



FANPAY
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10, Number 3, Autumn, (2025)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Spatial Analysis of More-Than-Three-Decade Green Infrastructure Change Using Landscape Ecology Approach in Borujerd City

Iman Saeedi^{*1}, Hassan Darabi²

*1. Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran.

2. Department of Environmental Design, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Email Address: Isaeedi@malayeru.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article Type:

Research Paper

Article History:

Received Date:

2025/09/02

Revised Date:

2025/09/12

Accepted Date:

2025/09/24

Published Date:

2025/10/04

Keywords:

Green Infrastructure
Fragmentation,
Remote Sensing,
Semi-Arid Urban
Sustainability,
Blue-Green Infrastructure.

Green infrastructure is integral to urban areas, delivering ecosystem services that influence urban quality of life. Rapid urban growth endangers this infrastructure, leading to notable structural and functional decline. This issue requires deeper examination in semi-arid and arid regions, particularly under water stress conditions. Accordingly, this study aims to conduct a systematic, criteria-based, and temporally explicit analysis to reveal trends in urban green infrastructure changes using landscape ecology metrics. For this purpose, a spatiotemporal analysis of Green Infrastructure (GI) dynamics in Borujerd, Iran (1990-2025) was performed using Landsat imagery. First, land cover was classified into built-up areas, green infrastructure, and barren land. Subsequently, the trends of green infrastructure changes were analyzed using 10 landscape ecology metrics. The results indicate that rapid urbanization (a 128% expansion) has caused severe fragmentation of green infrastructure. Key metrics—Patch Density (NP ↑), Edge Density (ED ↑), and Largest Patch Index (LPI ↓)—signify habitat fragmentation, despite a relative improvement in green infrastructure area by 2025. Landscape connectivity (CONTAG) has decreased significantly. This trend indicates intensified water stress in arid and semi-arid regions, as fragmented green infrastructure requires more irrigation. Robust quantification using TerrSet and Fragstats provided high accuracy (OA >90%, Kappa >0.82). The findings underscore that integrated blue-green infrastructure and hierarchical ecological networks require appropriate management to prevent continued fragmentation and enhance resilience in water-scarce Iranian cities. Therefore, policy reforms and adaptive planning for green infrastructure are needed, with a focus on reducing water demand under stress while preserving ecosystem services.

Cite this article:

Iman Saeedi, Hassan Darabi (2025). Spatial Analysis of More-Than-Three-Decade Green Infrastructure Change Using Landscape Ecology Approach in Borujerd City, Journal of Environmental Sciences Studies , 10(3), Pages 10676-10689.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Green Infrastructure (GI) is a critical network of natural elements that delivers essential ecosystem services, enhances biodiversity, and improves urban well-being. In semi-arid and arid regions like Iran, GI faces a severe threat from rapid, unplanned urban expansion and intense water stress, creating a paradox where its need is greatest but its viability is most compromised. While well-studied in temperate climates, a significant research gap exists regarding the long-term spatiotemporal dynamics of GI in water-scarce urban settings. This study addresses this gap by conducting a systematic, metric-based analysis of GI changes in Borujerd, Iran, a representative mid-sized city in the semi-arid Zagros region, over a 35-year period (1990–2025).

Materials and methods

This study employed a remote sensing approach to analyze spatial transformations of green and blue infrastructure in Borujerd City over a 40-year period (1990-2025). Four Landsat satellite images (Landsat 5/TM, 1990; Landsat 5/TM, 2000; Landsat 8/OLI, 2018; Landsat 9/OLI-2, 2025) were processed using TerrSet software (v.18.31). Following atmospheric correction and spectral standardization, supervised classification with Maximum Likelihood algorithm generated land use/cover maps, validated with overall accuracy >90% and Kappa coefficient >0.82. Subsequent analysis utilized Fragstats 4.2 to calculate ten landscape ecology metrics at both class and landscape levels, examining spatial dynamics, fragmentation patterns, and connectivity changes of green and blue infrastructure networks. This multi-temporal analysis provides comprehensive insights into the ecological transformation of urban green spaces over four decades.

Results and discussion

Built-up areas expanded explosively by 128% (from 1,206.54 ha in 1990 to 2,748.6 ha in 2025), primarily at the expense of barren land (-25%). GI area showed a fluctuating trend, decreasing initially before a partial recovery to 4,388.94 ha by 2025. Despite the recovery in area, landscape metrics revealed severe qualitative degradation. The Number of Patches (NP) for GI increased by 74%, indicating intense subdivision. The Largest Patch Index (LPI) decreased by 17%, signifying the loss of core habitat areas. Effective Mesh Size (MESH) nearly halved, demonstrating increased isolation of GI patches. At the landscape level, connectivity (CONTAG) decreased significantly from 84.48 to 73.9, indicating a breakdown in spatial cohesion. Increased diversity (SHDI) and evenness (SHEI) reflected a more heterogeneous landscape, a negative consequence of fragmentation and land cover intermixing due to urban sprawl.

Conclusion

The results demonstrate that rapid urbanization has driven severe fragmentation of GI in Borujerd, significantly reducing ecological connectivity and functionality despite a recent increase in green space area. The findings underscore that in water-scarce environments, the spatial configuration of GI is a more critical determinant of its sustainability and resilience than its total area alone. The proposed strategies offer a pathway for Borujerd and similar cities to enhance ecological resilience, optimize water use, and secure ecosystem services for future generations.



تحلیل فضایی بیش از سه دهه تغییرات زیرساخت‌های سبز با استفاده از رویکرد

اکولوژی سیمای سرزمین در شهر بروجرد

ایمان سعیدی^{۱*}، حسن دارابی^۲

*-گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر

۲-گروه طراحی محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران،

*ایمیل نویسنده مسئول: Isaeedi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی	زیرساخت‌های سبز، بخش تفکیک ناپذیر عرصه های شهری است که وظیفه ارائه خدمات اکوسیستمی را برعهده دارد. بر همین اساس نیز بر کیفیت زندگی شهری اثرگذار است. اما به دلیل رشد سرسام آور شهری این زیرساخت ها به صورت مداوم در معرض تهدید و در نتیجه کاهش چشمگیری ساختاری و عملکردی قرار دارند. این موضوع در مناطق نیمه خشک و خشک، به ویژه در شرایط تنش آبی، نیازمند بررسی عمیق تری است. بر همین اساس هدف این مطالعه بررسی نظاممند، مبتنی بر معیار و با صراحت زمانی برای آشکار کردن روندها تغییر زیرساخت های سبز شهری به کارگیری معیارهای بوم‌شناسی سیمای سرزمین است. به این منظور تجزیه و تحلیل مکانی-زمانی پویایی زیرساخت‌های سبز (GI) در بروجرد، ایران (۱۹۹۰-۲۰۲۵) با استفاده از تصاویر لندست، صورت گرفته است. در ابتدا، اقدام به طبقه بندی پوشش زمین به مناطق ساخته شده، زیرساخت‌های سبز و زمین‌های بایر شد سپس روند تغییرات زیرساخت‌های سبز با استفاده از ۱۰ متریک اکولوژی سیمای سرزمین تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهد شهرنشینی سریع (گسترش ۱۲۸٪) باعث گسستگی شدید زیرساخت سبز شده است. معیارهای کلیدی - تراکم لکه (NP ↑)، تراکم لکه (ED ↑) و شاخص بزرگترین لکه (LPI ↓) نشان دهنده تجزیه زیستگاه، علیرغم بهبود نسبی زیرساخت سبز تا سال ۲۰۲۵ هستند، اتصال سیمای سرزمین (CONTAG) به طور قابل توجهی کاهش یافته است. این روند دال بر تشدید تنش آبی در نواحی خشک و نیمه‌خشک است. چراکه زیرساخت‌های سبز گسسته نیاز به آبیاری بیشتری دارد. از صحت، Fragstats و TerrSet کمی‌سازی قوی ($OA > 90\%$ ، $Kappa > 0.82$) ارائه دادند که زیرساخت‌های آبی-سبز یکپارچه و شبکه‌های اکولوژیکی سلسله مراتبی نیازمند مدیریتی متناسب برای پیشگیری از تداوم روند گسستگی و افزایش تاب‌آوری در شهرهای کم آب ایران است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲	
کلید واژه ها: گسستگی زیرساخت‌های سبز، سنجش از دور، پایداری شهری نیمه‌خشک، زیرساخت‌های آبی- سبز	

