IRANIAN JOURNAL OF FOREST AND POPLAR RESEARCH
RIFR

10.22092/ijfpr.2025.368421.2192
Vol. 33, No. 4, Page 330-347 (2026)

Research Article

Urban forest pattern and tree canopy cover assessment in Tehran, Iran: A landscape ecology approach

Mohammad Teymoori [1], Jahangir Feghhi [2*], Afshin Danehkar [3] and Negin Abdollahi [4]

1- Ph.D. Candidate, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2*- Corresponding Author, Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jfeghhi@ut.ac.ir
3- Prof., Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4- M.Sc. Student, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 29.01.2025 Revised: 19.05.2025 Accepted: 05.06.2025

Abstract

Background and Objectives: Urban forestry involves the management and planning of urban tree-covered spaces and forests within city boundaries and plays a crucial role in improving quality of life and urban livability. The importance of urban green spaces, especially in densely populated and compact urban areas, lies in their ability to reduce air pollution, regulate temperature, mitigate urban heat island effects, and enhance citizens' mental health. Given the rapid pace of urbanization and the degradation of green spaces, evaluating the distribution and spatial layout of urban green spaces, particularly in older and central areas such as districts 10, 11, and 12 of Tehran, Iran, is essential. This study aimed to identify urban tree canopy layout patterns, determine green space per capita, and propose strategies to improve the current conditions in these districts.

Methodology: Tree canopy patch maps were prepared for the study areas using high-resolution Google Earth imagery. ArcGIS software and landscape metrics were used to analyze and model the spatial patterns of green space patches. Three types of green space layout patterns were defined: single-tree (isolated trees in residential areas), linear (trees along streets and sidewalks), and clumped (groups of trees in parks and public spaces). Population data for districts and sub-districts were obtained from Tehran Municipality records, and a green space per capita map was developed accordingly. Numerical analyses were conducted using Fragstats software to calculate metrics such as class area (CA), number of patches (NP), landscape shape index (LSI), and mean nearest neighbor distance (ENN_MN). The accuracy of the maps was validated through field observations, resulting in an overall accuracy of 98.5% and a kappa index of 96.12%.

Results: The results revealed that linear layouts occupied the largest area in all three districts, with the highest area recorded in district 11 (103.48 hectares). In contrast, clumped layouts covered smaller areas, mainly in parks and public spaces, and were least prominent in district 10. Single-tree layouts, despite having a greater number of patches, contributed a smaller total area and were primarily observed in high-density residential neighborhoods. In terms of green space per capita, district 12 had the highest value (7.53 m²), whereas district 10 had the lowest (2.16 m²). This disparity highlights significant inequalities in access to green spaces across districts and sub-districts. Landscape metrics analysis demonstrated that LSI and CA are effective tools for

Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (https://ijfpr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

assessing the dispersion and complexity of green space patches. In densely populated areas, green space patches tended to be smaller and more fragmented.
Conclusion: The study concluded that linear layouts, due to their feasibility for implementation along streets and public pathways, are the most suitable option for high-density areas such as districts 10, 11, and 12. Linear layouts can improve air quality, enhance visual aesthetics, and provide shade in urban environments. Meanwhile, clumped layouts, concentrated in parks and gardens, offer greater ecological benefits and are better suited for creating social spaces. For districts with limited green spaces, such as district 10, the development of small local parks and the use of vacant lands for tree planting are recommended. Improving access to green spaces in these areas can reduce environmental inequalities and enhance residents' quality of life. This research provides a practical framework for urban planning and offers actionable strategies for achieving balanced development of urban green spaces.

Keywords: Landscape metrics, modeling, Tehran, urban forestry.

ارزیابی الگوی فضایی جنگل‌های شهری و پوشش تاج درختان در تهران: رویکردی بر پایه بوم‌شناسی سیمای سرزمین

محمد تیموری [۱]، جهانگیر فقهی [۲*]، افشین دانه‌کار [۳] و نگین عبداللهی [۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: jfeghhi@ut.ac.ir

۳- استاد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰ تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

چکیده

سابقه و هدف: جنگل‌داری شهری به‌معنای مدیریت و برنامه‌ریزی برای فضاهای درختی شهری و جنگل‌های موجود در محدوده‌های شهری است که نقش مهمی در بهبود کیفیت زندگی و زیست‌پذیری شهرها ایفا می‌کند. اهمیت فضای سبز شهری، به‌ویژه در منطقه‌های پرتراکم و با بافت فشرده، به‌دلیل تأثیر آن بر کاهش آلودگی هوا، کنترل دمای محیط، کاهش اثرات جزیره‌های حرارتی و افزایش سلامت روانی شهروندان مورد تأکید قرار دارد. باتوجه‌به روند روبه‌رشد شهرنشینی و تخریب فضاهای سبز، ارزیابی توزیع و چیدمان فضاهای سبز درختی شهری، به‌ویژه در منطقه‌های قدیمی و مرکزی مانند منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ شهر تهران، امری ضروری است. هدف این پژوهش، شناسایی الگوهای چیدمان فضای سبز درختی، تعیین سرانه فضای سبز درختی و ارائه راهکارهایی برای بهبود شرایط موجود در این منطقه‌ها است.

مواد و روش‌ها: در پژوهش پیش‌رو، ابتدا نقشه لکه‌های فضای سبز درختی در منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ شهر تهران با استفاده از تصاویر با وضوح زیادِ Google Earth تهیه شد. برای تحلیل و مدل‌سازی چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی از نرم‌افزار ArcGIS و سنجه‌های سیمای سرزمین بهره گرفته شد. سه نوع الگوی چیدمان فضای سبز درختی شامل تک‌پایه (درختان منفرد در بافت مسکونی)، خطی (درختان حاشیه معابر و خیابان‌ها) و کپه‌ای (تجمع درختان در پارک‌ها و فضاهای عمومی) تعریف شدند. داده‌های جمعیتی منطقه‌های مورد مطالعه از منابع شهرداری تهران استخراج شد و نقشه سرانه فضای سبز درختی باتوجه‌به این داده‌ها تهیه شد. تحلیل‌های عددی در نرم‌افزار Fragstats انجام گرفت و سنجه‌هایی مانند مساحت لکه (CA)، تعداد لکه (NP)، شاخص شکل لکه (LSI) و میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه (ENN_MN) محاسبه شدند. دقت نقشه‌های برداشت‌شده فضای سبز درختی با استفاده از برداشت‌های میدانی و شاخص‌های صحت کلی و کاپا ارزیابی شد. صحت کلی نقشه‌ها ۹۸/۵ درصد و شاخص کاپا ۹۶/۱۲ درصد به‌دست آمد.

نتایج: در هر سه منطقه مورد مطالعه، مدل چیدمان خطی، بیشترین مساحت را به‌خود اختصاص داد. به‌طوری‌که این الگو در منطقه ۱۱ با ۱۰۳/۴۸ هکتار، بیشترین مساحت را داشت. در مقابل، چیدمان کپه‌ای با مساحتی کمتر، اغلب در پارک‌ها و فضاهای سبز درختی عمومی مشاهده شد. این چیدمان در منطقه ۱۰ کمترین مساحت را داشت. الگوی مدل چیدمان تک‌پایه با وجود تعداد بیشتر لکه‌ها، سهم کمی ازنظر مساحت را به‌خود اختصاص داد و اغلب در منطقه‌های مسکونی با تراکم زیاد مشاهده شد. ازنظر سرانه فضای سبز درختی، منطقه ۱۲ با ۷/۵۳ متر مربع به‌ازای هر نفر، بیشترین و منطقه ۱۰ با ۲/۱۶ متر مربع برای هر نفر، کمترین مقدار را داشتند. این تفاوت

نشان‌دهنده نابرابری شدید در دسترسی به فضای سبز درختی بین منطقه‌ها و حتی نواحی داخلی هر منطقه است. تحلیل سنجه‌های سیمای سرزمین نشان داد که شاخص‌های شکل لکه و مساحت لکه، سنجه‌های مناسبی برای تهیه مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی هستند. همچنین، در منطقه‌های با تراکم زیادِ جمعیت، لکه‌ها بیشتر به‌صورت پراکنده و کوچک مشاهده شدند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که الگوی چیدمان خطی به‌دلیل قابلیت اجرای آن در امتداد خیابان‌ها و معابر عمومی، مناسب‌ترین گزینه برای منطقه‌های پرتراکم مانند منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ است. توسعه چیدمان خطی می‌تواند به کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت بصری و ایجاد سایه در معابر کمک کند. در عین حال، چیدمان کپه‌ای با تمرکز بیشتر در پارک‌ها و باغ‌ها، خدمات بوم‌شناختی بیشتری ارائه می‌دهد و برای ایجاد فضاهای اجتماعی مناسب‌تر است. برای منطقه‌های با کمبود فضای سبز درختی مانند منطقه ۱۰، توسعه پارک‌های محلی کوچک و استفاده از زمین‌های بایر برای کاشت درختان پیشنهاد می‌شود. بهبود دسترسی به فضای سبز در این منطقه‌ها می‌تواند نابرابری‌های محیط‌زیستی را کاهش و کیفیت زندگی شهروندان را ارتقا دهد. نتایج این پژوهش، ابزاری مفید برای برنامه‌ریزی شهری و راهکارهایی عملی برای توسعه متوازنِ فضای سبز درختی شهری ارائه داده است.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌داری شهری، سنجه‌های سیمای سرزمین، شهر تهران، مدل‌سازی.

