

Strategic Assessment of Vegetation Cover Connectivity in the Tehran Metropolis: Identifying Priority Management Zones

Sayede A Alemohammad¹ | Hossein Khosravi²

1. Department of Environmental Governance, Faculty of Governance, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Sh.alemohammad@ut.ac.ir
 2. Department of Architecture and Urban Planning, Art University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 08 Jul 2025 Received in revised form: 09 Sep 2025 Accepted: 11 Sep 2025 Available online: 22 Dec 2025 Keywords: Landscape metrics, Fine-scale analysis, Ecological sustainability, Spatial discontinuities, Environmental justice, Policy.	Structural fragmentation in urban green space networks contributes to reduced ecological sustainability, disrupted ecosystem service performance, and weakened environmental resilience in metropolitan areas. This study aims to spatially evaluate the structural connectivity of Tehran's green space network and identify priority intervention zones at both neighborhood and district levels. To achieve this, an up-to-date vegetation cover map was produced using Sentinel-2 satellite imagery with a 10-meter spatial resolution, applying object-based image classification. Three key landscape metrics—Percentage of Landscape (PLAND), Proximity Index (PROX), and Landscape Shape Index (LSI)—were subsequently calculated using FRAGSTATS software and visualized in ArcGIS. For enhanced comparability, the metrics were normalized and integrated into a weighted composite index. This fine-scale analytical framework enabled the ranking of structural connectivity across urban zones and the identification of ecological discontinuities. The results indicate that the northern parts of Tehran exhibit the highest levels of ecological sustainability and spatial continuity, whereas the central, eastern, and portions of the western zones suffer from severe fragmentation and disconnection. These findings can inform decision-making in targeted green space management, the design of spatially explicit interventions, green infrastructure regeneration, urban environmental policy formulation, and the optimal allocation of ecological resources and investments. The proposed framework—characterized by high interpretability, mappability, and transferability—serves as a practical tool for advancing environmental justice and promoting sustainable green infrastructure planning in rapidly expanding metropolitan contexts.
Cite this article: Alemohammad, S., Khosravi, H. (2025). Strategic Assessment of Vegetation Cover Connectivity in the Tehran Metropolis: Identifying Priority Management Zones. <i>Geography and Environmental Sustainability</i>, 15(4), 121-142. https://doi.org/10.22126/GES.2025.12417.2890	
	© The Author (s). DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2025.12417.2890 Publisher: Razi University

ارزیابی راهبردی پیوستگی پوشش گیاهی کلان شهر تهران با تأکید بر تعیین پهنه‌های اولویت‌دار مدیریتی

سیده آل محمد^۱ | حسین خسروی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه حکمرانی محیط زیست، دانشکده حکمرانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Sh.alemohammad@ut.ac.ir
 ۲. گروه طراحی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ کلیدواژه‌ها: سنجه‌های سیمای سرزمین، تحلیل خردمقیاس، پایداری بوم‌شناختی، گسستگی فضایی، عدالت محیط‌زیستی، خط‌مشی.	گسستگی ساختاری در شبکه فضای سبز شهری موجب اختلال در کارکرد خدمات بوم‌سازگانی و تضعیف پایداری بوم‌شناختی کلان‌شهرها می‌شود. این پژوهش باهدف ارزیابی فضایی پیوستگی ساختاری شبکه فضای سبز کلان‌شهر تهران و شناسایی پهنه‌های اولویت‌دار مداخله در مقیاس محله و منطقه انجام شده است. بدین منظور، با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ با قدرت تفکیک ۱۰ متر و روش طبقه‌بندی شی‌گرا، نقشه به‌روز پوشش گیاهی شهری تولید شد. در ادامه، سه سنجه کلیدی از سیمای سرزمین شامل درصد پوشش لکه‌ها (PLAND)، شاخص مجاورت فضایی (PROX) و پیچیدگی هندسی لکه‌ها (LSI) با استفاده از نرم‌افزار FRAGSTATS محاسبه و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نقشه‌سازی گردید. برای افزایش هم‌ترازی داده‌ها، نرمال‌سازی آماری انجام و مقادیر در قالب نمایه‌ای وزن‌دار تلفیق شد. چارچوب به‌کاررفته با قابلیت تحلیل خردمقیاس، امکان رتبه‌بندی پیوستگی ساختاری در پهنه‌های شهری و شناسایی گسستگی‌های بوم‌شناختی را فراهم ساخت. یافته‌ها نشان داد نواحی شمالی شهر از بیشترین پایداری بوم‌شناختی و اتصال فضایی برخوردارند، درحالی‌که پهنه‌های مرکزی، شرقی و بخش‌هایی از غرب، با گسستگی فضایی شدید و ریزدانه‌تر شدن مواجه‌اند. خروجی‌ها می‌توانند در فرایند تصمیم‌سازی برای مدیریت هدفمند فضای سبز، طراحی مداخلات مکان‌محور، بازآفرینی زیرساخت‌های سبز، تدوین خط‌مشی محیط‌زیستی شهری و تخصیص بهینه سرمایه‌گذاری‌ها و منابع بوم‌شناختی مورد استفاده قرار گیرند. چارچوب پیشنهادی، با تفسیرپذیری، نقشه‌پذیری و تعمیم‌پذیری بالا، ابزاری کاربردی برای ارتقای عدالت محیط‌زیستی در کلان‌شهرهای در حال گسترش محسوب می‌شود.

استناد: آل محمد، سیده؛ خسروی، حسین (۱۴۰۴). ارزیابی راهبردی پیوستگی پوشش گیاهی کلان‌شهر تهران با تأکید بر تعیین پهنه‌های اولویت‌دار مدیریتی. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۵ (۴)، ۱۲۱-۱۴۲. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12417.2890>

© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12417.2890>

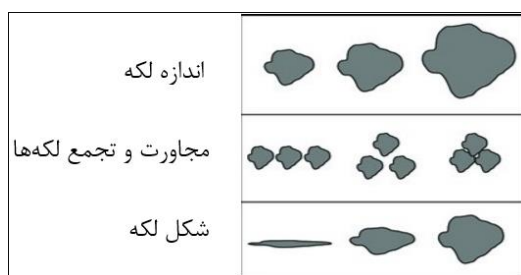
ناشر: دانشگاه رازی



مقدمه

روند پرشتاب شهرنشینی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، پیامدهای گسترده‌ای در حوزه محیط‌زیست شهری به‌دنبال داشته است. در این میان، فضای سبز شهری با مدیریت کارآمد، نقش مهمی در ارتقای کیفیت زندگی ایفا می‌کند (Hepcan, 2013; Huang et al., 2021). فضاهای سبز با ارائه خدمات بوم‌سازگانی (خدمات اکوسیستمی)^۱، در بهبود عملکرد اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و زیبایی‌شناختی شهرها مؤثرند. از جمله این خدمات می‌توان به ترسیب کربن، کاهش اثر جزایر حرارتی، تعدیل اقلیم، افزایش نفوذپذیری سطح، تغذیه سفره‌های زیرزمینی، کاهش خطر سیلاب، حفاظت از زیستگاه‌های طبیعی، ارتقای کیفیت بصری، تقویت تعاملات اجتماعی، ارتقای سلامت جسمی و روانی، کاهش هزینه‌های سلامت و ایجاد ارزش‌های اقتصادی و گردشگری اشاره کرد (Fang et al., 2023; Valente et al., 2022; Ai et al., 2023). در مواجهه با چالش‌های ناشی از رشد سریع شهری، تقویت شبکه فضاهای سبز به‌عنوان راهبردی بنیادین در برنامه‌ریزی محیط‌زیست شهری مطرح است. محرومیت سکونتگاه‌های انسانی از مزایای حاصل از مجاورت، هم‌جواری یا هم‌پوشانی با این فضاها، تأثیری تعیین‌کننده و غیرقابل جایگزین بر پایداری بوم‌شناختی شهرها دارد.

فضای سبز شهری، به فضاهای باز عمومی طبیعی، نیمه‌طبیعی و یا انسان‌ساخت در درون و یا پیرامون نواحی شهری اطلاق می‌شود که از حجم قابل توجه پوشش گیاهی (درختان، درختچه‌ها، چمن‌ها و گیاهان بالارونده) برخوردار است. فهم موجودیت، میزان و کیفیت این فضاها در میان سایر انواع پوشش‌ها و کاربری‌های اراضی، در دانش بوم‌شناسی سیمای سرزمین مطالعه می‌شود. بنا بر شکل ۱، سه اصل این دانش برای یکپارچگی ساختار سیمای سرزمین، ارتقای کارکردهای بوم‌شناختی^۲ و سازگاری‌های محیط‌زیستی، چنین است (Romanillos et al., 2024; Alemohammad et al., 2022; Mortelliti et al., 2010; Elizbarashvili et al., 2022; Hladnik & Nastran, 2023). بیشتر از سطح کل، در ارائه خدمات بوم‌سازگانی مؤثرتر از لکه‌های کوچک‌تر عمل می‌کنند. دوم، هم‌جواری و تجمع لکه‌ها و دالان‌های سبز نقش مهمی در تقویت پایداری بوم‌شناختی شهر دارند، درحالی‌که فاصله آن‌ها موجب کاهش کارایی بوم‌شناختی و توزیع نابرابر آن‌ها در سطح شهر می‌شود. سوم، لکه‌هایی با شکل فشرده‌تر (نزدیک به دایره) به دلیل نسبت کمتر محیط به مساحت، در برابر اثرات منفی محیطی مقاوم‌تر هستند. همچنین دالان‌هایی با پهنای بیشتر و پیوندهای گسترده‌تر، کارکرد بوم‌شناختی بهتری دارند.



شکل ۱. افزایش پایداری زیرساخت‌های سبز از سمت چپ به راست (Suzan et al., 2012). میزان کارکرد بوم‌شناختی هر بخش از سیمای سرزمین، تا حد زیادی تابع پیوندهای افقی آن با نواحی همجوار است و این پیوندها تحت تأثیر فراوانی، مجاورت و شکل لکه‌ها و دالان‌های سیمای سرزمین است.

با اینکه حفاظت از لکه‌های بزرگ و حساس در سیمای سرزمین اهمیت بالایی دارد، پیوند آن‌ها با سایر لکه‌ها نیز حیاتی است. شبکه‌های بوم‌شناختی^۳ به‌جای تمرکز صرف بر حفاظت زیستگاه‌ها، بر حفظ ارتباط فضایی میان آن‌ها تأکید دارند. پیوستگی این شبکه، از طریق نزدیکی، هم‌جواری و ارتباط فیزیکی میان فضاهای سبز شهری شکل می‌گیرد و جابه‌جایی آسان زیست‌مندان، تعامل بیشتر و تجربه مطلوب‌تری را برای کاربران به همراه دارد (Alavi et al., 2024; Choe et al., 2021).

1. Ecosystem Services
2. Ecological Function
3. Ecological Networks

(Mateer, 2022).

سه رویکرد عمده برای مطالعه تحلیل فضای سبز شهری وجود دارد که هر یک به روش متفاوتی منتهی می‌شود. در رویکرد نخست، فضای سبز به‌عنوان یکی از کاربری‌های شهری است و با استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین^۱، ویژگی‌ها و تحولات فضایی - زمانی آن تحلیل می‌گردد. رویکرد دوم مبتنی بر نظریه گراف^۲ است که با تحلیل شبکه‌ای، امکان تصمیم‌گیری مؤثر در برنامه‌ریزی شبکه بوم‌شناختی شهری را فراهم می‌کند. در سومین رویکرد، با تمرکز بر تجزیه و تحلیل الگوی فضایی - شکل‌شناختی^۳، الگوی زیرساخت‌های سبز باتکیه بر اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین تبیین می‌شود (Nowosad & Hesselbarth, 2024; Vardopoulos et al., 2024; Moraitis, 2024).

نرم‌افزار FRAGSTATS از ابزارهای تخصصی در روش نخست به شمار می‌رود و دارای دو رویکرد اصلی است: تحلیل استاندارد^۴ و تحلیل پنجره متحرک^۵. در تحلیل استاندارد، سنج‌های سیمای سرزمین در سطوح لکه، طبقه و کل سیمای سرزمین ارائه می‌شود و بیشتر برای بررسی ویژگی‌های کلی، تحلیل تغییرات زمانی یا مقایسه بین مناطق مختلف کاربرد دارد (García-Llorente et al., 2021; Hesselbarth et al., 2019). تحلیل پنجره متحرک، رویکردی محلی و مبتنی بر همسایگی فضایی است. در این روش، یک پنجره مربع یا دایره‌ای با ابعاد مشخص روی نقشه رستری گام‌به‌گام حرکت می‌کند و سنج را فقط بر اساس داده‌های درون آن پنجره محاسبه می‌کند.