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2025.544552.2402

زیرساخت‌های سبز به عنوان یک رویکرد بنیادین در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت سیمای سرزمین، به‌عنوان شبکه‌ای از عناصر طبیعی و نیمه‌طبیعی عمل می‌کنند که خدمات اکوسیستمی را در محیط‌های شهری تأمین و پایداری اکولوژیک را تقویت می‌کنند (Monteiro et al., 2020; Hammack & Barber, 2021). این مفهوم، ریشه در اکولوژی سیمای سرزمین دارد و بر پیوستگی فضایی، چندان‌کردی بودن و بازتاب‌پذیری در برابر تغییرات تأکید دارد. در مواجهه با چالش‌هایی مانند گسترش شهری، تخریب زیستگاه‌ها و تغییر اقلیم، زیرساخت‌های سبز به‌عنوان راهکاری استراتژیک برای بازسازی پیوستگی اکولوژیک و ارتقای تاب‌آوری شهری مطرح شده‌اند (Vilanova et al., 2024; Ramyar, 2017; Artmann et al., 2017). یک پارچه‌سازی زیرساخت‌های سبز در برنامه‌ریزی شهری، توانایی آن در بهبود پیوستگی اکولوژیک، حفاظت از تنوع زیستی، ارتقای کیفیت زندگی شهری، کاهش فشارهای محیطی و تقویت خدمات اکوسیستمی را تأیید کرده است (Yacamán Ochoa et al., 2020; Stefanakis, 2019). در این راستا، اکولوژی سیمای سرزمین به‌عنوان چارچوب نظری و روش‌شناختی، امکان درک الگوهای فضایی، فرآیندهای اکولوژیک و تعاملات بین سیستم‌های طبیعی و انسانی را فراهم می‌کند (Vilanova et al., 2024; Serra et al., 2024). کاربرد متریک‌های کمی سیمای سرزمین، نظیر پیوستگی شبکه، مقیاس مقاومت و تحلیل کریدورها، ارزیابی اثربخشی زیرساخت‌های سبز در حفظ خدمات اکوسیستمی در طول زمان را ممکن ساخته است (Sun et al., 2022; Huang et al., 2020). رویکردهای چندمقیاسی و تحلیل‌های زمانی-مکانی نیز به درک پویایی این شبکه‌ها در برابر تحولات شهری و تغییرات کاربری اراضی کمک کرده‌اند (Vilanova et al., 2024; Zhang et al., 2022). بررسی تحول تاریخی زیرساخت‌های سبز نشان می‌دهد که این تفکر برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ در پایگاه داده‌های علمی پدیدار شد (Ying et al., 2022). پس از آن به‌عنوان تلاشی هوشمند برای حفاظت عرصه‌های طبیعی به‌طور اخص در محیط‌های شهری در نظر گرفته شده و بکار رفت (Bae et al. 2021, Ramyar and Zarghami 2017, Hersperger et al. 2021). این مفهوم به تدریج گسترش یافت و ارتباط آن با سلامت انسان، رفاه شهری و خدمات اکوسیستمی تقویت شد. زولاس و همکاران (۲۰۰۰) مروری اثرگذار بر نقش اکوسیستم‌ها در بهبود سلامت در نواحی شهری در چارچوب زیر ساخت‌های سبز داشتند (Tzoulas et al. 2007). آنها چارچوبی تلفیقی از زیرساخت‌های سبز، سلامت اکوسیستم و رفاه انسان ارائه کردند که زمینه‌ساز همکاری‌های بین‌رشته‌ای شد (Ying et al. 2022, Bae et al. 2021, Anees et al. 2023). در همین راستا مطالعاتی متفاوتی در خصوص اثرات شهر بر خدمات اکوسیستم، (Ying et al. 2022, Arthur and Hack 2022) ترسیب کربن (Ramyar and Zarghami 2017) مقابله با تغییرات اقلیمی (Kumar et al. 2024, Ramyar and Zarghami 2017) و تعادل میان سیاست‌های پیشگیری و سازگاری با تغییر اقلیم صورت گرفت (Arthur and Hack 2022, Ramyar and Zarghami 2017). طی سالهای ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ مطالعات زیرساخت‌های سبز رشد چشمگیری داشت که اصطلاحاً از آن به‌عنوان معرفت‌شناسی انفجاری نام می‌برند (Ying et al. 2022). در همین راستا مبحث زیرساخت‌های سبز توسط انجمن و سازمان‌های علمی مانند اتحادیه جهانی معماری منظر نه تنها به رسمیت شناخته شد، بلکه نقش آن در منظر برجسته شد. در این دوره موضوعات متفاوتی صورت مانند بحث پایداری مناطق شهری (Ying et al. 2022)، مدیریت رواناب‌های شهری (Bae et al. 2021, Schueler, Fraley-McNeal and Capiella 2009)، شبکه اکولوژیک (Kong et al. 2010) و اکوسیستم‌های شهری (Oh, Lee and Park 2011)، تعدیل اقلیم (Bowler et al. 2010)، پایداری منظر، (Termorshuizen and Opdam 2009) مورد توجه قرار گرفتند. طی سالهای ۲۰۱۳-۲۰۱۴ موضوعات مطالعات در خصوص زیرساخت‌های سبز و آبی عمیق شده و مباحثی فراتر از موضوعات سنتی مورد توجه قرار گرفت. موضوعاتی مانند مدیریت رواناب‌ها به مهندسی و مدیریت تبدیل شد (Ying et al. 2022). بحث‌های جدید مانند سبزراه‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های سبز (Newell et al. 2013)، ارزش‌های اجتماعی و فرهنگی زیرساخت‌های سبز (Gómez-Baggethun and Barton 2013) را می‌توان به‌عنوان مصادیق این مبحث ذکر کرد. علاوه بر این بحث‌های نوینی مانند سینرژی انسان و اکوسیستم (Gill et al. 2008, Andersson et al. 2014) و عدالت و تغییر اقلیم و زیرساخت‌های سبز (Hysa 2021, Kabisch and Haase 2014) در کانون توجه محققان قرار گرفت. ضمن اینکه افرادی مانند ماتئوس و همکاران موضوعاتی مانند سازگاری با تغییرات اقلیمی و چالش‌های موجود آن در چارچوب زیرساخت‌های سبز را بسط دادند (Matthews, Lo and Byrne 2015). سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ شاهد تشدید رشد انتشار مقالات در خصوص این موضوع بود. در این برهه از زمان

مقیاس فضایی، مقیاس‌های میانی و خرد، توسعه با پیامدهای محدود (Dhakal and Chevalier 2017)، برجسته ساختن نقش بام‌های سبز (Arthur and Hack 2022, Mentens, Raes and Hermy 2006)، خدمات اکوسیستم و نقش زیرساخت‌ها در تاب آوری شهری (Meerow and Newell 2017, Darabi et al. 2023) از جمله محورهای کلیدی به شمار می‌روند. ضمن این که تغییرات اقلیم (Gunawardena, Wells and Kershaw 2017)، حفاظت از تنوع زیستی (Hostetler, Allen and Meurk 2011)، عملکرد زیرساخت‌های سبز در منظر شهری، مرمت محیط شهری (Sun, Liu and Wei 2021) و همچنین مطالعات متمرکز بر روندها و سری‌های زمانی با این موضوع نیز در دستور کار قرار داشت. مطالعات اخیر بیشتر به سمت یکپارچه‌سازی معیارهای اکولوژی سیمای سرزمین در برنامه‌ریزی و ارزیابی زیرساخت‌های سبز حرکت کرده‌اند (Rahimi and Jung 2025). استفاده از تحلیل‌های سناریو، سنجش از دور، و مدل‌های شبکه‌ای (مانند مدل‌های مقاومت و گرانش) امکان شناسایی کریدورها، منابع اکولوژیک و ساختار شبکه را فراهم کرده و بینش‌های عملی برای سیاست‌گذاران ارائه داده است. رویکردهای یکپارچه‌ای می‌توانند به طور مؤثر از فضاهای طبیعی حفاظت کرده و شبکه‌های بوم‌شناختی را تقویت کنند (Zhang et al. 2022, Sun, Wei and Han 2022). در عین حال، روش‌هایی مانند تحلیل الگوی مکانیف مورفولوژیکی، مدل‌های مقاومت و مدل‌های گرانش برای شناسایی منابع بوم‌شناختی، کریدورها و ساختارهای شبکه به کار گرفته شده‌اند و بینش‌های عملی را برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران شهری به ارمغان آورده‌اند (Huang et al., 2020; Zhang et al., 2022). با این حال، در مناطق نیمه‌خشک و خشک، به ویژه در شرایط تنش آبی، دانش کافی درباره عملکرد زیرساخت‌های سبز و تأثیر کم‌آبی بر پیوستگی سیمای سرزمین وجود ندارد. همچنین، کمبود مطالعات بلندمدت، سیستماتیک و مبتنی بر تحلیل زمانی-مکانی در این مناطق، به ویژه در ایران، یک شکاف تحقیقاتی مهم محسوب می‌شود که نیازمند بررسی عمیق تری است. بر این اساس نیاز به مطالعات نظام مند، مبتنی بر معیار و با صراحت زمانی برای آشکار کردن روندها و محرک‌های تغییر شاخص جغرافیایی وجود به طور اخص در مناطق خشک و نیمه خشک ایران محسوس است. این تحقیق با به‌کارگیری معیارهای بوم‌شناسی سیمای سرزمین برای تحلیل پویایی شاخص جغرافیایی در طول زمان، قصد دارد این شکاف را برطرف کند و چارچوبی متناسب برای درک و هدایت توسعه پایدار سیمای سرزمین شهری و منطقه‌ای ارائه دهد.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- محدوده مطالعاتی