مقدمه

جنگل‌های شهری، طیف وسیعی از خدمات بوم‌سازگانی را برای ساکنان شهری فراهم می‌کنند و برای توسعه پایدار شهری اهمیت دارند (Goddard *et al.*, 2010; McGovern & Pasher, 2016). بااین‌حال، فضاهای سبز شهری به‌دلیل تراکم جمعیت در حال از بین رفتن و تکه‌تکه شدن هستند (Haaland & van den Bosch, 2015). تغییرات در ساختار لکه‌های جنگل‌های شهری نیز به الگوی رشد شهری مربوط می‌شود. به‌طوری‌که این لکه‌ها اغلب در طول گسترش پراکندگی شهری افزایش می‌یابند. به‌علاوه، لکه‌های فضای سبز شهری در طول فاز توسعه فشرده، بزرگ‌تر می‌شوند (Deng *et al.*, 2008). کاهش خدمات زیست‌بومی به‌دلیل تغییر در الگوهای زمین سیمای جنگل‌های شهری، یک چالش بزرگ برای توسعه پایدار شهری است (Zhou *et al.*, 2017). فضای سبز شهری به‌عنوان بخش ضروری از سیستم اجتماعی- بوم‌شناختی شهر، نه‌تنها مجموعه‌ای از خدمات بوم‌سازگانی ازجمله کاهش انتشار صوت، فیلتر هوا، کنترل رواناب و تنظیم خُرداقلیم را ارائه می‌دهد (Kothencz *et al.*, 2017)، بلکه فرصت‌های فراغتی را برای ساکنان شهر ایجاد می‌کند تا نشاط شهروندان را افزایش دهد (Bertram & Rehdanz, 2015). فضای سبزِ بخش مسکونی شهر، تأثیر قوی‌تری بر بهبود سلامت انسان نسبت به فضاهای سبز دیگر دارد (Roscoe *et al.*, 2022). حفاظت و توسعه فضای سبز شهری به‌عنوان یک راهبرد اساسی برای کاهش تضاد بین کیفیت محیط شهری و فرایند شهرنشینی مورد توجه است (Xu *et al.*, 2011). از دیدگاه بوم‌شناسیِ سیمای سرزمین، برای برنامه‌ریزی و طراحی شهر، فضاهای سبز شهری باید به‌عنوان یک بخش جدایی‌ناپذیر از سیمای شهری دیده شوند و اجزای آن‌ها در سطوح مختلف فرایندهای شهری و روابط در نظر گرفته شوند. در این چهارچوب نظری، سیمای سرزمین شامل سه عنصر کلیدی است: لکه‌ها، کریدورها و ماتریس. لکه‌ها به‌عنوان نواحی مجزا و همگن با کارکرد مشخص تعریف می‌شوند؛ مانند فضای سبز درختی تک‌پایه یا کپه‌ای. در پژوهش پیش‌رو، سنجه‌هایی مانند تعداد لکه‌ها (NP) برای تحلیل تراکم و توزیع لکه‌ها و شاخص شکل لکه (LSI) برای ارزیابی پیچیدگی هندسی آن‌ها به‌کار گرفته شده است. کریدورها، مسیرهایی هستند که لکه‌ها را به هم متصل و پیوستگی بوم‌شناختی را ایجاد می‌کنند؛ مانند درختان حاشیه معابر. سنجه میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه (ENN_MN) برای تحلیل پیوستگی و ارتباط میان این

ساختارها استفاده شده است. ماتریس نیز محیط غالبی است که لکه‌ها و کریدورها در آن قرار دارند و ساختار کلی شهر را شکل می‌دهد. این سه عنصر، بنیان رویکردهای تحلیل سیمای سرزمین را تشکیل می‌دهند و امکان بررسی دقیق‌تر الگوهای فضایی و اثرات بوم‌شناختی آن‌ها را فراهم می‌کنند. از این نظر، توجه به ارتباط لکه‌های سبز با کاربری‌های دیگر شهری و در نظر گرفتن زمینه منطقه‌ای که شهر در آن واقع شده، حائز اهمیت است. دیدگاه‌های بوم‌شناسیِ سیمای سرزمین، یک چهارچوب فضایی روشمند و میان‌رشته‌ای برای درک اثرات متقابل الگوهای فضایی و فرایندهای بوم‌شناختی در سرتاسر فضای شهر ارائه می‌دهد و ارتباط میان علوم مختلف، سیاستمداران، برنامه‌ریزان و مردم را تسهیل می‌کند (Chang *et al.*, 2013). ازجمله مهم‌ترین خدمات بوم‌سازگانی فضای سبز درون و برون شهرها می‌توان به کاهش مخاطرات ناشی از جاری شدن سیلاب (Bahmanpour, 2016)، کاهش اثر جزایر حرارتی (Taheri Sarteshnizi *et al.*, 2013)، ترسیب کربن و جذب گازهای گلخانه‌ای، تعدیل اثرات تغییر اقلیم، تولید اکسیژن، کاهش آلودگی صوتی، ارتقای سلامت شهری، نگهداشت آب و جلوگیری از فرسایش خاک (Senanayake *et al.*, 2013) اشاره کرد.

پژوهش‌های متعددی به بررسی و ارزیابی فضای سبز شهری و کاربری‌های مختلف با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین پرداخته‌اند. ارزیابی کیفیت ساختاری شبکه فضای سبز شهری در منطقه ۱۶ تهران براساس مبانی بوم‌شناختی سیمای سرزمین نشان داد که محله شهرک بعثت، بیشینه کیفیت ساختاری فضای سبز را دارد (Ramezani Mehrian, 2022). بررسی روند تغییرات در وسعت و ساختار بوم‌شناختی فضای سبز منطقه ۲۲ تهران در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۸ با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین و سنجش از دور، بیانگر این است که لکه‌های سبز منطقه ۲۲ تهران در سال ۲۰۱۸ در مقایسه با سال ۱۹۹۶ ازنظر پیوستگی، اندازه و شکل دچار تغییرات عمده شده بودند و در وضعیت مطلوبی قرار نداشتند (Hassanpour *et al.*, 2020). Jaafari و همکاران (۲۰۱۸) اثرگذاری چیدمان فضاهای سبز شهر تهران بر پراکنش آلاینده‌های هوا، صوت و دما را بررسی کردند. Fotoohi و Barghjelveh (۲۰۱۸) پژوهشی تحت عنوان بررسی شبکه‌های بوم‌شناختی سیمای سرزمین در شهر تهران را انجام دادند. بررسی تغییرات پوشش زمین و پراکندگی شهری با استفاده از تکنیک‌های جغرافیایی و معیارهای منظر در یک شهر در زیمبابوه نشان داد که توسعه شهری سبب تکه‌تکه شدن لکه‌های فضای سبز درختی می‌شود و الگوی خطی، رایج‌ترین چیدمان در منطقه‌های پرتراکم است (Sithole *et al.*, 2024). Fakour و همکاران (۲۰۱۶) وضعیت کمی فضای سبز درختی منطقه‌های شهری مشهد و امکان توسعه آن با روش‌های WLC و GIS را بررسی کردند. Zhang و همکاران (۲۰۱۵) و Daz و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش‌های مشابه با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین، با کمی‌سازی الگوی مکانی فضاهای سبز شهری، میزان تغییرات در سطح، تراکم و فاصله بین لکه‌های فضای سبز در زمان‌های مختلف را برآورد کردند و نرخ رشد تا تخریب در انواع لکه‌های فضای سبز را تحلیل کردند. در مقایسه با این پژوهش‌ها، پژوهش پیش‌رو نه‌تنها از سنجه‌های سیمای سرزمین برای تحلیل کمی و الگوی چیدمان استفاده کرده است، بلکه سه الگوی مشخص چیدمان شامل تک‌پایه، خطی و کپه‌ای را برای فضای سبز درختی مدل‌سازی کرده و تفاوت‌های سرانه فضای سبز درختی بین منطقه‌ها و ناحیه‌ها مختلف را تحلیل کرده است. این نوع مدل‌سازی دقیق و تعریف الگوهای چیدمان درختی در پژوهش‌های پیشین، کمتر دیده شده است، بنابراین درحالی‌که پژوهش‌های پیشین اغلب بر تحلیل کلی فضای سبز یا مکان‌یابی و اثرات آن تمرکز داشته‌اند، پژوهش پیش‌رو، رویکردی جامع‌تر اتخاذ کرده است و با مدل‌سازی دقیق به ارائه راهکارهای کاربردی برای توسعه متوازن فضای سبز درختی در منطقه‌های با تراکم زیاد پرداخته است. این تمایزها، نقش این پژوهش را به‌عنوان ابزاری کاربردی برای مدیریت و برنامه‌ریزی شهری برجسته می‌کند. به‌عنوان نوآوری پژوهش پیش‌رو، با بهره‌گیری از رویکرد مدل‌سازی با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین در محیط GISسه نوع الگوی چیدمان فضای سبز درختی (تک‌پایه، خطی و کپه‌ای) به‌صورت جداگانه مدل‌سازی و برای