نتیجه تحلیل با روش پنجره متحرک، تولید نقشه‌ای رستری است که گرادین‌های ناپیوستگی فضایی را با دقت نشان می‌دهد. انتخاب شعاع ۵۰۰ متر برای این تحلیل از چند جهت اهمیت دارد: اول، با درک روزمره انسانی از فاصله پیاده‌روی (حدود ۵ تا ۷ دقیقه) هم‌راستاست؛ دوم، با ساختار ناهمگون شهر تهران هماهنگ است و امکان تحلیل دقیق‌تری از پیوستگی در مقیاس محلی را فراهم می‌کند؛ سوم، تعادلی میان دقت و قابلیت تعمیم ایجاد کرده و از افراط در نمایش جزئیات یا کلی‌نمایی پرهیز می‌شود (Zhang et al., 2022; Li et al., 2021; WHO, 2017). این روش، تولید نقشه‌های گرمایی و نقشه‌های نقاط داغ^۶ را ممکن می‌سازد. نقشه‌هایی که با نمایش شدت، تراکم یا فراوانی وقوع یک پدیده، به شناسایی مناطق بحرانی یا دارای اولویت در برنامه‌ریزی محیط‌زیستی کمک می‌کنند. به‌عنوان مثال، این نقشه‌ها می‌توانند نواحی با کمبود فضای سبز یا مناطق تحت فشارهای محیطی مانند آلودگی بیشتر را آشکار سازند و بدین ترتیب، ابزار مؤثری برای تحلیل فضایی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های شهری فراهم آورند.

پیوستگی در سیمای سرزمین، برخلاف پدیده ریزدانه شدن یا گسستگی فضایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تسهیل جریان خدمات بوم‌سازگانی ایفا می‌کند. این یکپارچگی ساختاری می‌تواند به‌عنوان عاملی پشتیبان، موجب تقویت کارکرد و تداوم کارکردهای بوم‌شناختی در محیط‌های شهری شود. این ویژگی، زمانی بیشترین اثربخشی را خواهد داشت که علاوه بر توزیع بهینه و متعادل فضاهای سبز، ارتباط فضایی و پیوند کارکردی میان اجزای مختلف این فضاها نیز مورد توجه قرار گیرد؛ بنابراین، مفهوم پیوستگی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی در برنامه‌ریزی و مدیریت بوم‌شناختی شهری، جایگاهی محوری در پژوهش‌های بوم‌شناسی سیمای سرزمین یافته است و در رویکردهای نوین، به‌مثابه یک راهبرد کلان و بنیادین تلقی می‌شود (Ben Messaoud et al., 2024).

پژوهش‌های مهم درباره پیوستگی شبکه فضای سبز با تأکید بر پایداری و رویکرد سیمای سرزمین در همه جهان افزایش روزافزون دارد. اما به طور نسبی در آفریقا، آمریکای لاتین و خاورمیانه، کمتر از اروپا، آسیای شرقی، ایالات متحده آمریکا و کانادا مورد توجه است. شایان ذکر است که زیرساخت سبز^۷ و شبکه فضای سبز^۸، مفهومی هستند که نسبتاً جدید بوده و فعلاً دستورالعمل یا قانون مدونی برای توسعه پایدار آن‌ها در جهان و حتی در کشور نیست. پس اهمیت دارد که پهنه‌های

1. Landscape Metrics
2. Graph Theory
3. Morphological- Spatial Pattern Analysis
4. Standard Analysis
5. Moving Window Analysis
6. Heatmap and HotSpot Map
7. Green Infrastructure
8. Green Spase Network

اولویت‌دار به منظور حفظ و تقویت وضعیت یکپارچگی آن‌ها برای ذینفعان و برنامه‌ریزان سیمای سرزمین، حداقل برای شهرها و مناطق شهری مشخص گردد تا مبنای برای تنظیم اقدام‌های اولویت‌دار به منظور ارتقای پایداری بوم‌شناختی شهر باشد (Monteiro et al., 2020; Conway et al., 2020; Parker et al., 2019).

در سال‌های اخیر در پی رشد سریع جمعیت و توسعه افقی و عمودی شهرها، میزان فضاهای سبز درون‌شهری و پیرامونی در بسیاری از مناطق کشور ایران، با کاهش چشمگیری مواجه شده است. این کاهش در بستر اقلیم خشک و نیمه‌خشک غالب، محدودیت‌های زمین، ساخت‌وسازهای بی‌رویه و تشدید آلودگی هوا، در کلان‌شهرهایی چون تهران، چالش‌های محیط‌زیستی قابل‌توجهی ایجاد کرده است. در چنین شرایطی، لزوم حفظ، بازآفرینی و گسترش هدفمند فضاهای سبز شهری، به یک ضرورت راهبردی تبدیل شده است. مطالعات مهمی با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور، تحلیل‌های گراف‌محور و سنجه‌های سیمای سرزمین، به بررسی پیوستگی ساختاری و کارکردی فضای سبز در شهرها پرداخته‌اند.

در مطالعه‌ای، با قطعه‌بندی تصاویر در شهرهای اروپایی، سه سنجه پیوستگی شامل اندازه، مجاورت و پوشش اطراف مرکز شهری ارزیابی شده است (Aleixo et al., 2024). همچنین باتکیه بر تحلیل فضایی - شکل‌شناختی و نظریه گراف، ساختار بهینه شبکه بوم‌شناختی در چنگدو و پکن پیشنهاد شده است (Zhou et al., 2023; Liu et al., 2022). در مطالعاتی دیگر، تغییرات زمانی پوشش سبز در اثر گسترش شهرنشینی و روند ریزدانه‌تر شدن در شهرهای مختلف بررسی شده است (Zięba- (Zięba et al., 2022; Kulawik & Wężyk, 2022; Naroei et al., 2022). تحلیل مقاومت، فاصله و مسیرهای کم‌هزینه نیز به منظور حفظ پیوستگی لکه‌ها و دالان‌ها در کلان‌شهرها به کاررفته است (Gao & Li, 2024; Huang et al., 2021). برخی پژوهش‌ها به ارزیابی اثر تراکم ساختمانی، ارتفاع و جمعیت بر پیوستگی فضاهای سبز شهری پرداخته‌اند (Tian et al., 2017) و برخی دیگر کمی‌سازی پیوستگی را در راستای بهینه‌سازی طراحی سبز شهری انجام داده‌اند (Hepcan, 2013).

در تهران، تغییرات پوشش سبز طی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ با تصاویر لندست و روش‌های طبقه‌بندی پیشرفته تحلیل شده است (روزبهرانی و همکاران، ۱۴۰۰). سنجش کیفیت ساختاری شبکه فضای سبز در مناطق شهری تهران با سنجه‌های سیمای سرزمین نیز صورت گرفته است (رمضانی مهریان، ۱۴۰۱). مدل‌سازی تغییرات بلندمدت و پیش‌بینی وضعیت تا ۲۰۳۰ با زنجیره مارکوف و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری نیز انجام شده است (Naroei et al., 2022). همچنین تحلیل فضایی فضاهای سبز با مدل‌هایی چون کوپراس و خودهمبستگی فضایی در همه مناطق تهران، گویای ضعف ساختاری و مدیریتی است (Mohammadi Hamidi et al., 2020). مشکلاتی مانند کمبود سرانه، نابرابری فضایی و توزیع نامتوازن، نتیجه غفلت از اصول بوم‌شناختی در برنامه‌ریزی شهری هستند (صابونچی و همکاران، ۱۳۹۷؛ امیدپور و همکاران، ۱۳۹۹؛ روزبهرانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ علیپور و همکاران، ۱۳۹۸؛ حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۹؛ کوخانی و مثنوی، ۱۳۹۳).

شواهد مآهواره‌ای نشان می‌دهد که روند گسستگی پوشش گیاهی و پراکندگی زیرساخت‌های سبز در تهران ادامه‌دار بوده (Allahyari & Salehi, 2020) و در صورت بی‌توجهی به مدیریت پایدار منابع، این روند به تضعیف بیشتر پایداری بوم‌شناختی خواهد انجامید (نارویی و همکاران، ۱۴۰۱؛ یزدان‌پناه و همکاران، ۱۳۹۴؛ فتوحی و برق‌جلوه، ۱۳۹۷؛ ناصحی و همکاران، ۱۴۰۲). اگرچه رویکردهایی چون ادغام کاربری‌های سبز یا توسعه پارک‌ها مطرح شده‌اند، اما بدون لحاظ پیوستگی و توزیع متوازن، اثربخشی آن‌ها برای تهران محدود بوده است. ضرورت دارد پیوستگی فضایی^۱ زیرساخت‌های سبز به‌عنوان رویکردی جامع در خط‌مشی‌گذاری‌های پایداری سیمای سرزمین شهری لحاظ شود، زیرا عاملی بنیادین در ارزیابی کارکردهای بوم‌شناختی و همچنین نقش‌های اجتماعی شبکه فضاهای سبز به شمار می‌رود.

تحلیل میزان گسستگی و پراکندگی لکه‌های سبز شهری و تبیین الگوهای ارتباطی، تداوم و همبستگی میان آن‌ها، به‌صورت مؤثری می‌تواند برنامه‌ریزی مکان‌محور برای توسعه پایدار شبکه فضای سبز را بر پایه شناخت دقیق از قوت‌ها و کاستی‌های ساختاری موجود پشتیبانی کند. پس در اختیار داشتن یک الگوی تحلیلی ساختاری که از پشتوانه نظریه‌های بوم‌شناختی برخوردار باشد و درعین حال، قابلیت سنجش‌پذیری و تفسیر در مقیاس‌های مختلف فضایی را داشته باشد، ضرورتی اساسی در جهت تقویت تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد به شمار می‌آید. چنین الگویی می‌تواند برنامه‌ریزی

مداخله‌گرانه کالبدی- فضایی را هدایت کند تا ضمن حفظ و توسعه فضاهای سبز، پیوستگی فضایی آن‌ها نیز به طور پایدار بهبود یابد. تحقیقات آینده باید توسعه چارچوب‌های یکپارچه‌ای را که اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین را در برنامه‌ریزی شهری برای تقویت شهرهای تاب‌آور گنجانده باشد، در اولویت قرار دهند. یکی از ارکان مهم در مسیر افزایش پایداری بوم‌شناختی شهر، مربوط به نیاز ملموس و مبرم به اقدام جدی به‌منظور بهبود و ارتقای کارکردهای فضاهای سبز کلان‌شهر تهران از طریق اصلاح تدریجی ساختار سیمای سرزمین است. صرف‌نظر از توجه به سرانه فضای سبز در مناطق و محلات شهر تهران لازم است زمینه‌های بهبود کیفیت ساختاری سیمای سرزمین (به‌ویژه به لحاظ پیوستگی شبکه فضای سبز) فراهم شود.

درحالی‌که اهمیت پیوستگی شبکه‌های فضای سبز در سطح جهانی رو به فزونی است، پژوهش‌ها در خاورمیانه و از جمله کلان‌شهر تهران با خلأهای قابل‌توجهی در این زمینه مواجه هستند. درعین‌حال در دل همین مطالعات، از جمله چالش‌های پایداری بوم‌شناختی تهران به کمبود سرانه فضای سبز، نابرابری فضایی آن و گسستگی پوشش گیاهی، به‌عنوان مشکلات اساسی اشاره شده است (روزبهنی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رضانی مهربان، ۱۴۰۱؛ نارویی و همکاران، ۱۴۰۱؛ امیدپور و همکاران، ۱۳۹۹؛ صابونچی و همکاران، ۱۳۹۷). بااین‌وجود، اکثر این تحقیقات عمدتاً بر ابعاد جزئی‌تر یا کلی‌تری از مسئله تمرکز داشته‌اند و کمتر به ارائه یک الگوی تحلیلی ساختاری جامع و مکان‌محور برای ارزیابی چندبعدی پیوستگی شبکه فضای سبز در مقیاس محلی و منطقه‌ای پرداخته‌اند. این خلأیی است که در تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد برای بهبود کیفیت ساختاری سیمای سرزمین تهران، به‌ویژه از لحاظ پیوستگی، محسوس است.

باتوجه‌به خلأهای موجود در تحقیقات پیشین و نیاز مبرم به رویکردی جامع‌تر در ارزیابی پیوستگی شبکه فضای سبز در کلان‌شهری مانند تهران، این پژوهش قصد دارد فراتر از مطالعات گذشته، به ارزیابی دقیق و مکان‌مند پیوستگی ساختاری شبکه فضای سبز تهران بپردازد و با تمرکز بر تعیین پهنه‌های اولویت‌دار، راهکارهای مداخله‌گرانه آتی را هدفمند سازد. اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین و اهمیت حیاتی ارتباطات افقی برای پایداری بوم‌شناختی شهر، در کنار نیازهای مدیریتی، ما را بر آن داشت تا یک نمایه پیوستگی شبکه فضای سبز را با تلفیق هوشمندانه سه سنجه کلیدی (کمیت فضا، پیوند کارکردی و کیفیت هندسی) تدوین کنیم. آنچه پژوهش حاضر را از سایر مطالعات متمایز می‌سازد، برتری‌های زیر است:

۱. تطبیق‌پذیری با تحلیل خردمقیاس: استفاده از روش پنجره متحرک، امکان تحلیل موضعی - محلی را فراهم می‌آورد که برای درک گسستگی‌های فضایی در مقیاس محلات و مناطق شهری بسیار کارآمد است.
۲. نقشه‌پذیری و تفسیرپذیری بالا: قابلیت نقشه‌سازی و تفسیر نتایج، ابزاری قدرتمند برای پشتیبانی تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد در برنامه‌ریزی و مدیریت فضای سبز ارائه می‌دهد.
۳. شناخت مکان‌مند: این چارچوب منسجم و ساده، امکان شناسایی دقیق و مکان‌دار قوت‌ها و ضعف‌های پیوستگی ساختاری را میسر می‌سازد.
۴. پوشش جامع و چندبعدی ابعاد پیوستگی: با پوشش هم‌زمان سه بعد کمیت فضا (حضور)، پیوند کارکردی (مجاورت) و کیفیت هندسی (شکل)، تصویری کامل‌تر از وضعیت پیوستگی ارائه می‌دهد.
۵. هدایت هدفمند تصمیم‌گیری: نتایج این پژوهش، با جهت‌دهی هدفمند مداخلات مکانی، می‌تواند مسیر توسعه پایدار شبکه فضای سبز و ارتقای پیوستگی آن را هموار سازد.