شهر بروجرد به عنوان یکی از شهرهای متوسط غرب ایران و مرکز شهرستان بروجرد در استان لرستان واقع شده است. این شهر با مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۳ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی، در دامنه‌های زاگرس مرکزی و در ارتفاعی حدود ۱۵۷۰ متر از سطح دریا قرار گرفته و دارای اقلیمی نیمه‌خشک است. بروجرد به دلیل موقعیت ارتباطی و رشد شهری شتابان در دهه‌های اخیر، نمونه‌ای از چالش‌های مدیریت شهری در مناطق نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود. مرز منطقه مطالعه در این پژوهش به گونه‌ای تعریف شده است که نه تنها محدوده اداری شهر بروجرد، بلکه حاشیه‌ها و روستاهای اقماری که در تعامل اکولوژیک و گسترش کالبدی با شهر هستند را نیز در بر می‌گیرد. این روستاها بر اساس نقشه‌های طبقه‌بندی شده کاربری اراضی و تصاویر ماهواره‌ای شناسایی شدند که مهم‌ترین آن‌ها شامل: قلعه حاتم و قلعه شمسی در شمال غرب، گلدشت و فیال در غرب، روستاهای اقماری شهر بروجرد مانند فلک الدین، حاجی آباد، زرشگه و روستاهای دیگر در جنوب غرب، دهنو و فلک الدین در جنوب، و روستای قشلاق و مناطق پیرامونی در شرق و شمال شرق شهر هستند. توجیه انتخاب این مرز وسیع بر سه پایه استوار است: یک تعامل اکولوژیک: شبکه زیرساخت سبز (مانند کریدورهای آبی-سبز و کشاورزی حاشیه‌شهری) محدود به مرز اداری شهر نیست و روستاهای اطراف بخشی جدایی‌ناپذیر از این سیستم اکولوژیک به هم پیوسته را تشکیل می‌دهند. برای درک کامل پویایی سیمای سرزمین، مطالعه این شبکه یکپارچه ضروری است. دو الگوی گسترش شهری: همان‌طور که نقشه‌های تغییرات (شکل ۱) به وضوح نشان می‌دهند، توسعه کالبدی شهر بروجرد به صورت افقی و پراکنده (Sprawl) به سمت این روستاها و اراضی پیرامونی صورت گرفته است. بنابراین، برای کمی‌سازی دقیق فرآیندهای تخریب و تکه‌تکه‌شدگی، در نظر گرفتن این عرصه‌ها اجتناب‌ناپذیر بود. سه واحد هیدرولوژیکی: منطقه مطالعه تا حد امکان حوزه آبخیزهای کوچک منتهی به شهر و حریم رودخانه‌های محلی را پوشش می‌دهد تا تأثیر تغییر کاربری‌ها بر رواناب و چرخه آب نیز تا حدی مورد توجه قرار گیرد. این امر به ویژه با توجه تأکید مقاله بر «زیرساخت‌های آبی-سبز» حائز اهمیت است.

۲-۲- روش تحقیق

این پژوهش با هدف تحلیل فضایی تحولات زیرساخت‌های سبز و آبی در شهر بروجرد در بازه زمانی ۱۳۶۹ تا ۱۴۰۴ (۱۹۹۰-۲۰۲۵) طراحی شده است. برای این منظور، از داده‌های سنجنش از دور و روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. فرآیند تحقیق در چهار مرحله اصلی انجام گرفت: (۱) جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای، (۲) طبقه‌بندی نظارت‌شده و تولید نقشه کاربری اراضی، (۳) ارزیابی دقت نقشه‌ها، و (۴) تحلیل پویایی فضایی زیرساخت‌های سبز و آبی با استفاده از معیارهای اکولوژی سیمای سرزمین.

۲-۲-۱- جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

۲-۲-۱-۲- انتخاب تصاویر ماهواره‌ای

در این مطالعه، چهار تصویر ماهواره‌ای از سری Landsat شامل داده‌های Landsat 5/TM (1984, 1990)، Landsat 8/OLI (2018) و Landsat 9/OLI-2 (2025) متناظر با فصل تابستان در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۹، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۴ مورد استفاده قرار گرفتند، انتخاب این تاریخ‌ها به منظور تحلیل تحولات بلندمدت کاربری اراضی و پویایی زیرساخت‌های سبز و آبی در بازه ۴۰ ساله صورت گرفت، انتخاب این تاریخ‌ها به منظور تحلیل تحولات بلندمدت (۴۰ ساله) کاربری اراضی و پویایی زیرساخت‌های سبز و آبی در منطقه مطالعه صورت گرفت. تمامی تصاویر از پایگاه داده United States Geological Survey (USGS) در سطح بازتاب طیفی (Surface Reflectance, SR) دانلود شدند. این سطح داده شامل اصلاحات رادیومتری و هندسی اولیه است که با استفاده از الگوریتم‌های LEDAPS یا LaSRC اعمال شده‌اند و شامل تصحیح نپراکنش نور جوی، جذب بخار آب و زاویه تابش خورشید می‌شود. ویژگی‌های اصلی تصاویر در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱، مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش

نام ماهواره	زمان	سنجنده	تفکیک مکانی
لندست ۵	تابستان ۱۳۶۹ (۱۹۹۰)	TM	۳۰
لندست ۵	تابستان ۱۳۷۹ (۲۰۰۰)	TM	۳۰
لندست ۸	تابستان ۱۳۹۷ (۲۰۱۸)	OLI	۳۰
لندست ۹	تابستان ۱۴۰۴ (۲۰۲۵)	OLI-2	۳۰

۲-۲-۱-۳- پیش‌پردازش تصاویر در محیط TerrSet

هرچند داده‌های سطح ۲ از پیش تصحیح شده‌اند، به منظور بهبود کیفیت طیفی و کاهش نویزهای باقیمانده، مراحل زیر در محیط نرم‌افزار TerrSet (Ver 18.31) انجام شد:

- حذف نویزهای اتمسفری: برای تصحیح نویزهای جوی باقیمانده، الگوریتم DOS در باندهای طیفی اعمال شد، در این روش، حداقل مقدار بازتاب در هر باند به عنوان نویز جوی در نظر گرفته شده و از تمام پیکسل‌ها کسر می‌شود (معادله ۱) که در آن $\rho_{TOA}(\lambda)$ بازتاب در بالای جو (Top-of-Atmosphere)، $\rho_{dark}(\lambda)$ بازتاب پس‌زمینه جوی (حداقل مقدار در هر باند) و $\rho_{corrected}(\lambda)$ بازتاب تصحیح شده است:

$$\rho_{corrected}(\lambda) = \rho_{TOA}(\lambda) - \rho_{dark}(\lambda) \quad \text{معادله ۱}$$

- استانداردسازی مقیاس طیفی بین سنجنده‌ها: به منظور تطابق طیفی بین سنجنده‌های مختلف (TM، OLI، OLI-2)، باندهای مشترک (به‌ویژه باندهای مرئی و نزدیک به مادون قرمز) با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه نرمال شده و به یک مقیاس طیفی یکسان تبدیل شدند (معادله ۲) که ضرایب a و b از طریق مقایسه پیکسل‌های هم‌مکان در مناطق پایدار (مثلاً زمین بایر یا آب آرام) محاسبه شدند:

$$\rho_{norm}^{(i)} = a * \rho_{OLI} + b \quad \text{معادله ۲}$$

- استخراج محدوده مطالعه: با استفاده از ماژول Window در TerrSet، تصاویر ماهواره‌ای به محدوده شهر بروجرد و پیرامون آن (به‌عنوان منطقه مطالعه) برش داده شدند، این مرحله با استفاده از یک لایه مرزی شیپ فایل انجام شد تا حجم داده‌ها کاهش یافته و تحلیل‌ها به محدوده مورد نظر محدود شوند.

- تبدیل سیستم مختصات: تمام تصاویر به سیستم مختصات UTM Zone 39N (WGS84) و با واحد متر تبدیل شدند تا یکسان‌سازی هندسی و تطابق مکانی بین تصاویر مختلف تضمین شود.