نخستین‌بار تلاش شده است که الگوهای فضایی فضاهای سبز درختی شهری با جزئیات بیشتری تحلیل شوند، درحالی‌که پژوهش‌های پیشین (Fakour *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2015) به تحلیل کلی لکه‌های فضای سبز پرداخته‌اند، پژوهش پیش‌رو با تمرکز بر تفاوت‌های سه نوع چیدمان و اثرات آن‌ها بر سرانه فضای سبز، دیدگاه جدیدی برای برنامه‌ریزی شهری ارائه داده است. این مدل‌سازی به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا برای منطقه‌های پرتراکم یا کم‌تراکم، رویکردهای متفاوتی برای طراحی فضای سبز در نظر گیرند. هدف پژوهش پیش‌رو، ارائه مدلی به‌منظور بیشینه‌سازی خدمات فضای سبز در سه منطقه از شهر تهران از طریق شناسایی مطلوب‌ترین الگوی چیدمان و توزیع درختان فضاهای سبز شهری و بررسی سرانه فضای سبز درختی شهری است. این پژوهش تلاش داشته است به سه پرسش مشخص پاسخ دهد: ۱- آیا فضای سبز درختی را می‌توان به‌صورت چیدمان‌های مختلف مدل‌سازی کرد؟ ۲- وضعیت مکانی چیدمان فضای سبز درختی منطقه‌های مورد مطالعه چگونه است؟ ۳- سرانه فضای سبز درختی در منطقه‌ها و ناحیه‌ها برای هر نفر، چند متر مربع است؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ شهرداری شهر تهران انجام شد (شکل ۱) که در مرکز این شهر واقع شده‌اند. منطقه ۱۰ شهرداری تهران در بین مرکز، غرب و جنوب غرب تهران قرار دارد. این منطقه از تراکم ناخالص جمعیتی حدود ۴۰۰ نفر در هر هکتار برخوردار است. این تراکم جمعیت، چهار برابر حد استاندارد و دو برابر میانگین تراکم در شهر تهران است. این منطقه دارای سه ناحیه و ده محله است. منطقه ۱۱ یکی از منطقه‌های مرکزی شهر با بافتی قدیمی محسوب می‌شود که چهار ناحیه و ۱۷ محله دارد. منطقه ۱۲ نیز از منطقه‌های قدیمی در مرکز شهر تهران است. این منطقه به گونه‌ای مرز بین مرکز و شرق تهران به‌شمار می‌آید و دارای شش ناحیه و ۱۳ محله است. براساس برآورد سال ۱۴۰۱، منطقه ۱۰ حدود ۳۴۲ هزار نفر، منطقه ۱۱ حدود ۳۲۰ هزار نفر و منطقه ۱۲ حدود ۲۴۲ هزار نفر جمعیت دارند (Tehran Municipality, 2023).

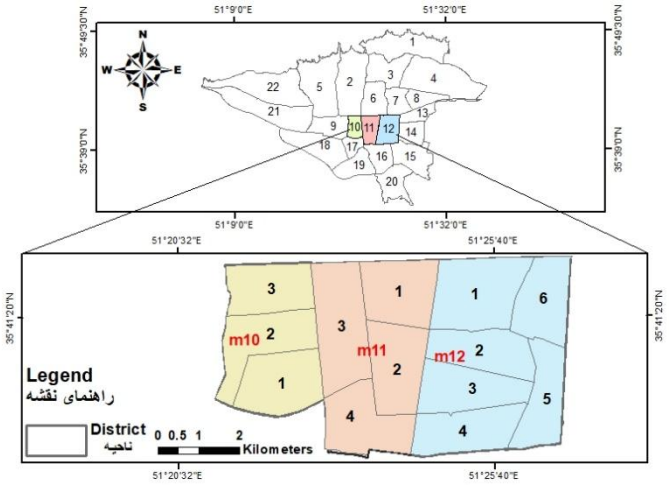
دلایل انتخاب منطقه‌های یادشده به شرح زیر هستند:

۱- موقعیت جغرافیایی: این منطقه‌ها ازجمله منطقه‌های مرکزی تهران هستند که به‌دلیل قدمت و ساختار قدیمی خود و تغییرات گسترده در ساختار شهری به ارزیابی وضعیت فضای سبز درختی نیاز دارند. بررسی این منطقه‌ها می‌تواند به شناسایی چالش‌های خاص در حفظ و توسعه فضای سبز درختی در منطقه‌های قدیمی کمک کند. مقایسه این منطقه‌ها با یکدیگر می‌تواند الگوهای توسعه فضای سبز درختی در منطقه‌های مرکزی شهر را نشان دهد.

۲- تراکم جمعیتی و ساختار شهری: این منطقه‌ها دارای تراکم جمعیتی زیاد و بافت مسکونی فشرده و فرسوده هستند.

۳- وجود مراکز تجاری مهم تهران: این منطقه‌ها به‌دلیل وجود بازارهای مهم تهران از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردار هستند. این بازارها، تراکم جمعیتی، رفت‌وآمد و فعالیت‌های تجاری را افزایش می‌دهند که می‌توانند فشار بیشتری بر فضای سبز درختی و بوم‌سازگان شهری وارد کنند.

۴- نمونه‌گیری هدفمند: انتخاب این سه منطقه به‌دلیل تفاوت‌های احتمالی در توسعه فضای سبز درختی در منطقه‌های مرکزی شهر نسبت به منطقه‌های شمالی یا جنوبی تهران، یک رویکرد نمونه‌گیری هدفمند است. منطقه‌های شمال تهران به‌دلیل سرانه فضای سبز بیشتر و نیز طبیعت و امکانات مطلوب‌تر، ساختار متفاوتی نسبت به منطقه‌های مرکزی دارند، بنابراین انتخاب منطقه‌های با تراکم جمعیتی زیاد و فضای سبز محدود، یافته‌ها را برای منطقه‌هایی با شرایط مشابه در سطح شهر یا دیگر شهرهای مشابه، قابل‌تعمیم‌تر می‌کند.

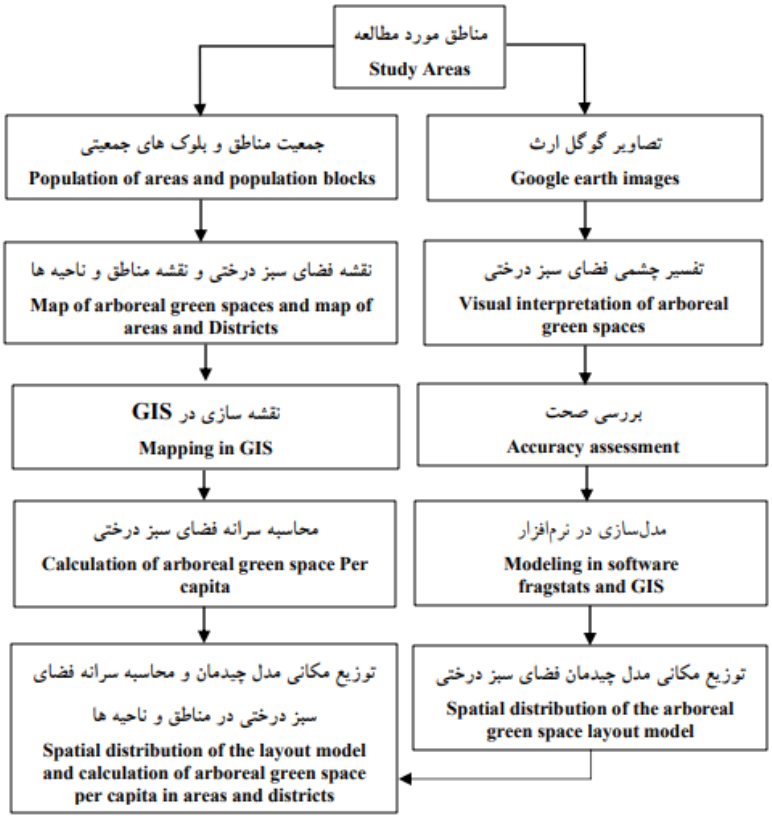


شکل ۱- موقعیت منطقه‌های مورد مطالعه در شهر تهران

Figure 1. The location of the study areas in Tehran City

روش پژوهش

پژوهش پیش‌رو ازنظر هدف‌گذاری، کاربردی و ازنظر روش‌شناسی، توصیفی- تحلیلی- استنباطی است. اطلاعات در بخش توصیفی از طریق مطالعه اسناد کتابخانه‌ای، منابع علمی و نظرات کارشناسان گردآوری شد. در بخش تحلیلی پژوهش نیز پلی‌گون لکه‌های فضای سبز درختی با استفاده از تصاویر گوگل ارث و برداشت نقاط کنترل زمینی برای صحت‌سنجی تهیه شد. خلاصه مراحل پژوهش در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲- مدل مفهومی پژوهش

Figure 2. Workflow of the methodology

این پژوهش در چهار گام اصلی اجرا شد که در ادامه به‌صورت خلاصه معرفی می‌شوند.

گام اول: تهیه نقشه فضای سبز درختی

در این پژوهش از تصاویر نرم‌افزار Google Earth مربوط به تاریخ تیرماه سال ۱۴۰۲ استفاده شد. تصاویر انتخاب‌شده برای همه منطقه‌های مطالعه، ثابت و مربوط به همان بازه زمانی تیرماه ۱۴۰۲ بود تا از همخوانی مکانی و زمانی داده‌ها، اطمینان حاصل شود. در این تصاویر، پدیده‌ها به رنگ طبیعی دیده می‌شوند و از قدرت تفکیک مکانی زیادی برای تشخیص فضای سبز درختی تک‌پایه نسبت به تصاویر ماهواره‌ای رایگان دیگر برخوردار هستند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این تصاویر به‌دلیل وضوح زیاد، نمایش ویژگی‌های طبیعی و قابلیت دسترسی، منبع مناسبی برای شناسایی لکه‌های درختی و فضاهای سبز دیگر در شهرها هستند (Taylor & Lovell, 2012; Lian *et al.*, 2024). با استفاده از تصاویر ذکرشده، سه چیدمان مختلف شامل تک‌پایه یا منفرد (درختان در بافت‌های مسکونی و خصوصی شهر)، خطی (درختان حاشیه معابر، نهرها و مسیل‌ها) و کپه‌ای (درختان در پارک‌ها و فضاهای سبز نیمه‌خصوصی و اداره‌های دولتی) تفکیک شد. فضای سبز نیمه‌خصوصی به فضاهایی اطلاق می‌شود که در مالکیت اداره‌ها، سازمان‌های دولتی یا شرکت‌ها قرار دارند، اما به‌دلیل کاربری عمومی ساختمان‌ها، دسترسی محدود و اما ممکن برای مردم وجود دارد. برای مثال، محوطه‌های سبز اداره‌های دولتی، دانشگاه‌ها و بیمارستان‌ها، جزو این دسته محسوب می‌شوند. این فضاها برخلاف فضاهای عمومی مانند پارک‌ها، برای استفاده عمومی طراحی نشده‌اند، اما پتانسیل ارائه خدمات بوم‌شناختی و زیبایی بصری را دارند. نقشه فضای سبز درختی منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ شهر تهران در سال ۱۴۰۲ تهیه شد. برای تهیه

