



Designing a Comprehensive Model for Evaluating the Resilience of Green Infrastructure Using a Fuzzy Multi-Criteria Approach and Urban Acupuncture

Saeedeh Nasehi¹ | Ahmad Nohegar²

1. Department Landscape Architecture, Minab Higher Education Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2. Corresponding Author, Department of Environmental Planning, Management and Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: nohegar@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 07 May 2025

Received in revised form:
11 Aug 2025

Accepted: 18 Aug 2025

Available online: 22 Dec 2025

Keywords:

Fuzzy multi-criteria evaluation,
Resilience,
Green infrastructure,
Tehran,
Urban acupuncture.

ABSTRACT

Urban green infrastructure plays a vital role in achieving ecological sustainability, yet its resilience has markedly declined in recent decades due to rapid urban expansion. This study develops a comprehensive model for assessing the resilience of urban green infrastructure in Tehran. In the first phase, land use changes in 1997, 2010, and 2023 were analyzed using Landsat satellite imagery processed in the IDRISI software environment. Ecological metrics of green patches were then calculated with FRAGSTATS software. Subsequently, eleven resilience indicators across ecological, social, economic, and physical dimensions were identified through the Delphi method, with their relative weights determined using the Analytical Hierarchy Process (AHP). In the final stage, spatial information layers were integrated using the Weighted Linear Combination (WLC) method to generate a five-class resilience map. The urban acupuncture approach was further applied to identify and analyze critical vulnerability points. Results revealed a sharp reduction in green infrastructure, from 7,396 hectares in 1997 to 4,171 hectares in 2023, with much of this area converted into built-up land. Ecological analysis indicated severe degradation in the continuity and cohesion of green patches. Among the eleven indicators, ecological ones carried the highest weights, including Mean Core Area (0.1423), Largest Patch Index (0.1254), and Mean Contiguity Index (0.1027). The final resilience map highlighted the southern and central districts of Tehran as the most vulnerable, exhibiting the lowest resilience levels. Based on these findings, a set of protective, defensive, and opportunistic strategies was proposed to strengthen resilience in vulnerable areas. This integrated framework provides a practical tool for urban planning and management, supporting more sustainable approaches to safeguarding Tehran's ecological assets.

Cite this article: Nasehi, S., & Nohegar A. (2025). Designing a Comprehensive Model for Evaluating the Resilience of Green Infrastructure Using a Fuzzy Multi-Criteria Approach and Urban Acupuncture. *Geography and Environmental Sustainability*, 15(4), 53-79. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12102.2865>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12102.2865>

Publisher: Razi University

طراحی مدل جامع ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز با رویکرد چند معیاره فازی و طب سوزنی شهری

سعیده ناصحی^۱ | احمد نوحه‌گر^۲

۱. گروه مهندسی فضای سبز، مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
 ۲. نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط‌زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: nohegar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ کلیدواژه‌ها: ارزیابی چند معیاره فازی، تاب‌آوری، زیرساخت سبز، شهر تهران، طب سوزنی شهری.	زیرساخت‌های سبز شهری یکی از مؤلفه‌های کلیدی در تحقق پایداری اکولوژیکی به شمار می‌آیند که طی دهه‌های اخیر، تحت تأثیر گسترش سریع شهرنشینی، با کاهش تاب‌آوری مواجه شده‌اند. این پژوهش با هدف ارائه مدلی جامع برای ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری در شهر تهران انجام شده است. در گام نخست، تغییرات کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و تحلیل در محیط نرم‌افزار IDRISI بررسی شد. سپس، متریک‌های اکولوژیکی لکه‌های سبز با استفاده از نرم‌افزار FRAGSTATS محاسبه گردید. در ادامه، ۱۱ شاخص کلیدی تاب‌آوری در چهار بعد اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و کالبدی با بهره‌گیری از روش دلفی و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی شناسایی و وزن‌دهی شدند. در مرحله نهایی، لایه‌های اطلاعاتی با روش ترکیب خطی وزن‌دار تلفیق و نقشه تاب‌آوری در پنج طبقه تولید شد. همچنین از رویکرد طب سوزنی شهری برای شناسایی و تحلیل نقاط بحرانی استفاده گردید. نتایج نشان داد که مساحت زیرساخت‌های سبز طی دوره مورد بررسی از ۷۳۹۶ به ۴۱۷۱ هکتار کاهش یافته و بخش زیادی از این اراضی به کاربری انسان‌ساخت تبدیل شده است. تحلیل‌های اکولوژیکی حاکی از زوال شدید پیوستگی و انسجام لکه‌های سبز است. در میان ۱۱ شاخص بررسی‌شده، شاخص‌های اکولوژیکی بالاترین وزن را داشتند؛ میانگین مساحت هسته (۰،۱۴۲۳)، بزرگ‌ترین لکه (۰،۱۲۵۴) و پیوستگی لکه‌ها (۰،۱۰۲۷). نقشه نهایی نشان داد که زیرساخت‌های سبز مناطق جنوبی و مرکزی تهران پایین‌ترین سطح تاب‌آوری را دارند. در نهایت با بهره‌گیری از رویکرد طب سوزنی شهری مجموعه‌ای از راهبردهای حفاظتی، تدافعی، فرصت‌طلبانه و تهاجمی برای ارتقای تاب‌آوری این مناطق ارائه شد.

استناد: ناصحی، سعیده؛ نوحه‌گر، احمد (۱۴۰۴). طراحی مدل جامع ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز با رویکرد چند معیاره فازی و طب سوزنی شهری. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۵ (۴)، ۵۳-۷۹. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12102.2865>

ناشر: دانشگاه رازی

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12102.2865>

© نویسندگان.



مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های انسانی در چند دهه اخیر، فشار فزاینده‌ای بر اکوسیستم‌های طبیعی و زیرساخت‌های سبز وارد کرده است (Sun et al., 2018; Wang et al., 2018). امروزه بیش از نیمی از جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که این رقم تا سال ۲۰۵۰ به ۸۶ درصد خواهد رسید (UNDESA, 2018). این روند همراه با توسعه بی‌رویه و پراکنده شهرها، به تخریب گسترده زیستگاه‌های طبیعی، کاهش تنوع زیستی و افت کیفیت زندگی شهری منجر شده است (Girma et al., 2019). در کنار پیامدهای زیست‌محیطی، تغییرات در ساختار شهری و اجتماعی، اثرات اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی نیز از جمله؛ افزایش هزینه‌های نگهداری زیرساخت‌ها، کاهش تعاملات اجتماعی، تضعیف سلامت عمومی و کاهش تاب‌آوری در برابر بحران‌های طبیعی به دنبال داشته است (Reynolds et al., 2022; Shade et al., 2020; Voghera & Giudice, 2019; Zuniga-Teran et al., 2020).

مفهوم زیرساخت‌های سبز، که در راستای هماهنگی با طبیعت و پیوند عمیق انسان با محیط‌زیست شکل گرفته است، ریشه در نظریات قدیمی‌تری دارد که در طول زمان به تکامل رسیده‌اند. در دهه ۱۸۷۰، معمار منظر آمریکایی، المستند، بر اهمیت نقش پارک‌ها و پارک‌راه‌ها در بهبود کیفیت محیطی شهرها تأکید کرد (Ferreira et al., 2021; Ying et al., 2022). سپس در دهه ۱۸۹۰، نظریه باغ‌شهر توسط هاوارد مطرح شد و در دهه ۱۹۶۰، نظریه‌های شکل شهر توسط لینچ و کتاب طراحی با طبیعت اثر مک‌هارگ مطرح گردید (Ying et al., 2022). این اندیشه‌ها که بر هماهنگی با طبیعت تأکید داشتند، رویکردی کل‌گرایانه را در برنامه‌ریزی شهری و محیطی پایه‌گذاری کردند (Conway et al., 2020; Monteiro et al., 2020). امروزه، مفهوم زیرساخت‌های سبز به‌عنوان شبکه‌ای گسترده از فضاهای طبیعی و نیمه‌طبیعی، نه تنها در میان برنامه‌ریزان شهری و معماران منظر، بلکه در میان بوم‌شناسان، فعالان محیط‌زیست و سیاست‌گذاران نیز به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (Ely & Pitman, 2014; Parker & Zingoni de Baro, 2019). این زیرساخت‌ها، از جمله پارک‌ها، جنگل‌های شهری، رودکناره‌ها و فضاهای باز، نقشی حیاتی در بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری ایفا می‌کنند (Benedict & McMahon, 2012; Nawieśniak-Caesar et al., 2019). این فضاها با کاهش دمای هوا، بهبود کیفیت آب و هوا، مدیریت رواناب‌های سطحی و ارتقای تنوع زیستی، خدمات اکوسیستمی ارزشمندی ارائه می‌دهند (Mohammadian et al., 2018).

علاوه بر این، زیرساخت‌های سبز به تقویت تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی و بحران‌های زیست‌محیطی مانند سیلاب‌ها و امواج گرمایی کمک می‌کنند و اثرات منفی این بحران‌ها را کاهش می‌دهند (Foster et al., 2011; Karami & Mousavi, 2025). با این حال، توسعه ناپایدار، بهره‌برداری غیرمناسب از اراضی و نبود یک مدیریت هماهنگ و یکپارچه، تهدیدی جدی برای پایداری این زیرساخت‌ها به شمار می‌رود. این مشکلات به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که با چالش‌های منابع محدود و تضاد منافع مواجه‌اند، به‌طور فزاینده‌ای محسوس هستند (Nasehi & Imanpour namin, 2020; Wang & Banzhaf, 2018). بنابراین، شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر عملکرد و پایداری این زیرساخت‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Alemohammad et al., 2023).

تحقیقات علمی نشان می‌دهند که عواملی همچون انسجام اکولوژیکی (Nasehi et al., 2023)، مساحت و توزیع لکه‌های سبز (Liang et al., 2017)، فاصله از منابع خطرزا و تراکم جمعیت (Delgado-Capel & Cariñanos, 2020) تأثیر بسزایی بر عملکرد و تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز دارند. در این زمینه، استفاده از ابزارهای علمی مدرن مانند تحلیل سلسله‌مراتبی، مدل‌سازی چندمعیاره فازی و سیستم اطلاعات جغرافی می‌تواند به‌عنوان ابزارهای کارآمد در تصمیم‌گیری‌های مؤثر برای مدیریت و توسعه پایدار زیرساخت‌های سبز شهری عمل کند (Navas González et al., 2024; Sultana et al., 2024).

یکی از رویکردهای نوین برای تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری، رویکرد طب سوزنی شهری است که بر مداخلات کوچک‌مقیاس و هدفمند تمرکز دارد. این رویکرد با شناسایی نقاط بحرانی در ساختار شهری و تقویت آن‌ها از طریق پروژه‌های کم‌هزینه اما تأثیرگذار، نظیر ایجاد فضاهای سبز کوچک، باغچه‌های عمودی و مسیرهای سبز، علاوه بر

کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، باعث ارتقای تعاملات اجتماعی، تقویت حس تعلق به شهر و بهبود کیفیت زندگی شهری می‌شود (Al-Hinkawi & Al-Saadi, 2020). این مداخلات می‌توانند به‌عنوان محرک‌هایی برای تغییرات بزرگ‌تر در مدیریت زیرساخت‌های سبز و گسترش فرهنگ پایداری در مقیاس کلان عمل کنند (Fredericks et al., 2019; Hemingway, 2024).

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی بر نقش زیرساخت‌های سبز در ارتقای تاب‌آوری زیست‌محیطی و کالبدی شهرها تأکید کرده‌اند. برای نمونه، کرمی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای موردی بر منطقه یک شهرداری تهران، نشان دادند که تغییرات کاربری در زیرساخت‌های سبز می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش یا تقویت تاب‌آوری اکولوژیکی شهری داشته باشد. در همین راستا، گلچوبی دیوا و همکاران (۱۳۹۷) نیز با تمرکز بر پایداری باغات شهری در همین منطقه، معیارها و شاخص‌های تاب‌آوری را در پایداری باغات شهری ارزیابی کرده‌اند. از منظر توسعه فضایی، یدالله‌نیا و همکاران (۱۴۰۰) اثرات گسترش فیزیکی شهر بابل را بر تاب‌آوری زیست‌محیطی آن مورد بررسی قرار داده و بر ضرورت کنترل رشد کالبدی شهرها برای حفظ انسجام اکولوژیکی تأکید کرده‌اند. در مقیاس محله‌ای، شیرگیر و همکاران (۱۴۰۰) با بهره‌گیری از اصول اکولوژی سیمای سرزمین، الگویی برای سنجش و افزایش تاب‌آوری محله یوسف‌آباد در برابر تغییرات اقلیمی ارائه داده‌اند. در سطح تحلیل ساختارهای اکولوژیکی نیز، زاهدی کلاکی و همکاران (۱۴۰۲؛ ۱۴۰۰) با استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین، ساختار فضایی شهر بهشهر را تحلیل و پیشنهادهایی برای ارتقای پیوستگی منظر و بهبود تاب‌آوری اکولوژیکی ارائه کرده‌اند. همچنین، یوسفی مقدم و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای کاربردی، توان اکولوژیک توسعه شهری شیراز را بر اساس سنجش‌های سیمای سرزمین مدل‌سازی کرده‌اند.

مجموع این مطالعات گرچه هر یک به بخشی از ابعاد تاب‌آوری زیست‌محیطی پرداخته‌اند، اما عمدتاً متمرکز بر یک مقیاس جغرافیایی خاص، یک بعد از تاب‌آوری (اکولوژیکی یا کالبدی) یا فاقد نگاه تلفیقی به وجوه متنوع تاب‌آوری شهری بوده‌اند. همچنین، کمتر پژوهشی به طور هم‌زمان به تلفیق ابزارهای نوین تحلیل مکانی، رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره و چارچوب‌های عملیاتی در بستر سیاست‌گذاری شهری پرداخته است. از این‌رو، نیاز به مدلی جامع و یکپارچه که بتواند ابعاد اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و کالبدی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز را به‌صورت هم‌زمان و در مقیاس کلان‌شهری مورد ارزیابی قرار دهد، به‌شدت احساس می‌شود.

پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این خلأ علمی و ارتقای درک نظام‌مند از تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری، مدلی ترکیبی مبتنی بر روش‌های تحلیل چندمعیاره فازی طراحی کرده است که شهر تهران را به‌عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار می‌دهد. در این مدل، تلاش شده است تا با تلفیق داده‌های اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و کالبدی، بستری تحلیلی برای شناسایی نقاط آسیب‌پذیر، ارائه راهکارهای هدفمند و اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی با استفاده از رویکرد طب سوزنی شهری فراهم شود.

