی از تراکم و فعالیت‌های شهری، چالش‌های محیطی و همچنین وجود ظرفیت مناسب برای دسترسی و استخراج داده‌های مکانی، بستر مناسبی برای بررسی قابلیت عملیاتی شدن شاخص‌های تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی فراهم می‌کند. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر تدوین مدل مفهومی-عملیاتی تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی، متناسب با ویژگی‌های فضایی و ظرفیت‌های داده‌ای منطقه ۶ شهرداری تهران است. در راستای تحقق این هدف، پژوهش به دو پرسش اصلی پاسخ می‌دهد:

- شاخص‌های مرتبط با تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی در مطالعات پیشین کدام‌اند و چگونه می‌توان آن‌ها را در یک چارچوب مفهومی سازمان‌دهی کرد؟
- کدام‌یک از شاخص‌های استخراج‌شده با توجه به ویژگی‌های فضایی و ظرفیت‌های داده‌ای منطقه ۶ شهرداری تهران قابلیت بومی‌سازی و عملیاتی‌شدن دارند و چگونه می‌توان روابط میان شاخص‌های منتخب را در قالب یک مدل مفهومی-عملیاتی تبیین کرد؟

۲- مبانی نظری

در این بخش، ابتدا به تبیین مفاهیم پایه و رویکردهای نظری مرتبط با «تاب‌آوری زیست‌محیطی» و «شهر کربن‌خنثی» پرداخته می‌شود. هدف از این مرور، شناخت ابعاد و مؤلفه‌های کلیدی هر یک از این مفاهیم در ادبیات جهانی است. پس از تعریف مفاهیم مستقل، پیوندها و روابط متقابل میان این دو رویکرد مورد واکاوی قرار می‌گیرد تا بستر نظری لازم جهت تدوین یک چارچوب یکپارچه و مفهومی-عملیاتی برای پژوهش فراهم شود.

۲-۱- تاب‌آوری زیست‌محیطی

تاب‌آوری زیست‌محیطی به توانایی سیستم‌های شهری و بوم‌شناختی در مقابله با شوک‌ها، تنش‌ها و مخاطرات محیطی، از جمله مخاطرات طبیعی و انسان‌ساخت، اشاره دارد؛ به گونه‌ای که این سیستم‌ها بتوانند ضمن حفظ عملکردهای اساسی، اختلالات را جذب کرده، با شرایط جدید سازگار شوند و در مدت‌زمان مناسب عملکرد خود را بازیابی کنند (Beller et al., 2019; Amirzadeh et al., 2022). در همین راستا، تاب‌آوری زیست‌محیطی بیانگر ظرفیت یک شهر برای حفظ ساختار اساسی، عملکرد و هویت خود در مواجهه با نوسانات و شوک‌های غیر منتظره است (یدالله‌نیا و همکاران، ۱۴۰۰). این مفهوم فراتر از بازگشت صرف به وضعیت اولیه بوده و بر ظرفیت سازگاری، یادگیری، نوآوری و تحول سیستم‌ها در راستای دستیابی به پایداری تأکید دارد (Walker et al., 2004; Büyüközkan et al., 2022). همچنین، مفهوم تاب‌آوری در سال‌های اخیر از رویکردهای خطی و تک‌بعدی به سمت چارچوب‌های چندبعدی و مبتنی بر سیستم‌های اجتماعی-بوم‌شناختی تکامل یافته است؛ به گونه‌ای که علاوه بر مقاومت در برابر بحران‌ها، ظرفیت‌هایی همچون خودسازمان‌دهی، بازسازمان‌دهی و سازگاری با تغییرات اقلیمی را نیز دربرمی‌گیرد (Soltani et al., 2026). در سیستم‌های شهری، تاب‌آوری زیست‌محیطی بیانگر توانایی حفظ پایداری عملکردهای شهری و مدیریت فشارهای محیطی است (Shi et al., 2022; Samaei, 2024). بر اساس مطالعات پیشین، عوامل مؤثر بر این مفهوم در پنج گروه اصلی قابل دسته‌بندی هستند (Folke, 2016):

- **عوامل زیست‌محیطی:** شامل شرایط اقلیمی، توپوگرافی، پوشش و کاربری زمین و زیرساخت‌های سبز و آبی (Baho et al., 2017; Dakos & Kéfi, 2022). بر این اساس، حفظ پیوستگی اکولوژیک این زیرساخت‌ها و جلوگیری از تکه‌تکه شدن فضاها، سبز، نقشی حیاتی در ارتقای تاب‌آوری محیطی شهرها ایفا می‌کند (زاهدی کلاکی و همکاران، ۱۴۰۱).

- **عوامل کالبدی:** شامل الگوی توسعه، تراکم ساختمانی، اختلاط کاربری زمین و ساختار فضایی-کالبدی شهر که بیانگر ویژگی‌های فیزیکی و نحوه سازمان‌یابی فضایی محیط شهری هستند (Baho et al., 2017; Dakos & Kéfi, 2022). در این میان، مواردی نظیر گسترش فیزیکی افقی، افزایش سطوح نفوذناپذیر، تراکم بالای ساختمانی و وجود

بافت‌های فرسوده به‌عنوان مهم‌ترین چالش‌های کالبدی در مسیر تحقق تاب‌آوری زیست‌محیطی شناسایی شده‌اند (هندی و همکاران، ۱۳۹۹؛ یدالله‌نیا و همکاران، ۱۴۰۰).

- **عوامل اجتماعی:** شامل شهرنشینی، تراکم جمعیت، ساختار اقتصادی و میزان فشار فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست (Walker et al., 2004; Shi et al., 2022).

- **عوامل اقتصادی:** شامل ساختار اقتصادی و ویژگی‌های فعالیت‌های اقتصادی که می‌توانند بر میزان بهره‌برداری از منابع و فشار واردشده بر محیط‌زیست اثرگذار باشند (Shi et al., 2022).

- **عوامل نهادی-حکمرانی:** شامل کیفیت قوانین و سیاست‌های زیست‌محیطی، هماهنگی نهادی، ظرفیت یادگیری تطبیقی و مشارکت ذی‌نفعان (Baho et al., 2017).

در مجموع، تاب‌آوری زیست‌محیطی مفهومی پویا و چندبعدی است که بر اصولی نظیر تنوع، افزونگی و خودسازمان‌دهی استوار بوده و تقویت آن از طریق ارتقای سرمایه‌های طبیعی، اجتماعی و نهادی، نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری شهرها و تحقق توسعه پایدار ایفا می‌کند (Moghimi & Garna, 2019; Osman, 2021; Tariq et al., 2022).

۲-۲- شهر کربن خنثی

شهر کربن خنثی به الگویی نوین در برنامه‌ریزی شهری اشاره دارد که هدف آن دستیابی به انتشار خالص صفر گازهای گلخانه‌ای است؛ به‌گونه‌ای که میزان انتشار ناشی از فعالیت‌های شهری با ظرفیت جذب و جبران کربن در تعادل قرار گیرد (Chen et al., 2022; Laine et al., 2020; Miao et al., 2024). تحقق این هدف مستلزم هدایت توسعه شهری به سمت کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و استقرار نظام‌های کم‌کربن در بخش‌های ساختمان، حمل‌ونقل، انرژی، صنعت و مدیریت پسماند است (Huovila et al., 2022; Lai, 2022). دستیابی به این الگو بر دو راهبرد مکمل استوار است: کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق افزایش بهره‌وری انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی فعالیت‌های شهری، و جبران انتشارهای اجتناب‌ناپذیر با بهره‌گیری از زیرساخت‌های سبز، راهکارهای مبتنی بر طبیعت و فناوری‌های جذب و ذخیره کربن (Mirzakhani & Jalilisadrabad, 2026; Yang et al., 2024).

با این حال، شهر کربن خنثی صرفاً یک رویکرد فنی نیست، بلکه مستلزم حکمرانی یکپارچه، سیاست‌گذاری مؤثر، مشارکت ذی‌نفعان و بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند برای پایش و مدیریت انتشار کربن است (Kenis & Lievens, 2017; Lai, 2022; Ziozias et al., 2023). از این منظر، شهر کربن خنثی چارچوبی جامع برای گذار به توسعه کم‌کربن محسوب می‌شود که هم‌زمان کاهش اثرات تغییر اقلیم، افزایش تاب‌آوری شهری و بهبود کیفیت محیط زندگی را دنبال می‌کند (Lee & Jung, 2023; Miao et al., 2024). در مجموع، تحقق الگوی شهر کربن خنثی فراتر از به‌کارگیری صرف فناوری‌های کالبدی یا اقدامات مجزا در حوزه انرژی بوده و نیازمند اتخاذ یک رویکرد یکپارچه، سیستمی و مکان‌مند در برنامه‌ریزی فضایی شهرها است. دستیابی به تراز خالص صفر انتشار در مقیاس‌های خرد و محلی، مستلزم ایجاد توازن پویا میان نیروهای پیشران انسان‌ساخت و ظرفیت‌های جبرانی و تعدیل‌کننده بوم‌شناختی محیط است. از این رو، بررسی این مفهوم بدون توجه به ویژگی‌های کالبدی بافت ناممکن بوده و پیوند دادن بنیادین شهر کربن خنثی با رویکرد تاب‌آوری زیست‌محیطی، بستر اصلی تدوین چارچوب مفهومی-عملیاتی این پژوهش را شکل می‌دهد.

۲-۳- رابطه میان تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن خنثی

تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن خنثی، اگرچه بر جنبه‌های متفاوتی از پایداری شهری تأکید دارند، در مواجهه با تغییرات اقلیمی و فشارهای فزاینده بر نظام‌های شهری، ارتباطی متقابل و مکمل با یکدیگر دارند. تاب‌آوری زیست‌محیطی بر ظرفیت شهر برای جذب اختلالات، سازگاری با تغییرات و حفظ یا بازسازی عملکردهای اکولوژیک تأکید دارد، در حالی که شهر کربن خنثی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به توازن میان انتشار و جذب کربن متمرکز است. با این حال، هر دو رویکرد در جهت کاهش آسیب‌پذیری شهری و تقویت ظرفیت‌های محیطی در بلندمدت حرکت می‌کنند (He et al., 2020; Carreira & Ferreira, 2025). پیوند اصلی میان این دو مفهوم در کاهش انتشار کربن و تقویت ظرفیت‌های اکولوژیک شکل می‌گیرد. اقداماتی مانند توسعه انرژی‌های پاک، حمل‌ونقل پایدار، افزایش بهره‌وری منابع، اقتصاد چرخشی و توسعه زیرساخت‌های سبز، ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌توانند ظرفیت شهر برای سازگاری با تغییرات اقلیمی و مقابله با اختلالات محیطی را نیز افزایش دهند. از این رو، مفهوم «تاب‌آوری کم‌کربن» بر تلفیق همزمان سیاست‌های کاهش انتشار و سازگاری اقلیمی تأکید دارد (He et al., 2020; Shi et al., 2022).



این رابطه دوسویه است؛ به این معنا که از یک سو، کاهش انتشار کربن و حرکت به سوی فناوری‌های پاک می‌تواند فشارهای وارد بر سیستم‌های اکولوژیک و شهری را کاهش داده و تاب‌آوری آن‌ها را تقویت کند و از سوی دیگر، افزایش تاب‌آوری از طریق حفظ ظرفیت‌های طبیعی، ارتقای بهره‌وری منابع و توسعه زیرساخت‌های سبز می‌تواند دستیابی به کربن‌خنثی را تسهیل کند. شواهد تجربی نیز نشان داده‌اند که ذخیره کربن با افزایش تاب‌آوری اکولوژیک ارتباط مثبت دارد، درحالی‌که انتشار کربن می‌تواند این تاب‌آوری را تضعیف کند (Li et al., 2023). در مقیاس شهری، زیرساخت سبز و خدمات اکوسیستمی یکی از مهم‌ترین حوزه‌های هم‌پوشانی این دو رویکرد محسوب می‌شوند. فضاها، سبزی و پوشش گیاهی، علاوه بر جذب و ذخیره کربن، از طریق تنظیم دما، کاهش جزیره حرارتی، مدیریت رواناب و حفظ تنوع زیستی، ظرفیت محیط شهری برای مقابله با تنش‌های اقلیمی را افزایش می‌دهند. از این منظر، برنامه‌ریزی برای شهر کربن‌خنثی و تقویت تاب‌آوری زیست‌محیطی را می‌توان دو مسیر مکمل برای دستیابی به پایداری بلندمدت شهری دانست (Carreira & Ferreira, 2025; Giacomelli et al., 2025).

در نتیجه، مبنای نظری پژوهش حاضر بر این فرض استوار است که تحقق تاب‌آوری زیست‌محیطی در شهر، در شرایط تشدید تغییرات اقلیمی، نیازمند توجه همزمان به کاهش فشارهای محیطی و افزایش ظرفیت‌های اکولوژیک و فضایی است. از این منظر، رویکرد شهر کربن‌خنثی می‌تواند به‌عنوان یک جهت‌گیری راهبردی برای کاهش فشارهای اقلیمی و کربنی، و تاب‌آوری زیست‌محیطی به‌عنوان چارچوبی برای حفظ و تقویت ظرفیت سیستم شهری در مواجهه با این فشارها در نظر گرفته شود. این پیوند نظری، زمینه لازم را برای شناسایی و سازمان‌دهی شاخص‌هایی فراهم می‌کند که بتوانند همزمان ابعاد زیست‌محیطی تاب‌آوری و الزامات حرکت به سوی شهر کربن‌خنثی را در مقیاس شهری بازتاب می‌دهند.

۳- روش پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از روش مرور ادبیات نظام‌مند است که با رویکرد تحلیل محتوای کیفی و کمی‌سازی فراوانی داده‌ها انجام شده است. به‌منظور دستیابی به جامعیت نظری، دوری از قضاوت‌های سلیقه‌ای و تضمین تکرارپذیری علمی، فرآیند شناسایی، غربالگری، استخراج شاخص‌ها و تدوین مدل مفهومی پژوهش طی دو گام اصلی و همان‌طور که در تصویر ۱ نشان داده شده بر اساس فرآیند ۴ مرحله‌ای پروتکل استاندارد پریسما^۳ ۲۰۲۰ به شرح زیر ساختار بندی و به اجرا درآمد (Page et al., 2021):

۳-۱- گام اول: فرآیند استخراج، غربالگری و مستندسازی شاخص‌های عام پژوهش

در این گام، هدف اصلی استخراج جامع و مستدل تمامی متغیرها و شاخص‌های کلیدی، محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حکمرانی-نهادی مرتبط با دو رویکرد تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن‌خنثی بود. این فرآیند بر اساس مراحل چهارگانه پریسما شامل مراحل زیر طی شد:

- مرحله شناسایی

در مرحله نخست، جستجوی گسترده‌ای در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر بین‌المللی از جمله اسکوپوس، گوگل اسکالر و آی.بی.بی.بی. اکسپلور انجام پذیرفت. بازه زمانی جستجو از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد. این بازه با هدف پوشش مطالعات معاصر مرتبط با تاب‌آوری زیست‌محیطی و رویکرد شهر کربن‌خنثی و بررسی روند تحول شاخص‌ها و چارچوب‌های مرتبط انتخاب شد. سال ۲۰۱۰ به‌عنوان نقطه آغاز جستجو، امکان شناسایی مطالعات پایه و بررسی روند توسعه ادبیات مرتبط را فراهم کرد و سال ۲۰۲۵ نیز به‌عنوان آخرین سال کامل پیش از انجام جستجو در نظر گرفته شد. از این‌رو، انتخاب این بازه با هدف ایجاد توازن میان پوشش مطالعات پایه و حفظ روزآمدی منابع انجام گرفت. استراتژی جستجو بر پایه ترکیب کلیدواژه‌های تخصصی با استفاده از عملگرهای منطقی AND و OR فرمول زیر در بخش‌های عنوان، چکیده و کلمات کلیدی^۴ تنظیم شد. ("carbon-neutral city" OR "carbon neutral city") AND ("Environmental Resilience" OR "Ecological Resilience") در این مرحله، تعداد ۷۲۳ سند علمی اولیه یافت شد.

- مرحله غربالگری

پس از حذف ۱۴۷ رکورد تکراری، تعداد ۵۷۶ مطالعه منحصربه‌فرد برای ادامه فرایند غربالگری باقی ماند. در مرحله نخست، با بررسی عناوین مقالات، ۳۱۴ مطالعه به دلیل عدم ارتباط با موضوع و اهداف پژوهش حذف شد و در نتیجه، ۲۶۲ مقاله برای ارزیابی چکیده‌ها انتخاب شد. سپس، چکیده مطالعات منتخب از نظر میزان انطباق با موضوع، هدف و معیارهای ورود به پژوهش

بررسی که طی این مرحله، ۱۵۴ مطالعه به دلیل عدم انطباق با معیارهای تعیین شده کنار گذاشته شدند. در ادامه، مطالعات باقی مانده برای بررسی متن کامل و ارزیابی دقیق تر بر اساس معیارهای ورود و خروج مورد بررسی قرار گرفتند که بر این اساس، تعداد ۵۲ مقاله به دلیل عدم احراز معیارها حذف شدند.

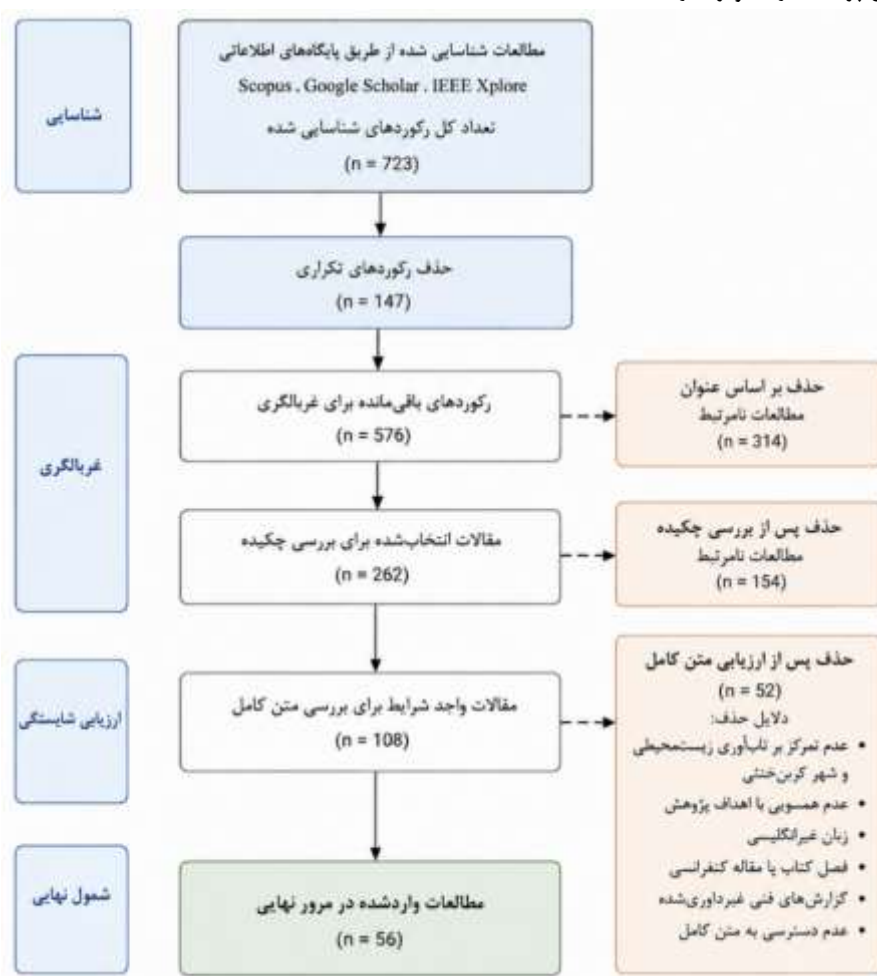
- مرحله ارزیابی شایستگی

در این مرحله، متن کامل تعداد ۱۰۸ مقاله باقی مانده بر اساس معیارهای شمول و خروج به دقت مورد ارزیابی کیفی قرار گرفت.

- معیارهای شمول: مقالات پژوهشی و مروری، چاپ شده به زبان انگلیسی، و تمرکز بر شاخص های تاب آوری زیست محیطی و شهر کربن خنثی؛
- معیارهای خروج: مقالات فاقد دیدگاه تاب آوری زیست محیطی و شهر کربن خنثی، مقالات به زبان غیر انگلیسی، مقالاتی که با اهداف پژوهش همسو نبودند، فصل های کتاب، مقالات کنفرانسی، گزارش های فنی غیرداوری شده و مقالاتی که متن کامل آن ها در دسترس نبود.

- مرحله شمول نهایی

در نهایت، تعداد ۵۶ مقاله کلیدی که به تبیین شاخص های مرتبط در دو حوزه تاب آوری زیست محیطی و شهر کربن خنثی پرداخته بودند، انتخاب شدند. به منظور نظام بخشی به یافته ها، اثبات روایی محتوایی و جلوگیری از پراکندگی داده ها، فرآیند استخراج و مستندسازی شاخص ها به گونه ای ساختار بندی شد که تمامی متغیرهای شناسایی شده مستقیماً به مقالات مرجع خود متصل و ارجاع داده شدند. در این فرآیند، هر شاخصی که در مقالات منتخب مورد تأیید یا مدل سازی قرار گرفته بود ثبت شد تا استخراج متغیرها از حالت سلیقه ای خارج شده و بر پایه اجماع علمی صاحب نظران استوار شود. نمودار جریان فرآیند انتخاب مطالعات بر اساس پروتکل پریسما در تصویر ۱ ارائه شده است.



تصویر ۱- جریان پریسما برای فرآیند انتخاب مطالعات

۳-۲- گام دوم: ساختاربندی شاخص‌ها در قالب ابعاد پنج‌گانه و تحلیل فراوانی

در گام دوم، مجموعه شاخص‌های استخراج‌شده از دل مقالات منتخب، بر اساس ماهیت عملکردی و قرابت مفهومی مورد بازبینی و پالایش قرار گرفتند. جهت ایجاد یک چارچوب منسجم شهری، این شاخص‌ها در قالب پنج بُعد کلیدی ساختاربندی شدند:

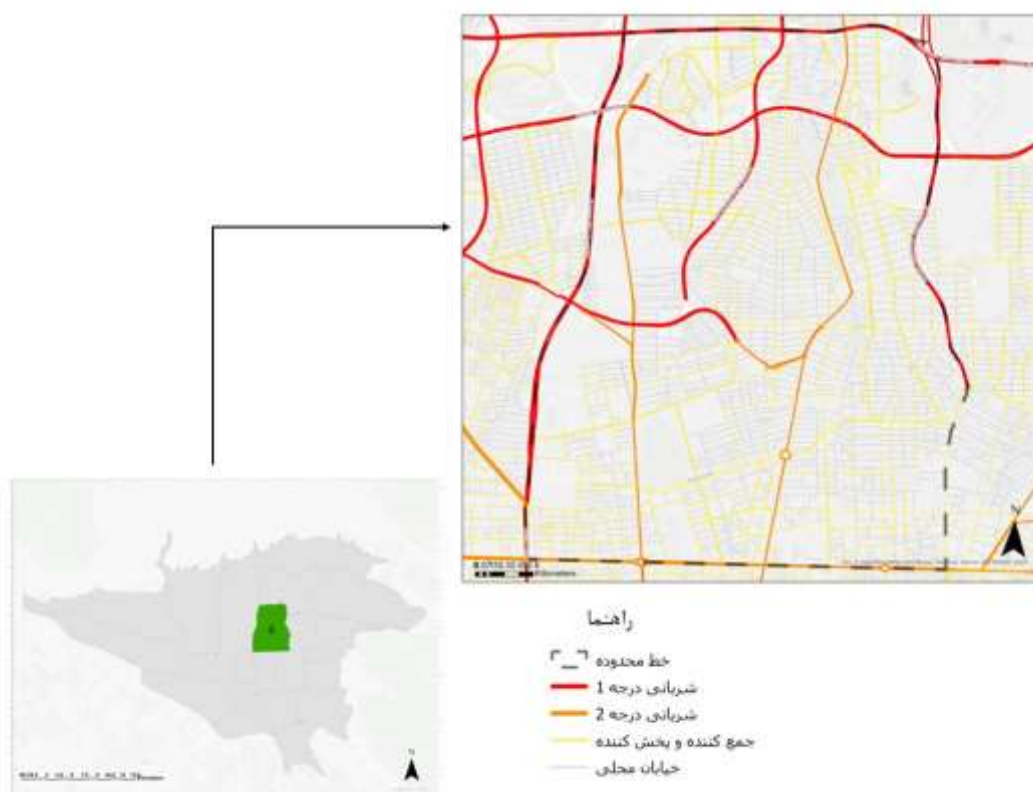
- بعد کالبدی: مرتبط با فرم شهر، تراکم ساختمانی، هندسه معابر و زیرساخت‌های فیزیکی؛
- بعد زیست‌محیطی: مرتبط با آلاینده‌های جوی، پوشش گیاهی، منابع آبی و شرایط اقلیمی؛
- بعد اقتصادی: مرتبط با هزینه و میزان مصرف انرژی، شدت انرژی و اقتصاد چرخشی؛
- بعد اجتماعی: مرتبط با تراکم جمعیت، کیفیت زندگی و میزان مشارکت شهروندان؛
- بعد نهادی و حکمرانی: مرتبط با سیاست‌گذاری‌ها، قوانین زیست‌محیطی و پایش هوشمند.

پس از این دسته‌بندی، به‌منظور درک روندهای مطالعاتی و شناسایی میزان توجه پژوهشگران در ادبیات جهانی، تحلیل آمار توصیفی بر روی متغیرها انجام گرفت. سهم درصدی اختصاص‌یافته به هر شاخص محاسبه شد تا وزن و تأکید مقالات بین‌المللی بر روی هر متغیر مشخص شود. با این حال، از آنجاکه فراوانی یا درصد بالای یک شاخص در ادبیات جهانی لزوماً به معنای اهمیت ذاتی یا قابلیت پیاده‌سازی مستقیم آن در یک بافت محلی خاص نیست، این تحلیل توصیفی صرفاً به‌عنوان یک شناخت اولیه و ارزیابی نظری از ادبیات موضوع مدنظر قرار گرفت و مبنای وزن‌دهی یا فیلتر نهایی شاخص‌ها در مدل بومی منطقه ۶ شهرداری تهران قرار نگرفت.

۳-۳- گام سوم: بومی‌سازی و انتخاب شاخص‌های عملیاتی و بررسی روایی و پایایی

به‌منظور تدوین یک مدل مفهومی-عملیاتی قابل اجرا و متناسب با ویژگی‌های بستر شهری ایران، شاخص‌های استخراج‌شده از مطالعات پیشین در این مرحله بومی‌سازی و غربال شدند. در این راستا، منطقه ۶ شهرداری تهران به‌عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد. این منطقه به‌عنوان یکی از محدوده‌های محوری و قدیمی شهر تهران، در بخش مرکزی پایتخت واقع شده (تصویر ۲) و از شمال به بزرگراه شهید همت، از غرب به بزرگراه شهید چمران، از شرق به بزرگراه مدرس و از جنوب به محور خیابان انقلاب اسلامی محدود می‌شود (Ghalehtemouri et al., 2021). ساختار کالبدی منطقه شامل ۲۸,۰۶۹ قطعه ملکی (پارسل) است که در قالب ۶ ناحیه و ۱۸ محله سازمان یافته‌اند. این منطقه با وجود برخورداری از سهمی حدود ۳۰۵ درصد از مساحت شهر تهران، به‌دلیل جایگاه راهبردی خود، محل استقرار بیش از ۳۱ درصد از ساختمان‌های دولتی، نهادهای عمومی و خصوصی و دستگاه‌های اصلی کشور است (Ghalambordezfooly & Hosseini, 2023). تمرکز فعالیت‌های اداری، تجاری و خدماتی و در پی آن، حجم قابل‌توجه جمعیت شناور و ترافیک، در کنار ویژگی‌های کالبدی و فرسودگی بخش‌هایی از بافت، این منطقه را با چالش‌های زیست‌محیطی از جمله آلودگی هوای ناشی از ترافیک و تشدید پدیده جزیره حرارتی شهری مواجه کرده است (Ghodrat & Sough, 2026; Ghaedrahmati & Alian, 2018).





شکل ۲- موقعیت منطقه ۶ شهرداری تهران

به منظور کاهش مداخلات قضاوتی در فرآیند بومی سازی و افزایش قابلیت بازتولید نتایج، انتخاب شاخص های نهایی بر اساس مجموعه ای از معیارهای از پیش تعیین شده انجام گرفت. روایی محتوایی شاخص ها از طریق اتکا به شواهد حاصل از مطالعات معتبر بین المللی و بررسی نظام مند آن ها در ماتریس تطبیقی تأمین شد. همچنین، برای افزایش پایایی فرآیند انتخاب، معیارهای مشخصی برای ارزیابی و غربال شاخص ها تعریف شد؛ به گونه ای که فرآیند انتخاب شاخص های نهایی بر مبنای ویژگی های قابل سنجش داده ها، قابلیت دسترسی و الزامات محدوده مطالعاتی و روش تحلیل قرار گرفت. بر این اساس، ۸۱ شاخص استخراج شده از ادبیات پژوهش با استفاده از پنج معیار اصلی مورد ارزیابی قرار گرفتند. معیارهای مذکور عبارت بودند از:

- **تکرارپذیری و تناسب نظری:** میزان تکرار و تأیید شاخص در مطالعات پیشین به عنوان یکی از شواهد پشتیبان انتخاب در نظر گرفته شد؛ با این حال، انتخاب شاخص صرفاً بر مبنای فراوانی آن در مطالعات انجام نگرفت. به عبارت دیگر، شاخص هایی که از فراوانی کمتری برخوردار بودند، اما ارتباط نظری و انطباق مناسبی با شرایط زیست محیطی و کالبدی منطقه ۶ شهرداری تهران داشتند، نیز در فرآیند ارزیابی حفظ شدند. از جمله این شاخص ها می توان به آلوده اشاره کرد.
- **قابلیت سنجش فضایی و کمی:** شاخص منتخب باید قابلیت تبدیل به یک متغیر کمی و مکان مند را داشته باشد و امکان تولید آن در قالب داده های نقطه ای، خطی، پلیگونی یا رستری در مقیاس مناسب محدوده مطالعاتی فراهم باشد.
- **در دسترس بودن داده ها در مقیاس خرد (پارسل شهری):** با توجه به ماهیت فضایی پژوهش و مقیاس پارسل، شاخص هایی در اولویت قرار گرفتند که داده های مورد نیاز آن ها در پارسل شهری قابل دسترسی و استخراج باشد. شاخص هایی که به دلیل فقدان داده معتبر و قابل دسترسی در مقیاس مورد نیاز امکان عملیاتی شدن نداشتند، از فرآیند انتخاب حذف شدند؛ برای مثال، مالیات بر کربن و میزان مصرف انرژی در این گروه قرار گرفت.
- **سازگاری با بستر محلی و ساختار شهری ایران:** شاخص هایی که سنجش یا پیاده سازی آن ها مستلزم وجود زیرساخت های فناورانه، سازوکارهای نهادی یا شرایط اقلیمی و مدیریتی خاص و غیر قابل دسترسی در محدوده مورد



مطالعه بود، کنار گذاشته شدند. برای نمونه، کنتورهای هوشمند لحظه‌ای انتشار کربن به دلیل محدودیت در دسترسی و پیاده‌سازی در مقیاس مورد نظر پژوهش، قابلیت عملیاتی شدن نداشتند.

– تناسب با الزامات مدل‌سازی‌های محاسباتی: شاخص‌ها باید قابلیت تبدیل به داده‌های عددی و ساختاریافته،

از جمله داده‌های ماتریسی یا رستری، را داشته باشند تا بتوان از آن‌ها به عنوان متغیرهای مستقل و ورودی‌های مدل‌های یادگیری ماشین استفاده کرد. این ویژگی، زمینه را برای به کارگیری مستقیم شاخص‌ها در تحلیل‌های مکانی و مدل‌سازی‌های پیش‌بینی محور فراهم کرده و امکان سنجش میزان تاب‌آوری زیست‌محیطی در سطح پارسل‌های منطقه ۶ شهرداری تهران را با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین میسر می‌سازد.

در نهایت، پس از اعمال معیارهای مذکور و بررسی قابلیت نظری و عملیاتی شاخص‌ها، از میان ۸۱ شاخص اولیه، ۱۲ شاخص به عنوان شاخص‌های عملیاتی نهایی انتخاب شدند. این شاخص‌ها مبنای تدوین چارچوب مفهومی-عملیاتی پژوهش و تحلیل‌های فضایی در منطقه ۶ شهرداری تهران قرار گرفتند.

۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌ها

پس از اتمام مراحل جستجو و غربالگری بر اساس پروتکل پریسما و گزینش نهایی مقالات کلیدی، مرحله استخراج داده‌ها آغاز گردید. در این مرحله، متن کامل تمامی ۵۶ مقاله منتخب به صورت خط به خط و با رویکرد تحلیل محتوای کیفی مورد مطالعه عمیق قرار گرفت. هدف از این خوانش دقیق، شناسایی و استخراج شاخص‌ها و متغیرهایی بود که به طور توأمان بر ارتقای «تاب‌آوری زیست‌محیطی» و تحقق اهداف «شهر کربن خنثی» تأکید داشتند. ماحصل گام نخست این بررسی، شناسایی ۸۱ شاخص عام و اولیه از لایه‌لای متون علمی جهانی بود. از آنجاکه این دو پارادایم در ادبیات پیشین غالباً دارای واژگان تخصصی متفاوتی بوده‌اند، بسیاری از شاخص‌های استخراج شده دارای هم‌پوشانی مفهومی بودند. لذا در گام بعدی، با بررسی قرابت‌های معنایی و عملکردی، شاخص‌های مشابه و هم‌خانواده ادغام و استانداردسازی شدند (به عنوان نمونه، کشف این موضوع که متغیرهای مختلفی نظیر «کاشت درختان»، «فضای سبز رهاشده» و «بام‌های سبز» همگی کارکردی دوگانه در جذب کربن و مهار جزایر حرارتی دارند و می‌توانند تحت عنوان جامع «توسعه زیرساخت‌های سبز» تجمیع شوند.

به منظور مستندسازی یافته‌ها، نظام‌بخشی به فرآیند استخراج شاخص‌ها و کاهش پراکندگی مفهومی، تمامی شاخص‌های شناسایی شده از ۵۶ مقاله منتخب به همراه منابع علمی پشتیبان آن‌ها در جدول (۱) ارائه شدند. در این فرآیند، هرگاه شاخصی در مطالعات پیشین به عنوان عامل مؤثر بر تاب‌آوری زیست‌محیطی یا کربن خنثی‌سازی معرفی، تأیید یا مدل‌سازی شده بود، مستندات مربوط به آن ثبت گردید. بر این اساس، ۸۱ شاخص استخراج شده در پنج بعد اصلی شامل ابعاد کالبدی، زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی-حکمرانی طبقه‌بندی شدند. به منظور شناسایی گرایش‌های غالب در ادبیات جهانی، برای هر شاخص فراوانی و درصد تکرار آن در میان ۵۶ مقاله منتخب محاسبه شد. این تحلیل توصیفی امکان بررسی میزان توجه پژوهشگران به مؤلفه‌های مختلف را فراهم می‌کند و تصویری از روندهای حاکم بر مطالعات مرتبط با تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهرهای کربن خنثی ارائه می‌دهد. با این حال، در این پژوهش فراوانی تکرار شاخص‌ها صرفاً به عنوان ابزاری برای شناخت الگوهای موجود و دستیابی به اجماع نظری اولیه مورد استفاده قرار گرفته است و نه به عنوان معیار نهایی انتخاب یا اهمیت شاخص‌ها؛ زیرا تکرار بیشتر یک شاخص لزوماً بیانگر اهمیت مطلق آن در تمامی زمینه‌ها و بسترهای مکانی نیست. بر این اساس، نتایج حاصل از این مرحله مبنایی برای تحلیل ابعاد پنج‌گانه پژوهش و ورود به مرحله بومی‌سازی و عملیاتی‌سازی شاخص‌ها در محدوده مورد مطالعه فراهم ساخت. در ادامه، توزیع شاخص‌ها در هر یک از ابعاد پنج‌گانه و مهم‌ترین الگوهای مشاهده شده در ادبیات جهانی تشریح می‌شود.

جدول ۱- شاخص‌های استخراج شده از مطالعات منتخب و فراوانی و درصد تکرار آن‌ها در ادبیات پژوهش

ابعاد	شاخص‌ها	فراوانی	درصد از ۵۶ مقاله	منابع
زیست‌محیطی	پوشش گیاهی	۱۷	۳۰,۴٪	(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Asmawi et al., 2024); (Choudhury et al., 2024); (Daud & Ibrahim, 2025); (Flensburg et al., 2023); (Komninos & Panori, 2025); (Lee et al., 2010); (Lee et al., 2024); (Li et al., 2023); (Miao et al.,

(2024); (Newman, 2010); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Osman, 2021); (Panori et al., 2025); (Wu et al., 2025); (Yang et al., 2024); (Zhang et al., 2024)			
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Ekaterina & Li, 2024); (Komninos & Panori, 2025); (Laine et al., 2020); (Li et al., 2023); (Lombardi & Sonetti, 2017); (Miao et al., 2024); (Newman, 2010); (Osman, 2021); (Oshilalu & Iboh, 2025); (Panori et al., 2025); (Shang & Lv, 2023); (Shen et al., 2022); (Tan et al., 2017); (Wang et al., 2024)	۲۸,۶٪	۱۶	انرژی‌های تجدیدپذیر
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Conejos et al., 2012); (Cong et al., 2024); (Dong & Zhang, 2023); (Laine et al., 2020); (Li et al., 2023); (Moghim & Garna, 2019); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Panori et al., 2025); (Shi et al., 2022); (Tariq et al., 2022); (Tozer & Klenk, 2019); (Winkelman et al., 2010); (Yang et al., 2024)	۲۵,۰٪	۱۴	انتشار گازهای گلخانه‌ای
(Cong et al., 2024); (Dong & Zhang, 2023); (Ekaterina & Li, 2024); (Kim & Lee, 2013); (Komninos & Panori, 2025); (Lai, 2022); (Laine et al., 2020); (Oshilalu & Iboh, 2025); (Panori et al., 2025); (Shang & Lv, 2023); (Shen et al., 2022); (Tan et al., 2017); (Wang et al., 2024)	۲۳,۲٪	۱۳	بهره‌وری انرژی
(Al-Humaiqani & Al-Ghamdi, 2022); (Asmawi et al., 2024); (Baho et al., 2017); (Dakos & Kéfi, 2022); (Dong & Zhang, 2023); (Li et al., 2023); (Moghim & Garna, 2019); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Osman, 2021); (Oshilalu & Iboh, 2025); (Panori et al., 2025); (Shang & Lv, 2023); (Tariq et al., 2022)	۲۳,۲٪	۱۳	تاب‌آوری و سازگاری با مخاطرات اقلیمی
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Asmawi et al., 2024); (Bang et al., 2021); (Dong & Zhang, 2023); (Lee et al., 2024); (Li et al., 2023); (Moghim & Garna, 2019); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Osman, 2021); (Panori et al., 2025); (Wani et al., 2024); (Yang et al., 2024)	۲۱,۴٪	۱۲	کیفیت هوا / آلودگی هوا
(Choudhury et al., 2024); (Daud & Ibrahim, 2025); (Komninos & Panori, 2025); (Laine et al., 2020); (Lee et al., 2010); (Li et al., 2023); (Miao et al., 2024); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Wu et al., 2025)	۱۶,۱٪	۹	ظرفیت جذب کربن
(Cong et al., 2024); (Conejos et al., 2012); (Komninos & Panori, 2025); (Omar, 2018); (Tan et al., 2017); (Wani et al., 2024); (Zhang et al., 2022)	۱۴,۳٪	۸	تفکیک و طبقه‌بندی پسماند/بازیافت پسماند
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Asmawi et al., 2024); (Daud & Ibrahim, 2025); (Flensburg et al., 2023); (Komninos & Panori, 2025); (Lee et al., 2024); (Newman, 2010)	۱۲,۵٪	۷	تنوع زیستی
(Cong et al., 2024); (Conejos et al., 2012); (Komninos & Panori, 2025); (Laine et al., 2020); (Omar, 2018); (Tan et al., 2017); (Wani et al., 2024)	۱۲,۵٪	۷	مدیریت پسماند
(Cong et al., 2024); (Komninos & Panori, 2025); (Omar, 2018); (Shang & Lv, 2023); (Toriro & Chirisa, 2021)	۸,۹٪	۵	اقتصاد چرخه‌ای



(Conejos et al., 2012); (Lee et al., 2024); (Li et al., 2023); (Panori et al., 2025); (Wani et al., 2024)	۸,۹٪	۵	پایداری منابع طبیعی
(Asmawi et al., 2024); (Bang et al., 2021); (Lee et al., 2024); (Li et al., 2023); (Panori et al., 2025)	۸,۹٪	۵	کیفیت و سلامت منابع آبی
(Baho et al., 2017); (Dakos & Kéfi, 2022); (Okvat & Zautra, 2011); (Yi & Jackson, 2021)	۷,۱٪	۴	ظرفیت انطباق اکوسیستم
(Li et al., 2022); (Oshilalu & Iboh, 2025); (Tan et al., 2017)	۵,۴٪	۳	سیستم‌های حمل‌ونقل کربن خنثی
(Li et al., 2023); (Panori et al., 2025); (Tan et al., 2017)	۵,۴٪	۳	کیفیت محیط زیست
(Antoszewski et al., 2022)	۳,۶٪	۲	آلبيدو
(Asmawi et al., 2024); (Li et al., 2023)	۳,۶٪	۲	شرایط اقلیمی (دما و بارش)
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Bang et al., 2021)	۳,۶٪	۲	آلودگی صوتی
(Choudhury et al., 2024); (Moghim & Garna, 2019)	۳,۶٪	۲	جنگل کاری مجدد / فضاهاى سبز
(Shang & Lv, 2023); (Wang & Tae, 2025)	۳,۶٪	۲	انتشار کربن ساختمان
(Nieuwenhuijsen, 2020); (Panori et al., 2025)	۳,۶٪	۲	جزایر حرارتی شهری
(Lombardi & Sonetti, 2017)	۱,۸٪	۱	مدیریت منابع
(Moghim & Garna, 2019)	۱,۸٪	۱	اتصال اکولوژیکی
(Li et al., 2023)	۱,۸٪	۱	توان بازیابی
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Christidis et al., 2024); (Ekaterina & Li, 2024); (Lai, 2022); (Lee & Jung, 2023); (Li et al., 2022); (Miao et al., 2024); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Omar, 2018); (Shang & Lv, 2023); (Tan et al., 2017)	۱۹,۶٪	۱۱	دسترسی به حمل‌ونقل عمومی
(Komninos & Panori, 2025); (Lombardi & Sonetti, 2017); (Miao et al., 2024); (Newman, 2010); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Panori et al., 2025); (Tariq et al., 2022); (Tozer & Klenk, 2019); (Wang et al., 2024); (Zhang et al., 2024)	۱۷,۹٪	۱۰	زیرساخت سبز
(Mirzakhani et al., 2025); (Huovila et al., 2022); (Komninos & Panori, 2025); (Li et al., 2023); (Miao et al., 2024); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Osman, 2021); (Shang & Lv, 2023); (Winkelman et al., 2010)	۱۶,۱٪	۹	اختلاط کاربری
(Choudhury et al., 2024); (Komninos & Panori, 2025); (Miao et al., 2024); (Panori et al., 2025); (Shi et al., 2022); (Wang & Tae, 2025); (Winkelman et al., 2010)	۱۲,۵٪	۷	میزان تراکم ساختمانی
(Conejos et al., 2012); (Lee et al., 2024); (Li et al., 2023); (Oshilalu & Iboh, 2025); (Shang & Lv, 2023); (Shen et al., 2022)	۱۰,۷٪	۶	کارایی انرژی
(Al-Humaiqani & Al-Ghamdi, 2022); (Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Cong et al., 2024); (Li et al., 2022); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Tan et al., 2017)	۱۰,۷٪	۶	زیرساخت‌های حمل‌ونقل و نقل‌پاک
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Christidis et al., 2024); (Ekaterina & Li, 2024); (Lee et al., 2024); (Nieuwenhuijsen, 2020)	۸,۹٪	۵	وجود مسیر دوچرخه و پیاده‌روی

کلی

(Huovila et al., 2022); (Komninos & Panori, 2025); (Omar, 2018); (Zhang et al., 2022)	۷,۱٪	۴	ظرفیت تولید انرژی از پسماند	
(Conejos et al., 2012); (Ekaterina & Li, 2024); (Komninos & Panori, 2025); (Lai, 2022)	۷,۱٪	۴	قدمت ساختمان / قدمت بنا	
(Chen et al., 2021); (Omar, 2018); (Sobstyl et al., 2018)	۵,۴٪	۳	ضریب دید آسمان	
(Shang & Lv, 2023); (Shi et al., 2022); (Ziozias et al., 2023)	۵,۴٪	۳	زیرساخت هوشمند	
(Bang et al., 2021); (Cong et al., 2024); (Nieuwenhuijsen, 2020)	۵,۴٪	۳	تغییر کاربری زمین	
(Komninos & Panori, 2025); (Miao et al., 2024); (Nieuwenhuijsen, 2020)	۵,۴٪	۳	فرم شهری	
(Osman, 2021); (Shang & Lv, 2023); (Shen et al., 2022)	۵,۴٪	۳	شبکه هوشمند انرژی	
(Miao et al., 2024); (Wang & Tae, 2025)	۳,۶٪	۲	ساختمان‌های سبز و پایدار	
(Dong & Zhang, 2023)	۱,۸٪	۱	نوسازی و بهسازی ساختمان‌ها	
(Nieuwenhuijsen, 2020)	۱,۸٪	۱	نرخ فضای پارکینگ	
(Oshilalu & Iboh, 2025)	۱,۸٪	۱	الکتریکی‌سازی حمل‌ونقل	
(Wang & Tae, 2025)	۱,۸٪	۱	درصد ساختمان‌های دارای استاندارد انرژی با کربن پایین	
(Panori et al., 2025)	۱,۸٪	۱	بهره‌وری کاربری زمین	
(Panori et al., 2025)	۱,۸٪	۱	زیرساخت‌های آبی	
(Al-Humaiqani & Al-Ghamdi, 2022); (Lima et al., 2023); (Lombardi & Sonetti, 2017); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Oshilalu & Iboh, 2025); (Spiegelhalter & Werner, 2022)	۱۰,۷٪	۶	میزان مشارکت شهروندان	محیطی
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Shi et al., 2022); (Winkelman et al., 2010)	۷,۱٪	۴	جمعیت	
(Nieuwenhuijsen, 2020); (Panori et al., 2025); (Toriro & Chirisa, 2021); (Winkelman et al., 2010)	۷,۱٪	۴	کیفیت سلامت	
(Okvat & Zautra, 2011); (Winkelman et al., 2010)	۳,۶٪	۲	امنیت غذایی محلی	
(Panori et al., 2025); (Shang & Lv, 2023)	۳,۶٪	۲	رفاه پایدار ساکنان	
(Nieuwenhuijsen, 2020); (Panori et al., 2025)	۳,۶٪	۲	زیست‌پذیری شهری	
(Moghim & Garna, 2019)	۱,۸٪	۱	دسترسی به آب سالم	
(Moghim & Garna, 2019)	۱,۸٪	۱	دسترسی به بهداشت	
(Dong & Zhang, 2023)	۱,۸٪	۱	رفتار مصرف‌کنندگان انرژی	
(Nieuwenhuijsen, 2020)	۱,۸٪	۱	سازگاری با جمعیت	
(Lee et al., 2024)	۱,۸٪	۱	کیفیت زندگی	
(Lee et al., 2024)	۱,۸٪	۱	نرخ شهرنشینی	
(Dong & Zhang, 2023); (Ekaterina & Li, 2024); (Komninos & Panori, 2025); (Li et al., 2023); (Moghim & Garna, 2019); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Panori et al., 2025); (Shen et al., 2022); (Wani et al., 2024)	۱۶,۱٪	۹	میزان مصرف انرژی	اقتصادی
(Lee et al., 2024); (Oshilalu & Iboh, 2025); (Wang et al., 2024)	۵,۴٪	۳	میزان سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه فناوری‌های سبز	
(Conejos et al., 2012); (Komninos & Panori, 2025); (Zhang et al., 2022)	۵,۴٪	۳	میزان مشوق‌های اقتصادی برای توسعه اقتصاد چرخشی	



(Choudhury et al., 2024); (Osman, 2021); (Panori et al., 2025)	۵,۴٪	۳	شدت نور شبانه
(Aparisi-Cerdá et al., 2024); (Baho et al., 2017)	۳,۶٪	۲	میزان مصرف برق
(Wang, Z., et al., 2024)	۱,۸٪	۱	نسبت اعتبارات سبز به کل اعتبارات مالی شهر
(Osman, 2021)	۱,۸٪	۱	شدت انرژی اقتصاد
(Nieuwenhuijsen, 2020)	۱,۸٪	۱	فناوری و نوآوری سبز
(Lee et al., 2024)	۱,۸٪	۱	شدت انرژی حمل‌ونقل
(Panori et al., 2025)	۱,۸٪	۱	شهرهای خودکفا
(Al-Humaiqani & Al-Ghamdi, 2022); (Cong et al., 2024); (Laine et al., 2020); (Miao et al., 2024); (Shang & Lv, 2023); (Shi et al., 2022); (Tozer & Klenk, 2019)	۱۲,۵٪	۷	حکمرانی یکپارچه و چندسطحی
(Daud & Ibrahim, 2025); (Lai, 2022); (Lee et al., 2024); (Spiegelhalter & Werner, 2022); (Ziozias et al., 2023)	۸,۹٪	۵	فناوری‌های دیجیتال برای مدیریت کربن
(Choudhury et al., 2024); (Conejos et al., 2012); (Daud & Ibrahim, 2025); (Spiegelhalter & Werner, 2022); (Tan et al., 2017)	۸,۹٪	۵	توسعه پایدار شهری
(Laine et al., 2020); (Shi et al., 2022); (Winkelman et al., 2010); (Yang et al., 2024)	۷,۱٪	۴	پایش و پیش‌بینی انتشار کربن
(Lombardi & Sonetti, 2017); (Nieuwenhuijsen, 2020); (Shang & Lv, 2023)	۵,۴٪	۳	یکپارچگی سیاست‌های شهری
(Wang & Tae, 2025); (Wang et al., 2024)	۳,۶٪	۲	وجود استاندارد های سختگیرانه انتشار کربن
(Spiegelhalter & Werner, 2022)	۱,۸٪	۱	پایبندی به تعهدات اقلیمی بین‌المللی
(Huovila et al., 2022)	۱,۸٪	۱	نظام پایش انتشار و شفافیت داده‌ها
(Wang, Z., et al., 2024)	۱,۸٪	۱	میزان تعهد و نظارت دولت محلی بر اهداف کربن‌زدایی
(Moghim & Garna, 2019)	۱,۸٪	۱	قوانین حفاظت از اکوسیستم
(Yi & Jackson, 2021)	۱,۸٪	۱	ظرفیت ارزیابی زیست‌محیطی خسارت
(Osman, 2021)	۱,۸٪	۱	اثربخشی سیستم مدیریت اطلاعات بلایا
(Cong et al., 2024)	۱,۸٪	۱	مدیریت و برنامه‌ریزی هوشمند

حکمرانی و نهادی

درصد هر شاخص از تقسیم فراوانی آن شاخص بر ۵۶ مقاله محاسبه شده است؛ از این رو، مجموع درصدها برابر با ۱۰۰ درصد نیست، زیرا هر مقاله می‌تواند بیش از یک شاخص را دربرگیرد.

