



Spatial Analysis of Green Infrastructure Changes in Zanjan City

Ahmad Zanganeh^{1*}, Sara Abbasi², Tajulddin Karami³

¹ Department of Human Geography, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

² Department of Human Geography, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

³ Department of Human Geography, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

*Corresponding author, Email: zanganeh@khu.ac.ir

Keywords:

Spatial Analysis,
Urban Growth, Urban Green
Infrastructure, Zanjan City.

Introduction

Urban green networks, referred to as green infrastructure, constitute a significant component of urban ecology. They provide numerous key ecosystem services and enhance urban resilience to climate change. When properly designed, urban green infrastructures can aid in disaster risk management, enhance biodiversity conservation, and serve as economic assets. These infrastructures contribute to economic growth by increasing land and property values and supporting food production. Moreover, the physical and psychological benefits of urban green infrastructure translate into substantial economic advantages for the population. The city of Zanjan is no exception to this trend and has even been more adversely affected compared to other major cities in the country. In recent decades, Zanjan's rapid urban development has led to the conversion of agricultural lands and surrounding green spaces into gray urban infrastructures such as roads, parking lots, buildings, and other non-green land uses. This land transformation and change in usage have resulted in a significant reduction of green open spaces, posing current challenges and threatening the city's future. This study aims to explore the critical role of urban green infrastructure in enhancing the sustainability and resilience of Zanjan. It emphasizes the urgent need for strategic planning to address the ecological, economic, and social challenges stemming from the city's unbalanced development. Furthermore, the research highlights the importance of preserving and integrating green spaces into urban development plans to ensure a sustainable and livable urban environment for Zanjan's residents.

Materials and Methods

Research is a systematic activity aimed at discovering and developing a body of organized knowledge, carried out to solve existing problems or contribute to human knowledge in a specific field. Since the present study seeks to develop practical knowledge in the field of geography and urban planning, it falls under the category of applied research. The purpose of applied research is to find practical and effective solutions to real-world problems and improve processes and technologies in practical domains. In this study, various methods, techniques, and data analysis tools were employed to examine the spatial patterns of urban green infrastructure and its changes over time. Initially, Landsat satellite images for specific time periods (in ten-year intervals) were downloaded for the study area. The images were cropped to the boundaries of the study area, and land use maps were prepared using classification algorithms, specifically the Support Vector Machine (SVM) algorithm, in remote sensing software (ENVI). Subsequently, spatial statistical tools and the Moran's I spatial autocorrelation index were utilized in GIS software to determine the spatial patterns of green infrastructure (clustered, random, or dispersed) and their changes. Recognizing the impact of urban growth on changes in urban green infrastructure, the stages of city growth and development were also analyzed in parallel with the spatial analyses. Land use and land cover maps were extracted from the processed images. In the next phase, spatial data analyses were conducted to identify and investigate urban growth patterns

Received:

12/Dec/2024

Revised:

08/Jan/2025

Accepted:

15/Feb /2025



(including infill development, edge development, and leapfrog development) over specific time periods. Changes in green infrastructure within the study area were then assessed using vegetation indices. Finally, the spatial effects of urban growth on green infrastructure were evaluated using Ordinary Least Squares (OLS) and Geographically Weighted Regression (GWR) methods.

Findings

The satellite images of Zanjan city were cropped to the study area to prepare land use maps in subsequent steps. The analysis highlighted the importance of using band combinations of satellite imagery for identifying specific zones within the region. For example, built-up areas were identified using the 7, 5, and 3 band combination, while green areas were detected using the 4, 3, and 2 combination. These techniques facilitated precise differentiation and identification of various zones, enhancing the understanding of the study area and its urban infrastructure. The analysis revealed significant changes in land use over the years. The built-up area expanded from 2,697.39 hectares in 1993 to 5,725.35 hectares in 2023, indicating substantial urban growth. Similarly, the green spaces increased from 2,167.02 hectares in 1993 to 6,071.22 hectares in 2023, reflecting a growing focus on environmental concerns. Conversely, other land uses decreased from 12,989.34 hectares in 1993 to 6,057.18 hectares in 2023, demonstrating a shift in land use patterns. The vegetation coverage index, ranging between -1 and 1, was also analyzed. Negative values (close to -1) correspond to water bodies, while values near zero (-0.1 to 0.1) typically represent barren areas such as rock, sand, or snow. Low positive values (approximately 0.2 to 0.4) indicate shrublands and grasslands, whereas high values (close to 1) signify temperate and tropical rainforests. This comprehensive analysis provided a detailed understanding of the spatial and temporal changes in Zanjan's urban and green infrastructure, offering insights into the city's development trends and their environmental implications.