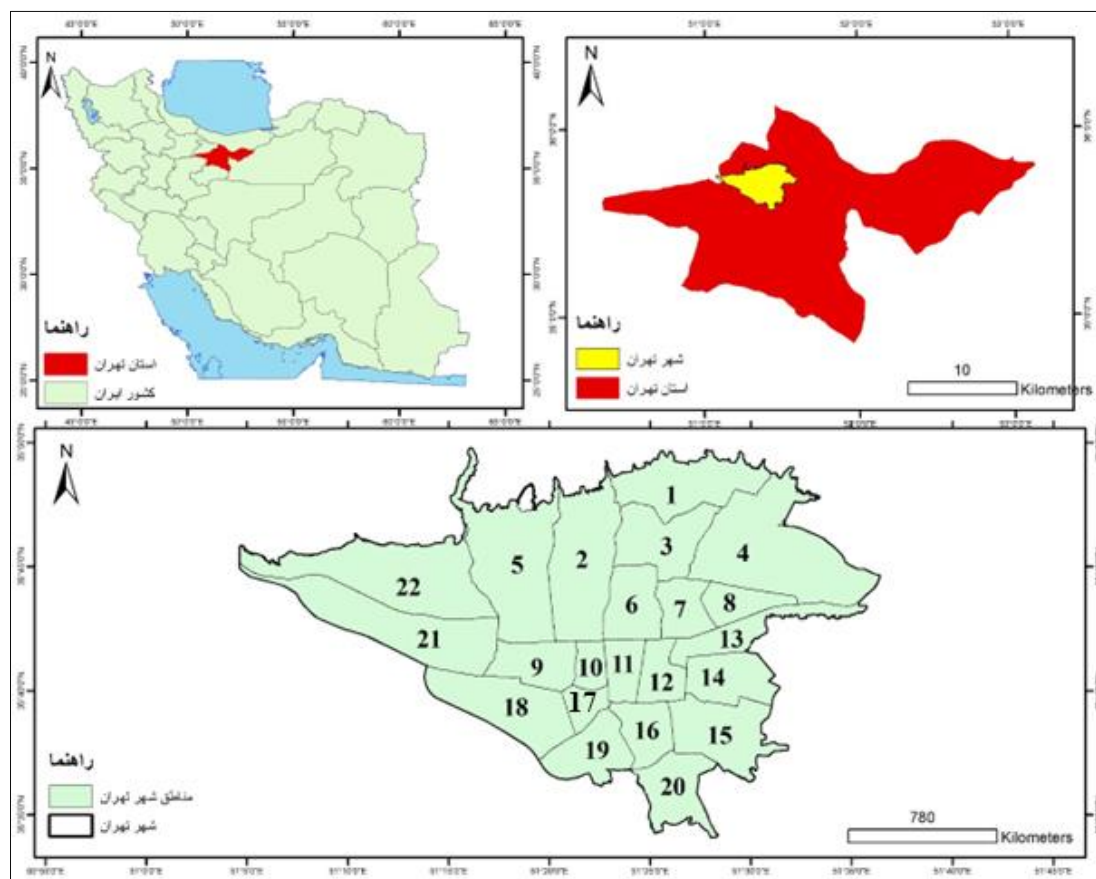
این رویکرد به شناسایی گره‌های بحرانی در ساختار فضایی زیرساخت‌های سبز پرداخته و مداخلاتی کوچک‌مقیاس اما اثرگذار برای افزایش تاب‌آوری پیشنهاد کرده است. مدل ارائه‌شده می‌تواند برای مدیران شهری و سیاست‌گذاران در مسیر توسعه پایدار و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های سبز در برابر بحران‌های اقلیمی و فشارهای انسانی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران، در شمال کشور و در دامنه جنوبی کوه‌های البرز و حاشیه کویری شمالی کویر ایران، در دشتی به نسبت هموار واقع شده است. تهران به ۲۲ منطقه شهری تقسیم شده است. این شهر با جمعیتی بالغ بر ۸۲۴۴۵۳۵ نفر و مساحتی معادل ۷۳۰ کیلومتر مربع، بیست و پنجمین شهر پرجمعیت و بیست و هفتمین شهر بزرگ جهان به شمار می‌آید. حد فاصل طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی گسترده شده است (خانی و همکاران، ۱۳۹۸). شکل ۱ موقعیت منطقه

مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این شهر با چالش‌هایی مانند تراکم جمعیت زیاد، تمرکز فعالیت‌ها، ساخت‌وسازهای وسیع و گسترش فیزیکی مراکز شهری روبرو است که منجر به تخریب اکوسیستم طبیعی آن شده است. در نتیجه، تهران در وضعیت ناپایداری از نظر وضعیت اکولوژیکی و همچنین مواجهه با خطرات زیست‌محیطی قرار دارد (Shamsipour et al., 2024).



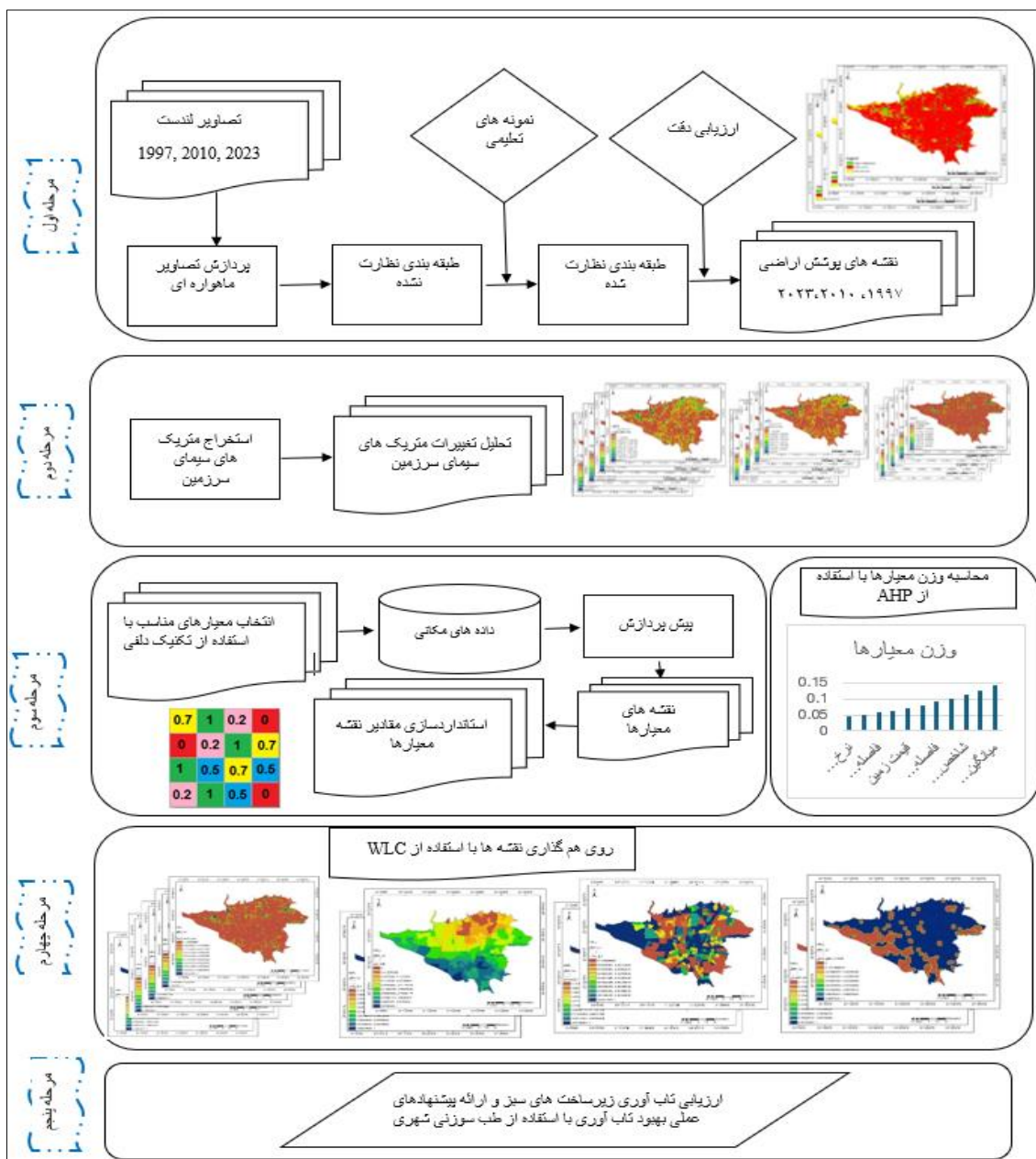
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش مطالعه

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری تهران از یک رویکرد ترکیبی شامل تحلیل مکانی و مدل‌سازی چندمعیاره در پنج مرحله اصلی بهره می‌برد. این مراحل شامل تحلیل تغییرات پوشش اراضی، محاسبه متریک‌های سیمای سرزمین، مدل‌سازی چندمعیاره فازی و ارائه راهبردهای اصلاحی است. در ادامه، جزئیات هر مرحله به همراه توضیحات روش‌شناختی ارائه می‌شود. فلوچارت روش پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

مرحله اول: تحلیل تغییرات پوشش اراضی

در این مرحله، تغییرات پوشش اراضی طی سه مقطع زمانی (۱۹۹۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳) بررسی شد. برای این منظور، داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و سنجنده OLI با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از پایگاه USGS دریافت شد. ابتدا، در مرحله طبقه‌بندی نظارت‌نشده، داده‌ها با هدف دست‌یابی به دید عمومی برای طبقات پوشش اراضی تقسیم‌بندی شدند. سپس تصاویر پس از اعمال تصحیحات هندسی و اتمسفری، با بکارگیری این نمونه‌های آموزشی و با روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال با استفاده از نرم‌افزار ایدریسی، طبقه‌بندی گردید. الگوریتم حداکثر احتمال یکی از متداول‌ترین الگوهای طبقه‌بندی نظارت شده است و در آن هر پیکسل به طبقه‌ای اختصاص می‌یابد که بالاترین احتمال را دارد (Taghadosi et al., 2019; Yousef et al., 2011). صحت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و معیارهای صحت کلی و ضریب کاپا ارزیابی شد.



شکل ۲. فلوچارت روش کار

مرحله دوم: محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین

از جمله پارامترهای مؤثر و کلیدی در ارزیابی پایداری زیرساخت‌های سبز شهری وسعت نسبی، انسجام شکلی و پیوستگی زیرساخت‌های سبز شهری می‌باشد (Dramstad et al., 1996; Ramezani Mehrian, 2022). به این دلیل در ارزیابی پایداری زیرساخت‌های سبز شهری این سه پارامتر بایست مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس در این مقاله با ارزیابی سنج‌های موجود چهار سنج شامل بزرگترین لکه و شاخص میانگین مساحت هسته برای کمی‌سازی معیارهای وسعت نسبی، شاخص میانگین شکل لکه‌ها نمایانگر انسجام شکلی و شاخص پیوستگی لکه‌ها نشان‌دهنده پیوستگی مورد استفاده قرار گرفته است.

شاخص بزرگ‌ترین لکه^۱ (LPI): این شاخص درصدی از کل مساحت منطقه را که به بزرگ‌ترین لکه اختصاص دارد،

نشان می‌دهد. کاهش مقدار آن بیانگر افزایش پراکندگی لکه‌ها است. این شاخص به صورت درصد بیان می‌شود. و فرمول محاسبه به صورت رابطه ۱ است:

$$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \left(\frac{j=1}{100} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن $\max(a_{ij})$ مساحت بزرگ‌ترین لکه و A کل مساحت منطقه است (Nazombe & Nambazo, 2023). در ارزیابی پایداری زیرساخت‌های سبز شهری، شاخص بزرگترین لکه نقش کلیدی ایفا می‌کند. زمانی که این شاخص به صفر نزدیک می‌شود، نشان‌دهنده تجزیه و کاهش شدید پهنه‌های سبز شهری است که پیامدهایی مانند تضعیف عملکرد اکولوژیکی، کاهش جذب آلاینده‌ها، تشدید جزیره گرمایی شهری و اختلال در زیست‌بوم‌های محلی را به دنبال دارد. این وضعیت عمدتاً ناشی از توسعه بی‌ضابطه شهری و تغییر کاربری اراضی است. در مقابل، مقدار برابر با ۱ بیانگر وجود یک پهنه سبز یکپارچه و غالب است که مزایای متعددی از جمله ارتقای تاب‌آوری اکولوژیکی، حفظ پیوستگی زیست‌گاهی و بهبود خدمات اکوسیستمی مانند تنظیم دمای محلی و کنترل سیلاب را موجب می‌شود (Nazombe & Nambazo, 2023). شاخص میانگین شکل لکه‌ها^۱ (MSI): این سنجه پیچیدگی شکل لکه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. با افزایش نامنظمی اشکال لکه‌ها، مقدار MSI بدون محدودیت افزایش می‌یابد. این شاخص بدون واحد است و فرمول محاسبه به صورت رابطه ۲ است:

$$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{.25p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right)}{n_i} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن p_{ij} محیط لکه، a_{ij} مساحت لکه و n تعداد لکه‌ها است. از منظر پایداری شهری، مقادیر پایین‌تر این شاخص حاکی از انسجام شکلی بیشتر لکه‌های سبز است که نشان‌دهنده نزدیکی شکل لکه‌ها به فرم‌های هندسی منظم (مانند دایره یا مربع) می‌باشد (Ha et al., 2024).

این ویژگی از چند جهت برای پایداری زیرساخت‌های سبز حائز اهمیت است: اولاً، لکه‌های با اشکال منظم از کارایی اکولوژیکی بالاتری برخوردارند، چرا که نسبت محیط به مساحت بهینه‌تری داشته و در نتیجه تبادلات انرژی و مواد در آنها با محیط پیرامون کارآمدتر صورت می‌پذیرد. ثانیاً، این لکه‌ها در برابر عوامل تهدیدکننده محیطی مانند آلودگی‌های صوتی و هوایی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. ثالثاً، از دیدگاه برنامه‌ریزی شهری، لکه‌های با اشکال منظم معمولاً مدیریت و نگهداری آسان‌تری داشته و در نتیجه پایداری عملیاتی بیشتری ارائه می‌دهند؛ بنابراین، در طراحی و برنامه‌ریزی فضاهای سبز شهری پایدار، تلاش برای کاهش مقدار شاخص میانگین شکل لکه‌ها و ایجاد لکه‌هایی با اشکال منظم‌تر می‌تواند به ارتقای عملکرد اکولوژیکی و افزایش تاب‌آوری این زیرساخت‌های حیاتی منجر گردد (Ha et al., 2024). شاخص پیوستگی لکه‌ها^۲ ($CONTIG_MN$): این شاخص میزان پیوستگی و اتصال درونی لکه‌های سبز را اندازه‌گیری می‌کند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود. فرمول به صورت رابطه ۳ است:

$$CONTIG = \frac{\left[\frac{\sum_{r=1}^Z c_{ijr}}{a_{ij}^*} \right] - 1}{v - 1} \quad \text{رابطه ۳}$$

c_{ijr} میزان اتصال سلول‌های مجاور در لکه و a_{ij}^* حداکثر مساحت ممکن لکه و v تعداد سلول‌های لکه می‌باشد. این

شاخص عددی بین صفر تا یک است.

مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده ساختار فشرده و پیوسته لکه‌های سبز است که برای پایداری اکولوژیکی مطلوب‌تر می‌باشد. مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده پراکندگی و تکه‌تکه‌شدن لکه‌هاست که بر عملکرد زیست‌بوم‌های شهری تأثیر منفی می‌گذارد (زندسلیمی و بهرامی، ۱۴۰۱).

