Vol. ?, No. ?, ? ?, p.?-? ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/GEOEH.2026.98449.1661 OPEN ACCESS

Spatial Assessment of Urban Resilience in Tehran based on the Production-Living-Ecology (PLE) Framework and the Social-Ecological Systems Approach

Ahmad Nohegar*[1], Mahmoud Behrouzi[2], Mohammad Madanifar[3], Mahmoud Namazi[4]

[1] Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

[2] Department of Research Institute of Marine Sciences - University of Tehran, Tehran, Iran

[3] Department of Project and Construction Management, Faculty of Architecture, University of Tehran, Tehran, Iran

[4] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 27 April 2026

Revised: 08 June 2026

Accepted: 16 August 2026

Available Online:

16 August 2026

Keywords:

Urban Resilience

Production–Living–Ecology (PLE) Space

Social–Ecological Systems (SES)

Spatial Analysis

Urban Sustainability

ABSTRACT

This study employs the Social–Ecological Systems (SES) framework to assess the resilience of the Production–Living–Ecology (PLE) space in Tehran. In this regard, the PLE system is structured into three objective layers (production, livelihood, and ecology), three criteria (resistance, adaptability, and diversity), and 15 indicators. Indicator weights were calculated using the Shannon entropy method, and spatial overlay of raster layers was applied to generate thematic resilience maps for the three PLE dimensions as well as the final integrated resilience map at the scale of 22 municipal districts of Tehran. The results indicate that more than 51% of Tehran's total area exhibits very low resilience within the PLE structure. In the ecology dimension, 69% of the city falls into the low-resilience category, with only District 22 showing favorable conditions. In the livelihood dimension, 39.6% of the urban area is classified as high resilience, whereas in the production dimension, 49.5% of the city demonstrates low resilience. Spatially, northern districts—particularly Districts 1 and 5—exhibit higher levels of resilience, while most central and southern districts fall within lower resilience classes. Overall, the findings reveal a pronounced spatial heterogeneity in PLE resilience across Tehran. By providing an integrated spatial framework, this study offers a basis for targeted urban policy-making and planning aimed at enhancing urban resilience.

* Corresponding author: Ahmad Nohegar E-mail address: Nohegar@ut.ac.ir

How to cite this article: Nohegar, A., Behrouzi, M., Madanifar, M., & Namazi, M. (2026). Spatial Assessment of Urban Resilience in Tehran based on the Production-Living-Ecology (PLE) Framework and the Social-Ecological Systems Approach. *Journal of Geography and Environmental Hazards, ?*(?), ?-?. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.98449.1661

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

In recent years, environmental hazards in urban Production-Living-Ecology (PLE) space have intensified, making it increasingly important to strengthen resilience as a foundation for sustainable urban development. Drawing on the theoretical framework of Social-Ecological Systems (SES), this study examines the formation mechanisms of urban PLE space and its resilience characteristics. By integrating insights from existing urban sustainability and resilience assessment frameworks and their core components, a comprehensive assessment framework was developed for Tehran's urban PLE space. Based on the analysis of the formation and assessment of urban PLE space, a resilience evaluation system for Tehran was constructed in accordance with national planning principles, scientific rigor, and practical feasibility.

Material and Methods

This study was conducted to assess the resilience of Tehran's urban PLE space in response to environmental crises. First, the three-dimensional PLE structure was designed. Then, through weighting and overlay analysis of raster layers, the target, criterion, and indicator layers were prepared, and the final resilience map of PLE space was generated. The assessment system was developed based on the theory of resilient cities and the functional characteristics of urban areas. The index system consists of three levels: the target layer, the criterion layer, and the indicator layer. The target layer represents the resilience of the production, living, and ecological spaces. The criterion layer includes three subdimensions: resistance, adaptability, and diversity. The indicator layer comprises 15 indicators.

Results and Discussion

The study developed an urban resilience assessment index system from the perspective of PLE space. Using multi-source data, spatial analysis methods, and comprehensive indexing techniques, the resilience of Tehran was evaluated across 22 municipal districts. The results show that PLE resilience in Tehran exhibits significant spatial differentiation. Ecological and production spaces have relatively low resilience, whereas living space shows comparatively higher resilience and better access to urban life services. Accordingly, targeted interventions are needed to improve the resilience of ecological and production spaces.

Spatially, areas with higher ecological and living-space resilience are mainly concentrated in the northern districts of Tehran, while some districts in the southern part of the city also show relatively better living-space resilience. The main factors influencing PLE resilience are concentrated in the resistance and adaptability dimensions. Access to urban life services, green space, transportation infrastructure, water retention capacity, and ecological quality are the most important determinants of urban resilience.

Conclusion

To enhance the resilience of Tehran's PLE space in a comprehensive manner, this study proposes a set of targeted management strategies based on the spatial resilience assessment and the actual conditions of the city:

1. Strengthening transportation infrastructure: Optimize the transportation network by expanding and upgrading roads, bridges, public transit systems, and traffic control facilities, and improve the accessibility and comfort of transport corridors.
2. Optimizing the industrial spatial structure: Support the transformation and upgrading of traditional industries, encourage emerging industries, and promote a more balanced distribution of industrial activities, especially in eastern Tehran, to reduce excessive concentration in the south and southwest and enhance industrial diversity.
3. Promoting spatial functional diversity: Avoid the segregation of production spaces by integrating public services and green spaces, particularly in industrial areas of southern and southwestern Tehran, to improve spatial diversity and resilience.

4. Improving infrastructure resilience: Strengthen the construction and maintenance of urban infrastructure and develop emergency response plans to better withstand external shocks, crises, and natural disasters.

5. Enhancing water and soil conservation: Given Tehran's limited rainfall and water resources, improve water conservation, implement soil and water protection measures, and safeguard natural resources and environmentally sensitive areas to strengthen ecological resilience.

6. Increasing biodiversity: Establish an ecological security network, expand the diversity of environmental spaces such as green patches, blue spaces, and corridor landscapes, and integrate fragmented parks into a connected ecological network to improve urban ecological resilience.

Acknowledgements

We would like to thank Tehran Municipality for providing data and information resources.

جلد ؟، شماره ؟، ؟ ؟، ص ؟-؟
ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076
نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی
مقاله پژوهشی
DOI:10.22067/GEOEH.2026.98449.16
دسترسی آزاد

تحلیل فضایی تاب‌آوری شهری تهران در فضای تولید-زندگی- اکولوژی (PLE) با رویکرد نظری سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی

احمد نوحه‌گر*[۱]، محمود بهروزی[۲]، محمد مدنی‌فر[۳]، محمود نمازی[۴]

[۱] گروه مهندسی سوانح ، آموزش و سیستم های محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] گروه مخاطرات محیطی، پژوهشکده علوم دریایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۳] گروه مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۴] گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

کلمات کلیدی:
تاب‌آوری شهری
فضای تولی-زندگی-اکولوژی (PLE)
سیستم‌های اجتماعی – اکولوژیکی (SES)
تحلیل فضایی
پایداری شهری

چکیده

این پژوهش با تکیه بر چارچوب سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی (SES) به ارزیابی تاب‌آوری فضای تولید–زندگی–اکولوژی (PLE) در شهر تهران می‌پردازد. در این راستا، سیستم PLE در سه لایه هدف (تولید، زندگی و اکولوژی)، سه معیار (مقاومت، سازگاری و تنوع) و ۱۵ شاخص ساختاربندی شد. وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون انجام و با همپوشانی لایه‌های رستری، نقشه‌های تاب‌آوری سه‌گانه و نقشه نهایی تاب‌آوری در مقیاس ۲۲ منطقه شهری تهران تولید شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که بیش از ٪۵۱ از مساحت تهران دارای تاب‌آوری بسیار پایین در ساختار PLE است. در بُعد اکولوژی، ٪۶۹ از شهر در طبقه کم‌تاب‌آوری قرار دارد و تنها منطقه ۲۲ وضعیت مطلوب دارد. در بُعد زندگی، ٪۳۹/۶ از مساحت شهر در طبقه تاب‌آوری بالا قرار گرفته است، در حالی‌که در بُعد تولید، ٪۴۹/۵ از شهر دارای تاب‌آوری پایین است. از نظر الگوی فضایی، مناطق شمالی به‌ویژه مناطق ۱ و ۵ دارای سطوح بالاتر تاب‌آوری بوده، در حالی‌که بخش عمده مناطق مرکزی و جنوبی در طبقات پایین تاب‌آوری قرار دارند. در مجموع، نتایج نشان‌دهنده ناهمگونی شدید فضایی در تاب‌آوری PLE در تهران است. این مطالعه با ارائه یک چارچوب یکپارچه فضایی، مبنایی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی هدفمند در جهت ارتقای تاب‌آوری شهری فراهم می‌سازد.

* نویسنده مسئول: احمد نوحه‌گر
E-mail: nohegar@ut.ac.ir

مقدمه

رخدادهای مخاطره‌آمیز در جهان امروز به‌طور فزاینده‌ای رایج شده‌اند و احتمال وقوع مخاطراتی مانند زمین‌لرزه، آتش‌سوزی، فرونشست، بیماری‌های فراگیر مانند کووید ۱۹ و مهم‌تر از همه، سیل‌های ویرانگر شهری، در حال افزایش است (Xiang, Chen & Zheng, 2025). فراتر از خسارات فیزیکی فوری، رخدادهای مخاطره‌آمیز تأثیرات اجتماعی-اقتصادی، محیط‌زیستی و بهداشت عمومی از جمله زیان‌های جانی، آوارگی، تضعیف معیشت، ناامنی غذایی و افزایش آسیب‌پذیری در میان جمعیت‌های در حاشیه رانده شده ایجاد می‌کنند (Burayu, Karuppannan & Shuniye, 2023). تنها بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵، پدیدهٔ سیل شهری، تقریباً ۲/۳ میلیارد نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار داده و خسارات اقتصادی بیش از ۲۳۰ میلیارد دلار را به بار آورده است که نشان‌دهندهٔ اهمیت روزافزون آن است (Buba, Ojinnaka, Ndukwu, Agbaje & Orofin, 2021; Burayu et al., 2023).

تاب‌آوری، مفهومی در مقابل آسیب‌پذیری است. تاب‌آوری در برابر پدیده‌های مخاطره‌آمیز به عنوان یک وضعیت چندبُعدی و وابسته به زمینه که با تعامل، مواجهه، حساسیت و ظرفیت سازگاری شکل می‌گیرد، مفهوم‌سازی می‌شود (Fiorillo et al., 2018). «در معرض خطر بودن» نشان‌دهندهٔ حضور افراد، دارایی‌ها و زیرساخت‌ها در مناطق مستعد خطر است؛ «حساسیت» نشان‌دهندهٔ میزان تأثیرپذیری این عناصر از خطر است؛ و «تاب‌آوری» نشان‌دهندهٔ ظرفیت سازگاری و توانایی افراد و جوامع در پیش‌بینی، مقابله و بازیابی از اثرات خطر است (Folorunsho et al., 2022; Ziga-Abortta & Kruse, 2023). این ابعاد تحت تأثیر تعاملات پیچیده بین عوامل فیزیکی، اجتماعی-اقتصادی، تخریب محیط‌زیست و ساختارهای تصمیم‌گیری و نهادی قرار دارند (Tirivangasi, 2018). در نتیجه، ارزیابی مؤثر تاب‌آوری شهری نیازمند رویکردهای یکپارچه‌ای است که بتوانند این وابستگی‌های متقابل را در طول فضا و زمان در نظر بگیرد.

تاب‌آوری شهری بیانگر توانایی سیستم‌های شهری در مقابله با اختلالات و تداوم عملکرد در شرایط بحران است. در شهرهای غیرتاب‌آور، بازگشت به وضعیت پیش از بحران دشوار بوده و آسیب‌پذیری بالاتر است، در حالی‌که شهرهای تاب‌آور پس از اختلال مسیر بهبود سریعی (اغلب با الگوی V شکل) را طی کرده و به توسعه در شرایط پایدارتر ادامه می‌دهند (Kong, Mu, Hu & Zhang, 2022). با توجه به افزایش عدم قطعیت و پیچیدگی مخاطرات شهری، تاب‌آوری به یکی از مفاهیم کلیدی در برنامه‌ریزی و حکمرانی شهری تبدیل شده و ارزیابی نظام‌مند آن برای ارتقای پایداری ضروری است (Tong et al., 2025).