نقشه فضای سبز درختی از تفسیر چشمی و برداشت هریک از پلی‌گون‌ها با زوم کردن روی فضای سبز درختی با مقیاس ۱:۵۰۰، استفاده و در محیط GIS زمین‌مرجع شد. سپس، به‌منظور ارزیابی صحت نقشه تهیه‌شده از فضای سبز درختی، ۷۵ نقطه واقعیت زمینی برای فضای سبز درختی و ۴۵ نقطه برای مکان‌های دیگر با GPS و کنترل میدانی برداشت شد. درنهایت، ماتریس خطا تشکیل شد. میزان صحت نیز با استفاده از صحت کلی و شاخص کاپا بررسی شد. صحت کلی ۹۸/۵ درصد و ضریب کاپا ۹۶/۱۲ درصد به‌دست آمد. به‌دلیل اینکه تصاویر گوگل ارث از وضوح زیادی برخوردار هستند، به تصحیح هندسی نیاز ندارند (Clark *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012; Malarvizhi *et al.*, 2016).

گام دوم: تهیه نقشه سرانه فضای سبز درختی

پس از کمی‌سازی الگوی مکانی لکه‌های فضای سبز درختی و نیز مدل‌سازی این لکه‌ها، با استفاده از جمعیت منطقه‌ها و بلوک‌های جمعیتی شهر تهران که توسط شهرداری تهران در سال ۱۴۰۲ تهیه شده بود، نقشه جمعیت ناحیه‌های هر منطقه تهیه شد. بلوک جمعیتی به مجموعه‌ای از ساختمان‌های مسکونی به هم پیوسته اطلاق می‌شود کـه از همه طرف به معابر عمومی یـا عـوارض طبیعـی محدود شده باشند. درنهایت، سرانه فضای سبز درختی از تقسیم مساحت فضای سبز درختی بر جمعیت منطقه‌ها و نواحی با واحد متر مربع به‌ازای هر نفر به‌دست آمد.

گام سوم: انتخاب سنجه‌های مناسب

به‌منظور مدل‌سازی الگوی چیدمان و توزیع مکانی درختان و فضاهای سبز درختی از نرم‌افزار Arc GIS 10.8 و Fragstats 3.3 استفاده شد. پس از تهیه نقشه لکه‌های فضای سبز درختی در محیط نرم‌افزار Google Earth و انجام محاسبه‌های اولیه در نرم‌افزار Arc GIS، با استفاده از تابع Patch Analyst که شامل تعدادی از سنجه‌های سیمای سرزمین است، سنجه‌ها کمی شد. با استفاده از تابع Select by attributes سنجه‌های مختلف مانند مساحت لکه (CA) و شاخص شکل لکه (LSI) فرمول‌نویسی شد. سپس، مدل چیدمان برای لکه‌های فضای سبز (تک‌پایه، خطی و کپه‌ای) درختی تهیه شد. باتوجه‌به وجود سنجه‌های زیاد و همبستگی بین برخی از آن‌ها و به‌منظور جلوگیری از اطلاعات اضافی، درمجموع پنج سنجه براساس مرور منابع علمی و استفاده ازنظر کارشناسان برای آنالیز و مدل‌سازی استفاده شدند که ویژگی آن‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود (Zhang *et al.*, 2020; Woldesemayat & Genovese, 2021; Chu *et al.*, 2022).

سنجه CA بیان‌کننده مساحت لکه در مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی است. این سنجه، ترکیب ساختار مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی را اندازه‌گیری می‌کند و نشان می‌دهد که چه مقدار از لکه‌های مدل چیدمان از یک نوع کاربری خاص تشکیل شده است. سنجه NP بیانگر تعداد لکه مدل چیدمانِ لکه‌های فضای سبز درختی در سطح منطقه مورد مطالعه است. سنجه LPI درصد سیمای سرزمین که توسط بزرگ‌ترین لکه مدل چیدمانِ لکه‌های فضای سبز درختی اشغال شده است را نشان می‌دهد، بنابراین این سنجه برابر است با مساحت بزرگ‌ترین لکه در یک کلاس تقسیم‌بر مجموع مساحت کل کلاس‌ها (ضرب‌در صد برای تبدیل به درصد). سنجه LSI شکل لکه مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی را نشان می‌دهد که براساس نسبت طول حاشیه‌های موجود در کل مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی به کمینه حاشیه ممکن آن‌ها به‌دست می‌آید و بدون واحد است. هرچقدر LSI از عدد یک، بیشتر فاصله می‌گیرد، بیانگر افزایش بی‌نظمی مرز و حاشیه‌های سیمای سرزمین و پیچیده‌تر شدن شکل آن است. هر چقدر این شاخص به عدد یک نزدیک شود، شکل لکه دایره‌ای خواهد بود. سنجه ENN_MN یا میانگین فاصله اقلیدسی نزدیک‌ترین همسایه، نشان‌دهنده میانگین فاصله برحسب متر از نزدیک‌ترین لکه مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی هم‌نوع خود است که براساس کمترین فاصله از لکه‌های مشابه محاسبه می‌شود (Nohegar *et al.*, 2015; Mirsanjeri *et al.*, 2022).

جدول ۱- ویژگی‌های سنجه‌های مورد استفاده

Table 1. Characteristics of the metrics used

Metrics	Acronym	Description	Unit	Range
Class area	CA	Total area of patches of one type	Hectares	CA > 0
Number of patches	NP	Number of patches of different land uses	Unitless	NP >1
Largest patch index	LPI	Percentage of land composed of the largest patch	Percentage	0 < LPI ≤ 100
Landscape shape index	LSI	Ratio of total edge length to total area	Unitless	LSI ≥ 1
Mean nearest neighbor distance	ENN_MN	Average distance between two similar patches	Meters	MNN > 0

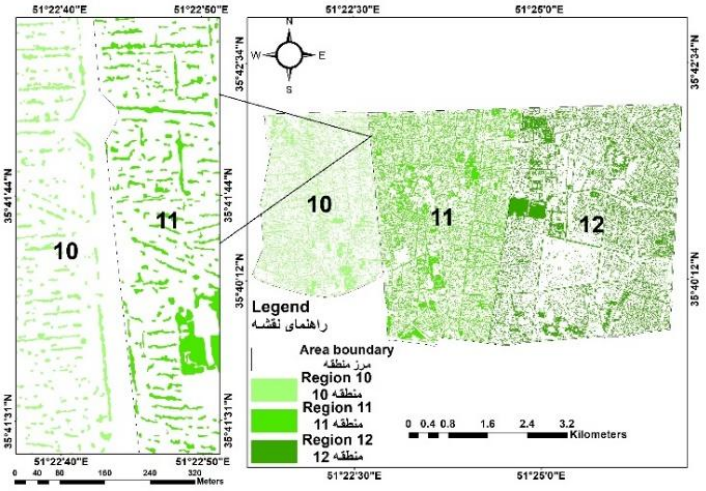
گام چهارم: مدل‌سازی چیدمان فضای سبز درختی

پس از تهیه نقشه لکه‌های فضای سبز درختی و انجام محاسبه‌های اولیه در GIS، مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی در سطح منطقه تهیه شد. برای محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین، نقشه‌های مدل چیدمانِ لکه‌های فضای سبز درختی در نرم‌افزار IDRISI طبقه‌بندی و در نرم‌افزار Fragstats وارد شد. درنهایت، اندازه‌گیری سنجه‌های مرتبط با توزیع و پراکنش مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی در سطح منطقه‌های مورد مطالعه ارائه شد.

نتایج

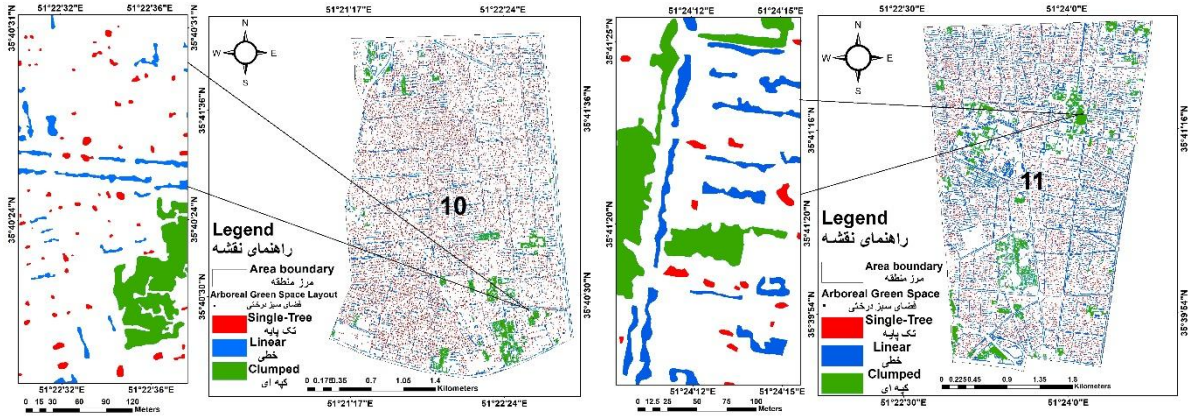
مدل چیدمان فضای سبز درختی

نقشه فضای سبز درختی در محیط GIS (شکل ۳) برای تهیه مدل چیدمان فضای سبز درختی استفاده شد. پس از فرمول‌نویسی و به‌دست آوردن روابط مدل چیدمان که شامل مدل‌های چیدمان تک‌پایه، خطی و کپه‌ای هستند، نقشه هریک از مدل‌های چیدمان تولید شد (شکل‌های ۴ و ۵).