شاخص میانگین مساحت هسته^۱: (Core_Mn) این سنجه میانگین مساحت بخش‌های هسته‌ای لکه‌ها را محاسبه می‌کند و با واحد هکتار بیان می‌شود. فرمول این شاخص به صورت رابطه ۴ است:

$$\text{Core_Mn} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

A_i مساحت ناحیه مرکزی برای هر لکه i و n تعداد لکه‌ها می‌باشد (McGarigal, 2002).

شاخص میانگین مساحت هسته، معیاری است که نسبت مساحت مرکزی لکه‌های سبز را به کل مساحت آن‌ها ارزیابی کرده و به صورت هکتار بیان می‌کند. این شاخص نشان‌دهنده میزان هسته‌های پایدار و مقاوم در زیرساخت‌های سبز شهری است که نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری اکولوژیکی و پایداری عملکردهای زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. مقادیر بالاتر نشان‌دهنده وجود لکه‌های سبز با هسته‌های بزرگ‌تر و پیوسته‌تر است که توان اکولوژیکی بیشتری برای مقابله با اختلالات بیرونی (مانند تغییرات اقلیمی یا توسعه شهری) دارند (Sadat et al., 2024).

مرحله سوم: شناسایی معیارها و وزن‌دهی آن‌ها

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی روش دلفی و تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ (AHP) به ارزیابی معیارهای تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری پرداخته است. روش دلفی به‌عنوان یک تکنیک ساختاریافته برای دستیابی به اجماع نظر متخصصان، بر سه اصل کلیدی ناشناس ماندن مشارکت‌کنندگان، فرایند تکراری بازخورد و امکان تعدیل نظرات در طول مراحل مختلف مطالعه استوار است (Haghighi Fard & Doratli, 2022; Hsu & Sandford, 2007).

در این تحقیق، ابتدا از روش دلفی برای شناسایی و غربالگری معیارهای کلیدی تاب‌آوری استفاده شد. گروهی متشکل از ۳۵ متخصص دانشگاهی که دارای سوابق پژوهشی در حوزه مدیریت شهری و زیرساخت‌های سبز بودند، در این فرایند مشارکت داشتند. این افراد طی سه دور تکرار، اهمیت معیارهای پیشنهادی را در مقیاس هفت‌درجه‌ای لیکرت (از کاملاً مهم تا کاملاً بی‌اهمیت) مورد ارزیابی قرار دادند.

معیارهایی که میانگین امتیاز بالاتر از ۴ کسب کردند، برای مراحل بعدی تحقیق انتخاب شدند (Markmann et al., 2021). در مرحله بعد فرایند وزن‌دهی معیارهای تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری به روش تحلیل سلسله‌مراتبی با مشارکت ۳۵ متخصص انجام شد. ابتدا هر یک از متخصصان به صورت جداگانه با استفاده از مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی به مقایسه زوجی معیارها پرداختند (Saaty, 2004). در این مرحله، برای هر متخصص ماتریس مقایسات زوجی تشکیل شد و وزن نسبی هر معیار با محاسبه میانگین حسابی سطری (نرمالیزه کردن ستون‌ها و محاسبه میانگین سطرها) تعیین گردید. سپس برای محاسبه وزن نهایی هر معیار در سطح کل پژوهش، از میانگین حسابی وزن‌های بدست آمده از تمامی ۳۵ متخصص به عبارت دیگر، وزن نهایی هر معیار از میانگین گیری ساده وزن‌های اختصاص داده شده توسط تک تک متخصصان محاسبه گردید.

این رویکرد امکان ترکیب نظرات تمامی کارشناسان را فراهم کرده و نتایج جامع‌تری ارائه می‌نماید (Coffey & Claudio, 2021).

مرحله چهارم: مدل‌سازی چندمعیاره فازی

در این مرحله، از مدل‌سازی چندمعیاره فازی برای تحلیل داده‌های مکانی استفاده شد. مدل‌های فازی برای شرایط عدم

1. Core Mean Area

2. Analytic Hierarchy Process

قطعیت در داده‌ها مناسب هستند و امکان ارزیابی دقیق‌تر معیارها را فراهم می‌کنند (Zadeh et al., 1996). روش ترکیب خطی وزن‌دار^۱ (WLC) برای تولید نقشه نهایی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز استفاده می‌کند (Malczewski & Rinner, 2015).

فرمول کلی ترکیب خطی وزن‌دار به صورت رابطه ۵ است:

$$WLC = [Gx1 \times W1] + (Gx2 \times W2) + \dots + (Gxm \times Wm) \quad \text{رابطه ۵}$$

$Gx1$ لایه استاندارد شده (۱)، $Gx2$ لایه استاندارد شده (۲)، Gxm لایه استاندارد شده آخر (شماره m) همچنین $W1$ وزن استخراج شده لایه (۱) با روش تحلیل سلسله مراتبی، $W2$ وزن استخراج شده لایه (۲) با روش تحلیل سلسله مراتبی، Wm وزن استخراج شده لایه آخر (شماره m) با روش تحلیل سلسله مراتبی.

این ترکیب وزنی، امکان ارزیابی هم‌زمان معیارهای مختلف و تأثیر متناسب آن‌ها بر تاب‌آوری را فراهم می‌کند. خروجی نهایی این گام به صورت نقشه‌ای تهیه شد که تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز مناطق مختلف شهر را نشان می‌دهد.

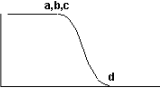
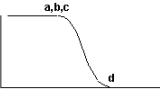
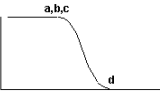
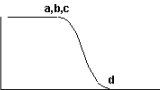
نتایج این مرحله، چارچوبی را برای شناسایی مناطق بحرانی، اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و برنامه‌ریزی جهت ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری ارائه خواهد داد.

معیارهای مورد استفاده در پژوهش و توصیف هر کدام از آنها به همراه نوع تابع مورد استفاده در جدول ۱ مشخص گردیده است.

جدول ۱. تعریف معیارها

دسته‌بندی	معیار	نوع تابع	توضیحات	منبع
اکولوژیکی	میانگین مساحت هسته لکه		افزایش مساحت هسته مرکزی لکه‌های سبز، اتصال مکانی و کارایی زیرساخت سبز را بهبود می‌بخشد و تاب‌آوری آن را افزایش می‌دهد.	(Nasehi & Imanpour namin, 2020) (Golchubi Diva et al., 2018) (Ramezani Mehrian, 2022)
	شاخص بزرگ‌ترین لکه		شاخص بالاتر نشان‌دهنده تسلط لکه‌های سبز بزرگ‌تر است که پایداری اکولوژیکی و عملکردی زیرساخت سبز را تقویت می‌کند.	
	شاخص شکل لکه		از منظر پایداری شهری، مقادیر پایین‌تر این شاخص حاکی از انسجام شکلی بیشتر لکه‌های سبز است که نشان‌دهنده نزدیکی شکل لکه‌ها به فرم‌های هندسی منظم (مانند دایره یا مربع) می‌باشد.	
	شاخص اتصال لکه‌ها		شاخص اتصال بالاتر نشان‌دهنده پیوستگی بهتر زیرساخت سبز است و تاب‌آوری آن را افزایش می‌دهد.	
کالبدی	فاصله از گسل		مجاورت با گسل‌ها، خطر زلزله و پیچیدگی بازایی زیرساخت سبز پس از بحران را افزایش می‌دهد.	(Li et al., 2005) (Syphard et al., 2017)
	فاصله از مناطق صنعتی		مجاورت با مناطق صنعتی، تنش آلودگی بر زیرساخت سبز را افزایش می‌دهد و کیفیت آن را کاهش می‌دهد.	
	فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی		فاصله بیشتر، پاسخگویی به بحران و حفاظت از زیرساخت سبز را کاهش می‌دهد.	

ادامه جدول ۱.

دسته‌بندی	معیار	نوع تابع	توضیحات	منبع
اقتصادی	قیمت زمین		قیمت بالای زمین، فشار برای تبدیل فضاهای سبز شهری را افزایش می‌دهد و تاب‌آوری را کاهش می‌دهد.	(Alberti & Marzluff, 2004) (Jim & Chen, 2003)
	نرخ بیکاری		نرخ بالای بیکاری، توانایی اقتصادی جامعه محلی برای مشارکت در نگهداری زیرساخت سبز را کاهش می‌دهد.	(Wolch et al., 2014)
اجتماعی	نرخ بی‌سوادی		نرخ بالای بی‌سوادی، آگاهی محیط‌زیستی را کاهش می‌دهد و تاب‌آوری زیرساخت سبز را تضعیف می‌کند.	(Alberti & Marzluff, 2004) (Sharifi & Yamagata, 2016)
	تراکم جمعیت		تراکم جمعیت بالا، فشار بر زیرساخت سبز را افزایش می‌دهد.	(Cutter et al., 2010)

مرحله پنجم: طب سوزنی شهری و تدوین راهبردهای اصلاحی

در این مطالعه، از رویکرد طب سوزنی شهری به‌عنوان یک مدل نوین برای مدیریت پایدار شهری استفاده شده است که شهر را به‌عنوان یک ارگانیسم زنده با نقاط حساس و آسیب‌پذیر در نظر می‌گیرد (شکل ۳). هدف این رویکرد شناسایی این نقاط بحرانی و انجام مداخلات هدفمند برای افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز در برابر چالش‌های اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و کالبدی است (Carlotti, 2024; Dang et al., 2024).

این رویکرد با تمرکز بر مداخلات کم‌هزینه و تأثیرگذار، به تقویت زیرساخت‌های سبز و بهبود تعاملات اجتماعی و محیط‌زیست کمک می‌کند (Chehab & Farhat, 2024; Hemingway, 2024). در طب سوزنی شهری، دو دیدگاه متفاوت مطرح است: دیدگاه اول دیدگاه جیمی لرنر و دیدگاه دوم دیدگاه مارکوکاسانگرا و مانوئل دی سولا مورالس. در دیدگاه لرنر، نقاط بحرانی به‌عنوان نقاط بیمارگونه شهری شناسایی می‌شوند که نیاز به مداخلات فوری دارند تا مشکلات زیست‌محیطی، اجتماعی یا اقتصادی کاهش یابد. در مقابل، دیدگاه کاسانگرا و مورالس بر شناسایی نقاط با پتانسیل‌های بالقوه برای بهبود تاب‌آوری تأکید دارد. در این مقاله، از دیدگاه لرنر بهره‌برداری شده است تا نقاط بحرانی و آسیب‌پذیر شناسایی شوند و از طریق مداخلات هدفمند، تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری در برابر بحران‌های اقلیمی و فشارهای انسانی تقویت گردد (زرنگارزاده شیرازی، ۱۴۰۳).

این مداخلات در قالب چهار راهبرد اصلی طراحی شدند: راهبرد حفاظتی که بر حفظ وضعیت موجود و جلوگیری از تخریب زیرساخت‌های سبز تمرکز دارد؛ راهبرد تدافعی که شامل اقدامات برای مقابله با تهدیدات و افزایش مقاومت زیرساخت‌های سبز است؛ راهبرد فرصت‌طلبانه که به شناسایی و استفاده از فرصت‌های جدید برای توسعه زیرساخت‌های سبز می‌پردازد؛ و راهبرد تهاجمی که شامل مداخلات گسترده و تحول‌آفرین در نواحی بحرانی به‌منظور بازسازی و بهبود تاب‌آوری زیرساخت‌ها است. هدف نهایی این رویکرد، افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری از طریق شناسایی دقیق نقاط آسیب‌پذیر و اعمال مداخلات هوشمندانه‌ای است که ظرفیت‌های پنهان شهر را فعال کرده و به ارتقای پایداری و کیفیت محیط زیستی آن منجر شود.



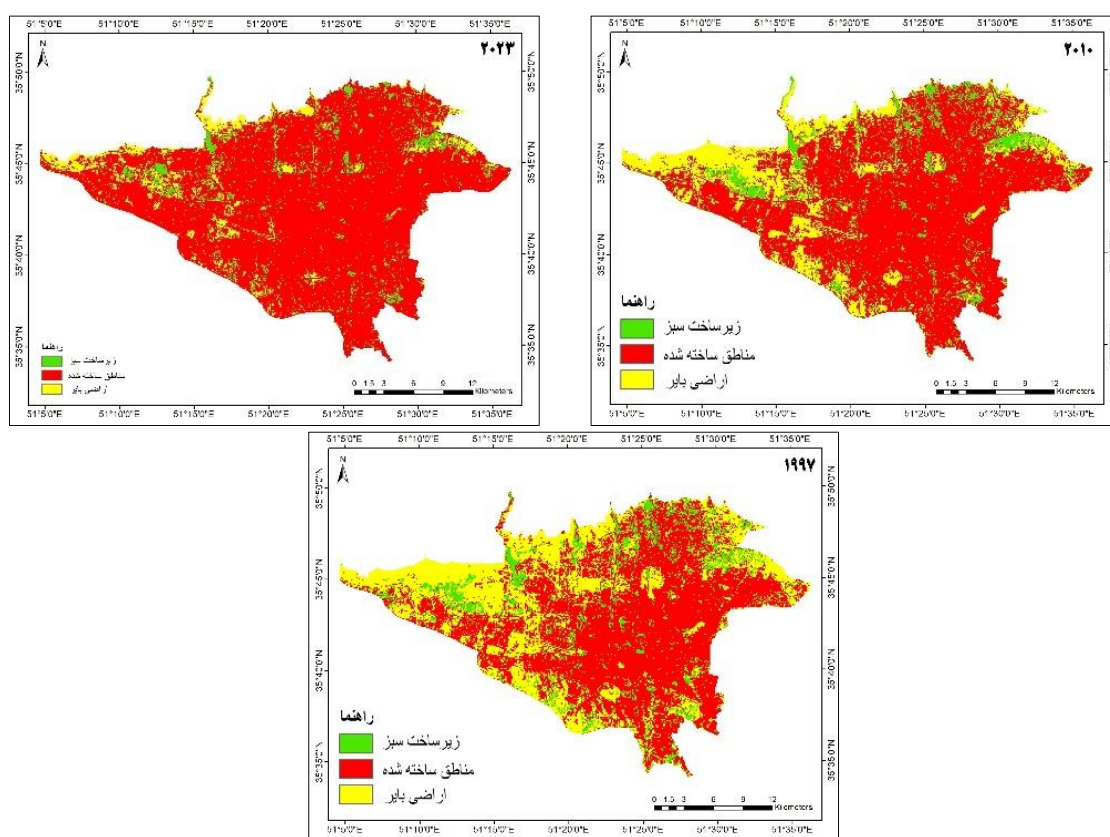
شکل ۳. طب سوزنی شهری (Google image, pocket-parks-as-urban-acupuncture.com)

این روش تحقیق جامع و چندوجهی، ابزارهای کارآمدی را برای تحلیل و مدیریت پایدار زیرساخت‌های سبز شهری تهران فراهم کرده است.