در ادبیات موجود، تاب‌آوری و پایداری شهری عمدتاً بر اساس رویکردهای سیستم‌های اجتماعی–اکولوژیکی و سیستم‌های پیچیده تطبیقی تحلیل می‌شوند (Béné et al., 2018). مطالعات و چارچوب‌های بین‌المللی نیز بر ابعاد چندگانه‌ای مانند زیرساخت، جامعه و اقتصاد تأکید دارند و ابزارهایی نظیر CDRI و DROP و چارچوب‌های UN-Habitat را برای سنجش تاب‌آوری در برابر مخاطرات ارائه کرده‌اند (Masnavi, Gharai & Hajibandeh, 2019).

در ادبیات مدیریت مخاطرات شهری، سامانه‌های هشدار سریع به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی کاهش ریسک و ارتقای تاب‌آوری مطرح شده‌اند (Tahmasebi Moghaddam & Rasulzadeh, 2025). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که توسعه سامانه‌های مبتنی بر وب، با قابلیت یکپارچه‌سازی پایش فضایی شاخص‌ها، ارزیابی ریسک، آگاهی‌بخشی به ذی‌نفعان و ارائه راهبردهای مدیریتی، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود مدیریت مخاطرات محیطی در چارچوب سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی (SES) داشته باشد. در این چارچوب، چنین سامانه‌هایی با تقویت جریان اطلاعات و افزایش دسترسی به داده‌های فضایی، زمینه تحلیل و پایش پویای تعامل میان فضاهای تولید، زندگی و اکولوژی را فراهم کرده و از این طریق به ارتقای تاب‌آوری شهری کمک می‌کنند (Akbari & Alizadeh Noughani, 2024).

شهرها سیستم‌های اجتماعی- اقتصادی باز و پیچیده‌ای را تشکیل می‌دهند. چارچوب‌های تاب‌آوری شهری که صرفاً برای مناطق یا بلایای خاص ساخته شده‌اند، اغلب برای مقابله با تاثیر مخاطرات بر کل سیستم شهری تلاش می‌کنند (Bayati Khatibi, Mohammadzadeh & Karimzadeh, 2024). محققان جامعه‌شناسی، شهرها را ترکیبی از یک محیط فیزیکی متشکل از بنیان‌های

مادی و یک محیط اجتماعی انسان‌گرایانه متشکل از جوامع انسانی می‌دانند. تعامل مثبت بین آنها، منجر به ارتقاء بهبود تاب‌آوری شهری می‌شود (Godschalk, 2003). چارچوب برنامه‌ریزی شهر تاب‌آور و شاخص تاب‌آوری شهر از ابعاد حکمرانی شهری و پویایی اجتماعی برای ارزیابی خودسازمان‌دهی و سازگاری اجتماعی شهرها استفاده کرده و بر مشارکت ذی‌نفعانی مانند ساکنان، جوامع، شرکت‌ها، دولت و سازمان‌های غیردولتی برای تضمین تاب‌آوری تاکید می‌کنند که هدف، افزایش توانایی سیستم‌های شهری برای مقاومت، بازیابی و سازگاری با تغییرات آینده است. جوئرین و همکاران (Joerin, Shaw, Takeuchi & Krishnamurthy, 2012)، کاتر و همکاران (Cutter, Ash & Emrich, 2014)، سون و یائو (Sun & Yao, 2017) و لیو و همکاران (Liu, Zhou, Li, Zheng & Liu, 2024) سیستم‌های چندبُعدی و مرکبی از شاخص‌ها را بر اساس جامعه، اقتصاد، بوم‌شناسی، محیط‌زیست و فرهنگ برای ارزیابی جامع تاب‌آوری شهری ساخته‌اند. دستیابی به روش مناسب برای ارزیابی تاب‌آوری فضای شهری، یکی از جنبه‌های اساسی پژوهش‌های مربوط به تاب‌آوری است. در ایران، فرهادی و همکاران (Farhadi, Pourahmad, Ziari & Faraji Sabokbar, 2025) آینده‌پژوهی عوامل موثر بر تاب‌آوری شهری در تهران را بررسی کردند که نتایج آنها بیان‌گر وضعیت ناپایدار تاب‌آوری تهران است و متغیرهای تاثیرگذار ثبات ندارند و تاثیر آنها بر سایر متغیرها ناپایدار است.

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که ارزیابی تاب‌آوری شهری به‌تدریج از رویکردهای تک‌بُعدی به سمت تحلیل یکپارچه تعاملات اجتماعی، اقتصادی و اکولوژیکی حرکت کرده است. شی و همکاران (Shi, Hu & Gan, 2024) تاب‌آوری شهری را در چارچوب سیستم تولید–زندگی–اکولوژی ارزیابی کرده و بر اهمیت هماهنگی میان این سه فضا در ارتقای تاب‌آوری تأکید کردند. همچنین کیائو و همکاران (Qiao et al., 2024) چارچوبی برای سنجش تاب‌آوری شهری مبتنی بر ابعاد استحکام، سازگاری و هماهنگی ارائه دادند. نتایج مطالعات پان و همکاران (Pan, Liu & Cheng, 2024) و یوان و همکاران (Yuan, Liu & Huang, 2024) نیز نشان داد که تعامل متقابل مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوهای فضایی تاب‌آوری شهری دارد. این تحولات پژوهشی بیانگر ضرورت استفاده از رویکرد سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی برای تحلیل تاب‌آوری شهرها و بررسی همزمان ابعاد تولید، زندگی و اکولوژی است.

در مقایسه با چارچوب ارزیابی تاب‌آوری مبتنی بر تغییرات اقلیمی و خطرات بلایا، چارچوب‌های مبتنی بر اکوسیستم‌های اجتماعی می‌توانند راحت‌تر مقیاس‌های مکانی و زمانی را پوشش دهند، وابستگی بین عناصر سیستم را ثبت کنند و شاخص‌های نسبتاً مستقل و کاربردی داشته باشند. قراردادن تاب‌آوری شهری در چارچوب وسیع‌تر اکوسیستم اجتماعی، بررسی توسعه هماهنگ روابط انسان و زمین را نیز آسان‌تر می‌کند (Yuan et al., 2024).

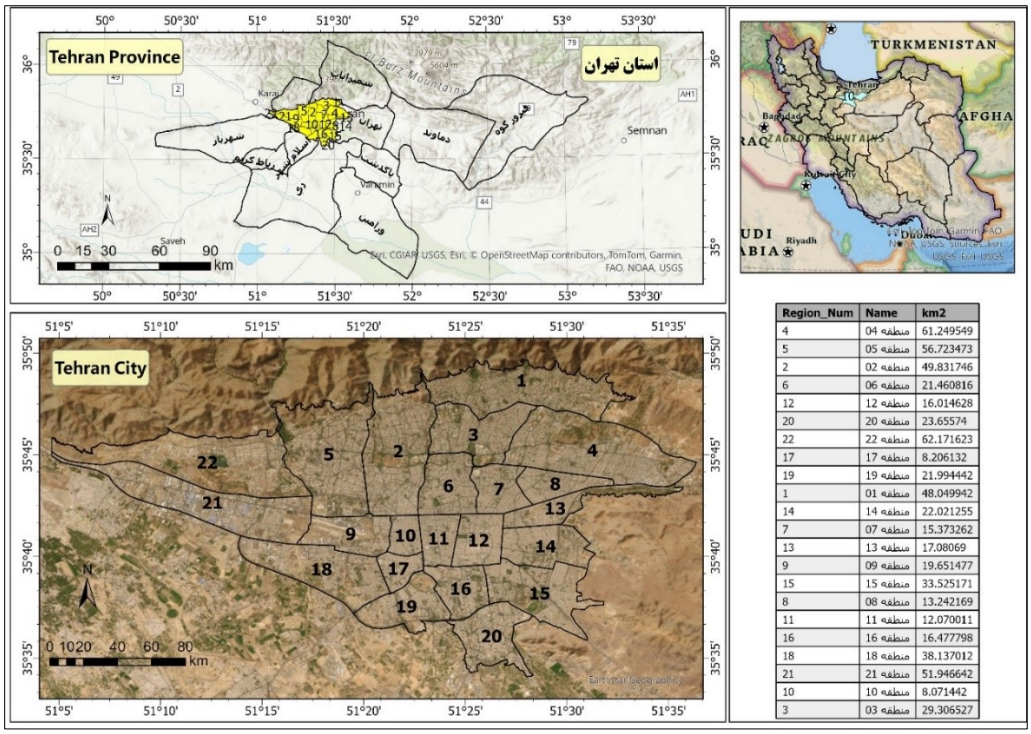
سیستم شهری پیچیده و تطبیق‌پذیر از فضای اکولوژیکی، فضای تولیدی و فضای زندگی (یعنی فضای PLE) تشکیل شده است و یک سیستم اجتماعی-اکولوژیکی (SES) است. مفهوم فضای PLE از پیوند بین انسان و زمین سرچشمه می‌گیرد و مجموعه‌ای از روابط را نشان می‌دهد که توسعه پایدار جامعهٔ بشری و طبیعت را تقویت می‌کند. ارتباط و تعامل پیچیده بین نیازهای انسانی و فضای جغرافیایی منجر به توسعهٔ مناطق جغرافیایی با کارکردهای خاص اکولوژیکی، تولیدی و زیستی شده است. فضای تولید، خدمات تولیدی و مدیریتی انسان را در خود جای می‌دهد؛ فضای اکولوژیکی زمینهٔ محیطی را برای بقا و توسعهٔ انسان فراهم می‌کند؛ و فضای زندگی از سکونت، اوقات فراغت و آموزش انسان پشتیبانی می‌کند (Meyer & Auriacombe, 2019).

فضای سه بُعدی PLE در کنار هم، رابطهٔ پیچیدهٔ بین انسان و زمین را منعکس می‌کند و محیط طبیعی شهری، اقتصاد، جامعه و فرهنگ را در بر می‌گیرد. این امر به آشکار شدن مکانیسم‌های داخلی، فرآیندهای پویا و بازخورد سیستم تعاملی از طریق سه ویژگی اصلی کمک می‌کند: ۱) اتصال؛ ۲) مکانیسم پویا و ۳) بازخورد متقابل. این چارچوب مرجع مهمی را برای تحقیق در مورد تاب‌آوری شهری و توسعه پایدار فراهم می‌کند (Ostrom, 2004). تحقیقات پایداری شهری بر ابعاد تولید، زندگی و اکولوژی تمرکز دارد و رویکردی سیستماتیک و یکپارچه برای پرداختن به چالش‌های ناشی از خطرات متعدد ارائه می‌دهد. این امر، تعمیق پایداری شهری

در تهران را بر اساس فضای PLE تشکیل می‌دهد. این مطالعه بر اساس چارچوب نظری سیستم اجتماعی-اکولوژیکی، مکانیسم‌های شکل‌گیری فضای PLE شهری را روشن می‌کند و ویژگی‌های پایداری آن را بررسی می‌کند. با ادغام دانش حاصل از چارچوب‌های ارزیابی پایداری شهری موجود و اجزای اصلی، یک چارچوب ارزیابی جامع برای پایداری فضای PLE شهری تهران تشکیل شد. بر اساس تجزیه و تحلیل شکل‌گیری و ارزیابی پایداری فضای PLE شهری، سیستمی برای ارزیابی فضای PLE شهری تهران با پیروی از اصول و ساختارهای ملی، صحت علمی و قابلیت اجرا ایجاد می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شهر تهران است که به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری شهری در چارچوب سیستم‌های اجتماعی–اکولوژیکی و رویکرد فضای تولید–زندگی–اکولوژی انتخاب شده است (شکل ۱). تهران با جمعیتی بالغ بر ۹/۰۳۹ میلیون نفر، بزرگ‌ترین کلان‌شهر ایران و یکی از مراکز اصلی شهری در غرب آسیا محسوب می‌شود و از نظر ساختار اداری به ۲۲ منطقه و ۱۲۲ ناحیه شهری تقسیم شده است. این شهر با مساحتی حدود ۷۳۰ کیلومترمربع، دارای یک گرادیان شدید ارتفاعی از حدود ۱۸۰۰ متر در دامنه‌های جنوبی البرز تا حدود ۹۰۰ متر در نواحی جنوبی و دشت ورامین است که منجر به شکل‌گیری تفاوت‌های اقلیمی و محیطی قابل توجه در مقیاس شمال- جنوب شده است. از منظر رویکرد PLE، این ناهمگنی طبیعی و انسان‌ساختی موجب شکل‌گیری الگوهای متفاوت در سه مؤلفه تولید، زندگی و اکولوژی شده و بستر مناسبی برای تحلیل نابرابری‌های فضایی تاب‌آوری فراهم می‌کند. از نظر مخاطرات، تهران به دلیل قرارگیری بر روی گسل اصلی البرز، با خطر بالای زلزله مواجه است و همچنین به‌واسطه توسعه نامتوازن شهری، با چالش‌هایی نظیر سیلاب‌های شهری، آلودگی شدید هوا و فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها روبه‌رو است (Kamranzad, Memarian & Zare, 2020). این ترکیب از فشارهای طبیعی و انسانی، تهران را به یک سیستم پیچیده اجتماعی–اکولوژیکی تبدیل کرده است که ارزیابی تاب‌آوری آن نیازمند رویکردهای یکپارچه فضایی مانند مدل PLE است.