امید است نتایج این پژوهش و شیوه نوآورانه آن، به‌عنوان یک راهنمای عملی مستند برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان شهری، در جهت توسعه پایدار و افزایش عدالت محیط‌زیستی کلان‌شهر تهران استفاده شود.

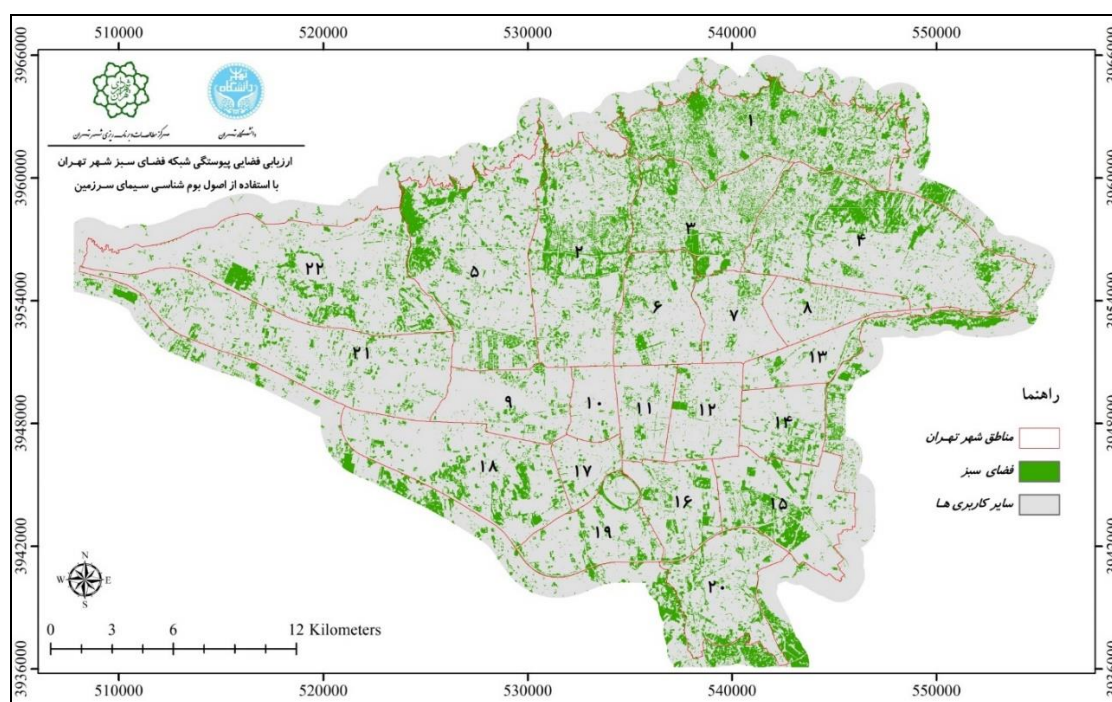
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران، به‌عنوان یکی از متراکم‌ترین مراکز جمعیتی منطقه خاورمیانه، سال‌هاست با رشد پرشتاب کالبدی روبروست؛ رشدی که ضرورت طراحی و اجرای خط‌مشی‌های محیط‌زیستی هدفمند و بلندمدت، به‌ویژه در زمینه توسعه و نگهداری

فضای سبز شهری را دوچندان کرده است. سابقه ایجاد توده‌های سبز مصنوعی در حومه شرقی و غربی تهران به دهه ۱۳۴۰ بازمی‌گردد، اما شکل‌گیری طرح جامع کمربند سبز پیرامونی با وسعت تقریبی ۵۰ هزار هکتار، از سال ۱۳۶۶ در دستور کار مدیریت شهری قرار گرفت و تا امروز ادامه یافته است. باوجود چنین پیشینه‌ای، فشارهای متعدد ناشی از اولویت‌دادن به دیگر طرح‌های شهری و کم‌توجهی به الزامات محیط‌زیستی، مانع از تحقق کامل اهداف برنامه‌ریزی‌شده در حوزه فضای سبز شده‌اند. درحالی‌که شهرداری تهران، بارها بر اهمیت گسترش پارک‌ها و فضاهای سبز شهری تأکید داشته، نبود رویکرد علمی و داده‌محور در مراحل طراحی و پیاده‌سازی پروژه‌ها، شکاف‌هایی جدی در تحقق عدالت محیط‌زیستی^۱ در سطح شهر برجای گذاشته است.

تلاش‌های پراکنده سال‌های اخیر، همچون توسعه مراحل مختلف کمربند سبز و تملک باغ‌ها و اراضی سبز درون‌شهری، بیشتر به‌مثابه واکنشی به بحران‌های محیط‌زیستی و فشارهای ناشی از کمبود دسترسی به فضاهای سبز بوده است تا بخشی از یک سیمای سرزمین منسجم. آنچه هنوز در برنامه‌ریزی‌ها مغفول مانده، تدوین نقشه‌ای جامع، یکپارچه و مکان‌مند برای سامان‌دهی فضاهای سبز، متناسب با الگوی سکونت در محلات و مناطق مختلف شهری است (Nasr et al., 2025; Nasrabadi et al., 2023). مجموع سطح فضای سبز کلان‌شهر تهران، معادل ۱۰۴۶۲ هکتار است. این مقدار در مقایسه با جمعیت و ساختار کالبدی پایتخت، پاسخگوی نیازهای محیط‌زیستی شهروندان نیست و بازنگری در خط‌مشی توزیع، کیفیت‌بخشی و حفظ این فضاها ضرورتی فوری است. شکل ۲، پوشش فضای سبز به تفکیک مناطق شهر تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۲. پوشش فضای سبز (۱۴۰۳) در مناطق شهر تهران

روش پژوهش

در این پژوهش ابتدا نقشه به‌روز پوشش گیاهی شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک ۱۰ متر تهیه شده است. ترسیم و طبقه‌بندی نقشه رستری نمایه پیوستگی فضایی فضاهای سبز شهر تهران و در نهایت مقایسه و رتبه‌بندی میزان پیوستگی شبکه فضای سبز در مقیاس محلات و مناطق شهر تهران موردنظر بوده است. باتوجه به حجم بالای اطلاعات موردنیاز و تجزیه و تحلیل متنوع آن‌ها در این پژوهش، از چهار نرم‌افزار GIS، Ecognition Developer، Fragstats، و Expert

Choise استفاده شده است.

اولین اقدام پس از دریافت تصاویر ماهواره سنتینل ۲، جداسازی و استخراج منطقه مورد مطالعه در شعاعی تا ۲۰۰۰ متر فراتر از مرز سیاسی کلانشهر تهران بوده است.^۱ سنجنده تصویربرداری این ماهواره، با نام MSI، تصاویری با وضوح بالا فراهم می‌آورد که به‌طور مؤثری داده‌های تصویری سنجنده‌های ماهواره اسپات ۵ و ۶ را تکمیل کرده است. داده‌های به‌دست آمده از سنجنش از دور، نیاز به آماده‌سازی دارد تا سپس در فرآیند طبقه‌بندی پوشش/کاربری زمین استفاده شود، از جمله این فرآیندهای پیش‌پردازش می‌توان به زمین‌مرجع کردن^۲، اصلاحات هندسی، اصلاحات رادیومتریک و اصلاحات تأثیرات اتمسفری اشاره کرد که در این پژوهش نیز انجام شده است. همچنین انتخاب بهترین تصویر از نظر زمان حداکثر پوشش گیاهی و با کمترین عناصر مزاحم مانند پوشش ابر، مورد نظر بوده است. ویژگی‌های کلی تصویر استفاده شده مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱. مشخصات تصویر انتخابی از ماهواره سنتینل ۲ برای منطقه مطالعاتی

سنجنده	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی	تاریخ اخذ تصویر	گذر و ردیف	باندهای طیفی
MSI	۱۰ متر	۵ روز	۱۱ خرداد ۱۴۰۳	N0510 R006	۸ و ۴، ۳، ۲

اطلاعات موردنیاز از تصاویر دیجیتال ماهواره‌ای به دو روش اصلی پیکسل‌محور و شی‌گرا^۳ استخراج و طبقه‌بندی می‌شود. روش پیکسل‌محور، طبقه‌بندی را بر اساس مقادیر عددی پیکسل‌های تصویر انجام می‌دهد. روش شی‌گرا، از اطلاعات طیفی، بافت فیزیکی، هندسه عوارض زمینی و محتوای تصویر بهره می‌برد و دقت بالاتری در طبقه‌بندی دارد. در این روش، واحدهای پردازش از سطح پیکسل به اشیای تصویری یا همان سگمنت‌ها منتقل می‌شود. در این پژوهش، مراحل پردازش تصویر با استفاده از روش طبقه‌بندی شی‌گرا برای تهیه نقشه فضای سبز شهر تهران با نرم‌افزار Ecognition Developer انجام شد. این محیط از طریق ایجاد و توسعه مجموعه‌ای از قواعد، به پردازش و قطعه‌بندی^۴ تصویر می‌پردازد و پیکسل‌های همسایه مشابه را به یک قطعه خاص تخصیص می‌دهد.

همچنین برای شناسایی قطعه‌های فضای سبز از شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی^۵ (NDVI) استفاده شده است تا پوشش گیاهی با سهولت از سایر پوشش اراضی تمیز داده شود و نمونه‌گیری با دقت بیشتر صورت پذیرد. این شاخص یکی از دقیق‌ترین سنج‌ها برای پایش و استخراج اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی محسوب می‌شود زیرا بر اثر فتوسنتز، دو باند قرمز مرئی و مادون‌قرمز نزدیک به ترتیب به شدت جذب شده و سپس انعکاس می‌یابند. باتوجه به رابطه ۱، NIR انعکاس ناشی از تابش طول موج مادون‌قرمز نزدیک و RED انعکاس ناشی از تابش طول موج قرمز مرئی است. NDVI بیشتر به معنی پوشش گیاهی دارای تراکم و شادابی بیشتر است.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad \text{رابطه ۱}$$

مقادیر این شاخص از ۱- تا ۱+ متغیر است؛ به‌گونه‌ای که مقدار ۱+ نشان‌دهنده تراکم بالای پوشش گیاهی و مقدار ۱- نمایانگر عدم وجود پوشش گیاهی در محدوده مورد بررسی است. در این پژوهش آستانه تعیین کننده فضای سبز به روش آزمون و خطا، مقدار ۰/۱۷ تعیین شد. بر این اساس سگمنت‌هایی که میانگین شاخص NDVI در پیکسل‌های تشکیل دهنده آن‌ها بیشتر از این مقدار باشد به عنوان فضای سبز در نظر گرفته می‌شوند. انواع طبقات نقشه نهایی با توجه به هدف پژوهش شامل دو مورد بوده است: ۱- پوشش فضای سبز ۲- سایر کاربری‌ها. در نتیجه نقشه به روز پوشش گیاهی شهر تهران با کیفیت بالا (قدرت تفکیک ۱۰ متر) به دست آمده است. ارزیابی دقت طبقه‌بندی، معمولاً با مقایسه نقشه مرجع یا واقعیت

۱. به این دلیل در نقشه ورودی اولیه به نرم‌افزار Fragstats، حاشیه شهر تهران تا ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است که سلول‌های نزدیک به مرز سیاسی کلانشهر تهران، فاقد محاسبات افقی در شعاع ۵۰۰ متر نشود.

2. Georeferencing

3. Pixel based and Object based Classification

4. Segmentation

5. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

زمینی با نقشه حاصل از روش‌های مختلف طبقه‌بندی و تولید ماتریس خطا^۱ انجام می‌پذیرد. همانطور که گفته شد، ارزیابی نتایج طبقه‌بندی یکی از مراحل مهم پس از طبقه‌بندی است. برای ارزیابی صحت تصویر طبقه‌بندی شده از نقاط کنترل زمینی (۲۰۰ نمونه مکانی پراکنده در مناطق غیرصعب‌العبور با انتخاب به صورت تصادفی) که بوسیله سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS از سطح شهر تهران برداشت شده بودند، استفاده شد. به این ترتیب معیار دقت کلی ۸۹/۰۹ درصد و مقدار ضریب کاپا^۲ حدود ۸۴ درصد محاسبه شدند که قابل قبول است.