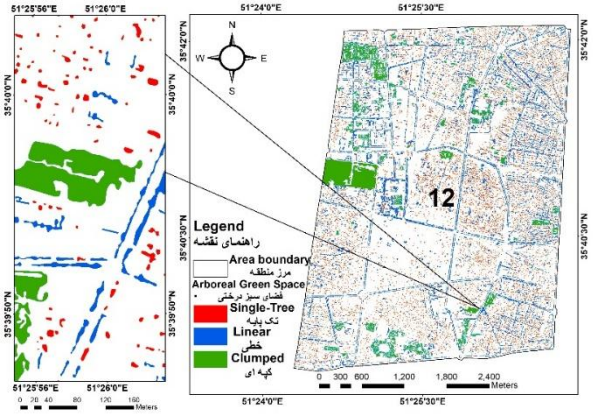
شکل ۳- نقشه لکه‌های فضای سبز درختی در منطقه‌های مورد مطالعه

Figure 3. Map of arboreal green space patches in the study areas



شکل ۴- نقشه‌های مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی در منطقه‌های ۱۰ و ۱۱

Figure 4. Layout model maps of arboreal green space patches in districts 10 and 11



شکل ۵- نقشه مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی در منطقه ۱۲

Figure 5. Layout model map of arboreal green space patches in districts 12

جدول ۲- سنجه‌های مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی در سطح کلاس در منطقه‌های مورد مطالعه

Table 2. Metrics of tree canopy patch pattern models at the class level in the study areas

Metrics / Region 10	Single-tree pattern model	Linear pattern model	Clumped pattern model
CA	26.03	28.56	19.41
NP	12463	2195	42
LPI	0.03	0.2	2.44
LSI	127.74	97.82	28.91
ENN_MN	9.35	14.49	85.42
Metrics / Region 11	Single-tree pattern model	Linear pattern model	Clumped pattern model
CA	30.91	103.48	46.93
NP	8306	4142	66
LPI	0.01	0.9	4.1
LSI	109.98	138.52	38.98
ENN_MN	12.2	10.66	78.09
Metrics / Region 12	Single-tree pattern model	Linear pattern model	Clumped pattern model
CA	47.24	78.47	56.47
NP	17332	4005	95
LPI	0.01	0.26	12.35
LSI	149.31	141.22	47.42
ENN_MN	9.37	12.14	28.36

شاخص‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس

در جدول ۲، نتایج حاصل از بررسی و مقایسه سنجه‌های سیمای سرزمین در منطقه‌های مورد مطالعه ارائه شده است.

مقایسه سنجه‌های سیمای سرزمین در منطقه ۱۰

باتوجه‌به مقادیر سنجه CA در جدول ۲، مدل چیدمان خطی لکه‌های فضای سبز درختی با ۲۸/۵۶ هکتار، بیشترین مساحت را داشت. مدل چیدمان کپه‌ای نیز با ۱۹/۴۱ هکتار، کمترین مساحت را به‌خود اختصاص داد. این سنجه، گویاترین سنجه در بررسی تغییرات سیمای سرزمین است که به‌آسانی توسط نرم‌افزار Fragstats قابل‌اندازه‌گیری است.

مقدار سنجه NP برای مدل چیدمان تک‌پایه ۱۲۴۶۳ لکه است که بیشترین تعداد لکه را در بین مدل چیدمان‌ها دارد. بیشتر بودن چیدمان تک‌پایه منطقه ۱۰ به‌دلیل بافت فشرده و متراکم مسکونی و ریزدانه شهری است. کمترین تعداد لکه مربوط به مدل چیدمان کپه‌ای با ۴۲ لکه بود. سنجه NP به این دلیل اهمیت دارد که نشان‌دهنده از هم گسیختگی سیمای سرزمین است. هرچقدر مقدار این شاخص افزایش یابد، نشان‌دهنده خرد شدن سیمای سرزمین به لکه‌های کوچک‌تر است. سنجه LPI یا بزرگ‌ترین لکه، معرف بزرگ‌ترین لکه مربوط به مدل چیدمان کپه‌ای است. بزرگ‌ترین لکه آن ۲/۴۴ درصد از کل مساحت مدل چیدمان‌ها را به‌خود اختصاص داد. کمترین درصدِ بزرگ‌ترین لکه مربوط به مدل چیدمان تک‌پایه با ۰/۰۳ درصد بود. مقدار سنجه LSI یا شکل سیمای سرزمین، برای مدل چیدمان تک‌پایه در بیشترین مقدار برابر با ۱۲۷/۷۴ عدد است که بی‌نظمی و پیچیدگی چیدمان تک‌پایه را نشان می‌دهد. کمترین شکل لکه مربوط به مدل چیدمان کپه‌ای با ۲۸/۹۱ عدد بود. مقدار زیاد این شاخص نشان‌دهنده لکه‌هایی با شکل پیچیده‌تر است. در منطقه‌هایی با تراکم کم یا الگوهای خطی، این پیچیدگی می‌تواند به بهبود دسترسی به فضای سبز درختی، گسترش خدمات بصری و کاهش اثرات جزیره‌های حرارتی کمک کند. مقدار کم این شاخص نیز بیانگر لکه‌هایی با شکل ساده‌تر و فشرده است. این ویژگی در لکه‌های کپه‌ای مشاهده می‌شود و به تمرکز خدمات بوم‌شناختی و اجتماعی در پارک‌ها و فضاهای عمومی کمک می‌کند. این سنجه، بهترین شاخص همراه با سنجه مساحت لکه‌ها برای تهیه نقشه مدل‌های چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی است. مقدار زیادِ میانگین فاصله اقلیدسی نزدیک‌ترین همسایه (ENN_MN) نشان می‌دهد که فاصله لکه‌های مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی هم‌نوع خود افزایش پیدا کرده است. بیشترین فاصله مربوط به مدل کپه‌ای با ۸۵/۴۲ متر بود. این فاصله زیاد لکه‌های هم‌نوع به‌دلیل وجود بافت مسکونی متراکم و فشرده و خیابان‌های موجود در منطقه است که می‌توانند از عوامل از هم گسیختگی سیمای سرزمین باشند. کمترین فاصله نیز مربوط به مدل چیدمان تک‌پایه با ۹/۳۵ متر بود. میانگین کم فاصله لکه‌ها در الگوهای تک‌پایه و خطی نشان‌دهنده اتصال مناسب و خدمات بوم‌شناختی بهینه است. همچنین، افزایش پیوستگی لکه‌ها سبب افزایش پایداری بوم‌شناختی و بهبود زیست‌پذیری شهری می‌شود.

مقایسه سنجه‌های سیمای سرزمین در منطقه ۱۱

نتایج سنجه CA در منطقه ۱۱ نشان داد که مدل چیدمان خطی لکه‌های فضای سبز درختی با ۱۰۳/۴۸ هکتار، بیشترین مساحت را دارد. مدل چیدمان تک‌پایه نیز با ۳۰/۹۱ هکتار، کمترین مساحت را به‌خود اختصاص داد. نتایج سنجه NP برای مدل چیدمان تک‌پایه، ۸۳۰۶ لکه بود که بیشترین تعداد لکه را در بین مدل چیدمان‌ها داشت. بیشتر بودن چیدمان تک‌پایه منطقه ۱۱ به‌دلیل بافت فشرده و متراکم مسکونی و ریزدانه شهری است. کمترین تعداد لکه مربوط به مدل چیدمان کپه‌ای با ۶۶ لکه بود. بیشینه سنجه LPI (بزرگ‌ترین لکه) متعلق به مدل چیدمان کپه‌ای است که بزرگ‌ترین لکه آن ۴/۱ درصد از کل مساحت مدل چیدمان‌ها را به‌خود اختصاص داد. کمترین درصد بزرگ‌ترین لکه نیز مربوط به مدل چیدمان تک‌پایه با ۰/۰۱ درصد بود. مقدار سنجه LSI (شکل سیمای سرزمین) در منطقه ۱۱ برای مدل چیدمان خطی، بیشترین مقدار (۱۳۸/۵۲ عدد) را به‌خود اختصاص داد. کمترین شکل لکه نیز مربوط به مدل چیدمان کپه‌ای با ۳۸/۹۸ عدد بود.

سنجه ENN_MN، بیشترین میانگین فاصله را در مدل کپه‌ای با ۷۸/۰۹ متر نشان داد. کمترین فاصله نیز مربوط به مدل چیدمان خطی با ۱۰/۶۶ متر بود.