شکل ۱– محدوده موردمطالعهٔ پژوهش: شهر تهران با ۲۲ منطقهٔ شهری

Fig.1. Study area: Tehran city with 22 regions

مواد و روش ها

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تاب‌آوری و سطح پایداری شهری تهران در برابر بحران‌های محیطی انجام شد. به این منظور، ابتدا ساختار فضای سه بُعدی PLE طراحی شد، سپس با وزن‌دهی و همپوشانی لایه‌های رقومی (فایل‌های رستر)، لایه‌های هدف و معیار فضای سه بُعدی تهیه شد و نقشهٔ نهایی برای فضای تاب‌آوری PLE به دست آمد که در ادامه به تفصیل تشریح شده است.

منابع داده و اطلاعات

داده‌های استفاده شده در این پژوهش شامل تصویر ماهواره Sentinel-5 در ژوئن ۲۰۲۵، سالنامه آماری شهرداری تهران در سال ۱۴۰۰، شیپ‌فایل‌های برداری و رستری محدوده تهران است. نقشهٔ کاربری اراضی از روی تصویر ماهواره سنتینل در بستر تحت وب گوگل‌ارث انجین با الگوریتم SVM تهیه شد. نقشهٔ پوشش گیاهی از طریق محاسبه شاخص نرمال شده NDVI با تصویر سنتینل به دست آمد. اطلاعات مربوط به مراکز خدمات‌رسانی، حمل‌ونقل و مراکز تولید به‌صورت شیپ‌فایل در محدوده تهران تهیه شد و شاخص‌های مربوط به آنها در GIS محاسبه شد.

برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی استخراج‌شده با الگوریتم (SVM)، از مجموعه نمونه‌های اعتبارسنجی مستقل استفاده شد. ماتریس خطا محاسبه گردید و دقت کلی و ضریب کاپا به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی دقت به دست آمدند. نتایج نشان داد که دقت کلی طبقه‌بندی برابر با ۰/۸۹ و ضریب کاپا برابر با ۰/۸۱ است که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد مناسب نقشه تولیدشده برای تحلیل‌های فضایی بعدی می‌باشد.

ساختار فضای PLE

فضای تولید، زندگی و اکولوژی، اجزای جدایی‌ناپذیر سیستم SES هستند که نشان دهندهٔ اتصال بین سیستم محیط طبیعی و اجتماعی- اقتصادی هستند (Liu et al., 2024). به عنوان یک سیستم تطبیقی پیچیده متشکل از واحدهای زیستی – زمین‌شناسی- فیزیکی، نقش‌ها و نهادهای اجتماعی مرتبط با آنها که با مرزهای فضایی یا عملکردی مشخص می‌شوند، اجتناب‌ناپذیر است که سیستم تطبیقی پیچیده تحت تاثیر عوامل اختلال داخلی و خارجی قرار گیرد. عوامل اختلال داخلی PLE چندوجهی هستند، از جمله مقادیر خروجی صنایع که بر فضای تولید اثر می‌گذارند، برنامه‌ریزی فضایی که بر فضای زندگی تاثیر می‌گذارند و نوع پوشش گیاهی که بر فضای اکولوژی تاثیر می‌گذارند. عوامل اختلال خارجی نیز به همین ترتیب متنوع هستند، مانند دسترسی به حمل و نقل و شدت فعالیت‌های انسانی که بر فضای تولید تاثیر می‌گذارند؛ سطح تولید که بر فضای زندگی تاثیر می‌گذارد و تنوع کاربری زمین و کیفیت اکولوژیکی شهر که بر فضای اکولوژی تاثیر می‌گذارد.

این عوامل اختلال، ویژگی‌های تاب‌آوری قابل‌توجه فضای PLE، از جمله مقاومت (استحکام)، سازگاری و تنوع را نشان می‌دهند. مقاومت، توانایی PLE برای حفظ ساختار فضایی و عملکردهای پایدار آن در مواجهه با اختلالات است. سازگاری، توانایی تنظیم طرح و عملکردهای انعطاف‌پذیر در پاسخ به اختلالاتی است که نیازهای توسعه جدید ایجاد می‌کنند. تنوع، توانایی انعطاف‌پذیری در هنگام مواجهه با اختلالات است. سه ویژگی تاب‌آوری فضای PLE به طور خاص به شرح زیر آشکار می شوند:

تاب آوری فضای تولید

فضای تولید به عنوان یک تضمین اساسی برای وجود انسان عمل می‌کند. با بهینه‌سازی تخصیص عوامل تولید مانند منابع، نیروی کار و سرمایه، انسان‌ها تضمین می‌کنند که نسبت ورودی- خروجی مواد تولیدی برای برآوردن سطوح مختلف تقاضا به حداکثر می‌رسد (Tu, Ji, Chen, Liu & Xu, 2025). استحکام فضای تولید با تنظیم خروجی صنایع در پاسخ به عوامل اختلال داخلی و خارجی افزایش می‌یابد. صنایع به عنوان نیروهای محرک اصلی برای توسعه اقتصاد منطقه‌ای عمل می‌کنند و از فضای تولید پشتیبانی می‌کنند. با بهبود فعالیت‌های انسانی و افزایش ظرفیت حمل و نقل، فضای تولید می‌تواند بهتر با تغییرات محیط خارجی سازگار شود،

ثبات را حفظ کند و توسعه یابد. تنوع بخشیدن به ساختارهای صنعتی و مسیرهای فناوری می‌تواند خطرات را کاهش داده و ثبات و توسعه فضای تولید را تضمین کند.

تاب‌آوری فضای زندگی

فضای زندگی، عرصهٔ اصلی زندگی انسان است و عملکردهای متعددی از جمله اسکان، پناهگاه فضایی و تامین مواد غذایی را انجام می‌دهد. این فضا به‌طور پیچیده‌ای با رفاه انسان مرتبط است. ویژگی‌های اصلی این فضا، زیست‌پذیری و اعتدال است. تنظیم ظرفیت مسکونی و بهبود وضعیت تولید، اقدامات حیاتی برای افزایش مقاومت فضای زندگی هستند. ظرفیت مسکونی، ظرفیت تحمل فضاهای زندگی را تعیین می‌کند، درحالی‌که سرانه تولید، منعکس کنندهٔ استانداردهای زندگی ساکنان است. با ارزیابی دسترسی به نیازهای ضروری مانند خرید، آموزش و مراقبت‌های بهداشتی، می‌توان زیست‌پذیری راحت و مناسب بودن یک فضای زندگی را ارزیابی کرد و قضاوت جامعی از تاب‌آوری ان ارائه داد. تأمین این نیازهای متنوع انسانی می‌تواند ثبات و توسعه فضای زندگی را تضمین کند (Meerow, Newell & Stults, 2016).

تاب‌آوری فضای اکولوژیکی

فضای اکولوژی با ارائه محصولات و خدمات اکولوژیکی ضروری به مناطق شهری از جمله حفاظت از آب و خاک، حفظ تنوع زیستی، بادشکن در برابر طوفان‌های گردوغباری، تنظیم و ذخیرهٔ سیل یا پیشگیری از بلایای طبیعی، پایه و اساس بقا و توسعه انسانی را تشکیل می‌دهد. این فضا نقش کلیدی در در تنظیم امنیت اکولوژیکی منطقه‌ای از طریق ضمانت‌ها، مقررات و کاهش آلودگی دارد. هرچه شاخص حفاظت از آب و خاک بالاتر باشد، ظرفیت حفاظت از آب و خاک قوی‌تر است که برای احیای پوشش گیاهی مفیدتر است و می‌تواند نشان دهندهٔ تاب‌آوری اکوسیستم باشد (Gupta, Pfeffer, Verrest & Ros-Tonen, 2015). شاخص کیفیت محیط اکولوژیکی شامل جنبه‌های متعددی از جمله فراوانی زیستی، پوشش گیاهی، تراکم شبکه آب، تخریب زمین و کیفیت محیط‌زیست است. این شاخص می‌تواند به طور دقیق تاب‌آوری فضای اکولوژیکی را منعکس کند. سازگاری فضای اکولوژیکی را می‌توان از طریق شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و سرانه فضای سبز پارک به صورت انعطاف‌پذیر تنظیم کرد تا نیازهای جدید توسعه را تأمین نماید (Xie & Peng, 2023). تنوع فضای اکولوژیکی را می‌توان با افزایش تنوع کاربری اراضی شهری افزایش داد و در نتیجه غنا، یکنواختی و ناهمگونی انواع مختلف زمین در اکوسیستم شهری را بهبود بخشید و انعطاف‌پذیری را در پرداختن به اختلالات داخلی و خارجی نشان داد (Shi, Hu & Gan, 2024).

فضای PLE محصول اتصال متقابل بین سیستم‌های اجتماعی- اقتصادی و اکولوژیکی است. اختلالات ناشی از عوامل داخلی و خارجی نه‌تنها چالش‌هایی را ایجاد می‌کنند، بلکه فضای PLE را برای نشان دادن مقاومت، سازگاری و تنوع، تسریع می‌کنند. این پدیده نه‌تنها ثبات و توسعه را در یک محیط پیچیده و درحال تحول تسهیل می‌کند، بلکه پشتیبانی قابل‌توجهی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار سیستم‌های شهری فراهم می‌کند.

سیستم شاخص ارزیابی تاب‌آوری فضای PLE

به دلیل ماهیت درهم‌تنیدهٔ مؤلفه‌های تاب‌آوری در سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی، برخی شاخص‌ها می‌توانند به‌طور همزمان با بیش از یک ویژگی تاب‌آوری ارتباط مفهومی داشته باشند. با این حال، به منظور جلوگیری از همپوشانی محاسباتی و دوباره‌شماری، در این پژوهش هر شاخص تنها بر اساس کارکرد غالب خود در ادبیات تاب‌آوری به یکی از ابعاد مقاومت، سازگاری یا تنوع تخصیص داده شد. در این چارچوب، سازگاری بیانگر توانایی سیستم در حفظ عملکرد و پاسخ‌گویی به نیازهای جدید از طریق دسترسی و ظرفیت ارائه خدمات است؛ در حالی که تنوع به میزان گوناگونی و پراکندگی متوازن عناصر و کارکردها در فضای شهری اشاره دارد. بنابراین شاخص‌هایی نظیر دسترسی به خدمات آموزشی، بهداشتی و خدمات زندگی در بعد سازگاری قرار گرفتند، زیرا ظرفیت

پاسخ‌گویی سیستم شهری را نشان می‌دهند؛ در مقابل، شاخص تنوع خدمات زندگی با استفاده از شاخص شانون محاسبه شده و بیانگر گوناگونی و توزیع فضایی انواع خدمات است، از این رو در بعد تنوع طبقه‌بندی شده است.