در انتخاب سنجه‌های سیمای سرزمین برای ارزیابی ترکیب و توزیع ساختار سیمای سرزمین و پیوستگی آن، ملاک‌های خاصی را باید مدنظر داشت که مهم‌ترین آن‌ها به این شرح است (Umer et al., 2023; Alemohammad & et al., 2022; Nowosad & Hesselbarth, 2024; Zatelli et al., 2019): ۱. سادگی، دقت و تفسیرپذیری بالا برای تسهیل در تحلیل و تصمیم‌گیری؛ ۲. اجتناب از هم‌پوشانی مفهومی بین سنجه‌ها به منظور حفظ استقلال ریاضیاتی و جلوگیری از نتایج تکراری یا اغراق‌آمیز؛ ۳. سازگاری کامل با روش پنجره متحرک و امکان تولید نقشه در مقیاس خرد شهری؛ ۴. قابلیت ادامه تحلیل‌ها و تعمیم‌پذیری آن‌ها در مقیاس‌های بزرگ‌تر و ۵. انطباق با مفهوم پیوستگی ساختاری از طریق پوشش سه ویژگی کلیدی شامل فراوانی، مجاورت و شکل لکه‌ها که بر ارائه خدمات بوم‌سازگانی اثرگذارند. برخی سنجه‌های سیمای سرزمین، این ویژگی‌ها را در کنار یکدیگر، به صورت توأمان دارا هستند و در نتیجه نمایه حاصل از تلفیق آنها امکان تحلیل دقیق پیوستگی ساختاری را فراهم می‌کند. مهم‌ترین این سنجه‌ها چنین هستند:

۱- سنجه PLAND^۳، بیانگر میزان فراوانی و تراکم پوشش سبز در واحد سطح است و بدون در نظر گرفتن موقعیت مکانی لکه‌ها، درصد مساحت طبقه فضای سبز نسبت به کل سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. از آن به عنوان شاخص پایه برای شناسایی نواحی دارای کمبود فضای سبز استفاده می‌شود. در مناطقی که مقدار این سنجه صفر است، فقدان کامل فضای سبز وجود دارد. در رابطه ۲، a_{ij} ، مساحت لکه j از طبقه i است. طبقه i همان فضای سبز است. A ، مساحت کل سیمای سرزمین در پنجره متحرک است. n ، تعداد کل لکه‌های طبقه i است (رابطه ۲).

$$PLAND = \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

۲- سنجه PROX^۴، میزان مجاورت فضایی لکه مرجع را با سایر لکه‌های هم‌نوع در شعاع مشخص (در این پژوهش ۷۰۰ متر) ارزیابی می‌کند. این سنجه با ترکیب اندازه و فاصله لکه‌ها، ارتباط بوم‌شناختی آن‌ها را می‌سنجد و حتی در مناطق با فضای سبز محدود نیز عملکرد دقیقی دارد. مقادیر بالاتر آن، نشان‌دهنده همجواری و تجمع بیشتر لکه‌های فضای سبز است. مرکز لکه i در مرکز این شعاع است. در رابطه ۳، a_{ik} ، مساحت لکه k در درون شعاع مورد نظر است. d_{ik} ، فاصله لکه i تا لکه k است (فاصله مرکز به مرکز دو لکه i و k). m ، تعداد لکه‌های مجاور در شعاع مشخص اطراف لکه i است (رابطه ۳).

$$PROX_{ij} = \sum_{k=1}^m \left(\frac{a_{ik}}{d_{ik}^2} \right) \quad \text{رابطه ۳}$$

۳- سنجه LSI^۵، معرف شکل و میزان پیچیدگی و یکپارچگی درونی لکه‌های فضای سبز است. این سنجه، در سطح سیمای سرزمین، نسبت محیط به مساحت لکه‌های سبز را می‌سنجد. مقادیر کمتر، بیانگر لکه‌های فشرده‌تر و یکپارچه‌تر است و مقادیر بیشتر نشانه شکل‌های پیچیده، نامنظم، دنداندار و پراکنده است که منتج به افزایش تهدیدپذیری و آسیب‌پذیری خواهد شد. مقدار حداقل برابر با ۱ است و لکه‌های کاملاً فشرده را نشان می‌دهد که نشان از یکپارچگی درونی و ثبات بوم‌شناختی دارد. در رابطه ۴، E ، محیط کل طبقه (جمع محیط‌های همه لکه‌های طبقه) است. A ، مساحت کل طبقه است.

1. Error Matrix
2. Kappa Coefficient
3. Percentage of Landscape
4. Proximity
5. Landscape Shape Index

$$LSI = \frac{E}{(4 \times \sqrt{A})} \quad \text{رابطه ۴}$$

هر یک از این سه سنجه به یک سؤال بنیادین پاسخ می‌دهد. PLAND می‌پرسد آیا فضای سبز وجود دارد و چقدر؟ PROX می‌پرسد لکه‌ها چقدر به هم نزدیک و در ارتباط هستند؟ LSI می‌پرسد آیا لکه‌ها شکل منسجمی دارند یا مرزهای پیچیده‌ای دارند؟ پس تلفیق این سه سنجه، تصویری چندبعدی از پیوستگی ساختاری فراهم می‌کند.

در این تحقیق، از نرم‌افزار ArcGIS برای تهیه و تدارک داده‌های ورودی به نرم‌افزار تخصصی Fragstats و انجام برخی تحلیل‌های آمار فضایی استفاده می‌شود. Fragstats، برنامه‌ای برای کمی‌سازی عدم تجانس در ترکیب و توزیع اجزای سیمای سرزمین است که در این پژوهش با روش پنجره متحرک دایره‌ای، سنجه‌های منتخب را برای تمامی واحدهای مطالعاتی محاسبه نموده است. برای این منظور ابتدا سیمای سرزمین به سلول‌های ۱۰ متر در ۱۰ متر تقسیم شده است. هر سلول ۱۰۰ متر مربعی به عنوان یک واحد مطالعاتی است که به آن، یک عدد برای هر سنجه و یک عدد برای نمایه پیوستگی شبکه فضای سبز اختصاص داده شده است. اما برای محاسبه این اعداد به ازای هر سلول، شعاع پنجره متحرک ۵۰۰ متری از مرکز آنها مبنای ارزیابی است تا ارتباطات افقی سیمای سرزمین در محدوده اطراف نادیده گرفته نشود.

پنجره دایره‌ای با شعاع ۵۰۰ متر بر روی تمامی سلول‌های موجود در سیمای سرزمین قرار گرفته و عدد به دست آمده را به سلول مرکزی اختصاص داده است. با تکرار این فرایند برای همه سلول‌ها، نقشه سنجه‌ها و نقشه پیوستگی شبکه فضای سبز به دست آمده است. استفاده از جدول مقایسات زوجی بر پایه مقیاس ۱ تا ۹، سبب مشخص شدن اهمیت نسبی سنجه‌ها در تبیین نمایه پیوستگی نهایی می‌شود. بر اساس جدول ۲، PLAND نسبت به PROX و LSI اهمیت بالاتری دارد. LSI در پایین‌ترین سطح اهمیت قرار دارد. سپس در نرم‌افزار Expert Choise با روش بردار ویژه (Eigen Vector)، وزن‌های نهایی استخراج شد. PLAND با وزن ۰/۵۲، نقش بنیادین دارد به دلیل اهمیت فراوانی کمی فضای سبز. PROX با وزن ۰/۳، نقش میانی دارد به عنوان نماینده مجاورت و ارتباط فضایی لکه‌ها. کمترین وزن متعلق به LSI است به مقدار ۰/۱۸. به دلیل اهمیت پیچیدگی شکلی.

جدول ۲. مقایسات زوجی سه سنجه منتخب برای وزن‌دهی آن‌ها

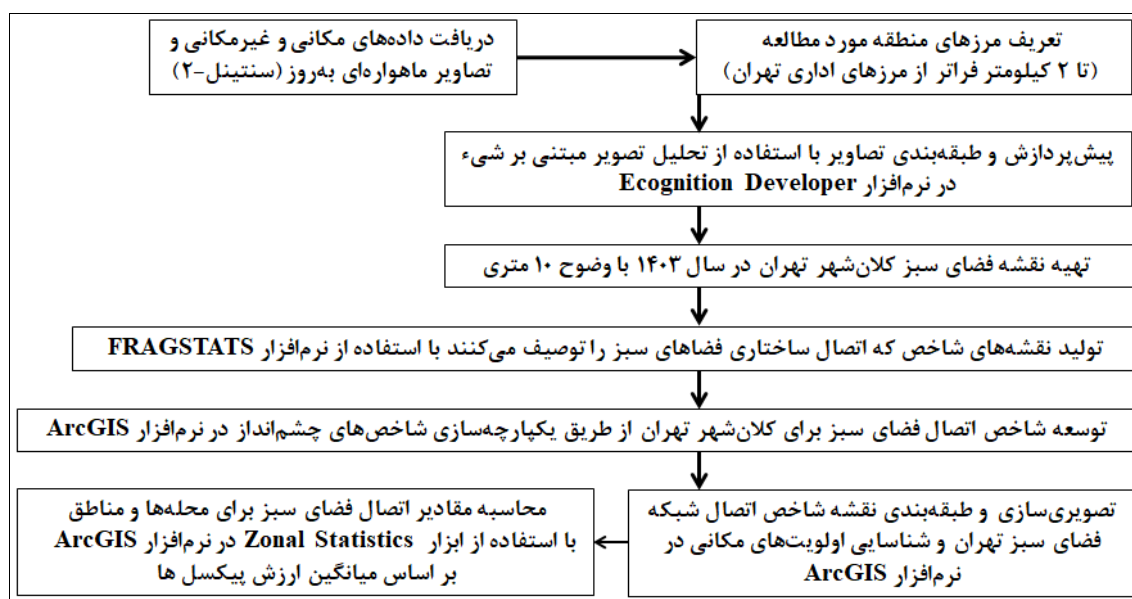
سنجه‌ها	PLAND	PROX	LSI
PLAND	۱	۲	۳
PROX	۰/۵	۱	۲
LSI	۰/۳۳	۰/۵	۱

به‌منظور نرمال‌سازی، سنجه PLAND در هر پنجره متحرک، بر عدد ۱۰۰ تقسیم می‌شود تا مقدار آن از حالت درصد به یک عدد اعشاری بین صفر و یک تبدیل گردد. همچنین سنجه PROX در هر پنجره متحرک به بیشینه مقدار آن در کل سیمای سرزمین تقسیم شد تا در بازه نرمال صفر تا یک قرار گیرد. در نهایت سنجه LSI، نسبت به بیشینه مقدار خود سنجیده شده و از عدد یک کم شده است. با این کار، یکپارچگی بالاتر شکل لکه‌ها، تأثیر افزایشی در نمایه پیوستگی خواهد داشت، زیرا ذاتاً لکه‌های منسجم‌تر، سبب LSI کمتر می‌شوند. به این ترتیب هر سه سنجه در یک چارچوب محاسباتی یکسان و هماهنگ قرار گرفتند. از آنجاکه به کمک نرم‌افزار GIS، تمام سنجه‌ها در بازه صفر تا یک نرمال شده و وزن‌ها نیز به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که جمع آن‌ها برابر با یک است، از اینرو نمایه پیوستگی قادر است نمایی دقیق، عینی و قابل فهم از وضعیت پیوستگی شبکه فضای سبز در هر منطقه شهری ارائه دهد. مقدار صفر نشان‌دهنده حداقل پیوستگی و مقدار یک نمایانگر بیشترین درجه پیوستگی شبکه فضای سبز است. سپس عملیات جبری سنجه‌های وزن‌دار نرمال شده با روی هم‌اندازی در نرم‌افزار GIS انجام می‌شود. رابطه ۵، نمایه ترکیبی را نشان می‌دهد که توسط آن مقدار نمایه پیوستگی برای هر پنجره محاسبه شده است.

$$= \text{Conectivity Index}_{local}$$

$$\left(0.52 \times \frac{PLAND}{100}\right) + \left(0.3 \times \frac{PROX_{Mean}}{PROX_{max}}\right) + \left(0.18 \times \left(1 - \frac{LSI}{LSI_{max}}\right)\right) \quad \text{رابطه ۵}$$

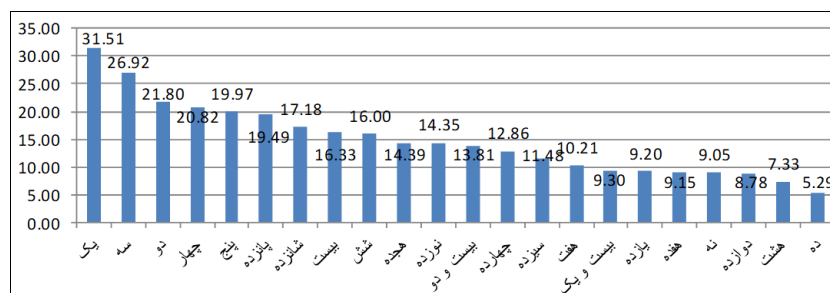
مقادیر این نمایه ابتدا به ازای هر پیکسل در واحد خرد (پنجره متحرک) محاسبه می شود. با استفاده از آمار پهنه‌ای^۱ در GIS، میانگین امتیاز پیوستگی فضای سبز برای پیکسل‌های هر پهنه (مناطق یا محلات شهری) به دست آمده است. با مقایسه رتبه این پهنه‌ها، بینش مدیریتی به منظور حفظ و تقویت پیوستگی شبکه فضای سبز به صورت عادلانه کسب شده است. شکل ۳، مدل کامل فرایندی این پژوهش است.