مقایسه سنجه‌های سیمای سرزمین در منطقه ۱۲

نتایج سنجه CA در منطقه ۱۲ نشان داد که مدل چیدمان خطی لکه‌های فضای سبز درختی با ۷۸/۴۷ هکتار، بیشترین مساحت را دارد. مدل چیدمان تک‌پایه نیز با ۴۷/۲۴ هکتار، کمترین مساحت را به‌خود اختصاص داد. مقدار سنجه NP در منطقه ۱۲ برای مدل چیدمان تک‌پایه، ۱۷۳۳۲ لکه بود که بیشترین تعداد لکه را در بین مدل چیدمان‌ها دارد. بیشتر بودن چیدمان تک‌پایه منطقه ۱۲ به‌دلیل بافت فشرده و متراکم مسکونی و ریزدانه شهری است. کمترین تعداد لکه مربوط به مدل چیدمان کپه‌ای با ۹۵ لکه بود. مطابق نتایج سنجه LPI، بزرگ‌ترین لکه متعلق به مدل چیدمان کپه‌ای است که بزرگ‌ترین لکه آن ۱۲/۳۵ درصد از کل مساحت مدل چیدمان‌ها را به‌خود اختصاص داد. کمترین درصدِ بزرگ‌ترین لکه نیز مربوط به مدل چیدمان تک‌پایه با ۰/۰۱ درصد بود. مقدار سنجه LSI در منطقه ۱۲ برای مدل چیدمان تک‌پایه، بیشترین مقدار (۱۴۹/۳۱ عدد) را نشان داد. کمترین شکل لکه نیز مربوط به مدل چیدمان کپه‌ای با ۴۷/۴۲ عدد بود. مطابق نتایج سنجه ENN_MN، بیشترین و کمترین میانگین فاصله به‌ترتیب در مدل کپه‌ای با ۲۸/۳۶ متر و مدل تک‌پایه با ۹/۳۷ متر مشاهده شد.

مدل چیدمان لکه‌های فضای سبز درختی در منطقه‌های مورد بررسی

براساس مساحت چیدمان‌های CA، چیدمان خطی، بیشترین مساحت را در هر سه منطقه به‌خود اختصاص داد. این چیدمان با ۱۰۳/۴۸ هکتار در منطقه ۱۱، بیشینه مساحت را داشت. پس از آن، منطقه ۱۲ در جایگاه دوم قرار گرفت و منطقه ۱۰ نیز کمترین مساحت را به‌خود اختصاص داد. علت مساحت زیاد چیدمان خطی به تراکم زیاد جمعیت و فشردگی ساختار شهری در این منطقه‌ها و نیاز به فضاهای سبز درختی برمی‌گردد. این چیدمان می‌تواند در معابر عمومی، پیاده‌روها و خیابان‌ها جای گیرد و به بهبود کیفیت هوای منطقه‌های پرتردد کمک کند. چیدمان کپه‌ای نیز در هر سه منطقه حضور داشت، اما بیشترین مساحت آن در منطقه ۱۲ و کمترین مساحت در منطقه ۱۰ مشاهده شد. این چیدمان در فضاهای سبز درختی مانند پارک‌ها و باغ‌های کوچک کاربرد دارد که فضای بیشتری را برای تجمیع درختان فراهم می‌کنند. درنهایت، چیدمان تک‌پایه، کمترین مساحت را در بین سه چیدمان داشت. مساحت آن در منطقه ۱۲ بیشترین و در منطقه ۱۰ کمترین مقدار بود. این چیدمان به‌طور معمول در کنار ساختمان‌ها و حاشیه‌های کوچک استفاده می‌شود و به‌دلیل تراکم زیاد و محدودیت فضا در این منطقه‌ها، توسعه آن با محدودیت مواجه است.

تعداد لکه‌ها (NP) بین منطقه‌های مورد مطالعه، تفاوت داشت. در هر سه منطقه، چیدمان تک‌پایه، بیشترین تعداد لکه را به‌خود اختصاص داد. به‌طوری‌که در منطقه ۱۲، این لکه‌ها به ۱۷۳۳۲ عدد رسید، درحالی‌که در منطقه ۱۱ این مقدار به ۸۳۰۶ عدد کاهش یافت. تعداد زیادِ لکه‌های چیدمان تک‌پایه نشان‌دهنده وجود فضای سبز درختی به‌صورت پراکنده است که می‌تواند به‌دلیل ساختار مسکونی فشرده و محدودیت فضا در این منطقه‌ها باشد. در مقابل، چیدمان کپه‌ای، کمترین تعداد لکه را در هر سه منطقه داشت. بیشترین تعداد لکه در منطقه ۱۲ و کمترین تعداد نیز در منطقه ۱۰ مشاهده شد. این الگو نشان‌دهنده کمبود فضاهای وسیع و تجمیع‌شده در منطقه ۱۰ و بیشتر بودن فضای پارک‌ها و باغ‌های عمومی در منطقه ۱۲ است.

چیدمان کپه‌ای در هر سه منطقه، بیشترین درصد را ازنظر بزرگ‌ترین لکه‌ها (LPI) به‌خود اختصاص داد. به‌طوری‌که در منطقه ۱۲، بزرگ‌ترین لکه چیدمان کپه‌ای ۱۲/۳۵ درصد از کل مساحت چیدمان‌ها را شامل می‌شد. این چیدمان به‌ویژه در منطقه ۱۲ به‌دلیل فضای بیشتری است که برای چیدمان کپه‌ای اختصاص داده شده است و نشان‌دهنده تمرکز بهتر فضای سبز در مقیاس بزرگ است.

چیدمان تک‌پایه، بیشترین میزان پیچیدگی شکل لکه (LSI) را در منطقه‌های ۱۲ و ۱۰ داشت که بیانگر تکه‌تکه و ریزدانه بودن لکه‌های این چیدمان است. کمترین مقدار آن نیز در منطقه ۱۱ مشاهده شد. بیشتر بودن پیچیدگی شکل لکه‌ها نشان‌دهنده

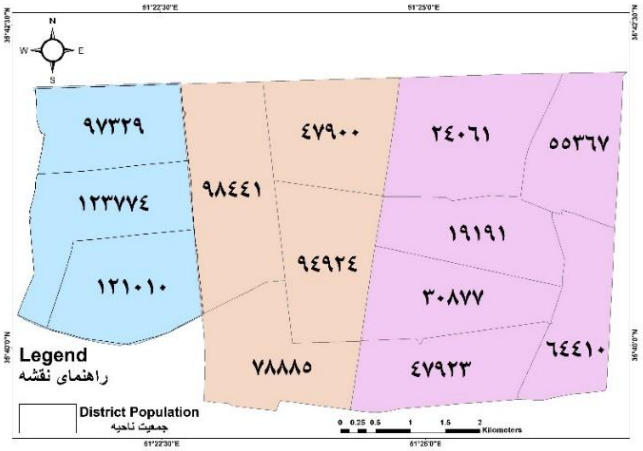
بی‌نظمی در چیدمان و از هم‌گسیختگی فضاهای سبز درختی چیدمان تک‌پایه در این منطقه‌ها است. در مقابل، چیدمان کپه‌ای در هر سه منطقه، کم‌ترین مقدار شکل لکه را داشت که نشان‌دهنده مرزهای به‌نسبت منظم‌تر و متمرکزتر در این چیدمان است.

چیدمان کپه‌ای، بیشترین میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه (ENN_MN) را در هر سه منطقه داشت که نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر این چیدمان در منطقه‌های مورد مطالعه است. بیشترین و کمترین فاصله به‌ترتیب در منطقه‌های ۱۰ و ۱۲ مشاهده شد. این تفاوت نشان‌دهنده بیشتر بودن فضاهای کپه‌ای در منطقه ۱۲ نسبت به منطقه ۱۰ است. در مقابل، چیدمان تک‌پایه کمترین فاصله را در هر سه منطقه داشت که نشان‌دهنده نزدیکی لکه‌های تک‌پایه به یکدیگر است. کمترین فاصله این شاخص در منطقه ۱۰ و بیشترین فاصله در منطقه ۱۱ مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهند که چیدمان تک‌پایه به‌صورت پراکنده و نزدیک به هم در محیط‌های محدودتر و ریزدانه مسکونی وجود دارد.

به‌طورکلی، چیدمان خطی، بیشترین مساحت را در هر سه منطقه به‌خود اختصاص داد. این چیدمان باتوجه‌به تراکم زیاد جمعیت و فشردگی بافت شهری، کارایی بیشتری در منطقه‌های مورد مطالعه دارد. ازسوی دیگر، چیدمان کپه‌ای با ایجاد لکه‌های بزرگ و محدود به فضاهای پارک‌ها و باغ‌های عمومی در منطقه ۱۲ به‌دلیل فضای باز بیشتر از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار بود. منطقه ۱۲ به‌ویژه به‌دلیل تمرکز بیشتر لکه‌های کپه‌ای و پراکندگی کمتر لکه‌های تک‌پایه، به‌عنوان منطقه‌ای با توزیع منظم‌تر و یکپارچه‌تر فضای سبز درختی شناخته می‌شود، درحالی‌که در منطقه‌های ۱۰ و ۱۱ به‌دلیل تراکم زیاد و محدودیت فضا، چیدمان‌های خطی و تک‌پایه به شکل ریزدانه‌تر وجود دارند.

سرانه فضای سبز درختی در منطقه‌ها و ناحیه‌ها

با استفاده از نقشه بلوک‌های جمعیتی، نقشه جمعیت هر ناحیه تهیه شد (شکل ۶). سپس، سرانه فضای سبز درختی در منطقه‌ها و ناحیه‌ها تعیین و تجزیه و تحلیل شد (جدول ۳). نتایج سرانه فضای سبز درختی در منطقه‌های مختلف حاکی از آن است که منطقه ۱۰ با ۲/۱۶ متر مربع برای هر نفر دارای کمترین سرانه و منطقه ۱۲ با ۷/۵۳ متر مربع برای هر نفر دارای بیشترین سرانه فضای سبز درختی بودند. بیشترین و کمترین سرانه فضای سبز درختی در منطقه ۱۰ به‌ترتیب مربوط به ناحیه یک با ۲/۸۵ و ناحیه دو با ۱/۶۴ متر مربع به‌ازای هر نفر است. بیشترین و کمترین سرانه فضای سبز درختی در منطقه ۱۱ به‌ترتیب در ناحیه‌های یک (۹/۳ متر مربع برای هر نفر) و دو (۳/۹۴ متر مربع برای هر نفر) مشاهده شد. بیشینه سرانه فضای سبز درختی در منطقه ۱۲ به ناحیه دو با ۲۶/۸۸ متر مربع به‌ازای هر نفر تعلق داشت، درحالی‌که کمینه سرانه فضای سبز درختی در این منطقه مربوط به ناحیه شش با ۱/۳۷ متر مربع بود.