بر اساس تجزیه و تحلیل شکل‌گیری و ارزیابی فضای تولید-زندگی- اکولوژی شهری، سیستمی برای ارزیابی فضای PLE شهر تهران ایجاد شد. از نظریه شهرهای تاب‌آور و ویژگی‌های عملکردی مناطق شهری استفاده شد. سیستم شاخص به سه سطح تقسیم می‌شود: لایه هدف، لایه معیار و لایه شاخص. لایه هدف مربوط به پایداری فضای تولید، زندگی و اکولوژی است. لایه معیار، زیرگروهی از لایه هدف است که از مقاومت، سازگاری و تنوع تشکیل شده است. لایه شاخص نیز از ۱۵ شاخص تشکیل شده است که به‌طور جامع سهم تاب‌آوری را منعکس می‌کنند (جدول ۱).

جدول ۱- سلسه مراتب لایه‌ها و وزن آنها در مدل سه بُعدی فضای PLE در تاب‌آوری شهری

Table 1- Hierarchy of layers and weights in the PLE in urban resilience

لایه هدف Target	لایه معیار Criteria	لایه شاخص Index	وزن شاخص Index weight	نحوه تهیه شاخص Create Index	رفرنس Reference
اکولوژی Ecology 0.1654	استحکام (Robustness) 0.63	ظرفیت آب / Water capacity	0.408	بر اساس نوع کاربری اراضی، ظرفیت آب از ۱ تا ۹ رتبه‌بندی و امتیازدهی شد. Water capacity was ranked and scored on a scale of 1 to 9 based on land-use types.	Burkhard, Kroll, Nedkov & Muller, 2012
		کیفیت اکولوژی Ecological quality	0.327	بر اساس رابطه زیر محاسبه شد: $LEQI = \sum_{i=1}^{n} p_i \times q_i$ که، piمساحت کاربری اراضی و qiارزش اکولوژیکی نوع کاربری اراضی که امتیاز ضریب qi برای جنگل، علفزار، زراعی، آب، ساختمانی و زمین بایر به‌ترتیب ۱، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۹، ۰/۲ و ۰/۱ است. ضرایب ارزش اکولوژیکی کاربری‌های مختلف اراضی بر اساس مطالعات پیشین در زمینه خدمات اکوسیستمی شهری از جمله Peng et al., 2020 استخراج شده است. همچنین به‌منظور بومی‌سازی و تطبیق با شرایط منطقه مطالعه، این ضرایب از طریق مصاحبه با دو کارشناس متخصص در حوزه برنامه‌ریزی شهری و محیط‌زیست مورد بررسی و تأیید قرار گرفته‌اند. where (p_i) represents the area proportion of each land-use type and qirepresents its ecological value. The qi coefficients for forests, grasslands, croplands, water bodies, built-up areas, and barren lands were set at 1, 0.8, 0.6, 0.9, 0.2, and 0.1, respectively. These ecological-value coefficients were derived from previous studies on urban ecosystem services, including Peng et al. (2020). To adapt them to the conditions of the study area, the coefficients were reviewed and validated through interviews with two experts in urban planning and environmental studies.	Peng et al., 2020
	سازگاری Adaptability 0.24	سرانه فضای سبز Green Space per Capita	0.157	جمعیت / مساحت فضای سبز Population / Green Space Area	UN-Habitat, 2019
		سرانه پارک Park Area per Capita	0.065	جمعیت / مساحت پارک و بوستان Population / Park and Garden Area	UN-Habitat, 2019
	تنوع Diversity	تنوع اکولوژی شهر	0.043	تنوع اکولوژی شهر با اجرای شاخص شانون بر روی کاربری‌های اراضی محاسبه شد:	Costanza et al., 1998

	Urban ecological diversity was calculated using the Shannon Index applied to land-use types. $H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i)$		Urban Ecological Diversity	0.15	
McGarigal, 1995	درصد ساختمان‌هایی که با داوم هستند. Percentage of durable buildings	0.263	کیفیت مسکن Housing Quality	استحکام (Robustness) 0.63	زندگی Living 0.536
OECD, 2013	مقدار دارایی ثابت در هر منطقه Value of fixed assets in each district	0.459	دارایی ثابت Fixed Assets		
UNESCO, 2015	دسترسی به مراکز خدمات رسانی Accessibility to service centers	0.049	خدمات زندگی Living Services		
UNESCO, 2015	دسترسی به مراکز خدمات بهداشتی Accessibility to healthcare facilities	0.135	خدمات بهداشتی Healthcare Services	سازگاری Adaptability 0.24	
UNESCO, 2015	دسترسی به مراکز خدمات آموزشی Accessibility to educational facilities	0.069	خدمات آموزشی Educational Services		
McGarigal, 1995	محاسبه شاخص شانون بر روی مراکز ارائه خدمات زندگی و نحوه پراکنش آنها در سطح شهر The Shannon Index was applied to living-service facilities and their spatial distribution across the city. $H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i)$	0.043	تنوع خدمات زندگی Diversity of Living Services	تنوع Diversity 0.15	
McGarigal, 1995	نزدیکی به مراکز تولیدی شامل شهرک‌های صنعتی، زمین‌های کشاورزی و باغی این شاخص صرفاً در چارچوب "تاب‌آوری عملکردی فضای تولید" و به‌عنوان مؤلفه‌ای از دسترسی و پشتیبانی فعالیت‌های اقتصادی تعریف شده است، نه به‌عنوان شاخص اثرات زیست‌محیطی. به‌منظور جلوگیری از هم‌پوشانی مفهومی، اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های تولیدی در بعد "اکولوژی" و از طریق شاخص‌های کیفیت اکولوژی و کاربری اراضی لحاظ شده است. بنابراین تفکیک ابعادی میان کارکرد اقتصادی (تولید) و پیامدهای محیطی (اکولوژی) در ساختار سه‌بعدی PLE اعمال شده است. Proximity to production centers, including industrial parks, agricultural lands, and orchards.	0.37	مراکز تولید Production Centers	استحکام (Robustness) 0.63	تولید Production 0.297
OECD, 2013	دسترسی به خطوط حمل‌ونقل ریلی، اتوبوس‌رانی و تاکسی‌رانی شهری Accessibility to railway lines, bus services, and urban taxi services.	0.123	حمل و نقل Transportation		
OECD, 2013	تراکم ساختمان‌سازی شهری که براساس نسبت مساحت زمین‌های ساخته شده به زمین‌های سبز، بایر و کشاورزی محاسبه شد. Urban building density, calculated as the ratio of built-up land area to green, barren, and agricultural land area.	0.078	شدت فعالیت انسان Human Activity Intensity	سازگاری Adaptability 0.24	
McGarigal, 1995	محاسبه شاخص شانون بر روی مراکز تولیدی و نحوه پراکنش آنها در سطح شهر	0.429	تنوع تولید Production Diversity	تنوع Diversity 0.15	

The Shannon Index was applied to production centers and their spatial distribution across the city.

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i)$$

وزن‌دهی لایه‌ها با آنتروپی شانون

هر یک از شاخص‌ها تاثیر متفاوتی در تاب‌آوری دارند، به همین دلیل وزن آنها باید به دست آید. به این منظور، ابتدا برای هر یک از شاخص‌ها با استفاده از نرم افزار GIS یک لایه رستری تهیه شد. با توجه به اینکه شاخص‌های مختلف ابعاد متفاوتی را منعکس می‌کنند، استانداردسازی شاخص‌های سیستم برای مقایسه مؤثر، پیش‌نیاز است که از رابطهٔ (۱) برای استانداردسازی شاخص‌ها استفاده شد (Tian & Sun, 2018):

$$x_{ij*} = \frac{(x_{ij} - \min(x_j))}{(\max(x_j) - \min(x_j))} \quad (۱)$$

در این معادله، xij مقدار نرمال‌شده شاخص j برای منطقه i است؛ max(xj) و min(xj) به ترتیب نشان دهنده حداکثر و حداقل مقادیر شاخص j در تمام مناطق شهری تهران هستند.

پس از اکتشاف و تعیین شاخص‌ها و استانداردسازی آنها، وزن هر یک از آنها از طریق آنتروپی شانون محاسبه شد. به منظور حذف ترجیحات ذهنی ارزیابان، از روش آنتروپی برای محاسبه وزن نسبی هر شاخص استفاده می‌شود. رشته‌های مختلف، مفهوم آنتروپی را بر اساس نیازهای خود در حوزه‌های خاص به کار برده‌اند. به طور کلی، آنتروپی در حوزه‌های اقتصاد و مدیریت به آنتروپی اطلاعات، معیاری از وضعیت بی‌نظمی سیستم، اشاره دارد. اغلب فرض می‌شود که مقدار آنتروپی اطلاعات، که به معنای درجه تغییر هر شاخص است، متناسب با درجه تعادل ساختار سیستم است. هرچه درجه تغییر بیشتر باشد، وزن این شاخص بیشتر است.

با توجه به تعدد شاخص‌ها و هدف کاهش مداخله قضاوت‌های ذهنی در وزن‌دهی، از روش آنتروپی شانون به عنوان یک روش عینی استفاده شد. در این پژوهش، چارچوب نظری سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی مبنای انتخاب شاخص‌ها بوده و روش آنتروپی صرفاً برای تعیین وزن نسبی شاخص‌های منتخب بر اساس میزان اطلاعات موجود در داده‌های فضایی مناطق شهر تهران به کار گرفته شده است. پاپادیمیتروف (Papadimitriou, 2022) با نظریه آنتروپی فضایی، که نوع خاصی از آنتروپی اطلاعات است، به تحلیل چشم‌انداز پرداخته است. برخلاف سایر روش‌های ارزیابی، روش وزن آنتروپی نسبتاً عینی و دقیق است. بنابراین می‌توان از آن برای ارزیابی کیفیت توسعه جامع سیستم شهری استفاده کرد. وزن هر شاخص بر اساس آنتروپی اطلاعات و تغییرات در شاخص‌ها محاسبه می‌شود.

در این پژوهش، روش آنتروپی شانون برای وزن‌دهی لایه شاخص و وزن لایه‌های معیار (مقاومت، سازگاری و تنوع) در هر یک از ابعاد تولید، زندگی و اکولوژی به‌کار گرفته شد و با استفاده از ماتریس داده‌های استانداردشده محاسبه شد. بنابراین تمامی وزن‌های ارائه‌شده در جدول ۱، اعّم‌از وزن معیارها و وزن شاخص‌ها، حاصل فرایند وزن‌دهی عینی مبتنی بر آنتروپی شانون هستند و هیچ وزن از پیش تعیین‌شده یا مبتنی بر قضاوت ذهنی در مدل استفاده نشده است. مراحل محاسبهٔ آنتروپی که همان وزن هر شاخص است، به شرح رابطه (۲) است:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}}$$

$$E_{ij} = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^{m} (P_{ij} \times lnP_{ij}) \quad (۲)$$

$$G_j = 1 - E_{ij}$$

$$x_j: W_j = \frac{G_j}{\sum_{i=1}^{m} G_j}$$

$$S_i = \sum_{i=1}^{m} W_j \times x_{ij}$$

در روابط فوق: P_{ij} مقدار استاندارد شدهٔ شاخص؛ E_{ij} مقدار آنتروپی هر شاخص؛ G_j افزونگی آنتروپی برای هر شاخص؛ W_j وزن هر شاخص و S_i سطح جامع از وزن‌ها برای سیستم است.

روش شاخص جامع [1]

شاخص‌های مختلف سیستم توسعه یافته، تاب‌آوری فضای PLE شهری را بیان می‌کنند. با توجه به تفاوت‌های قابل‌توجه در سهم و وزن شاخص‌ها در سطوح مختلف سیستم، از روش آنتروپی برای تعیین وزن آنها استفاده شد. سپس از روش شاخص جامع برای همپوشانی مقادیر شاخص‌های مختلف و به‌دست آوردن مقادیر تاب‌آوری جامع برای فضاهای تولید، زندگی و اکولوژیکی استفاده شد (رابطه ۳). این امر منجر به ویژگی‌های مکانی مقادیر تاب‌آوری آنها شد (Lu et al., 2011):

$$R = \sum_{n=1}^{n} a_n \times x_n \quad (۳)$$

که در آن، R تاب آوری نوع خاصی از فضا، a وزن شاخص و x مقدار تاب آوری است.