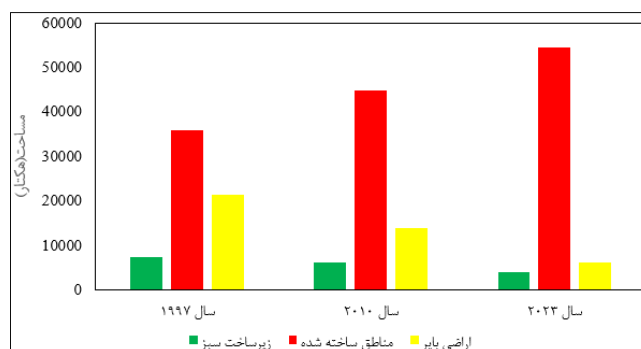
نتایج

تغییرات انواع پوشش اراضی، به شرح زیر و مطابق شکل ۴ و شکل ۵ می‌باشد. بررسی آرایه خطای تهیه شده برای نقشه‌های تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای، نشان‌دهنده ضریب کاپای کلی بیش از ۹۰ درصد و صحت کلی بیش از ۸۰ درصد می‌باشد که بر اساس مرور منابع انجام شده، دقت قابل قبول نقشه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد.

طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۳، اراضی انسان‌ساخت، از حدود ۳۵۹۷۹ هکتار به بیش از ۵۴۵۴۶ هکتار رسیده است. همچنین زیرساخت‌های سبز، از بیش از ۷۳۹۶ هکتار، به حدود ۴۱۷۱ هکتار رسیده است. در نهایت اراضی بایر از حدود ۲۱۵۲۶ به حدود ۶۱۸۵ هکتار کاهش یافته است. شایان ذکر است بیش از ۳۱۸۹ هکتار از زیرساخت‌های سبز و ۱۵۰۸۱ هکتار از اراضی بایر به اراضی انسان‌ساخت تبدیل شده است.



شکل ۴. نقشه تغییرات پوشش اراضی از ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۳ شهر تهران



شکل ۵. نمودار تغییرات پوشش اراضی طی بازه زمانی مورد بررسی

تحلیل تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین برای زیرساخت‌های سبز شهری

در تحلیل وضعیت لکه‌های سبز شهری، از سنجه‌های سیمای سرزمین برای ارزیابی تاب‌آوری و پایداری این زیرساخت‌ها استفاده شده است. بررسی روند تغییرات این سنجه‌ها شامل شاخص بزرگ‌ترین لکه، شاخص میانگین شکل لکه، شاخص پیوستگی لکه‌ها و شاخص میانگین مساحت هسته در سه دوره زمانی ۱۹۹۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ که در شکل ۶ نشان داده شده است نشان‌دهنده تأثیر این تغییرات بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز و پایداری اکوسیستم‌ها است.

کاهش مقدار شاخص بزرگ‌ترین لکه از ۰/۹۹۷۹ در سال ۱۹۹۷ به ۰/۸۲۵۸ در سال ۲۰۱۰ و سپس به ۰/۴۳۴۹ در سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده کاهش اندازه بزرگ‌ترین تراکم زیرساخت‌های سبز و به‌دنبال آن افزایش پراکندگی و تجزیه این زیرساخت‌ها در طول زمان است. مقدار شاخص بزرگ‌ترین لکه در سال ۱۹۹۷ که نزدیک به ۱ بود، نشان‌دهنده یکپارچگی بالای زیرساخت‌های سبز و تراکم بالای این فضاها است. اما کاهش تدریجی این مقدار در سال‌های بعد، به‌ویژه افت شدید آن از ۲۰۱۰ به ۲۰۲۳، بیانگر تجزیه بیشتر این تراکم‌ها و کاهش پیوستگی زیرساخت‌های سبز در سطح شهری است. کاهش این شاخص در بازه ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰ حدود ۰/۱۷۲۱ واحد بوده، در حالی که از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ این افت به ۰/۳۹۰۹ واحد رسیده است که نشان‌دهنده افزایش سرعت تجزیه و پراکندگی زیرساخت‌های سبز در این سال‌ها است. کاهش اندازه این تراکم‌های زیرساخت‌های سبز باعث شده که این فضاها به لکه‌های کوچک‌تر و جدا از هم تبدیل شوند؛ امری که می‌تواند منجر به کاهش تنوع زیستی، افزایش آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی و کاهش توانایی این مناطق در جذب آلودگی و ذخیره کربن شود.

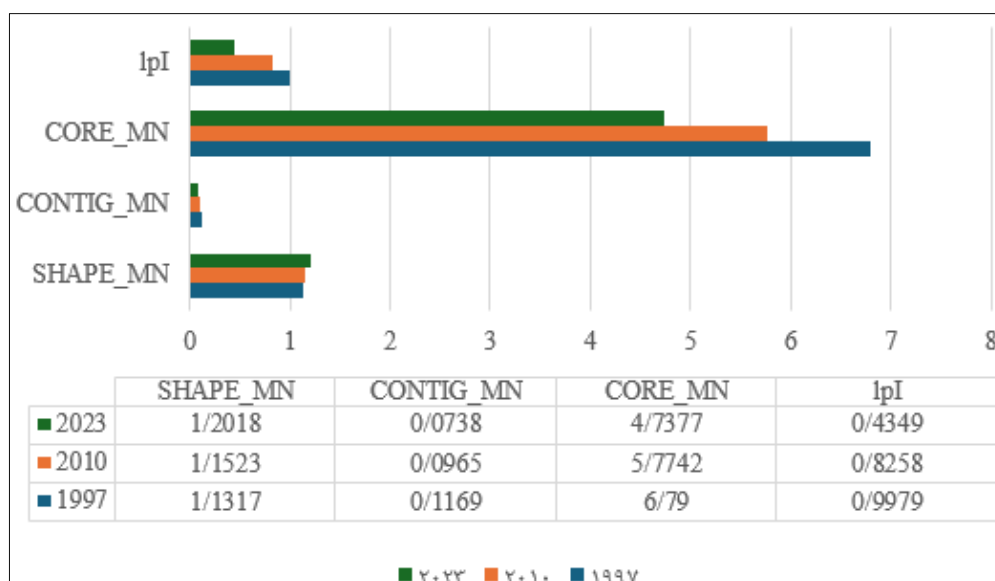
افزایش مقدار شاخص میانگین شکل لکه از ۱/۱۳۱۷ در سال ۱۹۹۷ به ۱،۱۵۲۳ در سال ۲۰۱۰ و سپس ۱/۲۰۱۸ در سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده کاهش نسبی پایداری شکل لکه‌ها در زیرساخت‌های سبز شهری در طول زمان است. هرچه مقدار این شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده شکل‌های پایدارتر و نزدیک‌تر به فرم ایده‌آل است. بنابراین، افزایش این شاخص حاکی از آن است که شکل لکه‌های زیرساخت سبز در حال تغییر به سمت فرم‌های نامنظم‌تر و پراکنده‌تر است. همچنین شدت این تغییرات در سال‌های اخیر افزایش یافته است، به‌طوری که از ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰ مقدار شاخص حدود ۰/۲۰۶ واحد افزایش داشته، اما از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ این افزایش به ۰/۴۹۵ واحد رسیده است که نشان‌دهنده شتاب بیشتر در تغییرات و کاهش یکپارچگی شکلی زیرساخت‌های سبز است. این روند نشان می‌دهد که پایداری شکل لکه‌ها در زیرساخت‌های سبز شهری در حال کاهش است و این لکه‌ها نسبت به گذشته نامنظم‌تر و پراکنده‌تر شده‌اند، که می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد اکولوژیکی، اجتماعی و فضایی این زیرساخت‌ها بگذارد.

شاخص پیوستگی لکه‌ها که میزان اتصال لکه‌های سبز در زیرساخت‌های سبز شهری را اندازه‌گیری می‌کند، در سال ۱۹۹۷ مقدار ۰/۱۱۶۹ را نشان می‌دهد که بیانگر اتصال نسبتاً ضعیفی میان لکه‌های سبز است. این مقدار در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ به ترتیب به ۰/۰۹۶۵ و ۰/۰۹۳۸ کاهش یافته است. کاهش مداوم این شاخص نشان‌دهنده تضعیف ارتباطات اکولوژیکی میان بخش‌های مختلف زیرساخت‌های سبز است. این کاهش در پیوستگی لکه‌ها منجر به کاهش تبادل انرژی، مواد مغذی و تنوع زیستی در سطح زیرساخت‌های سبز می‌شود و در نتیجه تاب‌آوری این زیرساخت‌ها در برابر تهدیدات زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی کاهش می‌یابد.

کاهش مقدار شاخص میانگین مساحت هسته از ۶/۷۹ هکتار در سال ۱۹۹۷ به ۵/۷۷۴۲ هکتار در سال ۲۰۱۰ و سپس ۴/۷۳۷۷ هکتار در سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده کوچک‌تر شدن هسته‌های سبز و کاهش پایداری آن‌ها در طول زمان است. این شاخص مساحت هسته‌ای زیرساخت‌های سبز را اندازه‌گیری می‌کند، به این معنا که هرچه مقدار آن بیشتر باشد، زیرساخت‌های سبز دارای نواحی مرکزی بزرگ‌تری هستند که از تأثیرات مخرب محیطی مانند آلودگی، فرسایش و تغییرات اقلیمی محافظت می‌شوند. کاهش تدریجی اما مداوم مساحت هسته‌های سبز، نشان‌دهنده روندی نگران‌کننده در تجزیه این نواحی است. در بازه ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰، مقدار شاخص میانگین مساحت هسته حدود ۱/۰۱۵ واحد کاهش یافته که بیانگر روندی نسبتاً سریع در کوچک شدن هسته‌های سبز است. در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳، این کاهش به ۱/۰۳۶۵ واحد رسیده که

نشان می‌دهد سرعت تجزیه و کوچک‌تر شدن این مناطق همچنان بالا باقی مانده است. این روند به‌طور مستقیم بر پایداری زیرساخت‌های سبز تأثیر گذاشته و می‌تواند به کاهش توانایی این زیرساخت‌ها در مقابله با تهدیدات زیست‌محیطی منجر شود.

بررسی تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین در سه دوره زمانی حاکی از کاهش یکپارچگی (LPI و CONTIG_MN)، کاهش پایداری شکل و کاهش مساحت هسته‌ای است. این تغییرات به‌طور مستقیم باعث کاهش تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز و افزایش آسیب‌پذیری اکوسیستم‌ها در برابر تهدیدات زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی و توسعه شهری شده است. از این‌رو، برنامه‌ریزی‌های آتی باید بر تقویت اتصال لکه‌های سبز، افزایش مساحت هسته‌ای و حفظ پیچیدگی و تنوع شکل لکه‌های سبز تمرکز کنند تا تاب‌آوری و پایداری اکوسیستم‌ها بهبود یابد.



شکل ۶. تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین طی بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۳

برای وزن‌دهی معیارها در این مطالعه روش تحلیل سلسله‌مراتبی به‌کار گرفته شده است. در این روش، معیارهای مختلف باتوجه‌به اهمیت نسبی‌شان نسبت به یکدیگر مقایسه شده و وزن نهایی هر معیار از طریق آرایه مقایسه زوجی به‌دست‌آمده است. در ابتدا، بر اساس نظر کارشناسان که از تجربه و تخصص در زمینه‌های مختلف برخوردار بودند، هر یک از معیارها در مقایسه زوجی با دیگر معیارها ارزیابی شدند. این مقایسات با استفاده از مقیاس ۹ درجه‌ای مقیاس مقایسه زوجی ساعتی انجام شد که در آن عدد ۱ به معنای اهمیت برابر دو معیار و عدد ۹ به معنای اهمیت بسیار بالاتر یک معیار نسبت به دیگری است.

آرایه مقایسه زوجی معیارهای مختلف باتوجه‌به اهمیت آن‌ها نسبت به یکدیگر بر اساس نظر کارشناسان ارائه شده است. پس از تکمیل این ماتریس، فرایند نرمال‌سازی و محاسبه وزن‌ها بر اساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد. در نهایت، وزن نهایی هر معیار در جدول ۲ ارائه شده است. با انجام مراحل روش تحلیل سلسله‌مراتبی وزن نهایی معیارها تعیین شد که در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. وزن نهایی معیارهای سنجه سیمای سرزمین

معیارها	میانگین مساحت هسته	شاخص بزرگ‌ترین لکه سبز	شاخص شکل	شاخص پیوستگی	فاصله از مناطق صنعتی	تراکم جمعیت	قیمت زمین	فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی	فاصله از گل	نرخ بی‌سوادی	نرخ بیکاری
وزن معیارها	۰/۱۴۲۳	۰/۱۲۵۴	۰/۱۱۲۸	۰/۱۰۱۴	۰/۰۹۰۷	۰/۰۸۰۹	۰/۰۷۲۲	۰/۰۶۴۴	۰/۰۵۷۴	۰/۰۵۱۲	۰/۰۴۵۸

تحلیل بر اساس اهمیت وزن معیارها

در تحلیل معیارهای مؤثر بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری، وزن هر معیار نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری آن در پایداری و عملکرد اکولوژیکی است. براین اساس، معیارهایی که وزن بالاتری دارند، نقش اساسی‌تری در تاب‌آوری ایفا کرده و باید در اولویت برنامه‌ریزی قرار گیرند.

میانگین مساحت هسته با وزن $0/1423$ بیشترین تأثیر را در بین معیارها دارد. کاهش مساحت هسته می‌تواند منجر به کاهش انسجام اکولوژیکی و در نتیجه کاهش تاب‌آوری شود. بنابراین، برنامه‌ریزی برای افزایش مساحت لکه‌های سبز یا اتصال لکه‌های کوچک ضروری است.

شاخص بزرگ‌ترین لکه با وزن $0/1254$ نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. این معیار به نقش لکه‌های سبز بزرگ در کاهش اثرات جزیره گرمایی، تقویت زیستگاه‌ها و بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری اشاره دارد. کاهش اندازه لکه‌های بزرگ می‌تواند پایداری اکولوژیکی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. حفظ لکه‌های بزرگ و جلوگیری از تغییر کاربری آن‌ها یک ضرورت است.