شکل ۶- نقشه جمعیت ناحیه‌های منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲

Figure 6. Population Map of Sub-Districts in Districts 10, 11, and 12

جدول ۳- سرانه فضای سبز درختی در منطقه‌ها و ناحیه‌ها

Table 3. Per Capita Arboreal Green Space in Districts and Sub-Districts

District 10		District 11		District 12	
Sub-districts	Arboreal green space per capita (m²)	Sub-districts	Arboreal green space per capita (m²)	Sub-districts	Arboreal green space per capita (m²)
1	2.85	1	9.3	1	19.68
2	1.64	2	3.94	2	26.88
3	1.97	3	5.33	3	5.93
Total	2.16	4	5.95	4	5.86
-	-	Total	5.66	5	4.55
-	-	-	-	6	1.37
-	-	-	-	Total	7.53

بحث و نتیجه‌گیری

تشریح مسئله فضای سبز از الزامات زندگی شهرنشینی محسوب می‌شود. زیرا فضای سبز شهری علاوه‌بر ارزش‌های غیرقابل‌جایگزینیِ محیط‌زیستی، تأثیر شگرف و غیرقابل انکاری بر زیباسازی شهر و حفظ آرامش و شادابی شهروندان دارد. با پهناور شدن شهر تهران و تمرکز شکل‌گرفته در فضای داخلی آن، خلأ ضرورت دسترسی به محیط‌های طبیعی و سبز، بیش‌ازپیش نمایان شده است (Mirzade Tabatabaee *et al.*, 2023). هدف اصلی در پژوهش پیش‌رو، تهیه نقشه لکه‌های فضای سبز درختی و کمی‌سازی آن با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین، انتخاب بهترین مدل الگوی چیدمان و توزیع مطلوب پوشش‌های فضای سبز درختی و تهیه نقشه سرانه فضای سبز درختی در منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ شهرداری تهران بود. نتایج نشان داد که مدل چیدمان خطی، بیشترین مساحت را در سه منطقه مورد مطالعه دارد، بنابراین در این منطقه‌ها، فضای کافی برای گسترش مدل‌های دیگر چیدمان به‌خصوص مدل چیدمان کپه‌ای وجود ندارد. از مهم‌ترین علت‌های آن می‌توان به جمعیت زیاد، بافت فشرده و متراکم مسکونی و ریزدانه شهری، مساحت کم این منطقه‌ها، کمبود پهنه سبز و باز عمومی و خصوصی و هزینه سنگین تملک عرصه‌ها برای توسعه فضای سبز اشاره کرد. براساس دلایل موجود و شرایط این منطقه‌ها که تراکم جمعیتی و فعالیت‌های تجاری زیادی دارند و نیز باتوجه‌به وجود بازارهای شهری در این منطقه‌ها، بهترین چیدمانِ فضای سبز درختی، چیدمان خطی است. زیرا به‌منظور استفاده بهینه از فضا می‌توان درختان را به‌صورت چیدمان خطی در حاشیه معابر، پیاده‌روها و خیابان‌ها کاشت. همچنین، باتوجه‌به فعالیت‌های تجاری و رفت‌وآمد زیاد، چیدمان خطی درختان می‌تواند به کاهش آلودگی هوا و ایجاد سایه در خیابان‌های پرتردد کمک کند که این امر به بهبود کیفیت زندگی شهروندان در منطقه‌های پرتراکم می‌انجامد. چیدمان خطی درختان می‌تواند به‌صورت پیوسته در سراسر منطقه به‌کار گرفته شود و شبکه‌ای از فضاهای سبز درختی ایجاد کنند که به یکپارچگی و زیباسازی فضا کمک می‌کند، درحالی‌که به ایجاد فضاهای سبز درختی بزرگ مثل پارک‌ها نیاز نباشد.

کمترین مساحت چیدمان‌ها مربوط به چیدمان کپه‌ای و تک‌پایه بود که نشان‌دهنده کمبود فضاهای درختی کپه‌ای مثل پارک‌ها در منطقه‌های مورد مطالعه است. چیدمان تک‌پایه (تک‌درخت) نیز در برخی شرایط می‌تواند مفید باشد، اما باتوجه‌به ویژگی‌های این منطقه‌ها، استفاده از این چیدمان، محدودیت‌هایی مانند کارایی کمتر در کاهش آلودگی، محدودیت در ایجاد فضاهای اجتماعی، و جذابیت کمتر بصری دارد. بااین‌حال، چیدمان تک‌پایه می‌تواند در نقاطی که فضای کافی برای ایجاد چیدمان‌های دیگر وجود ندارد (مانند کنار ساختمان‌های بزرگ یا میدان‌ها)، یا برای تأکید بصری در برخی نقاط خاص شهری، کاربرد داشته باشد، اما به‌طورکلی، چیدمان تک‌پایه در مقایسه با چیدمان‌های خطی و کپه‌ای، کارایی کمتری در این منطقه‌ها دارد.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل سرانه فضای سبز درختی در منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تهران بیانگر نابرابری قابل‌توجهی

در توزیع این فضاها هم بین منطقه‌ها و هم در میان نواحی داخلی هر منطقه است. این سرانه کم به‌ویژه در برخی نواحی، محدودیت‌های جدی در تأمین فضای سبز درختی کافی برای ساکنان این نواحی ایجاد کرده است. تراکم زیاد جمعیت و محدودیت‌های فیزیکی ناشی از زیرساخت‌های موجود از دلایل اصلی این وضعیت است. پژوهش‌های زیادی، نتایج پژوهش پیش‌رو را تأیید می‌کنند. بررسی چیدمان درختان شهری در شهر ووهان در چین نشان داد که پوشش تاج درختان به‌صورت پراکنده در نواحی مختلف شهری (ازجمله درختان خیابانی، درختان پراکنده در پارک‌ها و منطقه‌های مسکونی) توزیع شده است (Lian *et al.*, 2024). یافته‌های پژوهش پیش‌رو نیز نشان می‌دهند که فضای سبز درختی در منطقه‌های مورد مطالعه به‌طور پراکنده و در لکه‌های مختلف توزیع شده است. این موضوع به‌ویژه در منطقه‌هایی با تراکم جمعیتی زیاد اهمیت دارد و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای توسعه فضای سبز درختی هستند. همچنین، کمبود فضای سبز درختی و سرانه کم در منطقه‌های مورد مطالعه، ضرورت سیاست‌های جدید برای توسعه فضای سبز درختی را نشان می‌دهد. هم‌راستا با این نتایج، بررسی کیفیت فضای سبز و اثرات محیط‌زیستی آن در منطقه ۱۰ تهران نشان داد که توزیع نامتوازن فضای سبز، یکی از چالش‌های اساسی این منطقه است (Alipour *et al.*, 2020). بررسی چیدمان درختان شهری در شهر ووهان در چین بیانگر طراحی الگوی فضای سبز این شهر به‌صورت حلقه‌های متحدالمرکز بود (Zhang *et al.*, 2015). این الگو، برخلاف الگوهای غالبِ خطی و کپه‌ای در شهر تهران، به بهبود پیوستگی فضایی کمک می‌کند. یافته‌های مربوط به پراکندگی نامتوازن فضای سبز درختی در منطقه‌های پرجمعیت تهران، مشابه با نتایج گزارش‌شده توسط Ghale و همکاران (۲۰۲۳) در شهر دهرادون در هند است. در این شهر نیز توسعه فضای سبز خطی در معابر عمومی به‌عنوان یک راهکار برای کاهش نابرابری فضایی و افزایش دسترسی پیشنهاد شده است. این رویکرد با نتایج پژوهش پیش‌رو مبنی‌بر بیشینه مساحت فضای سبز تهران به‌صورت الگوی خطی مطابقت دارد. به‌طورکلی، الگوی خطی فضای سبز درختی، به‌ویژه در معابر شهری، راهکاری عملی و مؤثر در کلان‌شهرهای پرجمعیت است. همچنین، تجربه موفقیت‌آمیز شهرهایی مانند شانگهای چین و دهرادون هند در طراحی الگوهای خطی و تقویت پیوستگی فضایی به‌عنوان الگویی برای تهران قابل‌استفاده است. گفتنی است که چیدمان کپه‌ای برای افزایش کیفیت محیط‌زیستیِ منطقه‌های شهری مناسب‌تر است. زیرا این چیدمان به‌دلیل تمرکز زیاد درختان و مساحت لکه‌های بزرگ‌تر، خدمات بوم‌شناختی بیشتری ارائه می‌دهد. در مقابل، چیدمان خطی به‌عنوان گزینه‌ای برای بهبود دسترسی به فضای سبز و کاهش نابرابری در توزیع آن، به‌ویژه در منطقه‌های پرتراکم توصیه می‌شود.