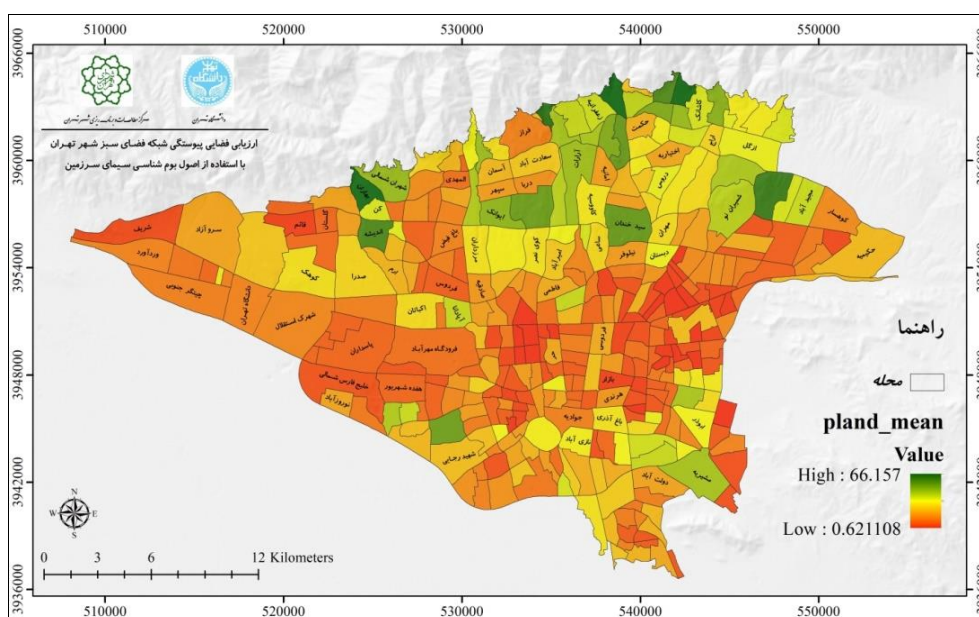
شکل ۳. چارچوب مراحل و مدل فرایندی انجام پژوهش

نتایج

شکل ۴، نمودار مقادیر سنجه PLAND را برای همه مناطق بیست و دوگانه تهران مقایسه می کند. مناطق ۱ (۳۱/۵۱ درصد)، ۳ (۲۶/۹۲ درصد)، ۲ (۲۱/۸۰ درصد)، ۴ (۲۰/۸۲ درصد) و ۵ (۱۹/۹۷ درصد)، بالاترین مقادیر PLAND را دارند. می توان این مناطق، کانون های اصلی فضای سبز هستند. در مقابل، مناطق ۱۰ (۵/۲۹)، ۸ (۷/۳۳)، ۱۲ (۸/۷۸)، ۹ (۹/۰۵) و ۱۹ (۹/۱۵)، کمترین مقادیر PLAND را دارند. شرایط نشان از وضعیت خیلی ضعیف فضای سبز در مناطق ۱۰، ۸ و ۱۲ و وضعیت ضعیف در مناطق ۹ و ۱۷ دارد. شکل ۵، این سنجه را به تفکیک محلات شهر تهران نشان می دهد. محله بهاران از منطقه ۵ (۶۶/۱۶ درصد)، دربند از منطقه ۱ (۵۶/۴۶ درصد)، نیاوران از منطقه ۱ (۵۰/۲۵ درصد)، درکه از منطقه ۱ (۴۸/۶۱ درصد) و قاسم آباد ده نارمک از منطقه ۴ (۴۷ درصد)، بالاترین مقادیر PLAND را دارند. این مقادیر نسبتاً بالا نشان می دهد که در این محلات، سطح پوشش فضای سبز به طور قابل توجهی بالاتر از سایر محلات است. در مقابل، محلات دلگشا از منطقه ۱۴ (۰/۶۲)، دهقان گرگان از منطقه ۷ (۰/۶۵)، افسریه شمالی از منطقه ۱۵ (۰/۶۷)، امام خمینی از منطقه ۱۰ (۰/۷۶) و سلسبیل از منطقه ۱۰ (۰/۸۱)، کمترین مقادیر PLAND را دارند. این اعداد نشان دهنده کمبود شدید سطح فضای سبز در محلات شرقی، مرکزی و غربی تهران و وضعیت نسبتاً بهتر در محلات شمالی شهر تهران است. محلات دارای رنگ قرمز و نارنجی به ترتیب بالاترین اولویت را به لحاظ نیاز به خط مشی توسعه و مداخلات برنامه ریزی شده دارند.

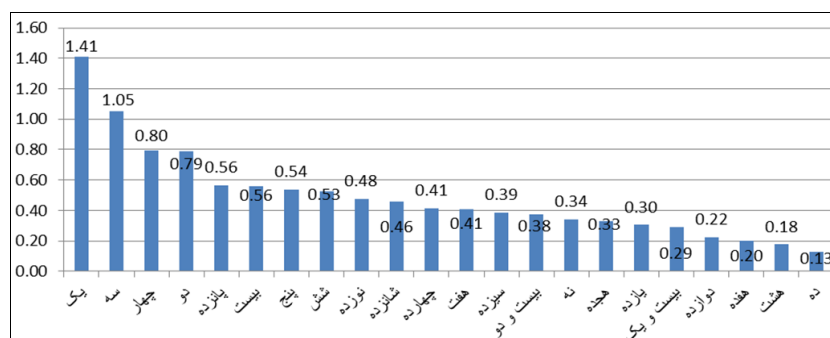


شکل ۴. مقایسه مقدار سنج PLAND به ازای تمامی مناطق شهر تهران

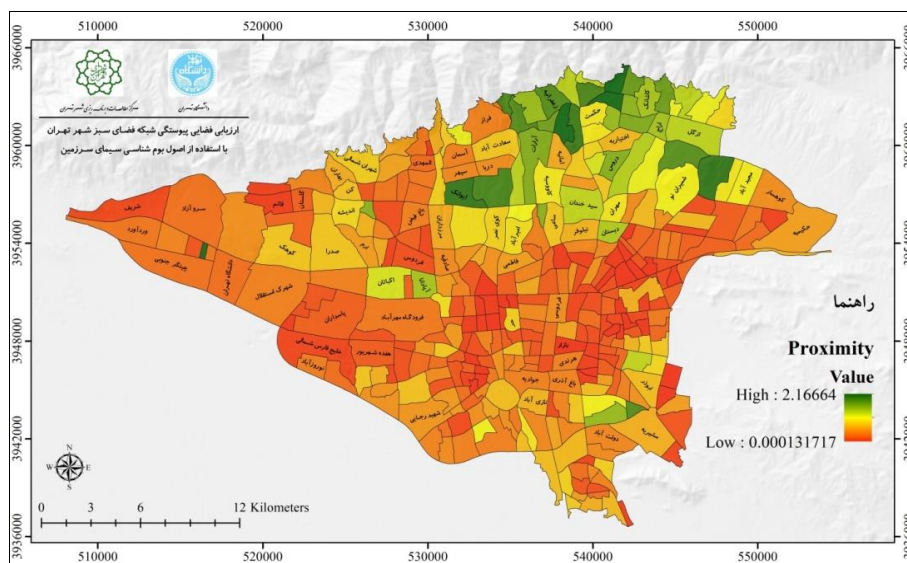


شکل ۵. سنج PLAND به ازای محلات شهر تهران

شکل ۶، نمودار مقادیر سنجه PROX را برای مناطق مقایسه می‌کند. در مناطق ۱ (۱/۴۱)، ۳ (۱/۰۵)، ۴ (۰/۸ متر)، ۲ (۰/۷۹) و ۱۵ (۰/۵۶)، لکه‌های فضای سبز از نظر جغرافیایی به یکدیگر نزدیک‌تر هستند و امکان ارتباط کاربردی بین آن‌ها بیشتر است. اما در مناطق ۱۰ (۰/۱۳)، ۸ (۰/۱۸)، ۱۷ (۰/۲۰)، ۱۲ (۰/۲۲) و ۲۱ (۰/۲۹)، پراکندگی و گسستگی لکه‌ها بیشتر است. بر اساس شکل ۷، این سنج در محلات دزاشیب از منطقه ۱ (۲/۱۷)، باغ فردوس منطقه ۱ (۲/۱۰)، چیتگر شمالی منطقه ۲۱ (۲/۰۹)، جماران منطقه ۱ (۱/۹۸) و قاسم آباد ده نارمک منطقه ۴ (۱/۸۹)، بالاترین مقادیر را دارد. اما محلات وحیدیه منطقه ۸، جمهوری منطقه ۱۱، دلگشا منطقه ۱۴، کارون منطقه ۱۰ و حشمت الله جمالزاده منطقه ۱۱، ارزش صفر دارند که نشان‌دهنده پراکندگی و گسستگی لکه‌ها در این مناطق است. این یافته‌ها گویای آن است که در برخی محلات، به‌رغم وجود فضای سبز، لکه‌ها به‌صورت جزایری جداگانه عمل می‌کنند و ارتباطات فضایی بین آن‌ها ضعیف است.

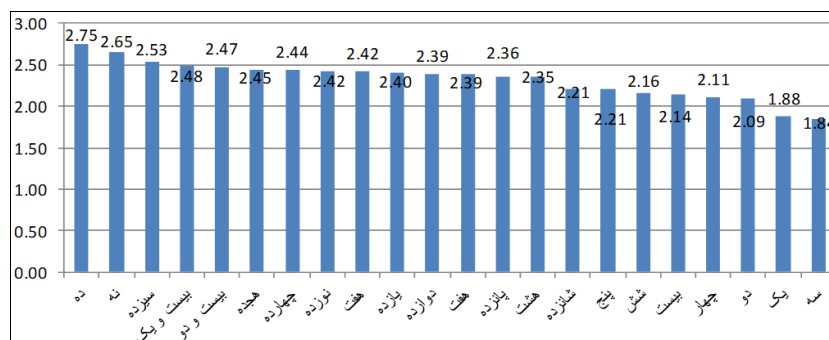


شکل ۶. مقایسه مقدار سنج PROX به ازای تمامی مناطق شهر تهران



شکل ۷. سنجه PROX به ازای محلات شهر تهران

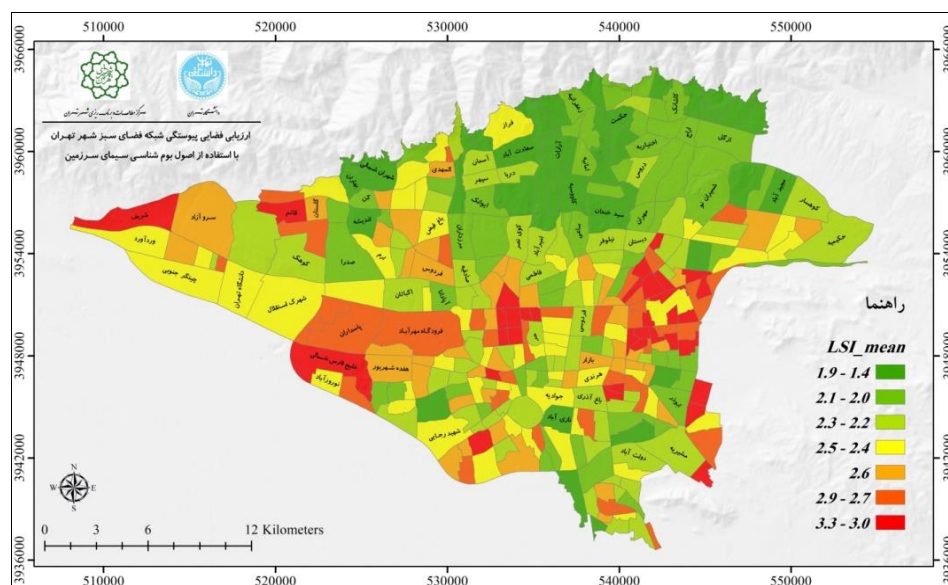
شکل ۸، مقادیر سنجه LSI را برای همه مناطق تهران مقایسه می‌کند. مناطق ۱۰ (۲/۷۵)، ۹ (۲/۶۵)، ۱۳ (۲/۵۳)، ۲۱ (۲/۴۸) و ۲۲ (۲/۴۷)، بالاترین مقادیر را دارند که یعنی لکه‌های فضای سبز در این مناطق، اشکالی پیچیده‌تر و خطوط مرزی ناهموارتر دارند که می‌تواند تحت تأثیر مداخلات انسانی بیشتر باشد. برعکس، مناطق ۳ (۱/۸۴)، ۱ (۱/۸۸)، ۲ (۲/۰۹)، ۴ (۲/۱۱) و ۲۰ (۲/۱۴)، دارای پایین‌ترین مقادیر هستند. بر اساس شکل ۹، این سنجه در محلات کارون از منطقه ۱۰ (۳/۲۷)، افسریه شمالی از منطقه ۱۵ (۳/۲۶)، سلسبیل از منطقه ۱۰ (۳/۲۱)، امام خمینی منطقه ۱۰ (۳/۱۸) و مجیدیه منطقه ۸ (۳/۱۶)، بالاترین مقادیر را دارند. محلات بهاران از منطقه ۵ (۱/۴۲)، کوثر از منطقه ۱ (۱/۴۶)، دربند از منطقه ۱ (۱/۵۹)، قاسم آباد ده نارمک از منطقه ۴ (۱/۷۰) و اندیشه از منطقه ۵ (۱/۷۱)، دارای پایین‌ترین مقادیر هستند که نشان‌دهنده هندسه منظم‌تر لکه‌ها و ساختار بوم‌شناختی، بارزتر است.