۴-۱- تحلیل توصیفی شاخص‌ها

شاخص‌های بعد زیست‌محیطی: یافته‌های بعد زیست‌محیطی حاکی از آن است که گذار انرژی و مدیریت انتشار، محورهای اصلی دستیابی به پایداری محیطی در کلان‌شهرها هستند. بر اساس نتایج، شاخص‌های تراکم پوشش گیاهی و به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر با بالاترین فراوانی، مهم‌ترین متغیرها در مسیر کربن‌زدایی شناخته شدند. در کنار این موارد، تأکید بر شاخص‌های میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، کیفیت هوا و ظرفیت جذب کربن نشان‌دهنده توجه ویژه پژوهشگران به پیامدهای زیست‌محیطی و ظرفیت‌های جبرانی محیط است. هر چند شاخص‌های ریزاقلیمی نظیر آلودگی سطوح و جزایر حرارتی شهری

فراوانی کمتری داشتند، اما به عنوان متغیرهای تخصصی در تحلیل‌های سنجش‌ازدور، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی تاب‌آوری زیست محیطی ایفا می‌کنند.

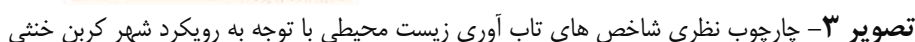
شاخص‌های بعد کالبدی: تحلیل شاخص‌های این بعد نشان می‌دهد که در برنامه‌ریزی شهرهای کربن‌خنثی، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل پایدار و ارتقای کیفیت فرم کالبدی شهر از مهم‌ترین مؤلفه‌ها محسوب می‌شوند. بر اساس نتایج تحلیل فراوانی، دسترسی به حمل‌ونقل عمومی به عنوان کلیدی‌ترین شاخص کالبدی با بیشترین میزان تکرار شناسایی شد. این امر تأیید می‌کند که استقرار الگوهای توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل، نقش پیشران در کاهش وابستگی به خودروی شخصی و تقلیل انتشار کربن دارد. پس از آن، متغیرهای توسعه زیرساخت‌های سبز، اختلاط کاربری و تراکم ساختمانی بیشترین توجه را به خود اختصاص داده‌اند که بیانگر اهمیت توأمان دسترسی‌پذیری شهری و توسعه زیرساخت‌های اکولوژیکی در ارتقای تاب‌آوری کالبدی است.

شاخص‌های بعد اقتصادی: در بررسی شاخص‌های اقتصادی، میزان مصرف انرژی پرتکرارترین شاخص بوده و به عنوان مهم‌ترین متغیر اقتصادی در سنجش برنامه‌های کربن‌زدایی شناخته می‌شود؛ زیرا اصلاح الگوهای مصرف، پایه پایداری مالی و کاهش هزینه‌های محیطی شهر را شکل می‌دهد. در سطوح بعدی، شاخص‌هایی نظیر سرمایه‌گذاری در نوآوری‌های سبز و مشوق‌های اقتصاد چرخشی قرار دارند. این یافته‌ها اثبات می‌کنند که ادبیات پژوهش علاوه بر کاهش تقاضا برای منابع، بر ضرورت تأمین مالی فناوری‌های کم‌کربن و استفاده از رویکردهای چرخشی جهت بازیافت پسماند تأکید ویژه‌ای دارد.

شاخص‌های بعد اجتماعی: تحلیل متون در بعد اجتماعی حاکی از آن است که شاخص میزان مشارکت شهروندان محوری‌ترین متغیر در تحقق شهرهای کربن‌خنثی است. این یافته گویای این واقعیت علمی است که موفقیت در گذار به سمت تراز صفر انتشار، بیش از هر چیز مستلزم هم‌سویی و مداخله فعالانه جوامع محلی است. پس از آن، متغیرهای تراکم جمعیتی و کیفیت سلامت قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فشارهای جمعیتی بر میزان تولید آلاینده‌ها و همچنین اهمیت حفظ رفاه شهروندان در فرآیند سازگاری با تغییرات اقلیمی است.

شاخص‌های بعد نهادی و حکمرانی: ارزیابی شاخص‌های استخراج‌شده در بعد نهادی نشان می‌دهد که حکمرانی یکپارچه و چندسطحی کلیدی‌ترین عامل زیرساختی در مدیریت اقلیم شهری است. این یافته تبیین‌کننده این موضوع است که تحقق سیاست‌های کربن‌خنثی، نیازمند یک ساختار مدیریتی منسجم جهت ایجاد هم‌افزایی میان نهادهای محلی، منطقه‌ای و ملی است. همچنین فراوانی بالای متغیرهای به‌کارگیری فناوری‌های دیجیتال برای مدیریت کربن و پایش و پیش‌بینی انتشار، مبین نقش حیاتی ابزارهای هوشمند و کلان‌داده‌ها در تحقق اهداف حکمرانی زیست‌محیطی معاصر است.

برآیند استخراج شاخص‌ها و تحلیل آن‌ها در ابعاد پنج‌گانه نشان می‌دهد که تاب‌آوری زیست‌محیطی در بستر شهرهای کربن‌خنثی، ساختاری چندوجهی و درهم‌تنیده دارد. پس از بررسی و دسته‌بندی شاخص‌های مستخرج از ادبیات جهانی، گام نهایی در این بخش، تلفیق و یکپارچه‌سازی این یافته‌ها در قالب یک چارچوب نظری منسجم است. این چارچوب، پراکندگی مفاهیم موجود در مقالات را برطرف نموده و آن‌ها را به یک ساختار نظام‌مند پنج‌بعدی تبدیل می‌کند. ماحصل این یکپارچه‌سازی، شکل‌گیری یک چارچوب نظری کلان (شامل ۸۱ شاخص) است که بستر علمی لازم را جهت ورود به مرحله تفسیر روابط و طراحی مدل عملیاتی فراهم می‌آورد. در شکل ۳، این چارچوب نظری به همراه درصد تکرار هر شاخص در متون علمی، تدوین و ارائه شده است. با این وجود، این چارچوب کلان اگرچه بازتاب‌دهنده وضعیت ایده‌آل و تمامی مفاهیم موجود در ادبیات جهانی است، اما تمامی اجزای آن لزوماً در مقیاس خرد یک شهر خاص قابلیت اجرایی و سنجش ندارند؛ از این رو، کاربردی ساختن این مفاهیم نیازمند عبور از مقیاس جهانی و ورود به فاز بومی‌سازی است.



چارچوب نظری استخراج شده (تصویر ۳) بیانگر مجموعه‌ای از شاخص‌ها در سطح عمومی و بین‌المللی است. با این حال، به کارگیری این چارچوب در شرایط واقعی منطقه ۶ کلان‌شهر تهران، مستلزم ارزیابی و انطباق شاخص‌ها با ویژگی‌های بستر مطالعاتی و الزامات داده‌ای پژوهش بود. از این رو، فرآیند بومی‌سازی با رویکردی نظام‌مند و مبتنی بر شواهد انجام شد و به منظور شناسایی ویژگی‌های بومی منطقه و ارزیابی قابلیت عملیاتی شاخص‌ها، اسناد فرادست و به‌ویژه طرح تفصیلی منطقه ۶ شهرداری تهران مورد بررسی قرار گرفت. در این فرآیند، ۸۱ شاخص اولیه به‌صورت نظام‌مند و بر اساس پنج معیار اصلی شامل اجماع نظری، قابلیت سنجش فضایی، دسترسی به داده در مقیاس پارسل، سازگاری با بستر محلی ایران و تناسب با مدل‌سازی‌های محاسباتی ارزیابی و غربالگری شدند. این معیارها با هدف اطمینان از امکان استفاده عملیاتی از شاخص‌ها در مدل‌سازی کمی و فضایی پژوهش، به کار گرفته شدند.

69

حذف شدند. در این راستا، جامعه آماری پژوهش شامل کلیه ۲۸,۰۶۹ قطعه ملکی (پارسل) منطقه ۶ شهرداری تهران بود. برای آماده‌سازی داده‌ها، از الگوریتم تکمیل داده‌های مفقود با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه‌ها^۵ با ۵ همسایگی جهت مدیریت مقادیر گم‌شده و روش نرمال‌سازی حداقل - حداکثر^۶ برای یکدست‌سازی مقیاس متغیرها بین ۰ و ۱ استفاده شد. دوم، برخی متغیرهای کلان، از جمله مالیات بر کربن، سهم انرژی‌های بادی و برخی سیاست‌های اقتصاد چرخشی، به دلیل عدم تناسب مقیاس و ماهیت آن‌ها با سطح فضایی مورد مطالعه، در مدل نهایی لحاظ نشدند. سوم، و از نظر قابلیت عملیاتی، دسترسی به داده‌های خرد و مکان‌مند به‌عنوان یکی از معیارهای اساسی غربالگری مورد توجه قرار گرفت. برای نمونه، شاخص مصرف انرژی ساختمان‌ها، علی‌رغم اهمیت و تکرار قابل توجه در ادبیات موضوع، به دلیل نبود پایگاه داده فضایی یکپارچه و عدم دسترسی به اطلاعات مصرف انرژی در مقیاس پارسل در محدوده مورد مطالعه، از این‌رو، این شاخص کنار گذاشته شد و در صورت امکان، از متغیرهای جایگزین و قابل سنجش فضایی، نظیر شدت روشنایی شبانه، استفاده شد.

در مقابل، شاخص‌هایی در مجموعه نهایی حفظ شدند که ضمن برخورداری از پشتوانه نظری، با ویژگی‌ها و چالش‌های شناسایی‌شده در اسناد رسمی منطقه انطباق داشتند و داده‌های مورد نیاز برای سنجش آن‌ها به‌صورت مکانی از طریق پایگاه‌های اطلاعات جغرافیایی مدیریت شهری تهران سامانه اطلاعات جغرافیایی^۷ و یا داده‌های سنجش‌ازدور قابل دسترس بود. بدین ترتیب، شاخص‌های منتخب قابلیت تبدیل به متغیرهای کمی و مکانی و ورود به فرآیند مدل‌سازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین را پیدا کردند. در مجموع، تلفیق پشتوانه نظری شاخص‌ها، ویژگی‌های بومی محدوده مطالعاتی و قابلیت دسترسی و سنجش داده‌های مکانی، مبنای اصلی فرآیند بومی‌سازی را تشکیل داد. این رویکرد ضمن کاهش نقش قضاوت ذهنی در انتخاب شاخص‌ها، شفافیت معیارهای غربالگری و قابلیت تکرارپذیری فرآیند انتخاب را تقویت می‌کند. در نهایت، ۱۲ شاخص عملیاتی و مکان‌مند انتخاب و وارد مدل‌سازی شدند. فرآیند وزن‌دهی و ترکیب شاخص‌ها با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین تحلیل مؤلفه‌های اصلی با حفظ جهت^۸ انجام پذیرفت. از آنجاکه این روش ماهیتی غیرنظارتی دارد و فاقد متغیر هدف برچسب‌دار است، ارزیابی اعتبار مدل به‌جای تفکیک داده‌های آموزش/آزمون یا ماتریس درهم‌آمیختگی، از طریق آزمون‌های استاندارد ساختاری شامل آزمون کفایت نمونه‌گیری کایزر-مایر-اولکین^۹ مقدار ۰.۵۴۶، آزمون کرویت بارتلت و تحلیل واریانس تجمعی مؤلفه‌ها اعتبارسنجی شد. سپس امتیاز نهایی تاب‌آوری در مقیاس ۰ تا ۱۰۰ محاسبه و با الگوریتم شکست‌های طبیعی جنکس^{۱۰} در پنج طبقه (خیلی کم تا خیلی زیاد) دسته‌بندی شد. حاصل این فرآیند، استخراج ۱۲ شاخص عملیاتی برای منطقه ۶ شهرداری تهران بود که در جدول ۲ به تفکیک ابعاد ارائه شده است.

جدول ۲- شاخص‌های عملیاتی بومی‌سازی‌شده جهت سنجش تاب‌آوری زیست‌محیطی در منطقه ۶ شهرداری تهران

بعد اصلی	شاخص عملیاتی نهایی	منطق انتخاب و بومی‌سازی
کالبدی	تراکم ساختمانی	عامل کلیدی در حیس حرارت و مصرف انرژی شهری؛ قابلیت استخراج دقیق و مکان‌مند از داده‌های طرح تفصیلی و بلوک‌های آماری منطقه ۶
	دسترسی به مترو	شاخص حیاتی در کاهش وابستگی به خودرو و تقلیل انتشار کربن؛ پوشش بالای شبکه ریلی در منطقه ۶ شهرداری تهران و قابلیت محاسبه فواصل در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی
	دسترسی به اتوبوس	متغیر مکمل در سنجش نفوذپذیری حمل‌ونقل پاک؛ وجود خطوط متعدد و ایستگاه‌های سامانه اتوبوس تندرو ^{۱۱} در منطقه ۶ شهرداری تهران و قابلیت تبدیل به لایه‌های شبکه‌ای
	ضریب دید آسمان	شاخص فرم کالبدی مؤثر در شکل‌گیری جزایر حرارتی در بافت‌های متراکم؛ امکان مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از داده‌های ارتفاعی ساختمان‌ها
زیست‌محیطی	تراکم پوشش گیاهی	اصلی‌ترین زیرساخت برای جذب کربن و تعدیل حرارت؛ قابلیت کمی‌سازی دقیق با استفاده از شاخص‌هایی نظیر شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی از طریق سنجش‌ازدور
	دمای سطح زمین	معیار بنیادین در سنجش آسیب‌پذیری اقلیمی و جزایر حرارتی؛ قابلیت استخراج از طریق باندهای حرارتی تصاویر ماهواره‌ای
	میزان آلودگی	تعیین‌کننده میزان بازتابش حرارت از سطوح شهری؛ متغیری ضروری برای سنجش تاب‌آوری حرارتی که از تصاویر ماهواره‌ای قابل استخراج است.
	منابع آب	زیرساخت طبیعی مؤثر در تعدیل خرداقلیم؛ قابلیت نقشه‌برداری از فواصل پارسل‌ها تا منابع آبی یا قنوات موجود در سطح منطقه
	مجموع بارش سالانه	نشانگر ظرفیت پایه‌ای محیط در شست‌وشوی آلاینده‌ها؛ امکان سنجش فضایی از طریق میان‌یابی داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و هواشناسی

	شاخص آلودگی هوا	پیامد مستقیم تراکم و فعالیت‌های شهری؛ در دسترس بودن داده‌های مستمر از ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای مستقر در محدوده
اقتصادی	شدت روشنایی شبانه	متغیر جایگزین معتبر برای سنجش شدت فعالیت‌های اقتصادی و مصرف انرژی؛ قابلیت استخراج دقیق از تصاویر ماهواره‌ای دید در شب
اجتماعی	تراکم جمعیتی	نیروی محرکه اصلی در تولید کربن و فشار بر محیط‌زیست؛ در دسترس بودن داده‌های معتبر فضایی در مقیاس بلوک‌های مرکز آمار ایران

۵- بحث

هدف از استخراج نظام‌مند شاخص‌ها و سازمان‌دهی آن‌ها در قالب یک چارچوب مکان‌مند، تبیین روابط متقابل میان عوامل مؤثر بر تاب‌آوری زیست‌محیطی در مسیر تحقق شهر کربن‌خنثی است. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد که این روابط ماهیتی غیرخطی داشته و تاب‌آوری زیست‌محیطی حاصل برهم‌کنش هم‌زمان شاخص‌های کالبدی، عملکردی و اکولوژیکی است. بر این اساس، مدل مفهومی-عملیاتی پژوهش (تصویر ۴) به‌منظور نمایش سازوکار اثرگذاری شاخص‌ها و تبیین روابط میان آن‌ها تدوین شد. این مدل از غربالگری ۸۱ شاخص اولیه بر اساس پنج معیار اجماع نظری، قابلیت سنجش فضایی، دسترسی به داده در منطقه ۶ شهرداری تهران، سازگاری با بستر محلی و تناسب با مدل‌سازی محاسباتی حاصل شده و در نهایت به ۱۲ شاخص عملیاتی منجر شد. بنابراین، انتخاب شاخص‌ها علاوه بر اهمیت نظری، بر قابلیت اندازه‌گیری و کاربرد آن‌ها در تحلیل‌های فضایی و محاسباتی نیز استوار است. چارچوب حاضر به دلیل تلفیق ساختار نظری با قابلیت اجرای عملیاتی، «مفهومی-عملیاتی» نامیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ۱۲ شاخص منتخب به لایه‌های اطلاعاتی فضایی، رستری یا پارسل‌مقیاس در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تبدیل شده و امکان اندازه‌گیری و تحلیل فضایی تاب‌آوری زیست‌محیطی در منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌کنند. این مدل بر تعامل دو گروه اصلی از شاخص‌ها استوار است:

گروه نخست: شاخص‌های پیش‌ران و تنش شهری

این گروه، که در سمت چپ مدل قرار گرفته است، شامل شاخص‌هایی است که شدت فعالیت‌های انسانی، الگوی توسعه شهری و میزان فشار واردشده بر محیط‌زیست را نشان می‌دهند. این شاخص‌ها شامل تراکم ساختمانی، تراکم جمعیتی، دسترسی به ایستگاه‌های مترو و اتوبوس، شدت روشنایی شبانه و شاخص آلودگی هوا هستند. دسترسی به حمل‌ونقل عمومی بیانگر کاهش وابستگی به خودروی شخصی و تغییر الگوی جابه‌جایی شهروندان است؛ فرآیندی که به کاهش انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. در مقابل، شدت روشنایی شبانه به‌عنوان شاخصی جایگزین برای برآورد شدت فعالیت‌های انسانی و میزان مصرف انرژی شهری در نظر گرفته می‌شود.

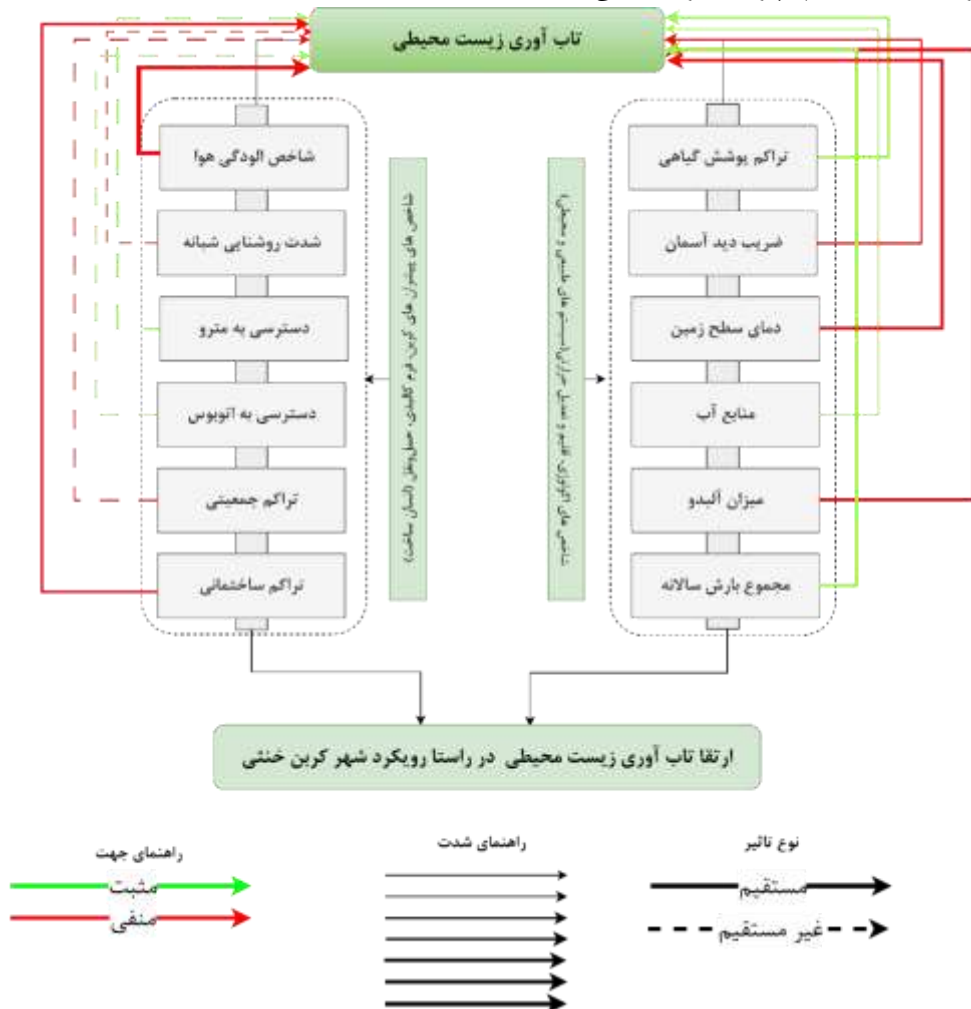
گروه دوم: شاخص‌های اکولوژیکی و تعدیل‌کننده‌های محیطی (سیستم‌های طبیعی)

این گروه، که در سمت راست مدل قرار دارد، بیانگر ظرفیت‌های طبیعی و ویژگی‌های محیطی شهر است و شامل تراکم پوشش گیاهی، ضریب دید آسمان، دمای سطح زمین، منابع آب، میزان آلودگی و مجموع بارش سالانه می‌شود. این شاخص‌ها نقش مهمی در تنظیم شرایط اقلیمی، بهبود کیفیت محیط و افزایش ظرفیت سازگاری اکوسیستم‌های شهری ایفا می‌کنند. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد که اثرگذاری شاخص‌های مدل صرفاً به جهت مثبت یا منفی آن‌ها محدود نمی‌شود، بلکه از نظر سازوکار نیز در دو سطح «تأثیرات مستقیم» و «تأثیرات غیرمستقیم» قابل تبیین است. تعیین جهت اثرگذاری شاخص‌ها، نوع رابطه و شدت نسبی آن‌ها در تصویر ۴، مستقیماً بر اساس خروجی مدل‌سازی‌های محاسباتی و پردازش داده‌ها در الگوریتم‌های یادگیری ماشین که از الگوریتم تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام شده است؛ از این‌رو، روابط ترسیم‌شده در مدل صرفاً روابط نظری یا فرضی نیستند، بلکه بازتاب رفتار تجربی متغیره در نمونه مطالعاتی است در روابط مستقیم، یک شاخص بدون واسطه بر وضعیت زیست‌محیطی و در نتیجه بر ظرفیت تاب‌آوری اثر می‌گذارد. بر اساس خروجی مدل محاسباتی، تراکم پوشش گیاهی، منابع آب، مجموع بارش و آلودگی دارای اثر مستقیم مثبت بر تاب‌آوری هستند. پوشش گیاهی از طریق ترسیب کربن، سایه‌اندازی و تبخیر و تعرق، منابع آب از طریق تعدیل شرایط حرارتی و افزایش ظرفیت اکولوژیکی، بارش از طریق تأمین رطوبت و منابع آبی و آلودگی از طریق بازتاب بخشی از تابش خورشیدی، در بهبود شرایط محیطی و کاهش تنش‌های اقلیمی نقش دارند. در مقابل، افزایش شاخص آلودگی هوا و دمای سطح زمین به‌عنوان عوامل تشدیدکننده تنش‌های محیطی، اثر مستقیم منفی بر تاب‌آوری زیست‌محیطی دارند.



در مقابل، بخشی از روابط موجود در مدل ماهیتی غیرمستقیم یا واسطه‌ای دارند؛ بدین معنا که برخی متغیرها خود به‌طور مستقیم عامل تولید یا جذب کربن نیستند، بلکه از طریق تغییر رفتار سیستم شهری یا اثرگذاری بر سایر شاخص‌ها، بر تاب‌آوری نهایی تأثیر می‌گذارند. برای نمونه، دسترسی به ایستگاه‌های مترو و اتوبوس اگرچه یک شاخص اکولوژیکی محسوب نمی‌شود، اما با ترغیب شهروندان به استفاده از حمل‌ونقل عمومی و کاهش وابستگی به خودروی شخصی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های ناشی از ترافیک را کاهش داده و از این مسیر، تاب‌آوری زیست‌محیطی را تقویت می‌کند.

به‌همین ترتیب، تراکم ساختمانی و تراکم جمعیتی نیز دارای اثرات غیرمستقیم و زنجیره‌ای هستند. افزایش این شاخص‌ها تقاضا برای مصرف انرژی را افزایش داده که بخشی از آن در شدت روشنایی شبانه بازتاب می‌یابد. علاوه بر این، توسعه متراکم شهری معمولاً با کاهش ضریب دید آسمان همراه است که موجب محدود شدن تهویه طبیعی، کاهش اتلاف حرارت در ساعات شب و در نهایت تشدید پدیده جزیره حرارتی شهری می‌شود. این زنجیره از تغییرات نشان می‌دهد که فشارهای کالبدی می‌توانند از طریق مجموعه‌ای از فرآیندهای واسطه‌ای، ظرفیت تاب‌آوری زیست‌محیطی شهر را کاهش دهند. در مدل عملیاتی پژوهش، این دو نوع رابطه به‌صورت بصری نیز نمایش داده شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که پیکان‌های سبزرنگ و قرمز رنگ به ترتیب بیانگر اثرات مثبت و منفی شاخص‌ها بر تاب‌آوری زیست‌محیطی هستند، درحالی‌که خطوط ممتد و خط‌چین به ترتیب روابط مستقیم و روابط غیرمستقیم یا واسطه‌ای را نشان می‌دهند. این نحوه نمایش، علاوه بر تبیین جهت اثرگذاری هر شاخص، سازوکار انتقال اثرات میان اجزای مختلف سیستم شهری را نیز آشکار می‌سازد.



تصویر ۴- مدل مفهومی-عملیاتی پژوهش

در مجموع، چارچوب تدوین‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که تاب‌آوری زیست‌محیطی نتیجه اثرگذاری مستقل هر شاخص نیست، بلکه حاصل تعامل پویا، چندسطحی و هم‌افزای میان عوامل کالبدی، عملکردی و اکولوژیکی است. این یافته بر ضرورت



اتخاذ رویکردی یکپارچه در برنامه‌ریزی شهری تأکید دارد. رویکردی که به‌طور هم‌زمان بر کاهش فشارهای ناشی از توسعه شهری، ارتقای کیفیت محیط‌زیست، تقویت ظرفیت‌های اکولوژیکی و کاهش انتشار کربن متمرکز باشد. از این منظر، گذار به شهر کربن‌خنثی مستلزم توجه هم‌زمان به روابط مستقیم و غیرمستقیم میان مؤلفه‌های سیستم شهری است، زیرا بخش قابل توجهی از پیامدهای زیست‌محیطی از طریق همین تعاملات واسطه‌ای شکل می‌گیرند.

مقایسه خروجی‌های این مدل مفهومی-عملیاتی با مطالعات اخیر جهانی نشان‌دهنده هم‌سویی‌ها و نوآوری‌های متمایزی در ادبیات برنامه‌ریزی شهری است. یافته‌های این تحقیق مبنی بر ارتباط متقابل و درهم‌تنیدگی تاب‌آوری زیست‌محیطی و کربن‌خنثی‌سازی، با نتایج مرورهای نظام‌مند اخیر (Carreira & Ferreira, 2025) و مطالعات تجربی (Shi et al., 2022; Wang et al., 2024) که نشان می‌دهند کاهش انتشار کربن و ارتقای تاب‌آوری شهری یکدیگر را تقویت می‌کنند، کاملاً هم‌سو است. با این وجود، درحالی‌که مرور ادبیات جهانی نشان می‌دهد بسیاری از شهرها قادر نیستند تنها با سیاست‌های کلان در مرزهای اداری خود به اهداف کربن‌خنثی دست یابند (Seto et al., 2021)، پژوهش حاضر اثبات کرد که نقطه تلاقی واقعی و نیازمند مداخله برای این دو رویکرد، در مقیاس خرد شهری (سطح پارسل) رخ می‌دهد. علاوه بر این، ساختار مدل پژوهش حاضر مبنی بر تقابل «فشارهای انسان‌ساخت» و «ظرفیت‌های طبیعی»، با یافته‌های لی و همکاران (Li et al., 2023) تطابق کامل دارد؛ آن‌ها نیز ثابت کردند که ذخیره کربن (توسط پوشش گیاهی) تأثیر مثبت و انتشار کربن تأثیر منفی و بازدارنده‌ای بر تاب‌آوری اکولوژیک شهری دارد. در نهایت، از منظر روش‌شناختی و کاربردی، مطالعات اخیر (Li et al., 2024) به این شکاف در ادبیات جهانی اشاره کرده‌اند که فناوری‌های داده‌محور نظیر سیستم اطلاعات جغرافیایی و هوش مصنوعی هنوز به‌طور کامل برای پیش‌مسیر کربن‌خنثی به کار گرفته نشده‌اند. مدل بومی‌سازی‌شده در این پژوهش، با عبور از متغیرهای کیفی (نظیر متغیرهای نهادی) و استخراج ۱۲ شاخص کاملاً مکان‌مند و فضایی، دقیقاً به این شکاف مطالعاتی پاسخ داده و معماری داده‌ای پایه‌ای را برای ورود به مدل‌سازی‌های پیشرفته (نظیر یادگیری ماشین) فراهم ساخته است.

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تدوین مدل مفهومی-عملیاتی تاب‌آوری زیست‌محیطی با رویکرد شهر کربن‌خنثی و با تأکید بر قابلیت بومی‌سازی و سنجش‌پذیری فضایی شاخص‌ها انجام شد. در راستای شناسایی و سازمان‌دهی شاخص‌های بنیادین، یافته‌های پژوهش نشان داد که ابعاد تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن‌خنثی را می‌توان در قالب ۸۱ شاخص اولیه و در پنج بعد کلیدی شامل کالبدی، زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی-حکمرانی ساختاربندی نمود. این طبقه‌بندی، چارچوب مفهومی جامعی برای تبیین هم‌پوشانی‌های معنایی و عملکردی میان دو رویکرد فراهم ساخت و نشان داد که کاهش انتشار کربن و ارتقای تاب‌آوری سیستم‌های شهری، اهدافی درهم‌تنیده و هم‌افزا در برنامه‌ریزی شهری نوین هستند. با این حال، نتایج فرآیند بومی‌سازی نشان داد که تمامی شاخص‌های شناسایی‌شده در ادبیات بین‌المللی، به دلیل تفاوت در مقیاس تحلیل، ویژگی‌های فضایی و میزان دسترسی به داده، قابلیت استفاده مستقیم در مقیاس محلی را ندارند. از این‌رو، با اعمال فیلترهای پنج‌مرحله‌ای مبتنی بر قابلیت سنجش فضایی، سازگاری با ساختار کالبدی و دسترس‌پذیری داده‌های خرد در سطح ۲۸۰۰۶۹ پارسل منطقه ۶ شهرداری تهران، ۱۲ شاخص کلیدی و عملیاتی بومی‌سازی و نهایی شدند. این فرآیند نشان داد که گذار از مفاهیم نسبتاً انتزاعی تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن‌خنثی به یک مدل قابل استفاده در مقیاس محلی، مستلزم انتخاب شاخص‌هایی است که علاوه بر پشتوانه نظری، از قابلیت اندازه‌گیری، مکان‌مندی و تحلیل داده‌محور برخوردار باشند.

مدل مفهومی-عملیاتی حاصل از این فرآیند نشان داد که تاب‌آوری زیست‌محیطی در محدوده مورد مطالعه، ویژگی‌ای ایستا و متشکل از مجموعه‌ای منفرد از شاخص‌ها نیست، بلکه حاصل تعامل فضایی، پویا و تا حدی غیرخطی میان دو گروه اصلی از عوامل است. گروه نخست شامل نیروهای پیشران و فشارزای انسان‌ساخت، نظیر تراکم کالبدی، بارگذاری جمعیتی، ویژگی‌های دسترسی و شبکه معابر و آلودگی هواست که می‌توانند با افزایش مصرف انرژی، انتشار کربن و تشدید تنش‌های حرارتی همراه باشند. در مقابل، گروه دوم شامل ظرفیت‌های اکولوژیک و عوامل تعدیل‌کننده محیطی، از جمله نفوذپذیری سطوح، ضریب دید آسمان، منابع آبی و آلودگی هواست که از طریق تعدیل شرایط خرداقلیمی، ظرفیت محیط را برای مواجهه با تنش‌ها و شوک‌های زیست‌محیطی افزایش می‌دهند. بر این اساس، تاب‌آوری زیست‌محیطی را می‌توان پیامد برهم‌کنش میان فشارهای ناشی از توسعه شهری و ظرفیت محیط برای تعدیل و پاسخ‌گویی به این فشارها دانست.

از منظر برنامه‌ریزی شهری، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش حاضر، تبدیل مفاهیم نسبتاً انتزاعی نظیر تاب‌آوری زیست‌محیطی و کربن‌خنثی‌سازی به مجموعه‌ای از متغیرهای کمی و قابل سنجش فضایی است. شاخص‌های منتخب قابلیت تبدیل به لایه‌های اطلاعاتی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و استفاده در تحلیل‌های فضایی را دارند و می‌توانند مبنایی برای توسعه ابزارهای پایش محیطی و سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری شهری فراهم کنند. چنین رویکردی امکان ارزیابی پیامدهای فضایی سیاست‌های توسعه کالبدی و بررسی آثار تغییرات در تراکم، ساخت‌وساز و شبکه معابر بر شرایط زیست‌محیطی را پیش از اجرای تصمیمات توسعه‌ای فراهم می‌سازد.

در ارتباط با منطقه ۶ شهرداری تهران، یافته‌های حاصل از فرآیند بومی‌سازی بر ضرورت توجه هم‌زمان به ظرفیت کالبدی و ظرفیت اکولوژیک در سیاست‌گذاری‌های توسعه شهری تأکید دارد. با توجه به تمرکز بالای فعالیت‌ها و بارگذاری‌های کالبدی در این منطقه، سیاست‌های توسعه‌ای باید فراتر از افزایش صرف تراکم، الزامات زیست‌محیطی را نیز در تصمیم‌گیری فضایی لحاظ کنند. در این راستا، توجه به تناسب ارتفاع و عرض معابر، حفظ شرایط مناسب ضریب دید آسمان، استفاده از مصالح با بازتابش مناسب، افزایش نفوذپذیری سطوح و تقویت پیوستگی شبکه‌های سبز می‌تواند در ارتقای ظرفیت سازگاری و تاب‌آوری زیست‌محیطی مؤثر باشد. بنابراین، نتایج پژوهش بر ضرورت حرکت از توسعه کالبدی صرف به سمت توسعه متوازن میان ظرفیت ساخت‌وساز و ظرفیت اکولوژیک محیط شهری تأکید دارد. با وجود این، تفسیر نتایج باید با توجه به محدودیت‌های داده‌ای پژوهش صورت گیرد. مهم‌ترین محدودیت، فقدان پایگاه‌های داده مکانی یکپارچه و به‌روز، به‌ویژه در مقیاس پارسل، در نظام مدیریت شهری ایران بود. همچنین، عدم دسترسی به داده‌های واقعی مصرف انرژی ساختمان‌ها و محدودیت برخی شاخص‌های نهادی و سیاستی موجب شد تعدادی از شاخص‌های مطرح در ادبیات بین‌المللی امکان ورود مستقیم به مدل عملیاتی را نداشته باشند. این موضوع نشان می‌دهد که توسعه مدل‌های دقیق‌تر تاب‌آوری زیست‌محیطی و شهر کربن‌خنثی در آینده به توسعه زیرساخت‌های داده‌ای شهری وابسته است.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با بهره‌گیری از شاخص‌های مکان‌مند استخراج‌شده در این مطالعه، از روش‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای مدل‌سازی روابط پیچیده میان ویژگی‌های کالبدی، محیطی و الگوهای مصرف انرژی استفاده کنند. ترکیب داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی، سنجش‌ازدور، داده‌های اقلیمی و در صورت امکان داده‌های واقعی مصرف انرژی می‌تواند زمینه توسعه مدل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی رفتار محیطی محلات را فراهم سازد. همچنین، ارزیابی عملکرد مدل در سناریوهای مختلف توسعه کالبدی و تغییرات اقلیمی می‌تواند امکان شناسایی نقاط آسیب‌پذیر، برآورد ظرفیت تاب‌آوری و آزمون سیاست‌های مداخله شهری را فراهم کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بومی‌سازی شاخص‌های تاب‌آوری زیست‌محیطی زمانی به ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی شهری تبدیل می‌شود که هم‌زمان از پشتوانه نظری، انطباق با ویژگی‌های محلی و قابلیت سنجش و تحلیل داده‌محور برخوردار باشد.

پی‌نوشت

- 1- Carbon-neutral city
- 2- Environmental resilience
- 3- PRISMA
- 4- TITLE-ABS-KEY
- 5- Min-Max
- 6- KNN Imputer
- 7- Geographic Information System
- 8- Direction-Preserving PCA
- 9- KMO
- 10- Jenks Natural Breaks
- 11- BRT
- 12- Normalized Difference Vegetation Index - NDVI

حامیان مالی: این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده است که با حمایت مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران انجام شده است.

مشارکت نویسندگان: در این بخش نویسندگان تایید می کنند که همگی در مقاله سهیم بوده اند.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می دارند که در انجام این پژوهش هیچ گونه تعارض منافی برای ایشان وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربری هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می کنند که از هوش مصنوعی ChatGPT برای ویرایش متن استفاده شده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است.

قدردانی: ما از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاس گزاریم.

منابع

- زاهدی کلاکی، ابراهیم، متولی، صدرالدین، محمودزاده، حسن، و جانبازقبادی، غلامرضا. (۱۴۰۱). ارائه الگوی پیشنهادی مناسب جهت ارتقای پیوستگی اکولوژیک و تاب آوری زیست محیطی (مطالعه موردی: شهر بهشهر). *جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۱۱(۴۲)، ۴۰-۵۷. [.SID https://sid.ir/paper/1034853/fa](https://sid.ir/paper/1034853/fa)
- هندی، هوشنگ، اقبالی، ناصر، سرور، رحیم، و پیشگاهی فرد، زهرا. (۱۳۹۹). سنجش تاب آوری زیست محیطی در سطح محلات منطقه چهارده شهر تهران. *آمایش محیط*، ۱۳(۱)، ۱۹-۱. [.SID. https://sid.ir/paper/130742/fa](https://sid.ir/paper/130742/fa)
- یداله نیا، هاجر، رجایی، سیدعباس، پوراحمد، احمد، و خراسانی، محمدامین. (۱۴۰۰). اثرات گسترش فیزیکی بر تاب آوری زیست محیطی شهر بابل. *جغرافیا*، ۱۹(۶۹)، ۱۵۰-۱۳۱. [.SID. https://sid.ir/paper/963202/fa](https://sid.ir/paper/963202/fa)
- Aghazadeh, F., Samadi, M., Cheval, S., & Moshiri, S. (2025). Impacts of land use, vegetation, and air pollution on surface urban heat island spatiotemporal dynamics: Tehran as a case study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 14607-14633. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06561-8>
- Al-Humaiqani, M. M., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). The built environment resilience qualities to climate change impact: Concepts, frameworks, and directions for future research. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103797. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103797>
- Amirzadeh, M., Sobhaninia, S., & Sharifi, A. (2022). Urban resilience: A vague or an evolutionary concept? *Sustainable Cities and Society*, 81, 103853. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103853>
- Antoszewski, P., Krzyżaniak, M., & Świerk, D. (2022). The Future of Climate-Resilient and Climate-Neutral City in the Temperate Climate Zone. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 4365. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074365>
- Aparisi-Cerdá, I., Ribó-Pérez, D., Gómez-Navarro, T., García-Melón, M., & Peris-Blanes, J. (2024). Prioritising Positive Energy Districts to achieve carbon neutral cities: Delphi-DANP approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 203, 114764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114764>
- Asmawi, M. Z., Yussof, S. H. S. Z., Ibrahim, I., & M Rani, W. N. M. W. (2024). The development of an environmental resilience index for Selangor, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1306(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1306/1/012029>
- Baho, D. L., Allen, C. R., Garmestani, A., Fried-Petersen, H., Renes, S. E., Gunderson, L., & Angeler, D. G. (2017). A quantitative framework for assessing ecological resilience. *Ecology and Society*, 22(3), art17. <https://doi.org/10.5751/ES-09427-220317>
- Bang, A., Kuo, C., Wen, C., Cherh, K., Ho, M., Cheng, N., Chen, Y., & Chen, C. (2021). Quantifying Coral Reef Resilience to Climate Change and Human Development: An Evaluation of Multiple Empirical Frameworks. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.610306>
- Beller, E. E., Spotswood, E. N., Robinson, A. H., Anderson, M. G., Higgs, E. S., Hobbs, R. J., Suding, K. N., Zavaleta, E. S., Grenier, J. L. & Grossinger, R.M. (2019). Building Ecological Resilience in Highly Modified Landscapes. *BioScience*, 69(1), 80-92. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy117>
- Bi, S., Xiao, Q., Yan, Z., Liang, B., & Appolloni, A. (2026). Impact of climate resilience policy on urban carbon intensity: Evidence from econometrics and machine learning. *Cities*, 173, 107005. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2026.107005>



- Büyükoçkan, G., Ilıcak, Ö., & Feyzioğlu, O. (2022). A review of urban resilience literature. *Sustainable Cities and Society*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103579>
- Carreira, H., & Ferreira, J. J. M. (2025). Environmental resilience and carbon neutrality: a systematic and integrative review. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. <https://doi.org/10.1108/meq-06-2025-0404>
- Chen, L., Msigwa, G., Yang, M., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental chemistry letters*, 20(4), 2277–2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>
- Chen, Q., Cheng, Q., Chen, Y., Li, K., Wang, D., & Cao, S. (2021). The Influence of Sky View Factor on Daytime and Nighttime Urban Land Surface Temperature in Different Spatial-Temporal Scales: A Case Study of Beijing. *Remote Sensing*, 13(20), 4117. <https://doi.org/10.3390/rs13204117>
- Choudhury, M. A. M., Marcheggiani, E., Modica, G., Praticò, S., & Somers, B. (2024). Toward carbon neutral cities: A comparative analysis between Sentinel 2 and WorldView 3 satellite image processing for tree carbon stock mapping in Brussels. *Urban Forestry & Urban Greening*, 101, 128495. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128495>
- Christidis, P., Ulpiani, G., Stepniak, M., & Vettters, N. (2024). Research and innovation paving the way for climate neutrality in urban transport: Analysis of 362 cities on their journey to zero emissions. *Transport Policy*, 148, 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.01.008>
- Chuenwong, K., Wangjiraniran, W., Pongthanaisawan, J., Sumitsawan, S., & Suppamit, T. (2022). Municipal solid waste management for reaching net-zero emissions in ASEAN tourism twin cities: A case study of Nan and Luang Prabang. *Heliyon*, 8(8), e10295. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10295>
- Conejos, S., Langston, C. A., & Smith, J. (2012). Designing for future building: adaptive reuse as a strategy for carbon neutral cities. *The international journal of climate change: Impacts and responses*, 3(2), 33-52.
- Cong, C., Page, J., Kwak, Y., Deal, B., & Kalantari, Z. (2024). AI Analytics for Carbon-Neutral City Planning: A Systematic Review of Applications. *Urban Science*, 8(3), 104. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030104>
- Dakos, V., & Kéfi, S. (2022). Ecological resilience: what to measure and how. *Environmental Research Letters*, 17. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5767>
- Daud, W. M. W., & Ibrahim, R. (2025). *The Need for Enhancing Green Infrastructure Strategies Towards Carbon-Neutral City* (pp. 161–173). https://doi.org/10.1007/978-3-031-76894-1_13
- Dong, H., & Zhang, L. (2023). Transition towards carbon neutrality: Forecasting Hong Kong's buildings carbon footprint by 2050 using a machine learning approach. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.014>
- Ekaterina, G., Li, J. (2024). Analysis of decarbonization path in New York state and forecasting carbon emissions using different machine learning algorithms. *Carb Neutrality* 3, 8. <https://doi.org/10.1007/s43979-024-00083-x>
- Flensburg, L., Maureaud, A., Bravo, D., & Lindegren, M. (2023). An indicator-based approach for assessing marine ecosystem resilience. *ICES Journal of Marine Science*. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad077>
- Folke, C. (2016). Resilience (Republished). <https://doi.org/10.5751/es-09088-210444>
- Ghaedrahmati, S., & Alian, M. (2018). Health risk assessment of relationship between air pollutants' density and population density in Tehran, Iran. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25, 1853 - 1869. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1475217>
- Ghalambordezfooly, R., & Hosseini, F. (2023). Factors Affecting Illegal Land-use Changes in Residential Areas: (Case Study: District 6 of Tehran). *Journal of Regional and City Planning*. <https://doi.org/10.5614/jpwk.2023.34.2.5>
- Ghalehtemouri, K., Rahimzadeh, A., Parizadi, T., & Sasanpour, F. (2021). Qualitative and Quantitative Analysis of Housing Indices at the Neighborhood Level: Case Study of Region 6 of Tehran Municipality. *Real Estate Management and Valuation*, 29, 1 - 15. <https://doi.org/10.2478/remav-2021-0009>
- Ghodrat, A. F., & Sough, S. R. (2026). Assessing air quality in Tehran: Explainable artificial intelligence for megacities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198. <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15490-z>