نتایج و بحث

هدف اصلی نتایج، اشاره به روندها یا ناسازگاری‌ها در داده‌های است، اما نباید شامل توضیحات یا نظرات باشد. بخش نتایج یک خلاصه عددی، مشاهده ای و/یا آماری از آنچه اتفاق افتاده یا آنچه پیدا شده، است. یافته های خود را به ترتیب منطقی ارائه دهید . داده هایی را که مشاهده کرده اید ارائه دهید، نه آنچه را که فکر می کنید باید پیدا می کردید.

شکل ۲ بیانگر امتیاز فضایی لایه معیارهای سه‌گانه شامل مقاومت، سازگاری و تنوع در سه لایه هدف اکولوژی- زندگی – تولید است. در فضای تاب‌آوری اکولوژیکی شهری، مقاومت که حاصل دو شاخص ظرفیت آب و کیفیت اکولوژی است، بیشترین اهمیت را نسبت به لایه معیار سازگاری و تنوع دارد. از لحاظ توزیع فضایی در شهر تهران، مناطق شمالی شهر مانند منطقه ۲۲، پنج، چهار و یک به‌دلیل ظرفیت نگهداشت آب و کیفیت اکولوژی بهتر، مقاومت اکولوژیکی نسبتاً خوبی در برابر بحران‌ها دارند؛ اما مناطق مرکزی شهر تهران مانند مناطق ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴ و ۱۷ به‌دلیل کیفیت پایین اکولوژی و عدم نگهداشت رواناب شهری، مقاومت اکولوژی پایینی دارند. از لحاظ تنوع اکولوژیکی نیز مناطق شمالی و جنوبی شهر تهران وضعیت بهتری نسبت به مناطق مرکزی دارند.

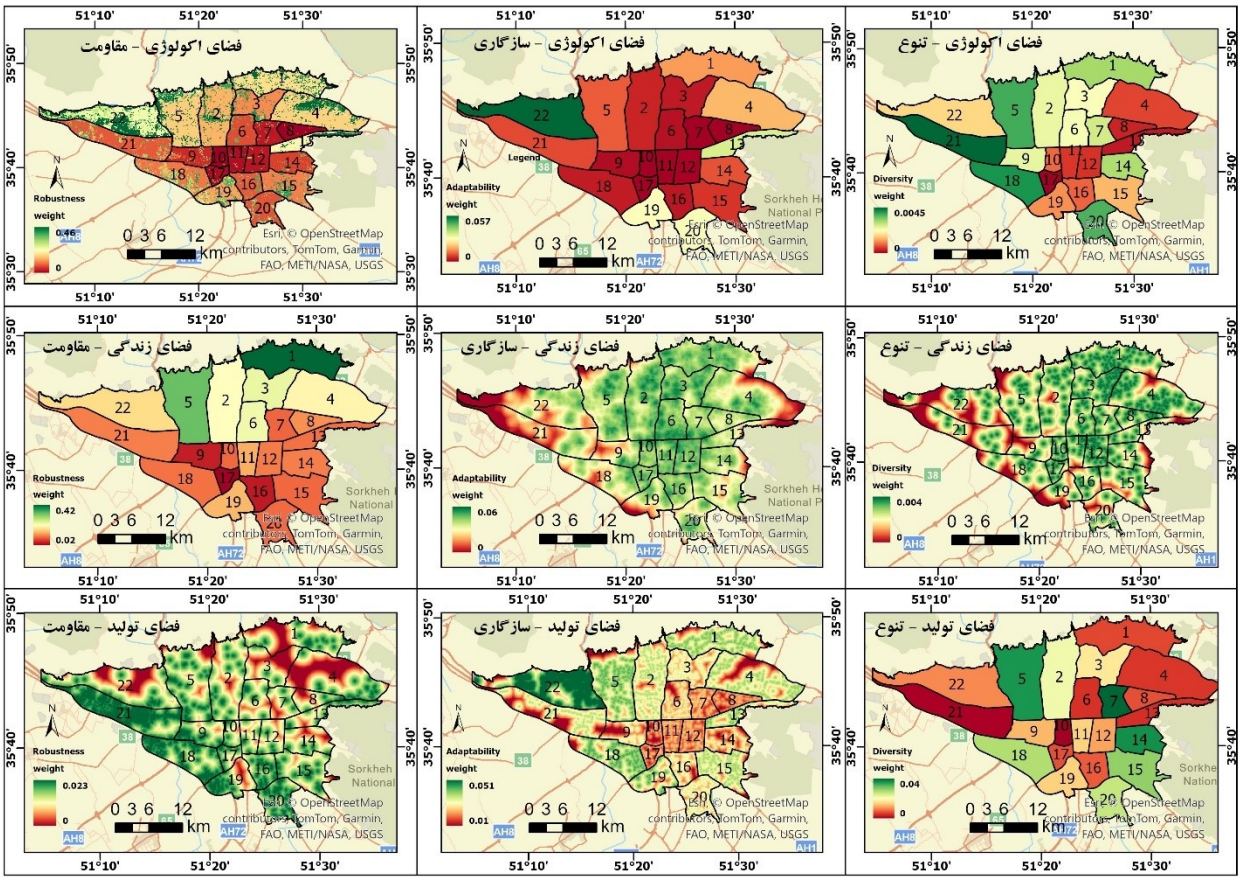
از لحاظ سازگاری اکولوژیکی که حاصل سرانه فضای سبز و پارک می‌باشد، در نیمهٔ شمالی شهر تهران، منطقه ۲۲ و در نیمهٔ جنوبی مناطق ۱۹ و ۲۰ وضعیت خوبی دارند، اما سازگاری در مناطق مرکزی شهر تهران وضعیت نامطلوبی دارند. این الگو با نتایج مطالعات پیشین در زمینه نابرابری فضایی اکولوژیکی در شهرهای بزرگ همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تمرکز توسعه شهری در هسته مرکزی منجر به کاهش خدمات اکوسیستمی و افت تاب‌آوری اکولوژیکی می‌شود (Su et al., 2012). همچنین یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات شهری تهران نیز هم‌راستا است که بیان می‌کند مناطق شمالی تهران از نظر پوشش سبز و کیفیت محیطی در وضعیت بهتری نسبت به مناطق مرکزی قرار دارند (PourAhmad, Ziyari & Sadeghi, 2018).

1 - Comprehensive index method

در فضای تاب‌آوری زندگی، استحکام یا مقاومت که حاصل کیفیت مسکن و دارایی‌های ثابت مناطق شهری است، نیمهٔ شمالی تهران به‌ویژه منطقهٔ یک و پنج وضعیت خیلی خوبی دارند، اما مناطق ۹، ۱۶ و ۱۷ به‌دلیل کیفیت پایین مسکن و دارایی کمتر وضعیت نامطلوبی دارند. از لحاظ تنوع فضای زندگی که حاصل تنوع خدمات زندگی است، پهنهٔ تهران وضعیت مناسبی دارد. از لحاظ سازگاری فضای زندگی که حاصل دسترسی به خدمات شهری مانند بهداشت، آموزش و خدمات زندگی است، نواحی مرزی شهر تهران وضعیت مناسبی ندارند، و هرچه به سمت مناطق مرکزی تهران نزدیک شویم، سازگاری فضای زندگی بهتر می‌شود.

در فضای تاب‌آوری تولید، مقاومت حاصل وجود و دسترسی به مراکز تولید است که با توجه به وجود مراکز تولید متعدد در مناطق جنوب و جنوب‌غربی تهران به‌ویژه در مناطق ۱۸، ۲۰ و ۲۱، این مناطق استحکام بالایی در برابر بحران دارند. سازگاری که حاصل وجود و دسترسی به حمل‌ونقل و شدت فعالیت انسان است، بخش‌هایی از شمال و شمال‌غربی تهران به‌ویژه منطقهٔ ۲۲ بهترین عملکرد را دارد، اما مناطق مرکزی تهران سازگاری کمتری در فضای تولید دارند (شکل ۲).

این یافته‌ها با نتایج پژوهش لیو و همکاران (Lyu, Wang, Zou & Wu, 2022) مطابقت دارد که بیان می‌کنند تمرکز فعالیت‌های تولیدی در حاشیه شهرها موجب افزایش تاب‌آوری عملکردی در آن مناطق می‌شود، در حالی‌که مراکز شهری به دلیل تراکم بالای فعالیت‌های غیرتولیدی، سازگاری پایین‌تری در حوزه تولید دارند.



شکل ۲- توزیع فضایی لایه های معیار در لایه‌های هدف سه گانهٔ PLE در شهر تهران

Fig.2. Spatial distribution of criterion layers in the target layers of PLE in Tehran city

لایه‌های هدف

لایه‌های هدف که شامل فضای اکولوژی- زندگی- تولید است، برای هر کدام از این فضاها، نقشه‌ای از همپوشانی لایهٔ معیارهای مختص خود تهیه شد (شکل ۳). نتایج نشان می‌دهد که فضای اکولوژیکی در منطقهٔ ۲۲ تهران با اختلاف زیاد وضعیت بهتری نسبت به سایر مناطق دارد و بدترین وضعیت اکولوژیکی مربوط به مناطق مرکزی شهر تهران می‌باشد. لایه‌های معیار (سازگاری – مقاومت – تنوع) فضای اکولوژیکی در سه کلاس دسته‌بندی شد که نتایج آن نشان می‌دهد که اکثر مناطق شهری تهران، سازگاری و مقاومت اکولوژیکی پایینی دارند؛ به‌گونه‌ای که به‌ترتیب ۸۰/۷٪ و ۶۷/۹٪ از شهر تهران، سازگاری و مقاومت اکولوژیکی با ارزش کم دارند. بنابراین فضای تاب‌آوری اکولوژیکی تهران به جز منطقهٔ ۲۲ در شمال‌غربی شهر، در سایر مناطق وضعیت مطلوبی ندارند (جدول ۲).

جدول ۲- ارزش تاب آوری شهر تهران فضای اکولوژیکی در لایه معیار

Table 2- Resilience value of Tehran city ecological space

کلاس Class	سازگاری Adaptability		تنوع Diversity		مقاومت Resistance	
	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)
ارزش زیاد High Value	62	9.6	152	23.6	9	14
ارزش متوسط Moderate Value	63	9.7	238	36.8	116	18.2
ارزش کم Low Value	521	80.7	255	39.6	435	67.9

فضای تاب‌آوری زندگی شهری که عرصهٔ حیات انسان است، در مناطق شمالی تهران مانند منطقهٔ یک، پنج و تا حدودی مناطق سه و شش وضعیت مناسب‌تری نسبت به سایر مناطق دارند؛ بدترین سطح تاب‌آوری زندگی در مناطق نیمهٔ مرکزی- جنوبی تهران شامل مناطق ۹، ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌گردد که نسبت به سایر مناطق وضعیت بسیار بدی دارند. لایه‌های معیار فضای زندگی نشان می‌دهد که ارزش لایه‌های تنوع و سازگاری زیاد به‌ترتیب ۵۷/۴٪ و ۷۳/۶٪ از تهران را به خود اختصاص داده‌اند، اما مقاومت در لایه زندگی کم است و حدود ۴۵/۷٪ از تهران مقاومت با ارزش کم دارد و فقط ۲۰/۸٪ از تهران، مقاومت بالایی از لحاظ فضای زندگی دارد (جدول ۳).