۲-۲-۲-۲- طبقه‌بندی نظارت‌شده و تولید نقشه کاربری اراضی

۲-۲-۲-۱- تعریف کلاس‌های کاربری اراضی

بر اساس اهداف پژوهش سه کلاس اصلی زیر تعریف شدند:

- مناطق ساخته‌شده: شامل مناطق شهری، ساختمان‌ها، معابر و زیرساخت‌های سخت.
 - زیرساخت سبز: شامل پارک‌ها، فضای سبز عمومی، باغ‌ها، مزارع، و پوشش گیاهی طبیعی با توان تولید اکوسیستمی.
 - اراضی بایر: شامل خاک برهنه، مناطق کویری، و سطوح بدون پوشش گیاهی یا ساختار شهری.
- همچنین، در صورت شناسایی مناطق آبی (رودخانه‌ها، تالاب‌ها، حوضچه‌ها)، به‌عنوان زیرکلاسی از زیرساخت آبی در تحلیل‌های بعدی مورد توجه قرار گرفت.

۲-۲-۲-۲- استخراج نمونه‌های آموزشی

نمونه‌های آموزشی برای هر کلاس با روش ترکیبی از منابع زیر تهیه شدند:

- تصاویر رنگ کاذب (False Color Composite) با ترکیب باندهای ۵، ۴، ۳ (برای TM و OLI) به‌منظور تفکیک بهتر پوشش گیاهی.

- داده‌های میدانی: با استفاده از دستگاه‌های GPS در سال ۱۴۰۴، نقاط کلیدی در سه کلاس ثبت شدند.

- تصاویر با وضوح بالا از گوگل ارث پرو برای اعتبارسنجی و تکمیل نمونه‌های آموزشی در سال‌های قبل، از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا در گوگل ارث استفاده شد.

تعداد نمونه‌ها بر اساس حداقل تعداد پیکسل مورد نیاز برای طبقه‌بندی پایدار از معادله ۳ محاسبه شد:

$$N_{\min} = 10 * C$$

معادله ۳:

که در آن C تعداد کلاس‌ها (در اینجا ۳) است، بنابراین حداقل ۳۰ نمونه در هر کلاس (و در مجموع بیش از ۱۰۰ نمونه) جمع‌آوری شد.

۲-۲-۲-۳- طبقه‌بندی با الگوریتم Maximum Likelihood

الگوریتم Maximum Likelihood Classifier (MLC) در ماژول Image Classification نرم‌افزار TerrSet مورد استفاده قرار گرفت، این الگوریتم بر اساس توزیع نرمال چندمتغیره (Multivariate Normal Distribution) عمل می‌کند و احتمال تعلق هر پیکسل به هر کلاس را از طریق معادله ۴ محاسبه می‌کند:

$$P(\omega_i | x) = \frac{P(\omega_i) * f(x | \omega_i)}{\sum_{j=1}^C P(\omega_j) * f(x | \omega_j)} \quad \text{معادله ۴:}$$

$$f(x | \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{d}{2}} |\Sigma_i| \frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} (X - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - \mu_i)\right)$$

که در آن $P(\omega_i)$ - احتمال پیشین کلاس i ، $f(X | \omega_i)$ - چگالی احتمال چندنرمال برای بردار ویژگی X در کلاس i ، μ_i : بردار ویژگی کلاس i ، Σ_i : ماتریس کوواریانس کلاس i ، d : تعداد باندهای طیفی، هر پیکسل به کلاسی نسبت داده می‌شود که احتمال پسین آن بیشینه باشد.

۲-۲-۲-۴- ارزیابی دقت طبقه‌بندی

برای ارزیابی دقت نقشه‌های تولیدشده، از ماژول Accuracy Assessment در TerrSet استفاده شد، یک ماتریس خطای (Confusion Matrix) با استفاده از نقطه‌های کنترل زمینی (GCPs) مستقل از نمونه‌های آموزشی تهیه شد، تعداد نقاط کنترل حداقل یک و نیم برابر تعداد کلاس‌ها در هر کلاس در نظر گرفته شد (مجموعاً ۵۰ نقطه تصادفی) معیارهای ۵ و ۶ محاسبه شدند:

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^C n_{ii}}{N} \quad \text{معادله ۵: دقت کلی (Overall Accuracy - OA)}$$

که n_{ii} تعداد پیکسل‌های تشخیص صحیح در قطر ماتریس و N تعداد کل نقاط کنترل است.

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^C n_{ii} - \sum_{i=1}^C (n_{i+} * n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^C (n_{i+} * n_{+i})} \quad \text{معادله ۶: ضریب کاپا (Kappa Coefficient)}$$

که n_{i+} مجموع سطر i کاربری پیش‌بینی شده، n_{+i} مجموع ستون i کاربری واقعی، $K=0$ ، ۸ نشان‌دهنده توافق بسیار خوب است. نتایج نشان داد که تمام نقشه‌های تولیدشده دارای $OA > 90\%$ و $kappa > 0.82$ بودند که مطابق با استانداردهای بین‌المللی در مطالعات سیمای سرزمین و سنجش از دور معتبر محسوب می‌شوند.

۲-۳- تحلیل‌های پس از طبقه‌بندی

نقشه‌های کاربری اراضی تولیدشده در فرمت GeoTIFF ذخیره و به نرم‌افزار Fragstats نسخه ۴,۲ منتقل شدند، در این محیط، سنجه‌های سیمای سرزمین در دو سطح کلاس و سیمای سرزمین محاسبه شدند (جدول ۲). جدول ۲ سنجه‌های اکولوژی سیمای سرزمین مورد استفاده در این پژوهش را معرفی می‌کند که در دو سطح کلاس و سیمای سرزمین دسته‌بندی شده‌اند، سنجه‌هایی مانند CA (مساحت کلاس) و PLAND (درصد پوشش) تغییرات کمی فضای سبز را اندازه‌گیری می‌کنند. در حالی که NP (تعداد لکه‌ها) پراکندگی فضایی را نشان می‌دهد، سنجه‌های ترکیبی مانند LSI (شاخص شکل لکه) پیچیدگی مرزها را تحلیل کرده و CONTAG (پیوستگی) یکپارچگی مکانی را ارزیابی می‌نماید. سنجه‌های تنوع نظیر SHDI (شاخص تنوع شانون) و SHEI (شاخص یکنواختی شانون) طبق مطالعات Turner (1989) برای سنجش تعادل اکوسیستم به کار می‌روند، انتخاب این سنجه‌ها مبتنی بر پژوهش‌های پیشین در تحلیل تغییرات زیرساخت‌های سبز شهری است که قابلیت شناسایی الگوهای تجزیه زیستگاه‌ها را فراهم می‌کنند. این شاخص‌ها به منظور تحلیل تحولات فضایی، تکه‌تکه‌شدگی و پیوستگی زیرساخت‌های سبز و آبی در طول زمان مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲، سنجه‌های بکار برده شده در تحلیل فضایی ساختار سیمای سرزمین

سطح	CA	مساحت طبقه
کلاس	NP	تعداد لکه
کلاس	PLAND	درصد پوشش
کلاس	ENN-MN	متوسط نزدیک ترین فاصله همسایگی
کلاس	LPI	شاخص بزرگترین لکه
کلاس	LSI	شاخص شکل لکه
کلاس	MESH	اندازه شبکه تاثیرگذار
سیمای سرزمین	SHEI	شاخص یکنواختی شانون
سیمای سرزمین	SHDI	شاخص تنوع شانون
سیمای سرزمین	SIEI	شاخص یکنواختی سیمپسون
سیمای سرزمین	CONTAG	پیوستگی

سنجه‌های ارائه‌شده در پژوهش (جدول ۲) از نظر کفایت روش‌شناختی شامل سنجه‌های کمی (CA, PLAND) ساختاری (NP), LSI, ENN-MN, LPI, MESH و کارکردی-الگوی (SHEI, SHDI, CONTAG, SIEI) است که به‌خوبی تحولات کمی، پراکندگی، پیچیدگی، پیوستگی و تنوع فضایی را پوشش می‌دهند.