- Han, D., Xia, J., & Wu, D. (2025). Ecological Resilience and Urban Health: A Global Analysis of Research Hotspots and Trends in Nature-Based Solutions. *Forests*, 16(8), 1305. <https://doi.org/10.3390/f16081305>
- He, X., Lin, M., Chen, T.-L., Liu, B., Tseng, P.-C., Cao, W., & Chiang, P. (2020). Implementation Plan for Low-carbon Resilient City towards Sustainable Development Goals: Challenges and Perspectives. *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 444-464. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.11.0568>
- Huovila, A., Siikavirta, H., Antuña Rozado, C., Rökman, J., Tuominen, P., Paiho, S., Hedman, A. & Ylén, P. (2022). Carbon-neutral cities: Critical review of theory and practice. *Journal of Cleaner Production*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130912>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.). (2023). *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Kenis, A., & Lievens, M. (2017). Imagining the carbon neutral city: The (post)politics of time and space. *Environment and Planning A*, 49, 1762 - 1778. <https://doi.org/10.1177/0308518x16680617>
- Kim, Y. M., & Lee, J. H. (2013). A study on the planning indicator for carbon neutral green city. *KIEAE Journal*, 13(2), 131-139.
- Komninos, N., & Panori, A. (2025). Smart carbon-neutral development: Embracing complexity with multi-level governance and convolution. *World Development*, 192, 107026. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2025.107026>
- Lai, Y. (2022). Urban Intelligence for Carbon Neutral Cities: Creating Synergy among Data, Analytics, and Climate Actions. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14127286>
- Laine, J., Heinonen, J., & Junnila, S. (2020). Pathways to Carbon-Neutral Cities Prior to a National Policy. *Sustainability*, 12(6), 2445. <https://doi.org/10.3390/su12062445>
- Lee, C.-C., Yan, J., & Li, T. (2024). Ecological resilience of city clusters in the middle reaches of Yangtze River. *Journal of Cleaner Production*, 443, 141082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141082>
- Lee, J., & Jung, S. (2023). Towards Carbon-Neutral Cities: Urban Classification Based on Physical Environment and Carbon Emission Characteristics. *Land*, 12(5), 968. <https://doi.org/10.3390/land12050968>
- Lee, J., Lee, G., & Hong, J. (2010). Development of Carbon Neutral Indicator Using Capacity of Carbon Storage on Urban Forest. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 13, 94-102.
- Li, B., Li, X., & Liu, C. (2023). Dynamic Evolution of the Ecological Resilience and Response under the Context of Carbon Neutrality. *Ecosystem Health and Sustainability*, 9. <https://doi.org/10.34133/ehs.0130>
- Li, J., Shirowzhan, S., Pignatta, G., & Sepasgozar, S. (2024). Data-Driven Net-Zero Carbon Monitoring: Applications of Geographic Information Systems, Building Information Modelling, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Cities. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16156285>
- Li, W., Bao, L., Li, Y., Si, H., & Li, Y. (2022). Assessing the transition to low-carbon urban transport: A global comparison. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106179>
- Lima, N., Nygård, M., & Heris, M. (2023). Towards Carbon-Neutral Cities: The Crucial Role of Social Participation. *2023 International Conference on Future Energy Solutions (FES)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/fes57669.2023.10182857>
- Lombardi, P., & Sonetti, G. (2017). Transition Towards a Post Carbon City - Does Resilience Matter?. , 55-68. <https://doi.org/10.1002/9781119190691.ch4>
- Luqman, M., Rayner, P. J., & Gurney, K. R. (2023). On the impact of urbanisation on CO2 emissions. *Npj Urban Sustainability*, 3(1), 6. <https://doi.org/10.1038/s42949-023-00084-2>
- Madad Soltani, A. A., Ahani, S., & Dehghani, Z. (2026). Structural Typology of Regional Resilience: A Meta-Synthesis Review. *Journal of Urban Planning and Development*, 152(1). <https://doi.org/10.1061/JUPDDM.UPENG-5950>
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>



- Miao, Y., Yang, L., Chen, F., & Chen, J. (2024). Mapping the Landscape of Carbon-Neutral City Research: Dynamic Evolution and Emerging Frontiers. *Sustainability*, 16(16), 6733. <https://doi.org/10.3390/su16166733>
- Mirzakhani, N., & Jaliliasadabad, S. (2026). The application of machine learning in the development of carbon-neutral cities: a systematic literature review. *City and Environment Interactions*, 31, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2026.100399>
- Mirzakhani, N., Ali Madad Soltani, A., & Hedayatifard, M. (2025). Application of machine learning in understanding urban neighborhood gentrification: A meta-synthesis review. *Cities*, 162, 105973. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105973>
- Moghim, S., & Garna, R. K. (2019). Countries' classification by environmental resilience. *Journal of Environmental Management*, 230, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.090>
- Newman, P. (2010). Resilient Infrastructure Cities. , 77-106. https://doi.org/10.1142/9789814304504_0004.
- Nieuwenhuijsen, M. J. (2020). Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities; A review of the current evidence. *Environment International*, 140, 105661. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105661>
- Okvat, H. A., & Zautra, A. J. (2011). Community Gardening: A Parsimonious Path to Individual, Community, and Environmental Resilience. *American Journal of Community Psychology*, 47(3–4), 374–387. <https://doi.org/10.1007/s10464-010-9404-z>
- Omar, O. (2025). Digital Twins for Climate-Responsive Urban Development: Integrating Zero-Energy Buildings into Smart City Strategies. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17156670>.
- Omar, W. F. (2018). Zero carbon city—Masdar city critical analysis. *BAU Journal - Health and Wellbeing*, 1(3), Article 1. <https://doi.org/10.54729/2789-8288.1053>
- O'Regan, A. C., & Nyhan, M. M. (2023). Towards sustainable and net-zero cities: A review of environmental modelling and monitoring tools for optimizing emissions reduction strategies for improved air quality in urban areas. *Environmental research*, 231(Pt 3), 116242. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116242>
- Oshilalu, A. Z., & Iboh, S. (2025). Integration of renewable energy technologies into transportation infrastructure to minimize carbon footprint and enhance long-term environmental resilience. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 24(3), 236–251. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2025.24.3.0281>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Panori, A., Komninos, N., Latinopoulos, D., Papadaki, I., Gkitsa, E., & Tarani, P. (2025). Blending Nature with Technology: Integrating NBSs with RESs to Foster Carbon-Neutral Cities. *Designs*, 9(3), 60. <https://doi.org/10.3390/designs9030060>
- Pour, M. A., Zare, N., & Maknoon, R. (2024). Urban flood resilience assessment & stormwater management (case study: District 6 of Tehran). *International Journal of Disaster Risk Reduction*. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104280>
- Samaei, S. R. (2024). Using artificial intelligence to increase urban resilience: a case study of Tehran. In *13th international conference on advanced research in science, engineering and technology, Brussels, Belgium*.
- Seto, K., Churkina, G., Hsu, A., Keller, M., Newman, P. W. G., Qin, B., & Ramaswami, A. (2021). From Low- to Net-Zero Carbon Cities: The Next Global Agenda. *Annual Review of Environment and Resources*. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050120-113117>
- Shang, W.-L., & Lv, Z. (2023). Low carbon technology for carbon neutrality in sustainable cities: A survey. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104489. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104489>
- Sharifi, A. (2023). Resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS): A review. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104910. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104910>
- Shen, Y., Shi, X., Zhao, Z., Sun, Y., & Shan, Y. (2022). Measuring the low-carbon energy transition in Chinese cities. *iScience*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105803>.
- Shi, C., Guo, N., Gao, X., & Wu, F. (2022). How carbon emission reduction is going to affect urban resilience. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133737>

- Shi, C., Zhu, X., Wu, H., & Li, Z. (2022). Assessment of Urban Ecological Resilience and Its Influencing Factors: A Case Study of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration of China. *Land*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/land11060921>
- Spiegelhalter, T., & Werner, L. C. (2022). Methods for In-Silico Environmental Resilience, 2018 to 2100. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1), 012139. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012139>
- Tan, S., Yang, J., Yan, J., Lee, C., Hashim, H., & Chen, B. (2017). A holistic low carbon city indicator framework for sustainable development. *Applied Energy*, 185, 1919-1930. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.041>.
- Tariq, H., Pathirage, C., Fernando, T., Sulaiman, N., Nazir, U., Kamalia Abdul Latib, S. K., & Masram, H. (2022). Measuring Environmental Resilience Using Q-Methods: A Malaysian Perspective. *Sustainability*, 14(22), 14749. <https://doi.org/10.3390/su142214749>
- Toriro, P., & Chirisa, I. (2021). Environmental Resilience. *Advances in 21st Century Human Settlements*.
- Tozer, L., & Klenk, N. (2019). Urban configurations of carbon neutrality: Insights from the Carbon Neutral Cities Alliance. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 37(3), 539–557. <https://doi.org/10.1177/2399654418784949>
- Ulpiani, G., Pisoni, E., Bastos, J., Monforti-Ferrario, F., & Vetters, N. (2024). Are cities ready to synergize climate neutrality and air quality efforts? *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106059>.
- UNFCCC, 2022. COP27 in Sharm el-Sheikh to Focus on Delivering on the Promises of Paris. Retrieved from: <https://unfccc.int/news/cop27-in-sharm-el-sheikh-to-focus-on-delivering-on-the-promises-of-paris> Last access: December 5, 2022.
- Walker, B., Holling, C., Carpenter, S., & Kinzig, A. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social–ecological Systems. *Ecology and Society*, 9, 5. <https://doi.org/10.5751/es-00650-090205>.
- Wang, H., Du, S., Zhong, Y., Liu, S., Xu, T., Zhao, Y., He, W., Xue, H., He, Y., Gao, X., & Jiang, R. (2024). Unveiling the impact mechanism of urban resilience on carbon dioxide emissions of the Pearl River Delta urban agglomeration in China. *Environmental Impact Assessment Review*. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107422>
- Wang, S., & Tae, S. (2025). Assessment of Carbon Neutrality Performance of Buildings Using EPD-Certified Korean Construction Materials. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app15126533>.
- Wang, Z., Zhou, F., & Zhong, J. (2024). Can China's low-carbon city pilot policy facilitate carbon neutrality? Evidence from a machine learning approach. *Economic Analysis and Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2024.09.028>.
- Wani, A. K., Rahayu, F., ben Amor, I., Quadir, M., Murianingrum, M., Parnidi, P., Ayub, A., Supriyadi, S., Sakiroh, S., Saefudin, S., Kumar, A., & Latifah, E. (2024). Environmental resilience through artificial intelligence: innovations in monitoring and management. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12), 18379–18395. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32404-z>
- Winkelman, S., Bishins, A., & Kooshian, C. (2010). Planning for economic and environmental resilience. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(8), 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.011>
- Wu, X., Zhong, S., Chen, G., Wu, C., Han, J., & Qian, Z. (2025). Influence of land use intensity on urban carbon efficiency under a carbon neutrality target: Evidence from the Yangtze River Delta urban agglomeration, China. *Environmental Impact Assessment Review*. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107689>.
- Yang, C., Li, S., Huang, D., & Lo, W. (2024). Performance Evaluation of Carbon-Neutral Cities Based on Fuzzy AHP and HFS-VIKOR. *Syst.*, 12, 173. <https://doi.org/10.3390/systems12050173>.
- Yi, C., & Jackson, N. (2021). A review of measuring ecosystem resilience to disturbance. *Environmental Research Letters*, 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdf09>.
- Zhang, C., Dong, H., Geng, Y., Song, X., Zhang, T., & Zhuang, M. (2022). Carbon neutrality prediction of municipal solid waste treatment sector under the shared socioeconomic pathways. *Resources, Conservation and Recycling*, 186, 106528. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106528>
- Zhang, H., Song, C., Geng, Y., Luo, Z., & Chen, Z. (2024). Carbon Neutrality Benefit by Developing Underground Space and Overlying Green Land: Calculation Methodology and Case Study. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings15010078>.



Ziozias, C., Kontogianni, E., & Anthopoulos, L. (2023). Carbon-Neutral City Transformation with Digitization: Guidelines from International Standardization. *Energies*.
<https://doi.org/10.3390/en16155814>.



ORIGINAL RESEARCH PAPER

A Study of Seljuk Caravanserais in Iran and Anatolia: Architectural Form and the Identification of Commonalities and Differences

Tooraj Khosravi Javid ^{(1)*} 

1. PhD in the Restoration and Revitalization of Historical Buildings and Urban Fabrics, lecturer at Payame Noor University in Parand and Robot Karim branches, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0000-0003-3366-1465>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 25/09/2025 Revised: 03/11/2025 Accepted: 05/11/2025 PP. 81-111 Keywords: <i>Caravanserai architecture, Seljuk caravanserais of Iran, Seljuk caravanserais of Anatolia, comparative analysis, architectural form</i>	Introduction: Seljuk-period caravanserais are among the most important manifestations of architectural and cultural heritage in Iran and Anatolia. They developed in close connection with historical communication and trade networks and played an important role in facilitating travel, trade, and cultural exchange. In addition to providing shelter and security for travelers, caravans, and goods, caravanserais functioned as important elements of the historical transportation network. Their architectural organization reflects the functional, social, cultural, climatic, geographical, and security requirements of their time. Iran and Anatolia, as two interconnected cultural-geographical regions, maintained significant political, economic, and cultural relations during the Seljuk period. The caravanserais constructed in these regions share numerous architectural characteristics, while also displaying differences resulting from local historical, cultural, social, climatic, geographical, technical, and constructional conditions. A comparative study of these buildings can therefore provide a better understanding of the continuity, transmission, transformation, and localization of caravanserai architecture. This research adopts a comparative approach to examine the architectural plans, spatial organization, and physical characteristics of Seljuk caravanserais in Iran and Anatolia and to identify their major similarities and differences. The Purpose of the Research: The main objective of this study is to comparatively examine the plans and architectural characteristics of Seljuk caravanserais in Iran and Anatolia and to identify the similarities and differences in their architectural layouts and physical structures. The research also seeks to identify the primary and secondary architectural elements of the caravanserais and determine the relationship between these elements and the spatial and functional organization of the buildings. Furthermore, the study aims to investigate the factors underlying architectural similarities and differences and to clarify how historical, cultural, social, political, climatic, geographical, technical, and constructional conditions influenced the development of caravanserai architecture in the two regions. Through this comparison, the research seeks to clarify the position of each region within the historical development of caravanserai architecture. Research Method: This research employs a qualitative methodology based on a historical-interpretive and comparative strategy. Case study and purposive sampling were used to select and examine the relevant caravanserais. The research population consists of Seljuk-period caravanserais in Iran and Anatolia. Each selected caravanserai was examined individually, and its primary and secondary architectural elements were identified, evaluated, and compared. Particular attention was given to the overall plan, spatial composition, organization of architectural elements, hierarchy of access, spatial circulation, completeness of the design, geometric proportions, symmetry, axial organization, and overall integration of the plan. The collected information was classified and presented in analytical tables, allowing systematic comparison between Iranian and Anatolian examples. Finally, the similarities and differences in the architectural characteristics of the two groups were identified and



Use your device to scan
and read the article online

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	interpreted. Findings and Discussion: The findings indicate that Seljuk caravanserais in Iran and Anatolia share fundamental architectural and functional characteristics but differ in the degree of development and organization of their architectural plans. Iranian Seljuk caravanserais generally demonstrate a more complete and mature spatial composition, particularly in terms of the organization of architectural elements, access hierarchy, spatial circulation, completeness of the overall plan, geometric proportions, symmetry and bilateral balance, axial organization, and integration of the architectural design. This greater degree of development can be related to Iran's long historical experience and rich architectural background in the design and construction of caravanserais. The findings also show that the basic concept and functions of caravanserais in both regions were similar. Providing shelter, security, resting facilities, and support for travelers, caravans, and commercial activities constituted their principal common functions. Although the caravanserai concept and many of its architectural principles were transmitted from Iran to other regions, including Anatolia, these principles did not remain unchanged. Over time, they were adapted to local conditions and acquired characteristics associated with the cultural, social, historical, geographical, and environmental identity of Anatolia. Therefore, Anatolian caravanserais can be understood as architectural manifestations that retained fundamental characteristics of the Iranian caravanserai tradition while developing a distinct regional expression. Conclusion: The comparative analysis of the plans and architectural characteristics of Seljuk caravanserais in Iran and Anatolia demonstrates numerous shared architectural elements and confirms the similarity of their principal functions. The physical organization of both groups reflects common requirements related to travel, accommodation, security, and commercial activities. However, differences can be observed in the organization and development of their architectural plans, which are associated with the particular historical, cultural, social, political, climatic, geographical, technical, and constructional conditions of each region. Historical inscriptions and textual evidence further indicate that Iranian Seljuk caravanserais are considerably older than Seljuk caravanserais in Anatolia. This chronological precedence, together with Iran's extensive experience in caravanserai design and construction, may have contributed to the development and transmission of architectural patterns from Iran to Anatolia. Nevertheless, these patterns underwent adaptation and localization in Anatolia and gradually acquired regional characteristics in response to local cultural and environmental conditions. Overall, the comparative study demonstrates that the architecture of Seljuk caravanserais in Iran and Anatolia represents both continuity and transformation. Identifying the common elements and understanding the distinctive features of each region can contribute to a more accurate interpretation of the historical development of caravanserai architecture. Furthermore, the recognition of shared and differentiated architectural elements can provide valuable guidance for conservation and restoration practices. In particular, where architectural components have been lost, destroyed, or damaged, comparative evidence from related caravanserais can assist conservation professionals in identifying probable architectural patterns and developing more appropriate and historically informed restoration strategies. Funding: There is no funding support. Conflict of Interest: Author declared no conflict of interest. AI Usage Declaration: The author declares that the AI tool [GapGPT] was used for [language polishing]. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the author. Acknowledgments: I am grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Highlight

- A Comparative Study of Seljuk Caravanserais in Iran and Anatolia.
- Identification of Similarities and Differences in the Architectural Elements and Characteristics of Seljuk Caravanserais in Iran and Anatolia.
- Typological Classification of Seljuk Caravanserais in Iran and Anatolia Based on Their Physical Characteristics and Spatial Organization.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Khosravi Javid, T. (2025). A Study of Seljuk Caravanserais in Iran and Anatolia: Architectural Form and the Identification of Commonalities and Differences. *The Art of Green Management*, 3(3), 81-111. [10.30480/agm.2026.6601.1089](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6601.1089)



[http://doi.org/ 10.30480/agm.2026.6601.1089](http://doi.org/10.30480/agm.2026.6601.1089)



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1553.html

*Corresponding Author (Email: khosravi.javid@gmail.com)/ (Phone: +989129151712)



مطالعه کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی در حوزه کالبد معماری، به منظور دستیابی به وجوه اشتراک و افتراق آنها

تورج خسروی جاوید^(۱)

۱. دانش آموخته دکتری مرمت و احیاء بناها و بافت های تاریخی، مدرس دانشگاه پیام نور پرد و رباط کریم، تهران، ایران. (<https://orcid.org/0000-0003-3366-1465>)

ناشر: دانشگاه هنر ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
مقدمه: کاروانسراهای دوره سلجوقی از مهم ترین جلوه های معماری و میراث فرهنگی ایران و آناتولی به شمار می روند که در پیوند با شبکه های تاریخی ارتباطی و تجاری شکل گرفته اند. مطالعه و مقایسه کالبد معماری این بناها، امکان شناخت ویژگی های مشترک و تفاوت های برخاسته از شرایط تاریخی، فرهنگی، اقلیمی و جغرافیایی دو حوزه را فراهم می سازد. این کتاب با رویکردی تطبیقی، به بررسی وجوه اشتراک و افتراق کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی در حوزه کالبد معماری می پردازد. هدف پژوهش: هدف این نوشتار مطالعه مقایسه ای طرح و خصوصیات معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران با کاروانسراهای سلجوقی آناتولی و دستیابی به شباهت ها و تفاوت های طرح معماری کاروانسراهای این دو حوزه فرهنگی-جغرافیایی است. روش شناسی: روش تحقیق کیفی است. راهبرد مطالعه تفسیری-تاریخی و مقایسه ای و روش مطالعه موردی و نمونه گیری هدفمند است. جامعه آماری شامل کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی است. در مطالعه نمونه ها تک تک عناصر اصلی و فرعی کاروانسراها مطالعه و ارزیابی و با هم مقایسه شده اند و نتایج در قالب جداول ارائه شده و در آخر وجوه اشتراک و افتراق معماری کاروانسراهای سلجوقی دو حوزه ایران و آناتولی تبیین شده است. یافته ها و بحث: یافته ها بیان گر آن است که طرح و خصوصیات معماری شامل؛ ترکیب بندی فضایی عناصر، سلسله مراتب دسترسی، سیرکولاسیون فضایی، تکمیل بودن طرح کلی، تناسب هندسی، تقارن و قرینگی، محوربندی و یکپارچگی طرح در کاروانسراهای سلجوقی ایرانی کامل تر و پخته تر است که ناشی از پیشینه غنی طراحی و ساخت کاروانسرا در ایران است. مفهوم و کارکرد کاروانسراها هم در ایران و هم در منطقه آناتولی مشابه بوده و این مفهوم از ایران به دیگر نواحی از جمله آناتولی تسریع پیدا کرده است اما با گذشت زمان رنگ و بوی بومی به خود گرفته و با هویت و ریشه های فرهنگی و اجتماعی سرزمین مورد نظر خو گرفته است. نتیجه گیری: مطالعه نقشه و طرح معماری کاروانسراهای هر دو حوزه نشان می دهد که عناصر معماری مشترک زیادی بین دو گونه کاروانسرا دیده می شود. کالبد معماری کاروانسراها بیان گر آن است که کارکرد هر دو گونه یکی بوده. تاریخ ساخت کاروانسراها طبق کتیبه ها و متون تاریخی نشان می دهد که کاروانسراهای سلجوقی ایرانی به مراتب از قدمت بالاتری نسبت به کاروانسراهای سلجوقی آناتولی برخوردار هستند. نتایج نشان می دهد علی رغم شباهت ها، کاروانسراهای هر دو حوزه تفاوت هایی نیز با هم دارند که می تواند ناشی از ریشه های فرهنگی، اجتماعی، تاریخی، سیاسی و مولفه های اقلیمی و تکنیکی و فنی دو حوزه باشد. مطالعه مقایسه ای این دو حوزه تمدنی-جغرافیایی مشخص خواهد کرد که کدام یک از این عناصر در دو کاروانسرا مشترک بوده و مرتبط با کالبد فضایی یا کارکردی بنا است و کدام یک از عناصر کالبدی بنا دارای تغییرات نسبت به دیگری است. بازایی عناصر مشترک و درک عناصر متفاوت می تواند راهکارهایی برای مرمت گران آتی ارائه دهد تا در کاروانسراهایی که بخش هایی از آن از دست رفته اند یا بخش های دچار آسیب شده اند راهکارهای مرمتی مناسب تری ارائه دهند.	دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴ صص. ۸۱-۱۱۱ واژگان کلیدی: معماری کاروانسراها، کاروانسراهای سلجوقی ایران، کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، تحلیل مقایسه ای، کالبد معماری 
نکات برجسته: - مطالعه مقایسه ای کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی؛ - تبیین شباهت ها و تفاوت ها عناصر معماری؛ - گونه شناسی کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی.	

ارجاع به این مقاله: خسروی جاوید، تورج. (۱۴۰۴). مطالعه کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی در حوزه کالبد معماری به منظور دستیابی به وجوه اشتراک و افتراق آنها، هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۸۱-۱۱۱. [10.30480/agm.2026.6601.1089](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6601.1089)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6601.1089>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1553.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با

مجوز [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

قابل استفاده است.

©2024, UST. All rights reserved.

*. نویسنده مسئول (رایانامه: khosravi.javid@gmail.com) / (تلفن: +۹۸۹۱۲۹۱۵۱۷۱۲)

۱- مقدمه

جاده ابریشم بستری برای انتقال مفاهیم و دادوستدهای فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی، مذهبی و دیگر مؤلفه‌های تمدنی بوده است. این بستر فرهنگی و اجتماعی، طی سده‌ها، زمینه‌ساز شکل‌گیری و گسترش کاروانسراهایی شد که از بناهای تأثیرگذار در تاریخ معماری ایران و آسیای صغیر به‌شمار می‌آیند. در روند تحول معماری ایران و در مطالعات سبک‌شناختی این بناها، می‌توان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری متقابل میان حوزه‌های فرهنگی و جغرافیایی مختلف را مشاهده کرد. ارتباطات کالبدی و شباهت‌های معماری کاروانسراها با دیگر بناها نیز بیانگر اهمیت و جایگاه این بناها در نظام معماری و ارتباطی سرزمین‌های تاریخی است.

در معماری آسیای صغیر، کاروانسراها در دوره‌های سلجوقی و عثمانی از جمله بناهای شاخص و ماندگار منطقه به‌شمار می‌روند. معماری، ویژگی‌های کالبدی، آرایه‌های معماری، مصالح و ساختمانی و اصول طراحی این بناها، از ویژگی‌های منحصربه‌فرد و حائز اهمیت برخوردار است. کاروانسراهای آسیای صغیر، همانند کاروانسراهای ایران، غالباً به دو گروه برون‌شهری و درون‌شهری تقسیم می‌شوند و علاوه بر تأمین نیازهای اقامتی و خدماتی، دارای کارکردهای اجتماعی، تجاری، بازرگانی و فرهنگی بوده‌اند (کیانی و کلایس، ۱۳۷۳).

ارتباط میان کاروانسراهای ایران و آسیای صغیر در ابتدا تنگاتنگ بوده و معماری این بناها در آسیای صغیر، تا حد زیادی تحت تأثیر معماری کاروانسراهای ایرانی قرار داشته است؛ اما با گذشت زمان، این معماری رنگ‌وبوی بومی‌تری به خود گرفته و متناسب با شرایط فرهنگی، اجتماعی و جغرافیایی منطقه تحول یافته است. کاروانسراهای دو حوزه، در کنار وجوه اشتراک، دارای تفاوت‌هایی نیز هستند که موجب شده معماری کاروانسراها در هر یک از این دو حوزه فرهنگی-جغرافیایی، ویژگی‌ها و هویت منحصربه‌فرد خود را بیابد.

با کم‌رنگ‌شدن تجارت در جاده ابریشم و کاهش اهمیت این مسیر ارتباطی، کاروانسراها نیز به‌تبع آن، با انزوا و افول تدریجی مواجه شدند. تغییر مسیرهای ارتباطی، دگرگونی شیوه‌های زندگی و کاهش نقش کاروان‌ها سبب شد بسیاری از این بناهای ارزشمند به‌تدریج متروک و منزوی شوند و برخی نیز در گذر زمان تخریب شوند (سیرو، ۱۳۲۸، ۱۳۵۷). از این‌رو، ضروری است کاروانسراها در وهله نخست شناسایی، در مرحله دوم مطالعه و در گام سوم گونه‌شناسی شوند و در نهایت، با توجه به نتایج مطالعات انجام‌شده، چارچوبی برای حفاظت از آن‌ها تبیین شود. هدف این پژوهش، مطالعه تطبیقی طرح و ویژگی‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی و تبیین شباهت‌ها و تفاوت‌های کاروانسراهای این دو حوزه فرهنگی - جغرافیایی است. جامعه آماری پژوهش در حوزه ایران، تمامی مناطق ایران و در حوزه آناتولی، تمامی مناطق آناتولی را دربرمی‌گیرد. پژوهش حاضر در پی پاسخ‌گویی به دو پرسش زیر است:

- چه عواملی بر شکل‌گیری شباهت‌ها و تفاوت‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی دو حوزه فرهنگی ایران و آناتولی

تأثیرگذار بوده‌اند؟

- شباهت‌ها و تفاوت‌های کاروانسراهای سلجوقی ایران و کاروانسراهای سلجوقی آناتولی کدام‌اند؟

۱-۱- پیشینه پژوهش

مطالعات مربوط به کاروانسراهای ایران و آناتولی طیف گسترده‌ای از پژوهش‌های تاریخی، معماری، گونه‌شناختی و حفاظتی را دربرمی‌گیرد. بررسی منابع نشان می‌دهد که کاروانسراها از دوره‌های باستان تا دوره اسلامی، به‌عنوان بخشی از شبکه راه‌های ارتباطی و تجاری، علاوه بر تأمین امنیت و اقامت مسافران، در رونق اقتصادی، تبادلات فرهنگی و سازمان‌دهی سکونتگاه‌های میان‌راهی نقش داشته‌اند. در دوره ایلخانی نیز ساخت کاروانسراها، به‌ویژه در مسیرهای اصلی تجاری و حکومتی، ادامه یافت و این بناها علاوه بر کارکرد خدماتی، در تقویت ارتباطات سرزمینی و نمایش اقتدار سیاسی نیز مؤثر بودند (Grabar, 1990). از سوی دیگر، مطالعات اقلیمی نشان می‌دهد که سازمان فضایی کاروانسراها متناسب با شرایط محیطی شکل گرفته است؛ به‌گونه‌ای که در مناطق گرم و خشک، دیوارهای ضخیم، حیاط‌های محصور و فضاهای سایه‌دار و در مناطق سرد، سازمان فضایی فشرده و ورودی‌های کنترل‌شده رواج داشته است (پیرنیا، ۱۳۷۸).

در مطالعات ایرانی، احسانی (۱۳۸۱) با رویکردی تاریخی و اجتماعی، به بررسی کاروانسراها، شیوه سفر و سازمان حرکت کاروان‌ها پرداخته است. کیانی و کلایس (۱۳۷۳) با معرفی و مستندسازی شمار زیادی از کاروانسراها، از مهم‌ترین منابع در زمینه دوره‌بندی، گونه‌شناسی، طرح، مصالح و تزیینات معماری به‌شمار می‌روند. پیرنیا و افسر (۱۳۵۰) نیز پیوند میان راه‌ها و



رباطها و بستر تاریخی شکل‌گیری کاروانسراها را بررسی کرده‌اند. خاقانی و شانواز (۱۳۹۴) روند تحول تاریخی کاروانسراها را از دوره هخامنشی تا قاجار دنبال کرده‌اند. در پژوهش‌های جدیدتر، کاویان و غلامی (۱۳۹۵) و وحدت‌پور و همکاران (۱۳۹۸) با تمرکز بر تناسبات هندسی، پیمون، روابط فضایی و تحول کالبدی، مطالعات کاروانسراها را از سطح توصیف تاریخی به تحلیل معماری و فضایی نزدیک کرده‌اند.

در حوزه آناتولی نیز مطالعات متعددی به کاروانسراهای سلجوقی، نقش آن‌ها در ساختار حکومتی و ویژگی‌های معماری و تزئینی پرداخته‌اند. هیلن‌براند (۱۳۸۹) کاروانسراهای سلجوقی آناتولی را از نظر تاریخ، معماری، مالکیت و ارتباط با قدرت سیاسی بررسی کرده و آن‌ها را به نمونه‌های دولتی، خیریه و خصوصی تقسیم کرده است. دارندلی و بینان (۲۰۲۱) نیز با مطالعه تاریخ، شبکه راه‌ها، گونه‌شناسی و سبک‌شناسی کاروانسراهای سلجوقی آناتولی و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های ایران و آسیای مرکزی، زمینه مناسبی برای مطالعات تطبیقی فراهم کرده‌اند. همچنین پژوهش‌های مرتبط با مستندسازی دیجیتال، از جمله استفاده از فتوگرامتری برد نزدیک در مطالعه کاروانسرای زازادین، ظرفیت فناوری‌های نوین را در ثبت دقیق ویژگی‌های کالبدی بناهای تاریخی نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، حفاظت، مرمت و ثبت جهانی کاروانسراها نیز به یکی از محورهای مهم مطالعات تبدیل شده است؛ زیرا فرسایش طبیعی، تخریب انسانی، تغییر کاربری و نبود برنامه‌های حفاظتی، بخش مهمی از این میراث را تهدید می‌کند. در مجموع، پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی درباره تاریخ، گونه‌شناسی، معماری، اقلیم، شبکه راه‌ها و حفاظت کاروانسراهای ایران و آناتولی انجام شده است، مطالعات تطبیقی منسجم که به‌صورت هم‌زمان سازمان فضایی، هندسه، عناصر معماری، مصالح و تزئینات کاروانسراهای سلجوقی دو حوزه را بررسی کند، محدود است. پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأ، به مقایسه ویژگی‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی و تبیین شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها می‌پردازد.

بررسی پیشینه پژوهش‌های انجام‌شده درباره کاروانسراهای آسیای صغیر نشان می‌دهد که مطالعات این بناها از رویکردهای تاریخی و کالبدی به سوی تحلیل‌های سیاسی، اقتصادی و اجتماعی گسترش یافته است. پژوهش‌های جدید ضمن بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مستندسازی مانند فتوگرامتری و اسکن سه‌بعدی، به نقش نظام مالکیت، بانیان ساخت، موقعیت راهبردی و ارتباط کاروانسراها با ساختار قدرت و اقتصاد توجه بیشتری دارند. در این دیدگاه، کاروانسراهای سلجوقی آناتولی فراتر از بناهای خدماتی، به‌عنوان ابزارهایی برای تقویت مبادلات، کنترل مسیرهای ارتباطی و نمایش اقتدار سیاسی تفسیر می‌شوند. در مقابل، بخش عمده مطالعات کاروانسراهای ایران بر تاریخ، گونه‌شناسی، سازمان فضایی و ویژگی‌های معماری متمرکز بوده و نقش نظام سفارش و سیاست‌گذاری ساخت کمتر بررسی شده است. بنابراین، خلأ اصلی پژوهش در پیوند میان تحلیل کالبدی و مستندسازی معماری با زمینه‌های سیاسی - اقتصادی شکل‌گیری بناهاست. پژوهش حاضر با رویکردی تطبیقی، کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی را از نظر عناصر معماری، سازمان فضایی و زمینه‌های تاریخی و سیاسی مقایسه می‌کند تا ضمن شناسایی شباهت‌ها و تفاوت‌ها، نقش قدرت، اقتصاد و بستر جغرافیایی را در شکل‌گیری معماری این بناها تبیین کند.

۲- مبانی نظری

مبانی نظری پژوهش، چارچوب مفهومی و علمی لازم برای شناخت و تحلیل موضوع پژوهش را فراهم می‌کند و مفاهیم و دیدگاه‌های مرتبط با آن را تبیین می‌نماید. در این بخش، مفاهیم بنیادین مرتبط با معماری کاروانسرا، ویژگی‌های کالبدی و عناصر تشکیل‌دهنده آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، مبانی نظری لازم برای مطالعه تطبیقی کاروانسراهای دوره سلجوقی ایران و آناتولی و شناسایی وجوه اشتراک و افتراق آن‌ها تبیین می‌شود. این چارچوب، زمینه لازم برای تحلیل و ارزیابی یافته‌های پژوهش در بخش‌های بعدی را فراهم خواهد کرد.

۲-۱- کاروانسرا

کاروانسراها از مهم‌ترین بناهای مرتبط با راه‌های تاریخی و شبکه‌های تجاری بودند که با هدف تأمین امنیت، استراحت و خدمات مورد نیاز مسافران و کاروانیان شکل گرفتند. این بناها، علاوه بر نقش اقامتی، در گسترش تجارت و مبادلات اجتماعی و فرهنگی نیز مؤثر بودند و معمولاً به دو گروه درون‌شهری و برون‌شهری تقسیم می‌شدند. کاروانسراهای برون‌شهری در امتداد راه‌ها و متناسب با فاصله قابل پیمایش کاروانیان احداث می‌شدند و در کنار عناصری مانند آبنبار، مسجد و سایر تأسیسات خدماتی، بخشی از نظام ارتباطی مسیرهای تاریخی را تشکیل می‌دادند (پیرنیا و افسر، ۱۳۵۰؛ نیستانی و تاتاری، ۱۳۹۳).

سازمان فضایی کاروانسراها متناسب با نیازهای اقامتی، خدماتی و امنیتی و تحت تأثیر شرایط اقلیمی و جغرافیایی شکل می‌گرفت. حیاط مرکزی، حجره‌ها، اصطبل، شترخان، بارانداز و فضاهای خدماتی از عناصر اصلی این بناها بودند و در مناطق مختلف، شیوه تأمین آب و راهکارهای اقلیمی نیز بر معماری آن‌ها تأثیر داشت. بنابراین، کاروانسرا را نمی‌توان صرفاً محلی برای اقامت موقت دانست؛ بلکه باید آن را بخشی از یک نظام گسترده تاریخی، فضایی، اقتصادی و اجتماعی دانست که در پیوند با راه، منابع آب، سکونتگاه‌ها و بستر فرهنگی و جغرافیایی پیرامون خود شکل گرفته است.

۲-۲- معماری کاروانسراها

معماری کاروانسراها حاصل تعامل میان نیازهای عملکردی سفر، امنیت، شرایط اقلیمی و جغرافیایی، امکانات ساخت‌وساز و زمینه‌های فرهنگی و اجتماعی هر منطقه است. از این رو، با وجود اشتراک در برخی الگوهای فضایی، کاروانسراهای ایران از نظر پلان، سازمان‌دهی فضاها، مصالح، شیوه ساخت و جزئیات معماری تنوع زیادی دارند. این بناها به دو گروه درون‌شهری و برون‌شهری تقسیم می‌شوند و کاروانسراهای برون‌شهری معمولاً ساختاری محصور و استوار دارند که برای اقامت مسافران، نگهداری کالا و حیوانات و تأمین امنیت شکل گرفته است.

در سازمان فضایی کاروانسرا، ورودی، هشتی، حیاط مرکزی، ایوان، حجره، ایوانچه و شترخان یا اصطبل از مهم‌ترین عناصر به‌شمار می‌روند. ورودی، علاوه بر کنترل دسترسی، گاه دارای اهمیت نمایشی و تزئینی بوده است. هشتی، فضای واسط میان بیرون و درون، و حیاط مرکزی، مهم‌ترین عنصر سازمان‌دهنده فضاها بوده و دسترسی، روشنایی، تهویه و فعالیت‌های روزمره را سامان می‌داده است. حجره‌ها در پیرامون حیاط برای اقامت مسافران و شترخان‌ها در بخش پشتی آن‌ها برای نگهداری حیوانات و جابه‌جایی بار قرار می‌گرفتند.

ساختار بسته و تدافعی کاروانسراها، با دیوارهای ضخیم، برج‌ها و گشودگی‌های محدود، علاوه بر تأمین امنیت، در سازگاری با شرایط محیطی نیز نقش داشته است. اقلیم و منابع آب نیز تأثیر مستقیمی بر شکل‌گیری بنا داشته‌اند؛ به‌گونه‌ای که ضخامت دیوارها، نوع پوشش، نحوه استقرار فضاها، بازشوها، حیاط مرکزی و گاه بادگیر، متناسب با شرایط منطقه طراحی می‌شد. آب نیز از طریق حوض، آب‌انبار، قنات، چشمه یا منابع مجاور تأمین می‌شد (وئیک و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین، معماری کاروانسرا را می‌توان معماری‌ای عملکردگرا، اقلیمی و امنیت‌محور دانست که تنوع گونه‌های آن، نتیجه تفاوت‌های تاریخی، جغرافیایی، اقلیمی و فرهنگی است.

۲-۳- عناصر اصلی معماری کاروانسراهای ایران

عناصر معماری کاروانسرا، اجزای شکل‌دهنده ساختار کالبدی و سازمان فضایی این بناها هستند که در کنار یک‌دیگر، نظامی منسجم و هدفمند ایجاد می‌کنند. در کاروانسراهای برون‌شهری، این سازمان‌دهی معمولاً از ورودی آغاز شده و با عبور از فضاهای واسط، به حیاط مرکزی و سپس به فضاهای اقامتی و خدماتی می‌رسد. این سلسله‌مراتب، علاوه بر ایجاد نظم و خوانایی در بنا، امکان تفکیک عملکردها و کنترل حرکت مسافران، حیوانات و کالاها را فراهم می‌کرد. هر یک از عناصر، نقشی مشخص در عملکرد کاروانسرا دارد؛ ورودی محل کنترل و هدایت دسترسی، هشتی فضای واسط میان بیرون و درون، ایوان و ایوانچه فضاهای نیمه‌باز، و حیاط مرکزی محور اصلی سازمان‌دهی و ارتباط میان بخش‌های مختلف بناست. اتاق‌ها و حجره‌ها محل اقامت مسافران و شترخان و اصطبل محل نگهداری حیوانات و فعالیت‌های مرتبط با حمل‌ونقل بوده‌اند. برج‌ها نیز در برخی کاروانسراها، علاوه بر نقش کالبدی، کارکرد امنیتی و دیده‌بانی داشته‌اند. بر این اساس، عناصر معماری را می‌توان در سه گروه دسترسی و ارتباطی، اقامتی، و خدماتی و امنیتی دسته‌بندی کرد. در این پژوهش، عناصر شاخص شامل ورودی، هشتی، ایوان، حیاط مرکزی، اتاق، شترخان و برج، مبنای بررسی معماری و گونه‌شناسی قرار گرفته‌اند؛ زیرا نحوه حضور، حذف و ترکیب آن‌ها در شکل‌گیری الگوهای فضایی و گونه‌های مختلف کاروانسرا نقش اساسی دارد (جدول ۱).



جدول ۱- عناصر اصلی معماری کاروانسراها (خسروی جاوید و همکاران، ۱۴۰۴؛ خسروی جاوید و ولی بیگ، ۱۴۰۳)

ردیف	عناصر معماری کاروانسراها	توضیحات	تصویر
۱	ورودی	ورودی کاروانسراها از مهم‌ترین عناصر معماری و شاخص‌ترین بخش بنا بوده و از نظر نحوه قرارگیری نسبت به نمای بیرونی به چهار گونه هم‌سطح، برجسته، فرورفته و برجسته با گوشه‌های پخش شده تقسیم می‌شوند. نمونه‌های این گونه‌ها در کاروانسراهای پاستگان، دیرگچین، مهیار، مورچه‌خورت و دیگر بناهای مورد مطالعه مشاهده می‌شود. ورودی‌ها در دوره‌های متأخر، به‌ویژه صفوی و قاجار، غالباً دوطبقه و دارای بالاخانه بوده و گاه با طاق‌نما، کتیبه و عناصر دفاعی همراه بوده‌اند. از این‌رو، ورودی علاوه بر کنترل دسترسی، نقش مهمی در امنیت، هویت معماری و جلوه بصری کاروانسرا داشته است.	
۲	هشتی	هشتی فضای واسط و حلقه ارتباطی میان ورودی و دیگر فضاهای کاروانسراست و معمولاً با پلان چهارضلعی یا هشت‌ضلعی و پوشش گنبدی ساخته می‌شده است. در دو سوی آن اغلب اتاقک‌های نگهداری و گاه دسترسی مستقیم به شترخان‌ها قرار داشته است؛ مانند کاروانسراهای ینگ‌امام و زین‌الدین. در برخی نمونه‌ها، پلکان دسترسی به بام نیز در اضلاع هشتی تعبیه شده و سکوهایی برای نشست و طاق‌نماهای کاذب تزئینی در جداره آن وجود داشته است.	
۳	ایوان	ایوان از عناصر اصلی کاروانسراست که معمولاً در چهار ضلع حیاط و در تراز بالاتر از کف حیاط قرار می‌گیرد. ایوان‌ها نسبت به حجره‌ها بزرگ‌تر، بلندتر و عمیق‌تر بوده و گاه با شومینه، بخاری، طاقچه و پله همراه‌اند. برخی ایوان‌ها نقش شاه‌نشین داشته و با تقسیمات فضایی و تزئیناتی مانند آجرکاری خفته و راسته، از شاخص‌ترین فضاهای معماری کاروانسرا به شمار می‌آیند.	
۴	حیاط مرکزی	حیاط مرکزی مهم‌ترین فضای سازمان‌دهنده کاروانسراهای ایرانی بوده و متناسب با شرایط جغرافیایی، در اشکال مربع، مستطیل، مدور و هشت‌ضلعی شکل می‌گرفته است. در برخی نمونه‌های هشت‌ضلعی، پخ‌های کوچک به‌تدریج به محل دسترسی شترخان تبدیل شده‌اند و در کاروانسراهای مدور مانند زیزه، زین‌الدین و تاج‌آباد همدان، حیاط نیز فرم مدور داشته است. در حیاط مرکزی محلهایی برای بستن حیوانات تعبیه می‌شد و در کاروانسراهای اولیه که شترخان مستقل نداشتند، میانسرا برای نگهداری حیوانات نیز مورد استفاده قرار می‌گرفت.	
۵	اتاق‌ها	اتاق‌ها معمولاً پیرامون حیاط مرکزی و کمی بالاتر از سطح زمین قرار داشتند و با ایوانچه به حیاط مرتبط می‌شدند؛ فضای داخلی آنها دارای طاقچه، شومینه و پوشش‌های طاقی بود. نور اتاق‌ها از درگاه یا نورگیر سقفی تأمین می‌شد و در برخی نمونه‌ها منفذی برای نظارت بر حیوانات به شترخان وجود داشت. در کاروانسراهای کوهستانی، فضاهای اقامتی گاه پیرامون تالار مرکزی قرار می‌گرفتند و در برخی نمونه‌ها مانند ورده ساوه، حجره‌ها با ایوانچه جایگزین شده بودند.	
۶	اصطبل	شترخان معمولاً در لایه انتهایی کاروانسرا و پشت حجره‌ها قرار داشت و به‌صورت فضایی کشیده و مستطیلی یا با شکل طراحی می‌شد. این فضا دارای سکو و بارانداز برای تخلیه بار و گاه استقرار نگهدار و مهتر بود و دسترسی به آن از هشتی یا گوشه‌های حیاط مرکزی امکان‌پذیر می‌شد. پوشش شترخان‌ها معمولاً طاقی، تویزه‌ای یا گنبدی بود و نور آن از هورنو سقف تأمین می‌شد؛ همچنین منافذ و بست‌هایی برای نگهداری حیوانات در آنها تعبیه می‌کردند.	

	برج‌های نگهبانی در کاروانسراهای برون‌شهری، به‌ویژه در مناطق کویری، بیابانی و کوهستانی، برای تأمین امنیت کاروانیان و حفاظت از بنا ایجاد می‌شدند. این برج‌ها معمولاً مدور، ساخته‌شده از سنگ یا آجر و بلندتر از باروها بودند و با تیرکشی‌هایی برای دیده‌بانی و دفاع تجهیز می‌شدند. از نمونه‌های برج‌دار می‌توان به هجیب، سن‌سن، دیرگچین، نوگنبد و پاسنگان اشاره کرد؛ در مقابل، برخی کاروانسراهای دوره صفوی مانند ینگ‌ی امام و حاج کمال فاقد برج نگهبانی بودند.	برج	۷
---	--	------------	----------

۲-۴- چارچوب مفهومی پژوهش

چارچوب نظری پژوهش بر تلفیق مورفولوژی معماری، اکولوژی فرهنگی و جغرافیای سیاسی استوار است و کاروانسراها را به‌عنوان عناصر مؤثر در شبکه‌های ارتباطی، اقتصادی و فرهنگی ایران و آناتولی بررسی می‌کند. در این چارچوب، تأثیر اقلیم و محیط بر فرم، مصالح، پوشش، ضخامت دیوارها و شیوه‌های تأمین آسایش، و نقش مورفولوژی فضایی در سازمان پلان و روابط میان فضاهای اقامتی، خدماتی و تجاری تحلیل می‌شود. همچنین عوامل فرهنگی، مذهبی، امنیتی و ژئوپلیتیکی به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر بر شکل‌گیری و تحول معماری مورد توجه قرار می‌گیرند. در ادامه، با مقایسه عناصری همچون ورودی، حیاط، ایوان، پوشش، سازه، مصالح و تزیینات، شباهت‌ها و تفاوت‌های معماری کاروانسراهای دو حوزه شناسایی می‌شود. بر این اساس، پژوهش بررسی می‌کند که چگونه شبکه‌های تاریخی و تجاری، فناوری‌های ساخت، شرایط محیطی و ساختارهای فرهنگی و سیاسی موجب شکل‌گیری زبانی مشترک در معماری کاروانسراها، همراه با ویژگی‌های بومی و منطقه‌ای، شده‌اند. در نتیجه، کاروانسرا به‌عنوان محصول تعامل میان انسان، محیط، اقتصاد و قدرت و به‌مثابه سندی مادی از ارتباطات تاریخی ایران و آناتولی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۳- روش‌شناسی

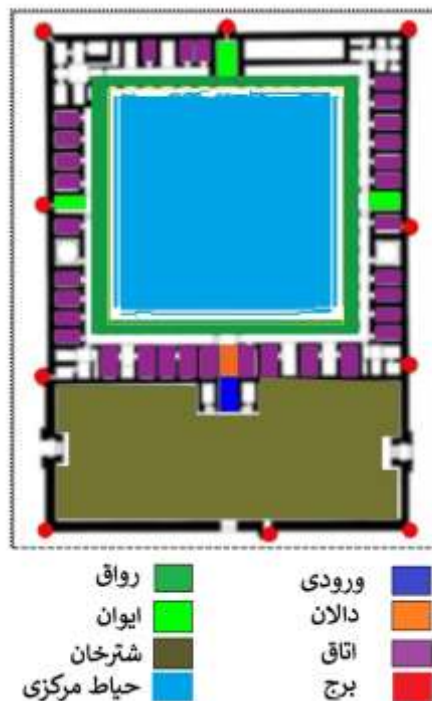
این تحقیق کیفی و راهبرد آن تفسیری-تاریخی و مقایسه‌ای است. نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند و موردی انجام شده است. حوزه جغرافیایی پژوهش، محدوده ایران و حوزه آناتولی (ترکیه امروزی) را دربرمی‌گیرد. در این پژوهش، کاروانسراهای سلجوقی هر دو حوزه بررسی و ارزیابی شده‌اند. از حوزه ایران، ۲۰ کاروانسرا و از حوزه آناتولی، ۱۰ کاروانسرا مطالعه و ارزیابی شده‌اند. از هر گونه معماری، تعدادی نمونه بر پایه ویژگی‌های معماری کاروانسراها، از جمله طرح و پلان، مصالح، تزیینات، شکل کلی و هندسی و تنوع طرح‌ها، انتخاب شده‌اند. کاروانسراهای مورد مطالعه، بازه زمانی قرون دهم تا سیزدهم میلادی را شامل می‌شوند. روش گردآوری اطلاعات در حوزه ایران، شامل مطالعات کتابخانه‌ای، برداشت‌های میدانی و تحلیل نقشه‌های معماری است. در حوزه ایران، از منابع کتابخانه‌ای، نظیر کتاب «فهرست کاروانسراهای ایران» تألیف کیانی و کلایس (۱۳۷۳) و کتاب‌های سیرو درباره کاروانسراهای ایران و کاروانسراهای منطقه اصفهان، استفاده شده است. در حوزه آناتولی نیز کتاب «معماری اسلامی» تألیف هیلن‌براند (۱۳۸۹)، به‌عنوان یکی از مراجع نقشه‌ها و مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. روش دیگر گردآوری اطلاعات، تجزیه و تحلیل نقشه‌های معماری بوده است. گام نخست پژوهش، مبتنی بر شناسایی کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی است. این شناسایی بر پایه مطالعه مقالات، کتاب‌ها، رساله‌ها، پایان‌نامه‌ها و گزارش‌های موجود انجام شده است. در گام دوم، خصوصیات معماری کاروانسراها از منظر جانمایی و ترکیب فضایی عناصر، پلان معماری، مصالح، سازه، هندسه فرم کلی و فرم حیاط مطالعه شده است. در گام سوم، کاروانسراها بر پایه مطالعات انجام‌شده در گام دوم، دسته‌بندی و گونه‌شناسی شده‌اند. گونه‌شناسی کاروانسراها بر اساس فرم کلی، طرح هندسی، ترکیب طرح بسته و باز و ترکیب‌بندی فضایی عناصر معماری صورت گرفته است. در گام چهارم و نهایی، شباهت‌ها و تفاوت‌های کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی تبیین و ارائه شده‌اند.

۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌ها

در این بخش، یافته‌های پژوهش در چند بخش دسته‌بندی شده‌اند. بررسی ویژگی‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی و تبیین شباهت‌ها و تفاوت‌های کاروانسراهای مورد مطالعه، از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به‌شمار می‌روند.

۴-۱- مطالعه کاروانسراهای سلجوقی ایران

گونه‌شناسی عناصر معماری کاروانسراها تابع شرایط اقلیمی، سبک رایج معماری، جنبه‌های فرهنگی و اجتماعی، جغرافیای مکانی، دوره‌بندی‌های تاریخی، ویژگی‌های کالبدی و کارکردی و نیز خلاقیت و نوآوری معماران بوده است. این عناصر معماری، در طول زمان، روندی تدریجی را برای بهینه‌تر شدن فضاها طی کرده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که با توجه به سیر تحول کاروانسراها در دوره‌های تاریخی و روند رو به تطور آن‌ها، عناصر اصلی معماری کاروانسراها، به‌عنوان شاکله اصلی بنا، نیز دست‌خوش تحول تدریجی شده‌اند. برای نمونه، در کاروانسراهای سده‌های نخستین اسلام و دوره سلجوقی، معمولاً اتاق‌ها فاقد ایوانچه در مقابل خود بودند و به‌جای ایوانچه، رواق داشتند. فرم هندسی اتاق‌ها نیز غالباً مستطیل‌شکل بود. در کاروانسراهای سلجوقی، غالباً برج وجود داشت. این برج‌ها دارای کارکردهای سازه‌ای و دفاعی بودند. در این دوره، دستگاه ورودی کاروانسرا معمولاً شامل عمارت سردر و دالان بود و عنصر هشتی کمتر در نقشه‌های این دوره دیده می‌شود. در کاروانسراهای ایلخانی، به‌تدریج عنصر رواق حذف شده و ایوانچه در مقابل اتاق قرار می‌گیرد. کاروانسراهای این دوره دارای عمارت سردر و دالان بودند و عنصر شترخان نیز جایگاه و جانمایی مشخص‌تری پیدا می‌کند. در کاروانسراهای دوره صفوی، عناصر معماری کامل‌تر می‌شوند. در این دوره، کاروانسراها ورودی کامل‌تری دارند که شامل عمارت سردر، هشتی و دالان است. اتاق‌ها نیز غالباً در مقابل خود ایوانچه دارند. همچنین، عنصر برج در بیشتر کاروانسراهای این دوره دیده می‌شود و در نمای بیرونی کاروانسراها نیز ایوانچه مشاهده می‌شود. در این دوره، شترخان و نحوه دسترسی به آن نیز دست‌خوش تحول شده است. در کاروانسراهای قاجاری، بناها معمولاً دارای برج، دستگاه ورودی شامل عمارت سردر، هشتی و دالان، ایوان، اتاق، ایوانچه و شترخان هستند و در نمای بیرونی نیز ایوانچه دارند. در کاروانسراهای این دوره، روند تحول معماری کاروانسراهای صفوی ادامه می‌یابد و تحول عمده‌ای در ساختار معماری این بناها پدید نمی‌آید (تصویر ۱).



تصویر ۱- جانمایی فضاها در یک نمونه از کاروانسراهای سلجوقی ایران

۴-۱-۱- ویژگی‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران

بررسی سیر تحول معماری کاروانسراها نشان می‌دهد که رواق و گوشه مرکزی در دوره‌های پیش از سلجوقی، به‌ویژه آل‌بویه و غزنوی، حضور محدودی داشته‌اند، اما در دوره سلجوقی مجدداً در سازمان فضایی کاروانسراها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعه نمونه‌هایی مانند حاجی‌آباد ساوه، دیرکاج، علی‌آباد، کوه‌نمک و طرلاب بیانگر آن است که کاروانسراهای سلجوقی عمدتاً دارای پلان مربع یا مستطیل، حیاط مرکزی، سازمان چهارایوانی، اتاق‌های پیرامونی، شترخان، ورودی شاخص و برج‌های پیرامونی بوده‌اند. در این میان، رواق یکی از عناصر مهم معماری دوره سلجوقی محسوب می‌شود که معمولاً در حدفصل حیاط



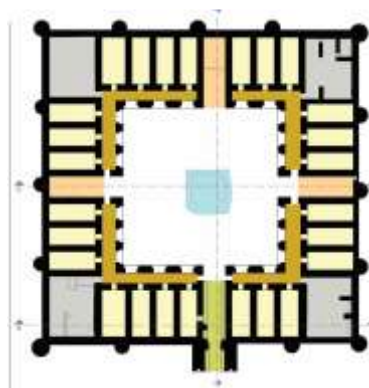
و اتاق‌ها قرار داشته و در بسیاری از نمونه‌ها تداوم یافته است. کوشک مرکزی نیز در برخی نمونه‌های سلجوقی متقدم، از جمله حاجی‌آباد ساوه، مشاهده می‌شود، اما به تدریج در دوره سلجوقی متأخر حذف شده است. در کنار این عناصر، شاه‌نشین‌های چهارصفه در گوشه‌های حیاط در برخی نمونه‌ها دیده می‌شوند و همراه با ایوان، رواق و حیاط مرکزی، ساختار فضایی ویژه‌ای را شکل می‌دهند. همچنین وجود برج‌های مدور، ورودی‌های برجسته و فضاهای دفاعی نشان‌دهنده توجه هم‌زمان به عملکرد اقامتی، امنیت و سازمان فضایی بناست. در دوره‌های ایلخانی و تیموری، کوشک مرکزی و شاه‌نشین چهارصفه به ندرت ادامه یافته و استفاده از رواق نیز کاهش می‌یابد؛ در دوره‌های صفوی و قاجار، کوشک و رواق از سازمان فضایی کاروانسراها حذف می‌شوند، درحالی‌که ایوان همچنان به عنوان یکی از عناصر پایدار معماری باقی می‌ماند. در مجموع، سیر تحول این عناصر بیانگر آن است که الگوی معماری کاروانسرا از سازمان فضایی متنوع و چندعنصری دوره سلجوقی به سوی ساختاری ساده‌تر و عملکردگراتر در دوره‌های بعدی تحول یافته است (تصویر ۲ تا ۵).



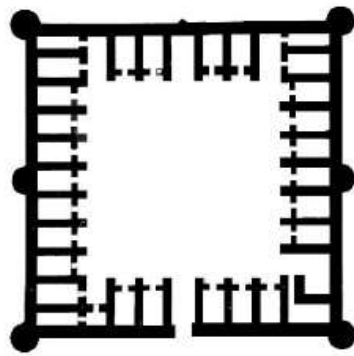
تصویر ۲- کاروانسرای بدون رواق، کاروانسرای قلعه سنگی رباط کریم (هیلن براند، ۱۳۸۹)



تصویر ۳- کاروانسرا با دو حیاط مرکزی و رواق دار، رباط شرف (Unesco, 2021)



تصویر ۴- کاروانسرا با یک حیاط مرکزی و رواق دار، کاروانسرای سنگی آهوان (Unesco, 2021)



تصویر ۵- کاروانسرای اتاق دار با ایوانچه، کاروانسرای شورگر (Unesco, 2021)

۴-۱-۲- ویژگی‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران

الف) انتظام هندسی، سازمان فضایی و گونه‌شناسی پلان

در کاروانسراهای دوره سلجوقی، فرم کلی پلان از هندسه‌ای صلب و منظم پیروی می‌کند و عمدتاً به‌صورت مربع یا مستطیل شکل گرفته است. در این دوره، پلان‌های چندضلعی یا مدور مشاهده نمی‌شود. این انتظام هندسی در سازمان‌دهی درون‌گرا، بر پایه الگوی چهارایوانی پیرامون یک حیاط مرکزی شکل گرفته است.

- **هندسه حیاط مرکزی:** میانسرای کاروانسراها همواره به‌صورت مربع یا مستطیل اجرا شده و از فرم‌های هشت‌ضلعی یا هشت‌ونیم‌هشت پرهیز شده است.
- **سامانه کوشک و شاه‌نشین میانی:** یکی از شاخصه‌های بارز گونه‌شناسی سلجوقی، جانمایی یک کوشک یا شاه‌نشین تک‌اشکوبه (یک‌طبقه) و متقارن با طرح چهارصفه در مرکز حیاط است. در مواردی که کوشک مرکزی تعبیه نشده باشد، فضاهای شاه‌نشین به گوشه‌های حیاط منتقل شده‌اند.
- **فضاهای چهارگانه گوشه‌ها:** در چهار کنج خارجی کاروانسرا، چهار فضای چهارصفه مستقل جانمایی شده است که غالباً برای اقامت مسافران ممتاز یا کارکردهای ویژه مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند.
- **سطوح و ترازهای حیاط:** حیاط مرکزی فاقد سکو یا صفه میانی است. همچنین، در نمونه‌هایی که فاقد رواق‌های پیرامونی هستند، کف اتاق‌ها، ایوان‌ها و اصطبل‌ها به‌صورت هم‌سطح با کف حیاط مرکزی طراحی شده‌اند.

ب) سلسله‌مراتب دسترسی، ساختار ورودی و مفصل‌بندی

- **ساده‌سازی سلسله‌مراتب فضایی:** الگوی گسترده و تکامل‌یافته ورود، شامل مفصل‌بندی جلوخان، پیش‌طاق، درگاه، هشتی، دالان و ایوان، در این دوره کمتر رعایت شده است؛ به‌گونه‌ای که فضاهایی نظیر جلوخان، پیش‌طاق و هشتی در اغلب موارد وجود ندارند یا بسیار ساده طراحی شده‌اند.
- **حذف هشتی:** بخش عمده کاروانسراهای سلجوقی فاقد هشتی منسجم به‌عنوان مفصل توزیع فضایی و عامل ایجاد شکست در محرمیت هستند.
- **حجم و ارتفاع سردر:** ورودی بنا ساختاری ساده، فاقد تکلف و یک‌طبقه، یعنی فاقد بالاخانه یا اشکوب دوم، دارد؛ هرچند حجم کلی درگاه به سمت بیرون از حصار پیرامونی برجسته و بیرون‌زده است.
- **عدم تعبیه پیرنشین:** در پیشانی و دو سوی ورودی بیرونی کاروانسراها، سکوه‌های پیرنشین پیش‌بینی نشده است.

ج) تفکیک ریزفضاها و سازمان کارکردی بنا

- **فضاهای اقامتی و ارتباطی (حجره‌ها، ایوان‌ها و رواق‌ها):** حجره‌ها و اتاق‌های مسافران به‌صورت یک‌قسمتی، ساده و کشیده انتظام یافته‌اند. این اتاق‌ها فاقد پیش‌بینی‌های خرد کالبدی، نظیر تاقچه، بخاری دیواری (شومینه) و پستوی مجزا هستند. درگاه ورود به اتاق‌ها، در صورت وجود، در میانه یا گوشه‌های ضلع ورودی قرار دارد؛ هرچند در برخی نمونه‌ها، اتاق‌ها بدون درگاه مشخص و به‌صورت دهانه‌های باز اجرا شده‌اند. علاوه بر این،



اتاق‌ها فاقد ایوانچه اختصاصی هستند و به‌جای آن، معمولاً یک رواق مسقف و سراسری در گرداگرد حیاط تعبیه شده است. ایوان‌ها نیز به‌صورت ممتد و کشیده بوده و به فضای پشت‌بند یا پستو منتهی نمی‌شوند.

- **فضاهای دامی و بارانداز (اصطبل‌ها و شترخان‌ها):** اصطبل‌ها، به‌عنوان فضاهای پشتیبانی، در کنج‌های حیاط استقرار یافته‌اند. سازمان کالبدی این فضاها در دوره سلجوقی، فاقد سکوه‌های مجزای بارانداز و صفه‌های استقرار سربان است.

- **تأسیسات بهداشتی و تأمین آب:** تأمین آب در کاروانسراهای سلجوقی از طریق منابع درون‌زا، شامل چاه‌ها یا حوض‌های مستقر در درون بنا، صورت می‌گرفته است. همچنین، این بناها غالباً فاقد فضاهای تعبیه‌شده برای آبریزگاه و سرویس‌های بهداشتی تفکیک‌شده هستند.

د) نظام سازه‌ای، پوشش‌های طاقی و ایستایی

پایداری و ساختار باربر در کاروانسراهای سلجوقی بر روش‌های اصیل طاق‌زنی استوار است.

- **گونه‌شناسی پوشش‌ها:** پوشش غالب دهانه‌ها، حجره‌ها و فضاها به‌صورت تاق گهواره‌ای پیوسته و کشیده اجرا شده است؛ استفاده از ساختار تاق و تویزه در این دوره بسیار محدود است.

- **فرم قوس‌ها:** هندسه قوس‌ها عمدتاً از انواع هلالی (نیم‌دایره) و جناغی شکل گرفته است.

- **سامانه باربر و مهار جانبی:** برای مقابله با رانش افقی ناشی از تاق‌های گهواره‌ای، از پشت‌بندهای نیم‌دایره در بدنه حصار خارجی استفاده شده است.

- **برج‌های دفاعی و استحکامی:** برج‌های تعبیه‌شده در جداره پیرامونی، ترکیبی از برج‌های توپر، با هدف افزایش صلبیت و تقویت ایستایی سازه، و برج‌های توخالی، با هدف پایش، دیده‌بانی و انجام امور نظامی، هستند.

ه) ساختمانی و فناوری مصالح بوم‌آورد

نظام مصالح در کاروانسراهای سلجوقی، بیانگر ترجیح استفاده از سنگ در بخش‌های اصلی کالبد بناست.

- **ترکیب سنگ و آجر:** مصالح غالب بناها ترکیبی از سنگ و آجر است؛ اما وزن و حجم اصلی سازه بر کاربرد سنگ متمرکز بوده و آجر در مقیاسی کمتر و عموماً در تاق‌ها و نماها به‌کار رفته است.

- **ویژگی‌های سنگ:** سنگ‌های مصرفی از نوع نامنظم، غیرهندسی و لاشه یا بادبر هستند و استفاده از قلوه‌سنگ‌های رودخانه‌ای در این ساختار دیده نمی‌شود.

و) سیما، جداره‌های بیرونی و آرایه‌های وابسته به معماری

از منظر بصری و ادراکی، تباین مشخصی میان جداره بیرونی و فضاهای درونی کاروانسرا وجود دارد.

- **سیمای جداره خارجی:** پوسته بیرونی کاروانسرا کاملاً صلب، بسته و تدافعی است؛ در نمای بیرونی هیچ‌گونه ایوانچه، طاق‌نما یا سکوی پیرامونی تعبیه نشده است.

- **طاق‌نماهای داخلی:** طاق‌نماهای حیاط مرکزی ماهیتی ساده و عملکردی دارند و از شکست‌ها یا طرح‌های هندسی پیچیده مبرا هستند.

- **تزیینات وابسته به معماری:** برخلاف صلبیت سیمای خارجی، در نقاط شاخص، نظیر پیش‌طاق‌ها، درگاه‌ها و قاب‌ها، از آرایه‌های فاخر آجرکاری، شامل گره‌چینی‌ها و نقوش متنوع خفته‌راسته، و نیز کتیبه‌ها و نقوش ظریف گچ‌بری بهره گرفته شده است.

گونه‌شناسی کاروانسراهای دوره سلجوقی بازتاب‌دهنده ساختاری پیوسته، تدافعی و کارکردگرا و درعین‌حال، واجد ظرافت‌های فضایی ویژه است. غلبه تاق‌های گهواره‌ای، استفاده ساختاری از سنگ‌های لاشه در ترکیب با آجر، تعبیه کوشک چهارصفه در میانه حیاط، استقرار فضاهای چهارصفه در گوشه‌ها و حذف عناصر واسطه‌ای، چون هشتی و ایوانچه‌های انفرادی، هویتی کالبدی را شکل داده‌اند که در دوره‌های بعدی، با توسعه مدولاسیون آجری، فضاهای پیچیده هشتی و ایوانچه‌های حجره‌محور، بازتعریف شده است.

۴-۲- مطالعه کاروانسراهای سلجوقی آناتولی

گونه‌شناسی کلی کاروانسراهای آناتولی، غالباً به چهار دسته در دوره سلجوقی طبقه‌بندی می‌شود. در دوره عثمانی، کاروانسراها بیشتر به‌صورت درون‌شهری ساخته شدند و کاروانسراهای برون‌شهری چندانی احداث نشد. در مجموع، چهار گونه اصلی در

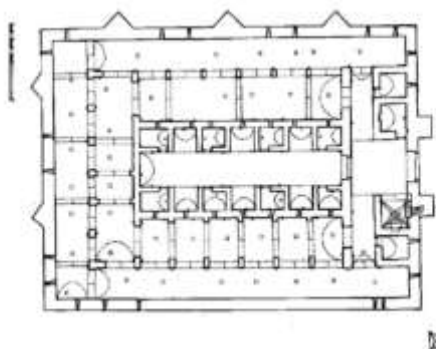
کاروانسراهای دوره سلجوقی تبیین شده است و جنبه اقامتی در آن‌ها پررنگ بوده است. در دوره عثمانی، کاروانسراها بیشتر برای تجارت مورد استفاده قرار می‌گرفتند و جنبه اقامتی در آن‌ها اهمیت کمتری داشته است (تصویر ۶ تا ۱۰).



تصویر ۶- نقشه آناتولی در دوره سلجوقیان (Oguz, 2025)

گونه‌شناسی نوع اول: کاروانسرای مرکز گرا

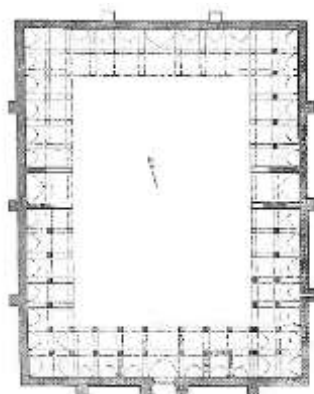
این گونه‌شناسی در آناتولی محدود است ولی در عین حال پیشرفته‌ترین نوع گونه‌شناسی پلان کاروانسرا است. این گونه‌شناسی در موقعیت‌های جغرافیایی گوناگونی قرار گرفته است و اقلیم‌های مختلف تاثیری در پراکندگی آن‌ها نداشته است. فضاها طبق کارکرد و عملکرد آن‌ها متفاوت است. اتاق‌ها شامل اتاق‌های روز و شب است. بیشتر فضاها برای مسافران در نظر گرفته شده است. اصطبل‌ها در دورترین قسمت ساختمان در نظر گرفته شده‌اند. کاروانسرای مرکز گرا یک طرح اصیل و با اصالت است و طرح آن پلان با ویژگی‌های متنوعی ایجاد کرده است.



تصویر ۷- کاروانسرای مرکز گرا (هیلن براند، ۱۳۸۹)

گونه‌شناسی نوع دوم: کاروانسرای تنها حیاط دار

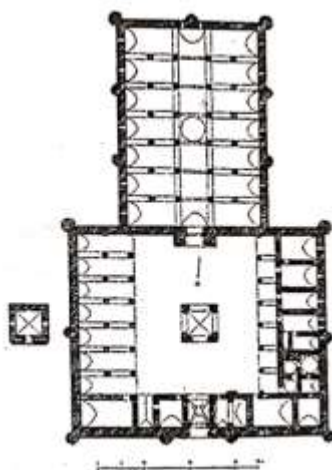
این گونه‌شناسی معمولاً در جنوب شرقی منطقه آناتولی دیده می‌شود و مشابه کاروانسراهای ایرانی است. فضاها دورتادور حیاط هستند و کاروانسرا متقارن است و یک محور مرکزی دارد. تعداد این کاروانسراها نسبت به دیگر خان و کاروانسراهای آناتولی کمتر است.



تصویر ۸- کاروانسرای حیاط دار (هیلن براند، ۱۳۸۹)

گونه شناسی نوع سوم: کاروانسرای فضای سرپوشیده با طرح حیاط دار

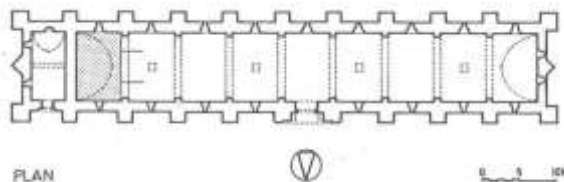
این گونه شناسی پلان معمولا در آناتولی مرکزی استفاده می شود. ابتدا یک فضای بسته ساخته شده و سپس حیاط بدان افزوده شده. این سلسله مراتب ساخت ممکن است به علت های موقعیت و شرایط اقتصادی و توسعه یا احتیاج به آنها باشد. از این گونه پلان نمونه های زیادی باقی مانده است.



تصویر ۹- کاروانسرای حیاط دار و سرپوشیده بسته (هیلن براند، ۱۳۸۹)

گونه شناسی نوع چهارم: کاروانسرا با طرح فضای بسته و سرپوشیده

این سبک شناسی پلان که تنها شامل فضای سرپوشیده است نسبت به دیگر گونه ها محدودتر است. فرم هندسی این گونه مستطیل کشیده، مستطیل معمولی یا مربع شکل است.



تصویر ۱۰- کاروانسرای صرفا سرپوشیده و بسته (هیلن براند، ۱۳۸۹)

۴-۲-۱- ویژگی های معماری کاروانسراهای سلجوقی آناتولی

در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی چهار گونه اصلی شناسایی شده است: گونه کاملاً بسته و سرپوشیده، گونه حیاطدار، گونه ترکیب بسته و حیاطدار و گونه درون گرا. در ادامه، سه نمونه از گونه های دربردارنده حیاط بررسی می شوند. در گونه حیاطدار،



اتاق‌ها و فضاهای اقامتی و خدماتی دورتادور حیاط قرار دارند و در مقابل اتاق‌ها رواق وجود دارد. عنصر رواق غالباً در کاروانسراهای این دوره قابل مشاهده است. رواق سرتاسری و نیمه‌باز است. اتاق‌ها در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی فاقد درگاه هستند و مستقیماً به رواق باز می‌شوند. در این گونه معمولاً یک مسجد در وسط حیاط وجود دارد. برخی از کاروانسراهای حیاط‌دار دارای دو حیاط هستند و برخی نیز یک حیاط و یک فضای بسته دارند و دویخی هستند. در ادامه، به چند نمونه از کاروانسراهای سلجوقی اشاره می‌شود.

- **آکسارای سلطان‌خان** یکی از بزرگ‌ترین کاروانسراهای آناتولی مربوط به دوره سلجوقی متأخر است که در گونه ترکیب حیاط‌دار و بسته قرار دارد و در سده ششم هجری قمری (سده سیزدهم میلادی) ساخته شده است. نکته مهم این کاروانسرا، وجود یک مسجد کوشکی در مرکز میانسراست. پلان مسجد کوشکی مربع‌شکل است. مهم‌ترین عناصر فضایی این نمونه عبارت‌اند از: ورودی، اتاق، ایوان، رواق، مسجد، فضای سرپوشیده ستون‌دار، پشت‌بند و اصطبل.
- **کاروانسرای اودیرخان** یکی دیگر از نمونه‌های کاروانسراهای حیاط‌دار است که مربوط به دوره سلجوقی متأخر است. حیاط مستطیل‌شکل فضاهایی است که دورتادور آن قرار گرفته‌اند. این کاروانسرا عناصری همچون ورودی، حیاط، رواق، پشت‌بند، اتاق، ایوان و اصطبل را شامل می‌شود.
- نمونه دیگر **کاروانسرای آلاخان** است که آن هم بازمانده‌ای از دوره سلجوقی متأخر است. گونه درون‌گرا بیشترین پراکندگی را در میان کاروانسراهای سلجوقی آناتولی دارد. اتاق‌ها شامل اتاق‌های روز و شب هستند. بیشتر فضاها برای مسافران در نظر گرفته شده است. اصطبل‌ها در دورترین قسمت ساختمان در نظر گرفته شده‌اند. این کاروانسرا در سده سیزدهم میلادی ساخته شده است. این کاروانسرا دستگاه ورودی، اتاق، رواق، پشت‌بند، ایوان و اصطبل دارد.

در گونه حیاط‌دار از کاروانسراهای سلجوقی آناتولی که در این پژوهش به‌واسطه شکل و طرح کلی آن‌ها مدنظر قرار گرفته‌اند، اتاق‌ها و فضاهای اقامتی و خدماتی دورتادور حیاط قرار دارند و در برابر اتاق‌ها نیز رواق دیده می‌شود. عنصر رواق غالباً در کاروانسراهای این دوره قابل مشاهده است و این فضا معمولاً سرتاسری و نیمه‌باز است. اتاق‌ها در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی فاقد درگاه هستند و معمولاً به‌طور مستقیم به رواق باز می‌شوند. در این گونه معمولاً یک مسجد در وسط حیاط وجود دارد. برخی از کاروانسراهای حیاط‌دار آناتولی دو حیاط دارند و برخی نیز یک حیاط و یک فضای بسته را شامل می‌شوند و دویخی‌اند. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، عناصر ورودی، اتاق، ایوان و شترخان دیده می‌شود. مهم‌ترین ویژگی‌های کاروانسراهای این دوره عبارت‌اند از: وجود رواق در حیاط، اتاق‌های بدون درگاه، دو بخش سرپوشیده و حیاط‌دار در کنار یکدیگر، وجود مسجد چارطاقی‌مانند در مرکز حیاط و همچنین وجود پشت‌بندهای چندضلعی در حصار بیرونی کاروانسراها (جدول ۲ و تصویر ۱۰).

۴-۲-۲- ویژگی‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی آناتولی

کاروانسراهای سلجوقی آناتولی با رویکردی درون‌گرا و سازه‌ای حجیم برای مقابله با اقلیم سرد و کوهستانی طراحی شده‌اند. ویژگی شاخص آن‌ها جایگزینی یا تکمیل حیاط‌های باز با تالارهای سرپوشیده سنگی است که امکان اقامت در شرایط جوی سخت را فراهم می‌کند. پیش‌طاق‌های عظیم و پرکار با سنگ‌تراشی‌های پیچیده، نقش نمادین و حفاظتی بنا را در پهنه‌های وسیع ایفا می‌کنند. پلان‌ها اغلب به صورت دوگانه (تابستان‌نشین و زمستان‌نشین) سازماندهی شده‌اند تا بهره‌وری فضایی در فصول مختلف حداکثر شود. این بناها علاوه بر عملکردهای تجاری، به مثابه قلعه‌های مستحکم، امنیت شبکه‌های مواصلاتی در قلمرو سلجوقیان روم را تضمین می‌کردند.

الف) ویژگی‌های کالبدی و سازه‌ای

- استفاده گسترده از سنگ پاک‌تراش و قلوه‌سنگ در ساخت و پوشش دیوارهای خارجی.
- استفاده از پشت‌بندها و عناصر تقویتی در نمای بیرونی برای استحکام‌بخشی به دیوارها.
- برخورداری از برج و بارو و تأکید بر جنبه تدافعی و استحکامی بنا.
- استفاده از گوشه‌سازی برای انتقال از پلان چهارگوش به گنبد.
- استفاده از انواع قوس‌های نوک‌تیز و طاق‌ها در فضاهای مختلف بنا.
- شکل‌گیری مجموعه‌هایی با ترکیب فضاهای تابستانی و زمستانی و گاه فضاهای متناسب با اقامت روزانه و شبانه.

ب) ویژگی‌های ورودی و سردر

- ورودی‌ها معمولاً از شاخص‌ترین و پرکارترین بخش‌های معماری کاروانسرا هستند و نسبت به سایر قسمت‌های بنا تزئینات غنی‌تری دارند.
- ارتفاع سردر و ورودی از ارتفاع دیوارهای جانبی بیشتر است و به این ترتیب، ورودی به‌صورت یک عنصر شاخص در نمای اصلی بنا ظاهر می‌شود.
- استفاده از قاب‌بندی مستطیلی در اطراف ورودی و شکل‌گیری ترکیب مثلی یا هرمی در بخش فوقانی آن.
- استفاده از مقرنس در تزئین و تکمیل فضای سردر.
- نصب کتیبه‌های سنگی در بخش فوقانی ورودی که معمولاً اطلاعاتی درباره بانی، تاریخ ساخت یا کارکرد بنا ارائه می‌کنند.
- استفاده از سنگ‌های سیاه و سفید پاک‌تراش در برخی نمونه‌ها برای ایجاد تضاد رنگی و تأکید بصری بر نمای ورودی.

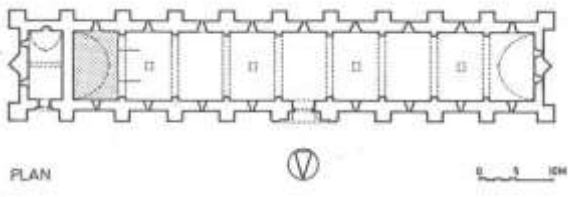
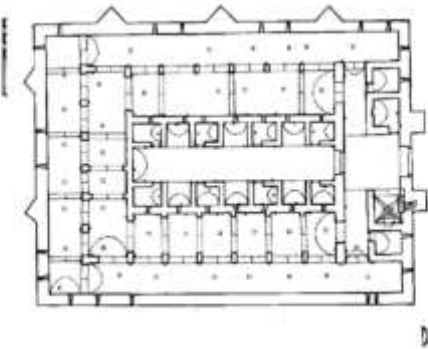
ج) سازمان‌دهی فضای داخلی و میانسرا

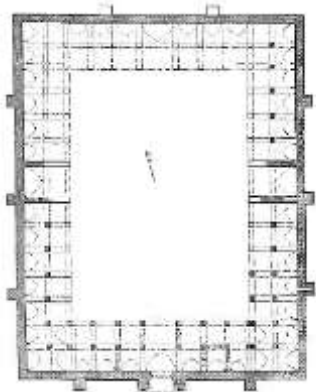
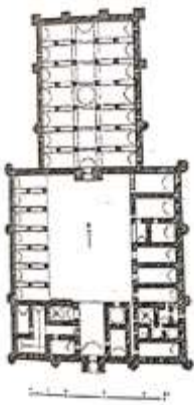
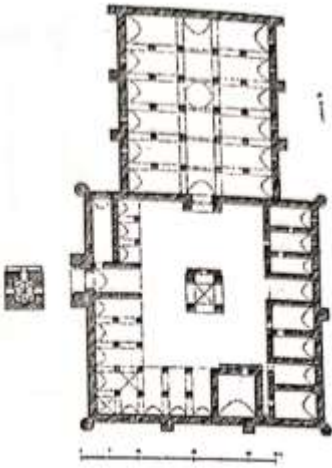
- استفاده از حیاط مرکزی به‌عنوان هسته اصلی سازمان فضایی در کاروانسراهای حیاط‌دار.
- استفاده از رواق در پیرامون میانسرا و ایجاد ارتباط میان فضاهای اقامتی و خدماتی.
- استفاده از قوس‌ها و طاق‌نماهای تزئینی در پیرامون حیاط مرکزی.
- در برخی نمونه‌ها، استقرار مسجد کوشکی در مرکز حیاط؛ این عنصر به‌صورت یک فضای مستقل و شاخص در میانه میانسرا قرار می‌گیرد و از ویژگی‌های قابل توجه برخی کاروانسراهای سلجوقی آناتولی است.
- تفکیک فضاهای اقامتی و خدماتی و ایجاد فضاهایی متناسب با شرایط اقلیمی متفاوت.

د) ویژگی‌های تزئینی

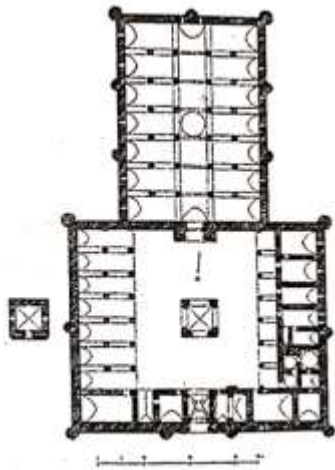
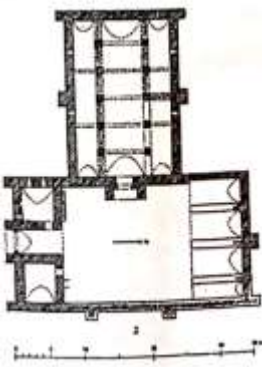
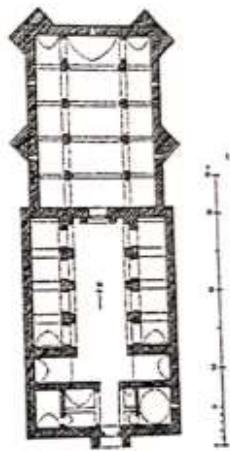
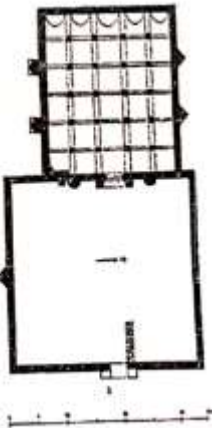
- استفاده از نقوش گیاهی و جانوری در حجاری‌های سنگی.
- به‌کارگیری نقوش و پیکره‌های شیر و سر شیر در تزئینات برخی بناها.
- استفاده از سر اژدها به‌عنوان یکی از موتیف‌های تزئینی در حجاری‌های سنگی.
- وجود نقوش جانوری و نمادین در سردرها، قاب‌های سنگی و سایر عناصر معماری.
- استفاده از تضاد رنگی سنگ‌های روشن و تیره در برخی نماها، به‌ویژه در سردر و ورودی.

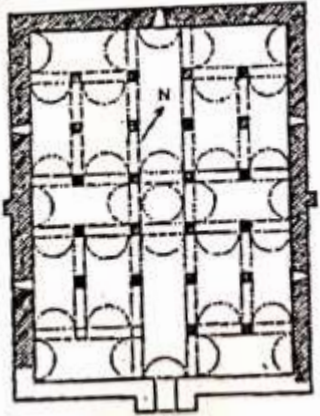
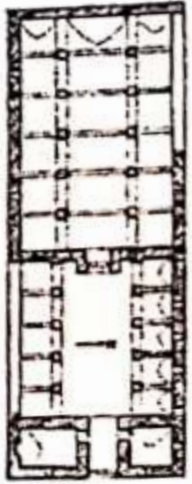
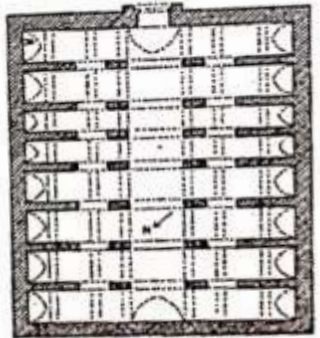
جدول ۲- نمونه کاروانسراهای سلجوقی آناتولی (هیلن براند، ۱۳۸۹)

ردیف	نام کاروانسرا	تصویر
۱	کاروانسرای ساراپاسا	
۲	کاروانسرای آلارا	

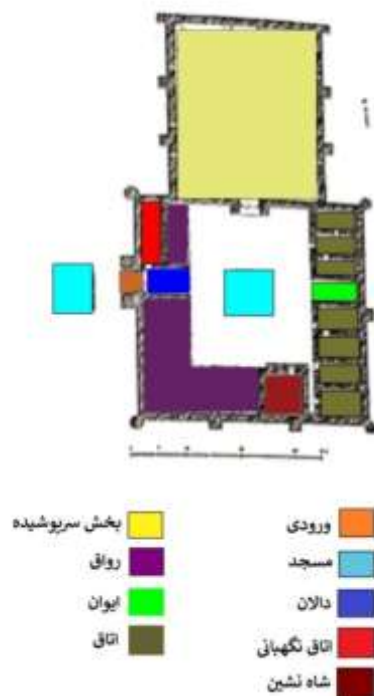
	کاروانسرای اودیر	۳
	قره تاي خان	۴
	اغزی قره خان	۵



	سلطان خان نزدیک قیصریه	۶
	کرشهر، کسبک کپری خان	۷
	ارتوقوش خان	۸
	چهارطاقی خان	۹

	اوره سن خان	۱۰
	قوری چشم خان	۱۱
	زیواریک خان	۱۲





تصویر ۱۱- جانمایی فضاها در یک نمونه از کاروانسراهای سلجوقی آناتولی

۳-۴- مقایسه عناصر معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی

مقایسه عناصر معماری کاروانسراهای سلجوقی نشان می‌دهد که در عین وجود یک «زبان مشترک» در ساختار کلی، تفاوت‌های اقلیمی، فرم کالبدی را تغییر داده است. در ایران، به دلیل اقلیم خشک، تمرکز بر حیاط‌های باز (صحن‌دار) و استفاده گسترده از آجرکاری و کاشی‌کاری برای تزئین است؛ اما در آناتولی، به دلیل سرمای شدید، بناها بیشتر درون‌گرا و با تالارهای سرپوشیده طراحی شده‌اند. از نظر مصالح نیز، در حالی که آجر در ایران عنصر اصلی است، در آناتولی سنگ تراشی و حجاری بر سنگ، جایگاه ویژه‌ای دارد. همچنین، پیش‌طاق در هر دو منطقه به عنوان عنصر شاخص حضور دارد، اما در آناتولی ابعاد عظیم‌تر و ساختاری سنگین‌تر برای مقابله با شرایط جوی دارد. در مجموع، این تفاوت‌ها نشان‌دهنده انطباق هوشمندانه الگوی معماری سلجوقی با شرایط محیطی دو منطقه است.

الف) دستگاه ورودی

- **سردر:** در کاروانسراهای سلجوقی ایران، سردر ورودی غالباً برجسته و یک‌طبقه است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی نیز سردر ورودی برجسته و در مواردی تخت است. کاروانسراهای سلجوقی ایران غالباً یک ورودی دارند و دو کاروانسرا بیش از یک ورودی و یک حیاط دارند که حیاط‌های اضافی، حیاط فرعی بوده و نقش شترخان را داشته‌اند (رابط دهچی مورچه‌خورت و رابط دیرکاج قم). کاروانسراهای سلجوقی آناتولی همگی یک ورودی دارند.
- **دالان:** در هر دو حوزه، دالان ورودی مستطیل و مربع‌شکل وجود دارد. کاروانسراهای سلجوقی آناتولی در مواردی فاقد دالان ورودی هستند.
- **هشتی:** عنصر هشتی غالباً در کاروانسراهای سلجوقی ایران دیده نمی‌شود و در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی اصلاً دیده نمی‌شود.
- **اتاق نگهبانی:** اتاق نگهبانی در تمام کاروانسراهای سلجوقی ایران دیده می‌شود و به‌صورت دو اتاق و در کنار دالان یا هشتی ورودی است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی نیز غالباً دیده می‌شود و به‌صورت تک‌اتاق در کنار ورودی است.



- **پیش‌طاق:** عنصر پیش‌طاق غالباً در هر دو حوزه قابل مشاهده است. عمق پیش‌طاق در کاروانسراهای سلجوقی ایران بیشتر از کاروانسراهای سلجوقی آناتولی است و گاهی دو سکوی پیرنشین در دو طرف پیش‌طاق در کاروانسراهای ایرانی طراحی می‌شده است. کاروانسراهای سلجوقی آناتولی در مواردی فاقد فضای پیش‌طاق هستند.
- **جلوخان:** عنصر جلوخان در کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی دیده نمی‌شود.
- **درگاه:** درگاه در اکثر قریب به اتفاق کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی دیده می‌شود و دو جرز در دو طرف درگاه غالباً وجود دارد.

ب) ایوان: کاروانسراهای سلجوقی ایران همگی ایوان‌دار هستند و غالباً یک‌بخشی و بدون پستو هستند. برخی از کاروانسراهای سلجوقی حیاط‌دار آناتولی فاقد ایوان هستند و یک‌بخشی‌اند و پستو ندارند. کاروانسراهای سرپوشیده و درون‌گرای آناتولی بدون ایوان هستند.

ج) اتاق: همه کاروانسراهای سلجوقی ایران اتاق دارند و فرم هندسی اتاق‌ها مستطیل کشیده و معمولی است. اتاق‌ها در کاروانسراهای ایرانی درگاه دارند و درگاه‌ها غالباً در میانه ضلع ورودی اتاق است. برخی از کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، چه حیاط‌دار، چه سرپوشیده و چه درون‌گرا، فاقد اتاق هستند. برخی از اتاق‌های کاروانسراهای سلجوقی آناتولی درگاه دارند، اما غالباً فاقد درگاه هستند و فرم هندسی اتاق‌ها مربع و مستطیل معمولی است. اتاق‌ها در کاروانسراهای آناتولی غالباً فاقد درگاه هستند.

د) رواق: نیمی از کاروانسراهای سلجوقی ایران رواق دارند و رواق‌ها به دو صورت سرتاسری، نیمه‌باز و کاملاً بسته هستند. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، رواق بیشتر به چشم می‌خورد و حضور پررنگ‌تری دارد و کاروانسراهای حیاط‌دار غالباً رواق دارند. رواق در کاروانسراهای آناتولی کاملاً باز است و برخلاف کاروانسراهای ایرانی، بسته و نیمه‌باز نیست.

ه) حیاط: همه کاروانسراهای سلجوقی ایران حیاط‌دار هستند و برخی از آن‌ها بیش از یک حیاط دارند. فرم هندسی حیاط به‌صورت مربع، مستطیل و چندضلعی است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، دو گونه حیاط‌دار و ترکیب حیاط‌دار و سرپوشیده وجود دارد و فقط یک و به‌ندرت بیش از یک حیاط دارند. فرم هندسی حیاط مربع یا مستطیل است.

و) شترخان: کاروانسراهای سلجوقی ایران غالباً شترخان دارند. فضاهای چهارصفه در گوشه‌های حیاط، دالان‌های پشت اتاق‌ها و حیاط‌های فرعی، نقش شترخان را داشته‌اند. برخی از کاروانسراهای سلجوقی آناتولی فاقد شترخان و اصطبل هستند. اما در بیشتر کاروانسراهای سلجوقی آناتولی شترخان و اصطبل نیز وجود داشته است. دالان‌های پشت اتاق‌ها، اتاق‌های گوشه حیاط و در گونه درون‌گرا، حلقه آخر و بیرونی و پشت بخش اقامتی، نقش شترخان و اصطبل را داشته است.

ز) مستراح: در کاروانسراهای سلجوقی ایران غالباً فاقد آبریزگاه یا مستراح بوده‌اند و در موارد اندک، در برج‌ها آبریزگاه‌هایی تعبیه می‌شده است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، فضای آبریزگاه در بیشتر کاروانسراها دیده می‌شود. جانمایی آبریزگاه غالباً در کنار ورودی و به دور از بخش اقامتی بوده است.

ح) حمام: در کاروانسراهای سلجوقی ایران حمام دیده نمی‌شود. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی حمام در بیشتر کاروانسراها دیده می‌شود.

ط) آب‌انبار: در کاروانسراهای سلجوقی ایران غالباً آب‌انبار مستقل در بیرون کاروانسرا، یا چاه آب در درون کاروانسرا، یا حوض آب در درون کاروانسرا، یا چشمه، قنات و نهر در نزدیکی کاروانسرا وجود دارد. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، چاه آب یا رودخانه یا چشمه‌ای در نزدیکی کاروانسرا قرار دارد.

ی) برج: کاروانسراهای سلجوقی ایران غالباً در گوشه‌های حصار بیرونی خود برج نگهبانی دارند. برج‌ها به شکل مدور یا چندضلعی هستند و توپر یا توخالی‌اند. کارکرد برج‌ها در کاروانسراهای ایرانی دفاعی، سازه‌ای و نمادین بوده است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، برج‌های نگهبانی کمتر دیده می‌شود و کارکرد برج‌ها بیشتر نمادین و سازه‌ای و کمتر دفاعی بوده است. فرم هندسی برج‌ها مربع، چندضلعی و مدور و به‌صورت توپر است.

ک) اتاق خدمه: در کاروانسراهای سلجوقی ایران اتاق مخصوص جهت اقامت خدمه وجود داشته است. جانمایی اتاق خدمه معمولاً در کناره‌ها و حاشیه‌ها و در مکان‌های فرعی بوده است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی نیز اتاق مخصوص برای خدمه وجود داشته است و جانمایی آن در مکان‌های فرعی بوده است.

ل) شاه‌نشین: در کاروانسراهای سلجوقی ایران، فضاهای چهارصفه در چهار گوشه حیاط، فضاهای چلیپاشکل در چهار گوشه حیاط، کوشک مرکزی در مرکز حیاط و یا ایوان‌ها نقش شاه‌نشین را داشتند. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، ایوان‌ها و اتاق‌های مخصوص و خصوصی در گونه درون‌گرا، نقش شاه‌نشین را داشتند.

م) ایوانچه مقابل اتاق: در کاروانسراهای سلجوقی ایران عنصر ایوانچه در مقابل اتاق وجود نداشته و اگر هم در نقشه‌ها دیده می‌شود، بعدها بدان افزوده شده است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی ایوانچه در مقابل اتاق‌ها اصلاً وجود ندارد.

ن) نمازخانه: در برخی از کاروانسراهای سلجوقی ایران، نمازخانه و مسجدی در گوشه‌های حیاط یا در کنار ورودی، به صورت شبستان ستون‌دار، وجود دارد. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی که اعیانی و مهم بوده‌اند، مسجد کوشک‌مانندی در مرکز حیاط، در کاروانسراهای حیاط‌دار، دیده می‌شود. در غیر این صورت، نمازخانه‌ای در گوشه‌ای از حیاط تعبیه می‌شده است.

س) ایوانچه بیرونی: در کاروانسراهای سلجوقی ایران، ایوانچه بیرونی غالباً وجود ندارد و در صورت وجود، بعداً به بنا الحاق شده است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی ایوانچه بیرونی اصلاً دیده نمی‌شود.

ع) تزیینات: کاروانسراهای سلجوقی ایران غالباً فاقد تزیینات وابسته به معماری هستند (به‌استثنای رباط شرف خراسان و رباط ماهی). تزیینات به‌کاررفته در آن‌ها، نقوش گیاهی و هندسی و خوشنویسی است و از جنس گچ و آجر است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی تزیینات بیشتر دیده می‌شود. نقوش به‌کاررفته در آن‌ها گیاهی و حیوانی است و غالباً از سنگ است.

ف) سلسله‌مراتب دسترسی: در کاروانسراهای سلجوقی ایران، سلسله‌مراتب دسترسی غالباً شامل پیش‌طاق، درگاه، دالان، ایوان و رواق است. در کاروانسراهای سلجوقی آناتولی، سلسله‌مراتب دسترسی شامل پیش‌طاق، درگاه، دالان و رواق است. سلسله‌مراتب دسترسی در کاروانسراهای سلجوقی ایران پیچیده و کامل‌تر است.