جدول ۳- ارزش تاب آوری شهر تهران فضای زندگی در لایه معیار

Table 3- Resilience value of Tehran city living space

کلاس Class	سازگاری Adaptability		تنوع Diversity		مقاومت Resistance	
	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)
ارزش زیاد High Value	457	73.6	370	57.4	134	20.8
ارزش متوسط Moderate Value	158	24.6	200	30.9	216	23.6
ارزش کم Low Value	12	1.8	75	11.7	295	45.7

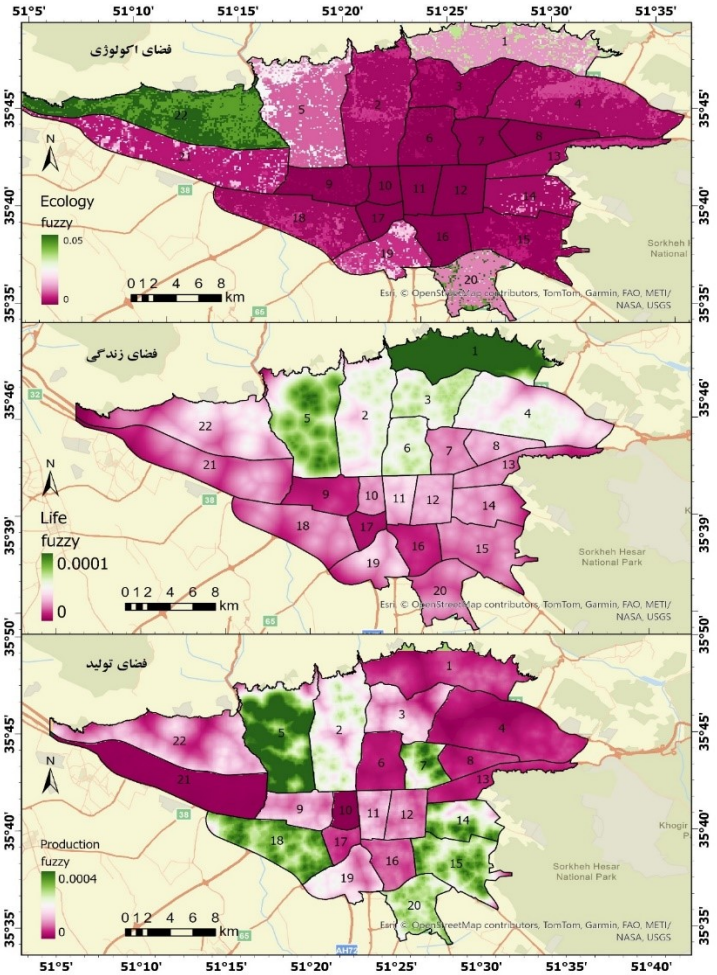
فضای تاب‌آوری تولید در منطقه پنج در شمال تهران و مناطق ۱۴، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ در مناطق جنوبی تهران وضعیت بهتری نسبت به سایر مناطق به‌ویژه مناطق مرزی مانند مناطق چهار، هشت، ۱۳ و منطقه یک در مرز شرقی و منطقه ۲۱ در مرز غربی تهران دارند. به‌طورکلی، ارزش متوسط سازگاری فضای تولید که ۵۲/۱٪ از مناطق تهران را پوشش می‌دهد، بیشترین فراوانی را دارد. از

لحاظ مقاومت (استحکام)، ارزش زیاد ۴۷/۵٪ را می‌پوشاند. بنابراین می‌توان گفت تهران از لحاظ فضای تولید در لایه‌های سازگاری- تنوع- مقاومت، وضعیت متوسطی دارد (جدول ۴).

جدول ۴- ارزش تاب آوری شهر تهران فضای تولید در لایه معیار

Table 4- Resilience value of Tehran city product space

کلاس Class	سازگاری Adaptability		تنوع Diversity		مقاومت Resistance	
	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)
ارزش زیاد High Value	104	16.3	239	37	306	47.5
ارزش متوسط Moderate Value	201	52.1	161	25	240	37.2
ارزش کم Low Value	333	31.25	245	38	98	15.3

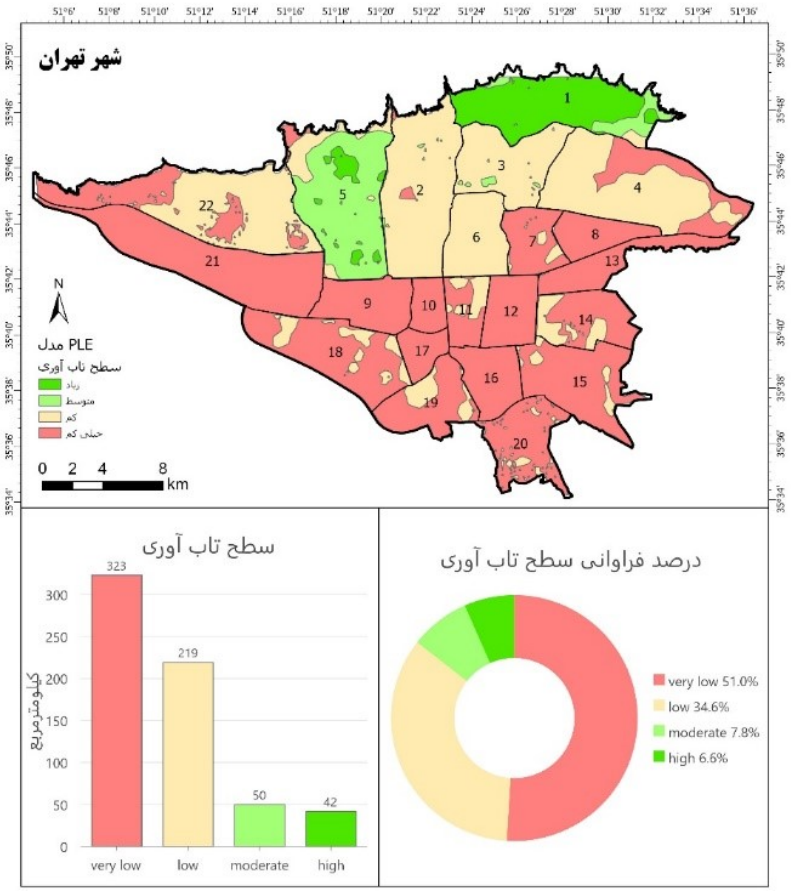


شکل ۳- نقشه توزیع فضایی لایه های هدف سه گانهٔ PLE در شهر تهران

Fig.3. Spatial distribution map of PLE triple target layers in Tehran city

تاب آوری فضای PLE در تهران

با همپوشانی لایه‌های هدف سه‌گانهٔ اکولوژی- زندگی- تولید، نقشهٔ نهایی فضای تاب‌آوری PLE تهیه شد (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که منطقه یک تهران، تاب‌آوری زیاد و منطقه پنج تاب‌آوری متوسطی در برابر بحران‌های محیطی دارند. مناطق دیگر نیمهٔ شمالی مانند منطقه ۴، ۳، ۲، ۶ و ۲۲ تاب‌آوری کمی دارند؛ اما سایر مناطق به‌ویژه مناطق مرکزی و جنوبی تهران، به‌دلیل وضعیت نامطلوبی که در فضای اکولوژی و زندگی دارند، سطح تاب‌آوری آنها در برابر بحران‌های محیطی خیلی کم برآورد گردید. همچنین نتایج زمین‌آماری نشان می‌دهد که ۵۱٪ از تهران، تاب‌آوری خیلی پایینی دارند که این یک هشدار جدی برای مدیران شهری و تصمیم‌گیران است. مناطق یک و پنج که تاب‌آوری بالا و متوسط دارند، حدود ۱۴/۴٪ از تهران را می‌پوشانند.



شکل ۴- توزیع فضایی تاب آوری فضای PLE در شهر تهران

Fig.4. Spatial distribution of PLE space resilience in Tehran city

در فضای کل سیستم سه‌گانهٔ PLE، ارزش کم فضای اکولوژیکی حدود ۶۹٪ از تهران را به خود اختصاص داده است که یکی از نقاط ضعف در تاب‌آوری شهری محسوب می‌شود. در فضای زندگی، ارزش زیاد با پوشش ۳۹/۶٪ از تهران، وضعیت بهتری نسبت به فضای اکولوژی و تولید دارد. در فضای تولید نیز بیشترین فراوانی مربوط به طبقهٔ ارزش کم است که ۴۹/۵٪ از تهران را می‌پوشاند (جدول ۵).

جدول ۵- ارزش تاب آوری شهر تهران در فضای سه گانه PLE

Table 5- Tehran City Resilience Value in the PLE Space

کلاس Class	اکولوژی Ecology		زندگی Living		تولید Product	
	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی	مساحت (کیلومترمربع) Area (km²)	درصد فراوانی Frequency (%)
ارزش زیاد High Value	59	9.2	255	39.6	155	24.3
ارزش متوسط Moderate Value	131	20.5	238	36.8	168	26.2
ارزش کم Low Value	437	69	152	23.6	316	49.5

به‌منظور افزایش توانایی فضای PLE شهری برای مقابله با خطرات غیرقابل کنترل، در این مطالعه ویژگی‌های تاب‌آوری فضای PLE شهری در تهران تجزیه و تحلیل شد، یک سیستم ارزیابی برای تاب‌آوری ساخته شد و تاب‌آوری فضای سه گانهٔ اکولوژی- زندگی- تولید در منطقه شهری تهران ارزیابی گردید و عوامل اصلی موثر در تاب‌آوری فضای PLE شهری بررسی شده تا دیدگاه و روش شناسی جدیدی برای برنامه‌ریزی فضای PLE و مدیریت تاب‌آوری ارائه نمود.

تاب‌آوری فضای PLE منطقه شهری تهران، اختلاف‌های مکانی قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. مانند یافته‌های سایر پژوهشگران و مطالعاتی که تاب‌آوری فضای شهری را ارزیابی می‌کنند، مانند آنهایی که از یک سیستم شاخص ارزیابی مبتنی بر مولفه‌های تاب‌آوری شهری استفاده می‌کنند، این مطالعه نیز از ابعاد متعددی از جمله محیط‌های طبیعی، اجتماعی، اقتصادی و زیرساختی، برای ارزیابی تاب‌آوری شهری تهران استفاده نمود. این تحلیل، ساختار تمایز فضایی قابل‌توجهی را در سطوح تاب‌آوری مناطق شهری تهران نشان می‌دهد. یان و همکاران (Yan et al., 2025) از مدل شاخص‌های تاب‌آوری پایه برای جوامع به عنوان مبنای نظری استفاده کردند و روش‌های ارزیابی مثل سنجش از دور را برای بررسی سطح تاب‌آوری شهرهای چین به کار بردند که تحلیل آنها تغییرات فضایی را در تاب‌اوری شهری آشکار کرد. مناطق مختلف توسعه در یک منطقه، ناگزیر تحت تاثیر سطوح توسعه اقتصادی، منابع طبیعی، محیط سیاست گذاری و تنظیمات نهادی قرار می‌گیرند که منجر به تفاوت‌های قابل توجهی در تاب‌آوری فضای PLE می‌شود. این مطالعه یک سیستم ارزیابی تاب‌آوری ایجاد کرد که شامل مقاومت، سازگاری و تنوع است و مبتنی بر تجزیه و تحلیل ویژگی‌های تاب‌آوری فضای PLE شهری است.

این مطالعه نه تنها سطح تاب‌آوری جامع فضای PLE در منطقه شهری تهران را تعیین کرد، بلکه سطوح تاب‌اوری فضای تولید، زندگی و اکولوژی را در مناطق شهر تهران، همراه با سطوح مقاومت، سازگاری و تنوع مربوطهٔ آنها به تفصیل شرح داد. با مقایسهٔ سطوح شاخص تاب‌آوری و سطوح شاخص مقاومت، سازگاری و تنوع در مناطق مختلف، نقاط ضعف و خطرات بالقوه تاب‌آوری فضای PLE شهری به وضوح شناسایی شد.