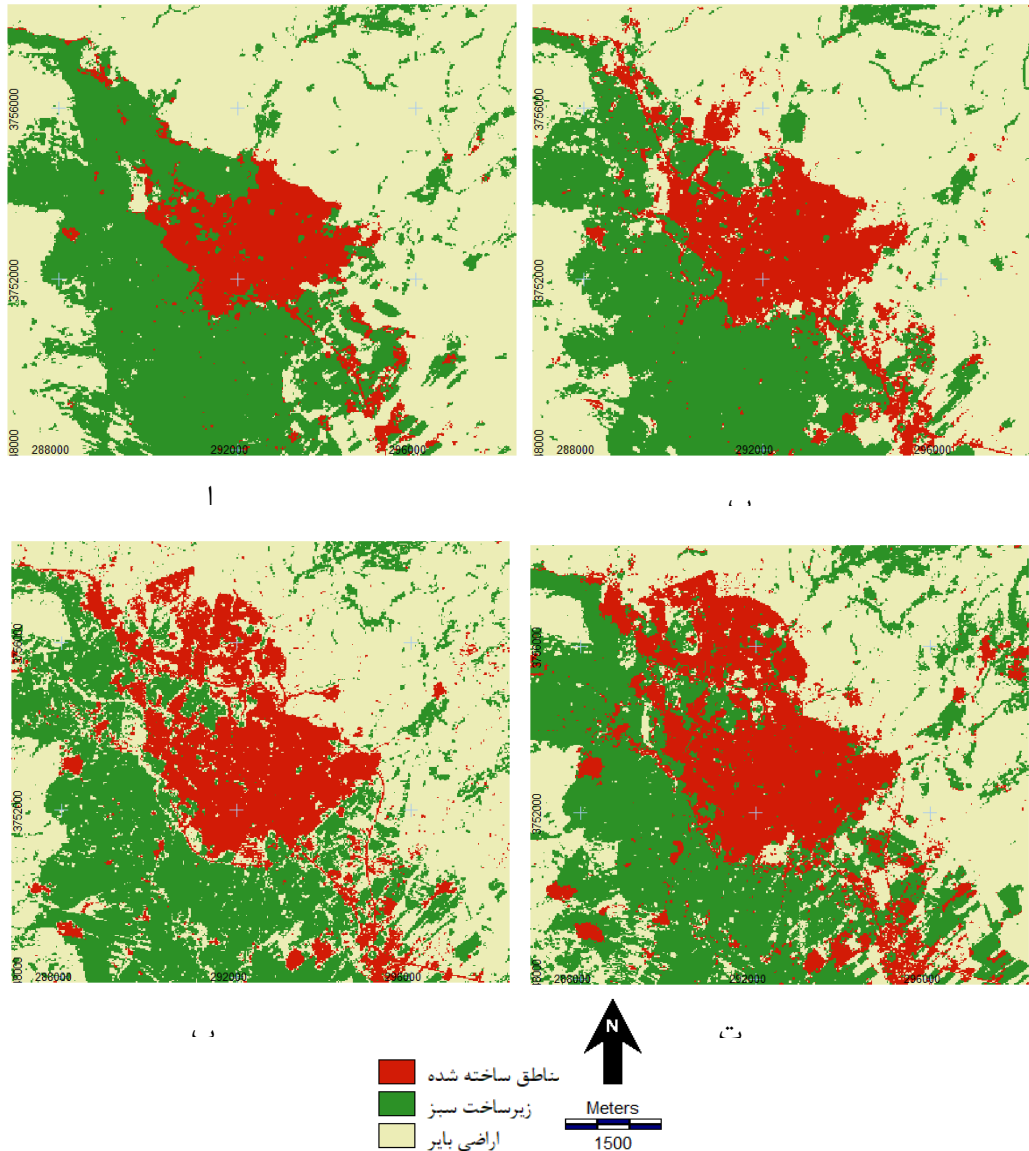
۳- نتایج

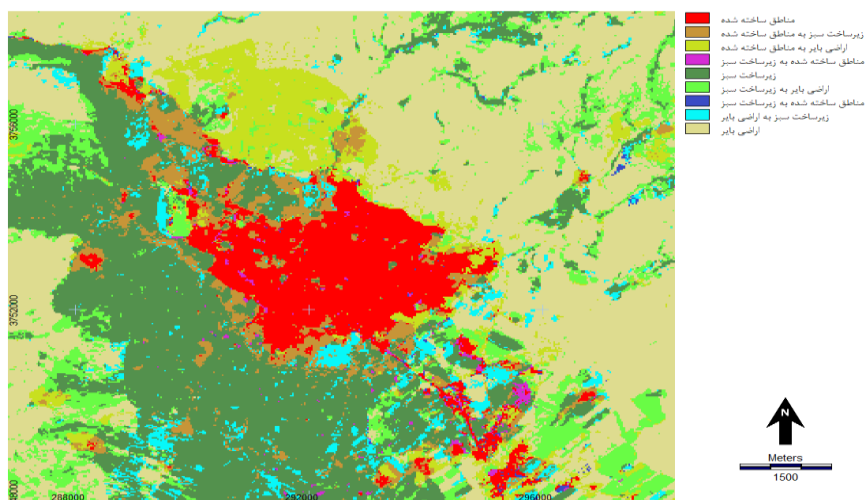
تحلیل کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۶۹ تا ۱۴۰۴ نشان می‌دهد که ساختار کاربری اراضی در شهر بروجرد تحولات چشمگیری داشته است. بر اساس جدول ۳، مساحت مناطق ساخته شده از ۱۲۰۶,۵۴ هکتار در سال ۱۳۶۹ به ۲۷۴۸,۰۶ هکتار در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است که معادل ۱۲۸ درصد رشد است. در همین بازه زمانی، مساحت اراضی بایر از ۶۶۰,۱۰۲۳ هکتار به ۴۹۶۶,۸۳ هکتار کاهش یافته (معادل ۲۵ درصد کاهش). مساحت زیرساخت‌های سبز در سال ۱۳۶۹ برابر با ۴۲۹۶,۰۶ هکتار بوده است که در سال ۱۳۷۹ به ۳۸۴۹,۸۴ هکتار کاهش یافته و سپس تا سال ۱۴۰۴ به ۴۳۸۸,۹۴ هکتار افزایش یافته است. این نشان‌دهنده یک روند اولیه کاهش و سپس افزایشی در مساحت زیرساخت‌های سبز است. نقشه‌های طبقه‌بندی شده کاربری اراضی (شکل ۱) الگوی فضایی-زمانی تغییرات را به وضوح نشان می‌دهند. در سال ۱۳۶۹، مناطق سبز به صورت پیوسته و عمدتاً در حاشیه شهر و در کنار اراضی بایر گسترش داشته‌اند. با گذشت زمان، به ویژه از سال ۱۳۷۹ به بعد، مناطق ساخته شده به صورت پراکنده و افقی در حاشیه شهر توسعه یافته و بخش‌هایی از فضای سبز و اراضی بایر را احاطه کرده‌اند. در سال ۱۴۰۴، ساختار شهری به شکل چند هسته‌ای درآمده و زیرساخت‌های سبز به صورت لکه‌های پراکنده در میان بافت شهری مشاهده می‌شوند. جدول ۳ مساحت کاربری‌های محدوده مطالعاتی را در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۹، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۴ نشان می‌دهد، نتایج این جدول روند کاهش اراضی بایر و افزایش مداوم مناطق ساخته شده را طی بیش از سه دهه در بروجرد نشان می‌دهد.

جدول ۳، مساحت کاربری های محدوده مطالعاتی به هکتار در سال های مورد بررسی

کاربری های اراضی			سال
اراضی بایر	زیرساخت سبز	مناطق ساخته شده	
54,1206	6,4296	23,6601	تابستان ۱۳۶۹
14,1678	84,3849	39,6576	تابستان ۱۳۷۹
82,2267	03,3930	52,5906	تابستان ۱۳۹۷
6,2748	94,4388	83,4966	تابستان ۱۴۰۴

شکل ۱، الگوی مکانی-زمانی تغییرات را به طور بصری ارائه می کند: در سال ۱۳۶۷ (الف) پهناهای وسیع زمین های بایر (به رنگ زرد) و زیرساخت سبز پیوسته (سبز) غالب اند، تا ۱۳۷۹ (ب) توسعه مناطق ساخته شده (قرمز) به ویژه در حاشیه شهر مشهود است، در ۱۳۹۷ (پ)، لکه های قرمز با گسترش افقی، اراضی بایر و فضای سبز مرکزی را احاطه کرده اند، روند تغییرات در سال ۱۴۰۴ (ت) حاکی از شکل گیری ساختار چند هسته ای با تکه های سبز پراکنده در میان بافت شهری است، این نقشه ها تجزیه پیشرونده کریدورهای سبز را تأیید می کنند که در پژوهش مهندسی مشاور هفت شهر (۱۴۰۲) نیز برای بروجرد هشدار داده شده بود، رنگ های روشن تر در مناطق مرکزی نشان دهنده کاهش شدید پوشش گیاهی در هسته تاریخی شهر است، این تحولات فضایی به شکل توامان در شکل ۲ نیز به تصویر کشیده شده است. شکل ۲ نیز تغییرات کاربری اراضی را در چهار دوره زمانی به صورت ترکیبی نشان می دهد و گسترش مناطق ساخته شده به سمت مناطق حاشیه ای و تکه تکه شدن فضاهای سبز را به وضوح آشکار می سازد.