۵- بحث

کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی هر دو بر پایه الگوی حیاط مرکزی (صحن‌دار) و با هدف تثبیت شبکه تجاری جاده ابریشم طراحی شده‌اند. از منظر کالبدی، هر دو جریان از سیستم‌های سازه‌ای مشابه مانند طاق‌ها و گنبدها بهره برده و بر «پیش‌طاق» (پشت‌طاق) به عنوان شاخص‌ترین عنصر معماری ورودی تأکید دارند. رعایت فواصل جغرافیایی معادل یک منزل روزانه و تفکیک فضای زیستی مسافران از محل نگهداری چارپایان، از وجوه عملکردی مشترک و بنیادین آن‌هاست. این شباهت‌ها نشان‌دهنده «زبان معماری واحد» در تمدن سلجوقی است که نیازهای لجستیکی تجارت فرامرزی را با هویت هنری یگانه پاسخ داده است.

۵-۱- شباهت‌های کاروانسراهای سلجوقی ایران با کاروانسراهای سلجوقی آناتولی

وجوه مشترک فرهنگی، مذهبی، تجاری، سیاسی و فنی در حوزه تمدنی ایران و آناتولی سبب پدیدارشدن مفاهیم و الگوهای مشترک معماری کاروانسراهای این دو حوزه شده است. نزدیکی و داشتن مرکز مشترک میان این دو حوزه تمدنی - جغرافیایی، دادوستد و ردوبدل کردن دانش‌ها و مفاهیم، باعث به‌وجودآمدن الگوهای شبیه‌به‌هم شده است. وجود عناصر و اجزای مشترک در کاروانسراها، همانند اتاق، اصطبل، مسجد، آبریزگاه و شاه‌نشین، سبب پدیدارشدن الگوهای مشابه شده است. مسیرهای فرهنگی و اجتماعی مشترک، همانند جاده ابریشم، به‌مثابه قلب تپنده حیات اقتصادی و فرهنگی منطقه، نیز در شکل‌گیری کاروانسراهای شبیه‌به‌هم نقش زیادی داشته است. بررسی ویژگی‌های معماری کاروانسراهای دو حوزه مورد مطالعه نشان می‌دهد که با وجود تفاوت‌های اقلیمی، جغرافیایی، تاریخی و فرهنگی، در ساختار کالبدی و سازمان فضایی آن‌ها شباهت‌های قابل‌توجهی وجود دارد. این شباهت‌ها را می‌توان در چند محور اصلی شامل فرم و هندسه، سازمان فضایی و عملکردی، عناصر کالبدی و معماری، سازه و فنون ساخت و عناصر اقلیمی دسته‌بندی کرد.

الف) فرم و هندسه

- فرم کلی کاروانسراها عمدتاً مربع و مستطیل‌شکل است.
- حیاط مرکزی در اغلب نمونه‌ها دارای فرم هندسی چهارگوش است.
- اتاق‌های پیرامون حیاط نیز عمدتاً دارای فرم مربع و مستطیل‌شکل هستند.
- سازمان کلی بنا بر پایه یک هندسه منظم و محوری شکل گرفته و فضاها حول حیاط مرکزی سازمان‌دهی شده‌اند.



ب) سازمان فضایی و عملکردی

- در هر دو حوزه، اتاق‌هایی برای اقامت و استقرار مهمانان و خدمه پیش‌بینی شده است.
- رواق پیرامون حیاط مرکزی در بخش قابل‌توجهی از کاروانسراها وجود دارد و به‌عنوان فضای ارتباطی و واسط میان حیاط و اتاق‌ها عمل می‌کند.
- فضای اختصاص‌یافته به شترخان و اصطبل از اجزای مهم سازمان فضایی کاروانسراهاست.
- شاه‌نشین به‌عنوان فضای ویژه برای افراد خاص و مهمانان ممتاز در برخی نمونه‌ها پیش‌بینی شده است.
- نمازخانه نیز در ساختار فضایی کاروانسراهای هر دو حوزه مشاهده می‌شود.
- شترخان و اصطبل در بسیاری از نمونه‌ها در آخرین حلقه فضایی کاروانسرا قرار گرفته و از فضاهای اقامتی و عمومی تفکیک شده‌اند.

ج) عناصر کالبدی و معماری

- ورودی کاروانسراها غالباً دارای تأکید کالبدی و برجسته‌بودن نسبت به بدنه بنا است.
- ارتفاع و تناسب ورودی معمولاً به‌گونه‌ای است که ارتفاع آن از فضاها و بخش‌های مجاور بیشتر بوده و بدین ترتیب بر ورودی تأکید می‌شود.
- استفاده از پشت‌بند در حصار و دیوارهای بیرونی از دیگر ویژگی‌های مشترک است که علاوه بر نقش سازه‌ای، به تقویت و استحکام دیوارهای پیرامونی کمک می‌کند.
- استفاده از طاق‌نماهای کاذب در نمای بناها و دیوارهای داخلی یا خارجی از دیگر عناصر مشترک در معماری دو حوزه است.

د) سازه و فنون ساخت

- استفاده از سنگ به‌عنوان یکی از مصالح اصلی در ساخت کاروانسراها در هر دو حوزه مشاهده می‌شود.
- در پوشش برخی فضاها و به‌ویژه گنبد‌ها، از فن گوشه‌سازی برای انتقال بار و تبدیل پلان چهارگوش به پایه مناسب برای اجرای گنبد استفاده شده است.
- بهره‌گیری از عناصر و روش‌های سازه‌ای متناسب با فرم هندسی بنا، موجب شکل‌گیری پوشش‌های مقاوم و پایدار در کاروانسراها شده است.

و) عناصر اقلیمی و تأمین نور و تهویه

- در کاروانسراهای هر دو حوزه، استفاده از هورنو در پوشش فضاها به‌منظور تأمین نور طبیعی و ایجاد تهویه طبیعی مشاهده می‌شود.
- هورنوها علاوه بر نقش نوررسانی، به تبادل و گردش هوا در فضاهای داخلی کمک کرده و بخشی از راهکارهای اقلیمی معماری کاروانسراها به‌شمار می‌روند.

در مجموع، شباهت‌های معماری کاروانسراهای دو حوزه را می‌توان در پنج محور اصلی فرم و هندسه، سازمان فضایی و عملکردی، عناصر کالبدی و معماری، سازه و فنون ساخت و عناصر اقلیمی خلاصه کرد. این اشتراکات نشان‌دهنده وجود یک الگوی عمومی در معماری کاروانسراهاست که در پاسخ به نیازهای مشترک عملکردی، امنیتی، اقامتی و اقلیمی شکل گرفته است؛ هرچند نحوه بروز و میزان تأکید بر هر یک از این ویژگی‌ها می‌تواند تحت تأثیر شرایط تاریخی، جغرافیایی و فرهنگی هر حوزه متفاوت باشد (تصویر ۱۲).



تصویر ۱۲- شباهت های کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی

۵-۲- تفاوت های کاروانسراهای سلجوقی ایران با کاروانسراهای سلجوقی آناتولی

تفاوت مؤلفه های اقتصادی، فرهنگی، سیاسی خرد و کلان نیز سبب پدیدارشدن الگوهای متفاوت و نامشابه شده است. همچنین، کوهستانی بودن بیشتر مناطق آناتولی در شکل گیری طرح های بدیع تأثیر مستقیم داشته است. وجود المان ها و موتیف های بومی در شکل گیری الگوهای تزئینی نیز تأثیرگذار بوده است. وجود مصالح غالباً سنگی و به صورت پاک تراش و هندسی و با بافت و رنگی متفاوت، سبب شکل گیری معماری متفاوت نیز شده است. نفوذ معماری رومی، ارمنی و سوری های در آناتولی از عوامل مهم دیگر در طراحی و طرح اندازی کاروانسراها شده است. بررسی تطبیقی کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی نشان می دهد که تفاوت های معماری آن ها در حوزه های مختلفی از جمله مصالح و فنون ساخت، فرم و عناصر کالبدی، سازمان فضایی و دسترسی، عناصر امنیتی و دفاعی، عناصر اقلیمی و تزئینات معماری قابل مشاهده است. مهم ترین این تفاوت ها عبارتند از:

الف) مصالح و فنون ساخت

- نوع و نحوه استفاده از سنگ در دو حوزه متفاوت است. در کاروانسراهای ایران، استفاده از قلوه سنگ و سنگ های با شکل هندسی نامنظم رواج بیشتری دارد، در حالی که در کاروانسراهای آناتولی استفاده از سنگ های پاک تراش و هندسی شاخص تر است.
- پوشش بام نیز در دو حوزه تفاوت دارد؛ در کاروانسراهای ایرانی عمدتاً از آجر و سنگ استفاده شده، در حالی که در نمونه های آناتولی، علاوه بر سنگ پاک تراش، پوشش های سربی نیز مشاهده می شود.
- دستگاه پله در کاروانسراهای ایرانی عمدتاً با استفاده از سنگ و آجر ساخته شده است، در حالی که در کاروانسراهای آناتولی استفاده از سنگ پاک تراش و در برخی نمونه ها پلکان فلزی معلق مشاهده می شود.

ب) فرم و عناصر کالبدی

- شکل پشت بندها در دو حوزه متفاوت است؛ در کاروانسراهای ایران، پشت بندها غالباً نیم دایره ای هستند، در حالی که در نمونه های آناتولی شکل پشت بندها بیشتر مربع یا مثلثی است.
- نوع قوس ها نیز از تفاوت های قابل توجه است. در کاروانسراهای ایرانی استفاده از قوس های جناغی غالب است، در حالی که در کاروانسراهای آناتولی قوس های رومی نیز کاربرد قابل توجهی دارند.
- در کاروانسراهای آناتولی، فضای ورودی از نظر تزئینات معماری غنی تر است و عناصری مانند مقرنس کاری در سردرها و ورودی ها بیشتر دیده می شود.



- اتاق‌های کاروانسراهای آئاتولی در اغلب موارد فاقد درگاه یا فضای واسط ورودی هستند و تنها در برخی الگوهای مرکزگرا، به‌ویژه در اتاق‌های خصوصی، درگاه مشاهده می‌شود.

ج) سازمان فضایی، دسترسی و سلسله‌مراتب

جانمایی نمازخانه در دو حوزه متفاوت است. در کاروانسراهای ایرانی، نمازخانه معمولاً در مجاورت ورودی یا در گوشه‌های حیاط قرار می‌گیرد؛ در حالی که در نمونه‌های آئاتولی، نمازخانه در مواردی در مرکز حیاط جانمایی شده است. سلسله‌مراتب دسترسی در کاروانسراهای ایرانی پیچیده‌تر و سازمان‌یافته‌تر است و تفکیک و کنترل دسترسی به فضاهای مختلف با دقت بیشتری صورت گرفته است.

بررسی پلان و نحوه دسترسی به فضاها نشان می‌دهد که حریمیت و حرمت‌گذاری فضایی در کاروانسراهای ایرانی اهمیت بیشتری داشته است. در کاروانسراهای سلجوقی ایران، مسیرهای دسترسی غالباً مستقیم و محوری هستند، در حالی که در کاروانسراهای سلجوقی آئاتولی، علاوه بر مسیرهای مستقیم، دسترسی‌های مورب نیز مشاهده می‌شود. اتاق‌ها و ایوان‌ها در هر دو حوزه غالباً هم‌تراز با سطح حیاط قرار گرفته‌اند؛ بنابراین، این ویژگی را می‌توان از اشتراکات سازمان فضایی دانست، نه تفاوت‌ها.

د) سازمان فضایی، تقارن و نسبت پر و خالی

چیدمان فضاهای پر و خالی در کاروانسراهای سلجوقی ایران عموماً حساب‌شده‌تر و منظم‌تر است. این ویژگی تا حد زیادی با تأکید بر تقارن، قرینگی و نظم محوری در پلان کاروانسراهای ایرانی ارتباط دارد. در مقابل، در برخی نمونه‌های آئاتولی، سازمان فضایی می‌تواند از تنوع بیشتری در نحوه استقرار عناصر و مسیرهای حرکتی برخوردار باشد و الزام به تقارن محوری به اندازه نمونه‌های ایرانی پررنگ نیست.

ه) امنیت و عناصر دفاعی

مؤلفه‌های امنیتی و دفاعی در کاروانسراهای سلجوقی ایران برجسته‌تر و پررنگ‌تر است و در سازمان کالبدی بنا نقش بیشتری دارد. برج‌های نگهبانی در بسیاری از کاروانسراهای آئاتولی حضور ندارند و در مواردی که دیده می‌شوند، نقش آن‌ها بیش از آنکه صرفاً دفاعی باشد، می‌تواند جنبه نمادین و سازه‌ای داشته باشد. در مقابل، وجود و تأکید بر عناصر دفاعی در نمونه‌های ایرانی را می‌توان در ارتباط با حصار، پشت‌بندها و برج‌ها و نحوه کنترل ورودی و دسترسی تحلیل کرد.

و) عناصر اقلیمی و تهویه

در نمای بیرونی حصار برخی کاروانسراهای آئاتولی، منفرجهایی برای تأمین نور و تهویه تعبیه شده است. این نوع بازوها در نمای بیرونی، از ویژگی‌هایی است که در مقایسه با نمونه‌های ایرانی تفاوت ایجاد می‌کند.

ز) تزئینات و بیان معماری

نوع و تنوع عناصر تزئینی در دو حوزه متفاوت است. در کاروانسراهای ایرانی، استفاده از موتیف‌های گیاهی و مضامین مذهبی غالب‌تر است، درحالی‌که در کاروانسراهای آئاتولی، علاوه بر نقوش گیاهی، استفاده از موتیف‌های حیوانی و انسانی نیز مشاهده می‌شود. از نظر میزان تأکید بر تزئینات، فضای ورودی کاروانسراهای آئاتولی معمولاً جلوه تزئینی بیشتری دارد و استفاده از عناصری همچون مقرنس، در شکل‌دهی به هویت بصری سردر نقش مهمی ایفا می‌کند. در مجموع، تفاوت‌های معماری کاروانسراهای سلجوقی ایران و آئاتولی را می‌توان در هفت محور اصلی شامل مصالح و فنون ساخت، فرم و عناصر کالبدی، سازمان فضایی و دسترسی، نظم هندسی و نسبت پر و خالی، امنیت و دفاع، عناصر اقلیمی و تزئینات معماری دسته‌بندی کرد. این تفاوت‌ها صرفاً حاصل تفاوت در شیوه ساخت نیستند، بلکه بازتابی از شرایط تاریخی، فرهنگی، اقلیمی، اجتماعی و امنیتی هر یک از دو حوزه به‌شمار می‌روند. در این میان، به نظر می‌رسد تأکید بیشتر بر تقارن و قرینگی، پیچیدگی سلسله‌مراتب دسترسی، توجه بیشتر به حریمیت و حرمت‌گذاری فضایی و پررنگ‌تر بودن مؤلفه‌های امنیتی و دفاعی از مهم‌ترین ویژگی‌های متمایزکننده کاروانسراهای سلجوقی ایران در مقایسه با نمونه‌های آئاتولی باشد (تصویر ۱۳).



تصویر ۱۳- تفاوت های کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی

۳-۵- مقایسه نتایج با ساختار دانش موجود

یافته های این پژوهش درباره معماری کاروانسراهای دوره سلجوقی ایران و آناتولی نشان می دهد که الگوی کاروانسرا در این دو حوزه، با وجود برخورداری از یک بنیان مشترک در سازمان فضایی، در نحوه شکل گیری هندسه پلان، سلسله مراتب فضایی، عناصر معماری، فنون ساخت و میزان تأکید بر مؤلفه های امنیتی و مذهبی تفاوت هایی اساسی دارد. از این منظر، یافته های پژوهش حاضر را می توان در امتداد مطالعات پیشین درباره معماری کاروانسراهای ایران و آناتولی قرار داد؛ با این تفاوت که در این پژوهش، این ویژگی ها نه به صورت منفرد، بلکه در ارتباط با یکدیگر و در قالب یک نظام تطبیقی و گونه شناختی بررسی شده اند.

یکی از مهم ترین یافته های پژوهش، تفاوت در میزان انتظام هندسی و تقارن پلان در دو حوزه است. بررسی نمونه های ایرانی نشان می دهد که سازمان فضایی بسیاری از کاروانسراهای سلجوقی بر پایه محورهای اصلی و فرعی، مرکزیت حیاط و تکرار منظم عناصر پیرامونی شکل گرفته است. قرارگیری ایوان ها، اتاق ها و رواق ها در جبهه های مختلف حیاط، در بسیاری از نمونه ها تابع نظم محوری و قرینه است. در مقابل، در نمونه های آناتولی، اگرچه حیاط مرکزی و سازمان دهی درون گرا همچنان نقش مهمی دارند، اما میزان تقارن و استمرار محورهای هندسی به اندازه نمونه های ایرانی نیست و در برخی نمونه ها مسیرهای حرکتی و استقرار فضاها از انعطاف بیشتری برخوردارند.

این یافته را می توان در ارتباط با مطالعاتی دانست که حیاط مرکزی، سازمان درون گرا و نظم هندسی را از ویژگی های بنیادی معماری کاروانسراهای ایرانی معرفی کرده اند. با این حال، نتیجه پژوهش حاضر نشان می دهد که این نظم را نباید صرفاً به عنوان یک ویژگی شکلی تلقی کرد؛ بلکه تقارن و مرکزگرایی در کاروانسراهای ایرانی با سازمان دهی عملکردی، کنترل دسترسی، تفکیک فضاها و ایجاد سلسله مراتب فضایی ارتباط مستقیم دارد. بنابراین، هندسه پلان در این بناها نه تنها یک نظام زیبایی شناختی، بلکه ابزاری برای سازمان دهی عملکرد و کنترل حرکت نیز بوده است.

از سوی دیگر، مقایسه عناصر معماری نشان می دهد که زبان معماری کاروانسراهای ایرانی از تنوع بیشتری در ترکیب عناصر پیرامون حیاط برخوردار است. وجود چهار ایوان، رواق، فضاها چهارصفه و در برخی نمونه ها کوشک مرکزی، موجب ایجاد



نظامی متراکم و چندلایه در پیرامون حیاط شده است. در نمونه‌های آناتولی، رواق همچنان یکی از عناصر مهم سازمان فضایی است، اما برخی از عناصر شاخص معماری ایرانی، از جمله کوشک مرکزی و فضاهای چهارصفه، حضور بسیار محدودتری دارند. همچنین، در برخی نمونه‌های آناتولی، «مسجد-کوشک» جایگزین یا صورت متفاوتی از عنصر مرکزی شده است. این تفاوت نشان می‌دهد که اگرچه اصل حیاط مرکزی در هر دو حوزه مشترک است، محتوای عملکردی و مذهبی فضای مرکزی یکسان نبوده است.

از منظر مصالح و فنون ساخت نیز یافته‌های پژوهش نشان‌دهنده یک تفاوت منطقه‌ای روشن است. در نمونه‌های ایرانی، استفاده از آجر، قلوه سنگ و سنگ‌های با شکل نامنظم، در کنار روش‌های متنوع پوشش و طاق‌زنی، بیانگر بهره‌گیری از مصالح در دسترس و سنت‌های ساخت بومی است. در مقابل، در کاروانسراهای آناتولی، سنگ پاک‌تراش نقش برجسته‌تری در ساخت بدنه و عناصر معماری دارد. این تفاوت با ویژگی‌های معماری تاریخی هر دو منطقه و سنت‌های ساخت آن‌ها قابل تبیین است. بنابراین، همانند آنچه در مطالعات پیشین درباره تفاوت‌های معماری ایران و آناتولی مطرح شده است، مصالح را نمی‌توان صرفاً یک انتخاب فنی دانست؛ بلکه نوع مصالح و شیوه اجرای آن‌ها بخشی از هویت معماری منطقه‌ای کاروانسراها را شکل داده است. یکی دیگر از نتایج قابل توجه پژوهش، تفاوت در سازمان‌دهی دسترسی و میزان تأکید بر حریمیت و کنترل فضایی است. در نمونه‌های ایرانی، دستگاه ورودی و ارتباط آن با دالان، ایوان، اتاق‌ها، شترخان و سایر فضاها از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. این امر موجب ایجاد سلسله‌مراتب مشخصی میان فضای بیرون، ورودی، حیاط و فضاهای اقامتی و خدماتی می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش در پاسخ به پرسش نخست نشان می‌دهد که شکل‌گیری گونه‌های معماری کاروانسراها حاصل تعامل عوامل تاریخی، فرهنگی، اجتماعی، سیاسی، مذهبی، اقلیمی، اقتصادی، امنیتی و فنی-سازه‌ای بوده است. ارتباطات تاریخی ایران و آناتولی، به‌ویژه در بستر جاده ابریشم و راه‌های تاریخی، زمینه انتقال و تبادل دانش و فنون معماری و شکل‌گیری برخی الگوهای مشترک را فراهم کرده است؛ درحالی‌که تفاوت‌های جغرافیایی، اقلیمی، فرهنگی و اجتماعی هر حوزه موجب شکل‌گیری ویژگی‌های متفاوت در سازمان فضایی و کالبدی کاروانسراها شده است.

در پاسخ به پرسش دوم، مطالعه تطبیقی کاروانسراهای سلجوقی ایران و آناتولی نشان داد که مهم‌ترین وجوه اشتراک آن‌ها شامل فرم و هندسه چهارگوش، حیاط مرکزی، رواق، فضاهای اقامتی، شترخان و اسطبل، ورودی شاخص و الگوی درون‌گراست. تفاوت‌ها عمدتاً در میزان تقارن و قرینگی، ترکیب عناصر فضایی، نحوه سازمان‌دهی دسترسی، مصالح و فنون ساخت، جانمایی عناصر مذهبی و نوع و میزان تزئینات دیده می‌شود. در نمونه‌های ایرانی، نظم هندسی، سلسله‌مراتب فضایی و مؤلفه‌های امنیتی برجسته‌تر و در نمونه‌های آناتولی، استفاده از سنگ پاک‌تراش و تأکید بر عناصر مذهبی و تزئینی، به‌ویژه در ورودی‌ها، شاخص‌تر است. بنابراین، بخشی از عناصر دو حوزه دارای اشتراکات کالبدی، فضایی و عملکردی و بخشی متأثر از شرایط تاریخی، فرهنگی، اقلیمی و شیوه‌های ساخت منطقه‌ای است که شناخت آن‌ها به تبیین ساختار و روند تحول کاروانسراها کمک می‌کند.

مهم‌ترین محدودیت پژوهش، تفاوت در میزان و کیفیت اسناد تاریخی، نقشه‌ها، مدارک معماری، گزارش‌های باستان‌شناسی و مستندات مرمتی دو حوزه و نیز تخریب، تغییر کاربری، الحاقات، بازسازی و مداخلات مرمتی در برخی بناهاست؛ ازاین‌رو، وضعیت موجود همیشه با شکل اولیه بنا یکسان نیست و استفاده هم‌زمان از شواهد کالبدی، اسناد تاریخی و مطالعات پیشین ضروری بوده است. همچنین، گستردگی جغرافیایی نمونه‌ها و تفاوت شرایط تاریخی، اقلیمی و فرهنگی، تعمیم نتایج به تمامی کاروانسراهای ایران و آناتولی را محدود می‌کند.

یافته‌های پژوهش می‌تواند در مستندسازی، آسیب‌شناسی، حفاظت و مرمت، ایجاد پایگاه‌های اطلاعاتی، تدوین دستورالعمل‌های حفاظتی، شناسایی ارزش‌های کالبدی و فضایی و تعیین اولویت‌های مداخله به کار رود. مقایسه نمونه‌های هم‌دوره و هم‌گونه، به‌ویژه در موارد فقدان یا تغییر عناصر، می‌تواند به شناخت احتمالی عناصر، روابط فضایی و کارکردهای ازدست‌رفته و تصمیم‌گیری مرمتی کمک کند؛ بااین‌حال، هرگونه بازسازی باید بر پایه شواهد تاریخی و کالبدی همان بنا و اصول حفاظت و مرمت باشد. شناخت تفاوت‌های منطقه‌ای نیز از بازسازی‌های غیرمستند و تعمیم الگوهای مرمتی یک منطقه

به منطقه دیگر جلوگیری می‌کند. این یافته‌ها همچنین در حوزه‌های معماری، معماری اسلامی، مرمت، تاریخ معماری و مطالعات میراث فرهنگی و در شناخت ارتباط کاروانسراها با شبکه‌های تاریخی ارتباطی و فرهنگی کاربرد دارد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با بررسی نمونه‌های بیشتر در ایران، آناتولی و سایر حوزه‌های مرتبط، بر مصالح، سازه، فنون ساخت، پوشش‌ها، جزئیات اجرایی، گونه‌شناسی پلان، سازمان فضایی، سلسله‌مراتب دسترسی و مؤلفه‌های امنیتی تمرکز کنند و از فناوری‌هایی مانند فتوگرامتری، اسکن لیزری و اچ.بی.آی.ام. برای مستندسازی دقیق‌تر بهره گیرند. همچنین، بررسی تحولات کاروانسراها در طول زمان و تأثیر عوامل اجتماعی، اقتصادی، مذهبی، سیاسی و فناوری، مطالعه رابطه کاروانسرا با راه‌های تاریخی، سکونتگاه‌ها، منابع آب، پل‌ها و بازارها در مقیاس منظر فرهنگی، و تدوین چارچوبی برای استفاده از مطالعات تطبیقی در تصمیم‌گیری‌های مرمتی ضروری است. در مجموع، مطالعه تطبیقی کاروانسراهای ایران و آناتولی نشان می‌دهد که مقایسه نمونه‌های هم‌دوره و هم‌گونه، ضمن آشکارساختن اشتراکات و تفاوت‌های معماری، ابزاری مؤثر برای شناخت، تفسیر و حفاظت از میراث کاروانسرای است؛ مشروط بر آنکه نتایج تطبیقی در کنار اسناد تاریخی، مستندات معماری و داده‌های باستان‌شناختی هر بنا قرار گیرد و از بازسازی‌های صرفاً قیاسی و فاقد پشتوانه مستند پرهیز شود.

حامیان مالی: مقاله حامی مالی و معنوی نداشته است.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسنده اعلام می‌دارد که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای نویسنده وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسنده اعلام می‌کند که از هوش مصنوعی GapGPT برای ویرایش متن مقاله استفاده شده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله بر عهده نویسنده است. **قدردانی:** از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاس‌گزاری می‌کنم.

منابع

- احسانی، محمدتقی. (۱۳۸۱). *یادی از کاروانسراها، رباط‌ها و کاروان‌ها در ایران* (چاپ اول). تهران: انتشارات امیرکبیر.
- پیرنیا، محمدکریم. (۱۳۷۸). *آشنایی با معماری اسلامی ایران*. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران. <https://lib.ut.ac.ir/site/catalogue/510637>
- پیرنیا، محمدکریم، افسر، کرامت اله. (۱۳۵۰). *راه و رباط*. تهران: سازمان ملی حفاظت آثار باستانی ایران. <https://lib.ut.ac.ir/site/catalogue/421804>
- خاقانی، راضیه، شانواز، بلال. (۱۳۹۴). *کاروانسراهای ایران زمین*. تهران: پازینه.
- خسروی جاوید، تورج، ولی بیگ، نیما. (۱۴۰۳). مطالعه مقایسه‌ای کاروانسراهای قلعه‌سنگی، رباط کریم و حاج کمال در مسیر جاده ابریشم در جهت ارائه راهکاری برای بازایی بخش‌های از دست‌رفته. *فصلنامه مکتب احیا*، ۳(۳)، ۱۷-۶. <http://jors-sj.com/article-1-28-en.html>
- خسروی جاوید، تورج، ناسخیان، شهریار، جیحانی، حمیدرضا. (۱۴۰۴). گونه‌شناسی کالبدی فضایی کاروانسراهای برون شهری شبکه راه تاریخی اصفهان به ری و ساوه بر پایه ترکیب بندی فضایی پلان معماری، *فصلنامه نقش جهان*، ۱۵ (۱)، ۸۴-۴۹.
- سیرو، ماکسیم. (۱۳۵۷). *راه‌های باستانی ناحیه اصفهان و بناهای وابسته آنها*. (محمد مشایخی، مترجم). تهران: انتشارات سازمان ملی حفاظت آثار باستانی ایران. <https://lib.ut.ac.ir/site/catalogue/217590>
- سیرو، ماکسیم. (۱۳۲۸). *کاروانسراهای ایران و ساختمان‌های کوچک میان راه‌ها*. (عیسی بهنام، مترجم). تهران: انتشارات سازمان ملی حفاظت آثار باستانی ایران. <https://lib.ut.ac.ir/site/catalogue/217590>
- کاویان، مجتبی، غلامی، غلامحسین. (۱۳۹۵). بررسی سیر تحول معماری کاروانسراهای حیاط دار مرکز ایران، *فصلنامه اثر*، ۷۵، ۶۶-۴۹. <https://journal.richt.ir/athar/article-1-717-fa.html>
- کیانی، محمد یوسف، کلایس، ولفرام. (۱۳۷۳). *کاروانسراهای ایران*. تهران: سازمان میراث فرهنگی. <https://lib.ut.ac.ir/site/catalogue/217590>
- وحدت پور، شعله، ولی بیگ، نیما، رحیمی، افروز. (۱۳۹۸). مطالعه مقایسه‌ای کاروانسراهای درون شهری و برون شهری اصفهان در گستره کالبد معماری. *مجله هویت شهر*، ۳۹ (سال سیزدهم)، ۱۰۳-۱۱۶.
- نیستانی، جواد، تاتاری، مهدی. (۱۳۹۳). مطالعه عناصر معماری فضاهای ورودی: موارد بررسی: کاروانسراهای صفوی خراسان رضوی. *مجله پیام باستان شناس*، ۲۱ (سال یازدهم).
- وثیق، بهزاد، امینی فارسانی، زهرا، ناصری، حسین. (۱۴۰۰). مقایسه تطبیقی تناسبات حاکم بر معماری کاروانسراهای حیاط دار مناطق

مرکزی ایران در دوره‌های صفویه و قاجاریه. نشریه مرمت و معماری ایران، ۲۷ (سال یازدهم)، ۶۵-۷۸.
هیلن براند، رابرت. (۱۳۸۹). معماری اسلامی (باقر. آیت‌الله‌زاده شیرازی، مترجم؛ چاپ پنجم). تهران: روزنه.

<https://lib.ut.ac.ir/site/catalogue/510865>.

- Buyukimhci, G. (2012). Carvanserais: The Architectural Treasures of Silk Road and the case of Kayseri Sultan Hani. Nishinomiya: 2th International. Conference, Mukogava. pp. 389-384.
- Blair, S., & Bloom, J. (1994). The Art and Architecture of Islam 1250-1800. Yale University Press.
- Darendeli, T., & Binan, C.Ş. (2021). Seljuks inherit to Anatolia; Caravanserais. *Athens Journal of Architecture*, 7, pp. 137-172.
- Grabar, O. (1990). *The Architecture of the Islamic West: Third to Eighteenth Century*. Princeton University Press.
- The Iranian Ministry of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts. (2021). *Nomination of The Persian Caravanserai for Inscription on the World Heritage List*. Tehran. Unesco World Heritage Center. <https://whc.unesco.org/en/list/1668>.
- Payaslı Oğuz, G., & Kakdas Ateş, D. (2025). Remains of a caravanserai from the seljuk period: adiyaman damlacik caravanserai. *TÜBA-KED Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi*, 31, 93-105. <https://doi.org/10.22520/tubaked.1509026>





eISSN:2980-9673

The Art of Green Management

Homepage: <https://agm.journal.art.ac.ir/>



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Re-reading the Architecture of Traditional Iranian Houses with a Strategic Design Approach (A Study of Prominent Houses in the Hot and Arid Climate)

Mostafa Kiani ^{(1)*} , Fatemeh Khosravi ⁽²⁾ 

1. Associate Professor, Department of Interior Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0000-0002-4492-9482>)

2. Master's student in Iranian Architectural Studies, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0009-0003-9068-1048>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 02/10/2025 Revised: 05/11/2025 Accepted: 07/11/2025 PP. 113-132 Keywords: Value Creation, Environmental Sustainability, Privacy, Traditional Iranian House, Strategic Design, Hospitality, Spatial System.  Use your device to scan and read the article online	Introduction: Traditional Iranian architecture is the product of accumulated collective knowledge, historical experience, and adaptation to environmental and socio-cultural conditions. In traditional Iranian houses, spatial organization integrated cultural values, social relations, psychological needs, and climatic requirements into a coordinated system. However, much existing interpretation has concentrated on physical features and formal characteristics, while the strategic logic underlying spatial configurations has received less systematic attention. This has encouraged the reproduction of visible historical elements in contemporary architecture without sufficient understanding of the principles that generated them. The present study addresses this gap by reconsidering traditional Iranian houses through a strategic design perspective. It interprets architectural elements as deliberate spatial responses to objectives such as privacy, hospitality, social organization, environmental sustainability, and resource management. The central problem is how traditional Iranian architecture can be reinterpreted beyond imitation of historical forms toward identifying and translating its underlying principles and decision-making logic. The Purpose of the Research: The main purpose is to develop a conceptual model explaining the relationships among strategic objectives, design strategies, and architectural elements in prominent traditional Iranian houses in the hot and arid climate. The study identifies the strategic objectives guiding traditional residential design, examines the strategies used to achieve them, and clarifies how architectural elements embodied multiple functions simultaneously. It particularly examines privacy and hospitality as strategic objectives that actively shaped spatial organization rather than as cultural characteristics expressed after the formation of space. A further purpose is to derive practical lessons for contemporary Iranian architecture by translating traditional design logic into flexible principles instead of reproducing historical forms literally. The study therefore shifts interpretation from asking only “how” spaces were arranged toward understanding “why” they were arranged and “for what purpose.” Methodology: The research adopts a qualitative and conceptual approach and applies an analytical-strategic method. Data were collected through rereading and analyzing historical-spatial evidence related to traditional Iranian houses and previous studies concerning privacy, spatial organization, hospitality, social relations, climatic adaptation, and sustainability. The study focuses on prominent houses in Isfahan, Yazd, and Shiraz within the hot and arid climatic zone. Analysis was conducted in three stages: identifying values and strategic objectives; extracting corresponding design strategies; and linking these strategies to architectural elements and their multiple functions. The theoretical interpretation combines sustainable strategic planning with design thinking to examine traditional

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	architecture as an integrated and goal-oriented process. Because the research is qualitative and conceptual, it does not claim quantitative measurement of thermal or behavioral performance. The resulting framework is instead proposed as a conceptual model for interpreting traditional architecture and informing contemporary design. Findings and Discussion: The findings show that the spatial organization of traditional Iranian houses cannot be explained by a single functional, formal, or climatic factor. Their design logic results from the integration of several strategic objectives. Four major strategic directions were identified: inward orientation, controlled entrances, the public-private system of biruni and andaruni, and environmental and energy sustainability. Inward orientation functioned as a comprehensive strategy for protecting privacy and establishing spatial hierarchy. Organizing spaces around a central courtyard while limiting direct visual relationships with the street created a protected interior domain and enabled controlled access to light, air, vegetation, and water. Controlled entrances strengthened privacy by transforming access into a gradual process. The hashti and indirect passages acted as physical and visual filters, preventing immediate exposure of private areas and regulating movement between public and private domains. Entrance design therefore operated as a proactive strategy for preventing unwanted visual intrusion, rather than merely facilitating circulation. The distinction between andaruni and biruni was a fundamental strategy for managing social relations and user experience. It enabled the simultaneous protection of family privacy and provision of appropriate spaces for guests. The private realm supported family life and seclusion, whereas the public realm structured hospitality without disrupting the household. Hospitality was organized through differentiated spaces, controlled access, and attention to the visitor experience. Within the private realm, the sanduq-khaneh provided a fine-grained response to privacy and psychological needs by offering a secluded place for rest, worship, contemplation, and storage of personal belongings. Environmental sustainability and energy management formed the fourth strategic direction. Traditional houses responded to the hot and arid climate through an interconnected system rather than a single device. The orientation and seasonal zoning of spaces around the courtyard supported shading, ventilation, solar adaptation, and thermal moderation. Courtyards, iwans, ravaqs, windcatchers, water features, and subterranean spaces worked together to create favorable microclimatic conditions and reduce dependence on non-renewable energy. The central courtyard was especially important because it connected environmental and social strategies: it supported family interaction and hospitality while contributing to daylight, natural ventilation, shading, humidity regulation, and thermal comfort. Iwans and semi-open spaces also acted as climatic and visual filters. The findings demonstrate that architectural elements frequently performed several strategic tasks simultaneously. The hashti and entrance passage could regulate access, protect privacy, manage social interaction, and moderate light and climate, while the courtyard could support inward orientation, social cohesion, hospitality, and environmental performance. Thus, the principal advantage of traditional architecture lies in the integration of strategies and its capacity to address multiple objectives through coordinated spatial decisions. Conclusion: The study concludes that traditional Iranian houses can be understood more effectively as integrated, goal-oriented systems rather than collections of historical forms. Its main contribution is a three-level conceptual model linking strategic objectives, design strategies, and architectural elements. Privacy and spatial hierarchy, social relationship management and hospitality, and environmental sustainability and energy management emerge as major strategic concerns, while architectural elements are interpreted as physical instruments for realizing them. The strength of traditional Iranian architecture therefore lies not in reproducing specific forms, but in the capacity of its spatial system to respond simultaneously to cultural, social, psychological, and environmental requirements. This interpretation provides a basis for moving from form-based imitation toward strategy-based translation in contemporary architecture. The framework has implications for contemporary housing, architectural education, and human-centered urban planning. Spatial hierarchy, controlled access, flexible territorial boundaries, individual privacy, hospitality, and courtyard-based organization can be reinterpreted within modern housing without directly copying historical elements. The courtyard, for example, can be reconsidered as a contemporary organizing device supporting both environmental performance and social interaction, while layered access

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	can reinterpret traditional principles of privacy and territorial control. The study is limited to selected prominent houses in Isfahan, Yazd, and Shiraz and to the hot and arid climatic context; therefore, its conclusions should be generalized to other Iranian climatic regions with caution. Moreover, its qualitative and conceptual nature means that it does not include systematic quantitative measurements of thermal or behavioral performance, and the conceptual model has not been validated through field studies, resident interviews, or post-occupancy evaluation. Future research can test the framework through mixed-method studies, comparisons across different climatic regions, post-occupancy assessment of contemporary applications, and expert validation through Delphi studies or focus groups. Funding: There is no funding support. Authors' Contribution: Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. 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. AI Usage Declaration: The authors declare that the AI tools was not used. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the authors. Acknowledgments: We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

Highlight

- Traditional Iranian houses are interpreted as integrated strategic systems rather than collections of historical forms.
- A three-level model links strategic objectives, design strategies, and architectural elements.
- Privacy, hospitality, social management, and environmental sustainability are addressed through integrated spatial strategies.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Kiani, M., & Khosravi, F. (2025). Re-reading the Architecture of Traditional Iranian Houses with a Strategic Design Approach (A Study of Prominent Houses in the Hot and Arid Climate). *The Art of Green Management*, 3(3), 113-132. [10.30480/agm.2026.6557.1079](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6557.1079)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6557.1079>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1557.html

*. Corresponding Author (Email: kiani@art.ac.ir)/ (Phone: +982166722740)



بازخوانی معماری خانه‌های سنتی ایرانی با رویکرد طراحی راهبردی (مطالعه خانه‌های شاخص در اقلیم گرم و خشک)

دکتر مصطفی کیانی^{(۱)*}، فاطمه خسروی^(۲)

۱- دانشیار گروه معماری داخلی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0000-0002-4492-9482>
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مطالعات معماری ایران، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0009-0003-9068-1048>

ناشر: دانشگاه هنر ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶ صص: ۱۱۳-۱۳۲ واژگان کلیدی: ارزش آفرینی، پایداری محیطی، حریم خصوصی، خانه سنتی ایران، طراحی راهبردی، مهمان‌نوازی، نظام فضایی. 	مقدمه: معماری خانه‌های سنتی ایران حاصل تعامل دانش تجربی، ارزش‌های فرهنگی - اجتماعی و سازگاری با شرایط اقلیمی است. با وجود مطالعات متعدد، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین بر توصیف کالبد و فرم متمرکز بوده و منطق راهبردی نهفته در سازمان فضایی این خانه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مسئله موجب شده است که در معماری معاصر، برخی عناصر سنتی بدون توجه به اصول و اهداف شکل‌دهنده آن‌ها بازتولید شوند. هدف پژوهش: پژوهش حاضر با هدف بازخوانی معماری خانه‌های سنتی ایران از منظر طراحی راهبردی و ارائه مدل مفهومی روابط میان اهداف راهبردی، راهکارهای طراحی و اندام‌های معماری انجام شده است. پژوهش در پی تبیین چرایی شکل‌گیری الگوهای فضایی و استخراج اصول قابل ترجمه برای معماری معاصر است. روش‌شناسی: این پژوهش از نظر رویکرد، کیفی و مفهومی و از نظر روش، تحلیلی - راهبردی است. داده‌ها از طریق بازخوانی شواهد تاریخی - کالبدی و مطالعات پیشین گردآوری و در چارچوب برنامه‌ریزی راهبردی و تفکر طراحی تحلیل شده‌اند. محدوده مطالعه شامل خانه‌های شاخص اصفهان، یزد و شیراز در اقلیم گرم و خشک است. فرایند تحلیل در سه مرحله شناسایی اهداف راهبردی، استخراج راهکارهای طراحی و پیوند آن‌ها با اندام‌های معماری انجام شد. یافته‌ها و بحث: نتایج نشان داد سازمان فضایی خانه‌های سنتی حاصل هم‌افزایی چهار راهبرد اصلی شامل درونگرایی، ورودی‌های کنترل‌شده، نظام اندرونی - بیرونی و پایداری محیطی و انرژی است. این راهبردها به‌ترتیب در حفظ حریمیت و سلسله‌مراتب فضایی، مدیریت دسترسی و دید، تنظیم روابط اجتماعی و مهمان‌نوازی، و پاسخگویی اقلیمی و مدیریت منابع نقش دارند. همچنین عناصری مانند حیاط مرکزی، هشتی، ایوان، صندوقخانه و بادگیر، به‌صورت هم‌زمان چند هدف فرهنگی، اجتماعی، روانشناختی و محیطی را محقق می‌کنند. نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌ها، مدل مفهومی «اهداف راهبردی، راهکارهای طراحی، اندام‌های معماری» می‌تواند مبنایی برای گذار از تقلید فرمی به ترجمه اصول معماری سنتی در طراحی معاصر باشد. این چارچوب، معماری سنتی را فرایندی هدفمند و یکپارچه برای خلق ارزش و مدیریت هم‌زمان حریم خصوصی، روابط اجتماعی و پایداری محیطی تبیین می‌کند.
نکات برجسته:	- خانه‌های سنتی ایران به‌مثابه نظام‌های یکپارچه و راهبردی، فراتر از مجموعه‌ای از فرم‌های تاریخی بازخوانی شده‌اند. - مدل مفهومی سه‌سطحی، اهداف راهبردی، راهکارهای طراحی و اندام‌های معماری را به یکدیگر پیوند می‌دهد. - حریم خصوصی، مهمان‌نوازی، مدیریت اجتماعی و پایداری محیطی از طریق راهکارهای فضایی یکپارچه تحقق یافته‌اند.

ارجاع به این مقاله: کیانی، مصطفی و خسروی، فاطمه. (۱۴۰۴). بازخوانی معماری خانه‌های سنتی ایرانی با رویکرد طراحی راهبردی (مطالعه خانه‌های شاخص در اقلیم گرم و خشک). هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۱۱۳-۱۳۲. [10.30480/agm.2026.6557.1079](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6557.1079)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6557.1079>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1557.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با

مجوز [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

قابل استفاده است.

©2024, UST. All rights reserved.

*. نویسنده مسئول (رایانامه: kiani@art.ac.ir) / (تلفن: +۹۸۲۱۶۶۷۳۲۷۴۰)

معماری خانه‌های سنتی ایرانی همواره به‌عنوان میراثی غنی از خلاقیت، خرد جمعی و انطباق با محیط ستوده شده است. با این حال، چنان، بیشتر مطالعات موجود به توصیف کالبد و فرم بسنده کرده‌اند و از شناسایی منطق راهبردی نهفته در پس این فرم‌ها غفلت نموده‌اند. این شکاف باعث شده است که در معماری معاصر، تنها به تقلید ظاهری از المان‌های سنتی پرداخته شود و هویت و اصول زیربنایی آنها نادیده گرفته شود و بخش عمده‌ای از مطالعات موجود، این معماری را در سطوح توصیفی کالبد و فرم بازنمایی کرده‌اند و از کشف نظام‌مند منطق راهبردی نهفته در پس این فرم‌ها بازمانده‌اند. این غفلت، به گسست رویکرد معاصر از اصول بنیادین طراحی بومی دامن زده است. مقاله حاضر با هدف پر کردن این خلأ، با رویکرد «طراحی راهبردی» به بازخوانی خانه‌های سنتی ایران می‌پردازد. بنابراین، مسئله اصلی این مقاله، شناخت و ارائه چارچوبی تحلیلی است که بتواند الگوهای فرهنگی-اجتماعی را نه به‌عنوان خروجی‌های صرف یک پیکربندی فضایی، بلکه به‌عنوان «اهداف راهبردی» اصلی در فرآیند طراحی بازشناسد. بر این اساس، پرسش اساسی مقاله چنین صورتبندی می‌شود: چگونه می‌توان معماری سنتی ایرانی را با رویکردی راهبردی بازخوانی کرد تا از تکرار فرم‌های ظاهری به درک و پیاده‌سازی اصول بنیادین آن گذار نمود؟ این رویکرد، تحلیل را از یک فرآیند صرفاً توصیفی به فرآیندی هدف‌محور تبدیل می‌کند.

هدف اصلی این مقاله، ترسیم یک «مدل مفهومی» از روابط میان اهداف راهبردی، راهکارهای طراحی و اندام‌های معماری در خانه‌های سنتی ایرانی است تا از این رهگذر، تحلیل این معماری از سطح توصیف «چگونه» به درک «چرایی» و «برای چه هدفی» تعمیق یابد. در راستای این هدف، مقاله در پی شناسایی اهداف راهبردی اصلی هدایت‌کننده فرآیند طراحی سنتی، تحلیل راهکارهای طراحی به‌کاررفته برای تحقق آنها، و استخراج اصول و درس‌آموخته‌هایی عملی برای معماری معاصر ایران است. این چارچوب تحلیلی، معماری را واجد مفهومی چندبعدی می‌داند که هم‌زمان واجد ابعاد تاریخی، مکانی، فرهنگی و معنایی است (صادقی پی، ۱۳۸۸) و بر آن است تا با خوانشی یکپارچه، الگویی برای «طراحی پاسخگو به فرهنگ» در آینده ارائه دهد. نوآوری پژوهش حاضر در ارائه خوانشی تحلیلی-راهبردی و صورت‌بندی یک مدل مفهومی سه‌سطحی است که اهداف راهبردی، راهکارهای طراحی و اندام‌های معماری را به یکدیگر پیوند می‌دهد. در این چارچوب، عناصر خانه سنتی صرفاً به‌عنوان اجزای کالبدی توصیف نمی‌شوند، بلکه به‌مثابه پاسخ‌هایی طراحی‌شده برای تحقق هم‌زمان اهداف فرهنگی، اجتماعی، روان‌شناختی و محیطی تفسیر می‌شوند. این صورت‌بندی، امکان انتقال اصول معماری سنتی از سطح تقلید فرم به سطح ترجمه راهبردها برای طراحی معاصر را فراهم می‌کند. بدین‌منظور، در ادامه مقاله، ابتدا چارچوب نظری «طراحی راهبردی» با جزئیات بیشتر بسط داده می‌شود، سپس بر اساس آن، اهداف راهبردی حاکم بر معماری سنتی و راهکارهای متناظر با آنها تحلیل می‌گردد. در گام بعدی، عناصر و اندام‌های معماری به‌مثابه تجسم کالبدی این راهکارها بررسی شده و در نهایت، دلالت‌های این بازخوانی برای سیاست‌ها و طراحی معماری معاصر مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۱- پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش در این مقاله در چهار حوزه اصلی دنبال می‌شود: نخست، مطالعات مرتبط با محرمیت و سازمان فضایی خانه‌های سنتی؛ دوم، پژوهش‌های مربوط به اندرونی، بیرونی و مهمان‌پذیری؛ سوم، مطالعات اقلیمی و پایداری محیطی در خانه‌های مناطق گرم و خشک؛ و چهارم، پژوهش‌های مرتبط با تفکر طراحی و برنامه‌ریزی راهبردی. مرور این حوزه‌ها نشان می‌دهد که هر یک از مطالعات موجود بخشی از رابطه میان فرهنگ، اجتماع، اقلیم و کالبد را توضیح داده‌اند، اما پیوند نظام‌مند این مؤلفه‌ها در قالب یک چارچوب «اهداف راهبردی-راهکارهای طراحی-اندام‌های معماری» کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

علی‌محمدی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای بر روی خانه‌های قزوین نشان دادند که ورودی‌های غیرمستقیم در دوره قاجار به‌تدریج حذف شده‌اند. همچنین، پژوهش‌های دیگری (مانند بیگدلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ باصولی و امیدواری، ۱۴۰۰) به توصیف کالبد و فرم پرداخته‌اند، اما ارائه چارچوبی تحلیلی که به‌طور نظام‌مند «راهبردهای طراحی» نهفته در پس این فرم‌ها را آشکار سازد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. غیبت چنین چارچوبی، پیامدی دوسویه داشته است: از یک سو، در مواجهه با چالش‌های معماری معاصر نظیر شهرنشینی سریع و نفوذ الگوهای مدرن، اصول بنیادین معماری سنتی عمدتاً در قالب «المان‌های ظاهری» و «پوسته» تقلید شده و از «هویت و اصول» زیربنایی آنها غفلت شده است. از سوی دیگر، این وضعیت شکافی فزاینده میان الزامات فرهنگی بومی و طرح‌های نو پدید آورده که به‌تبع آن، خانه‌ها از کارکرد فرهنگی و اجتماعی خود تهی شده‌اند.