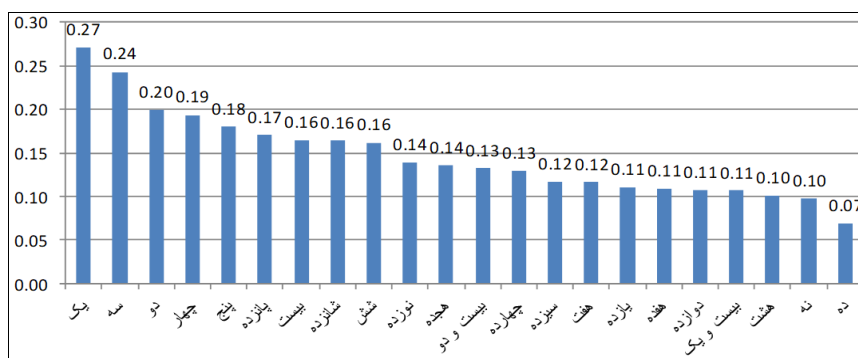
شکل ۸. مقایسه مقدار سنجه LSI به ازای تمامی مناطق شهر تهران

بر اساس شکل ۱۰، بدترین وضعیت (کمترین میزان پیوستگی) به ترتیب مربوط به مناطق ۱۰، ۹، ۸، ۲۱، ۱۲، ۱۷، ۱۱، ۷، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۱۸، ۱۹، ۶، ۱۶، ۲۰، ۱۵، ۵، ۴، ۲، ۳ و ۱ است. منطقه ۱ مناسب‌ترین وضعیت را به لحاظ پیوستگی شبکه فضای سبز دارد. بر اساس شکل ۱۱، محلات بهاران از منطقه ۵ (۰/۴۶)، دربند از منطقه ۱ (۰/۴۱)، نیاوران از منطقه ۱ (۰/۳۸)، درکه از منطقه ۱ (۰/۳۷) و قاسم آباد ده نارمک از منطقه ۴ (۰/۳۷)، جماران منطقه ۱ (۰/۳۴)، اندیشه منطقه ۵ (۰/۳۴)، تجریش منطقه ۱ (۰/۳۳)، شهرک غرب منطقه ۲ (۰/۳۲) و سید خندان از منطقه ۳ (۰/۳۲)، در بالاترین رتبه قرار دارند. این محلات وضعیت مطلوب‌تری از نظر پیوستگی و یکپارچگی کلی شبکه فضای سبز دارند. محلات افسریه شمالی از منطقه ۱۵ (۰/۰۲)، کارون از منطقه ۱۰ (۰/۰۲)، سرسبیل از منطقه ۱۰ (۰/۰۲)، امام خمینی از منطقه ۱۰ (۰/۰۲)، وحیدیه از منطقه ۸ (۰/۰۳) و مجیدیه از منطقه ۸ (۰/۰۳)، دهقان از منطقه ۱۳ (۰/۰۳)، دهقان گرگان از منطقه ۷ (۰/۰۳)، دلگشا از

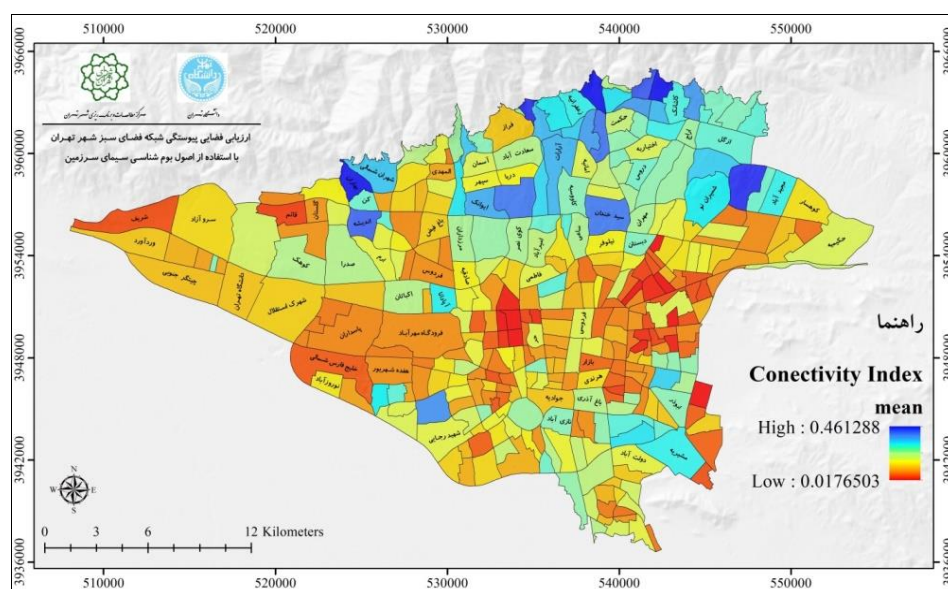
منطقه ۱۴ (۰/۰۳) و توحید از منطقه ۲ (۰/۰۳)، کمترین مقادیر این نمایه را دارند که ضرورت مداخلات فوری و برنامه‌ریزی‌های هدفمند برای بهبود پیوستگی شبکه فضای سبز در این مناطق را برجسته می‌کند.



شکل ۹. سنجه LSI به ازای محلات شهر تهران



شکل ۱۰. مقایسه مقدار نمایه پیوستگی به ازای تمامی مناطق شهر تهران



شکل ۱۱. نمایه پیوستگی به ازای محلات شهر تهران

بحث

مطالعات مرتبط با ارزیابی و برنامه‌ریزی در حوزه محیط‌زیست شهری، به طور روزافزون بر لزوم صیانت از پوشش‌های سبز موجود، بازآفرینی پیکربندی‌های فضایی جدید و حفظ و بازیابی پیوندهای کارکردی بین مؤلفه‌های اصلی ساختار شهری تأکید دارند. در چارچوب نظریه بوم‌شناسی سیمای سرزمین که یکی از رویکردهای کلیدی در تحلیل سیستم‌های طبیعی در بستر شهری است، ایجاد و تقویت ارتباط میان بوم‌سازگان‌های کوچک و سامانه‌های بزرگ‌تر طبیعی به‌عنوان یک اولویت اساسی شناخته می‌شود. گروهی از پژوهشگران، تمرکز مطالعات خود را بر بازشناسی، تثبیت و ارتقای عناصر ساختاری مهم در شبکه فضای سبز معطوف کرده‌اند که می‌توانند به‌عنوان راهبردی خلاقانه در ارتقای پایداری بوم‌شناختی شهر عمل کنند (معتقد و همکاران، ۱۴۰۲). مفهوم پیوستگی سیمای سرزمین، ابزاری تحلیلی برای سنجش کیفیت پیوند فضاهای سبز به‌شمار می‌آید که به‌طور مستقیم بر فرایندهای بوم‌سازگانی نظیر جریان‌های هیدرولوژیک، الگوهای جابه‌جایی انرژی، انتقال بذر، و انتشار ژن اثرگذار است و این فرایندها را تسریع یا محدود می‌سازد. ساختارهایی که در آنها لکه‌های سبز به‌صورت مؤثرتر به‌واسطهٔ دالان‌های پیوسته و یا لکه‌های سبز واسطه دیگر به هم متصل هستند، می‌توانند پویایی کارکردی بالایی در بوم‌سازگان‌های شهری ایجاد کنند. این پیوندهای ساختاری باعث تقویت پایداری بوم‌شناختی شهر می‌شوند، زیرا در صورت اختلال در بخشی از مسیرها، سایر مسیرهای جایگزین می‌توانند نقش پشتیبان را ایفا کرده و از فروپاشی کارکردهای محیط‌زیستی جلوگیری کنند (Gao & Li, 2024; Zeller et al., 2020).

یافته‌های این پژوهش، به‌صورت کلی با طیفی از مطالعات پیشین که در زمینه فضای سبز شهری کلان‌شهر تهران انجام شده، هم‌راستا و قابل تطبیق است. بررسی‌های متعدد گذشته، چه با استفاده از رویکردهای مشابه و چه با روش‌های تحلیلی دیگر، به این نتیجه رسیده‌اند که شرایط موجود سرانه‌ها و شاخص‌های مرتبط با فضای سبز در تهران، نه از نظر کفایت کمی و نه از نظر توزیع عادلانه، در سطح قابل‌قبول قرار ندارد. در قیاس‌هایی که در چارچوب آن مطالعات صورت گرفته، مشخص شده که تعدادی از مناطق شهری در موقعیت بهتری نسبت به سایر مناطق قرار دارند (محمدی حمیدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نارویی و همکاران، ۱۴۰۱؛ روزبهنی و همکاران، ۱۴۰۰). در برخی از آن تحقیقات تأکید شده است که توزیع جغرافیایی فضای سبز در تهران حالتی خوشه‌ای، پراکنده و بعضاً بدون جهت‌گیری برنامه‌ریزی شده دارد. این الگوها حاکی از فقدان یک خط‌مشی هماهنگ و هدفمند در تخصیص فضاهای سبز در بستر شهری است. به نحوی که گسترش کاربری‌های انسان‌ساخت منجر به تضعیف پیوستگی بستر طبیعی سیمای سرزمین شهری شده است (Alavi et al., 2024; Nasri et al., 2021; Roodsari & Hoseini, 2022; Ghasemi & Saeedi, 2021). تحلیل‌های مکانی در این پژوهش‌ها نه تنها واقعیت‌های فضایی موجود را آشکار می‌سازد، بلکه می‌تواند به‌عنوان پایه طراحی نقشه راه در راستای بهینه‌سازی الگوی زیرساخت‌های سبز در آینده مورد بهره‌برداری قرار گیرد. اما رویکرد نوآورانه که سبب تمایز این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین است به شرح زیر است:

این تحلیل با بررسی نحوه پراکنش، آرایش فضایی و ارتباطات میان لکه‌های سبز در سطوح مختلف (از مقیاس خرد محلی تا گستره محلات و مناطق شهری)، امکان برداشت‌های دقیق‌تری از وضعیت موجود فراهم می‌کند و بستری را برای ارائه راهبردهای مدیریتی مؤثرتر مهیا می‌سازد. برتری دیگر این مطالعه به دقت در انتخاب سنج‌ها بازمی‌گردد. در میان طیف وسیعی از شاخص‌های مطرح‌شده برای توصیف الگوی فضایی سیمای سرزمین، سه سنج کلیدی و کاربردی متناسب با اهداف تحقیق، ویژگی‌های مکانی تهران و مستندات پژوهشی معتبر انتخاب شده‌اند که معرف کمیّت واقعی فضای سبز، ارتباط بین لکه‌ها و پیچیدگی هندسی هستند. PLAND در مقایسه با سنج‌هایی مانند Patch Number یا Patch Density، نه تنها تعداد لکه‌ها، بلکه وسعت و سهم فضایی آنها را نیز در نظر می‌گیرد که برای تحلیل‌های بوم‌شناختی شهر و نوع کاربری زمین مفیدتر است. PROX در قیاس با Cohesion یا Connectance، تفسیر روشن‌تری از پیوند و نزدیکی لکه‌ها ارائه می‌دهد. LSI به طور کارآمدتری نسبت به Edge Density یا PARA، پیچیدگی هندسی لکه‌ها را نمایان می‌کند. برخی سنج‌های رایج همچون Mean Patch Size و Patch Number به دلیل هم‌پوشانی مفهومی با PLAND و ایجاد افزونگی محاسباتی،

کنار گذاشته شده‌اند. سنجه‌هایی مانند Contagion و Interspersion، به دلیل ماهیت کلان‌مقیاس و ناسازگاری با تحلیل پنجره متحرک، از دقت لازم در مقیاس محلی برخوردار نیستند و مناسب تشخیص داده نشدند.

تحقق توسعه پایدار شبکه فضای سبز شهری در گرو اتخاذ تصمیمات مبتنی بر داده و تبیین خط‌مشی‌های محیط‌زیستی مکان‌محور به‌منظور کاهش گسستگی فضایی است. استفاده هدفمند از این سه سنجه و ترکیب تحلیلی آن‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تخصصی، ارزیابی جامعی از پیوستگی فضایی در کلان‌شهر تهران و پهنه‌های مدیریتی درون آن فراهم کرده است که می‌تواند مبنای تصمیم‌سازی‌های مبتنی بر مکان شود. چارچوب ارائه شده در این پژوهش می‌تواند در سایر کلان‌شهرهای ایران و جهان که با مسائل مشابه روبه‌رو هستند، با بومی‌سازی داده‌ها مورداستفاده قرار گیرد.

