



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)

Nilloofar 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. 51-79 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. & Jalilasadraab, 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), 51-79. [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: ۷۹-۵۱ 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؛ بااین‌حال، تبدیل این مفاهیم به چارچوب‌های عملیاتی، مکان‌مند و قابل‌سنجش 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 قابل‌سنجش 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)، ۷۹-۵۱.
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 قابل عملیاتی‌شدن در مقیاس خرد شهری به روشنی تبیین نشده است. افزون بر این، بخشی از شاخص‌های مطرح شده در ادبیات بین‌المللی به داده‌ها، ساختارهای نهادی یا زیرساخت‌هایی وابسته‌اند که ممکن است در شرایط شهرهای ایران و به ویژه 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 غیرمنتظره 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 & Jaliliasadrad, 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.

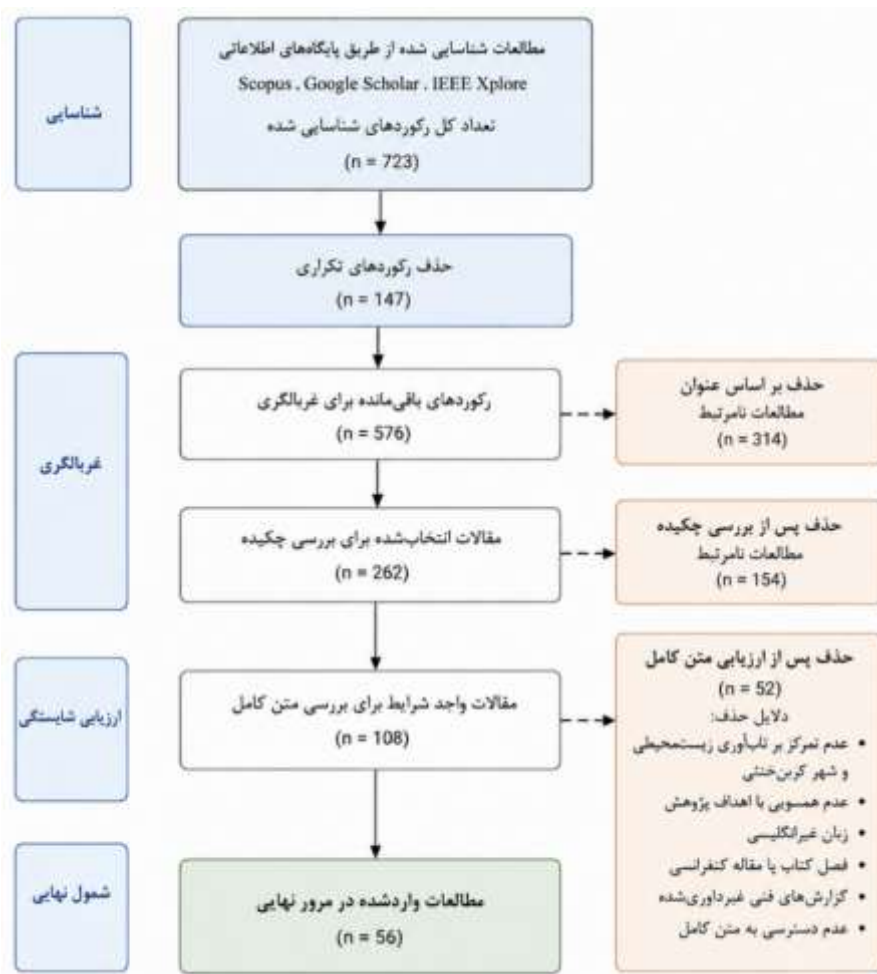
- مرحله ارزیابی شایستگی

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:

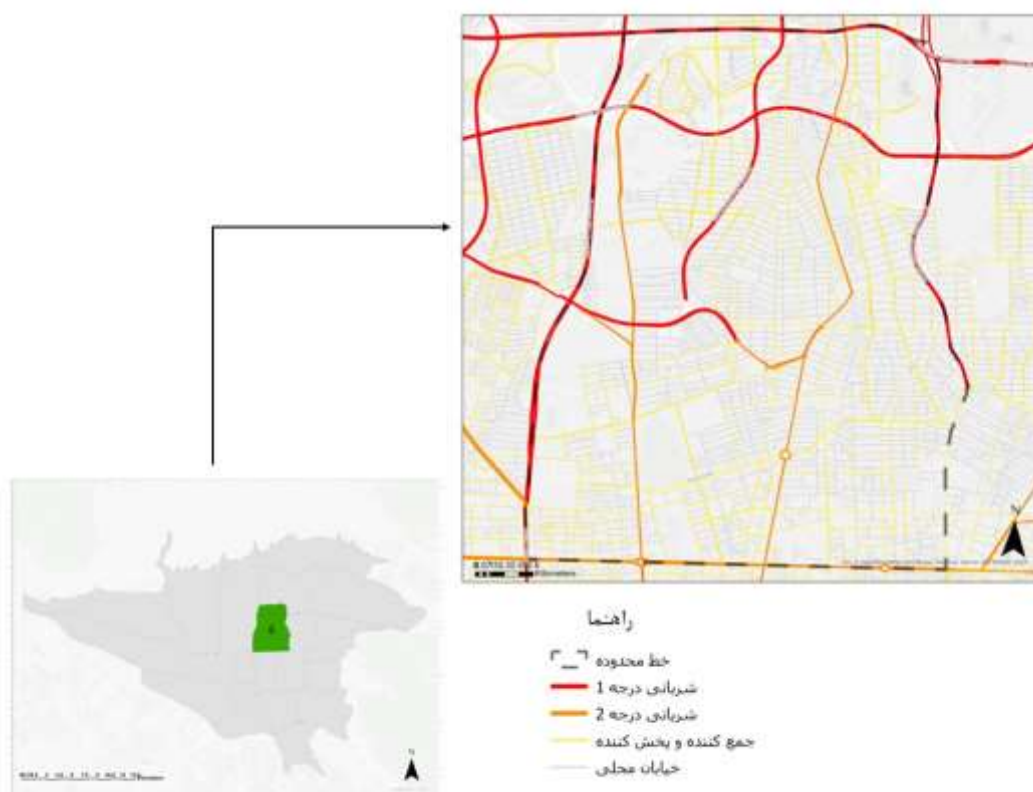
- بعد کالبدی: مرتبط با فرم شهر، تراکم ساختمانی، هندسه معابر و زیرساخت‌های فیزیکی؛
- بعد زیست‌محیطی: مرتبط با آلاینده‌های جوی، پوشش گیاهی، منابع آبی و شرایط اقلیمی؛
- بعد اقتصادی: مرتبط با هزینه و میزان مصرف انرژی، شدت انرژی و اقتصاد چرخشی؛
- بعد اجتماعی: مرتبط با تراکم جمعیت، کیفیت زندگی و میزان مشارکت 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. باین‌حال، 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 دسترس 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 خط‌به‌خط 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 کربن‌خنثی» 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 استخراج‌شده 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 شناسایی‌شده 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 کربن‌خنثی‌سازی معرفی، تأیید یا مدل‌سازی شده بود، مستندات مربوط به آن ثبت گردید. بر این اساس، ۸۱ شاخص استخراج‌شده 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 کربن‌خنثی 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 مشاهده‌شده در ادبیات جهانی تشریح می‌شود.

جدول ۱- شاخص‌های استخراج‌شده 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 این‌رو، 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.