باتوجه‌به یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای مختلفی می‌توان ارائه داد. باتوجه‌به کمبود فضا در منطقه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲، تراکم زیاد جمعیتی و متوسط سرانه فضای سبز درختی شهر تهران (۱۶/۷۸ متر مربع) پیشنهاد می‌شود که توسعه فضای سبز درختی به‌صورت خطی (کاشت درختان در امتداد خیابان‌ها، معابر و پیاده‌روها) به‌عنوان یک راهکار عملی و مقرون‌به‌صرفه مدنظر قرار گیرد. این نوع چیدمان می‌تواند به بهبود شرایط محیط‌زیستی و کاهش آلودگی هوا کمک کند. باتوجه‌به نابرابری موجود در توزیع فضای سبز درختی بین منطقه‌ها و نواحی مختلف به‌ویژه در منطقه ۱۰ پیشنهاد می‌شود که سرانه فضای سبز درختی با ایجاد پارک‌های کوچک محلی و باغچه‌های شهری در این منطقه‌ها افزایش یابد. برای توسعه فضای سبز درختی، به‌ویژه در منطقه‌هایی که با محدودیت زمین مواجه هستند، پیشنهاد می‌شود که زمین‌های بایر و بدون استفاده به فضای سبز درختی اختصاص داده شوند. همچنین، تخریب بافت فرسوده و نوسازی آن‌ها با همکاری شهرداری و با مشوق‌ها و کمک مالی به مالکان می‌توانند به بهبود کیفیت زندگی در این منطقه‌ها کمک کنند. بدین منظور، تأمین بودجه این اقدامات از طریق عوارض شهری، مشارکت بخش خصوصی یا کمک‌های سازمان‌های مردم‌نهاد و نیز هماهنگی با سازمان‌های مرتبط برای رفع تعارض با زیرساخت‌های شهری مانند خطوط برق و تأسیسات، ایجاد فضای سبز درختی عمودی و پشت‌بام سبز، ارائه مشوق‌های مالیاتی یا

یارانه برای ایجاد فضای سبز بر روی پشت‌بام‌ها و دیوارها در منطقه‌های پرجمعیت، تأمین منابع مالی اولیه از طریق حمایت شهرداری و نهادهای محیط‌زیستی، تدوین مقررات ایمنی و نگهداری و درنهایت، آموزش شهروندان برای اجرای صحیح این پروژه‌ها پیشنهاد می‌شود.

References

- Alipour, A., Bagheri, M., Charkaneh, K., Mahmoudi Chenari, H. and Khodadad, M., 2020. Analysis of the quality and environmental effects of urban green spaces (study: District 10 of Tehran Municipality). Journal of Sustainable Development of Geographical Environment, 1(1): 33-42 (In Persian with English summary).
- Bahmanpour, H., 2016. Urban Environnement Management. Textbook, Islamic Azad University, Shahrood Branch, Shahrood, Iran, 213p (In Persian).
- Bertram, C. and Rehdanz, K., 2015. The role of urban green space for human well-being. Ecological Economics, 120: 139-152.
- Chang, Q., Li, S., Wang, Y., Wu, J. and Xie, M., 2013. Spatial process of green infrastructure changes associated with rapid urbanization in Shenzhen, China. Chinese Geographical Science, 23: 113-128.
- Chu, M., Lu, J. and Sun, D., 2022. Influence of urban agglomeration expansion on fragmentation of green space: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Land, 11(2): 275.
- Clark, M.L., Aide, T.M., Grau, H.R. and Riner, G., 2010. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. Remote Sensing of Environment, 114(11): 2816-2832.
- Daz, B., Ghaffari Gilandeh, A. and Azizi, A., 2020. Analyzing of urban green space changes in Gorgan City using landscape metrics. Journal of Environmental Science and Technology, 22(5): 167-181 (In Persian with English summary).
- Deng, X., Huang, J., Rozelle, S. and Uchida, E., 2008. Growth, population and industrialization, and urban land expansion of China. Journal of Urban Economics, 63(1): 96-115.
- Fakour, A., Shataee Jouibary, Sh., Mikaeili Tabrizi, A.R. and Salehnasab, A., 2016. Quantative status of Mashhad urban arboreal green space and investigation on its possibility developing using WLC method and GIS. Journal of Wood and Forest Science and Technology Research, 23(1): 195-217 (In Persian with English summary).
- Fotoohi, O. and Barghjelveh, Sh., 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 (In Persian with English summary).
- Ghale, B., Gupta, K. and Roy, A., 2023. Evaluating public urban green spaces: a composite green space index for measuring accessibility and spatial quality. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48: 101-108.
- Goddard, M.A., Dougill, A.J. and Benton, T.G., 2010. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments. Trends in Ecology and Evolution, 25(2): 90-98.
- Haaland, C. and van Den Bosch, C.K., 2015. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. Urban Forestry and Urban Greening, 14(4): 760-771
- Hassanpour, P., Sayyahnia, R. and Esmaeilzadeh, H., 2020. Ecological structure assessment of urban green space using the landscape approach (case study: Tehran's 22nd district). Environmental Sciences, 18: 187-202 (In Persian with English summary).
- Jaafari, Sh., Alizadeh Shabani, A., Moeinaddini, M., Danehkar, A. and Alam Beigi, A., 2018. Modeling the relationships between urban green space, air and noise pollution and temperature using landscape metrics. RS and GIS for Natural Resources, 9(2): 59-75 (In Persian with English summary).
- Kothencz, G., Kolcsár, R., Cabrera-Barona, P. and Szilassi, P., 2017. Urban green space perception and its contribution to well-being. International Journal of Environmental Research and Public Health, 14(7): 766.
- Lian, X., Jiao, L., Liu, Z., Jia, Q., Liu, W. and Liu, Y., 2024. A detection of street trees and green space: Understanding contribution of urban trees to climate change mitigation. Urban Forestry and Urban Greening, 101: 128561.
- Malarvizhi, K., Kumar, S.V. and Porchelvan, P., 2016. Use of high resolution Google earth satellite imagery in landuse map preparation for urban related applications. Procedia Technology, 24: 1835-1842.
- McGovern, M. and Pasher, J., 2016. Canadian urban tree canopy cover and carbon sequestration status and change 1990–2012. Urban Forestry and Urban Greening, 20: 227-232.
- Mirsanjeri, M.M. and Mohammadyari, F., 2022. Analysis of land use in the Behbahan city approach landscape ecology. Journal of Environmental Science and Technology, 24(3): 191-204 (In Persian with English summary).
- Mirzade Tabatabaee, M., Robati, M. and Azizi, Z., 2023. Determination of spatial pattern of urban green spread (case study: District 5 of Tehran municipality). Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 22(67): 171-188 (In Persian with English summary).
- Nohegar, A., Jabariyan Amiri, B. and Afrakhte, R., 2015. Land use analysis on Guilan central district using landscape ecology approach. Geography and Territorial Spatial Arrangement, 5(15): 197-214 (In Persian).
- Ramezani Mehrian, M., 2022. Assessing the structural quality of green space network in urban environments, case study: District 16 of Tehran city. Journal of Geographical Urban Planning Research, 10(1): 81-99 (In Persian with English summary).
- Roscoe, C., Mackay, C., Gulliver, J., Hodgson, S., Cai, Y., Vineis, P. and Fecht, D., 2022. Associations of private residential gardens versus other greenspace types with cardiovascular and respiratory disease mortality:

Observational evidence from UK Biobank. Environment International, 167: 107427.
- Senanayake, I.P., Welivitiya, W.D.D.P. and Nadeeka, P.M., 2013. Urban green spaces analysis for development planning in Colombo, Sri Lanka, utilizing THEOS satellite imagery – A remote sensing and GIS approach. Urban Forestry and Urban Greening, 12(3): 307-314.
- Sithole, S.M., Musakwa, W., Magidi, J. and Kibangou, A.Y., 2024. Characterising landcover changes and urban sprawl using geospatial techniques and landscape metrics in Bulawayo, Zimbabwe (1984–2022). Heliyon, 10(6): e27275.
- Taheri Sarteshnizi, F., Feghhi, J. and Danehkar, A., 2013. Investigating the effect of landscape structure on urban thermal islands (Case study: Karaj city). Proceedings of National Geomatics Conference. Tehran, Iran, 24-25 May 2004: 10p (In Persian).
- Taylor, J.R. and Lovell, S.T., 2012. Mapping public and private spaces of urban agriculture in Chicago through the analysis of high-resolution aerial images in Google Earth. Landscape and Urban Planning, 108(1): 57-70.
- Tehran Municipality, 2023. Population and Manpower, Agriculture, Forestry and Fisheries. Available at: https://data.tehran.ir (In Persian).
- Woldesemayat, E.M. and Genovese, P.V., 2021. Urban green space composition and configuration in functional land use areas in Addis Ababa, Ethiopia, and their relationship with urban form. Land, 10(1): 85.
- Xu, X., Duan, X., Sun, H. and Sun, Q., 2011. Green space changes and planning in the capital region of China. Environmental Management, 47: 456-467.
- Yang, X., Jiang, G.M., Luo, X. and Zheng, Z., 2012. Preliminary mapping of high-resolution rural population distribution based on imagery from Google Earth: A case study in the Lake Tai basin, eastern China. Applied Geography, 32(2): 221-227.
- Zhang, Q., Chen, C., Wang, J., Yang, D., Zhang, Y., Wang, Z. and Gao, M., 2020. The spatial granularity effect, changing landscape patterns, and suitable landscape metrics in the Three Gorges Reservoir Area, 1995–2015. Ecological Indicators, 114: 106259.
- Zhang, Y., Li, J. and Wang, X., 2015. Spatial characteristics of urban green space for further optimization of the landscape pattern and construction of an urban green space landscape system with a rational structure, scientific layout and ecological functions. In Proceedings of the International Conference on Landscape, Architecture and Urban Planning, 156-161.
- Zhang, Y., Van Dijk, T., Tang, J. and Berg, A.E.v.d., 2015. Green space attachment and health: a comparative study in two urban neighborhoods. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12: 14342-14363.
- Zhou, W., Pu, Y., Dai, H. and Jin, Q., 2017. Cooperative interconnection settlement among ISPs through NAP. European Journal of Operational Research, 256(3): 991-1003.