در مقایسه نتایج این پژوهش با دانش مطالعات قبلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که مناطق شمالی تهران از بالاترین سطح پیوستگی و پایداری بوم‌شناختی برخوردار هستند، حال آنکه مناطق مرکزی، شرقی و بخش‌هایی از غرب، با پراکندگی شدید و ساختاری مواجه هستند. این امر با مطالعاتی (Alemohammad & Ramezani Mehrian, 2025; Ramezani Mehrian, 2022; Roozbahani et al., 2022; Ghasemi & Saeedi, 2021) مطابقت دارد که بر نابرابری فضایی و تضعیف شبکه فضای سبز تهران تأکید کرده‌اند. به طور مشابه، تحقیقات بین‌المللی در شهرهای بزرگ آسیا و اروپا نیز بیانگر آن است که نواحی با پیوستگی بیش‌تر فضای سبز دارای کیفیت محیطی بالاتر و دسترسی عادلانه‌تر به خدمات بوم‌سازگانی هستند (Aleixo et al., 2024; Huang et al., 2021).

از سوی دیگر، یافته‌های حاضر با بعضی مطالعات جهانی تفاوت‌هایی نیز دارد. برای مثال، برخلاف شهرهای پرجمعیت چین و اروپا که بازآفرینی پیوستگی سبز با مداخلات متمرکز و خط‌مشی‌گذاری هماهنگ همراه بوده است (Zhou et al., 2023)، در تهران ضعف در تدوین خط‌مشی یکپارچه و نبود شبکه سبز منسجم، مانع تحقق عدالت محیط‌زیستی شده است. همچنین، نتایج این پژوهش در رابطه با سنجه‌های مطرح که ویژگی‌های متفاوتی را در مناطق مرکزی و جنوبی نشان می‌دهد، مشابه با نتایج مطالعات مربوط به بررسی اثر مداخلات انسانی و توسعه نامتوازن در سایر کلان‌شهرهای در حال توسعه می‌باشد (Gao & Li, 2024; Valente et al., 2022). بنابراین، ضمن تأیید روندهای کلی گزارش شده در ادبیات موضوع، پژوهش حاضر رویکرد خردمقیاس و تحلیل سه‌بعدی را پیاده‌سازی نموده که نوآوری آن در امکان شناسایی دقیق کانون‌های ضعف و قوت پیوستگی سبز شهری در تهران است. برای برنامه‌ریزی مدیریت سبز شهری، تطبیق و تبیین هم‌زمان شباهت‌ها و تفاوت‌های ساختاری شناسایی شده، می‌تواند راهنمای عملی بهبود خط‌مشی‌گذاری و تخصیص منابع آتی باشد.

نتیجه‌گیری

مطالعه و مقایسه شاخص‌های برآمده از دانش بوم‌شناسی سیمای سرزمین در مقیاس‌های متنوع جغرافیایی، امکانی فراهم می‌کند تا الگوهای پراکندگی و یکپارچگی لکه‌های فضای سبز شهری با جزئیات بیشتری شناسایی شود. این بررسی‌ها قادرند مشخص کنند که در کدام نواحی از شهر، پراکندگی فضاهای سبز بیشتر است، در چه مناطقی لکه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر یا از هم فاصله‌دارتر هستند، چه محلاتی میزبان لکه‌هایی با هندسه ساده یا پیچیده هستند، و کدام بخش‌ها از منظر همبستگی فضایی در شرایط بهتری قرار دارند. داده‌های حاصل از تحلیل ساختار فضایی فضاهای سبز در سطوح مختلف، ابزار مهمی برای آشکارسازی نقاط قوت و کاستی‌های ساختاری به شمار می‌آیند. این اطلاعات می‌توانند پایه‌ای مؤثر برای تدوین خط‌مشی مداخلات مکان‌محور با هدف تقویت پیوستگی و پایداری شبکه فضای سبز فراهم سازد. در این پژوهش، یک شاخص تلفیقی طراحی شده که ویژگی‌هایش دقت، شفافیت، منطقی‌پذیری و نقشه‌پذیری است و در سه مقیاس شعاع محلی (۵۰۰ متر)، محله و منطقه شهری قابل‌سنجش، تحلیل و اعتماد است.

بخش‌های مرکزی، شرقی، غربی و جنوبی تهران با ضعف در پیوستگی ساختاری فضاهای سبز مواجه‌اند، درحالی‌که نواحی شمالی از شرایط مطلوب‌تری برخوردارند. تحلیل آماری در مقیاس مناطق شهری، وجود فاصله‌ای آشکار میان مناطق شمالی (مناطق ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) و مناطق میانی و پیرامونی شهر (مناطق ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۲) را از نظر پیوستگی فضایی نمایان می‌سازد. در این میان، مناطق جنوبی (۱۵، ۱۶، ۲۰) موقعیتی میانه دارند. منطقه

۱ از نظر پیوستگی شبکه سبز، جایگاه مطلوب‌تری نسبت به سایر مناطق دارد. با هدف ارتقای عدالت محیط‌زیستی و بهبود دسترسی به فضاهای سبز برای همه گروه‌های جمعیتی، ضروری است که اقدامات آینده و تخصیص منابع به‌گونه‌ای هدایت شوند که هم محله‌های محروم در مناطق کمتر برخوردار و هم نقاط کمتر توسعه‌یافته در مناطق برخوردار را دربرگیرد. ادغام و تحلیل ویژگی‌های فراوانی، مجاورت و شکل لکه‌های سبز، در این مطالعه زمینه‌ای فراهم کرده است تا تصویری دقیق و تحلیلی از الگوی گسستگی‌ها و ظرفیت‌های موجود برای بازسازی و توسعه پایدار شبکه فضای سبز در سطح کلانشهر تهران فراهم آید، تصویری که می‌تواند به‌عنوان راهنمایی مؤثر در برنامه‌ریزی فضایی استفاده شود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، از محل قرارداد شماره ۱۳۷/۱۰۷۰۹۹۲ با معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تهران با عنوان "ارزیابی فضایی پیوستگی شبکه فضای سبز شهر تهران با استفاده از اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین" انجام شده است. در این زمینه از راهنمایی‌های ارزشمند آقای دکتر یوسف رفیعی راهبر محترم پروژه بسیار سپاسگزاریم.

منابع

- آل محمد، سیده؛ رمضانی مهران، مجید (۱۴۰۴). نیازسنجی پهنه‌های شهری برای تقویت و گسترش فضای سبز با تاکید بر عدالت فضایی (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران). *فصلنامه علمی راهبرد*، ۳۴ (۲)، ۳۱-۵۴. <https://doi.org/10.22034/rahbord.2025.515861.1802>
- امیدپور، مریم؛ سیاح نیا، رومینا؛ رضایی، یوسف (۱۳۹۹). تأثیر روند رشد و توسعه شهری بر ساختار شبکه اکولوژیک با رویکرد تاب‌آوری و سیمای سرزمین (مورد مطالعه شهر همدان). *نشریه سنجش‌زدور و GIS/یران*، ۱۲ (۲)، ۱۹-۳۲. <https://doi.org/10.52547/gisj.12.2.19>
- حسن‌پور، پرستو؛ سیاح‌نیا، رومینا؛ اسماعیل زاده، حسن (۱۳۹۹). ارزیابی ساختار اکولوژیکی فضای سبز شهری با رویکرد سیمای سرزمین (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ تهران). *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۸ (۱)، ۱۸۷-۲۰۲. <https://doi.org/10.29252/envs.18.1.187>
- رمضانی مهران، مجید (۱۴۰۱). ارزیابی کیفیت ساختاری شبکه فضای سبز در محیط‌های شهری- مطالعه موردی منطقه ۱۶ شهرداری تهران. *پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری*، ۱۰ (۱)، ۸۱-۹۹. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2022.325283.1535>
- روزبهرانی، مهران؛ جانبازقبادی، غلامرضا؛ متولی، صدرالدین؛ عظیمی آملی، جلال (۱۴۰۰). آشکارسازی و تحلیل منطقه‌ای تغییرات پوشش سبز شهری در مناطق ۲۲گانه شهر تهران. *فصلنامه علمی پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری*، ۱۲ (۵)، ۳۷-۵۸. <https://doi.org/10.30473/grup.2022.8708>
- صابونچی، پریچهر؛ ابرقویی، حمیده؛ متدین، حشمت‌اله (۱۳۹۷). شبکه‌های سبز منظرین؛ نقش مفصل‌بندی در یکپارچگی فضاهای سبز در منظر شهرهای معاصر ایران. *باغ‌نظر*، ۱۵ (۶۲)، ۵-۱۶. <https://doi.org/10.22034/bagh.2018.6628>
- علیپور، عباس؛ باقری، میلاد؛ چارکانه، خالق؛ محمودی چناری، حبیب؛ خداداد، مهدی (۱۳۹۸). تجزیه و تحلیل کیفیت و اثرات محیط زیستی فضاهای سبز شهری (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران). *توسعه پایدار محیط جغرافیایی*، ۱ (۱)، ۳۳-۴۲. <https://doi.org/10.52547/sdge.1.1.33>
- فتوحی، امید؛ برق جلوه، شهیندخت (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی شبکه‌های بوم‌شناختی سیمای سرزمین شهری (مطالعه موردی: شهر تهران). *محیط‌شناسی*، ۴۴ (۲)، ۲۷۷-۲۹۷. <https://doi.org/10.22059/jes.2018.243435.1007520>
- کوخانی، طاهره؛ مثنوی، محمدرضا (۱۳۹۳). طراحی محیطی زیرساخت‌های اکولوژیک منظر شهری با استفاده از اصل پیوستگی با انشعابات (AWOP) به‌منظور ارتقای کیفیت زندگی شهری (مطالعه موردی: منطقه دو شهرداری تهران). *محیط‌شناسی*، ۴۰ (۳)، ۵۷۲-۵۵۹. <https://doi.org/10.22059/jes.2014.52205>
- محمدی حمیدی، سمیه؛ نظم‌فر، حسین؛ اکبری، مجید (۱۳۹۹). تحلیل فضایی پارک‌ها و فضاهای سبز شهری با استفاده از مدل کوپراس و GIS (مورد مطالعه: مناطق ۲۲گانه شهر تهران). *پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، ۵۲ (۲)، ۴۳۷-۴۵۵. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2018.248988.1007610>
- معتقد، محمد؛ سجاذزاده، حسن؛ ایزدی، محمد سعید (۱۴۰۲). تبیین مدل مفهومی شبکه سبز شهری از منظر علوم محیطی. *جغرافیا و*

- برنامه ریزی محیطی. ۳۴ (۳)، ۶۵-۹۴. <https://doi.org/10.22108/gep.2022.133689.1526>
- ناروئی، بهروز؛ برق جلوه، شهیندخت؛ اسماعیل‌زاده، حسن؛ زبردست، لعبت (۱۴۰۱). ارزیابی تغییرات فضایی - زمانی زیرساخت سبز شهری مبتنی بر الگوریتم درخت تصمیم‌گیری فرایندهای فضایی - مطالعه موردی: سیمای سرزمین تهران. *فصلنامه علمی - پژوهشی/اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۳۱ (۱۲۲)، ۱۶۷-۱۸۸. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2022.254788>
- ناصحی، سعیده؛ آل محمد، سیده؛ رضائی مهران، مجید؛ مبرقی دینان، نغمه (۱۴۰۲). تدوین راهبردهای پایداری زیرساخت‌های سبز شهری با استفاده از ارزیابی تغییرات سیمای سرزمین (مطالعه موردی: منطقه دو کلان‌شهر تهران). *جغرافیا و پایداری محیط*. ۱۳ (۲)، ۹۵-۱۱۴. <https://doi.org/10.22126/ges.2023.8640.2614>
- یزدانه‌ها، مهسا؛ یآوری، احمدرضا؛ زبردست، لعبت؛ آل محمد، سیده (۱۳۹۴). ارزیابی زیرساخت‌های سبز شهری به منظور اصلاح تدریجی آن‌ها در سیمای سرزمین تهران. *محیط‌شناسی*، ۴۱ (۳)، ۶۱۳-۶۲۵. <https://doi.org/10.22059/jes.2015.55900>