این شکاف، صرفاً محصول طراحی معاصر نیست، بلکه ریشه در یک روند تاریخی دارد. مطالعات تطبیقی نشان می‌دهد که چگونه تغییرات فرهنگی در دوره‌های گذار، به‌ویژه از دوره قاجار به بعد، به‌تدریج اصول راهبردی طراحی را تقلیل داده است. برای نمونه،



پژوهش‌ها در شهر قزوین حاکی از آن است که هم‌زمان با افزایش روابط با غرب و تحولات فرهنگی از عصر ناصری، عناصر کلیدی حفظ حریم خصوصی در ورودی خانه‌ها -مانند هشتی و دالان‌های غیرمستقیم- به‌تدریج حذف شده و جای خود را به ورودی‌های مستقیم و فاقد حریم داده‌اند. این تغییر تدریجی، نقطه آغازین فاصله گرفتن از اصول یکپارچه‌نگر و حرکت به سمت تقلید صرف از فرم‌ها بوده است (علی‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). لازمه عملیاتی‌شدن این چارچوب راهبردی، تلفیق آن با «تفکر طراحی» است؛ تفکری که با عادت دادن ذهن به درگیری فعال با مسائل، به‌عنوان موتور محرک ایده‌پردازی و حل مسئله عمل می‌کند. در این تلفیق، «راهبرد» تعیین‌کننده «چرایی» و «اهداف» است و «تفکر طراحی»، «چگونگی» خلق راه‌حل‌های نوآورانه برای تحقق آن اهداف را فراهم می‌آورد.

۲- مبانی نظری

مبنای نظری این مقاله، بر دو مفهوم کلیدی «برنامه‌ریزی راهبردی» و «تفکر طراحی»^۱ استوار است. در ادبیات مدیریت، «برنامه‌ریزی راهبردی پایدار»^۲ رویکردی است که سازمان‌ها را قادر می‌سازد در شرایط عدم قطعیت، راهبردهایی پایدار و منعطف تدوین کنند (حنفی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵). این مفهوم، با تأکید بر تحلیل نظام‌مند محیط و تعیین اهداف کلان (کیانی، ۱۳۸۱)، چارچوبی برای درک نحوه مواجهه معمار سنتی با محدودیت‌ها و امکانات فراهم می‌آورد. در این منظر، معمار به‌مثابه راهبری عمل می‌کرد که با ارزیابی هم‌زمان «محیط بیرونی» (اقلیم، فرهنگ، هنجارهای اجتماعی) و «محیط درونی» (مصلح بومی، فناوری ساخت)، اهداف طراحی را تعریف می‌نمود. از سوی دیگر، «تفکر طراحی» به‌عنوان فرآیندی خلاق و مسئله‌محور، چگونگی تبدیل این اهداف کلان به راهکارهای کالبدی را تبیین می‌کند (فیضی و خاک‌زند، ۱۳۸۴). تلفیق این دو مفهوم، معماری را از یک فعالیت صرفاً ساختمانی به «فرآیندی پویا برای مدیریت فرهنگی و اجتماعی» ارتقا می‌دهد؛ فرآیندی که معمار سنتی به‌طور شهودی، با پیوند ارزش‌هایی چون «محرمت» و «مهمان‌نوازی» در قالب راهکارهایی یکپارچه (همچون هشتی) آن را محقق می‌ساخت. این دو در کنار هم، معماری را از فعالیتی صرفاً زیبایی‌شناختی به «فرآیندی فعال و پویا برای مدیریت فرهنگی و اجتماعی» ارتقا می‌دهند (Formolly & Saraei, 2024; Gökçen & Özbayraktar, 2024) و طاهری‌سرمد، ۱۴۰۳).

۲-۱- تحلیل راهبردی- اهداف، تصمیمات و راهکارهای طراحی در معماری سنتی ایرانی

در این نوشتار، «تحلیل راهبردی» به معنای شناسایی «اهداف کلان» و «راهکارهای طراحی» نهفته در پس‌پیکربندی فضایی خانه‌های سنتی است. این رویکرد برگرفته از چارچوب «برنامه‌ریزی راهبردی پایدار» (برایسون، ۲۰۱۸؛ کیانی، ۱۳۸۱) و تلفیق آن با «تفکر طراحی» (فیضی و خاک‌زند، ۱۳۸۴) است. تحلیل راهبردی خانه‌های سنتی، نیازمند «رویکردی کل‌نگر و چندبخشی» است (سلمانی و حسینی، ۱۳۹۱). این نگاه، تضاد آشکاری با تحلیل‌های تک‌بعدی و صرفاً توصیفی دارد. در چارچوب حاضر، خانه سنتی به عنوان یک «سیستم یکپارچه پارامتریک پیشامدرن» در نظر گرفته می‌شود که در آن، «ارزش‌های فرهنگی و اقلیمی» به‌عنوان پارامترهای ورودی ثابت و «راهکارهای طراحی هوشمند» به‌عنوان خروجی‌های بهینه سیستم عمل می‌کرده‌اند. این تحلیل، پیچیدگی و هوشمندی نهفته در طراحی سنتی را آشکار می‌سازد و نشان می‌دهد که چگونه اهداف به ظاهر متعارض (مانند حریم خصوصی و مهمان‌نوازی) در یک «بازی جمع‌مثبت»^۳ و از طریق راهکارهای یکپارچه طراحی محقق می‌شده‌اند.^۴ رویکرد تحلیلی این مقاله، با الهام از چارچوب «برنامه‌ریزی راهبردی پایدار» بر این فرض استوار است که معماران سنتی به‌صورت شهودی و مبتنی بر تجربه، فرآیندی مشابه «تدوین سناریو» را طی می‌کرده‌اند. آنها با شناسایی «عوامل محرک کلیدی» عدم قطعیت در محیط (نظیر شدت تابش آفتاب، جهت بادهای مطلوب، نیاز به حریم خصوصی و تعاملات اجتماعی)، سناریوهای مختلف زندگی (فصول سال، مراسم مختلف، حضور مهمانان) را پیش‌بینی و برای هر کدام، «راهکارهای طراحی استوار» ارائه می‌دادند. برای نمونه، حیاط مرکزی پاسخی استوار به سناریوهای مختلف نیاز به نور، تهویه، خلوت و تعامل اجتماعی بوده است. در اینجا راهبرد اصلی یا راهبرد کانونی، حریم خصوصی در نظر گرفته می‌شود. «حریم خصوصی در معماری ایرانی، که در قالب مفهوم غنی‌تر «محرمت» تجلی می‌یابد، فراتر از جلوگیری از دید مستقیم، به ایجاد فضایی می‌پردازد که در آن «امنیت، آرامش، اعتماد و امنیت خاطر» برای ساکنان فراهم شود (اغنیایی و همکاران، ۱۳۹۴).» حریم خصوصی در خانه‌های سنتی ایرانی یک ارزش فرهنگی و دینی عمیق بوده که نه به‌عنوان یک ویژگی فرعی، بلکه به‌عنوان یک جزء جدایی‌ناپذیر و «هدف راهبردی» اصلی در فرآیند طراحی تلقی می‌شده است. این مفهوم، فراتر از صرفاً جلوگیری از دید مستقیم، به ایجاد یک موقعیت محترم و به‌عبارتی یک شخصیت قابل احترام برای خانه می‌پردازد که در آن، مرزهای بین قلمرو عمومی و خصوصی به دقت تعریف

شده‌اند. این رویکرد را می‌توان به‌طور مستقیم با مفهوم طراحی محرمیت مقایسه کرد که یک اصل نوین در طراحی سیستم‌ها و فناوری‌ها است اما در معماری سنتی ایران به شکلی عمیق و بومی‌شده پیاده‌سازی شده بود. همچنین به این موضوع باید توجه داشته باشیم که پیاده‌سازی راهبرد حریم خصوصی (محرمیت‌محور) در خانه‌های سنتی ایرانی فراتر از سلسله‌مراتب فضایی کلان و تا سطح خردترین فضاها نیز گسترش یافته بود. در معماری ایرانی شرایط مادی و معنوی را برای استفاده‌کننده به‌منظور حصول محرمیت در تمامی ابعاد مختلف فراهم آورده است. بر این مبنا محرمیت را می‌توان یکی از اصولی دانست که از گذشته‌های دور در معماری ایران زمین به‌چشم می‌خورده است (سیفیان و محمودی، ۱۳۸۶). «صندوق‌خانه» به‌عنوان فضا یا مکانی فرعی اما حیاتی، نمونه‌ای بارز از این تفکر راهبردی است. این فضا که به‌عنوان «اندرونی‌ترین فضای اندرونی» شناخته می‌شود خلوت‌گاهی برای استراحت، عبادت، مراقبه و نگهداری وسایل شخصی بود و به‌طور هوشمندانه‌ای در انتها یا پشت اتاق‌های خصوصی‌تر (مانند اتاق‌های سهدری) جانمایی می‌شد. ایجاد چنین فضایی، یک «تخصیص آگاهانه» برای پاسخگویی به نیاز ساکنین به خلوت فردی و حفظ حرمت‌ها به‌ویژه برای پدر و مادر و تفکیک فضای خصوصی آنها از فرزندان بوده است. این امر نشان می‌دهد که حریم خصوصی نه یک ویژگی افزوده، بلکه یک «هدف راهبردی یکپارچه» بوده که در تمام سطوح طراحی جاری شده است (باصولی و امیدواری، ۱۴۰۰).

۳- روش پژوهش

این پژوهش از نظر رویکرد، کیفی و مفهومی و از نظر روش، تحلیلی-راهبردی است. داده‌های پژوهش از طریق بازخوانی و تحلیل شواهد تاریخی-کالبدی و مطالعات پیشین مرتبط با خانه‌های سنتی ایران گردآوری و در چارچوب مفاهیم برنامه‌ریزی راهبردی و تفکر طراحی تفسیر شده‌اند. محدوده مطالعه بر خانه‌های شاخص در سه شهر اصفهان، یزد و شیراز، در پهنه اقلیمی گرم و خشک، متمرکز است. فرایند تحلیل در سه گام انجام شده است: نخست، شناسایی ارزش‌ها و اهداف راهبردی؛ دوم، استخراج راهکارهای طراحی متناظر با این اهداف؛ و سوم، پیوند دادن راهکارها با اندام‌های معماری و کارکردهای چندگانه آن‌ها. از آنجاکه پژوهش ماهیت مفهومی و کیفی دارد، ادعای اندازه‌گیری کمی عملکرد حرارتی یا رفتاری در آن مطرح نیست و مدل نهایی به‌عنوان چارچوبی مفهومی برای تفسیر و طراحی ارائه می‌شود.

مقایسه راهبردهای اصلی نشان می‌دهد که سازمان فضایی خانه‌های سنتی را نمی‌توان با یک عامل منفرد توضیح داد. درون‌گرایی، بیش از همه با هدف تأمین محرمیت و تنظیم رابطه خانه با بیرون پیوند دارد. ورودی‌های کنترل‌شده، همین هدف را در مقیاس دسترسی و دید تقویت می‌کنند و ورود را به فرایندی تدریجی تبدیل می‌سازند. نظام اندرونی-بیرونی، امکان جمع میان خلوت خانواده و مهمان‌پذیری را فراهم می‌کند و روابط اجتماعی را در قلمروهای متفاوت سامان می‌دهد. راهبرد پایداری محیطی و انرژی نیز پاسخ به شرایط اقلیمی و مدیریت منابع را بر عهده دارد. این راهبردها مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند، بلکه در نقاطی مانند حیاط مرکزی، هشتی و ایوان با هم هم‌پوشانی دارند. بنابراین، مزیت اصلی معماری سنتی در یکپارچگی راهبردها و توانایی آن در پاسخ‌گویی هم‌زمان به چند هدف نهفته است. جدول ۱ خلاصه این روابط را پیش از ورود به تحلیل تفصیلی نشان می‌دهد.

۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌ها

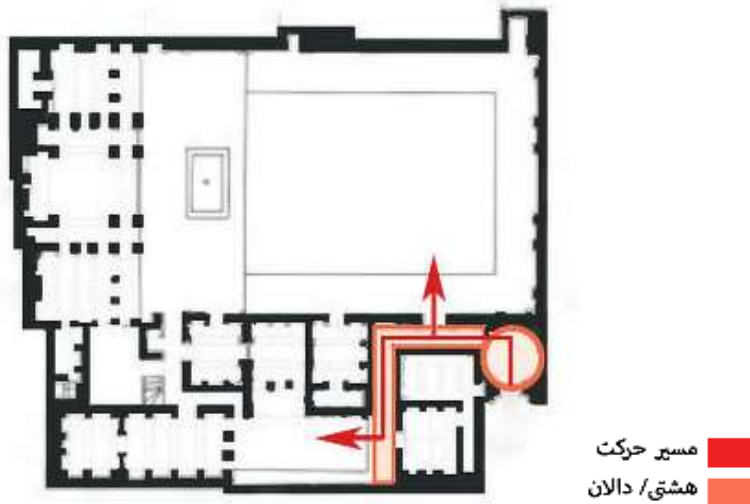
برای پیاده‌سازی این هدف راهبردی، چهار راهکار اصلی به‌کار گرفته شده است که در ادامه شرح داده می‌شود.

۴-۱- راهبرد درون‌گرایی

«درون‌گرایی در این معماری، صرفاً یک تکنیک اقلیمی یا زیبایی‌شناختی نبوده بلکه تجلی کالبدی یک «راهبرد کلان» برای حفظ محرمیت و ایجاد سلسله‌مراتب فضایی بوده است. به بیان دیگر، درون‌گرایی را می‌توان بارزترین مشخصه رعایت سلسله‌مراتب و ثمره مستقیم تفکر راهبردی در حول محور محرمیت دانست (اغنیایی و همکاران، ۱۳۹۴). این راهکار بر سازماندهی فضاهای خانه پیرامون یک حیاط مرکزی که از خیابان و همسایگان کاملاً پنهان است، استوار بوده و تمامی اتاق‌ها و فضاهای اصلی به این حیاط باز می‌شوند و بدین ترتیب، حریم بصری خانواده از محیط بیرونی به‌طور مؤثری حفظ می‌گردد. این راهبرد، به خانه اجازه می‌دهد که از یک‌سو به یک قلعه امن برای ساکنانش تبدیل شود و از سوی دیگر، با بهره‌گیری از حیاط، به تعامل با طبیعت و نور بپردازد.

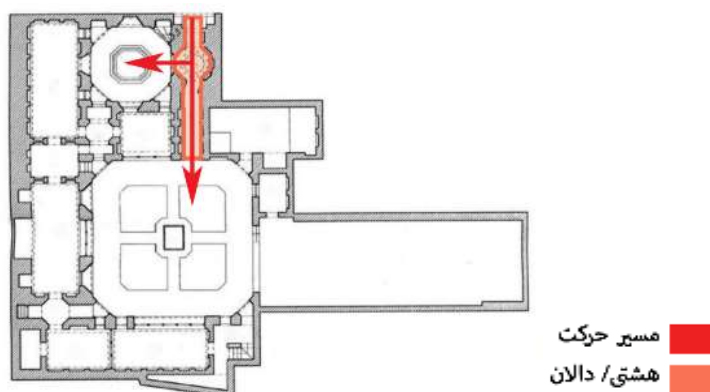
۴-۲- راهبرد ورودی‌های کنترل‌شده

ورودی در خانه‌های سنتی ایرانی نه یک فضای عبوری ساده، بلکه یک «نقطه کنترل راهبردی» چندعملکردی است که دسترسی فیزیکی و بصری را به‌صورت مرحله‌ای مدیریت می‌کند. عناصری چون هشتی (فضای واسط) و دالان (راهروی پیچ‌درپیچ)، به‌عنوان فیلترهای فیزیکی و بصری، سلسله‌مراتب فضایی خانه را تعریف کرده و حریم خصوصی را تقویت می‌نمایند. طراحی غیرمستقیم و چرخشی این فضاها، ورود ناگهانی به عرصه خصوصی را به فرآیندی تدریجی بدل می‌سازد و افراد را آگاهانه به سمت اندرونی یا بیرونی هدایت می‌کند (تصویر ۱). حتی جزئیاتی مانند «کوبه‌های متفاوت» برای مردان و زنان، بخشی از یک سیستم اطلاع‌رسانی غیرکلامی و مدیریت اجتماعی پیش از ورود به خانه بوده است (احمدنژاد، ۱۴۰۱).



تصویر ۱ - راهبرد ورودی‌های کنترل‌شده، خانه روغن فروش اصفهان

در این نمونه، تغییر جهت حرکت و فاصله گرفتن از محور مستقیم ورود، فرصت بیشتری برای کنترل دید و دسترسی ایجاد می‌کند. چنین سازماندهی‌ای میان فضای عمومی و خصوصی لایه‌ی واسط به‌وجود می‌آورد. این لایه واسط، هم رفتار ورودی را تنظیم می‌کند و هم از مواجهه ناگهانی با فضای خصوصی جلوگیری می‌نماید. در نتیجه، کنترل دسترسی در قالب یک توالی فضایی تحقق یافته است (تصویر ۲).



تصویر ۲ - راهبرد ورودی‌های کنترل‌شده، خانه سید محمود بهشتی قزوین

این رویکرد، «استراتژی پیشگیرانه»^۶ در طراحی محسوب می‌شود؛ به این معنا که پیش از وقوع هرگونه نقض حریم، با تمهیدات کالبدی آن را مسدود می‌کند. چنین نگاهی با اصل «اقدامات پیش‌گیرانه» در برنامه‌ریزی راهبردی هم‌خوانی دارد که بر جلوگیری از مسائل، به‌جای واکنش منفعلانه به آنها تأکید می‌کند. یافته‌های مقالهی نیز مؤید این هوشمندی طراحی است: زمان طی مسیر

ورودی با مساحت کل خانه و درصد فضای عملکردی آن رابطه معناداری دارد؛ به گونه‌ای که خانه‌های بزرگ‌تر با ساختار پیچیده‌تر، مسیر ورودی طولانی‌تر و زمان ورود بیشتری دارند و این امر به حفظ امنیت و ایجاد حریم بصری کمک شایانی می‌کند (تصویر ۳) (احمدنژاد، ۱۴۰۱).



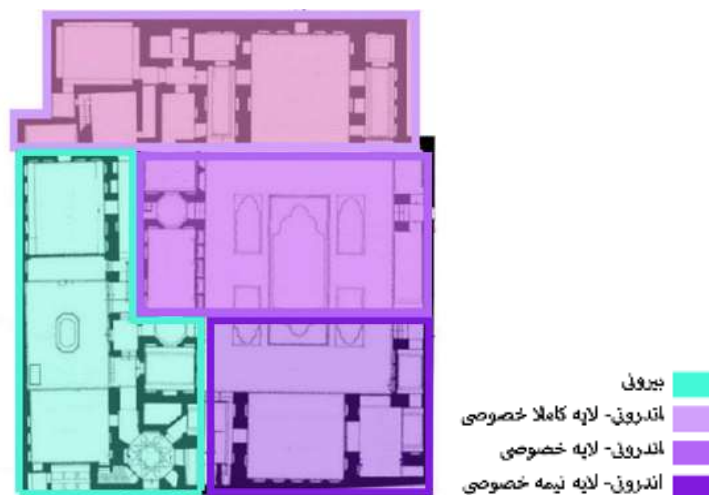
تصویر ۳ - راهبرد ورودی های کنترل شده، خانه عباسیان کاشان

۴-۳- راهبرد مدیریت جمعی و تجربه کاربری، اندرونی و بیرونی

تقسیم خانه‌های سنتی ایرانی به «اندرونی» (قلمرو خصوصی) و «بیرونی» (قلمرو عمومی و تشریفاتی)، یک تصمیم راهبردی بنیادین برای مدیریت هم‌زمان روابط اجتماعی و تجربه کاربری ساکنان و مهمانان بوده است. این نظام دوگانه، معماری را به مثابه یک «بازی برد-برد» در طراحی معرفی می‌کند؛ بدین معنا که ضمن حفظ کامل حریم خصوصی خانواده در اندرونی، اهداف راهبردی دیگر همچون مهمان‌نوازی و انسجام اجتماعی را در بیرونی تقویت می‌نماید. خانواده در قلمرو خصوصی خود از امنیت و آرامش بهره‌مند بود، حال آنکه مهمانان در فضای بیرونی با احترام و راحتی پذیرایی می‌شدند. این تقسیم‌بندی، مستقیماً بر الگوهای رفتاری و اجتماعی اثرگذار بوده و معماری را به «نظامی برای مدیریت روابط اجتماعی» با وظایف مشخص در سلسله‌مراتب فضایی ارتقا می‌داده است (نظیف، ۱۳۹۲).

قلمرو خصوصی (اندرونی) - مدیریت حریم خانواده

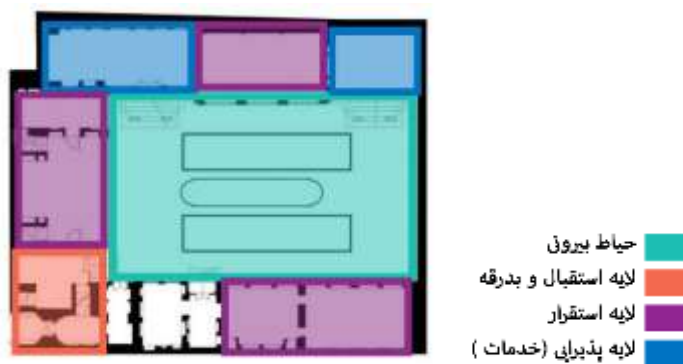
هدف راهبردی در طراحی اندرونی، ایجاد نظام فضایی پاسخگو برای مدیریت روابط درون خانوادگی، حفظ حریم و تفکیک قلمروها بوده است. این راهبرد، که می‌توان آن را «طراحی پاسخگو» به نیازهای فرهنگی و اجتماعی جامعه نامید، صرفاً به تقسیم‌بندی کلان اندرونی/بیرونی محدود نمی‌ماند، بلکه در قالب فضاهای فرعی نیز به شکلی ظریف عملیاتی می‌شد. «صندوق‌خانه» نمونه شاخصی از این مدیریت اجتماعی چندلایه است: فضایی در انتهای اتاق‌های خصوصی که خلوت‌گاهی برای عبادت، مراقبه، استراحت و نگهداری وسایل شخصی فراهم می‌آورد و با ایجاد امکان خلوت برای والدین در دل عرصه خصوصی خانواده، به حفظ حرمت و حریم آنان کمک می‌کرد. این فضا حدود ۷ تا ۱۴ درصد از مساحت خانه را به خود اختصاص می‌داده که نشان‌دهنده یک «سرمایه‌گذاری فضایی» آگاهانه برای پاسخ به نیاز فطری خلوت و خویش‌ننگری در فرهنگ اسلامی-ایرانی است. جای‌گیری راهبردی صندوق‌خانه مؤید آن است که هیچ عنصری در معماری سنتی تصادفی نبوده و همه در خدمت اهداف کلان طراحی قرار داشته‌اند (بیگدلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ باصولی و امیدواری، ۱۴۰۰). بدین ترتیب، معماری نه تنها مرز میان غریبه و آشنا، بلکه مرزهای درون خانوادگی را نیز با حساسیت مدیریت می‌کرد تا آرامش و نظم اجتماعی در کوچک‌ترین واحد جامعه-یعنی خانواده- حفظ شود (تصویر ۴) (باصولی و امیدواری، ۱۴۰۰).



تصویر ۴ - راهبرد مدیریت جمعی، قلمرو خصوصی، خانه رسولیان یزد

قلمرو عمومی (بیرونی) - مدیریت تجربه مهمان‌نوازی

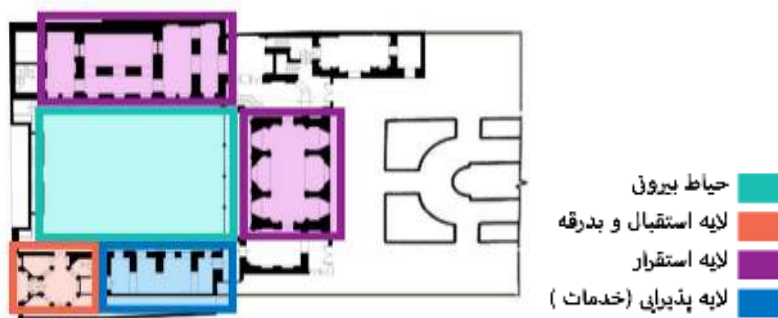
مهمان‌نوازی، ارزشی عمیقاً ریشه‌دار در فرهنگ ایرانی، به‌عنوان یک «راهبرد مدیریت تجربه کاربری» مستقیماً بر طراحی فضایی بیرونی تأثیر گذاشته است. هدف راهبردی در این قلمرو، پذیرایی شایسته از مهمانان و حفظ جایگاه اجتماعی میزبان، بدون به خطر انداختن حریم خصوصی خانواده بوده است. در معماری سنتی، مهمان‌پذیری یک «سیستم مدیریت تجربه» کامل و سلسله‌مراتبی را شکل می‌دهد که در سه لایه فضایی به هم پیوسته عمل می‌کرده است: (۱) لایه استقبال و بدرقه، (۲) لایه استقرار، و (۳) لایه پذیرایی (خدمات). این نگاه سیستمی، مهمان‌نوازی را از مفهومی انتزاعی به مجموعه‌ای از «اقدامات راهبردی فضایی» تبدیل می‌کند (تصویر ۵ و ۶) (عینی‌فر و آبرو، ۱۳۹۹).



تصویر ۵ - راهبرد مدیریت جمعی، قلمرو عمومی، خانه سلماسی‌ها تبریز

قلمرو عمومی خانه، برای پاسخ‌گویی به حضور مهمانان از فضای خصوصی خانواده فاصله می‌گیرد. این تفکیک به میزبان اجازه می‌دهد که بدون برهم خوردن نظم اندرونی، پذیرایی و تعامل اجتماعی را در عرصه‌ای مناسب سامان دهد. دسترسی کنترل‌شده میان دو قلمرو نیز از تداخل عملکردها جلوگیری می‌کند. از این رو، سازمان فضایی بیرونی بخشی از راهبرد مدیریت روابط اجتماعی است.

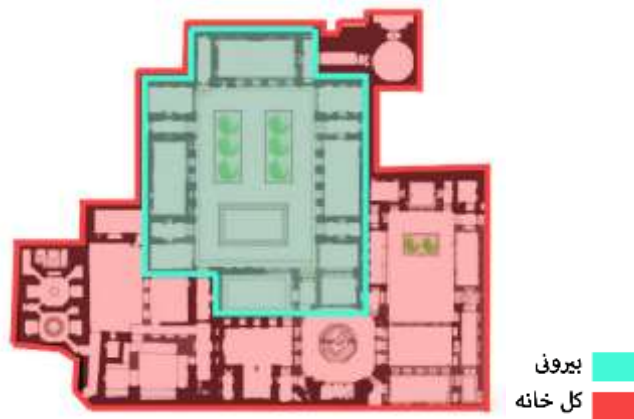




تصویر ۶ - راهبرد مدیریت جمعی، قلمرو عمومی، خانه قدکی تبریز

راهکارهای طراحی برای تحقق این هدف موارد زیر را دربرمی‌گیرد.

تخصیص فضایی: طراحی فضاهای اختصاصی برای مهمانان (بیرونی یا مهمان‌خانه) با ورودی‌های مستقل یا دسترسی‌های کنترل‌شده، نشان‌دهنده اولویت بالای این ارزش فرهنگی است. این تصمیم، یک «تخصیص منابع» آگاهانه بر اساس سلسله‌مراتب ارزشی محسوب می‌شود؛ به گونه‌ای که بخش قابل توجهی از مساحت خانه -به‌عنوان یک «هزینه فضایی»- به حفظ این هنجار اجتماعی-فرهنگی اختصاص می‌یافته است (تصویر ۷).

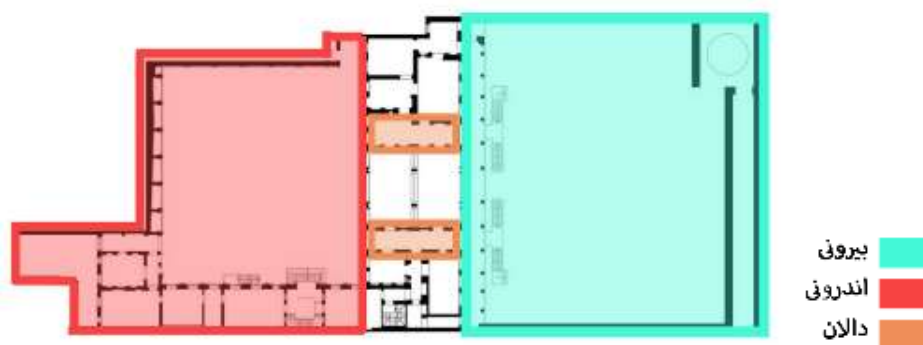


تصویر ۷ - راهبرد مدیریت جمعی، تخصیص فضایی، خانه فروغ الملک شیراز

طراحی تجربه‌محور: فضاهای مهمان‌نوازی با بهره‌گیری از ورودی‌های آراسته، دسترسی بصری به حیاط و باغ، و عناصری چون نورپردازی، تزئینات و مبلمان مناسب، به «محیط‌های جذاب و خاطره‌ساز» تبدیل می‌شدند. این رویکرد با مفاهیم نوین «طراحی تجربه کاربری»^۷ هم‌خوانی کامل دارد و حس استقبال، راحتی و احترام را برای مهمان القا می‌کرده است.

در مجموع، نظام اندرونی-بیرونی، معماری را به‌عنوان یک «سیستم» برای مدیریت روابط اجتماعی معرفی می‌کند که در آن، هر فضا وظیفه‌ای مشخص در سلسله‌مراتب اجتماعی دارد. این نظام، نه تنها به تفکیک فیزیکی می‌پرداخت بلکه به‌طور غیرمستقیم به «حفظ ارزش‌های فرهنگی» و «شکل هویت» کمک می‌کرد. راهکارهای پیاده‌سازی نظام دوگانه اندرونی-بیرونی بر دو راهکار کلان استوار بوده است:

- **تقسیم فضایی دوگانه:** ایجاد یک «ساختار سازمانی» روشن در خانه که فضاها را بر اساس کاربری و اهمیت اجتماعی، به لحاظ فیزیکی و عملیاتی تفکیک می‌کرد.
- **مدیریت دسترسی:** فضاهای بیرونی دسترسی بالایی به ورودی اصلی داشتند، اما ارتباط آن‌ها با اندرونی از طریق دالان‌ها و حیاط‌های ثانویه محدود و کنترل‌شده بود (تصویر ۸). این «لایه‌های سلسله‌مراتبی فضا»، حرکت میان دو قلمرو را مدیریت کرده و از نقض ناخواسته حریم خصوصی جلوگیری می‌نمودند.

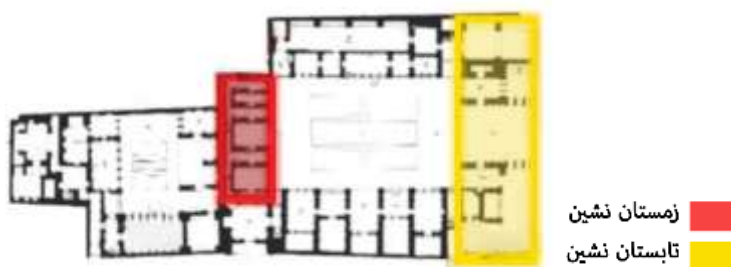


تصویر ۸ - راهبرد مدیریت جمعی، مدیریت دسترسی، خانه امیرنظام گروسی تبریز

۴-۴- راهبرد پایداری محیطی و انرژی، آینده‌نگری در مصرف منابع

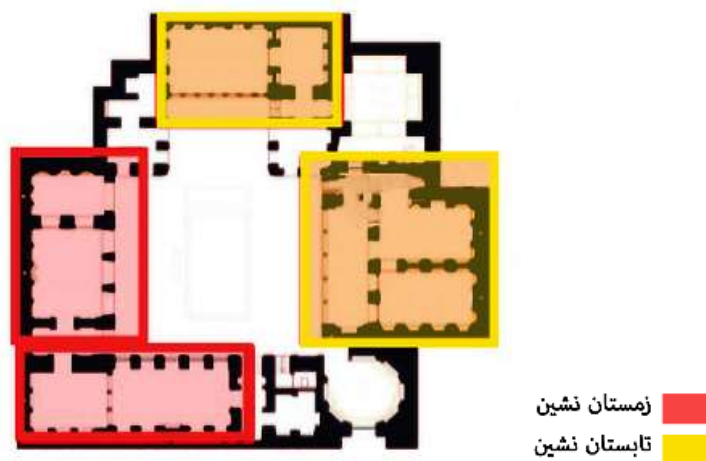
خانه‌های سنتی ایرانی، فراتر از پاسخ به نیازهای فرهنگی و اجتماعی، در حوزه مدیریت منابع انرژی و همزیستی با اقلیم نیز رویکردی آینده‌نگر و راهبردی داشته‌اند؛ به‌گونه‌ای که پایداری محیطی و اقتصادی را با ابعاد اجتماعی و فرهنگی پیوند زده و نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده تأمین می‌ساخته‌اند (زندیه و پروردی‌نژاد، ۱۳۸۹). اهداف راهبردی این معماری در حوزه پایداری عبارت بوده‌اند از: حفظ انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، هماهنگی کامل با اقلیم برای تأمین آسایش حرارتی، کاهش استفاده از منابع جدید با بهره‌گیری از مصالح بومی، و مدیریت خلاقانه منابع طبیعی مانند باد، خورشید، خاک و آب.

برای تحقق این اهداف، مجموعه‌ای از راهکارهای درهم‌تنیده طراحی شده بود. سازماندهی فضاهای تابستان‌نشین و زمستان‌نشین حول حیاط مرکزی، یک «راهبرد انطباق خورشیدی» هوشمندانه محسوب می‌شد (تصویر ۹ و ۱۰). فرو رفتن بنا در زمین و احداث زیرزمین‌های عمیق نیز راهکاری برای بهره‌گیری از انرژی زمین‌گرمایی بود که فضای داخلی را از شرایط نامساعد بیرون ایزوله کرده و به تعدیل دما کمک می‌کرد (حائری و علوی، ۱۳۹۴). به‌طور هم‌زمان، سیستم‌های سرمایشی و تهویه طبیعی همچون بادگیر، حوضخانه و سرداب (تصویر ۱۱ و ۱۲)، با تکیه بر ظرفیت حرارتی خاک و مصالح بومی، شرایط آسایش را بدون مصرف انرژی تجدیدناپذیر فراهم می‌آوردند. ایجاد خرداقلیم فعال در حیاط مرکزی با به‌کارگیری پوشش گیاهی و آب نیز نقشی اساسی در تعدیل دما و رطوبت ایفا می‌کرد.



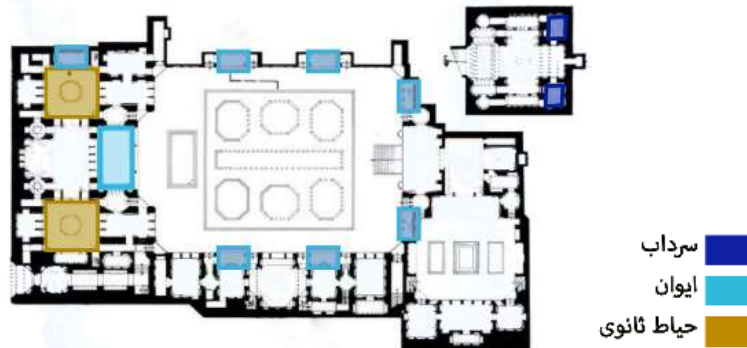
تصویر ۹ - راهبرد پایداری محیطی، خانه لاری‌های یزد

سازمان فضایی این خانه در هماهنگی با شرایط اقلیمی، امکان استفاده متفاوت از فضاها در فصل‌های مختلف را فراهم می‌کند. جهت‌گیری و نحوه استقرار فضاها در پیرامون حیاط، ظرفیت سایه، تهویه و تعدیل حرارتی را افزایش می‌دهد. این ویژگی نشان می‌دهد که پاسخ اقلیمی در معماری سنتی حاصل یک عنصر منفرد نیست. بلکه از ترکیب چند تصمیم فضایی و کالبدی شکل می‌گیرد.



تصویر ۱۰ - راهبرد پایداری محیطی، خانه افشاریان شیراز

در این نظام یکپارچه، عناصر معماری خود به عنوان اجزای این راهبرد پایداری عمل می‌کردند. حیاط مرکزی، به عنوان هسته راهبردی چندمنظوره، افزون بر نقش اجتماعی و پذیرایی، با تأمین سایه، هدایت تهویه طبیعی و تنظیم رطوبت، یک راهکار بنیادین برای پایداری محیطی بود و در مقیاس شهری نیز به ایجاد بافتی پایدار و خانواده‌محور یاری می‌رساند. ایوان‌ها و رواق‌ها نیز در جایگاه فضاهای واسط و فیلترهای اقلیمی، انتقال تدریجی میان قلمروهای عمومی و خصوصی را تسهیل کرده و به عنوان یک راهبرد طراحی غیرفعال، آسایش حرارتی و دوام ساختمان را افزایش می‌دادند. این مجموعه تدابیر نشان می‌دهد که معماری سنتی ایران با طراحی دقیق بازشوها، گودال‌باغچه‌ها و سازماندهی هوشمند فضاها، هم‌زمان به تأمین نور طبیعی، جلوگیری از تابش مزاحم و کاهش مصرف انرژی دست می‌یافته است.



تصویر ۱۱ - راهبرد پایداری محیطی، خانه طباطبایی کاشان

در این نمونه، حیاط مرکزی و فضاهای پیرامون آن به صورت یک سامانه اقلیمی عمل می‌کنند. حضور آب، پوشش گیاهی، سایه و فضاهای نیمه‌باز، شرایطی متفاوت از محیط بیرونی ایجاد می‌کند. این سازماندهی، ضمن تأمین کیفیت فضایی، به کاهش شدت گرما و بهبود آسایش کمک می‌کند. بنابراین، حیاط را می‌توان نقطه اتصال راهبردهای اجتماعی و محیطی دانست.



تصویر ۱۲ - راهبرد پایداری محیطی، خانه فروغ الملک شیراز

مقایسه راهبردهای اصلی نشان می‌دهد که سازمان فضایی خانه‌های سنتی را نمی‌توان با یک عامل منفرد توضیح داد. درون‌گرایی، بیش از همه با هدف تأمین حریمیت و تنظیم رابطه خانه با بیرون پیوند دارد. ورودی‌های کنترل‌شده، همین هدف را در مقیاس دسترسی و دید تقویت می‌کنند و ورود را به فرایندی تدریجی تبدیل می‌سازند. نظام اندرونی-بیرونی، امکان جمع میان خلوت خانواده و مهمان‌پذیری را فراهم می‌کند و روابط اجتماعی را در قلمروهای متفاوت سامان می‌دهد. راهبرد پایداری محیطی و انرژی نیز پاسخ به شرایط اقلیمی و مدیریت منابع را برعهده دارد. این راهبردها مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند، بلکه در نقاطی مانند حیاط مرکزی، هشتی و ایوان با هم هم‌پوشانی دارند. بنابراین، مزیت اصلی معماری سنتی در یکپارچگی راهبردها و توانایی آن در پاسخ‌گویی هم‌زمان به چند هدف نهفته است (جدول ۱).

جدول ۱ - خلاصه راهکارهای اصلی و ارتباط آنها با اهداف راهبردی

ردیف	نام راهکار	هدف راهبردی	ارتباط با مسائل مطرح شده
۱	درون‌گرایی	حفظ حریمیت و سلسله‌مراتب فضایی	پاسخ به نیاز فرهنگی اجتماعی به حریم خصوصی
۲	ورودی‌های کنترل‌شده	مدیریت دسترسی و کنترل بصری	جلوگیری از نقض حریم و ایجاد امنیت
۳	نظام اندرونی-بیرونی	مدیریت روابط اجتماعی و مهمان‌نازی	تعادل میان خلوت و ارتباطات اجتماعی
۴	پایداری محیطی و انرژی	کاهش مصرف انرژی و هماهنگی با اقلیم	پاسخ به الزامات اقلیمی و اقتصادی

۴-۵- تحلیل یکپارچه: اندام‌های معماری به‌مثابه تجسم راهبردها

تحلیل معماری سنتی ایران از منظر طراحی راهبردی، آن را نه صرفاً مجموعه‌ای از فضاهای کالبدی، بلکه به‌مثابه سیستمی یکپارچه و هدف‌محور بازمی‌نمایند که در آن ارزش‌های فرهنگی و اقلیمی به‌عنوان پارامترهای ورودی عمل کرده و راهکارهای طراحی هوشمند، خروجی‌های بهینه این سیستم بوده‌اند (بزرگزاد و همکاران، ۱۳۹۴). در این چارچوب، هر عنصر یا «اندام» معماری نه محصول یک انتخاب فرمی یا سلیقه‌ای، بلکه راهکاری راهبردی برای تحقق اهداف کلان طراحی (حریمیت، مهمان‌نازی، پایداری و مدیریت اجتماعی) به‌شمار می‌رفته است. تفکیک میان اندام‌ها، تصمیمی مبتنی بر «برنامه‌ریزی فیزیکی» در خدمت «برنامه‌ریزی اجتماعی» بود؛ نظامی که ضمن جداسازی قلمروها، با «انعطاف‌پذیری» در لایه‌های میانی (مانند استفاده چندمنظوره از حیاط و ایوان) مرزها را در مواقع ضروری نرمش‌پذیر می‌ساخت (عینی‌فر و آبرو، ۱۳۹۹). این رویکرد، تحلیل معماری را از سطح «فرم‌گرا» به سطح «کارکردگرا» و «راهبردی» ارتقا و نشان می‌دهد که هر فضا به‌طور هم‌زمان چندین مأموریت را دنبال می‌کرده است. برای نمونه، هشتی همزمان به حفظ حریم خصوصی، تقویت مهمان‌نازی و مدیریت نور و اقلیم یاری می‌رسانده است. جدول زیر، جمع‌بندی راهبردی از کارکرد و نقش هر اندام را بر اساس تحلیل‌های پیشین ارائه می‌دهد (جدول ۲).



جدول ۲ - تحلیل راهبردی اندام‌های معماری در خانه‌های سنتی ایران

ردیف	عنصر معماری	اهداف راهبردی	راهکار طراحی	کارکرد عملیاتی و چندگانه
۱	هشتی و دالان	- مدیریت حریم خصوصی - کنترل دسترسی - مدیریت اجتماعی	- ورودی غیرمستقیم و چرخشی - فیلتر بصری و فیزیکی - کوبه‌های متفاوت	- جلوگیری از دید مستقیم و ورود ناگهانی - تقسیم مسیر به اندرونی/بیرونی - فضای انتظار و آماده‌سازی ذهنی مهمان - تنظیم نور و اقلیم - اطلاع‌رسانی غیرکلامی
۲	اندرونی و بیرونی	- مدیریت روابط اجتماعی - حفظ هنجارهای فرهنگی	- تقسیم فضایی دوگانه - دسترسی محدود و کنترل شده - لایه‌های سلسله‌مراتبی	- حفظ کامل حریم خانواده در اندرونی - پذیرایی شایسته در بیرونی بدون نقض حریم - تفکیک قلمروها و مدیریت رفتارهای اجتماعی
۳	حیاط مرکزی	- یکپارچگی اجتماعی - پایداری محیطی - مدیریت انرژی	- درون‌گرایی - سازماندهی فضاهای تابستان‌نشین و زمستان‌نشین - ایجاد خرداقلیم با آب و گیاه	- هسته تعاملات خانوادگی و پذیرایی - تأمین نور و تهویه طبیعی - سایه‌اندازی و تعدیل دما و رطوبت - بهینه‌سازی انرژی خورشیدی و بهره‌گیری از انرژی زمین‌گرمایی
۴	ایوان‌ها و رواق‌ها	- سلسله‌مراتب فضایی - پایداری محیطی - آسایش حرارتی	- فضای نیمه‌باز واسط - فیلتر حرارتی و بصری - راهبرد طراحی غیرفعال	- انتقال تدریجی از عمومی به خصوصی - ایجاد سایه و جلوگیری از تابش مستقیم - فراهم‌سازی فضای قابل استفاده در فصول مختلف
۵	صندوق‌خانه	- مدیریت روان‌شناختی - حریم خصوصی - مدیریت اجتماعی - درون‌خانوادگی	- جانمایی در عمیق‌ترین لایه خصوصی - فضای شخصی‌شده - تخصیص فضایی	- خلوت‌گاه برای عبادت، مراقبه و استراحت - نگهداری وسایل شخصی - پاسخ به نیاز فطری خلوت و خویش‌نگری
۶	بادگیر، سرداب و حوضخانه	- پایداری محیطی - مدیریت انرژی - آسایش حرارتی	- بهره‌گیری از انرژی باد و ظرفیت حرارتی خاک - سرمایش تبخیری آب	- تأمین سرمایش و تهویه طبیعی - ایجاد فضای خنک برای استراحت در تابستان - کاهش وابستگی به انرژی تجدیدناپذیر

۵- بحث

تحلیل راهبردی خانه‌های سنتی ایرانی نشان می‌دهد که معماران سنتی با رویکردی کل‌نگر، پیچیده و هدف‌محور، راهبردهایی را تدوین کرده‌اند که به خلق محیط‌های ساخته‌شده‌ای منجر شده است از نظر فرهنگی پاسخگو، از نظر اقلیمی پایدار و از نظر هویتی غنی باشند. جانی‌پور (۱۳۹۸) در رساله دکتری خود به بررسی تأثیر الگوهای آپارتمان‌سازی بر هویت فرهنگی ساکنان پرداخته و نشان داده است که غفلت از بستر اجتماعی-فرهنگی، به کاهش تعاملات اجتماعی انجامیده است. یافته‌های این مقاله، درس‌ها و پیامدهای مشخصی را برای معماری و برنامه‌ریزی شهری امروز ارائه می‌دهد:

توجه راهبردی به «خلوت فردی» به مثابه یک ضرورت، نه تجمل: در خانه‌های آپارتمانی امروز، فضاهای اختصاصی برای عبادت، مراقبه یا خلوت شخصی که در معماری سنتی در قالب «صندوق‌خانه» تجسم یافته بود، به کلی نادیده گرفته شده است. حال آنکه نیاز به خلوت، یک «نیاز جهان‌شمول روان‌شناختی» است که ارضای آن برای دستیابی به هویت فردی، امنیت روانی و خودشکوفایی ضروری به‌شمار می‌رود (بیگدلی و همکاران، ۱۳۹۷). بازخوانی راهبردی این مفهوم به معمار معاصر یادآوری می‌کند که ایجاد گوشه‌های دنج و شخصی‌شده حتی در ابعاد کوچک، یک «ضرورت راهبردی» است، نه یک «لوکس فضایی». این امر می‌تواند در قالب طراحی طاقچه‌ها، فضاهای مطالعه منعطف یا کمدهای عمیق با قابلیت تبدیل به خلوت‌گاهی موقت عملیاتی شود (باسولی و امیدواری، ۱۴۰۰).