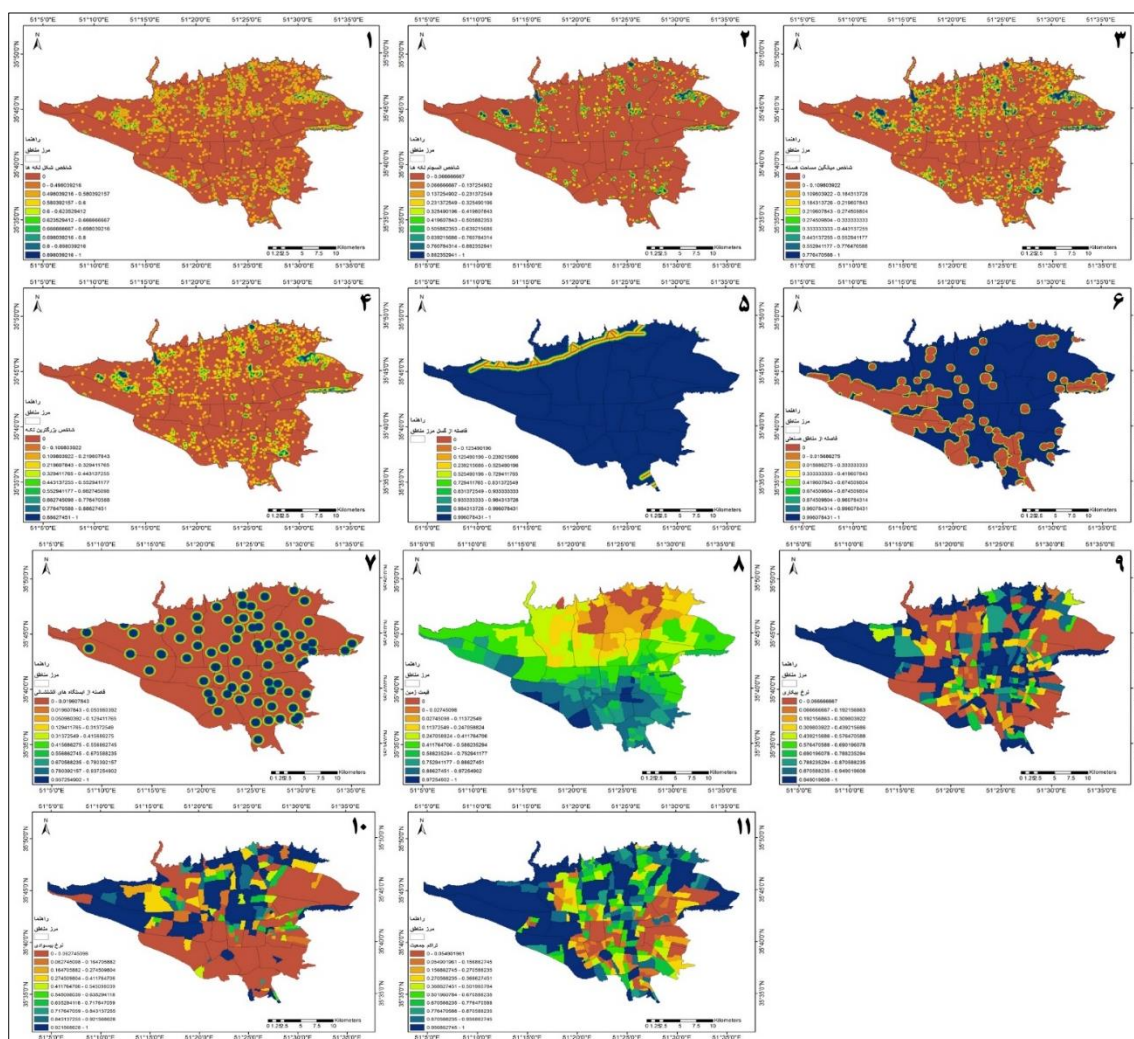
شاخص شکل لکه با وزن $0/1128$ نشان‌دهنده تأثیر هندسه لکه‌های سبز بر تاب‌آوری است. لکه‌های با اشکال پیچیده‌تر معمولاً در معرض فشارهای محیطی بیشتری قرار می‌گیرند و کارایی زیست‌محیطی کمتری دارند. در مقابل، لکه‌های با اشکال منظم‌تر عملکرد اکولوژیکی بهتری ارائه می‌دهند.

شاخص پیوستگی با وزن $0/1014$ نیز نقش مهمی در تاب‌آوری ایفا می‌کند. پیوستگی بالای لکه‌های سبز امکان تبادل مواد مغذی، حرکت گونه‌های زیستی و مقاومت در برابر تغییرات محیطی را افزایش می‌دهد. کاهش پیوستگی باعث جدایی لکه‌ها و ضعف عملکرد اکولوژیکی می‌شود. ایجاد کریدورهای سبز و تقویت پیوستگی بین لکه‌های سبز در این راستای افزایش پیوستگی لکه‌های سبز ضروری است.

معیارهای فاصله از مناطق صنعتی و تراکم جمعیت، به ترتیب با وزن‌های $0/0907$ و $0/0809$ ، تأثیر قابل توجهی بر کیفیت و تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز دارند. نزدیکی به صنایع پرخطر می‌تواند به دلیل آلودگی‌های ناشی از آن‌ها، کیفیت اکولوژیکی را کاهش دهد. تراکم بالای جمعیت نیز با افزایش فشار بر فضاهای سبز و کاهش پایداری این زیرساخت‌ها همراه است. قیمت زمین با وزن $0/0722$ و فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی با وزن $0/0644$ نیز معیارهای مهمی هستند که بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز تأثیر می‌گذارند. قیمت بالای زمین در مناطق شهری می‌تواند منجر به تغییر کاربری فضاهای سبز شود، فاصله زیاد زیرساخت‌های از ایستگاه‌های آتش‌نشانی نیز میزان آسیب‌پذیری در برابر حوادثی همچون آتش‌سوزی را افزایش می‌دهد.

معیارهای فاصله از گسل، نرخ بی‌سودای و نرخ بیکاری، به ترتیب با وزن‌های $0/0574$ ، $0/0512$ و $0/0458$ ، تأثیرات غیرمستقیم بر تاب‌آوری دارند. نزدیکی به گسل‌ها خطر آسیب ناشی از زلزله را افزایش می‌دهد و نیازمند مقاوم‌سازی زیرساخت‌های سبز است. از سوی دیگر، بی‌سودای و بیکاری با کاهش مشارکت اجتماعی و آگاهی عمومی، تأثیر منفی بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز دارند.

به‌طور کلی، معیارهایی مانند میانگین مساحت هسته، شاخص بزرگ‌ترین لکه، شاخص شکل و پیوستگی از بالاترین اولویت برخوردارند و باید در رأس برنامه‌ریزی‌های مرتبط با زیرساخت‌های سبز قرار گیرند. باین حال، توجه به معیارهای با وزن کمتر نیز برای تقویت تاب‌آوری در سطح کلان ضروری است. در شکل ۷ نقشه فازی معیارهای تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری، شهر تهران نشان داده شده است.



شکل ۷. ۱) شاخص شکل لکه‌ها؛ ۲) شاخص پیوستگی لکه‌ها؛ ۳) شاخص میانگین مساحت هسته؛ ۴) شاخص بزرگترین لکه؛ ۵) فاصله از گسل؛ ۶) فاصله از صنایع؛ ۷) فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی؛ ۸) قیمت زمین؛ ۹) نرخ بیکاری؛ ۱۰) نرخ بی‌سوادی و ۱۱) تراکم جمعیت

نتایج تحلیل شاخص‌های مختلف در مناطق ۲۲ گانه تهران نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در وضعیت زیرساخت‌های سبز و شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی در این مناطق است. تمامی مقادیر فازی که در این تحلیل‌ها ذکر شده، در بازه صفر تا یک قرار دارند، به این صورت که عدد یک نشان‌دهنده بالاترین مطلوبیت و عدد صفر نشان‌دهنده پایین‌ترین مطلوبیت است.

بر اساس تحلیل میانگین مساحت بزرگ‌ترین لکه سبز در مناطق ۲۲ گانه تهران، شامل منطقه ۱۳ (۰/۰۹۸)، منطقه ۱ (۰/۰۹۶)، منطقه ۲۲ (۰/۰۹۲) و منطقه ۳ (۰/۰۹۲) دارای بزرگ‌ترین و یکپارچه‌ترین لکه‌های سبز هستند، در حالی که مناطق مرکزی و جنوبی مانند منطقه ۱۰ (۰/۰۰۴)، منطقه ۸ (۰/۰۰۶)، منطقه ۱۷ (۰/۰۰۷) و منطقه ۷ (۰/۰۲۲) با کوچک‌ترین و پراکنده‌ترین لکه‌های سبز مواجه هستند. مناطقی نظیر منطقه ۴ (۰/۰۸۳)، منطقه ۵ (۰/۰۷۵) و منطقه ۱۶ (۰/۰۷۲) وضعیت متوسطی دارند.

تحلیل پیوستگی لکه‌های سبز نشان داد که مناطقی مانند منطقه ۱ (۰/۰۷۴)، منطقه ۳ (۰/۰۸۰)، منطقه ۱۳ (۰/۰۸۸) و منطقه ۲۲ (۰/۰۸۲) بالاترین مقادیر پیوستگی فضای سبز را دارا هستند. در مقابل، مناطق مرکزی و جنوبی شامل منطقه ۱۰ (۰)، منطقه ۱۷ (۰)، منطقه ۸ (۰/۰۰۲)، منطقه ۲۱ (۰/۰۰۸) و منطقه ۷ (۰/۰۰۹)، پایین‌ترین مقادیر پیوستگی لکه‌های سبز را نشان دادند. سایر مناطق از جمله منطقه ۴ (۰/۰۶۵)، منطقه ۱۵ (۰/۰۵۹)، منطقه ۱۶ (۰/۰۵۷) و منطقه ۱۸ (۰/۰۳۵) مقادیر متوسطی از پیوستگی فضای سبز را ثبت کردند.

شاخص میانگین مساحت هسته لکه‌های سبز نشان داد که مناطقی مانند مناطق ۲۲ گانه تهران نشان می‌دهد که مناطق شامل منطقه ۱۳ (۰/۰۹۵)، منطقه ۱ (۰/۰۹۴)، منطقه ۲۲ (۰/۰۹۱) و منطقه ۳ (۰/۰۹۰) دارای بالاترین میانگین مساحت هسته‌های سبز هستند که نشان‌دهنده وجود لکه‌های بزرگ و پیوسته‌تر فضای سبز در این مناطق می‌باشد. در مقابل، مناطق مرکزی و جنوبی شامل منطقه ۱۰ (۰/۰۰۴)، منطقه ۱۷ (۰/۰۰۷)، منطقه ۸ (۰/۰۰۶)، منطقه ۲۱ (۰/۰۱۵) و منطقه ۷ (۰/۰۲۱) کمترین میانگین مساحت هسته‌های سبز را دارا هستند که حاکی از پراکندگی و کوچک بودن لکه‌های سبز در این نواحی است. مناطق دیگر مانند منطقه ۴ (۰/۰۸۲)، منطقه ۵ (۰/۰۷۴)، منطقه ۱۶ (۰/۰۷۲) و منطقه ۱۹ (۰/۰۳۲) مقادیر متوسطی را نشان می‌دهند.

بر اساس شاخص شکل لکه‌های سبز، مناطق مرکزی و جنوبی تهران شامل منطقه ۱۰ (۰/۰۱۹)، منطقه ۸ (۰/۰۲۳)، منطقه ۱۷ (۰/۰۳۰) و منطقه ۷ (۰/۰۷۳) با مقادیر فازی پایین‌تر، پایین‌ترین سطح مطلوبیت اکولوژیکی را دارند. این مقادیر نشان‌دهنده اشکال نامنظم‌تر که به دلیل افزایش نسبت محیط به مساحت، تبدلات اکولوژیکی در این مناطق کم‌تر بهینه است. در مقابل، مناطق شمالی تهران مانند منطقه ۱ (۰/۲۲۰)، منطقه ۳ (۰/۱۸۳)، منطقه ۴ (۰/۱۹۱)، منطقه ۵ (۰/۱۹۲) و منطقه ۲۲ (۰/۱۶۵) با مقادیر فازی بالاتر، از مطلوبیت اکولوژیکی بیشتری برخوردارند. این مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده اشکال منظم‌تر و طبیعی‌تر لکه‌ها است که به واسطه نسبت بهینه محیط به مساحت، تبدلات اکولوژیکی مؤثرتری در این مناطق صورت می‌گیرد. مناطق میانی تهران مانند منطقه ۱۶ (۰/۱۷۵)، منطقه ۱۵ (۰/۱۵۸) و منطقه ۱۸ (۰/۱۱۹) وضعیت متوسطی دارند. این نواحی به‌طور نسبی دارای مقادیر فازی متوسط هستند که نشان‌دهنده ترکیبی از لکه‌های سبز با اشکال منظم و نامنظم است.

در تحلیل نرخ بیکاری در مناطق ۲۲ گانه تهران بر اساس شاخص فازی (۰ تا ۱) نشان‌دهنده اختلافات چشمگیر بین مناطق است، به‌طوری‌که مناطق ۶ (۰/۹۰۳)، ۲۲ (۰/۹۰۱) و ۲۱ (۰/۸۴۴) با مطلوبیت بالا و نرخ بیکاری پایین در بهترین وضعیت قرار دارند، درحالی‌که مناطق جنوبی و حاشیه‌ای مانند مناطق ۱۵ (۰/۱۳۳۵۷۴)، ۱۸ (۰/۲۱۲۱۶۲) و به‌ویژه منطقه ۱۰ (۰/۰۹۰۸۲۸) با مطلوبیت بسیار پایین و نرخ بیکاری بالا مواجه هستند.

تحلیل نرخ بی‌سودای نیز شکاف عمیق آموزشی بین شمال و جنوب تهران را نمایان کرد. مناطق شمالی مانند منطقه ۶ (۰/۹۶۳)، ۲۲ (۰/۷۶۶) و ۱ (۰/۷۶۵) با نرخ بی‌سودای پایین و مطلوبیت بالا در وضعیت مطلوبی قرار دارند. در مقابل، مناطق جنوبی و شرقی مانند منطقه ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ با میانگین‌های نزدیک به صفر (۰ تا ۰/۰۲۷) با معضل بی‌سودای شدید مواجه هستند.

مناطق ۱ (۰/۹۸۱)، ۳ (۰/۹۶۱) و ۲ (۰/۸۸۷) با مطلوبیت نزدیک به ۱ دارای بالاترین ارزش زمین هستند، درحالی‌که مناطق جنوبی مانند مناطق ۱۲ (۰/۰۸۸)، ۱۵ (۰/۱۰۴)، ۱۶ (۰/۰۸۰) و ۱۷ (۰/۰۶۳) با مطلوبیت نزدیک به صفر، پایین‌ترین ارزش‌های زمین را دارا می‌باشند. مناطق مرکزی و غربی شامل مناطق ۶ (۰/۸۲۷)، ۵ (۰/۷۹۸) و ۲۲ (۰/۵۶۸) وضعیت متوسطی را نشان می‌دهند.

در تحلیل تراکم جمعیت تهران، مناطق شمالی و غربی مانند منطقه ۲۲ (۰/۹۹۲)، ۲۱ (۰/۹۵۴) و ۱ (۰/۸۶۷) با وجود برخورداری از امکانات و زیرساخت‌های مطلوب، کمترین تراکم جمعیتی را تجربه می‌کنند، درحالی‌که مناطق مرکزی و جنوبی همچون منطقه ۱۰ (۰/۰۰۱)، ۱۷ (۰/۰۷۹) و ۱۴ (۰/۱۱۵) با وجود محدودیت‌های محیطی، بالاترین تراکم را دارند. مناطق تهران از نظر فاصله زیرساخت‌های سبز از صنایع تفاوت‌های چشمگیری دارند. مناطق شمالی و مرکزی مانند منطقه ۷ (۱)، ۳ (۰/۹۶۶) و ۱۲ (۰/۹۶۴) بهترین وضعیت را دارند که نشان‌دهنده فاصله مناسب فضای سبز از مناطق صنعتی است. در مقابل، مناطق جنوبی و غربی مانند منطقه ۲۱ (۰/۱۵۰)، ۱۸ (۰/۳۷۸) و ۱۶ (۰/۴۰۹) با تداخل بیشتر فضای سبز و صنعت مواجه هستند.