شکل ۲، تغییرات کاربری اراضی در بین سال های ۱۳۶۷ تا ۱۴۰۴ در محدوده مطالعاتی

تحلیل سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس (جدول ۴) نشان می‌دهد که تعداد لکه‌های زیرساخت سبز (NP) از ۶۵۱ لکه در سال ۱۳۶۹ به ۱۱۳۲ لکه در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است (افزایش ۷۴ درصدی)، در حالی که شاخص بزرگترین لکه (LPI) از ۲۸۰۴۴ درصد به ۲۳۰۶۹ درصد کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده تجزیه و تکه‌تکه شدن فضاهای سبز است. شاخص تراکم لکه (ED) زیرساخت سبز از ۱۸۰۹۹ در سال ۱۳۶۹ به ۲۹۰۵۲ در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است که نشان‌دهنده پیچیدگی بیشتر مرزهای بین کلاس‌ها است. اندازه شبکه تأثیرگذار (MESH) زیرساخت سبز نیز از ۹۸۰۰۹۵ هکتار به ۶۸۵۰۶۱ هکتار کاهش یافته که بیانگر کاهش پیوستگی و افزایش چشمگیر انزوای لکه‌هاست، در سطح سیمای سرزمین (جدول ۵)، شاخص تنوع شانون (SHDI) از ۰۰۹۲۸ در سال ۱۳۶۹ به ۱۰۰۷ در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است. شاخص یکنواختی شانون (SHEI) نیز از ۰۰۸۴۵ به ۰۰۹۷۴ رسیده است. متوسط اندازه لکه (AREA_MN) از ۸۰۴۶ هکتار به ۳۰۵۲ هکتار کاهش یافته است. شاخص پیوستگی (CONTAG) از ۸۴۰۴۸ در سال ۱۳۶۹ به ۷۳۰۹ در سال ۱۴۰۴ کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش انسجام فضایی کلی منظر است. کاهش LPI (شاخص بزرگترین لکه) زمین‌های بایر از ۴۲،۷٪ به ۲۹،۵٪ حاکی از ناپدید شدن هسته‌های پیوسته طبیعی است، رشد LSI مناطق ساخته شده از ۱۳،۳ به ۲۴،۹ توسعه شهری نامنظم و پراکنده را تأیید می‌کند، افزایش MESH (اندازه شبکه مؤثر) اراضی بایر تا ۲۰۲۵، نشان‌دهنده کاهش قابلیت زیست‌پذیری برای گونه‌های وابسته به زیستگاه‌های پیوسته است، این الگوها طبق مدل‌های Li و Wu (2004) منجر به کاهش خدمات اکوسیستمی فضای سبز می‌شود.

جدول ۴، تحلیل فضایی تغییرات کاربری اراضی در سطح کلاس با استفاده از سنجه‌های اکولوژی سیمای سرزمین

سال	طبقه بندی پوشش زمین	متریک سیمای سرزمین					
		MESH	LSI	LPI	NP	PLAND	CA
۱۳۶۷	زمین بایر	901.2273	8672.13	7561.42	405	5359.54	23.6601
۱۳۶۷	زیرساخت سبز	9545.980	9954.18	4372.28	651	4963.35	6.4296
۱۳۶۷	مناطق ساخته شده	2378.74	3578.13	8145.7	375	9678.9	54.1206
۱۳۷۹	زمین بایر	32.2240	9409.16	5353.42	866	3307.54	39.6576
۱۳۷۹	زیرساخت سبز	6948.733	4155.17	5775.24	467	8054.31	84.3849
۱۳۷۹	مناطق ساخته شده	2658.137	5073.18	6258.10	613	8639.13	14.1678
۱۳۹۷	زمین بایر	773.1409	575.33	7906.33	2044	7966.48	52.5906
۱۳۹۷	زیرساخت سبز	4139.666	8397.29	4272.23	1253	4679.32	03.3930
۱۳۹۷	مناطق ساخته شده	0455.250	4906.22	3442.14	733	7355.18	82.2267
۱۴۰۴	زمین بایر	536.1077	3085.26	5131.29	1186	0334.41	83.4966
۱۴۰۴	زیرساخت سبز	6133.685	5226.29	6934.23	1132	2591.36	94.4388
۱۴۰۴	مناطق ساخته شده	4588.308	9.24	9057.15	1118	7075.22	6.2748

ماخذ: نگارندگان

سنجه‌های سطح سیمای سرزمین نیز حاکی از افزایش پیچیدگی ساختار فضایی بوجود است (جدول ۵): رشد مداوم SHDI (شاخص تنوع شانون) از ۰.۹۲ به ۱.۰۷، افزایش ناهمگونی مکانی را نشان می‌دهد که ناشی از توسعه نامتوازن کاربری‌هاست، کاهش متوسط اندازه لکه (AREA_MN) از ۸.۴۵ به ۳.۵۲ هکتار، تکه‌تکه‌شدگی کلی سیمای سرزمین را تأیید می‌کند، افزایش یکنواختی شانون (SHEI) به ۰.۹۷ و MSIEI به ۰.۹۵، بیانگر توزیع متعادل‌تر لکه‌ها در ۲۰۲۵ است، اما طبق مطالعه فرینا (2000) این امر لزوماً به معنای بهبود اکولوژیکی نیست، کاهش پیوستگی نیز معمولاً همراه با چنین روندی است.

جدول ۵، تحلیل فضایی تغییرات کاربری اراضی در سطح سیمای سرزمین با استفاده از سنجه‌های اکولوژی سیمای سرزمین

متریک									سال
MSIEI	SIEI	SHEI	MSIDI	SIDI	SHDI	PRD	PR	AREA_MN	
7611.0	85.0	8448.0	8362.0	5666.0	9281.0	0248.0	3	84,587	۱۳۶۷
7993.0	8767.0	8827.0	8781.0	5844.0	9697.0	0248.0	3	62,201	۱۳۷۹
884.0	9321.0	9368.0	9712.0	6214.0	۱۰,۲۹۱	0248.0	3	30,036	۱۳۹۷
9519.0	9729.0	9739.0	۱۰,۴۵۸	6486.0	07.1	0248.0	3	35,228	۱۴۰۴

۴- بحث

تحلیل فضایی و زمانی ساختار سیمای سرزمینی شهر بروجرد از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ نشان دهنده تغییرات چشمگیر در الگوی توسعه شهری و کاهش کیفیت زیرساخت‌های سبز است. افزایش ۱۲۸٪ در مناطق ساخته شده (از ۱،۲۰۶ به ۲،۷۴۸ هکتار) در مقابل کاهش پیوسته زیرساخت‌های سبز (GI) و اراضی بایر، نمایانگر الگویی از توسعه ناپایدار شهری است که با پژوهش‌های مشابه در شهرهای میانی ایران مطابقت دارد (صالحی و همکاران، ۱۴۰۰). این توسعه ناپایدار، منجر به گسستگی شدی زیستگاه‌ها شده است؛ شاخص‌هایی مانند افزایش تعداد لکه‌ها (NP) از ۶۵۱ به ۱،۱۳۲ (و کاهش ۱۷٪ در شاخص بزرگترین لکه‌های سبز (LPI) نشان دهنده فروسایبی ساختاری و کاهش پیوستگی فضای سبز است که براساس نظر فورمن مستقیماً به تخریب شبکه‌های اکولوژیکی آسیب می‌زند (Forman 2019) (Forman, 2014). افزایش شاخص شکل لکه‌ها (LSI: 19) به ۳۰ برای (GI) بیانگر پیچیدگی و ناهمگونی بیشتر مرزهای میان پوشش‌های طبیعی و کاربری‌های ساخته شده است؛ این روند با پژوهش‌های رامبار و ضرغامی (۲۰۱۷) و شوئلر و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد که کاهش اندازه و پیچیدگی لکه‌ها را با افت ظرفیتهای ذخیره کربن و مدیریت آبهای سطحی مرتبط دانسته‌اند. همچنین کاهش چشمگیر اندازه موثر شبکه (MESH) و انسجام سیمای سرزمین (CONTAG) بیانگر منزوی شدن زیستگاهها و کاهش توانایی جابجایی گونه‌ها و تبادل ژنتیکی است، موضوعی که در مطالعات گوناوردنا و همکاران (۲۰۱۷) و آقایان لی و وو (2004) به عنوان یک چالش مهم در اکولوژی شهری مطرح شده است (Gunawardena et al. 2017, Li and Wu 2004). در بافت نیمه‌خشک بروجرد، اثرات گسستگی زیرساخت‌های سبز شدت یافته است. افزایش فاصله متوسط نزدیکی لکه‌ها نشان دهنده تشدید تنش آبی در لکه‌های جدا مانده است. این امر با یافته‌های کومار و همکاران (۲۰۲۴ و ۲۰۲۵) مبتنی بر این که نیاز آبی مناطق خشک زیرساخت سبز را ۴۰ تا ۶۰ درصد بالاتر از سایر مناطق می‌داند مطابقت دارد (Kumar, Kaur and Kaur 2023, Kumar et al. 2024). ظهور چنین تقاضای ناپایدار آبی در عین رشد ظاهری زیرساخت سبز (سال ۲۰۲۵) نشان دهنده فقدان برنامه‌ریزی جامع هیدرولوژیکی است که در مطالعات دارابی و همکاران (۲۰۲۳) نیز تأکید شده، جایی که انتخاب گونه‌های بومی مقاوم به خشکی و ادغام سیستم‌های جمع‌آوری آب باران به عنوان استراتژی‌هایی برای افزایش تاب‌آوری اقلیمی معرفی شده‌اند. رشد انفجاری ساخت‌وساز با موج گسترده مهاجرت روستایی-شهری در ایران (۲۰۲۰-۱۹۹۰) مرتبط است، که شهرهای میانی مانند بروجرد را به قطب جذب جمعیت کشاورزی مهاجر تبدیل کرده است. سیاستهای شهرداریها که توسعه صنعتی و تجاری را بر حفظ فضای سبز ترجیح داده‌اند، روند تبدیل زمین‌های بایر به کاربری‌های ساختمانی را تسریع نمودند. این شرایط که به اجرا و نظارت ضعیف طرح‌های توسعه و تراکم بی‌قاعده انجامیده است (افزایش LSI مناطق ساخته شده از ۱۳.۴ به ۲۴.۹). این روند در سال ۱۳۹۷ به اوج رسید و اجرای ضعیف طرح‌های جامع شهری، توسعه پراکنده را امکانپذیر کرد. چنین توسعه بی‌قاعده‌ای، منافع اقتصادی کوتاه‌مدت را بر پایداری اکولوژیک بلندمدت مقدم شمرده و اهمیت خدمات فضای سبز در کاهش هزینه‌های سلامت و افزایش ارزش املاک را نادیده گرفته است (Tzoulas et al. 2021, Gómez-Baggethun and Barton 2013, Tzoulas et al. 2007). بازنگری ارتباط تغییر سیمای سرزمین با ابعاد پایداری شهری نشان می‌دهد روند موجود در شهر بروجرد، به قیمت کاهش عملکرد و پیوستگی شبکه سبز شهری، نه تنها شاخص‌های اکولوژیکی بلکه ابعاد پایداری شهری را تحت تأثیر قرار داده است. اثرات عمده عبارتند از: افزایش جزایر حرارتی به دلیل کاهش پیوستگی و مساحت سبز، نیاز ۴۰٪-۶۰٪ آبیاری بیشتر به دلیل گسستگی زیرساخت‌های سبز، کاهش دسترسی عادلانه به فضاهای سبز و افزایش آسیب‌پذیری خانوارها، تشدید گرد و غبار و کاهش کیفیت