عوامل اصلی موثر بر تاب‌آوری فضای PLE عبارتنداز دسترسی به حمل و نقل شهری، دسترسی به مراکز خدمات‌رسانی زندگی، سرانه فضای سبز و حفاظت از آب است. این یافته‌ها با نتایج سایر مطالعات تاب‌آوری فضای شهری متفاوت است. عوامل متعددی بر تاب‌آوری فضای شهری تاثیر می‌گذارند و سیستم‌های شاخص ارزیابی ساخته شده از دیدگاه‌های تحقیقاتی مختلف، نتایج متفاوتی دارد. عوامل ترکیبی موثر بر تاب‌آوری فضای شهری عبارتنداز محیط طبیعی، اجتماعی، اقتصادی، زیرساختی و سازمانی است. این نتیجه‌گیری با نتایج سونگ و همکاران (Song, Zhang & Wu, 2024) متفاوت است. همچنین بین عوامل فرایند چرخه تطبیقی که بر سطح تاب‌اوری فضای شهری تاثیر می‌گذارند و نتایج مطالعه شی و همکاران (Shi et al., 2024) تفاوت‌هایی وجود دارد. این مطالعه

با ادغام ویژگی‌های تاب‌آوری، عوامل خاص موثر بر تاب‌آوری فضای شهری مانند مقاومت در برابر اختلال، سازگاری و تنوع را با اجزای شهری تجزیه و تحلیل می‌کند.

تفاوت‌های مشاهده‌شده در تاب‌آوری مناطق تهران را می‌توان به عدم تعادل ساختاری میان فضاهای تولید، زندگی و اکولوژی نسبت داد. تمرکز فعالیت‌های تولیدی در جنوب و جنوب‌غرب تهران در کنار کمبود زیرساخت‌های اکولوژیکی و خدمات زندگی، موجب ایجاد نوعی "تناقض فضایی" در سیستم PLE شده است. این ناهم‌خوانی، ظرفیت سیستم را برای جذب و بازیابی از اختلالات کاهش داده و در نهایت به کاهش تاب‌آوری در این مناطق منجر شده است. در مقابل، در مناطق شمالی، اگرچه شاخص‌های فضای زندگی وضعیت بهتری دارند، اما عدم یکپارچگی با ساختار تولیدی و اکولوژیکی مانع از شکل‌گیری تاب‌آوری متوازن شده است. بنابراین، عدم توازن ساختاری در توزیع و تعامل فضایی میان ابعاد تولید، زندگی و اکولوژی، با ایجاد ناهماهنگی در کارکردهای سیستمی شهر، موجب تضعیف ظرفیت مقاومت، سازگاری و تنوع شده و در نتیجه به کاهش تاب‌آوری شهری می‌انجامد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه یک سیستم شاخص ارزیابی تاب‌آوری شهری را بر اساس دیدگاه فضای PLE ایجاد کرد. تاب‌آوری شهر تهران به عنوان منطقه موردمطالعه با استفاده از داده‌های چندمنبعی و با استفاده از روش‌های تحلیل مکانی، تکنیک‌های شاخص‌گذاری جامع ارزیابی شد. می‌توان نتیجه گرفت که تاب‌آوری فضای PLE در مناطق شهری تهران، درجه‌بندی‌ها و تمایز مکانی قابل‌توجهی دارد. تاب‌آوری فضای اکولوژیکی و تاب‌آوری فضای تولید نسبتاً پایین است، درحالی‌که تاب‌آوری فضای زندگی و دسترسی به خدمات زندگی شهری نسبتاً بالا است. در نتیجه اقدامات هدفمند برای افزایش استحکام فضاهای اکولوژیکی و تولید ضروری است. مناطق با ارزش بالای تاب‌آوری اکولوژیکی و زندگی در مناطق شمالی تهران متمرکز هستند، اما مناطق با تاب‌آوری فضای زندگی در مناطق جنوبی تهران واقع شده‌اند. عوامل اصلی موثر بر تاب‌آوری فضای PLE در ابعاد مقاومت و سازگاری متمرکز شده‌اند. دسترسی به خدمات زندگی شهری، فضای سبز، حمل و نقل، ظرفیت نگهداشت آب و کیفیت اکولوژی عامل اصلی موثر بر تاب‌آوری شهری هستند.

دو نقص در ساختار نظری و فرایند تجربی این پژوهش وجود دارد: ۱) اتصال قوی فضای PLE به اندازه کافی در نظر گرفته نشده است و داده‌های مورداستفاده از یک دوره زمانی واحد هستند. علاوه‌بر این، رابطه بین تاب‌آوری شهری و مقیاس به اندازه کافی بررسی نشده است. ۲) ویژگی‌های تاب‌آوری سیستم اجتماعی- اکولوژیکی انتخاب شده محدود هستند. در آینده باید ارزیابی جامع‌تر و سیستماتیک‌تری از تاب‌آوری فضای PLE شهری با در نظرگرفتن مسائل فوق الذکر و مکانیسم‌های اساسی محرک توسعه سیستم اجتماعی- اکولوژیکی، مانند سازمان‌های اجتماعی، مدیریت اجتماعی، نوآوری و سایر عوامل انجام شود.

این پژوهش برای افزایش جامع تاب‌آوری فضای PLE در تهران، استراتژی‌های مدیریتی هدفمندی را بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل تاب‌آوری با درنظر گرفتن شرایط واقعی مناطق شهری تهران پیشنهاد می‌کند که به شرح زیر خلاصه شده است:

تقویت توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل: شامل بهینه‌سازی شبکه حمل و نقل، افزایش ساخت یا ارتقا زیرساخت‌ها مانند جاده، پل‌ها، حمل و نقل عمومی، کنترل ترافیک و بهبود راحتی مسیرهای حمل و نقل؛

بهینه سازی ساختار چیدمان صنعتی: تحول و ارتقای صنایع سنتی، تشویق و حمایت از توسعه صنایع نوظهور و بهینه‌سازی توزیع متوازن صنایع مختلف در منطقه مانند صنعت خدمات در مناطق جدیدی در شرق تهران که در آن تاب‌آوری فضای تولید پایین است و می‌تواند تهدیدات بالقوه ناشی از تمرکز بیش از حد صنایع در جنوب و جنوب‌غربی را به حداقل برساند و تنوع صنعتی را افزایش دهد و تنوع کلی را ارتقا دهد.

کارکردهای فضایی متنوع: باید از انزوای فضای تولید اجتناب شود و خدمات عمومی و فضاهای سبز برای بهبود تنوع فضای تولید به ویژه در مناطق صنعتی جنوب و جنوب‌غربی تهران ادغام شوند.

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فضایی: بهبود تنوع کارکردهای زندگی در قطعات منطقه ای، افزایش غنا و پیچیدگی قطعات خدمات زندگی و افزایش اتصال و تجمیع قطعات برای بهبود تنوع فضای زندگی انجام شود.

استحکام زیرساخت‌ها: تقویت ساخت و نگهداری زیرساخت‌ها برای تضمین تاب‌آوری در برابر شوک‌ها و فشارهای خارجی و تدوین برنامه‌های واکنش اضطراری برای مقابله با شرایط اضطراری و بلایای طبیعی می‌تواند استحکام فضای زندگی را افزایش دهد.

بهبود جذابیت شهری: توسعه امکانات خدمات عمومی شهر از قبیل امکانات فرهنگی، تفریحی و ورزشی برای افزایش جذابیت جامع و مزیت رقابتی آنها مناسب است.

تقویت حفاظت از آب و خاک: بولتن منابع آب شهر تهران نشان می‌دهد که تهران بارندگی و منابع آب محدودی دارد. بنابراین تقویت حفاظت از منابع آب، اجرای حفاظت از خاک و آب و حفاظت از منابع طبیعی و مناطق محیط زیستی برای بهبود ظرفیت حفاظت از آب و خاک و افزایش تاب‌آوری اکولوژکی آنها ضروری است.

افزایش تنوع زیستی: ایجاد شبکه امنیت محیط زیستی، افزایش تنوع اراضی محیط زیستی مانند لکه‌های سبز، لکه‌های آبی و مناظر کریدوری، ادغام پارک‌های پراکنده در شبکه امنیت محیط زیستی، فضای اکولوژی شهری را بهینه می‌کند.

بر اساس نتایج مدل PLE، راهبردهای مدیریت تاب‌آوری باید به‌صورت تفکیک‌شده و متناسب با شرایط فضایی هر منطقه طراحی شوند. در مناطق دارای ضعف اکولوژیکی، تمرکز بر بازسازی شبکه‌های اکولوژیکی، افزایش سرانه فضای سبز و بهبود کیفیت محیط طبیعی ضروری است. در مناطق با ضعف در فضای تولید، بازتوزیع فعالیت‌های اقتصادی، توسعه کاربری‌های خدماتی و تقویت زیرساخت‌های حمل‌ونقل می‌تواند به بهبود تعادل فضایی کمک کند. همچنین در مناطقی که ضعف در فضای زندگی مشاهده می‌شود، ارتقای دسترسی به خدمات عمومی، بهبود کیفیت مسکن و افزایش عدالت فضایی در ارائه خدمات شهری از اولویت‌های اصلی محسوب می‌شود. این رویکرد موجب حرکت از سیاست‌های عمومی به سمت مدیریت فضایی هدفمند در چارچوب PLE می‌گردد. در ادامه، جدول ۶ راهبردهای پیشنهادی هدفمند برای هر یک از گروه‌های منطقه‌ای تهران ارائه شده است.

جدول ۶- راهبردهای مدیریت تاب‌آوری مبتنی بر PLE در مناطق منتخب تهران

Table 6- PLE-Based Resilience Management Strategies for Selected Districts of Tehran

گروه مناطق District Group	**ضعف غالب در** PLE Predominant PLE Weakness	**تحلیل مبتنی بر مدل تبیین علت** (PLE) PLE Model-Based Analysis (Underlying Causes)	**راهبردهای پیشنهادی هدفمند** Targeted Strategic Recommendations
مناطق مرکزی تهران (10، 11، 12، 14، 17) Districts 10, 11, 12, 14, and 17	ضعف شدید در اکولوژی و سازگاری Severe Weakness in Ecology and Adaptability	تمرکز بالای کاربری‌های فشرده شهری، کمبود سرانه فضای سبز و پارک، کیفیت پایین محیط اکولوژیکی و ضعف در دسترسی به خدمات زیست‌پذیری باعث عدم تعادل شدید بین فضاهای زندگی و اکولوژی شده است. The concentration of intensive urban land uses, limited green space and park area per capita, poor ecological quality, and inadequate access to livability services have resulted in a pronounced imbalance between the Living and Ecology dimensions.	بازآفرینی اکولوژیکی شهری، افزایش سرانه فضای سبز و پارک‌های محلی، ایجاد شبکه سبز–آبی، بهبود نفوذپذیری شهری، ارتقای عدالت فضایی در خدمات زندگی Urban ecological regeneration; increasing green space and neighborhood parks per capita; establishing green–blue networks; improving urban permeability; and promoting spatial equity in living services.
مناطق 18، 19، 20، 21(جنوب و جنوب‌غربی تهران) Districts 18, 19, 20, and 21 (Southern and Southwestern Tehran)	ضعف در فضای زندگی و اکولوژی Weaknesses in Living and Ecology	غلبه کاربری‌های تولیدی و صنعتی در کنار تراکم بالای جمعیت و کیفیت پایین مسکن، موجب کاهش زیست‌پذیری و فشار بر ظرفیت اکولوژیکی شده است. The dominance of industrial and production land uses, combined with high population density and poor housing quality, reduces livability and places pressure on ecological capacity.	بهبود کیفیت مسکن و نوسازی بافت فرسوده، ارتقای خدمات بهداشتی–آموزشی، کاهش فشار صنعتی و بازتوزیع کاربری‌ها، افزایش فضاهای سبز محلی Improving housing quality and renewing deteriorated urban areas; upgrading healthcare and educational services; reducing industrial pressure

مناطق 3، 4، 6، 7(نیمه شمالی–مرکزی تهران) Districts 3, 4, 6, and 7 (North-Central Tehran)	عدم تعادل بین زندگی و تولید Imbalance between Living and Production	کیفیت بالای زندگی وجود دارد، اما پیوند ضعیف با فعالیت‌های تولیدی و خدمات اقتصادی باعث عدم توازن در ساختار PLEشده است Despite high living quality, weak linkages with production activities and economic services have contributed to an imbalance in the PLE structure.	تقویت کارکردهای اقتصادی دانش‌بنیان و خدماتی، توسعه حمل‌ونقل یکپارچه، افزایش تنوع کاربری‌های ترکیبی Strengthening knowledge-based economic functions and services; developing integrated transportation; and increasing the diversity of mixed land uses.
منطقه 22(غرب تهران) District 22 (Western Tehran)	ضعف نسبی در فضای زندگی (با اکولوژی قوی) Relative Weakness in Living (Despite Strong Ecology)	وجود ظرفیت اکولوژیکی بالا به دلیل پهنه‌های باز و طبیعی، اما توسعه نامتوازن خدمات شهری و فاصله از مراکز خدمات زندگی موجب عدم تعادل PLEشده است High ecological capacity due to open and natural areas contrasts with the uneven distribution of urban services and distance from living-service centers, resulting in a PLE imbalance.	توسعه خدمات شهری و مراکز محلی، تقویت دسترسی حمل‌ونقل عمومی، هدایت توسعه کنترل‌شده و جلوگیری از تخریب منابع اکولوژیکی Expanding urban services and local centers; improving public transport accessibility; guiding controlled development; and preventing the degradation of ecological resources.
مناطق 1و 5(هسته‌های نسبتاً پایدار) Districts 1 and 5 (Relatively Stable Cores)	عدم تعادل جزئی در تولید–اکولوژی Minor Imbalance between Production and Ecology	کیفیت بالای زندگی و خدمات شهری وجود دارد، اما وابستگی به سایر مناطق برای فعالیت‌های تولیدی و فشار اکولوژیکی ناشی از تراکم بالا همچنان مطرح است High living quality and urban services coexist with dependence on other districts for production activities and ecological pressures associated with high density.	حفظ کیفیت موجود، کنترل تراکم، تقویت تاب‌آوری اکولوژیکی محلی، مدیریت بارگذاری جمعیتی و خدماتی Maintaining existing quality; controlling density; strengthening local ecological resilience; and managing population and service loads.