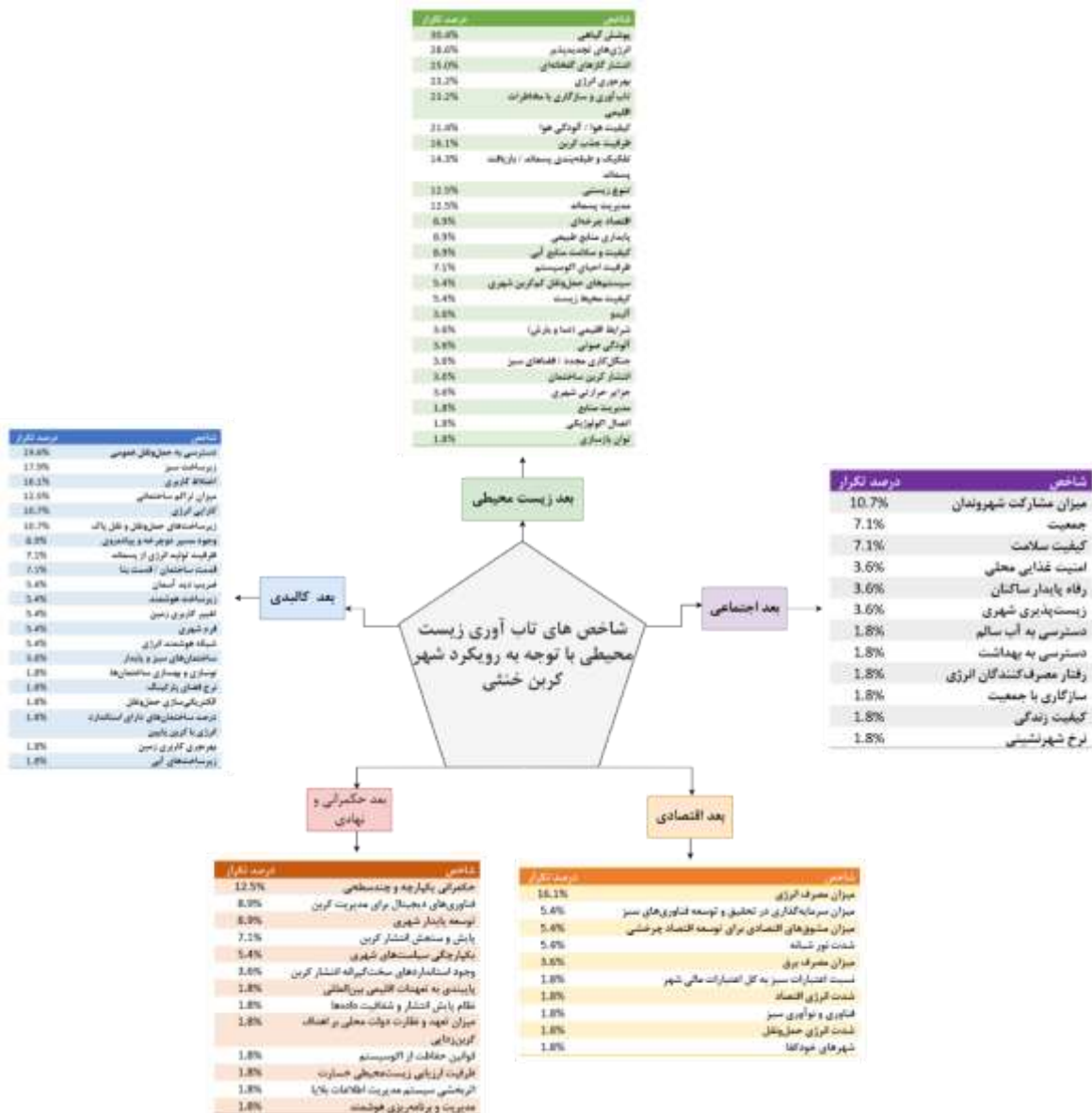
شاخص‌های بعد کالبدی: تحلیل شاخص‌های این بعد نشان می‌دهد که در برنامه‌ریزی شهرهای کربن‌خنثی، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل پایدار و ارتقای کیفیت فرم کالبدی شهر از مهم‌ترین مؤلفه‌ها محسوب می‌شوند. بر اساس نتایج تحلیل فراوانی، دسترسی به حمل‌ونقل عمومی به عنوان کلیدی‌ترین شاخص کالبدی با بیشترین میزان تکرار 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.



تصویر ۳- چارچوب نظری شاخص‌های تاب آوری زیست محیطی با توجه به رویکرد شهر کربن خنثی

۴-۲- استخراج شاخص‌های عملیاتی منطقه ۶ شهرداری تهران

چارچوب نظری استخراج‌شده (تصویر ۳) بیانگر مجموعه‌ای از شاخص‌ها در سطح عمومی و بین‌المللی است. با این حال، به‌کارگیری 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 به‌منظور 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.

نخست، با توجه به ماهیت کمی پژوهش و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین بدون نظارت، شاخص‌هایی که امکان تبدیل آن‌ها به متغیرهای عددی و ساختاریافته در قالب لایه‌های رستری یا برداری در مقیاس قطعه زمین را نداشتند، از چرخه مدل‌سازی

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.