هوا، و تجزیه زیستگاه‌ها با کاهش تنوع زیستی و تاب‌آوری اکولوژیک شهر. این روند با مطالعات بین‌المللی همسو است (Li et al. 2019) و نشان می‌دهد که بی‌برنامه‌گذاری در انتخاب گونه‌ها و نبود شبکه آبی-سبز یکپارچه، تاب‌آوری شهری را در برابر خشکسالی و فشارهای زیست‌محیطی تضعیف می‌کند. براساس تجربه جهانی برای مقابله با تکه‌تکه شدن، شبکه سبز سلسله مراتبی با ویژگی‌های زیر پیشنهاد می‌شود: (۱) زیستگاه‌های اصلی متمرکز بر تکه‌های بزرگ باقیمانده ($LPI > 20\%$ ، ۲) راهروهای خطی در امتداد رودخانه‌ها/جاده‌ها با استفاده از گونه‌های مقاوم به خشکسالی، و (۳) پارک‌های کوچک در بافت‌های متراکم شهری، این رویکرد، مدل‌های موفق در نانجینگ، چین را منعکس می‌کند، جایی که مسیرهای سبز، اتصال را در عرض یک دهه ۴۵ درصد افزایش دادند (Zhang et al. 2022). نکته مهم این است که حفاظت از زمین‌های بایر به عنوان "مناطق نفوذ آب" می‌تواند خطرات سیل را کاهش دهد و در عین حال سفره‌های آب زیرزمینی را دوباره تغذیه کند - راهبردی که در سیستم حفاظت از صحرای سونوران توسان اثبات شده است، سقف‌های سبز اجباری در توسعه‌های تجاری جدید، عملکردهای زیرساخت‌های سبز را بیشتر غیرمتمرکز می‌کند. علاوه بر این، برای کاهش این آسیب‌ها، پیشنهاد می‌شود با رویکردهای سیاستی مبتنی بر شبکه‌های سلسله‌مراتبی زیرساخت‌های سبز، پهنه‌بندی تطبیقی و انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی، تاب‌آوری و پایداری شهرهای نیمه‌خشک تقویت شود (Monteiro, Ferreira and Antunes 2022, Debsarma and Sahu 2025). حاکمیت شورایی و مدیریت اکوسیستمی میان‌بخشی از پایه‌های اصلاح سیاست‌های شهری هستند تا ضمن حفظ خدمات اکوسیستم، مصرف آب کاهش یابد و رفاه اجتماعی و کیفیت زندگی ارتقاء یابد. در مجموع، مدیریت هوشمند سیمای سرزمین می‌تواند پایداری اکولوژیک، رفاه اجتماعی، تاب‌آوری شهری و کیفیت منابع آب و هوا را بهبود بخشد (Artmann et al. 2019) و در تدوین سیاست‌های آینده ایران محور تصمیم‌گیری‌ها قرار گیرد. در نهایت، حفظ و ارتقاء زیرساخت‌های سبز در شهرهای نیمه‌خشک ایران مستلزم رویکردی تلفیقی و جامع است که اصلاحات سیاستی تطبیقی، برنامه‌ریزی شهری هوشمند، و مدیریت منابع آبی را به هم پیوند دهد (Karami, Sayahnia and Barghjelveh 2023). ایجاد شبکه‌های تولید زیستگاهی سلسله مراتبی و یکپارچه همراه با توسعه سیستم‌های آبی-سبز کارآمد، به ویژه با تأکید بر گونه‌های مقاوم به تنش آبی، کلید افزایش تاب‌آوری اکولوژیک و اجتماعی در این مناطق است (Darabi et al. 2023). علاوه بر آن، حاکمیت بین‌بخشی مؤثر و مشارکت «شوراهای سبز» در نظارت و کنترل توسعه شهری از ضرورت‌های حیاتی برای پیشگیری از گسستگی بیشتر و تحقق توسعه پایدار شهری به شمار می‌رود. به نظر می‌رسد حکمرانی مؤثر در شهرهای نیمه‌خشک ایران نیازمند سه اصلاح است: (۱) کدهای پهنه‌بندی تطبیقی که حداکثر نسبت سطح نفوذناپذیر را مشخص می‌کنند (مثلاً کمتر از ۶۰٪ در هر قطعه زمین)، (۲) ادغام زیرساخت‌های سبز و آبی از طریق سیستم‌های اعتباری آب‌های سطحی که به مناظر نفوذپذیر پاداش می‌دهند، و (۳) «شوراهای سبز» بین‌بخشی که برنامه‌ریزی شهری، مدیریت آب و آژانس‌های محیط زیستی را متحد می‌کنند، ابزارهای اقتصادی مانند حقوق توسعه قابل‌انتقال می‌توانند ساخت‌وساز را از زمین‌های بایر حساس از نظر زیست‌محیطی به مکان‌های پرکننده شهری هدایت کنند، این اقدامات با چارچوب سازگاری اقلیمی رامیار و ضرغامی (۲۰۱۷) همسو هستند، که نشان می‌دهد GI هماهنگ با سیاست، اثرات جزیره گرمایی را در شهرهای نیمه‌خشک ۲ تا ۴ درجه سانتیگراد کاهش می‌دهد، نظارت بلندمدت باید موارد زیر را در اولویت قرار دهد: (۱) کمی‌سازی بده‌بستان‌ها بین گسترش شاخص پوشش گیاهی و بودجه‌های آب با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی (SWAT، ۲) ارزیابی عدالت اجتماعی در دسترسی به شاخص پوشش گیاهی از طریق بررسی‌های در مقیاس محله، و (۳) توسعه معیارهای اتصال سازگار با مناطق خشک که آستانه‌های تبخیر و تعرق را در بر می‌گیرند، تحلیل سناریوها می‌تواند تأثیرات سیاست‌ها را آزمایش کند، به‌عنوان مثال، مقایسه محوطه‌سازی با صرفه‌جویی در مصرف آب در مقابل چمن‌کاری‌های مرسوم، درحالی‌که بهبود شاخص پوشش گیاهی بروجرد در سال ۲۰۲۵ امیدبخش است، پایداری آن به شناخت مناظر به‌عنوان سیستم‌های اجتماعی - اکولوژیکی به‌هم‌پیوسته بستگی دارد که در آن محدودیت‌های هیدرولوژیکی، عملکرد اکولوژیکی را تعیین می‌کنند، این مطالعه، معیارهای چشم‌انداز را به‌عنوان ابزارهای تشخیصی حیاتی برای شهرهای خشک که رشد شهری را در مرزهای سیاره‌ای هدایت می‌کنند، ایجاد می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه علاوه بر کاربرد ابزارهای پیشرفته تحلیل ترکیبی فرگ استت و تصاویر ماهواره‌ای لندست، محدودیت‌هایی نیز دارد: طبقه‌بندی‌های سراسری پوشش زمین ممکن است تنوع زیستی درون زیرساخت‌های سبز را نادیده گیرد، پیش‌بینی‌های آتی بر فرض تداوم سیاست‌های جاری بنا شده‌اند که احتمال تغییر آنها وجود درحالی‌که ادغام Fragstats-Landsat به طور مؤثر پویایی چشم‌انداز را کمی کرد، سه محدودیت وجود دارد که باید به آنها اذعان کرد: (۱) تعاریف ساده‌شده کلاس‌ها، ویژگی‌های متمایز اکولوژیکی (مثلاً باغات با پارک‌های زینتی) را ادغام کردند و به طور بالقوه روندهای تنوع زیستی درون زیرساخت‌های سبز را پنهان کردند؛ (۲) داده‌های پیش‌بینی‌شده ۲۰۲۵ فرض می‌کنند که سیاست‌های فعلی همچنان پابرجا هستند، اگرچه عدم قطعیت‌های اقلیمی می‌توانند مسیرها را تغییر دهند؛ و (۳) اعتبارسنجی زمینی بر انواع پوشش‌های وسیع بدون ارزیابی سلامت در سطح گونه‌ها متمرکز است، مطالعات آینده می‌توانند تصاویر فراطیفی