نتایج تحلیل دسترسی ایستگاه‌های آتش‌نشانی به زیرساخت‌های سبز به نشان می‌دهد که مناطق ۸ (۰/۴۹)، ۱۷ (۰/۴۲) و ۷ (۰/۳۶) بهترین دسترسی را به زیرساخت‌های سبز دارند، در حالی که مناطق ۱۸ (۰/۰۴)، ۱۹ (۰/۰۹) و ۲۱ (۰/۰۹) در

پایین‌ترین سطح این شاخص قرار می‌گیرند.

در نهایت، تحلیل فاصله زیرساخت‌های سبز از گسل‌های تهران نشان داد که بیشتر مناطق تهران (۱۷ از ۲۲ منطقه) با میانگین فازی ۱ از حداکثر مطلوبیت برخوردارند، به این معنی که زیرساخت‌های سبز آن‌ها فاصله ایمنی کاملی از گسل‌ها دارند. تنها پنج منطقه شامل مناطق ۱ (۰/۸۵۶)، ۲۲ (۰/۸۸۰)، ۵ (۰/۹۰۷)، ۲۰ (۰/۹۳۹) و ۲ (۰/۹۴۵) که همچنان در محدوده مطلوب قرار دارند، از میانگین کمی پایین‌تر برخوردارند. این تحلیل‌ها نشان‌دهنده وضعیت نامتوازن و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق برای بهبود تاب‌آوری و پایداری زیرساخت‌های سبز شهری است.

بحث

نتایج تحلیل تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری بر اساس معیارهای مختلف در این پژوهش نشان‌دهنده تأثیرات متنوع و قابل توجهی است که هر یک از این عوامل بر عملکرد و پایداری زیرساخت‌های سبز دارند. باتوجه به تحلیل‌های صورت گرفته، می‌توان گفت که زیرساخت‌های سبز شهری نه تنها تحت تأثیر ویژگی‌های طبیعی و اکولوژیکی بلکه به شدت وابسته به ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی و کالبدی نیز هستند. در این بخش، به تفصیل به تأثیرات مختلف این معیارها پرداخته می‌شود.

۱. تأثیر تراکم جمعیت

تراکم جمعیت یکی از مهم‌ترین عواملی است که تأثیر مستقیمی بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز دارد. طبق نتایج تحلیل‌ها، مناطقی که تراکم جمعیت در آن‌ها بالا است، مانند مناطق ۱۰، ۱۷ و ۱۴، فشار زیادی را بر زیرساخت‌های سبز وارد می‌کنند. این فشار منجر به افزایش مصرف منابع طبیعی، کاهش کیفیت فضاهای سبز و همچنین کاهش تاب‌آوری آن‌ها در برابر تهدیدات مختلف مانند تغییرات اقلیمی و آلودگی‌ها می‌شود.

۲. قیمت زمین و مسکن

مناطقی که دارای قیمت‌های بالای زمین و مسکن هستند، مانند مناطق ۱، ۲ و ۳، همواره با تهدیدات جدی برای زیرساخت‌های سبز مواجه‌اند. این مناطق به دلیل شرایط اقتصادی مناسب، شاهد افزایش تقاضا برای تغییر کاربری اراضی سبز به کاربری‌های مسکونی یا تجاری هستند. این تغییرات کاربری نه تنها به طور مستقیم باعث از دست رفتن فضاهای سبز می‌شود، بلکه با ایجاد سازه‌های بتنی و جاده‌ها، موجب افزایش آلودگی هوا، ترافیک و کاهش کیفیت زیست‌محیطی می‌گردد؛ بنابراین، لازم است که در این مناطق سیاست‌های حفاظتی و برنامه‌های مدیریتی برای جلوگیری از تغییر کاربری فضاهای سبز تدوین شود تا از تخریب این زیرساخت‌ها جلوگیری به عمل آید.

۳. نرخ بیکاری و بی‌سوادی

نرخ بیکاری و بی‌سوادی به طور غیرمستقیم بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری تأثیر می‌گذارد. مناطق با نرخ بالای بیکاری و بی‌سواد، مانند مناطق جنوبی و مرکزی (مناطق ۱۰، ۱۵ و ۱۸)، معمولاً با کمبود مشارکت اجتماعی در حفاظت از زیرساخت‌های سبز مواجه هستند. این کمبود مشارکت اجتماعی باعث می‌شود که نگهداری و تقویت زیرساخت‌های سبز به درستی انجام نشود و کاهش انسجام و پایداری آن‌ها را در پی دارد. علاوه بر این، در این مناطق، توجه کمتری به اهمیت اکوسیستم‌های شهری و خدمات محیطی که توسط زیرساخت‌های سبز ارائه می‌شود، می‌شود. بنابراین، برای افزایش تاب‌آوری این زیرساخت‌ها، لازم است که فرصت‌های شغلی بیشتری ایجاد و سطح آگاهی عمومی در مورد اهمیت زیرساخت‌های سبز ارتقا یابد. در این زمینه، و نیز به اهمیت مشارکت اجتماعی در تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز اشاره کرده‌اند.

۴. معیارهای اکولوژیکی

در بعد اکولوژیکی، شاخص‌های مختلفی بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز تأثیر دارند. یکی از مهم‌ترین این شاخص‌ها، میانگین

مساحت هسته لکه‌های سبز است. این معیار نشان‌دهنده وسعت لکه‌های سبز در سطح شهر است. تحلیل‌ها نشان داد که مناطقی که دارای مساحت هسته کوچک‌تری هستند، مانند مناطق مرکزی تهران، با مشکلاتی نظیر تکه‌تکه‌شدن لکه‌های سبز و کاهش انسجام اکولوژیکی مواجه‌اند. به‌طور کلی، افزایش مساحت هسته و انسجام شبکه‌های سبز در این مناطق می‌تواند تاب‌آوری اکولوژیکی آن‌ها را به‌شدت افزایش دهد.

شاخص پیوستگی لکه‌ها نیز در تحلیل تاب‌آوری اهمیت بالایی دارد. مناطقی که لکه‌های سبز منسجم‌تری دارند، عملکرد بهتری در جذب کربن، کاهش آلودگی هوا و فراهم‌آوردن فضاهای تفریحی و طبیعی برای ساکنین دارند. مناطق ۱ و ۳ و ۱۳ و ۲۲ به‌عنوان مناطقی با لکه‌های سبز منسجم‌تر و بزرگ‌تر، تاب‌آوری بیشتری را نشان می‌دهند و قابلیت بهتری برای ارائه خدمات اکوسیستمی دارند. تقویت شبکه‌های سبز در مناطق کم‌انسجام مانند مناطق ۱۰ و ۱۷ و ۷ و ۸ و ۲۱ می‌تواند کمک زیادی به بهبود تاب‌آوری اکولوژیکی کند.

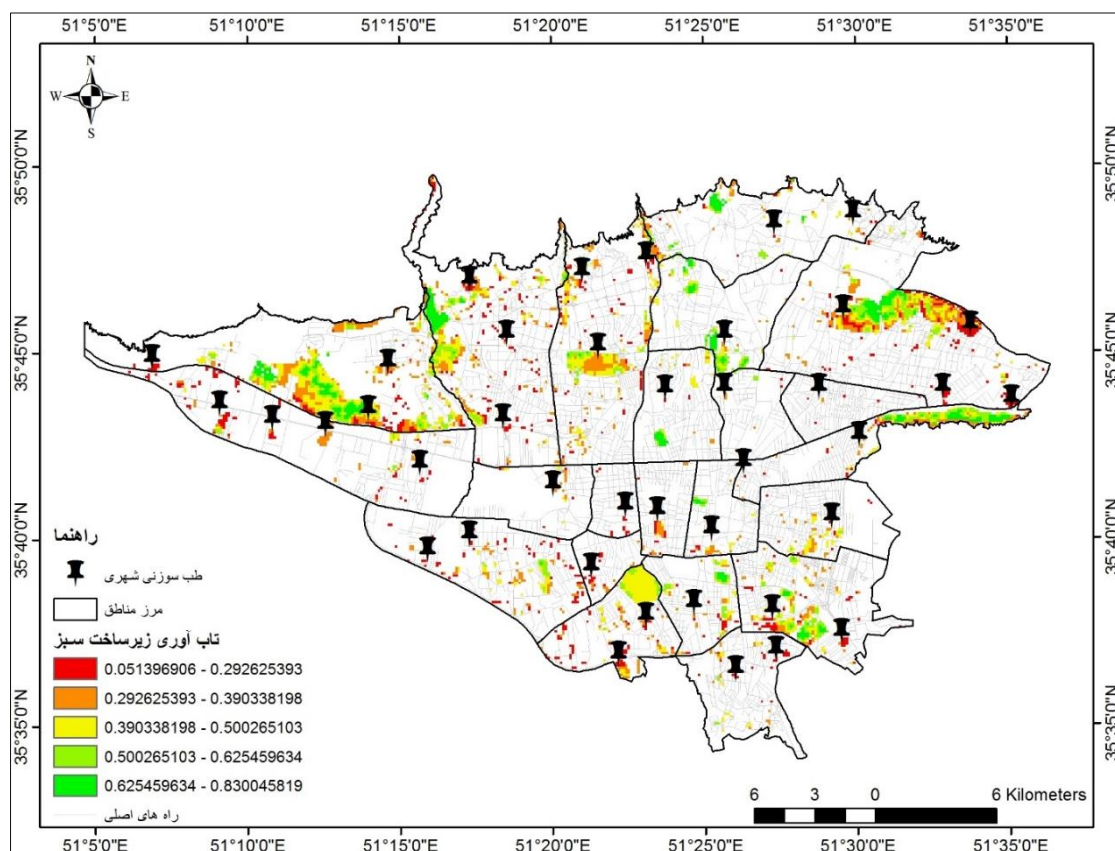
۵. فاصله از گسل‌ها و ایستگاه‌های آتش‌نشانی

فاصله از گسل‌ها و فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی دو معیار مهم دیگر در تحلیل تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز هستند. مناطقی که به گسل‌ها نزدیک‌تر هستند، مانند مناطق ۱ و ۲ و ۵ و ۲۰ و ۲۲ در برابر بلایای طبیعی مانند زلزله آسیب‌پذیرترند و این امر نیازمند برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای حفاظت از زیرساخت‌های سبز در این مناطق است. از سوی دیگر، مناطق با فاصله زیاد از ایستگاه‌های آتش‌نشانی، مانند برخی از مناطق جنوبی و حاشیه‌ای، در برابر آتش‌سوزی و حوادث غیرمترقبه آسیب‌پذیرتر هستند. برای این مناطق باید تدابیر ویژه‌ای برای استقرار ایستگاه‌های آتش‌نشانی و بهبود دسترسی به خدمات آتش‌نشانی اتخاذ شود تا تاب‌آوری در برابر حوادث افزایش یابد.

۶. نزدیکی به صنایع پرخطر

نزدیکی به صنایع پرخطر در مناطقی مانند ۱۶ و ۱۸ و ۲۱ به دلیل آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی و خطرات احتمالی ناشی از حوادث ناگهانی تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های سبز محسوب می‌شود. این مناطق به‌دلیل آلودگی هوا و آب ناشی از فعالیت‌های صنعتی، کاهش کیفیت زیست‌محیطی و افزایش فشار بر زیرساخت‌های سبز مواجه‌اند. برنامه‌ریزی برای کاهش آلودگی‌های صنعتی و مکان‌یابی مجدد صنایع در مناطق مناسب می‌تواند به کاهش این تهدیدات و بهبود تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز کمک کند.

در این مطالعه، با بهره‌گیری از دیدگاه لرزه، نقاط بحرانی و آسیب‌پذیر در زیرساخت‌های سبز شهری به‌عنوان نقاط بیمارگونه شهری شناسایی شدند. این نقاط، نواحی هستند که به دلیل چالش‌های اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و کالبدی نیازمند مداخلات فوری هستند تا از تشدید آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات جلوگیری شود. در مقابل دیدگاه کاسانگراد و مورالس که بر شناسایی نقاط با پتانسیل‌های بالقوه تاب‌آوری تأکید دارد، این پژوهش با تمرکز بر نقاط بحرانی، راهکارهای هدفمندی را برای تقویت زیرساخت‌های سبز ارائه کرده است. نقشه نهایی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری و نقاط طب سوزنی شهری در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. نقشه نهایی تاب آوری زیرساخت های سبز شهری تهران

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های اکولوژیکی، کالبدی، اقتصادی و اجتماعی، می‌توان دریافت که کاربست رویکرد طب سوزنی شهری برای طراحی مداخلات خردمقیاس، به‌عنوان ابزاری مؤثر در ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهر تهران قابل‌توجه است. این مداخلات، در چهار دسته راهبردی اصلی قابل دسته‌بندی‌اند: حفاظتی، تدافعی، فرصت‌طلبانه و تهاجمی.

در مناطق دارای لکه‌های سبز وسیع و منسجم مانند مناطق ۱، ۲، ۳، ۴ و ۲۲، افزایش میانگین مساحت هسته مرکزی و شاخص بزرگ‌ترین لکه، تأثیر بسزایی در ارتقای عملکرد اکولوژیکی و بهبود تاب‌آوری زیرساخت سبز دارد؛ همچنین، بهبود شاخص شکل لکه‌ها که بیانگر انسجام شکلی و نزدیک‌تر شدن فرم لکه‌ها به هندسه‌های منظم است، موجب افزایش پایداری و کاهش گسست عملکردی شبکه سبز می‌شود. در همین راستا، افزایش شاخص اتصال لکه‌ها نیز به‌عنوان عاملی مؤثر در تقویت پیوستگی عملکردی شبکه سبز و ارتقای ظرفیت تطبیق آن با فشارهای محیطی مطرح شده است که این یافته با نتایج پژوهش رضانی مهران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. افزون بر این، در مناطق متراکم و محدود از نظر فضایی مانند مناطق ۱۰، ۱۴ و ۱۷، توسعه پارک‌های جیبی و کمربندهای سبز پیرامونی به‌عنوان راهکاری مؤثر در تثبیت و بازایی خدمات اکوسیستمی پیشنهاد می‌شود. (Nasehi & Imanpour Namin, 2020; Golchubi Diva et al., 2018; Ramezani Mehrian, 2022).