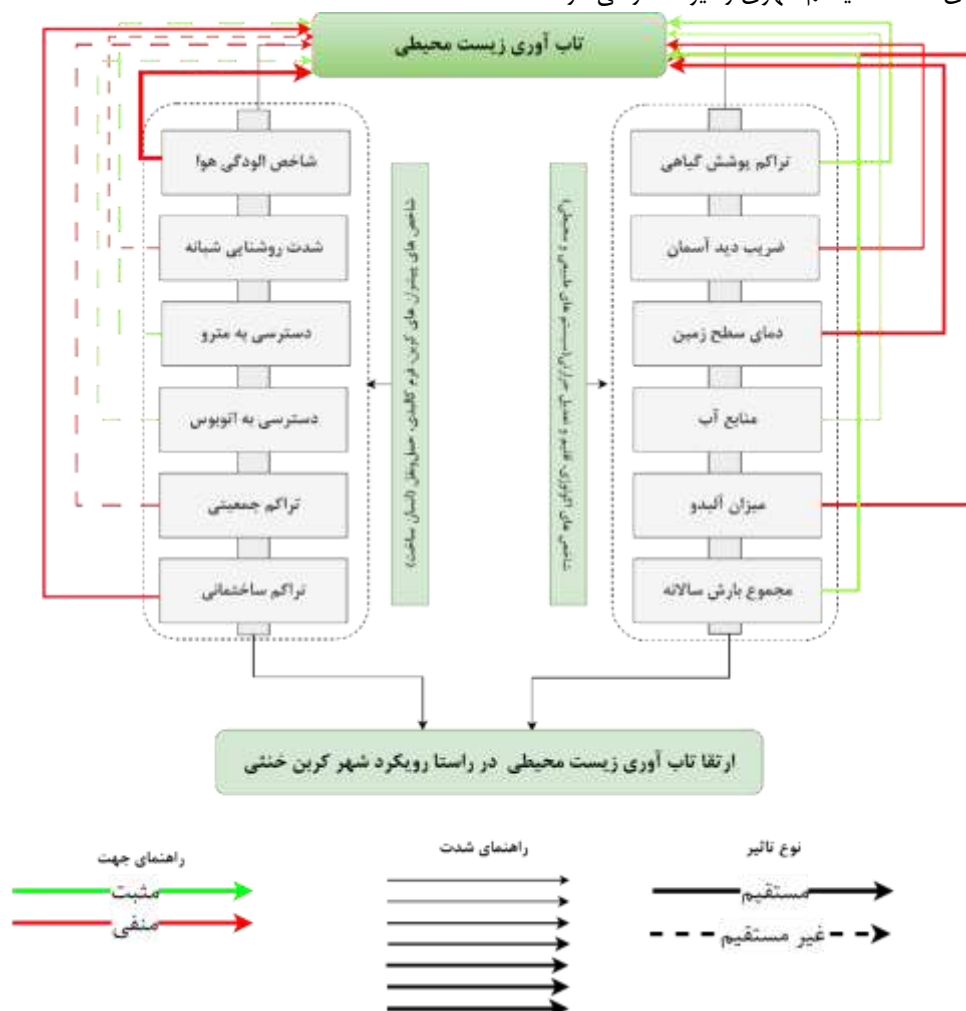
گروه دوم: شاخص‌های اکولوژیکی و تعدیل‌کننده‌های محیطی (سیستم‌های طبیعی)

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 به‌ترتیب بیانگر اثرات مثبت و منفی شاخص‌ها بر تاب‌آوری زیست‌محیطی هستند، درحالی‌که خطوط ممتد و خط‌چین به‌ترتیب 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 ساختار بندی 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 خرد اقلیمی، 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- Di rect i on-Preservi ng PCA
- 9- KMO
- 10- Jenks Nat ural Breaks
- 11- BRT
- 12- Normalized Difference Vegetation Index - NDVI

حامیان مالی: این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده است که با حمایت مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران انجام شده 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 منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربری هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کنند که از هوش مصنوعی ChatGPT برای ویرایش متن 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

- 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. *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., & Vetter, 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., & Jalilisadrabad, 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., & Vettters, 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>.