را برای تمایز پوشش گیاهی بومی در مقابل پوشش گیاهی غیربومی و حسگرهای رطوبت خاک برای ارزیابی تأثیرات تنش آبی بر عملکرد زیرساخت‌های سبز در سراسر خرداقلیم‌ها ترکیب کنند.

منابع

- Andersson, E., S. Barthel, S. Borgström, J. Colding, T. Elmqvist, C. Folke & Å. Gren (2014) Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services. *AMBIO*, 43, 445–453.
- Anees, M. M., E. Banzhaf, J. Wang & P .K. Joshi (2023) Quality index approach for analysis of urban green infrastructure in Himalayan cities. *Land*, 12, 279.
- Arthur, N. & J. Hack (2022) A multiple scale, function, and type approach to determine and improve Green Infrastructure of urban watersheds. *Urban Forestry & Urban Greening*, 68, 127459.
- Artmann, M., M. Kohler, G. Meinel, J. Gan & I.-C. Ioja (2019) How smart growth and green infrastructure can mutually support each other—A conceptual framework for compact and green cities. *Ecological indicators*, 96, 10–22.
- Bae, J., W. Sohn, G. Newman, D. Gu, S. Woodruff, S. Van Zandt, F. Ndubisi, C. Wilkins, J. Lee & T. Tran (2021) A longitudinal analysis of green infrastructure conditions in Coastal Texan cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 127315.
- Bowler, D. E., L. Buyung-Ali, T. M. Knight & A. S. Pullin (2010) Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 147–155.
- Darabi, H., Y. Moarrab, J. Balist & B. Naroie (2023) Resilient plant species selection for urban green infrastructure development in arid regions: a case of Qom, Iran. *Urban Ecosystems*, 26, 1753–1768.
- Debsarma, C. & P. Sahu. 2025. Enhancement of urban drought resilience using green infrastructural strategies. In *Handbook of Nature-Based Drought Solutions*, 231–252. Elsevier.
- Dhakal, K. P. & L. R. Chevalier (2017) Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. *Journal of Environmental Management*, 203, 171–181.
- Forman, R. T. 2019. *Towns, ecology, and the land*. Cambridge University Press.
- Gill, S. E., J. F. Handley, A. R. Ennos, S. Pauleit, N. Theuray & S. J. Lindley (2008) Characterising the urban environment of UK cities and towns: A template for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 87, 210–222.
- Gómez-Baggethun, E. & D. N. Barton (2013) Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235–245.
- Gunawardena, K. R., M. J. Wells & T. Kershaw (۲۰۱۷) Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040–1055.
- Hersperger, A. M., S. R. Grădinaru, A. B. Pierrri Daunt, C. S. Imhof & P. Fan (2021) Landscape ecological concepts in planning: review of recent developments. *Landscape Ecology*, 36, 2329–2345.
- Hostetler, M., W. Allen & C. Meurk (2011) Conserving urban biodiversity? Creating green infrastructure is only the first step. *Landscape and Urban Planning*, 100, 369–371.
- Hysa, A (۲۰۲۱) .Introducing Transversal Connectivity Index (TCI) as a method to evaluate the effectiveness of the blue-green infrastructure at metropolitan scale. *Ecological Indicators*, 124, 107432.
- Kabisch, N. & D. Haase (2014) Green justice or just green? Provision of urban green spaces in Berlin, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 129–139.
- Karami, H., R. Sayahnia & S. Barghjelveh (2023) Integrating climate change adaptation policies in spatial development planning in hyperarid regions of Kerman province, Iran .*Heliyon*, 9.
- Kong, F., H. Yin, N. Nakagoshi & Y. Zong (2010) Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and urban planning*, 95, 16–27.
- Kumar, P., S. E. Debele ,S. Khalili, C. H. Halios, J. Sahani, N. Aghamohammadi, M. d. F. Andrade, M. Athanassiadou, K. Bhui, N. Calvillo, S.-J. Cao, F. Coulon, J. L. Edmondson, D. Fletcher, E. Dias de Freitas, H. Guo, M. C. Hort, M. Katti, T. R. Kjeldsen, S. Lehmann, G. M. Locosselli, S. K. Malham, L. Morawska, R. Parajuli, C. D. F. Rogers, R. Yao, F. Wang, J. Wenk & L. Jones (2024) Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs. *The Innovation*, 5.
- Kumar, P., D. Kaur & A. Kaur (2۰۲۳) Green Infrastructure-A Roadmap Towards Sustainable Development. *IOP Conference Series: Earth and...*

- Li, F., W. Zheng, Y. Wang, J. Liang, S. Xie, S. Guo, X. Li & C. Yu (2019) Urban green space fragmentation and urbanization: A spatiotemporal perspective. *Forests*, 10, 333.
- Li, H. & J. Wu (2004) Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, 19, 389–399.
- Matthews, T., A. Y. Lo & J. A. Byrne (2015) Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. *Landscape and Urban Planning*, 138, 155–163.
- Meerow, S. & J. P. Newell (2017) Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 159, 62–75.
- Mentens, J., D. Raes & M. Hermy (2006) Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77, 217–226.
- Monteiro, R., J. C. Ferreira & P. Antunes (2022) Green infrastructure planning principles: identification of priorities using analytic hierarchy process. *Sustainability*, 14, 5170.
- Newell, J. P., M. Seymour, T. Yee, J. Renteria, T. Longcore, J. R. Wolch & A. Shishkovsky (2013) Green Alley Programs: Planning for a sustainable urban infrastructure? *Cities*, 31, 144–155.
- Oh, K., D. Lee & C. Park (2011) Urban Ecological Network Planning for Sustainable Landscape Management. *Journal of Urban Technology*, 18, 39–59.
- Rahimi, E. & C. Jung (2025) Analyzing vegetation heterogeneity trends in an urban-agricultural landscape in Iran using continuous metrics and NDVI. *Land*, 14, 244.
- Ramyar, R. & E. Zarghami (2017) Green infrastructure contribution for climate change adaptation in urban landscape context. *Applied Ecology & Environmental Research*, 15.
- Schueler, T. R., L. Fraley-McNeal & K. Capiella (2009) Is impervious cover still important? Review of recent research. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14, 309–315.
- Sun, H., C. Liu & J. Wei (2021) Identifying key sites of green infrastructure to support ecological restoration in the urban agglomeration. *Land*, 10, 1196.
- Sun, H., J. Wei & Q. Han (2022) Assessing land-use change and landscape connectivity under multiple green infrastructure conservation scenarios. *Ecological Indicators*, 142, 109236.
- Termorshuizen, J. W. & P. Opdam (2009) Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. *Landscape ecology*, 24, 1037–1052.
- Tzoulas, K., J. Galan, S. Venn, M. Dennis, B. Pedroli, H. Mishra, D. Haase, S. Pauleit, J. Niemelä & P. James (2021) A conceptual model of the social-ecological system of nature-based solutions in urban environments. *AMBIO*, 50, 335–345.
- Tzoulas, K., K. Korpela, S. Venn, V. Yli-Pelkonen, A. Kaźmierczak, J. Niemela & P. James (2007) Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81, 167–178.
- Ying, J., X. Zhang, Y. Zhang & S. Bilan (2022) Green infrastructure: Systematic literature review. *Economic research-Ekonomska istraživanja*. 36–38, 30 ,
- Zhang, X., X. Wang, C. Zhang & J. Zhai (2022) Development of a cross-scale landscape infrastructure network guided by the new Jiangnan watertown urbanism: A case study of the ecological green integration demonstration zone in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 143, 109317.