References

- Ai, H., Zhang, X., & Zhou, Z. (2023). The impact of greenspace on air pollution: Empirical evidence from China. *Ecol. Indic.* 146, 109881. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109881>
- Alavi, S. A., Esfandi, S., Khavarian-Garmsir, A. R., Tayebi, S., Shamsipour, A., & Sharifi, A. (2024). Assessing the connectivity of urban green spaces for enhanced environmental justice and ecosystem service flow: A study of Tehran using graph theory and least-cost analysis. *Urban Science*, 8(1), 14- 32. <https://doi.org/10.3390/urbansci8010014>.
- Aleixo, C., Branquinho, C., Laanisto, L., Tryjanowski, P., Niinemets, Ü., Moretti, M., & Pinho, P. (2024). Urban Green Connectivity Assessment: A Comparative Study of Datasets in European Cities. *Remote Sensing*, 16(5), 771. <https://doi.org/10.3390/rs16050771>.
- Alemohammad, S., & Ramezani Mehrian, M. (2025). Need Assessment of Urban Zones to Strengthen and Expand Green Space with Emphasis on Spatial Justice (Case Study: Tehran Metropolitan). *Strategy*, 34 (3), 31- 54 <https://doi.org/10.22034/rahbord.2025.515861.1802> (In Persian)
- Alemohammad, S., Yavari, AR., Malek-Mohammadi, B., & Amiri, M. J. (2022). Landscape conservation and protected areas (case of Dena, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(54), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09696-6>.
- Alipour, A., Bagheri, M., Khodadad, M. (2020). Analysis of the quality and environmental effects of urban green spaces (Study: District 10 of Tehran Municipality). *Sustainable Development of Geographical Environment*, 1(1), 33-42. <http://doi/10.52547/sdge.1.1.33>. (In Persian)
- Allahyari, H., & Salehi, E. (2020). Presentation of a suitable approach for green programming of urban ways through integrative method CA-Markov: Case study—Azadi Street of Tehran, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 373-382. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00685-w>
- Ben Messaoud, K., Wang, Y., Jiang, P., Ma, Z., Hou, K., & Dai, F. (2024). Spatial-Temporal Dynamics of Urban Green Spaces in Response to Rapid Urbanization and Urban Expansion in Tunis between 2000 and 2020. *Land*, 13(1), 98. <https://doi.org/10.3390/land13010098>
- Choe, H., Keeley, A.T., Cameron, D.R., Gogol-Prokurat, M.L., Hannah, P.R. & Thorne, J.H. (2021) The influence of model frameworks in spatial planning of regional climate-adaptive connectivity for conservation planning. *Landscape and Urban Planning*, 214(10). 104169. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104169>
- 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>
- Elizbarashvili, N., Meladze, G., Grigolia, L., Sandodze, G., Gogoladze, S., & Gurgenedze, M. (2022). Landscapes—Structure, Functions, and Development Trends (On the Example of Landscapes of Georgia). *Open Journal of Ecology*, 12(1), 81-93. <https://doi.org/10.4236/oje.2022.121005>
- Fang, X.; Li, J.; Ma, Q. (2023). Integrating green infrastructure, ecosystem services and nature-based solutions for urban sustainability: A comprehensive literature review. *Sustain. Cities Soc.* 98,

104843. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104843>
- Fotoohi, O., & Bargh Jelveh, S. (2018). The planning process of an urban landscape system's ecological networks (case study: The city of the Tehran). *Journal of Environmental Studies*, 44(2), 277-297. <http://doi.org/10.22059/jes.2018.243435.1007520>. (In Persian)
- Gao, L., & Li, H. (2024). The effects of landscape patterns on ecosystem services of urban green spaces. *Ecological Indicators*, 160, 113456. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113456>
- García-Llorente, M., Martín-López, B., González, J. A., Baró, F., & Montes, C. (2021). Linking landscape metrics to ecosystem services: A review across spatial scales. *Sustainability*, 14(22), 14876. <https://doi.org/10.3390/su142214876>
- Ghasemi, F., & Saeedi, S. (2021). Spatial analysis and distribution of urban green spaces in Tehran. *Vestnik MGSU*, 16(8), 1045–1057. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1045-1057>.
- Hassanpour, P., Sayyahnia, R., & Esmaeilzadeh, H. (2020). Ecological structure assessment of urban green space using the landscape approach (case study: Tehran's 22nd district). *Environmental Sciences*, 18(1), 187-202. <http://doi.org/10.29252/envs.18.1.187>. (In Persian)
- Hepcan, Ş. (2013). Analyzing the pattern and connectivity of urban green spaces: A case study of Izmir, Turkey. *Urban Ecosystems*, 16, 279-293. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11252-012-0271-2>
- Hesselbarth, M. H. K., Sciaini, M., With, K. A., Wiegand, K., & Nowosad, J. (2019). landscapemetrics: An open-source R tool to calculate landscape metrics. *Ecography*, 42(10), 1648–1657. <https://doi.org/10.1111/ecog.04617>
- Hladnik, D., & Nastran, M. (2023). Landscape Structure and Fragmentation: Key Factors in the Characterisation of Urban and Peri-Urban Forests in Slovenia. *Land*, 12(11), 1968. <https://doi.org/10.3390/land12111968>
- Huang, B. X., Chiou, S. C., & Li, W. Y. (2021). Landscape pattern and ecological network structure in urban green space planning: A case study of Fuzhou city. *Land*, 10(8), 769. <https://doi.org/10.3390/land10080769>
- Kookhaie, T., & Masnavi, M. R. (2014). Environmental Design for Ecological Infrastructure of Urban Landscape through Aggregate with Outlier Principle (AWOP) in Order to Enhance the Quality of Urban Life; the Case of District Two, Tehran City. *Journal of Environmental Studies*, 40(3), 559-572. <http://doi.org/10.22059/jes.2014.52205>. (In Persian)
- Li, Y., Zhang, X., Feng, Y., Xie, H., Jiang, L., & Lei, Z. (2021). Spatiotemporal dynamics of urban green space influenced by rapid urbanization and land use policies in Shanghai. *Forests*, 12(4), 476. <https://doi.org/10.3390/f12040476>
- Liu, Y., Huang, T. T., & Zheng, X. (2022). A method of linking functional and structural connectivity analysis in urban green infrastructure network construction. *Urban Ecosystems*, 25(3), 909-925. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01201-2>
- Mateer, T. J. (2022). Developing connectedness to nature in urban outdoor settings: A potential pathway through awe, solitude, and leisure. *Frontiers in Psychology*, 13, 940939. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.940939>.
- Mohammadi Hamidi, S., Nazmfar, H., & Akbari, M. (2020). Spatial Analysis of Parks and Urban Green spaces by using Copras Models and GIS (Case study: 22 regions of Tehran). *Human Geography Research*, 52(2), 437-455. <http://doi.org/10.22059/jhgr.2018.248988.1007610>. (In Persian)
- 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>
- Moraitis, K. (2024). Composing the Landscape: Analyzing Landscape Architecture as Design Formation. *Land*, 13(6), 827. <https://doi.org/10.3390/land13060827>
- Mortelliti, A., Amori, G., & Boitani, L. (2010). The role of habitat quality in fragmented landscapes: a conceptual overview and prospectus for future research. *Oecologia*, 163(2), 535-547. <http://doi.org/10.1007/s00442-010-1623-3>
- Motaghed, M., Sajadzadeh, H., & Izadi, M. S. (2023). Explaining the Concept of Urban Green Network from the Perspective of Different Sciences by Developing a Theoretical Framework. *Geography and Environmental Planning*, 34(3), 65-94.

- <http://doi/10.22108/gep.2022.133689.1526>. (In Persian)
- Naroei, B., Barghjelveh, S., Esmailzadeh, H., & Zebardast, L. (2022). Evaluating spatial-temporal changes of urban green infrastructure using decision tree algorithm of spatial processes - Case study: Tehran Landscape System. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 31(122), 167-188. <http://doi.org/10.22131/sepehr.2022.254788>. (In Persian)
- Nasehi, S., Alemohammad, S., Ramezani Mehrian, M., & Mobarghei Dinan, N. (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. <http://doi/10.22126/ges.2023.8640.2614>. (In Persian)
- Nasr, T., Jafarpour Ghalehtemouri, K., Khedmatzadeh, A., Mousavi, M. N., & Rajabi, A. (2025). Predicting urban green infrastructures of ecosystem services in Tehran metropolitan area sprawl with Landsat satellite time-series data. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 22(1), 268554. <https://aassjournal.com/article-1-259-en.pdf>
- Nasrabadi, M. T., Morassafar, S., Pourzakarya, M., & Dunning, R. (2023). Investigating the impacts of green spaces planning on social sustainability improvement in Tehran, Iran: a SWOT-AHP analysis. *Local Environment*, 28(5), 681-697. <https://doi.org/10.1080/13549839.2023.2178493>
- Nasri Roodsari, E., & Hoseini, P. (2022). An assessment of the correlation between urban green space supply and socio-economic disparities of Tehran districts—Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 24(10), 12867–12882. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01970-4>.
- Nowosad, J., & Hesselbarth, M. H. (2024). The landscapemetrics and motif packages for measuring landscape patterns and processes. *Ecological Indicators*, 105, 123-134. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.0655>
- Omidpour, M., Sayahnia, R., & Rezaei, Y. (2020). The Impact of Urban Growth and Development Trend on Ecological Network Structure with Resilience and Landscape Approach (Case study of Hamedan). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 12(2), 19-32. <http://doi/10.52547/gisj.12.2.19>. (In Persian)
- Parker, J., & Zingoni de Baro, M. E. (2019). Green infrastructure in the urban environment: A systematic quantitative review. *Sustainability*, 11(11), 3182. <http://doi/10.390/su11113182>
- 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 (GUPR)*, 10(1), 81-99. <http://doi/10.22059/jurbangeo.2022.325283.1535>. (In Persian)
- Romanillos, G., Robazza, G., & Lovato, F. (2024). A fragmented world: mapping the global extent of Anthropogenic Landscape Fragmentation. *Journal of Maps*, 20(1), 2307539.
- Roobahani, M., Janbaz ghobadi, G., Motevalli, S., & Azimi amoli, J. (2022). Detection and District Analysis of Urban Green Space Changes in The 22 Districts of Tehran. *Journal of Urban Ecology Researches*, 12(25), 37-58. <http://doi/10.30473/grup.2022.8708>. (In Persian)
- Saboonchi, P., Abarghouyi, H., & Motedayen, H. (2018). Green Landscape Networks; The role of articulation in the integrity of green space in landscapes of contemporary cities of Iran. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 15(62), 5-16. <http://doi/10.22034/bagh.2018.66280>. (In Persian)
- Suzan, G., Esponda, F., & Hernandez, R. (2012). habitat fragmentation and infectious disease ecology, In book: New Directions in Conservation Medicine: Applied Cases of Ecological Health. Oxford, Editors: Alonso, A., Aguirre, R., Ostfeld, S., & Daszak, 135-150. https://www.researchgate.net/publication/259216401_Habitat_fragmentation_and_infectious_disease_ecology
- Tian, Y., Liu, Y., Jim, C. Y., & Song, H. (2017). Assessing structural connectivity of urban green spaces in metropolitan Hong Kong. *Sustainability*, 9(9), 1653. <https://doi.org/10.3390/su9091653>
- Umer, Y., Jetten, V., Ettema, J., & Steeneveld, G. J. (2023). Assessing the impact of the urban landscape on extreme rainfall characteristics triggering flood hazards. *Hydrology*, 10(1), 15.

<https://doi.org/10.3390/hydrology10010015>

- Valente, D.; Marinelli, M.V.; Lovello, E.M.; Giannuzzi, C.G.; Petrosillo, I. Fostering the Resiliency of Urban Landscape through the Sustainable Spatial Planning of Green Spaces. *Land*, 11, 367. <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/3/367>
- Vardopoulos, I., Maialetti, M., Scarpitta, D., & Salvati, L. (2024). Spatially Explicit Analysis of Landscape Structures, Urban Growth, and Economic Dynamics in Metropolitan Regions. *Urban Science*, 8(4), 150. <http://doi/10.3390/urbansci8040150>
- WHO (2017). Urban Green Space Interventions and Health. World Health Organization. <https://www.who.int/europe/publications/m/item/urban-green-space-interventions-and-health-a-review-of-impacts-and-effectiveness.-full-report>
- Yazdanpanah, M., Yavari, A., Zebardast, L., & Alemohammad, S. (2015). Urban Green Infrastructure Assessment for Their Regeneration in Tehran Landscape. *Journal of Environmental Studies*, 41(3), 613-625. <http://doi/10.22059/jes.2015.55900> (In Persian)
- Zatelli, P., Gobbi, S., Tattoni, C., Cantiani, M. G., La Porta, N., Rocchini, D., Zorzi, N., & Ciolli, M. (2019). Relevance of the Cell Neighborhood Size in Landscape Metrics Evaluation and Free or Open Source Software Implementations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(12), 586. <https://doi.org/10.3390/ijgi8120586>
- Zeller, K. A., Lewison, R., Fletcher Jr, R. J., Tulbure, M. G., & Jennings, M. K. (2020). Understanding the importance of dynamic landscape connectivity. *Land*, 9(9), 303. <https://doi.org/10.3390/land9090303>
- Zhang, J., Wang, L., & Liu, S. (2022). Multiscale spatiotemporal dynamics analysis of urban green space: Implications for green space planning in the rapid urbanizing Hefei City, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 998111. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.998111>
- Zhou, Y., Yao, J., Chen, M., & Tang, M. (2023). Optimizing an urban green space ecological network by coupling structural and functional connectivity: A case for biodiversity conservation planning. *Sustainability*, 15(22), 15818. <https://doi.org/10.3390/su152215818>
- Zięba-Kulawik, K., & Wężyk, P. (2022). Monitoring 3D changes in urban forests using landscape metrics analyses based on multi-temporal remote sensing data. *Land*, 11(6), 883. <https://doi.org/10.3390/land11060883>