حرکت از «فرم» به «راهبرد» و اصلاح نظام آموزش: مهم‌ترین درس این تحلیل، ضرورت گذار از تقلید ظاهری فرم‌های تاریخی (نظیر قوس‌ها و ارسی‌ها) به درک و پیاده‌سازی «اصول و راهبردهای» بنیادین آنهاست. معمار باید به‌جای پرسش از «چگونه» ساختن یک نمای سنتی، از خود بپرسد که مفاهیمی چون حریم خصوصی، انعطاف‌پذیری و مهمان‌نوازی در زیست امروز چه معنایی دارند و چگونه می‌توانند به راهکارهای طراحی معاصر ترجمه شوند. برای تداوم فرهنگ مهمان‌پذیری در آپارتمان‌ها، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که سه اصل «قلمرو»، «انعطاف‌پذیری» و «سلسله‌مراتب» باید بازتعریف شوند - نه با



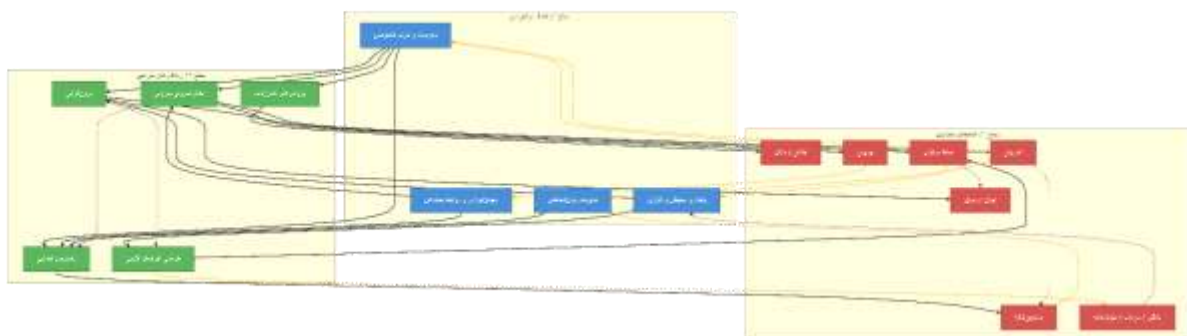
تکرار کالبدی هشتی و دالان، بلکه با پیاده‌سازی روح آنها در سازمان فضایی نوین (عینی فر و آبرو، ۱۳۹۹). تحقق این گذار، مستلزم تلفیق «آموزش طراحی راهبردی» با «پرورش تفکر طراحی» در نظام آموزش معماری است تا خلاقیت، به‌عنوان مهارتی آموزش‌پذیر، در بستری فرهنگی پرورش یابد.

پایداری اجتماعی و محیطی: الگوی یکپارچه: معماری سنتی ایران الگویی عملی از تلفیق پایداری اجتماعی و محیطی ارائه می‌دهد. از یک سو، اندام‌هایی چون حیاط مرکزی، ایوان‌ها و بادگیرها نمونه‌های درخشانی از «طراحی غیرفعال» هستند که وابستگی به انرژی تجدیدناپذیر را به حداقل می‌رسانند (زندیه و پروردی‌نژاد، ۱۳۸۹). از سوی دیگر، این عناصر با ایجاد عرصه‌هایی برای تعاملات خانوادگی، بازی کودکان و ارتباط با طبیعت، به «پایداری اجتماعی» و تقویت حس تعلق یاری می‌رسانند. بازآفرینی مفهوم «حیاط» به‌عنوان هسته سازمان‌دهنده فضا - حتی در مقیاس‌های خرد و در قالب‌های نوین، می‌تواند همزمان به بهبود عملکرد اقلیمی بنا و ارتقای کیفیت زندگی منجر شود.

معماری به‌مثابه ابزار مدیریت فرهنگی و برنامه‌ریزی شهری انسان‌محور: این مقاله نشان می‌دهد که معماری می‌تواند به‌عنوان ابزاری فعال برای مدیریت فرهنگی عمل کند. در شرایط کنونی که سرعت تغییرات فرهنگی بالاست، این رویکرد به برنامه‌ریزان و معماران امکان می‌دهد تا محیط‌هایی طراحی کنند که ضمن حفظ و تقویت ارزش‌های فرهنگی، به نیازهای عملکردی نیز پاسخ دهند. در مقیاس کلان، الگوهای شهرسازی سنتی که خانه‌های حیاطدار را به‌صورت متراکم، پیوسته و با هویت محله‌ای در کنار هم قرار می‌دادند، می‌توانند الهام‌بخش «توسعه پایدار شهری با کاربری مختلط» باشند و مدل‌های کمی‌محور کنونی (تراکم و کاربری صرف) را به سمت رویکردهای کیفی‌محور و انسان‌گرا سوق دهند.

چارچوبی عملی برای فرآیند طراحی معاصر: در نهایت، بازخوانی راهبردی، «مدل مفهومی» روشنی از منطق طراحی سنتی به‌دست می‌دهد: تعریف ارزش‌های بنیادین به‌عنوان اهداف راهبردی و خلق مجموعه‌ای از راهکارهای کالبدی منعطف برای تحقق هم‌زمان آنها. این مدل را می‌توان در قالب الگوی فرآیند برنامه‌ریزی راهبردی برایشون (۲۰۱۸)^۸ برای معماری معاصر عملیاتی کرد:

- هم‌اندیشی با ذی‌نفعان برای توافق بر سر اهداف؛
 - تعیین «رسالت» طرح (این بنا چه ارزشی باید خلق کند؟)؛
 - تحلیل بستر (اقلیم، فرهنگ، قوانین)؛
 - سنجش قابلیت‌ها و محدودیت‌های پروژه؛
 - شناسایی مسائل راهبردی (مانند تقابل تراکم و کیفیت زندگی)؛
 - و تدوین راهبردهای طراحی (برای مثال، بازتعریف مفهوم حیاط در آپارتمان).
- این چارچوب تضمین می‌کند که محصول نهایی، برآمده از تفکری آینده‌نگر و هدف‌محور خواهد بود، نه تصمیم‌هایی مقطعی و تقلیدی (تصویر ۱۳).



تصویر ۱۳ - نمودار مفهومی برنامه‌ریزی راهبردی در معماری مسکونی سنتی ایران

۶- نتیجه‌گیری

پرسش اصلی پژوهش این بود که چگونه می‌توان معماری سنتی ایرانی را با رویکردی راهبردی بازخوانی کرد تا از تکرار فرم‌های ظاهری به درک و پیاده‌سازی اصول بنیادین گذار شود. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که این گذار با شناسایی اهداف راهبردی، استخراج راهکارهای طراحی و پیوند دادن آن‌ها با اندام‌های معماری امکان‌پذیر است. بر این اساس، مدل مفهومی سه‌سطحی «اهداف راهبردی / راهکارهای طراحی / اندام‌های معماری» چارچوب اصلی پاسخ به پرسش پژوهش را تشکیل می‌دهد. در این مدل، محرمیت، مدیریت روابط اجتماعی و مهمان‌پذیری، و پایداری محیطی و انرژی به‌عنوان محورهای اصلی سازماندهی فضایی شناسایی شدند و عناصر کالبدی به‌عنوان ابزارهای تحقق این اهداف تفسیر شدند. یافته‌های پژوهش می‌تواند در طراحی مسکن معاصر، آموزش معماری و برنامه‌ریزی شهری به‌کار گرفته شود. مهم‌ترین کاربرد آن، انتقال اصولی مانند سلسله‌مراتب فضایی، قلمروهای منعطف، خلوت فردی، کنترل دسترسی و سازماندهی حیات به زبان طراحی معاصر، بدون تقلید مستقیم از فرم‌های تاریخی است. همچنین چارچوب ارائه‌شده می‌تواند برای بازتعریف مفهوم حیات، فضاهای واسط و تفکیک قلمروهای عمومی و خصوصی در مجتمع‌های مسکونی معاصر مورد استفاده قرار گیرد.

در ارتباط با محدودیت‌ها می‌توان بیان نمود که پژوهش حاضر به نمونه‌های شاخص در سه شهر اصفهان، یزد و شیراز و به اقلیم گرم و خشک محدود است؛ بنابراین تعمیم نتایج به سایر گونه‌های اقلیمی ایران باید با احتیاط انجام شود. همچنین رویکرد پژوهش کیفی و مفهومی است و اندازه‌گیری‌های کمی و نظام‌مند از عملکرد حرارتی یا الگوهای رفتاری در آن انجام نشده است. مدل مفهومی نیز در این پژوهش از طریق مطالعات میدانی، مصاحبه با ساکنان یا پس‌اشغالی اعتبارسنجی نشده است. برای پژوهش‌های آتی، انجام مطالعات ترکیبی کمی-کیفی برای سنجش عینی اثر راهکارهای سنتی بر کیفیت زندگی، مقایسه نمونه‌های معماری در اقلیم‌های متفاوت ایران، بررسی عملیاتی‌شدن اصول راهبردی در مسکن معاصر از طریق مطالعات پس‌اشغالی، و اعتبارسنجی مدل مفهومی با روش‌هایی مانند دلفی یا گروه‌های کانونی پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Design Thinking
- 2- Sustainable Strategic Planning
- 3- Holistic Approach
- 4- Positive-Sum Game

۵- در رویکرد طراحی راهبردی، «بازی جمع‌مثبت» به معنای خلق ارزش‌ها و راه‌حلهایی است که همه‌ی ذی‌نفعان از آن سود می‌برند، برخلاف بازی‌های جمع‌صفر که یک طرف برنده و طرف دیگر بازنده است. این مفهوم در ادبیات «Positive Sum Design» به‌عنوان چارچوبی برای بازطراحی روابط و قواعد تعامل معرفی شده است.

- 6- Proactive Strategy
- 7- User Experience Design
- 8- Bryson

حامیان مالی: مقاله حامی مالی و معنوی نداشته است.

مشارکت نویسندگان: در این بخش نویسندگان تایید می‌کنند که همگی در مقاله سهیم بوده‌اند.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله برعهده‌ی نویسندگان است.

قدردانی: ما از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاس‌گزاریم.

منابع

- احمدنژاد، فرهاد. (۱۴۰۱). تأمین حریم در خانه‌های سنتی ایران با فاصله‌گذاری زمانی در دستگاه ورودی. فرهنگ معماری و شهرسازی اسلامی، ۷(۱)، ۹۵-۱۱۲. <http://dx.doi.org/10.52547/ciauj.7.1.95>
- اغنیایی، الهام؛ منتظرالحجه، مهدی؛ و نبوی یزدی، سیدمحمد مهدی. (۱۳۹۴). نقش محرمیت در معماری اسلامی-ایرانی. همایش ملی معماری و شهرسازی بومی ایران، یزد. <https://civilica.com/doc/544616>
- باصولی، مهدی؛ و امیدواری، سمیه. (۱۴۰۰). صندوق خانه، منظر خلوت در خانه ایرانی (بررسی خانه‌های سنتی یزد). باغ نظر، ۱۸(۱۰۴)، ۲۹-۴۴. <https://doi.org/10.22034/bagh.2021.231378.4549>
- بزرگ‌زاد، نیما؛ توانگر، محمد؛ شفیعی، حسین؛ و حیدری، مهسا. (۱۳۹۴). بررسی و مقایسه معیارهای معماری پارامتریک با معماری سنتی اسلامی-ایرانی. پنجمین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری. <https://civilica.com/doc/509658>
- بیگدلی، حامد؛ باقری، محمد؛ و اسدی، فرخ. (۱۳۹۷). بررسی نقش خلوت در معماری خانه‌های سنتی. معماری‌شناسی، ۱۱(۴)، ۱-۱۴. <https://www.memarishenasi.ir/fa/archive.php?pid=129&rid=4>
- حاتری، ساناز؛ و علوی، جوانه. (۱۳۹۴). ابعاد پایداری در حیات مرکزی خانه‌های سنتی اقلیم گرم و خشک ایران (نمونه موردی: خانه‌های سنتی شیراز و کاشان). کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی. <https://civilica.com/doc/446784>
- زندیه، مهدی؛ و پروردی‌نژاد، سمیرا. (۱۳۸۹). توسعه پایدار و مفاهیم آن در معماری مسکونی ایران. مسکن و محیط روستا، ۲۹(۱۳۰)، ۲-۲۱. <http://jhre.ir/article-1-36-fa.html>
- سلمانی، حسن؛ و حسینی، سیدفرهاد. (۱۳۹۱). طراحی مدلی استراتژیک برای مدیریت اثربخش شهری. چهارمین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، مشهد. <https://civilica.com/doc/164827>
- سیفیان، محمدکاظم؛ و محمودی، محمدرضا. (۱۳۸۶). محرمیت در معماری سنتی ایران. هویت شهر، ۱(۱)، ۳-۱۴.
- صادقی‌پی، ناهید. (۱۳۸۸). تأملی در معماری سنتی. صفه، ۱۸(۴۸)، ۷-۱۶. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.1683870.1389.18.2.8.5>
- علی‌محمدی، فرزانه؛ بمانیان، محمدرضا؛ و پورفتح‌اله، مائده. (۱۳۹۴). بررسی تطبیقی تأثیر تغییرات فرهنگی بر محرمیت در ورودی خانه‌های سنتی دوره قاجاریه (نمونه: خانه‌های سنتی شهر قزوین). مطالعات میان‌فرهنگی، ۱۰(۲۷)، ۱۱۵-۱۴۰. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.1683870.1389.18.2.8.5>
- عبنی‌فر، علیرضا؛ و آبرون، نسترن. (۱۳۹۹). تبیین تداوم مهمان‌پذیری از خانه ایرانی تا آپارتمان معاصر. معماری و شهرسازی آرمان‌شهر، ۱۳(۳۳)، ۱۶۵-۱۷۷. <https://doi.org/10.22034/aaud.2021.150942.1701>
- فیضی، محسن؛ و خاک‌زند، مهدی. (۱۳۸۴). تفکر طراحی در فرایند طراحی معماری. باغ نظر، ۲(۴)، ۱۳-۲۳. https://www.bagh-sj.com/article_126.html
- کیانی، علیرضا. (۱۳۸۱). فرایند برنامه‌ریزی راهبردی. تدبیر، ۱۳(۲۱)، ۴۹-۵۳. <https://sid.ir/paper/420257/fa>
- نظیف، سیمانه. (۱۳۹۲). بررسی فضاهای اندرونی و بیرونی در خانه‌های مسکونی گذشته و تغییر آن به عرصه‌های عمومی امروزی و تأثیر آن بر رفتار افراد خانواده. همایش ملی معماری و شهرسازی انسان‌گرا. <https://search.isc.ac/dl/search/defaultta.aspx?DTC=36&DC=20621>
- طاهری‌سرمد، فائزه و کرمی، علی. (۱۴۰۳). تحلیل سلسله‌مراتب محرمیت در خانه‌های سنتی ایران بر اساس ساختار پلان با رویکرد نحو فضا. معماری و شهرسازی آرمان‌شهر، ۱۷(۴۷)، ۳۱-۱۷. [DOI: 10.22034/AAUD.2024.411150.2807](https://doi.org/10.22034/AAUD.2024.411150.2807)
- جانی‌پور، بهروز. (۱۳۷۹). سیر تحول معماری مسکن تهران در دوره پهلوی [رساله دکتری منتشرنشده]. دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.
- Bryson, J. M. (2018). *Strategic planning for public and nonprofit organizations: A guide to strengthening and sustaining organizational achievement* (5th ed.). Wiley.
- Chen, M., Wang, H., Hu, Z., Zhou, Q., & Zhao, L. (2024). Heritage regeneration models for traditional courtyard houses in a northern Chinese city (Jinan) in the context of urban renewal. *Sustainability*, 16(18), 8089. <https://doi.org/10.3390/su16188089>
- Formolly, A., & Saraei, M. H. (2024). Socio-cultural transformations in modernity and household patterns: A study on local traditions housing and the impact and evolution of vernacular architecture in Yazd, Iran. *City, Territory and Architecture*, 11, 15. <https://doi.org/10.1186/s40410-024-00236-6>



- Gökçen, D., & Özbayraktar, M. (2026). Integrating space syntax and system dynamics for understanding and managing change in rural housing morphology: A case study of traditional village houses in Düzce, Türkiye. *Environment, Development and Sustainability*, 28(2), 5023–5051. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05132-0>
- Moosavi, S. M., Cornadó, C., Askarizad, R., & Garau, C. (2025). The social life of residential architecture: A systematic review on identifying the hidden patterns within the spatial configuration of historic houses. *Buildings*, 15(12), 2120. <https://doi.org/10.3390/buildings15122120>



eISSN:2980-9673

The Art of Green Management

Homepage: <https://agm.journal.art.ac.ir/>



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Identifying and Analyzing the Drivers Shaping the Future of Urban Parks in Mazandaran Province from a Green Management Perspective

Mohammad Zare Abandansari⁽¹⁾, Azam Khalilpour^{(2)*}, Naser Rasoulzadehjedi⁽³⁾

1- PhD, Department of Sports Management, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (<https://orcid.org/0000-0002-3698-0632>)

2- Assistant Professor of Department of Physical Education, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0009-0000-5721-8084>)

3- PhD Candidate in Sports Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (<https://orcid.org/0009-0007-5131-6493>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 19/09/2025 Revised: 30/10/2025 Accepted: 01/11/2025 PP. 133-150 Keywords: Urban Parks, Green Management, Urban Sustainability, Climate Resilience, Smart Water Management Use your device to scan and read the article online	Introduction: Rapid urbanization and spatial expansion exacerbate pressures on urban ecosystems, causing resource depletion, biodiversity loss, and microclimatic degradation. In modern urban planning, urban parks serve as essential green infrastructure, providing critical ecosystem services, promoting public health, mitigating urban heat islands, and attenuating stormwater runoff. These functions are particularly crucial in ecologically vulnerable regions such as Mazandaran Province in northern Iran, which faces high tourist influx, shifting coastal-mountain microclimates, land-use conversion, water scarcity, and rising energy demands. However, merely expanding physical green space does not ensure operational sustainability. The long-term resilience of urban parks depends on how they are designed, maintained, and governed. In response, the “green management” approach provides an integrated framework that optimizes resource consumption, adopts smart technological innovations, and systematically minimizes environmental impact through climate-resilient landscaping, smart water recycling, decentralized renewable energy, and regulatory compliance. Despite expanding literature on urban green infrastructure, existing studies remain fragmented, primarily examining isolated operational metrics rather than conducting holistic analyses. A significant research gap persists regarding systemic structural foresight that evaluates the overarching Political, Economic, Social, Technological, Environmental, and Legal (PESTEL) forces shaping urban park development. Without an integrative structural methodology, urban planners risk misallocating finite municipal resources to superficial symptoms rather than addressing critical leverage points that drive sustainable systemic transformation. The Purpose of the Research: This study aimed to identify, validate, and structurally analyze the critical drivers shaping the future sustainable development of urban parks in Mazandaran Province from a green management perspective. The primary research question directing this investigation was: Which drivers, and through what systemic patterns of mutual influence and dependence, govern the future sustainable development and green management of urban parks in Mazandaran Province? To address this question comprehensively, the research sought to achieve four interconnected operational objectives: first, to extract an exhaustive catalog of potential drivers from the intersection of sustainable urban green infrastructure and green management literature; second, to contextualize, refine, and validate these drivers specifically for the socio-ecological landscape of Mazandaran Province through rigorous expert consensus; third, to map the intricate structural web of interrelations, direct and indirect impacts, and systemic feedback loops among the verified drivers using structural cross-impact analysis; and fourth, to determine the structural role of each driver—differentiating input/determinant forces and critical linkage variables from secondary dependent outcomes and autonomous factors. By achieving these objectives, the study moves beyond traditional, reductionist, one-dimensional evaluations to deliver a systemic roadmap that equips urban municipal authorities, environmental planners, and park

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	administrators with evidence-based leverage points for long-term strategic spatial planning. Methodology: This study employed a structural foresight approach based on a pragmatic paradigm, conducted in four main stages. First, an extensive review of the literature on urban green spaces, green management, climate resilience, and smart resource systems was carried out to extract preliminary drivers, which were then categorized under the six PESTEL dimensions. Second, the content validity, clarity, and regional relevance of the drivers were refined through consultation with a panel of 16 purposefully selected experts in urban planning, environmental science, and municipal management. Third, a three-round Delphi technique was utilized to screen and validate the drivers based on expert agreement; ultimately, 18 strategic drivers achieved high consensus and were retained for structural modeling. Fourth, the interactions among these 18 drivers were analyzed using a cross-impact matrix in MICMAC software. Expert assessments were aggregated to construct the direct influence matrix, and both direct and indirect relationships were computed. Finally, the drivers were mapped onto Cartesian coordinate planes and classified into four strategic groups: input/determinant, linkage/relay, output/dependent, and autonomous variables. Findings and Discussion: The structural analysis revealed that the 18 identified drivers play distinct roles in the green management system of Mazandaran's urban parks. Legal and policy-oriented factors emerged as the primary "engines" of the system (input/determinant quadrant), exerting significant influence while remaining structurally independent. These serve as the essential starting point for any systemic transformation. Technological and environmental factors function as critical "linkage" variables, acting as conduits that translate these high-level policies into operational reality. Conversely, financial and economic factors were classified as dependent variables; rather than acting as initial drivers, they are secondary results that materialize only after robust regulatory and technological frameworks are successfully established. Finally, several socio-cultural and operational factors were found to be largely autonomous, demonstrating weaker direct links to the system's core. These findings align with international literature, reinforcing that sustainable urban development requires prioritizing legislative mandates and technological infrastructure over immediate financial incentives. This confirms that financial sustainability is a downstream benefit of sound green management policy, rather than its initial precursor. Conclusion: The strategic foresight investigation concludes that the future sustainable development and green management of urban parks in Mazandaran Province operate as a hierarchically organized, highly interdependent structural system. The systemic architecture demonstrates that sustainable transformation is initiated by upstream legislative mandates and sustained policy incentives, propagated through intermediary linkage conduits of climate adaptation and smart water-energy technologies, and ultimately culminated in downstream operational cost-efficiencies and expanded ecological returns. Consequently, urban policymakers, municipal authorities, and green space planners must abandon fragmented, piecemeal interventions and instead sequence structural initiatives in strict alignment with the systemic hierarchies identified by the MICMAC model. Municipal authorities must establish the first strategic implementation phase around institutional and regulatory governance: formally embedding mandatory smart-technology prerequisites within park construction and renovation licensing codes (L1), codifying measurable zero-energy operational targets for municipal public assets (L2), and linking administrative and financial concessions directly to verified energy monitoring performance (P1, P2). Once an unyielding legal baseline is secured, capital investments in the second strategic phase must be directed toward the linkage core specifically deploying automated sensor-based irrigation networks (T1), closed-loop graywater recycling treatment plants (En2), and decentralized solar/biomass energy systems (T3) configured specifically to reinforce local microclimatic resilience (En1). Financial returns, measured through tangible reductions in municipal water and energy utility budgets (E2), must be utilized as systemic performance indicators and accountability benchmarks rather than upfront prerequisites. While this study provides an empirically robust, structurally validated roadmap, its methodological boundaries present productive avenues for subsequent scientific inquiry. The empirical focus was restricted specifically to designated urban parks within Mazandaran Province and did not encompass suburban forest parks, protected riparian belts, or unmanaged urban green corridors. Additionally, the structural configuration

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	reflects the collective expert consensus of the selected panel at a specific analytical junction. Future research should formulate dynamic, multi-directional future scenarios based on the four determinant drivers identified, conduct cross-regional structural comparisons across diverse biogeographical zones with differing institutional capabilities, and substantiate the predictive structural pathways through empirical, multi-year longitudinal assessments measuring actual kilowatt-hour energy savings, volumetric water recycling rates, and operational life-cycle cost reductions. Funding: There is no funding support. Authors' Contribution: The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All authors approved the content the manuscript and agreed on all aspects the work. Conflict of Interest: The authors declared no conflict of interest. AI Usage Declaration: The authors declare that no AI tools or generative AI technologies were used in the conceptualization, analysis, writing, or editing of this manuscript. All scientific content, data processing, and results were generated entirely by the authors. Acknowledgments: We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

Highlight

- Identification and validation of 18 PESTEL drivers shaping the future of urban parks in Mazandaran Province using Delphi and MICMAC structural analysis.
- Legal, regulatory, and climate drivers (L2, L1, En1) emerged as the primary influential and input variables driving the green management system.
- Economic indicators act as dependent output variables, indicating that cost reduction is a consequence rather than an initiating driver of green management.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Zare Abandansari, M., Khalilpour, A. & Rasoulzadehjedi, R. (2025). Identifying and Analyzing the Drivers Shaping the Future of Urban Parks in Mazandaran Province from a Green Management Perspective. *The Art of Green Management*, 3(3), 133-150. [10.30480/agm.2026.6632.1093](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6632.1093)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6632.1093>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1562.html



*. Corresponding Author (Email: azkhalilpour1@yahoo)/ (Phone: +989122757141)



شناسایی و تحلیل پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران با رویکرد مدیریت سبز

محمد زارع آبدان‌سری^(۱)، اعظم خلیل‌پور^(۲)، ناصر رسول‌زاده جدی^(۳)

۱- دکتری تخصصی گروه مدیریت ورزشی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. (<https://orcid.org/0000-0002-3698-0632>)

۲- استادیار گروه تربیت بدنی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران. (<https://orcid.org/0009-0000-5721-8084>)

۳- دانشجوی دکتری گروه مدیریت ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (<https://orcid.org/0009-0007-5131-6493>)

ناشر: دانشگاه هنر ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ صص: ۱۵۰-۱۳۳ واژگان کلیدی: تاب‌آوری اقلیمی، پارک‌های شهری، پایدار شهری، مدیریت سبز، مدیریت هوشمند آب 	مقدمه: پارک‌های شهری با توجه به فشارهای محیط‌زیستی، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آب و انرژی از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است؛ اما بررسی هم‌زمان پیشران‌های ساختاری این آینده کمتر مورد توجه واقع شده و نیازمند تحلیل راهبردی اثرات متقابل عوامل چندگانه بر آن است. هدف پژوهش: هدف پژوهش، شناسایی و تحلیل پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران با رویکرد مدیریت سبز بود. روش‌شناسی: با رویکرد آینده‌نگاری ساختاری، فرایند در چهار مرحله‌ی مرور ادبیات، تدوین پیشران‌ها، اعتبارسنجی دلفی با مشارکت ۱۶ خبره و در نهایت تحلیل ماتریس اثرات متقابل با نرم‌افزار میک‌مک اجرا شد و ۱۸ پیشران نهایی در شش بعد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، محیط‌زیستی و حقوقی تحلیل شد. یافته‌ها و بحث: پیشران‌های حقوقی و سیاست‌گذاری (آیین‌نامه‌های هوشمندسازی، استانداردهای انرژی‌صرف) در ربع مولد و دارای بیشترین اثرگذاری و کمترین وابستگی بودند. تاب‌آوری اقلیمی، مدیریت هوشمند بازیافت آب، سیستم‌های هوشمند کنترل مصرف انرژی در تأسیسات پارک‌ها و فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر در گروه متغیرهای رابط با اثرگذاری و وابستگی بالا قرار گرفتند. در پیشران‌های اقتصادی نیز کاهش هزینه‌های آب و انرژی و جذب رویدادهای سبز و اسپانسرهای محیط‌زیستی در گروه متغیرهای وابسته قرار گرفتند، درحالی‌که سرمایه‌گذاری مشارکتی در پروژه‌های ورزشی هوشمند و سبز در گروه متغیرهای مستقل و خنثی قرار گرفت. نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش به مدیران و برنامه‌ریزان شهری در شناسایی اولویت‌های برنامه‌ریزی برای مدیریت سبز پارک‌های شهری کمک می‌کند و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری درباره مدیریت آب و انرژی، سازگاری با تغییر اقلیم، استفاده از فناوری‌های هوشمند و الزامات قانونی در توسعه آینده این فضاها باشد.
نکات برجسته: - شناسایی و اعتبارسنجی ۱۸ پیشران کلیدی پستل بر آینده پارک‌های شهری مازندران با مدیریت سبز و تحلیل ساختاری میک‌مک. - بالاترین اثرگذاری پیشران‌های قانونی و اقلیمی شامل استانداردهای انرژی، آیین‌نامه‌های هوشمندسازی و تغییر اقلیم به‌عنوان متغیرهای ورودی سیستم. - قرارگیری شاخص‌های اقتصادی در دسته متغیرهای وابسته؛ کاهش هزینه‌ها و توجه مالی، پیامد مدیریت سبز پارک‌های شهری است.	ارجاع به این مقاله: زارع آبدان‌سری، محمد، خلیل‌پور، اعظم، و رسول‌زاده جدی، ناصر. (۱۴۰۴). شناسایی و تحلیل پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران با رویکرد مدیریت سبز. هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۱۵۰-۱۳۳. 10.30480/agm.2026.6632.1093



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6632.1093>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1562.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز
Creative Commons CC BY-NC 4.0
قابل استفاده است.

©2024, UST. All rights reserved.



۱- مقدمه

پارک‌های شهری از مهم‌ترین فضاهای عمومی و زیرساخت‌های سبز هستند که برای فعالیتهای اجتماعی، جسمانی و پیوند با طبیعت استفاده می‌شوند. کیفیت و مدیریت این فضاها بر عملکرد محیطی شهر و ارتقای سلامت و رفاه شهروندان اثر مستقیم دارد (Chen et al., 2020; Pinto et al., 2022). کیفیت و نحوه استفاده از پارک‌ها نیز بر تجربه شهروندان از این فضاها اثر دارد و اهمیت مدیریت مناسب آن‌ها را افزایش می‌دهد (Chen et al., 2020; González et al., 2023). از این رو، مسئله اصلی تنها ایجاد یا افزایش تعداد پارک‌ها نمی‌باشد و چگونگی مدیریت و آماده‌سازی آن‌ها برای شرایطی است که در سال‌های آینده تحت تأثیر عوامل مختلف قرار خواهند گرفت. در مطالعات داخلی نیز ابعاد اجتماعی و فرهنگی فضاهای سبز شهری، به‌ویژه پارک‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. براهویی و همکاران (۱۴۰۴)، در پژوهشی پیرامون عدالت اجتماعی در فضای سبز زاهدان، نشان دادند که رشد شهرنشینی موجب توزیع نابرابر خدمات و شکل‌گیری بحران عدالت محیطی در این شهر شده است. یافته‌ها حاکی از فاصله زیاد سرانه فضای سبز با استانداردهای مطلوب و تفاوت فاحش میان مناطق مختلف است. از دیدگاه این پژوهش، اصلاح وضعیت موجود نیازمند بازتوزیع عادلانه منابع، توسعه فضاهای سبز محلی و برنامه‌ریزی متوازن برای ارتقای کیفیت زندگی و سلامت شهروندان است.

پارک‌های شهری علاوه بر کارکردهای اجتماعی، در عملکرد محیطی شهر نیز نقش دارند. همچنین، این فضاها می‌توانند در تنظیم دما، مدیریت آب، کاهش رواناب، حفظ پوشش گیاهی و حمایت از تنوع زیستی نقش داشته باشند. مطالعات نشان داده‌اند که زیرساخت‌های سبز، از جمله پارک‌ها و پوشش گیاهی، می‌توانند به کاهش دمای محیط شهری و بهبود شرایط اقلیمی کمک زیادی کنند (Ji et al., 2024; Zhang & Qian, 2024). همچنین، فضاهای سبز شهری می‌توانند در ارائه خدمات تنظیمی و اکولوژیکی و حمایت از عملکردهای محیطی شهر نقش داشته باشند (Pinto et al., 2022; Yao et al., 2025). بنابراین، عملکرد آینده پارک‌های شهری به مجموعه‌ای از شرایط محیطی، اقتصادی، اجتماعی، مدیریتی، فناورانه و نهادی وابسته است و نمی‌توان وضعیت آینده آن‌ها را بر اساس یک عامل مشخص پیش‌بینی کرد. همچنین، قنبری‌نژاد و همکاران (۱۴۰۱)، در یک مطالعه مروری، رابطه برنامه‌ریزی فضای سبز شهری با ورزش، سلامت و رفاه اجتماعی را بررسی کردند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که فضاهای سبز پیوسته و مناسب می‌توانند فرصت‌هایی برای تحرک و ورزش، کاهش استرس، تفریح و تماس اجتماعی فراهم کنند و در نتیجه با سلامت و رفاه شهروندان ارتباط داشته باشند.

این مسئله در ایران اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا پارک‌های شهری در شهرهای مختلف کشور با شرایط یکسانی مواجه نیستند و تفاوت‌های اقلیمی، محدودیت منابع آب، کیفیت متفاوت زیرساخت‌ها، الگوهای متفاوت استفاده شهروندان و تفاوت در ظرفیتهای مدیریتی، مسیر مدیریت این فضاها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای نمونه، مطالعات انجام‌شده در تهران نشان داده‌اند که کیفیت نگهداری، امکانات، دسترسی، ایمنی و ویژگی‌های محیطی پارک‌ها با میزان استفاده شهروندان ارتباط دارد و مدیریت و نگهداری مناسب از عوامل مهم در عملکرد پارک‌ها محسوب می‌شود (Bahriy & Bell, 2020). همچنین، پژوهش‌های انجام‌شده در شهرهای مختلف ایران نشان داده‌اند که مسائل مربوط به دسترسی، توزیع فضایی، کیفیت فضای سبز، مدیریت منابع و شرایط اقلیمی از جمله موضوعات مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت فضاهای سبز شهری هستند (Madani et al., 2017).

۲- مبانی نظری

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین عواملی است که آینده پارک‌های شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش دما و بیشتر شدن دوره‌های گرما، شرایط استفاده از فضاهای باز شهری را تغییر داده و پارک‌ها و سایر فضاهای سبز با ایجاد سایه و کاهش دمای محیط، بخشی از این آثار منفی مرتبط با دما را کاهش می‌دهند. مطالعات فضاهای سبز شهری نشان داده‌اند که زیرساخت سبز در کاهش اثرات گرما و افزایش تاب‌آوری حرارتی شهرها اثرگذار است (Ji et al., 2024; Zhang & Qian, 2024). همچنین، برنامه‌ریزی هدفمند برای زیرساخت‌های سبز شهری، به کاهش دمای شهر و ایجاد محیط مناسب‌تر برای زندگی افراد کمک می‌کند (Hanna & Comín, 2021; Wang & Foley, 2021). مطالعات جدید در ایران نیز نشان داده‌اند که ساختار و اتصال‌پذیری فضاهای سبز شهری می‌تواند در سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش آثار جزیره حرارتی شهرها نقش مهمی داشته باشد (Omidighalehmohammadi et al., 2026).

آب نیز یکی از مسائل مهم در مدیریت پارک‌های شهری است. بسیاری از پارک‌ها برای حفظ پوشش گیاهی و کیفیت فضای سبز به آب نیاز دارند و افزایش فشار بر منابع آب، مدیریت این فضاها را دشوارتر می‌سازد. از سوی دیگر، پارک‌ها می‌توانند در مدیریت آب بارندگی و کاهش رواناب شهری نقش داشته باشند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مدیریت آبیاری پارک‌ها در شرایط تغییر اقلیم نیازمند بازنگری است و استفاده از الگوهای کم‌مصرف‌تر در شرایط کمبود آب اهمیت زیادی دارد (Doll et al., 2022). پوشش گیاهی و شیوه مدیریت فضای سبز هم بر نفوذ آب بارندگی و ارائه خدمات تنظیمی اثر دارد (Paudel & States, 2023). این مسئله در ایران نیز اهمیت دارد؛ زیرا در برخی شهرها، تأمین آب مورد نیاز فضاهای سبز با فشار فزاینده بر منابع آب همراه است و ضرورت استفاده از روش‌های مناسب آبیاری، انتخاب گونه‌های متناسب با شرایط محیطی و استفاده از منابع جایگزین آب را افزایش داده است (Nimjerdi et al., 2026).

مصرف انرژی نیز یکی دیگر از موضوعاتی است که می‌تواند در مدیریت آینده پارک‌های شهری مورد توجه قرار گیرد. پوشش گیاهی مناسب می‌تواند از طریق کاهش دمای محیط، بر نیاز به سرمایش و مصرف انرژی اثر بگذارد. پژوهش‌های جدید درباره زیرساخت سبز شهری نشان داده‌اند که پوشش گیاهی، سایه و فرایند تبخیر و تعرق می‌تواند در کاهش دمای محیط و افزایش بهره‌وری انرژی نقش داشته باشند (Li et al., 2024; Zhang & Qian, 2024). زارع آبدان‌سری و همکاران (۱۴۰۲) نیز در بررسی راهکارهای توسعه پایدار و مدیریت سبز در طراحی ورزشگاه‌های فوتبال، مجموعه‌ای از راهکارها از جمله بهینه‌سازی مصرف انرژی، توسعه بازیافت، نظارت و ارزیابی، توسعه زیرساخت و استفاده از مصالح سبز را شناسایی کردند. از این منظر، مدیریت پارک‌ها باید علاوه بر حفظ فضای سبز، به نحوه مصرف منابع و هزینه‌های نگهداری نیز توجه کند. پژوهش‌های انجام‌شده درباره طراحی پارک‌های کم‌مصرف نیز نشان داده‌اند که توجه هم‌زمان به هزینه‌های طراحی، نگهداری و مصرف منابع می‌تواند در بهبود عملکرد پارک‌های شهری مؤثر باشد (Breen et al., 2020; Wang & Foley, 2021).

در کنار عوامل محیطی و اقتصادی، فناوری نیز می‌تواند شیوه مدیریت پارک‌های شهری را تغییر دهد. استفاده از داده‌های مکانی، روش‌های پایش و ابزارهای دیجیتال می‌تواند اطلاعات بیشتری درباره وضعیت فضاهای سبز و خدماتی که ارائه می‌کنند در اختیار مدیران قرار دهد. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که استفاده از جی.آی.اس. و ابزارهای تحلیلی می‌تواند در ارزیابی، برنامه‌ریزی و مدیریت فضاهای سبز شهری مورد استفاده قرار گیرند (Halecki et al., 2023; Wu et al., 2025). همچنین، توسعه فناوری‌های هوشمند در پارک‌ها می‌تواند شیوه ارائه خدمات و تعامل کاربران با این فضاها را تغییر دهد (Xie et al., 2024). زارع آبدان‌سری و همکاران (۱۴۰۳) نیز در مطالعه زیرساخت‌های ورزشی ایران، بر نقش مدیریت سبز، فناوری‌های سبز و مدیریت منابع در توسعه پایدار تأکید کردند. در نتیجه، تغییرات فناورانه می‌تواند یکی از عواملی باشد که نحوه برنامه‌ریزی، پایش، نگهداری و ارائه خدمات پارک‌های شهری را در آینده تحت تأثیر قرار دهد.

مشارکت شهروندان و نحوه حکمرانی نیز از دیگر عواملی هستند که می‌توانند مسیر مدیریت پارک‌های شهری را تغییر دهند. پارک‌ها فضاهای عمومی هستند و کیفیت آن‌ها تا حد زیادی با نیازها و نحوه استفاده شهروندان ارتباط دارد. پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که مشارکت کاربران می‌تواند با مدیریت فضاهای سبز شهری و برخی پیامدهای اجتماعی و محیط‌زیستی ارتباط داشته باشد (Huang et al., 2021; Pinto et al., 2022). مشارکت ذی‌نفعان شهری نیز به شکل‌گیری ارتباط بهتر میان جامعه و مدیریت شهر کمک می‌کند و ظرفیت مدیریت فضاهای سبز را افزایش می‌دهد (Huang et al., 2021; Breen et al., 2020). از سوی دیگر، تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی، تأمین مالی، نگهداری، همکاری میان سازمان‌ها و نحوه تخصیص منابع می‌تواند بر مسیر مدیریت پارک‌ها اثر بگذارد. برخی مطالعات نیز نشان داده‌اند که شیوه‌های حکمرانی و نحوه هماهنگی میان ذی‌نفعان بر مدیریت زیرساخت‌های سبز شهری اثر می‌گذارد (Breen et al., 2020; Huang et al., 2021). همکاری میان سازمان‌ها و مشارکت گروه‌های مختلف هم ظرفیت مدیریت این فضاها را افزایش می‌دهد (Huang et al., 2021; Wang & Foley, 2021). از منظر مدیریت شهری، درگاهی و همکاران (۱۴۰۱) عملکرد مدیریت شهری و حاکمیت محلی را در گسترش فضاهای سبز عمومی (پارک‌ها) در منطقه ۱۱ شهرداری تهران بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که کمبود فضای سبز در منطقه مورد مطالعه محسوس بوده و عملکرد مدیریت شهری در شاخص‌های بررسی‌شده مطلوب ارزیابی نشده است؛ بنابراین، پژوهش بر بازبینی و اصلاح وضعیت فضای سبز شهری و کارکردهای فضایی و مکانی آن تأکید دارد.

در همین راستا استان مازندران به دلیل ویژگی‌های طبیعی، اقلیمی و اقتصادی خود، شرایط متفاوتی برای بررسی آینده پارک‌های شهری دارد. این استان از یک سو از پهنه‌های جنگلی، ساحلی و طبیعی ارزشمند برخوردار است و از سوی دیگر با فعالیت‌های شهری، گردشگری و فشارهای ناشی از استفاده از منابع طبیعی مواجه است. بنابراین، مدیریت فضاهای سبز و پارک‌های شهری



در این استان تنها یک مسئله محلی نمی‌باشد و با مجموعه‌ای از عوامل محیطی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی ارتباط دارد. یافته‌های پژوهش حیدری و همکاران (۲۰۲۵) در استان مازندران نیز نشان داده است که برنامه‌ریزی فضاهای تفریحی و اکولوژیک در این استان تحت تأثیر مجموعه‌ای از معیارهای مرتبط با دسترسی، خدمات، کاربری زمین، مخاطرات طبیعی و شرایط اقلیمی قرار دارد. این یافته نشان می‌دهد که شرایط طبیعی و مدیریتی مازندران را نمی‌توان با یک شاخص منفرد توضیح داد و بررسی آینده فضاهای سبز و تفریحی این استان به نگاه چندبعدی نیاز دارد.

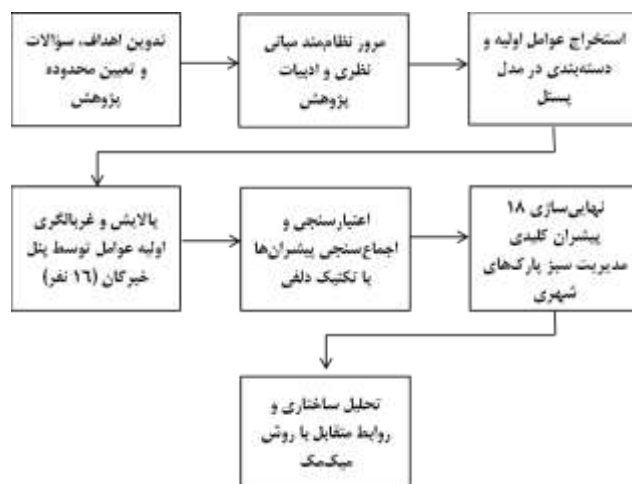
درعین‌حال، مسئله آینده پارک‌های شهری در مازندران فقط به شرایط طبیعی محدود نمی‌شود. تغییر در الگوهای استفاده از فضاهای عمومی، افزایش نیاز به خدمات شهری، هزینه‌های نگهداری، ضرورت استفاده مناسب از آب و انرژی، تغییرات اقلیمی، توسعه فناوری‌های مدیریتی و نحوه همکاری میان نهادهای مسئول می‌توانند مسیر آینده این فضاها را تغییر دهند. بنابراین، اگرچه هر یک از این عوامل در مطالعات مختلف بررسی شده‌اند، هنوز مشخص نیست که این عوامل در کنار یکدیگر چگونه بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران اثر می‌گذارند و کدامیک از آن‌ها نقش بیشتری در شکل‌دهی به آینده این فضاها دارند. مطالعات انجام‌شده در تهران، مشهد، تبریز و سایر شهرهای کشور بیشتر بر موضوعاتی مانند کیفیت و استفاده از پارک‌ها، دسترسی فضایی، شرایط حرارتی، مدیریت آب، طراحی پارک و روابط میان ذی‌نفعان تمرکز داشته‌اند (Bahriny & Bell, 2020; Doll et al., 2022; Gholami & Kolahi, 2026; Omidighalehmohammadi et al., 2026). برای نمونه، مطالعات اخیر در تبریز بر نقش روابط میان ذی‌نفعان و ساختارهای حکمرانی در تاب‌آوری پارک‌های شهری تأکید کرده‌اند، در حالی که مطالعات انجام‌شده در مشهد، ارتباط میان وضعیت پوشش گیاهی، مصرف آب و شرایط محیطی را بررسی کرده‌اند. با وجود ارزش این مطالعات، بیشتر آن‌ها بر یک یا چند موضوع مشخص تمرکز کرده‌اند و کمتر به شناسایی هم‌زمان مجموعه پیشران‌هایی پرداخته‌اند که می‌توانند مسیر آینده پارک‌های شهری را تغییر دهند.

ازسوی دیگر، مطالعات مربوط به فضاهای سبز نشان داده‌اند که تصمیمات امروز می‌توانند بر کیفیت، کارکرد و تاب‌آوری این فضاها در آینده اثر بگذارند (Wang & Foley, 2021; Huang et al., 2026). در نتیجه، اتکا به ارزیابی وضعیت موجود برای برنامه‌ریزی آینده پارک‌های شهری کافی نیست و لازم است عوامل و نیروهایی که می‌توانند مسیر آینده این فضاها را تغییر دهند، شناسایی شوند. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر می‌شود که عوامل مؤثر بر پارک‌ها مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند؛ برای مثال، تغییرات اقلیمی می‌تواند بر نیاز آبی و هزینه نگهداری اثر بگذارد، شرایط اقتصادی می‌تواند توان مدیریت و سرمایه‌گذاری را تغییر دهد، فناوری می‌تواند روش پایش و نگهداری را متحول کند و تصمیمات مدیریتی و قانونی می‌تواند امکان اجرای راهکارهای جدید را تعیین کند. بنابراین، شناخت روابط میان این عوامل برای برنامه‌ریزی آینده پارک‌های شهری اهمیت دارد.

با وجود مطالعات متعدد درباره خدمات اکوسیستمی، سلامت، تغییرات اقلیمی، مدیریت آب، فناوری، مشارکت اجتماعی و مدیریت فضاهای سبز، هنوز شکاف مشخصی در بررسی هم‌زمان و ساختاری پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران وجود دارد. مطالعات موجود در مازندران نیز بیشتر به ظرفیت‌های فضایی و طبیعی، ارزش‌های تفریحی یا مکان‌یابی و توسعه فضاهای تفریحی پرداخته‌اند (Mokhtari & Hosseinifar, 2013; Heydari et al., 2025). درحالی‌که شناخت پیشران‌های اصلی و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر آینده پارک‌های شهری می‌تواند اطلاعات متفاوتی برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی فراهم کند. از این نظر، پژوهش‌های پیشین بیشتر بر بررسی یک یا چند بعد مشخص از پارک‌ها و فضاهای سبز تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که پژوهش حاضر تلاش می‌کند عوامل مؤثر بر آینده پارک‌های شهری را به‌صورت هم‌زمان و در قالب یک ساختار مرتبط با یکدیگر بررسی کند. همچنین، در مطالعات مورد اشاره، تمرکز اصلی بر موضوعاتی مانند ظرفیت‌های فضایی و طبیعی، ارزش‌های تفریحی، مکان‌یابی و توسعه فضاهای تفریحی بوده است، اما در پژوهش حاضر علاوه بر این زمینه‌ها، پیشران‌های سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، محیط‌زیستی و حقوقی نیز در یک چارچوب واحد مورد بررسی قرار می‌گیرند.

وجه تمایز اصلی پژوهش حاضر، تمرکز بر شناسایی و تحلیل ساختار اثرگذاری و وابستگی میان پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران با رویکرد مدیریت سبز است. در این پژوهش، هدف صرفاً شناسایی عوامل مؤثر نیست و جایگاه هر پیشران در ساختار روابط متقابل میان عوامل نیز بررسی می‌شود تا مشخص شود کدام پیشران‌ها اثرگذاری بیشتری دارند، کدام عوامل بیشتر از سایر پیشران‌ها اثر می‌پذیرند و کدام عوامل در ارتباط متقابل با بخش‌های مختلف این ساختار قرار می‌گیرند. بنابراین، مطالعه حاضر از نظر توجه هم‌زمان به ابعاد مختلف و تحلیل روابط اثرگذاری و وابستگی میان آن‌ها، رویکرد متفاوتی

نسبت به مطالعاتی دارد که هر یک بر جنبه مشخصی از پارک‌ها و فضاهای سبز تمرکز کرده‌اند. لذا، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که آینده پارک‌های شهری استان مازندران تحت تأثیر چه پیشران‌هایی قرار می‌گیرد و این پیشران‌ها چه الگویی از اثرگذاری و وابستگی نسبت به یکدیگر دارند. پاسخ به این مسئله می‌تواند مشخص کند کدام عوامل باید در برنامه‌ریزی و مدیریت آینده پارک‌های شهری استان مورد توجه بیشتری قرار گیرند و کدام عوامل از طریق اثرگذاری بر سایر عوامل، نقش تعیین‌کننده‌تری در شکل‌دهی به آینده خواهند داشت. پرسش اصلی پژوهش این است که پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری استان مازندران کدام‌اند و چه الگوی اثرگذاری و وابستگی میان آن‌ها وجود دارد؟ در ادامه بر اساس تصویر ۱، چارچوب مفهومی پژوهش و مسیر شکل‌گیری پیشران‌ها از مبانی نظری تا تحلیل ساختاری ارائه شده است.