راهبردهای حفاظتی^۱

یافته‌ها نشان داد که راهبردهای مؤثر در تاب‌آورسازی شهری عمدتاً بر صیانت و ارتقای عملکرد زیرساخت‌های سبز موجود تمرکز دارند. در مناطق دارای لکه‌های سبز وسیع و منسجم همچون مناطق ۱، ۲، ۳، ۴ و ۲۲، افزایش میانگین مساحت هسته مرکزی و شاخص بزرگ‌ترین لکه، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد اکولوژیکی ایفا می‌کند، حفظ لکه‌های سبز

بزرگ به‌مثابه سپرهای زیست‌محیطی نیز یکی از ارکان کلیدی ارتقای تاب‌آوری اکولوژیکی معرفی شده است. موضوعی که به نتایج مطالعات فورمن (۱۹۹۵) و ناصحی و ایمان‌پور نمین (۲۰۲۰) هم‌راستاست (Forman, 1995; Nasehi & Imanpour, 2020). افزایش نسبت مساحت به محیط لکه‌ها و بهبود شاخص شکل آن‌ها که نشان‌دهنده انسجام فضایی و نزدیکی به هندسه‌های منظم است، از دیگر عواملی است که در افزایش پایداری و کاهش گسست عملکردی شبکه سبز تأثیرگذار بوده و با مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد. همچنین، افزایش شاخص اتصال لکه‌ها که بیانگر تقویت پیوستگی عملکردی شبکه سبز و ظرفیت تطبیق‌پذیری آن با فشارهای محیطی است، با یافته‌های رضانی مهران (۲۰۲۲) مطابقت دارد (Ramezani, 2022). در مقابل، مناطق پرتراکم و محدود از نظر فضایی مانند مناطق ۱۰، ۱۴ و ۱۷، با کمبود فضای سبز مواجه‌اند. در این مناطق، ایجاد کمربندهای سبز پیرامونی و محدودسازی تغییر کاربری، همسو با مطالعات فورمن (۱۹۹۵) و فابوس (۲۰۰۴) درخصوص اهمیت پیوستگی اکولوژیکی، راهکاری اثربخش در کاهش گسست عملکردی و ارتقای تاب‌آوری زیرساخت سبز محسوب می‌شود (Forman, 1995; Fabos, 2004). افزون بر این، توسعه پارک‌های جیبی در زمین‌های رهشده شهری، به‌ویژه در نواحی با ارزش بالای زمین نظیر مناطق ۱، ۲ و ۳، مطابق با پیشنهادهای روسو و همکاران (۲۰۲۲)، و با بهره‌گیری از ابزارهای سیاست‌گذاری مالی، می‌تواند نقش مهمی در تثبیت خدمات اکوسیستمی ایفا کند (Rosso et al., 2022).

۱. راهبردهای تدافعی^۱

راهبردهای تدافعی عمدتاً بر مهار مخاطرات محیطی و حفظ عملکرد موجود زیرساخت‌ها تمرکز دارند. در مناطقی نظیر ۱، ۲، ۵، ۲۰ و ۲۲ که در مجاورت گسل‌های فعال قرار دارند، مطالعات بوربی و همکاران (۲۰۰۰) بر نقش بحرانی فاصله از گسل در برنامه‌ریزی تاب‌آور تأکید دارند. در این مناطق، پیشنهاد محدودسازی توسعه شهری و حفاظت از پوشش سبز به‌عنوان سپر طبیعی در برابر مخاطرات لرزه‌ای مطرح است. اتخاذ این رویکرد می‌تواند با کاهش ریسک زلزله، به ارتقای تاب‌آوری عملکردی زیرساخت‌های سبز کمک کند (Burby et al., 2000). از سوی دیگر، در مناطق صنعتی مانند ۱۶، ۱۸ و ۲۱، پژوهش‌های آلبرتی و مارزلاف نشان داده‌اند که مجاورت با منابع آلاینده، فشار مضاعفی بر کیفیت محیط‌زیست وارد کرده و احداث فیلترهای طبیعی از پوشش‌های گیاهی مقاوم می‌تواند عملکرد حفاظتی مؤثری در برابر آلودگی‌ها ایفا کند (Alberti & Marzluff, 2004). همچنین در مناطق با دسترسی پایین به خدمات اضطراری، مانند مناطق ۱۸، ۱۹ و ۲۱ افزایش فاصله از ایستگاه آتش‌نشانی به کاهش سرعت واکنش در بحران‌ها منجر می‌شود که زیرساخت سبز را آسیب‌پذیرتر می‌سازد. در کنار این ملاحظات، توسعه خدمات اضطراری در نیز ضروری است. مطالعات کاتر و همکاران (۲۰۱۰) تأکید دارند که کاهش فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی و ارتقای آموزش‌های مدیریت بحران می‌تواند سرعت واکنش در مواقع بحرانی را افزایش داده و به تاب‌آوری زیرساخت سبز در برابر مخاطرات طبیعی و انسان‌ساخت کمک شایانی نماید (Cutter et al., 2008).

۲. راهبردهای فرصت‌طلبانه^۲

این راهبردها عمدتاً بر بهره‌برداری از ظرفیت‌های موجود و استفاده مجدد از فضاهای بلااستفاده شهری تمرکز دارند. در این راستا، تبدیل زمین‌های بایر به باغ‌های اجتماعی، به‌ویژه در منطقه ۲۲، با مطالعات هئو (۲۰۱۰) و گیتارت و همکاران (۲۰۱۲) همسو است. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارتقای تاب‌آوری اجتماعی و بهبود کیفیت زندگی شهری موردتوجه قرار گیرد (Hou, 2010; Guitart et al., 2012). ایجاد بازارچه‌های سبز در مناطق با نرخ بالای بیکاری مانند مناطق ۱۰، ۱۵ و ۱۸، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مهم برای ترکیب عملکرد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، به‌ویژه در تقویت تاب‌آوری اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی مطرح شود. مطالعات مختلف بر اهمیت این نوع فضاهای چندمنظوره تأکید دارند. توسعه بام‌های سبز در مناطق پرتراکم مانند ۱۰، ۱۴ و ۱۷ نیز به‌عنوان راهکاری برای جبران کمبود فضای افقی و افزایش

تاب‌آوری اکولوژیکی پیشنهاد می‌شود. در این راستا، مطالعه الکساندری و جونز (۲۰۰۸) بر نقش دیوارهای سبز و بام‌های سبز در بهبود کیفیت هوای شهری و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها تأکید دارد (Alexandri & Jones, 2008). همچنین، توسعه جنگل‌های شهری در حاشیه پایتخت و بازپس‌گیری اراضی سبز تغییر کاربری‌یافته در مناطق مرکزی با استفاده از ابزارهای حقوقی یا اقتصادی، به‌عنوان مکملی برای بازتوزیع عادلانه فضای سبز و ارتقای تاب‌آوری اقلیمی شناخته می‌شود. در این زمینه، استفاده از اراضی کم‌تراکم در مناطق ۲۱ و ۲۲ برای احداث پارک‌های جدید و رفع عدم توازن توزیع فضای سبز، می‌تواند به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در توزیع عادلانه فضاهای سبز در سطح شهر تلقی شود.

۳. راهبردهای تهاجمی^{۱۰}

در نهایت، راهبردهای تهاجمی شامل مداخلات فعال و احیای نواحی بحرانی هستند. ایجاد فیلترهای طبیعی از پوشش گیاهی در مجاورت صنایع آلاینده (نظیر مناطق ۱۶، ۱۸ و ۲۱)، به‌عنوان یک راهکار اثربخش برای کاهش آلودگی‌های محیطی و ارتقای عملکرد اکولوژیکی و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز مطرح می‌شود. این رویکرد مطابق با یافته‌های تزولاس و همکاران (۲۰۰۷) در خصوص اهمیت پوشش گیاهی در کاهش اثرات زیست‌محیطی است (Tzoulas et al., 2007). همچنین، احیای زمین‌های صنعتی آلوده با استفاده از گونه‌های مقاوم، به‌عنوان مصداق بارز مدیریت زمین‌های قهوه‌ای در مطالعات آلکر و همکاران (۲۰۰۰) مورد تأکید قرار گرفته است. این اقدامات می‌تواند به بازسازی محیط‌زیست شهری و افزایش تاب‌آوری آن در برابر تهدیدات مختلف کمک کند (Alker et al., 2000).

نتیجه‌گیری

این تحقیق با ارائه مدلی جامع برای ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز شهری تهران، به بررسی ابعاد مختلف اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و کالبدی این زیرساخت‌ها پرداخته است. استفاده از رویکرد چندمعیاره فازی، تحلیل مکانی و روش طب سوزنی شهری، امکان شناسایی نقاط بحرانی و ارائه راهبردهای هدفمند برای تقویت تاب‌آوری را فراهم کرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که زیرساخت‌های سبز شهر تهران طی سال‌های اخیر دچار کاهش قابل توجهی در مساحت و یکپارچگی خود شده‌اند. این کاهش به‌ویژه در شاخص‌های بزرگ‌ترین لکه، پیوستگی و مساحت هسته‌ای مشهود است که نشان‌دهنده پراکندگی و ضعف در تاب‌آوری این زیرساخت‌هاست. به‌طور مشخص، سهم بزرگ‌ترین لکه سبز از ۰/۹۹ به ۰/۴۳ کاهش یافته (کاهش ۵۶/۵ درصد)، شاخص پیوستگی لکه‌ها از ۰/۱۱۷ به ۰/۰۹۳ تنزل یافته (کاهش حدود ۲۰/۵ درصد)، و میانگین مساحت هسته نیز از ۶/۷۹ به ۴/۷۳ هکتار رسیده است (کاهش تقریبی ۳۰ درصد). از میان ۱۱ شاخص مورد بررسی، شاخص‌های اکولوژیکی دارای بیشترین تأثیر در مدل نهایی بوده‌اند؛ به‌گونه‌ای که وزن معیار میانگین مساحت هسته معادل ۰/۱۴۲۳ و شاخص بزرگ‌ترین لکه برابر با ۰/۱۲۵۴ برآورد شد که در مقایسه با سایر شاخص‌ها، بیشترین نقش را در تعیین سطح تاب‌آوری داشته‌اند.

یافته‌های این پژوهش هم‌راستا با نتایج پژوهش‌های پیشین است که بر اهمیت پیوستگی فضایی، انسجام شبکه سبز و نقش آن‌ها در پایداری محیط زیستی شهرها تأکید داشته‌اند (Bernat, 2014; Nasehi et al., 2023; Ramezani Mehrian, 2022). کاهش شدید انسجام و سطح هسته‌ای زیرساخت‌های سبز در مناطق مرکزی و جنوبی تهران نه تنها نشان‌دهنده افت شدید کیفیت اکولوژیکی است، بلکه لزوم مداخلات مدیریتی مبتنی بر راهبردهای طب سوزنی شهری را بیش‌ازپیش برجسته می‌سازد.

علاوه‌برآن، تحلیل معیارهای اجتماعی و اقتصادی از جمله تراکم جمعیت، قیمت زمین، نرخ بیکاری و بی‌سوادی، نشان‌دهنده تأثیرات غیرمستقیم این عوامل بر تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز است. تراکم بالای جمعیت و قیمت‌های بالای زمین به‌طور خاص تهدیدات جدی برای این زیرساخت‌ها ایجاد کرده و امکان تبدیل فضاهای سبز به کاربری‌های غیرسبز را افزایش می‌دهد. همچنین، مناطق با نرخ بالای بیکاری و بی‌سوادی با مشکلات بیشتری در حفظ و نگهداری زیرساخت‌های سبز مواجه هستند.

در نهایت، تدوین راهبردهای اصلاحی مبتنی بر طب سوزنی شهری و توجه به تغییرات اجتماعی و اقتصادی می‌تواند به تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌های سبز در این مناطق کمک کند. با تمرکز بر تقویت هسته‌های سبز، افزایش پیوستگی لکه‌ها و کاهش فشارهای جمعیتی، امکان بهبود وضعیت تاب‌آوری و پایداری اکولوژیکی فراهم می‌شود. این اقدامات به‌ویژه در مناطقی که در معرض خطرهای مختلف محیطی و توسعه شهری قرار دارند، ضروری است.

منابع

- زاهدی کلاکی، ابراهیم؛ متولی، صدرالدین؛ محمودزاده، حسن؛ جانباز قبادی، غلامرضا (۱۴۰۰). تبیین ساختار اکولوژی شهری در راستای ارتقای ضریب تاب‌آوری زیست‌محیطی با استفاده از تحلیل متریک‌های سیمای سرزمین (مطالعه موردی: شهر بهشهر). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵ (۷۸)، ۱۹۷-۲۱۸. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.42841.2741>
- زاهدی کلاکی، ابراهیم؛ متولی، صدرالدین؛ محمودزاده، حسن؛ جانباز قبادی، غلامرضا (۱۴۰۲). ارزیابی تغییرات ساختار اکولوژیک شهر بهشهر به‌منظور ارائه راهکارهایی جهت بهبود پیوستگی منظر و ارتقای تاب‌آوری زیست‌محیطی. *مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی*، ۱ (۱)، ۲۳۹-۲۶۰. <https://dori.net/dor/20.1001.1.25385968.1402.18.1.19.6>
- زرنگازاده شیرازی، سارا (۱۴۰۳). تدوین و تجمیع مدل‌های رویکرد طب سوزنی فراشهری و طب سوزنی شهری آسایش حرارتی با کاربست پایداری در حمایت از شهرها در برابر بحران تغییر اقلیم و گرمایش جهانی. *جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)*، ۱۴ (۵۶)، ۹۲-۱۴۰. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2024.480314.4>
- زندسلیمی، میلاد؛ بهرامی، بختیار (۱۴۰۱). بررسی تغییرات ساختار اکولوژیک چهار تپه در سنجند به کمک روش شیء‌گرا و شاخص‌های پیوستگی و پیچیدگی. *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۴ (۱۰)، ۷۷-۹۱. <https://doi.org/10.22034/jest.2021.59586>
- شیرگیر، المیرا؛ بهزادفر، مصطفی؛ خیرالدین، رضا (۱۴۰۰). تبیین روشی جهت سنجش و افزایش میزان تاب‌آوری شهری به تغییرات اقلیمی بر پایه اصول اکولوژی سیمای سرزمین در مقیاس محله شهری (مطالعه موردی: محله یوسف‌آباد تهران). *پژوهش‌های معماری منظر*، ۱۰ (۱۹)، ۱-۱۸. <https://doi.org/10.30495/hoviatshahr.2021.17026>
- کریمی تاج‌الدین، محمد؛ شمعی، علی؛ محبی، فاطمه (۱۴۰۳). تحلیل نقش تغییر کاربری زیرساخت‌های سبز در تاب‌آوری اکولوژیک منطقه یک شهرداری تهران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۰ (۴)، ۵۹-۷۸. <http://doi.org/10.61186/jsaeh.10.4.59>
- گلچوبی دیوا، شهربانو؛ صالحی، اسماعیل؛ کریمی، سعید (۱۳۹۷). بررسی و ارزیابی اصول و معیارهای تاب‌آوری در پایداری باغات شهری (مطالعه موردی: منطقه یک شهرداری تهران). *پژوهش‌های محیط‌زیست شهری*، ۷ (۴)، ۴۵-۶۰. <https://doi.org/10.22034/jsc.2018.87374>
- یدالله‌نیا، هاجر؛ رجایی، سید عباس؛ پوراحمد، احمد؛ خراسانی، محمدمامین (۱۴۰۰). اثرات گسترش فیزیکی بر تاب‌آوری زیست‌محیطی شهر بابل. *جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری*، ۹ (۳۲)، ۱۱۱-۱۳۰. https://mag.iga.ir/article_246244.html
- یوسفی مقدم، علیرضا؛ نبی بیده‌ندی، غلامرضا؛ هویدی، حسن (۱۳۹۹). مدل‌سازی توان اکولوژیک توسعه شهری بر اساس سنجه‌های سیمای سرزمین (مطالعه موردی: شهر شیراز). *پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، ۵۲ (۴)، ۱۴۰۹-۱۴۳۲. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2019.290379.1008019>