در پژوهش حاضر، تمرکز اصلی بر سنجش تاب‌آوری فضایی در قالب چارچوب تولید–زندگی–اکولوژی و مبتنی بر داده‌های قابل سنجش مکانی بوده است. از این‌رو، شاخص‌های حکمرانی، سرمایه اجتماعی و مشارکت مردمی به‌صورت مستقیم در مدل کمی وارد نشده‌اند، که این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش نیز در نسخه بازنگری‌شده به‌صراحت اضافه شده است. با این حال، تلاش شده است برخی ابعاد غیرمستقیم حکمرانی شهری از طریق شاخص‌هایی مانند دسترسی به خدمات عمومی، زیرساخت‌های حمل‌ونقل، و توزیع خدمات شهری تا حدی در ساختار مدل منعکس شود. با وجود این، همان‌طور که داور محترم اشاره کرده‌اند، این جایگزین نمی‌تواند به‌طور کامل ابعاد حکمرانی و مشارکت اجتماعی را پوشش دهد.

References

Akbari, M., & Alizadeh Noughani, M. (2024). Early warning systems for desertification hazard: A review of integrated system models and risk management. *Modeling Earth Systems and Environment*, *10*(4), 4611–4626. https://doi.org/10.1007/s40808-024-02059-3

Bayati Khatibi, M., Mohammadzadeh, R., & Karimzadeh, S. (2024). Modeling of land subsidence of Salmas Plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(4), 48–73. https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.75157.1171. [In Persian]

Béné, C., Mehta, L., McGranahan, G., Cannon, T., Gupte, J., & Tanner, T. (2018). Resilience as a policy narrative: Potentials and limits in the context of urban planning. *Climate and Development*, *10*(2), 116–133. https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1301868

Buba, F. N., Ojinnaka, O. C., Ndukwu, R. I., Agbaje, G. I., & Orofin, Z. O. (2021). Assessment of flood vulnerability in some communities in Lokoja, Kogi State, Nigeria, using participatory geographic information systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *55*, 102111. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102111

Burayu, D. G., Karuppannan, S., & Shuniye, G. (2023). Identifying flood vulnerable and risk areas using the integration of analytical hierarchy process (AHP), GIS, and remote sensing: A case study of southern Oromia region. *Urban Climate*, *51*, 101640. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101640

Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., & Müller, F. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, *21*, 17–29. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & Van Den Belt, M. (1998). The value of ecosystem services: Putting the issues in perspective. *Ecological Economics*, *25*(1), 67–72. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00019-6

Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2014). The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, *29*, 65–77. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005

Farhadi, E., Pourahmad, A., Ziari, K., & Faraji Sabokbar, H. (2025). Future study of effective factors in Tehran's resilience with an emphasis on spatial interaction. *Geographical Urban Planning Research*, *13*(2), 19–36. https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2023.349450.1743. [In Persian]

Fiorillo, E., Crisci, A., Issa, H., Maracchi, G., Morabito, M., & Tarchiani, V. (2018). Recent changes of floods and related impacts in Niger based on the ANADIA Niger flood database. *Climate*, *6*(3), 59. https://doi.org/10.3390/cli6030059

Folorunsho, J. O. (2022). Flood vulnerability assessment using GIS/AHP in Jalingo Metropolis, Taraba State, Nigeria. *Journal of Geography and Earth Sciences*, *10*(1), 16–43. https://doi.org/10.15640/jges.v10n1a2

Godschalk, D. R. (2003). Urban hazard mitigation: Creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, *4*(3), 136–143. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:3(136)

Gupta, J., Pfeffer, K., Verrest, H., & Ros-Tonen, M. (Eds.). (2015). Geographies of urban governance: Advanced theories, methods and practices. *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21272-2

Joerin, J., Shaw, R., Takeuchi, Y., & Krishnamurthy, R. (2012). Action-oriented resilience assessment of communities in Chennai, India. *Environmental Hazards*, *11*(3), 226–241. https://doi.org/10.1080/17477891.2012.689248

Kamranzad, F., Memarian, H., & Zare, M. (2020). Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 9*(7), 430. https://doi.org/10.3390/ijgi9070430

Kong, L., Mu, X., Hu, G., & Zhang, Z. (2022). The application of resilience theory in urban development: A literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(33), 49651–49671. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20891-x

Liu, W., Zhou, J., Li, X., Zheng, H., & Liu, Y. (2024). Urban resilience assessment and its spatial correlation from the multidimensional perspective: A case study of four provinces in North-South Seismic Belt, China. *Sustainable Cities and Society*, *101*, 105109. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105109

Lu, C. Y., Wen, F., Yang, Q. Y., Chen, L. L., & Zong, H. M. (2011). An evaluation of urban land use performance based on the improved TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators: A case study of Chongqing. *Resources Science*, *33*(3), 535–541.

Lyu, Y., Wang, M., Zou, Y., & Wu, C. (2022). Mapping trade-offs among urban fringe land use functions to accurately support spatial planning. *Science of the Total Environment*, *802*, 149915. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149915

Masnavi, M. R., Gharai, F., & Hajibandeh, M. (2019). Exploring urban resilience thinking for its application in urban planning: A review of literature. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(1), 567–582. https://doi.org/10.1007/s13762-018-1860-2

McGarigal, K. (1995). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure (Vol. 351). U.S. *Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station*. https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351

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

Meyer, N., & Auriacombe, C. (2019). Good urban governance and city resilience: An Afrocentric approach to sustainable development. *Sustainability*, *11*(19), 5514. https://doi.org/10.3390/su11195514

Ostrom, E. (2004). Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems: Lance H. Gunderson and C. S. Holling (Eds.), Island Press, Washington, DC, 2002, ISBN: 1559638575, 450 pp. *Ecological Economics*, *49*(4), 488–491.

Pan, Y., Liu, J., & Cheng, C. (2024). Research on urban resilience from the perspective of land intensive use: Indicator measurement, impact and policy implications. *Buildings*, *14*(8), 2564. https://doi.org/10.3390/buildings14082564

Papadimitriou, F. (2022). Visual perception of spatial entropy and landscape analysis. In Spatial entropy and landscape analysis (pp. 87–102). Springer Fachmedien Wiesbaden. Series E-ISSN2625-7009

PourAhmad, A., Ziyari, K., & Sadeghi, A. (2018). Spatial analysis of physical resilience components of urban attrited/beaten tissues against earthquakes (Case study: District 10 of Tehran Municipality). *Spatial Planning*, *8*(1), 111–130. https://doi.org/10.22108/sppl.2018.109941.1178 [InPersian].

Qiao, D., Shen, S., Chen, J., Lu, W., Xu, C., & Su, M. (2024). Urban resilience assessment from the perspective of cross-media carbon metabolism. *Journal of Cleaner Production*, *445*, 141383. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141383

Shi, H., Hu, Y., & Gan, L. (2024). Assessing urban resilience based on production-living-ecological system using degree of coupling coordination: A case of Sichuan. *PLOS ONE*, *19*(5), e0304002. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304002

Song, H., Zhang, X., & Wu, X. (2024). Research on the spatial-temporal evolution and driving mechanism of coupling coordination among digital-tourism-environment in the Yellow River Basin. *Sustainability*, *16*(13), 5339. https://doi.org/10.3390/su16135339

Su, S., Xiao, R., Jiang, Z., & Zhang, Y. (2012). Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale. *Applied Geography*, *34*, 295–305. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.12.001

Sun, Y., & Yao, S. (2017). Evaluation of the resilience of prefecture-level cities in the Yangtze River Delta region based on a social-ecological system perspective. *China Population, Resources and Environment*, *27*, 151–158. DOI not identified.

Tahmasebi Moghaddam, H., & Rasulzadeh, Z. (2025). Assessing the role of smart cities in enhancing urban resilience against environmental hazards (Case study: Zanjan City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(4), 181–200. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94757.1600. [In Persian]

Tian, Y., & Sun, C. (2018). A spatial differentiation study on comprehensive carrying capacity of the urban agglomeration in the Yangtze River Economic Belt. *Regional Science and Urban Economics*, *68*, 11–22. https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2017.10.014

Tirivangasi, H. M. (2018). Regional disaster risk management strategies for food security: Probing Southern African Development Community channels for influencing national policy. *Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies*, *10*(1), Article a468. https://doi.org/10.4102/jamba.v10i1.468

Tong, B., Liu, H., Zhu, J., Wang, Y., & Mei, T. (2025). Enhancing urban system safety through urban resilience: A case study of Ningbo, China. *Reliability Engineering & System Safety*, 111882. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111882

Tu, X., Ji, Z., Chen, H., Liu, Y., & Xu, X. (2025). Resilience assessment and obstacle factors of urban production-living-ecological space: A case study of Ganzhou city, China. *Journal of Geographical Sciences*, *35*(4), 846–866. https://doi.org/10.1007/s11442-025-2349-9

UN-Habitat. (2019). The strategic plan 2020–2023. DOI not identified.

Xiang, Y., Chen, Y., & Zheng, L. (2025). Research on coupling coordination of urban safety resilience based on disaster prevention and reduction. *Springer Nature Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1562-9

Xie, Z., & Peng, B. (2023). A framework for resilient city governance in response to sudden weather disasters: A perspective based on accident causation theories. *Sustainability*, *15*(3), 2387. https://doi.org/10.3390/su15032387

Xun, X., & Yuan, Y. (2020). Research on the urban resilience evaluation with hybrid multiple attribute TOPSIS method: An example in China. *Natural Hazards*, *103*(1), 557–577. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04000-0

Yan, Z., Li, Z., Li, P., Zhao, C., Xu, Y., Cui, Z., & Sun, H. (2025). Spatial-temporal changes and driving factors analysis of coupling coordination degree of economy-society-environment system in Shaanxi Province from 2010 to 2020. *Environment, Development and Sustainability*, 1–19. DOI: 10.1007/s10668-025-06658-7

Yuan, X., Liu, R., & Huang, T. (2024). Analyzing spatial-temporal patterns and driving mechanisms of ecological resilience using the driving force-pressure-state-influence-response and environment-economy-society model: A case study of 280 cities in China. *Systems*, *12*(8), 311. https://doi.org/10.3390/systems12080311

Ziga-Abortta, F. R., & Kruse, S. (2023). What drives vulnerability? Explaining the institutional context of flood disaster risk management in Sub-Saharan Africa. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *97*, 104054. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104054