تصویر ۱- چارچوب مفهومی و فرایند شکل‌گیری پیشران‌های پژوهش

۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، آینده‌نگرانه است و با راهبرد آینده‌نگاری انجام شد. از نظر پارادایم، پژوهش حاضر در چارچوب پارادایم عمل‌گرایی قرار می‌گیرد؛ زیرا متناسب با مسئله‌ی پژوهش، از ترکیب روش‌ها و منابع مختلف برای شناسایی، اعتبارسنجی و تحلیل پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری با رویکرد مدیریت سبز استفاده شد. در این چارچوب، فرایند پژوهش در چهار مرحله شامل: بررسی منابع علمی و استخراج پیشران‌های اولیه، شناسایی و اصلاح پیشران‌ها با کمک خبرگان، اعتبارسنجی پیشران‌ها با روش دلفی و تحلیل روابط میان پیشران‌های نهایی با روش میک‌مک انجام شد.

ابتدا با جست‌وجوی منابع بر اساس کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع پژوهش و ترکیب آن‌ها با مفاهیمی مانند آینده پارک‌های شهری، مدیریت سبز، فضای سبز شهری، تغییر اقلیم، آب، انرژی، فناوری و مشارکت شهروندان انجام شد. منابعی در تدوین فهرست اولیه مورد استفاده قرار گرفتند که ارتباط مستقیم یا قابل‌توجهی با موضوع پژوهش و عوامل مؤثر بر وضعیت و آینده پارک‌های شهری داشتند. عواملی که در منابع مختلف با مفهوم مشابه مطرح شده بودند، به‌صورت جداگانه تکرار نشدند و موارد هم‌پوشان در یک عامل با عنوان روش‌تر و جامع‌تر ادغام شدند. همچنین، عوامل فاقد ارتباط مشخص با موضوع پژوهش یا عواملی که مفهوم آن‌ها با سایر عوامل تداخل اساسی داشت، از فهرست اولیه کنار گذاشته شدند. هدف از این بررسی، شناسایی عوامل و شرایطی بود که می‌توانند بر مدیریت سبز پارک‌های شهری در آینده تأثیر بگذارند. عوامل اولیه پس از بررسی و مقایسه، موارد مشابه و هم‌پوشان حذف یا ادغام شدند و مجموعه‌ی اولیه پیشران‌ها شکل گرفت. سپس پیشران‌ها در شش بعد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، محیط‌زیستی و قانونی بر اساس چارچوب پستل دسته‌بندی شدند.

در مرحله‌ی دوم، پیشران‌های اولیه در اختیار خبرگان مرتبط با مدیریت شهری، پارک‌های شهری، مدیریت سبز، محیط‌زیست، برنامه‌ریزی شهری و فناوری قرار گرفتند. خبرگان با روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند و از میان جامعه ذکر شده، ۱۶ نفر انتخاب شدند. معیار انتخاب خبرگان، برخورداری از دانش و تجربه مرتبط با حداقل یکی از حوزه‌های مدیریت شهری، برنامه‌ریزی شهری، مدیریت و برنامه‌ریزی پارک‌های شهری، مدیریت سبز، محیط‌زیست یا فناوری‌های مرتبط با مدیریت



شهری و همچنین مدیریت ورزشی با تخصص در حوزه امکان بود. لذا، انتخاب خبرگان با توجه به ارتباط تخصصی آنها با موضوع پژوهش و توانایی ارزیابی پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری انجام شد. در جدول ۱، ویژگی‌های مشارکت‌کنندگان ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات خبرگان

ردیف	جنسیت	تحصیلات	حوزه تخصصی	سمت/شغل
۱	مرد	دکتری	گروه جغرافیا برنامه ریزی شهری	عضو هیئت علمی دانشگاه
۲	مرد	دکتری	گروه جغرافیا برنامه ریزی شهری	عضو هیئت علمی دانشگاه
۳	زن	دکتری	گروه علوم محیط زیست	عضو هیئت علمی دانشگاه
۴	مرد	دکتری	گروه علوم محیط زیست	عضو هیئت علمی دانشگاه
۵	مرد	دکتری	گروه علوم محیط زیست	عضو هیئت علمی دانشگاه
۶	مرد	کارشناسی ارشد	مدیریت شهری	معاونت خدمات شهری و محیط زیست
۷	مرد	کارشناسی ارشد	مدیریت و برنامه‌ریزی پارک‌های شهری	مدیر سازمان سیما منظر و فضای سبز شهرداری
۸	مرد	کارشناسی ارشد	مدیریت و برنامه‌ریزی پارک‌های شهری	کارشناس سازمان سیما، منظر و فضای سبز شهرداری
۹	مرد	کارشناسی ارشد	برنامه‌ریزی و مدیریت شهری	کارشناس شهرسازی شهرداری
۱۰	مرد	کارشناسی ارشد	برنامه‌ریزی و مدیریت شهری	کارشناس شهرسازی شهرداری
۱۱	مرد	دکتری	برنامه‌ریزی و مدیریت شهری	کارشناس شهرسازی شهرداری
۱۲	مرد	کارشناسی ارشد	برنامه‌ریزی و مدیریت شهری	کارشناس محیط‌زیست شهری
۱۳	مرد	دکتری	گروه مدیریت ورزشی با تخصص در حوزه امکان	عضو هیئت علمی دانشگاه
۱۴	مرد	دکتری	گروه مدیریت ورزشی با تخصص در حوزه امکان	عضو هیئت علمی دانشگاه
۱۵	زن	دکتری	گروه مدیریت ورزشی با تخصص در حوزه امکان	عضو هیئت علمی دانشگاه
۱۶	مرد	کارشناسی ارشد	مدیریت سبز	کارشناس فضای سبز شهری

از نظر ترکیب تخصصی نیز تلاش شد خبرگان از حوزه‌های مختلف مرتبط با موضوع پژوهش انتخاب شوند تا شناسایی پیشران‌ها تنها بر یک حوزه تخصصی متکی نباشد و درباره اهمیت، ارتباط، وضوح و تمایز هر یک از پیشران‌ها نظر تخصصی خود را ارائه دادند. همچنین، در صورت وجود عامل مهمی که در فهرست اولیه قرار نداشت، خبرگان آن را پیشنهاد کردند. نظرات دریافت شده بررسی شد و موارد مشابه ادغام، موارد نامناسب حذف و عبارت‌های مبهم اصلاح شدند. به این ترتیب، نظر خبرگان در این مرحله فقط برای تأیید فهرست اولیه استفاده نشد و برای اصلاح عنوان و محتوای پیشران‌ها، حذف عوامل نامرتبط، ادغام عوامل هم‌پوشان و شناسایی عوامل احتمالی جاافتاده نیز مورد استفاده قرار گرفت. در پایان این مرحله، فهرست اولیه پیشران‌ها برای ورود به فرایند دلفی آماده شد.

در مرحله سوم، برای بررسی اهمیت و دستیابی به توافق میان خبرگان از روش دلفی استفاده شد. پیشران‌های اصلاح شده در قالب پرسشنامه در اختیار اعضای پنل قرار گرفتند و اهمیت هر پیشران با استفاده از طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت از (اهمیت بسیار کم) تا (اهمیت بسیار زیاد) ارزیابی شد. برای تعیین میزان اجماع، پاسخ‌های (اهمیت زیاد) و (اهمیت بسیار زیاد) به عنوان پاسخ‌های موافق با اهمیت پیشران در نظر گرفته شدند. در این راستا، درصد اجماع از طریق تقسیم تعداد خبرگان موافق بر کل اعضای پنل یعنی ۱۶ نفر ضرب در ۱۰۰ محاسبه شد که بر این اساس وزن رأی هر خبره معادل ۲۵/۶ درصد است. در این پژوهش، از درصد توافق به عنوان شاخص اجماع استفاده شد و حداقل ۷۰ درصد توافق (موافقت حداقل ۱۲ نفر از ۱۶ خبره) به عنوان معیار دستیابی به اجماع و حفظ پیشران در نظر گرفته شد. این آستانه با توجه به کاربرد رایج درصد توافق در مطالعات دلفی و گزارش آستانه‌های ۷۰ تا ۸۰ درصد در مطالعات روش شناختی انتخاب شد.

پیشران‌هایی که میزان توافق تعیین‌شده میان خبرگان را به دست آوردند، حفظ شدند و مواردی که توافق کافی درباره آنها وجود نداشت، بررسی و در صورت نیاز اصلاح یا حذف شدند. در دور بعد نیز نتایج کلی دور قبل در اختیار خبرگان قرار گرفت تا در صورت نیاز ارزیابی خود را بازنگری کنند. در این مرحله، بازخورد گروهی با هدف فراهم کردن امکان بازنگری در ارزیابی‌ها و افزایش همگرایی دیدگاه‌های خبرگان ارائه شد. در نهایت، پیشران‌هایی که به معیار تعیین‌شده برای اجماع دست یافتند، به عنوان پیشران‌های نهایی انتخاب شدند. در پایان فرایند دلفی، ۱۸ پیشران برای ادامه تحلیل انتخاب شدند.

روایی و پایایی فرایند شناسایی و اعتبارسنجی پیشران‌ها نیز در مراحل مختلف پژوهش مورد توجه قرار گرفت. روایی محتوایی پیشران‌ها از طریق بررسی تخصصی خبرگان بررسی شد؛ به این صورت که خبرگان علاوه بر ارزیابی اهمیت پیشران‌ها، ارتباط آن‌ها با موضوع پژوهش، وضوح عبارت‌ها و تمایز آن‌ها از یکدیگر را بررسی کردند و امکان پیشنهاد عوامل جدید نیز برای آنها فراهم شد. بر این اساس، پیشران‌هایی که از نظر مفهومی نامرتبط، مبهم یا دارای هم‌پوشانی بودند، پیش از ورود به مرحله دلفی اصلاح، ادغام یا حذف شدند. پایایی فرایند دلفی نیز از طریق اجرای ارزیابی در چند دور و بررسی ثبات نتایج در دورهای متوالی مورد توجه قرار گرفت. بازنگری پاسخ‌ها پس از دریافت بازخورد گروهی و بررسی میزان توافق خبرگان در دورهای متوالی، مبنای ارزیابی پایایی نتایج قرار گرفت و پیشران‌هایی که معیار اجماع تعیین‌شده را کسب کردند، برای ادامه فرایند پژوهش حفظ شدند.

در مرحله چهارم، روابط میان پیشران‌های نهایی با استفاده از روش میک مک بررسی شد. برای این منظور، یک ماتریس اثرات متقابل تشکیل شد و میزان تأثیر مستقیم هر پیشران بر سایر پیشران‌ها توسط خبرگان تعیین شد. در این ماتریس، عدد صفر نشان‌دهنده نبود تأثیر، عدد یک نشان‌دهنده تأثیر ضعیف، عدد دو نشان‌دهنده تأثیر متوسط و عدد سه نشان‌دهنده تأثیر قوی بود. در این پژوهش از گزینه (تأثیر بالقوه) استفاده نشد. برای تجمیع ماتریس‌های تکمیل شده توسط ۱۶ خبره و دستیابی به یک ماتریس واحد جهت ورود به نرم‌افزار میک مک، از شاخص آماری مد (بیشترین فراوانی پاسخ خبرگان) برای هر رابطه استفاده شد و در موارد برابری فراوانی‌ها، میانگین نظرات خبرگان محاسبه و به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد شد. سپس میزان تأثیرگذاری و وابستگی هر پیشران محاسبه شد و جایگاه آن‌ها در ساختار تأثیرگذاری و وابستگی مشخص شد. در ادامه، روابط غیرمستقیم میان پیشران‌ها نیز بررسی شد تا مشخص شود هر عامل چگونه می‌تواند از طریق سایر عوامل بر بخش‌های مختلف سیستم اثر بگذارد. بر اساس نتایج میک مک، پیشران‌ها از نظر میزان تأثیرگذاری و وابستگی در گروه‌های مختلف قرار گرفتند و عوامل دارای نقش مهم‌تر در ساختار آینده مدیریت سبز پارک‌های شهری شناسایی شدند. در مجموع، ترکیب بررسی منابع، نظر خبرگان، دلفی و میک مک امکان شناسایی، اعتبارسنجی و تحلیل ساختاری پیشران‌های مؤثر بر آینده مدیریت سبز پارک‌های شهری را فراهم کرد. این فرایند کمک کرد تا عوامل مهم فقط به صورت جداگانه شناسایی نشوند، بلکه روابط و میزان تأثیرگذاری و وابستگی آن‌ها نیز بررسی شوند.

۴- تحلیل داده‌ها

بر این اساس، پرسشنامه‌ای ساختاریافته در اختیار همان خبرگان قرار گرفت تا میزان اهمیت پیشران‌های شناسایی‌شده در شکل‌دهی به آینده مدیریت سبز پارک‌های شهری با استفاده از طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت ارزیابی شود. پیشران‌هایی که به سطح اجماع تعیین‌شده و میزان اهمیت مطلوب دست یافتند، برای بررسی بیشتر حفظ شدند. در دور سوم، نتایج تجمیعی پاسخ‌ها و سطوح اجماع دور قبل در اختیار خبرگان قرار گرفت تا در صورت نیاز، قضاوت‌های خود را بازنگری و اصلاح کنند. پس از تکمیل فرایند سه‌دوره‌ای دلفی، مجموعه نهایی پیشران‌های اعتبارسنجی‌شده تعیین شد. نتایج تلفیقی مرور مطالعات و اسناد و فرایند دلفی، شامل پیشران‌های نهایی و سطوح اجماع آن‌ها، در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲- پیشران‌های پستل^۱ اعتبارسنجی‌شده با روش دلفی و سطوح اجماع

حوزه پستل	پیشران	کد پستل	اجماع دور دوم دلفی (%)	اجماع دور سوم دلفی (%)
سیاسی	قوانین مرتبط با ساخت پارک‌های شهری با انرژی صفر	P1	۸۱،۲۵	۹۳،۷۵
	تسهیلات ویژه برای پارک‌های شهری دارای پایش هوشمند انرژی	P2	۸۱،۲۵	۸۷،۵۰
	ادغام شاخص‌های شهر هوشمند در توسعه پارک‌های شهری	P3	۸۷،۵۰	۹۳،۷۵
اقتصادی	سرمایه‌گذاری مشارکتی در پروژه‌های ورزشی هوشمند و سبز	E1	۹۳،۷۵	۹۳،۷۵
	کاهش هزینه‌های آب و انرژی در پارک‌های شهری هوشمند	E2	۸۱،۲۵	۸۷،۵۰
	جذب رویدادهای سبز و اسپانسرهای محیط‌زیستی	E3	۸۷،۵۰	۹۳،۷۵

اجتماعی	S1	۷۵۰۰۰	۸۱۰۲۵	انتظار شهروندان برای دسترسی به فضاهای هوشمند و پایدار
	S2	۸۱۰۲۵	۸۷۰۵۰	گرایش به اپلیکیشن‌ها و تعامل با محیط‌های هوشمند
	S3	۸۷۰۵۰	۸۷۰۵۰	مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی سازمان‌های شهری
فناورانه	T1	۹۳۰۷۵	۱۰۰۰۰۰	سیستم‌های هوشمند کنترل مصرف انرژی در تأسیسات پارک‌ها
	T2	۷۵۰۰۰	۸۱۰۲۵	فناوری‌های دیجیتال برای آموزش پایدار به مراجعان
	T3	۸۱۰۲۵	۸۷۰۵۰	فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر در فضای پارک‌های شهری
زیست‌محیطی	En1	۸۷۰۵۰	۹۳۰۷۵	تغییر اقلیم و نیاز به طراحی پارک‌های شهری تاب‌آور
	En2	۹۳۰۷۵	۱۰۰۰۰۰	کمبود منابع آب و نیاز به سیستم‌های هوشمند بازیافت آب
	En3	۸۱۰۲۵	۸۷۰۵۰	ضرورت حفظ پوشش گیاهی بومی در پارک‌های شهری
حقوقی	L1	۷۵۰۰۰	۸۱۰۲۵	آیین‌نامه‌های اجباری هوشمندسازی در پروانه ساخت پارک‌های شهری
	L2	۸۷۰۵۰	۹۳۰۷۵	الزام به رعایت استانداردهای بین‌المللی مدیریت انرژی
	L3	۸۱۰۲۵	۸۷۰۵۰	قوانین مدیریت پسماند تجهیزات الکترونیکی پارک‌ها

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که هر ۱۸ پیشران در دور سوم دلفی به سطح بالایی از اجماع دست یافته‌اند و برای تحلیل ساختاری با روش میک مک تأیید شده‌اند. بر این اساس، پس از تحلیل ماتریس اثرات متقابل مستقیم، مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس برای هر یک از ۱۸ پیشران محاسبه شد. مجموع سطرها میزان اثرگذاری مستقیم هر پیشران و مجموع ستون‌ها میزان وابستگی مستقیم آن را نشان می‌دهد. نتایج این محاسبات در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس اثرات مستقیم پیشران‌ها

شماره	متغیر	کد پستل	مجموع سطرها	مجموع ستون‌ها
۱	قوانین مرتبط با ساخت پارک‌های شهری با انرژی صفر	P1	۳۳	۲۷
۲	تسهیلات ویژه برای پارک‌های شهری دارای پایش هوشمند انرژی	P2	۳۳	۲۵
۳	ادغام شاخص‌های شهر هوشمند در توسعه پارک‌های شهری	P3	۳۰	۲۷
۴	سرمایه‌گذاری مشارکتی در پروژه‌های ورزشی هوشمند و سبز	E1	۲۵	۲۷
۵	کاهش هزینه‌های آب و انرژی در پارک‌های شهری هوشمند	E2	۲۶	۳۷
۶	جذب رویدادهای سبز و اسپانسرهای محیط‌زیستی	E3	۲۳	۳۱
۷	انتظار شهروندان برای دسترسی به فضاهای هوشمند و پایدار	S1	۲۸	۲۹
۸	گرایش به اپلیکیشن‌ها و تعامل با محیط‌های هوشمند	S2	۲۱	۲۳
۹	مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی سازمان‌های شهری	S3	۲۸	۲۸
۱۰	سیستم‌های هوشمند کنترل مصرف انرژی در تأسیسات پارک‌ها	T1	۳۱	۳۶
۱۱	فناوری‌های دیجیتال برای آموزش پایدار به مراجعان	T2	۲۴	۲۵
۱۲	فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر در فضای پارک‌های شهری	T3	۳۳	۳۷
۱۳	تغییر اقلیم و نیاز به طراحی پارک‌های شهری تاب‌آور	En1	۳۶	۳۴
۱۴	کمبود منابع آب و نیاز به سیستم‌های هوشمند بازیافت آب	En2	۳۴	۳۵
۱۵	ضرورت حفظ پوشش گیاهی بومی در پارک‌های شهری	En3	۲۶	۳۳
۱۶	آیین‌نامه‌های اجباری هوشمندسازی در پروانه ساخت پارک‌های شهری	L1	۳۹	۲۸
۱۷	الزام به رعایت استانداردهای بین‌المللی مدیریت انرژی	L2	۴۰	۲۶
۱۸	قوانین مدیریت پسماند تجهیزات الکترونیکی پارک‌ها	L3	۲۲	۲۴
—	—	مجموع	۵۳۲	۵۳۲



مجموع مقادیر سطرها و ستون‌ها برابر با ۵۳۲ است که نشان‌دهنده توازن کلی اثرگذاری و وابستگی مستقیم در ماتریس است. این نتایج مبنایی برای شناسایی پیشران‌های اثرگذار و اثرپذیر و تحلیل ساختار روابط میان آن‌ها در مرحله میک میک فراهم می‌کند. پس از محاسبه میزان اثرگذاری و وابستگی مستقیم و غیرمستقیم پیشران‌ها، رتبه هر یک از پیشران‌ها بر اساس شدت اثرگذاری و وابستگی تعیین شد. نتایج حاصل از تحلیل میک میک برای شناسایی پیشران‌های کلیدی و میزان نقش آن‌ها در ساختار آینده مدیریت سبز پارک‌های شهری در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۴- میزان اثرگذاری، وابستگی مستقیم و غیرمستقیم پیشران‌های کلیدی بر آینده مدیریت سبز پارک‌های شهری

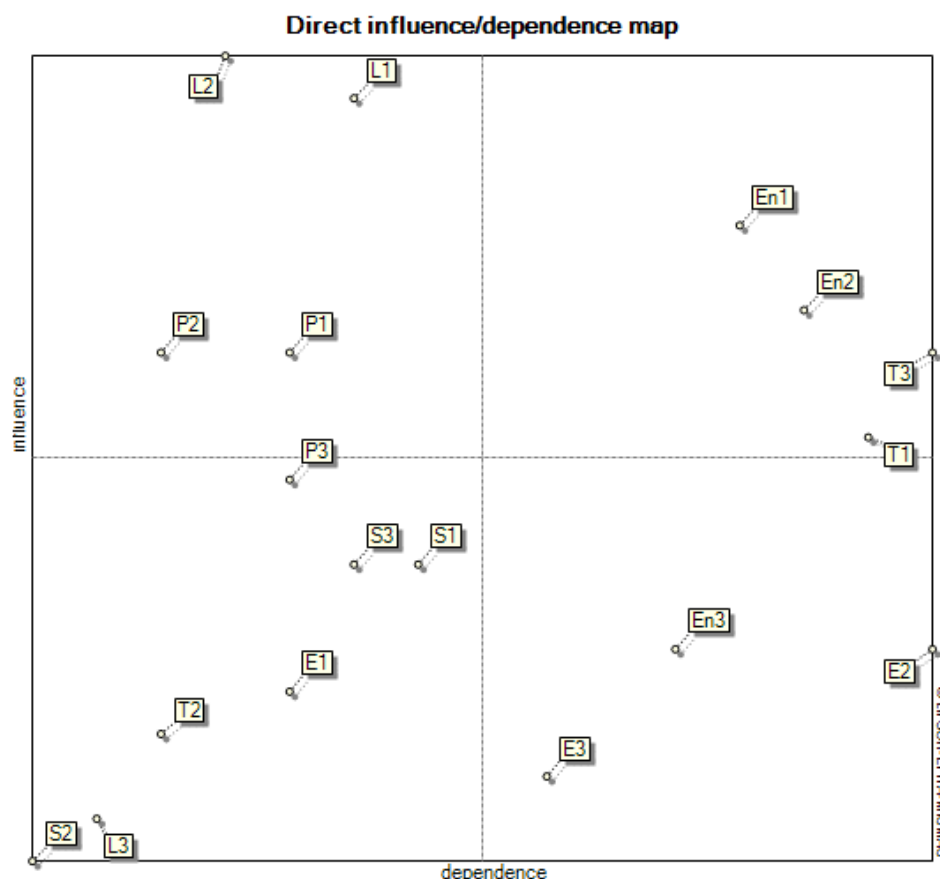
رتبه	متغیر اثرگذار	میزان اثرگذاری مستقیم	متغیر اثرپذیر	میزان وابستگی مستقیم	متغیر اثرگذار	میزان اثرگذاری غیرمستقیم	متغیر اثرپذیر	میزان وابستگی غیرمستقیم
۱	L2	۷۵۱	E2	۶۹۵	L2	۷۵۲	E2	۷۰۱
۲	L1	۷۳۳	T3	۶۹۵	L1	۷۳۰	T3	۶۸۵
۳	En1	۶۷۶	T1	۶۷۶	En1	۶۷۷	En2	۶۷۲
۴	En2	۶۳۹	En2	۶۵۷	P1	۶۴۵	T1	۶۷۲
۵	P1	۶۲۰	En1	۶۳۹	En2	۶۴۲	En1	۶۴۹
۶	P2	۶۲۰	En3	۶۲۰	P2	۶۲۷	En3	۶۲۳
۷	T3	۶۲۰	E3	۵۸۲	T3	۶۱۸	E3	۵۸۳
۸	T1	۵۸۲	S1	۵۴۵	T1	۵۸۰	S1	۵۴۳
۹	P3	۵۶۳	S3	۵۲۶	P3	۵۶۴	S3	۵۲۶
۱۰	S1	۵۲۶	L1	۵۲۶	S3	۵۱۲	L1	۵۲۳
۱۱	S3	۵۲۶	P1	۵۰۷	S1	۵۱۱	E1	۵۰۶
۱۲	E2	۴۸۸	P3	۵۰۷	En3	۴۹۸	P1	۵۰۳
۱۳	En3	۴۸۸	E1	۵۰۷	E2	۴۹۴	L2	۴۹۳
۱۴	E1	۴۶۹	L2	۴۸۸	E1	۴۶۱	P3	۴۹۲
۱۵	T2	۴۵۱	P2	۴۶۹	T2	۴۳۹	P2	۴۶۶
۱۶	E3	۴۳۲	T2	۴۶۹	E3	۴۲۶	T2	۴۶۴
۱۷	L3	۴۱۳	L3	۴۵۱	L3	۴۲۵	L3	۴۶۲
۱۸	S2	۳۹۴	S2	۴۳۲	S2	۳۹۰	S2	۴۲۹

نتایج نشان می‌دهد که پیشران‌های قانونی، محیط‌زیستی و سیاست‌گذاری در میان عوامل دارای اثرگذاری بالاتر قرار دارند. مقایسه اثرگذاری و وابستگی مستقیم و غیرمستقیم نیز تغییرات ساختاری روابط میان پیشران‌ها را در نظام مورد مطالعه نشان می‌دهد.

۵- یافته‌ها و بحث

در تحلیل ماتریس اثرات متقابل موقعیت هر یک از ۱۸ پیشران در دستگاه مختصات دوبعدی اثرگذاری وابستگی مشخص شد. میانگین کل اثرگذاری و وابستگی مبنای تفکیک سیستم به چهار ربع اصلی قرار گرفت. پیشران‌های کلیدی و رابط با برخورداری از اثرگذاری و وابستگی بالا شامل تغییر اقلیم و نیاز به طراحی پارک‌های شهری تاب‌آور و کمبود منابع آب و نیاز به سیستم‌های هوشمند بازیافت آب و سیستم‌های هوشمند کنترل مصرف انرژی در تأسیسات پارک‌ها و فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر در فضای پارک‌های شهری می‌باشند. این عوامل بیشترین حساسیت و ناپایداری را در پویایی سیستم دارا بوده و هرگونه تغییری در آن‌ها کل نظام مدیریت سبز پارک‌های شهری را دستخوش دگرگونی می‌کند. پیشران‌های مولد و ورودی با اثرگذاری بالا و وابستگی پایین شامل آیین‌نامه‌های اجباری هوشمندسازی در پروانه ساخت پارک‌های شهری و الزام به رعایت استانداردهای بین‌المللی مدیریت انرژی و قوانین مرتبط با ساخت پارک‌های شهری با انرژی صفر و تسهیلات ویژه برای پارک‌های شهری دارای پایش هوشمند انرژی هستند. این متغیرها به عنوان متغیرهای محرک پیش‌برنده و ورودی سیستم عمل کرده و کمترین وابستگی را به عملکرد سایر بخش‌ها دارند بنابراین اهم‌های اصلی سیاست‌گذاری به شمار می‌آیند. پیشران‌های وابسته و خروجی با اثرگذاری پایین و وابستگی بالا شامل ضرورت حفظ پوشش گیاهی بومی در پارک‌های شهری و کاهش هزینه‌های آب و

انرژی در پارک‌های شهری هوشمند و جذب رویدادهای سبز و اسپانسرهای محیط‌زیستی می‌باشند. این عوامل به‌عنوان خروجی‌ها و نتایج عملکرد سایر متغیرها عمل می‌کنند و خود توانایی ایجاد تغییر عمده در سیستم را ندارند. پیشران‌های خنثی و مستقل با اثرگذاری و وابستگی پایین شامل انتظار شهروندان برای دسترسی به فضاهای هوشمند و پایدار و گرایش به اپلیکیشن‌ها و تعامل با محیط‌های هوشمند و مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی سازمان‌های شهری و سرمایه‌گذاری مشارکتی در پروژه‌های ورزشی هوشمند و سبز و فناوری‌های دیجیتال برای آموزش پایداری به مراجعان و ادغام شاخص‌های شهر هوشمند در توسعه پارک‌های شهری و قوانین مدیریت پسماند تجهیزات الکترونیکی پارک‌ها هستند که در موقعیت کنونی سیستم نقشه ثانویه ایفا می‌کنند. بر این اساس نقشه اثرگذاری وابستگی مستقیم پیشران‌های کلیدی مؤثر بر آینده مدیریت سبز پارک‌های شهری در تصویر ۲ ارائه شده است.

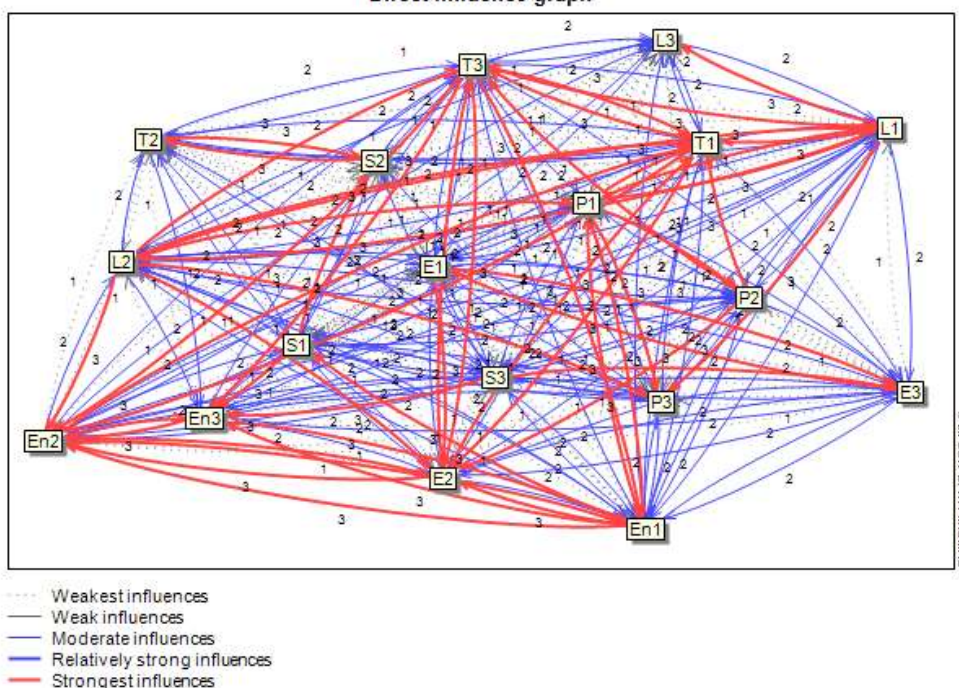


تصویر ۲- نقشه اثرگذاری وابستگی مستقیم پیشران‌های کلیدی بر آینده پارک‌های شهری با رویکرد مدیریت سبز

به‌منظور تحلیل ساختار شبکه و تعیین شدت اثرات مستقیم میان متغیرهای پژوهش، گراف اثرگذاری مستقیم با بهره‌گیری از نرم‌افزار میک‌مک ترسیم شد. این نمودار پیوندهای متقابل میان پیشران‌های شناسایی‌شده را بر مبنای سطوح پنج‌گانه شدت تأثیر، از کمترین تا بیشترین پیوستگی، نمایش می‌دهد. بر این اساس، ساختار شبکه روابط مستقیم پیشران‌ها در تصویر ۳ ارائه شده است. در ارتباط با راهنمای خطوط گراف بر اساس شدت اثرگذاری، خط‌چین نشان‌دهنده ضعیف‌ترین تأثیرات، خط خاکستری نشان‌دهنده تأثیرات ضعیف، خطوط آبی به ترتیب ضخامت بیانگر تأثیرات متوسط و نسبتاً قوی، و خطوط قرمز نشان‌دهنده قوی‌ترین تأثیرات میان پیشران‌ها است.



Direct influence graph



تصویر ۳- گراف اثرگذاری مستقیم پیشران‌های مؤثر بر آینده پارک‌های شهری با رویکرد مدیریت سبز

گراف اثرگذاری مستقیم، روابط پیچیده میان پیشران‌های مدیریت سبز پارک‌های شهری را آشکار می‌سازد. در این نمودار، جهت پیک‌ها نشان‌دهنده مسیر اثرگذاری و ضخامت خطوط، شدت این تأثیرات را تعیین می‌کند. تمرکز اصلی بر شناسایی پیشران‌های کلیدی و مولد و درک چگونگی هدایت آن‌ها بر سایر عوامل در راستای تحقق اهداف مدیریت سبز است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که محرک‌های اصلی پایداری پارک‌ها در درجه اول ریشه در چارچوب‌های حقوقی و سیاست‌گذاری دارند که این نتیجه با یافته‌های برین و همکاران (۲۰۲۰) و هوانگ و همکاران (۲۰۲۱) مبنی بر اهمیت ساختارهای حاکمیتی در موفقیت زیرساخت‌های سبز شهری هم‌راستا است و همچنین قرارگیری عوامل اقلیمی و منابع آب و فناوری‌های مصرف انرژی در زمره پیشران‌های کلیدی، مؤید مطالعات دال و همکاران (۲۰۲۲) و ژانگ و کیان (۲۰۲۴) است که بر ضرورت بازنگری در مدیریت منابع آب و به‌کارگیری فناوری‌های نوین در مواجهه با شرایط تغییر اقلیم تأکید داشته‌اند و در نهایت قرار گرفتن شاخص‌های اقتصادی در دسته متغیرهای وابسته نشان می‌دهد که توجیه اقتصادی و صرفه‌جویی هزینه‌ها، خروجی پیاده‌سازی مدیریت سبز است و لزوماً محرک شروع آن محسوب نمی‌شود که این امر با نتایج وانگ و فولی (۲۰۲۱) انطباق دارد. نتایج این بخش در جدول ۵، ارائه شده است.

جدول ۵- تحلیل تطبیقی یافته‌های پژوهش با مطالعات هم‌راستا

یافته پژوهش	پیشران‌های مرتبط	مطالعه هم‌راستا	تحلیل تطبیقی
ریشه داشتن محرک‌های اصلی پایداری در چارچوب‌های حقوقی و سیاست‌گذاری	قوانین انرژی صفر؛ تسهیلات پایش هوشمند	برین و همکاران (۲۰۲۰)؛ هوانگ و همکاران (۲۰۲۱)	اهمیت ساختارهای حاکمیتی در موفقیت زیرساخت‌های سبز شهری
قرارگیری عوامل اقلیمی، منابع آب و فناوری‌های انرژی در زمره پیشران‌های کلیدی	تغییر اقلیم؛ طراحی تاب‌آور؛ کمبود آب و سیستم‌های بازیافت	دال و همکاران (۲۰۲۲)؛ ژانگ و کیان (۲۰۲۴)	ضرورت بازنگری در مدیریت منابع آب و فناوری‌های نوین در مواجهه با تغییر اقلیم
قرار گرفتن شاخص‌های اقتصادی در دسته متغیرهای وابسته	کاهش هزینه‌های آب و انرژی؛ جذب رویدادهای سبز	وانگ و فولی (۲۰۲۱)	توجیه اقتصادی خروجی مدیریت سبز است و محرک شروع آن نمی‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر در پاسخ به پرسش پژوهش، هجده پیشران مؤثر بر آینده پارک‌های شهری با رویکرد مدیریت سبز را در شش بعد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناوری، محیط‌زیستی و قانونی شناسایی و تحلیل کرد. نتایج نشان داد که پیشران‌های شناسایی شده نقش یکسانی در شکل‌دهی به آینده پارک‌های شهری ندارند و از نظر میزان اثرگذاری و وابستگی با یکدیگر تفاوت دارند. در میان آن‌ها، پیشران‌های مرتبط با الزامات قانونی و سیاست‌گذاری، تغییر اقلیم، مدیریت منابع آب و فناوری‌های مرتبط با انرژی و آب، نقش مهمی در ساختار آینده پارک‌های شهری با رویکرد مدیریت سبز دارند. بنابراین، پژوهش حاضر بر وجود مجموعه‌ای از پیشران‌های به هم پیوسته تأکید دارد که توجه هم‌زمان به آن‌ها برای مدیریت آینده پارک‌های شهری ضروری می‌داند.

یافته‌های پژوهش می‌تواند در حوزه مدیریت شهری و مدیریت سبز برای شناسایی اولویت‌های مؤثر بر برنامه‌ریزی و توسعه آینده پارک‌های شهری استفاده شود. مدیران و برنامه‌ریزان شهری می‌توانند از پیشران‌های شناسایی شده برای توجه بیشتر به موضوعاتی مانند مدیریت آب و انرژی، سازگاری با تغییر اقلیم، استفاده از فناوری‌های هوشمند و الزامات قانونی در برنامه‌ریزی پارک‌های شهری استفاده نمایند. همچنین، نتایج می‌تواند به عنوان مبنایی برای مطالعات آینده‌نگر و تصمیم‌گیری درباره مدیریت سبز پارک‌های شهری به کار رود.

از محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان گفت موضوع بر آینده پارک‌های شهری با رویکرد مدیریت سبز متمرکز بود و سایر انواع فضاهای سبز شهری به صورت مستقل بررسی نشدند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر تغییرات اقتصادی، اقلیمی و فناورانه بر آینده پارک‌های شهری در دوره‌های زمانی مختلف بررسی شود. همچنین، استفاده از داده‌های واقعی مربوط به مصرف آب و انرژی پارک‌ها می‌تواند امکان بررسی عملی‌تر اثربخشی راهکارهای مدیریت سبز را فراهم کند. انجام مطالعات آینده‌نگر درباره سایر انواع فضاهای سبز شهری و بررسی تفاوت پیشران‌های مؤثر در مناطق و شرایط مختلف شهری نیز می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

پی‌نوشت

^۱ - Pestel

حامیان مالی: پژوهش حاضر بدون حمایت مالی و معنوی سازمان‌های دولتی و غیردولتی انجام شده است.

مشارکت نویسندگان: نویسندگان تأیید می‌کنند که همگی در مقاله سهیم بوده‌اند.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزارهای هوش مصنوعی در این پژوهش استفاده نشده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است.

قدردانی: نویسندگان از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاس‌گزاری می‌کنند.

منابع

براهویی، احمد، ابراهیم‌زاده آکباد، عیسی، و حمیدیان‌پور، محسن. (۱۴۰۴). تحلیل و ارزیابی فضای سبز شهری از منظر عدالت اجتماعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: مناطق پنجگانه شهر زاهدان). *آمایش سرزمین*، ۱۷(۱)، ۱۱۳-۱۲۸.

<https://doi.org/10.22059/jtcp.2025.395013.670509>

درگاهی کفشگرکلایی، محمد، ابراهیمی، لیلا، حق‌زاد، آمنه، و رضانی‌پور، مهرداد. (۱۴۰۱). بررسی عملکرد مدیریت شهری و حاکمیت محلی در گسترش فضاهای سبز عمومی (پارک‌ها). *پژوهش‌های سیاسی و بین‌المللی*، ۱۳(۵۱)، ۱۹۷-۲۱۹.

<https://sanad.iau.ir/fa/Journal/ipir/Article/945098>



زارع آبندانسری، محمد، نقی‌زاده باقی، عباس، و نقی‌زاده باقی، مهدی. (۱۴۰۳). شناسایی راهکارهای مؤثر اکولوژی انسانی در توسعه پایدار زیرساخت‌های ورزشی کشور ایران. *اکولوژی انسانی*، ۳(۹)، ۷۰۸-۷۲۴.

<https://doi.org/10.22034/el.2025.501171.1050>

زارع آبندانسری، محمد، نقی‌زاده باقی، عباس، و نقی‌زاده باقی، مهدی. (۱۴۰۲). شناسایی راهکارهای توسعه پایدار و مدیریت سبز در طراحی ورزشگاه‌های فوتبال. *مطالعات مدیریت توسعه سبز*، ۲(۲)، ۱۶-۲۴. <https://doi.org/10.22077/jgdms.2024.7114.1060>

قنبری نژادانصری، ندا، و کاظمی‌زاده، وحید. (۱۴۰۱). برنامه‌ریزی فضای سبز شهری با رویکرد ورزش، سلامتی و رفاه اجتماعی. *نشریه فرهنگ و ارتقاء سلامت*، ۶(۲)، ۳۲۳-۳۳۱. <https://doi.org/10.22034/6.2.17>

Bahriny, F., & Bell, S. (2020). Patterns of urban park use and their relationship to factors of quality: A case study of Tehran, Iran. *Sustainability*, 12(4), 1560. <https://doi.org/10.3390/su12041560>

Grafius, D. R., Corstanje, R., & Harris, J. A. (2018). Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. *Landscape Ecology*, 33(4), 557–573. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0618-z>

Heydari, R., Fatholouloumi, S., Soltanbeygi, M., & Firozjaei, M. K. (2025). A sustainability-oriented spatial multi-criteria decision analysis framework for optimizing recreational ecological park development. *Sustainability*, 17(2), 731. <https://doi.org/10.3390/su17020731>

Mokhtari, R., & Hosseinifar, S. M. (2013). Economic and social value of recreational facilities in urban areas by using Travel Cost Method (Case study: Amirkola Urban Park, Mazandaran Province, Iran). *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, 2(4), pp-549. <https://european-science.com/eojnss/article/view/193>

Nimjerdi, A. H., Talaei, M., Sajadifar, S., & Rafiei, S. (2026). Optimizing decentralized wastewater allocation to urban green spaces in the water scarce megacity of Tehran. *Discover Environment*, 4(1), 482. doi.org/10.1007/s44274-026-01020-8

Omidighalehmohammadi, Z., Morovati, M., Karami, P., & Parvar, Z. (2026). Spatiotemporal modeling of urban green space connectivity and landscape structure for climate adaptation in Tehran, Iran. *Plos one*, 21(4), e0341276. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0341276>

Pauleit, S., Andersson, E., Anton, B., Buijs, A., Haase, D., Hansen, R., Kowarik, I., Olafsson, A. S., & van der Jagt, S. (2019). Urban green infrastructure—Connecting people and nature for sustainable cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40, 1–3. doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.007

Chen, S., Sleipness, O., Xu, Y., Park, K., & Christensen, K. (2020). A systematic review of alternative protocols for evaluating non-spatial dimensions of urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 53, 126718. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126718>

Breen, A., Giannotti, E., Flores Molina, M., & Vásquez, A. (2020). From “Government to Governance”? A systematic literature review of research for urban green infrastructure management in Latin America. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2, 572360. <https://doi.org/10.3389/frsc.2020.572360>

Hanna, E., & Comín, F. A. (2021). Urban green infrastructure and sustainable development: A review. *Sustainability*, 13(20), 11498. <https://doi.org/10.3390/su132011498>

Wang, J., & Foley, K. (2021). Assessing the performance of urban open space for achieving sustainable and resilient cities: A pilot study of two urban parks in Dublin, Ireland. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127180. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127180>

Huang, Y., Aguilar, F. X., Yang, J., Qin, Y., & Wen, Y. (2021). Predicting citizens’ participatory behavior in urban green space governance: Application of the extended theory of planned behavior. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127110. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127110>

- Pinto, L. V., Inácio, M., Ferreira, C. S. S., Ferreira, A. D., & Pereira, P. (2022). Ecosystem services and well-being dimensions related to urban green spaces—A systematic review. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104072. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104072>
- Doll, C., Polyakov, M., Pannell, D. J., & Burton, M. P. (2022). Rethinking urban park irrigation under climate change. *Journal of Environmental Management*, 314, 115012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115012>
- Shadman, S., Khalid, P. A., Hanafiah, M. M., Koyande, A. K., Islam, M. A., Bhuiyan, S. A., Woon, K. S., & Show, P.-L. (2022). The carbon sequestration potential of urban public parks of densely populated cities to improve environmental sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102064. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102064>
- Halecki, W., Stachura, T., Fudała, W., Stec, A., & Kuboń, S. (2023). Assessment and planning of green spaces in urban parks: A review. *Sustainable Cities and Society*, 88, 104280. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104280>
- González, T., Berger, P., Sánchez, C. N., & Mahichi, F. (2023). Sustainability of urban parks: Applicable methodological framework for a simple assessment. *Sustainability*, 15(21), 15262. <https://doi.org/10.3390/su152115262>
- Paudel, S., & States, S. L. (2023). Urban green spaces and sustainability: Exploring the ecosystem services and disservices of grassy lawns versus floral meadows. *Urban Forestry & Urban Greening*, 84, 127932. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127932>
- Ji, L., Shu, C., Gaur, A., Wang, L., & Lacasse, M. A. (2024). A state-of-the-art review of studies on urban green infrastructure for thermal resilient communities. *Building and Environment*, 257, 111524. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111524>
- Zhang, F., & Qian, H. (2024). A comprehensive review of the environmental benefits of urban green spaces. *Environmental Research*, 252(Part 2), 118837. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118837>
- Xie, X., Zheng, L., Wang, R., & Gou, Z. (2024). Visitors' experience of using smart facilities in urban parks: A study in Shenzhen. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 46, 100759. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2024.100759>
- Zhang, B., & MacKenzie, A. (2024). Trade-offs and synergies in urban green infrastructure: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 94, 128262. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128262>
- Yao, Y., Zheng, H., Ouyang, Z., Gong, C., Zhang, J., Ying, L., & Wen, Z. (2025). Impact of urban green infrastructure on ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 178, 113885. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113885>
- Wu, X., Liu, J., & Hou, Y. (2025). Data and methods for assessing urban green infrastructure using GIS: A systematic review. *PLOS ONE*, 20(6), e0324906. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324906>
- Li, L., & Carter, J. (2025). Exploring the relationship between urban green infrastructure connectivity, size and multifunctionality: A systematic review. *Landscape Ecology*, 40, 61. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02069-1>
- Huang, Y., Chen, B., & Webster, C. (2026). Strategic greening: A multidimensional framework for balancing supply, demand, and cost in urban park allocation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 116, 129198. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129198>



-
- Zare Abandansari, M., Naghizadeh Baghi, A., & Naghizadeh Baghi, M. (2025). Identifying the effective solutions of human ecology in the sustainable development of sports infrastructure in Iran. *Human Ecology*, 3(9), 708-724. <https://doi.org/10.22034/el.2025.501171.1050>
- Zare Abandansari, M., Naghizadeh Baghi, A. and Naghizadeh Baghi, M. (2023). Identifying sustainable development solutions and green management in designing football stadiums. *Green Development Management Studies*, 2(2), 16-24. <https://doi.org/10.22077/jgdms.2024.7114.1060>

Contents

Comparative Assessment of the Energy Performance of an Office Building Based on
Chapter 19 with ESGB and Green Mark **7**

Reza Ebadi; Mehran Golsanamlou

Algorithmic Agency in Smart Urban Green Infrastructure Design: An Analysis Based on
Actor-Network Theory **29**

Masoumeh Abdi

Development of a Conceptual–Operational Model of Environmental Resilience Based on
the Carbon-Neutral City Approach: A Case Study of Tehran Municipality District 6 **51**

Niloofar Mirzakhani; Samaneh Jalilisadrabad

A Study of Seljuk Caravanserais in Iran and Anatolia: Architectural Form and the
Identification of Commonalities and Differences **81**

Tooraj Khosravi Javid

Re-reading the Architecture of Traditional Iranian Houses with a Strategic Design
Approach (A Study of Prominent Houses in the Hot and Arid Climate) **113**

Mostafa Kiani; Fatemeh Khosravi

Identifying and Analysing the Drivers Shaping the Future of Urban Parks in Mazandaran
Province from a Green Management Perspective **133**

Mohammad Zare Abandansari; Azam Khalilpour; Naser Rasoulzadehjedi



The Art of Green Management

Journal of Iran University of Art

New Publication, Vol.3, No.3, Autumn 2025

Print ISSN 2717-0756

Online ISSN 2980-9673

License Holder Iran University of Art

Director-in-Charge

Seyed Hassan Soltani—Associate Professor, Department of Painting, Faculty of Visual of Art, Iran University of Art, Tehran, Iran

Editor-in-Chief

Maryam Mohammadi—Associate Professor, Department of Urban Design, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran

Editorial Board (in Alphabetical Order)

Behnood Baramayevar — Associate Professor, Department of Architectural Technologies and Project Management, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art

Rima Fayaz — Associate Professor, Department of Architectural Technologies and Project Management, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art

Parviz Ghoddousi — Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

Seyed Behshid Hosseini — Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art

Seyed Ali Jozeyi — Professor, Department of Environmental Studies, Islamic Azad University, Tehran North Branch

Mehdi Khakzand — Associate Professor, Department of Landscape Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Science and Technology

Asghar Mohammad Moradi — Professor, Department of Restoration of Historical Buildings, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Science and Technology

Esmail Salehi — Associate Professor, Department of Environmental Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Tehran

Mansoureh Tahbaz — Associate Professor, Department of Building, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University

Managing Editor: Masoumeh Abdi

Graphic Designer: Sara Asgari

Literary and Technical Editor: Maryam Mohammadi

Lithography, Printing, and Binding: Iran University of Art

Address Iran University of Art, Bagh-e Meli, College, No. 56, Sakhai St, Hafez St, Tehran, Iran.

Postal Code 1136813518

E-Mail agm.journal@art.ac.ir

Phone (+98-21)66728845

Fax (+98-21)66728845

Website: www.agm.journal.art.ac.ir