References

- Alberti, M., & Marzluff, J. M. (2004). Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems*, 7(3), 241-265. <http://doi.org/10.1023/B:UECO.0000044038.90173.c6>
- Alemohammad, S., Nasehi, S., Alemohammad, A. A., Mehrian, M. R., & Farhadi, R. (2024). Spatial Analysis of Urban Sprawling with an Emphasis on Ecological Infrastructure Integrity (Case Study: Miandoab City). *Environmental Energy and Economic Research*, 8(2) 1-16. <https://doi.org/10.22097/eeer.2024.433352.1309>
- Alexandri, E., & Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- Al-Hinkawi, W. S., & Al-Saadi, S. M. (2020, July). Urban acupuncture, a strategy for development: Case study of Al-Rusafa, Baghdad. In *IOP Conference Series: Materials Science and*

- Engineering*, 881(1), 1-17. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012002>
- Alker, S., Joy, V., Roberts, P., & Smith, N. (2000). The definition of brownfield. *Journal of Environmental Planning and Management*, 43(1), 49–69. <https://doi.org/10.1080/09640560010766>
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press.
- Bernat, S. (2014). Revitalization of river valleys and development of tourism (Lublin and Puławy study case). *Geography and Tourism*, 2(1), 12-34. <https://czasopisma.ukw.edu.pl/index.php/gat/article/view/1>
- Burby, R. J., Deyle, R. E., Godschalk, D. R., & Olshansky, R. B. (2000). Creating hazard resilient communities through land-use planning. *Natural Hazards Review*, 1(2), 99–106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2000\)1:2\(99\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2000)1:2(99))
- Carlotti, P. (2024). “Architectural acupuncture” in urban morphology studies. *Land*, 13(5), 1-20. <https://doi.org/10.3390/land13050661>
- Coffey, L., & Claudio, D. (2021). In defense of group fuzzy AHP: A comparison of group fuzzy AHP and group AHP with confidence intervals. *Expert Systems with Applications*, 178, 114970. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114970>
- Conway, T. M., Khan, A., & Esak, N. (2020). An analysis of green infrastructure in municipal policy: Divergent meaning and terminology in the Greater Toronto Area. *Land Use Policy*, 99, 104864. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104864>
- Cutter, S. L., Burton, C. G., & Emrich, C. T. (2010). Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7(1), 1-25. <https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732>
- Delgado-Capel, M., & Cariñanos, P. (2020). Towards a standard framework to identify green infrastructure key elements in dense Mediterranean cities. *Forests*, 11(12), 1246. <https://doi.org/10.3390/f11121246>
- Dramstad, W. E., Olson, J. D., & Forman, R. T. (1996). *Landscape ecology principles in landscape architecture and land-use planning (Vol. 18)*. Harvard University Graduate School of Design.
- Fabos, J. G. (2004). Greenway planning in the United States: Its origins and recent case studies. *Landscape and Urban Planning*, 68(2-3), 321–342. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.07.003>
- Ferreira, J. C., Monteiro, R., & Silva, V. R. (2021). Planning a green infrastructure network from theory to practice: The case study of Setúbal, Portugal. *Sustainability*, 13(15), 8432. <https://doi.org/10.3390/su13158432>
- Forman, R. T. T. (1995). *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.
- Foster, J., Lowe, A., & Winkelman, S. (2011). The value of green infrastructure for urban climate adaptation. *Center for Clean Air Policy*, 750(1), 1–52.
- Fredericks, J., Caldwell, G. A., Foth, M., & Tomitsch, M. (2019). The city as perpetual beta: Fostering systemic urban acupuncture. *In the hackable city: Digital media and collaborative city-making in the network society*. 67–92. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2694-3_4
- Girma, Y., Terefe, H., Pauleit, S., & Kindu, M. (2019). Urban green infrastructure planning in Ethiopia: The case of emerging towns of Oromia special zone surrounding Finfinne. *Journal of Urban Management*, 8(1), 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2018.09.004>
- Golchoubi Diva, S., Salehi, E., & Karimi, S. (2018). Reviewing and assessing principals and criteria of resilience in urban gardens sustainability (Case Study: District 1 of Tehran Municipality). *Sustainable City*, 1(1), 107–128. <https://doi.org/10.22034/jsc.2018.87374> (In Persian)
- Guitart, D., Pickering, C., & Byrne, J. (2012). Past results and future directions in urban community gardens research. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.007>
- Ha, J., Choi, D. H., & Darling, L. E. (2024). Is the spatial distribution of urban green space associated with crime in Chicago? *Urban Forestry & Urban Greening*, 95, 128282. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128282>

- Haghighi Fard, S. M., & Doratli, N. (2022). Evaluation of resilience in historic urban areas by combining multi-criteria decision-making system and GIS, with sustainability and regeneration approach: The case study of Tehran (Iran). *Sustainability*, 14(5), 2495. <https://doi.org/10.3390/su14052495>
- Hemingway, J. M. (2024). Urban environmental acupuncture as a tool to support nature-based solution implementation: Does it deliver what it promises? *Urban Transformations*, 6(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s42854-024-00067-1>
- Hou, J. (2010). *Insurgent public space: Guerrilla urbanism and the remaking of contemporary cities*. Routledge.
- Hsu, C.-C., & Sandford, B. A. (2007). The Delphi technique: Making sense of consensus. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 12(10), 1-8. <https://doi.org/10.7275/pdz9-th90>
- Jim, C. Y., & Chen, S. S. (2003). Comprehensive greenspace planning based on landscape ecology principles in compact Nanjing city, China. *Landscape and Urban Planning*, 65(3), 95–116. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00244-X](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00244-X)
- Karami Tajeddin, M., Shamai, A., & Mohebi, F. (2014). Analysis of the role of urban green infrastructure changes in the ecological resilience of District 1 of Tehran Municipality. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 10(4), 59–78. <http://doi.org/10.61186/jsaeh.10.4.59> (In Persian)
- Karami, P., & Mousavi, S.-M. (2025). Spatiotemporal analysis of thermal islands in a semi-arid city: A case study of Kermanshah, Iran using machine learning and remote sensing. *Environmental Challenges*, 20, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101174>
- Li, F., Wang, R., Paulussen, J., & Liu, X. (2005). Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: A case study in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 72(4), 325–336. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.04.002>
- Liang, H., Chen, D., & Zhang, Q. (2017). Assessing urban green space distribution in a compact megacity by landscape metrics. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(1), 64–74. <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1210157>
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science* (Vol. 1, pp. 55-77). New York: Springer.
- Markmann, C., Spickermann, A., von der Gracht, H. A., & Brem, A. (2021). Improving the question formulation in Delphi-like surveys: Analysis of the effects of abstract language and amount of information on response behavior. *Futures & Foresight Science*, 3(1). <https://doi.org/10.1002/ffo2.56>
- McGarigal, K. (2002). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts. *Amherst*, 6(3), 1-182. https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/2243084
- Mohammadian, M. R., Sattarzadeh, D., & Poor Hadi Hosseini, M. (2018). Increasing sustainability using the potential of urban rivers in developing countries with a biophilic design approach. *International Journal of Agricultural Civil Construction Science*, 12(3), 278–283. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316027>
- Monteiro, R., Ferreira, J. C., & Antunes, P. (2020). Green infrastructure planning principles: An integrated literature review. *Land*, 9(12), 525. <https://doi.org/10.3390/land9120525>
- Nasehi, S., & Imanpour Namin, A. (2020). Assessment of urban green space fragmentation using landscape metrics (case study: district 2, Tehran city). *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2405–2414. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00809-7>
- Nasehi, S., Alemohammad, S., Mehrian, M. R., & Dinan, N. M. (2023). Formulating Sustainability Strategies for Urban Green Infrastructures by using the Landscape Changes Assessment (Tehran Metropolitan District 2). *Geography and Environmental Sustainability*, 13(2), 95-114 <https://doi.org/10.22126/ges.2023.8640.2614>
- Navas González, Á., Hewitt, R. J., & Martínez-Vega, J. (2024). Green infrastructure mapping in Almeria Province (Spain) using geographical information systems and multi-criteria evaluation. *Land*, 13(11), 1916. <https://doi.org/10.3390/land13111916>

- Nawieśniak-Caesar, M., Wilkosz-Mamcarczyk, M., Hernik, J., Gorzelany, J., & Gorzelany-Dziadkowiec, M. (2019). An integrated approach to river valley revitalisation. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 27(1), 22–32. <https://doi.org/10.3846/jeel.2019.7481>
- Nazombe, K., & Nambazo, O. (2023). Monitoring and assessment of urban green space loss and fragmentation using remote sensing data in the four cities of Malawi from 1986 to 2021. *Scientific African*, 20, e01639. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01639>
- Parker, J., & Zingoni de Baro, M. E. (2019). Green infrastructure in the urban environment: A systematic quantitative review. *Sustainability*, 11(11), 3182. <https://doi.org/10.3390/su11113182>
- Pitman, S. D., Daniels, C. B., & Ely, M. E. (2015). Green infrastructure as life support: Urban nature and climate change. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 139(1), 97–112. <https://doi.org/10.1080/03721426.2015.1035219>
- Ramezani Mehrian, M. (2022). Assessing the structural quality of green space network in urban environments - case study: District 16 of Tehran Municipality. *Geographical Urban Planning Research*, 10(1), 81–99. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2022.325283.1535>
- Reynolds, H. L., Mincey, S. K., Montoya, R. D., Hamlin, S., Sullivan, A., Thapa, B., Wilson, J., Rosing, H., Jarzen, J., & Grove, J. M. (2022). Green infrastructure for urban resilience: A trait-based framework. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(4), 231–239. <https://doi.org/10.1002/fee.2446>
- Rosso, F., Pioppi, B., & Pisello, A. L. (2022). Pocket parks for human-centered urban climate change resilience: Microclimate field tests and multi-domain comfort analysis through portable sensing techniques and citizens' science. *Energy and Buildings*, 260, 111918. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111918>
- Saaty, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13, 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
- Sadat, M., Zoghi, M., & Amiri, M. J. (2024). Investigating the Effects of Some Ecological Indicators of Forest Patches on the Supply of Selected Ecosystem Services (Study Area: Eastern Part of Gilan Province). *Geography and Environmental Planning*, 35(1), 89–110. <https://doi.org/10.22108/gep.2023.138399.1595>
- Shade, C., Kremer, P., Rockwell, J. S., & Henderson, K. G. (2020). The effects of urban development and current green infrastructure policy on future climate change resilience. *Ecology & Society*, 25(4), 37. <https://doi.org/10.5751/ES-12076-250437>
- Shamsipour, A., Jahanshahi, S., Mousavi, S. S., Shoja, F., Golenji, R. A., Tayebi, S., Alavi, S. A., & Sharifi, A. (2024). Assessing and mapping urban ecological resilience using the loss-gain approach: A case study of Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 103, 105252. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105252>
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2016). Urban resilience assessment: Multiple dimensions, criteria, and indicators. In *Urban resilience: A transformative approach*. 259–276. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39812-9_13
- Shirgijr, E., Behzadfar, M., & Kheyroddin, R. (2021). Defining a Method for Measuring and Enhancing Urban Resilience to Climate Change based on Landscape Ecology Theories(Case study:Yousef Abad Neighborhood,Tehran). *City Identity*, 15(46), 69–84. <https://doi.org/10.30495/hoviatshahr.2021.17026> (In Persian)
- Sultana, N., Sharifi, A., Haque, M. N., & Aghaloo, K. (2024). Urban greening in Dhaka: Assessing rooftop agriculture suitability using GIS and MCDM techniques. *Journal of Environmental Management*, 368, 122146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122146>
- Sun, X., Crittenden, J. C., Li, F., Lu, Z., & Dou, X. (2018). Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, 622–623, 974–987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.062>
- Syphard, A. D., Keeley, J. E., Pfaff, A. H., & Ferschweiler, K. (2017). Human presence diminishes

- the importance of climate in driving fire activity across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(52), 13750–13755. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713885114>
- Taghadossi, M. M., Hasanlou, M., & Eftekhari, K. (2019). Evaluating and comparing supervised classification algorithms With the aim of mapping soil salinity levels using Sentinel-2 satellite imageries. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(110), 37–52. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36608>
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and urban planning*, 81(3), 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- Voghera, A., & Giudice, B. (2019). Evaluating and planning green infrastructure: A strategic perspective for sustainability and resilience. *Sustainability*, 11(10), 2726. <https://doi.org/10.3390/su11102726>
- Wang, J., & Banzhaf, E. (2018). Towards a better understanding of green infrastructure: A critical review. *Ecological Indicators*, 85, 758–772. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.018>
- Wang, Y.-C., Shen, J.-K., & Xiang, W.-N. (2018). Ecosystem service of green infrastructure for adaptation to urban growth: Function and configuration. *Ecosystem Health and Sustainability*, 4(5), 132–143. <https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1474721>
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’. *Landscape and Urban Planning*, 125, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017>
- Yadollah Nia, H., Rajaei, S. A., Ahmadpour, A., & Khorasani, M. A. (2021). The Effects of Physical Expansion on the Environmental Resilience Case Study: City Babol. *Geography*, 19(69), 131–150. https://mag.iga.ir/article_246244.html (In Persian)
- Ying, J., Zhang, X., Zhang, Y., & Bilan, S. (2022). Green infrastructure: Systematic literature review. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35(1), 343–366. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1893202>
- Yosefi Moghadam, A. R., Nabi Bidhendi, G. R., & Hovidi, H. (2020). Modeling Ecological Capacity of Urban Development Based on Landscape Measurements. *Human Geography Research Quarterly*, 52(4), 1409–1432. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2019.290379.1008019> (In Persian)
- Zadeh, L. A., Klir, G. J., & Yuan, B. (1996). *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers* (Vol. 6). World scientific.
- Zahedikelaki, E., Motevali, S., Mahmoudzadeh, H., & Janbazghobadi, G. (2021). Explanation of urban ecology structure in order to improvement environmental resilience using the analysis of landscape metrics (Case study of Behshahr city). *Geography and Planning*, 25(78), 197–218. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.42841.2741> (In Persian)
- Zahedikelaki, E., Motevali, S., Mahmoudzadeh, H., & Janbazghobadi, G. (2022). Providing a Suitable Model to Promote Ecological Cohesion and Environmental Resilience (Case Study: Behshahr). *Geography and Environmental Studies*, 11(42), 40–57. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385968.1402.18.1.19.6> (In Persian)
- Zandsalimi, M., & Bahrami, B. (2023). Examining changes in the ecological structure of four hills in Sanandaj using object-oriented method and metrics of continuity and complexity. *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(10), 77–91. <https://doi.org/10.22034/JEST.2021.59586.5330> (In Persian)
- zarnegar zade shirazi, S. (2024). Compilation and compilation of extra-urban acupuncture and urban thermal comfort acupuncture approach models with sustainable application in supporting cities against the crisis of climate change and global warming. *Geography (Regional Planning)*, 14(56), 92–140. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2024.480314.4134> (In Persian)