Discussion and Conclusion

To analyze the impact of urban growth and development on green infrastructure, Pearson's correlation coefficient was calculated between changes in construction and green infrastructure. The results demonstrated a negative correlation, indicating that the expansion of built-up areas has coincided with a reduction in urban vegetation cover. Land use maps across different periods revealed a significant increase in the extent of built-up areas. Although green zones have also expanded, their growth has been comparatively slower, highlighting the adverse effects of urban development on green infrastructure. These findings suggest that urban growth directly contributes to the decline of green infrastructure. Similarly, Villanova et al. (2024) reported analogous outcomes in their study of Madrid, showing that substantial advancements in the city's green belt planning primarily impacted larger scales, with minimal effects on the urban core. New urban development initiatives and environmental transformations, although contributing to the growth of green zones, have been insufficient in preventing the overall decline of green infrastructure. This underscores the need for more comprehensive and sustainable urban planning approaches that prioritize the preservation and enhancement of green infrastructure alongside urban development. Policies should aim to promote green infrastructure, prevent its destruction, and foster positive interactions between urban development and environmental preservation. Wojciech et al. (2024) also emphasized the importance of improving stakeholder coordination, enhancing public participation, and increasing transparency in the regulatory process to support green infrastructure development. Overall, the study's findings indicate that while Zanjan city has experienced an increase in green areas during the study period, the rapid urban expansion has imposed significant negative impacts on its green infrastructure. To address these challenges, it is imperative to develop sustainable urban development policies and plans that strike a balance between urban growth and environmental conservation. Future planning should ensure that city development is accompanied by the preservation and enhancement of green infrastructure, thereby improving citizens' quality of life and ensuring environmental sustainability.

How to cite this article:

Zanganeh, A., Abbasi, S., & Karami, T. (2025) Spatial Analysis of Green Infrastructure Changes in Zanjan City. *Green Development Management Studies*, 4(3), 109-132. <https://doi.org/10.22077/jgdms.2025.8558.1226>.





تحلیل فضایی تغییرات زیرساخت سبز شهر زنجان

احمد زنگانه^{۱*}، سارا عباسی^۲، تاج الدین کرمی^۳^۱ گروه جغرافیای انسانی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران^۲ گروه جغرافیای انسانی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران^۳ گروه جغرافیای انسانی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران* ایمیل نویسنده مسئول: zanganeh@khu.ac.ir

واژگان کلیدی:

تحلیل فضایی، رشد شهری
زیرساخت‌های سبز شهری، شهر
زنجان.

چکیده

زیرساخت سبز شهری که خدمات اکوسیستمی متنوعی را ارائه می‌کند، از اجزای حیاتی یک شهر است. از این رو، دستیابی به تراکم مناسب و توزیع عادلانه زیرساخت سبز شهری برای برنامه‌ریزی شهری، تضمین‌کننده توسعه پایدار است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف تحلیل فضایی تغییرات زیرساخت سبز شهر زنجان تهیه شده است. روش از لحاظ نوع پژوهش توصیفی-تحلیلی و از لحاظ ماهیت و هدف یک نوع تحقیق کاربردی است. روش گردآوری داده‌ها کتابخانه‌ای، میدانی و روش تحلیل ثانوی بوده است. به منظور تحلیل فضایی تغییرات زیرساخت سبز، از شاخص‌های نسبت زمین‌های شهری، شاخص گسترش منظر و شاخص پوشش گیاهی استفاده شده است. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از الگوریتم‌های طبقه‌بندی (الگوریتم ماشین بردار پشتیبان) در نرم‌افزارهای سنجش‌ازدور (EVNI)، ابزارهای آمار فضایی- شاخص خودهمبستگی فضایی موران (Moran's I) و تحلیل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)، استفاده شده است. نتایج نشان داد که الگوهای فضایی زیرساخت‌های سبز شهر زنجان طی دوره زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲ دارای خودهمبستگی فضایی مثبت و قوی و دارای الگوهای خوشه‌ای قوی می‌باشند. همچنین نتایج با استفاده از همبستگی پیرسون بین تغییرات در ساخت و ساز و زیرساخت‌های سبز، مشخص شد که افزایش مناطق ساخته شده همراه با کاهش پوشش گیاهی در زمینه‌های شهری بوده است. این همبستگی منفی نشان‌دهنده این است که با افزایش ساخت و ساز، مناطق سبز در شهر زنجان کاهش یافته‌اند. بنابراین برنامه‌ریزی‌های آینده باید به گونه‌ای باشد که توسعه شهر همراه با حفظ و ارتقا زیرساخت‌های سبز صورت گیرد، تا نه تنها کیفیت زندگی شهروندان بهبود یابد، بلکه پایداری محیط‌زیست نیز تضمین شود.

تاریخ دریافت:

۲۲ آذر ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری:

۱۹ دی ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۲۷ بهمن ۱۴۰۳



مقدمه

شبکه مناطق سبز شهری، بخش مهمی از اکولوژی شهری است، زیرا خدمات اکوسیستمی متعدد کلیدی و تاب‌آوری شهری خاص در برابر تغییرات آب و هوایی را ارائه می‌کند. منابع رو به رشدی در مورد مزایای بالقوه زیرساخت سبز شهری وجود دارد، زیرا آنها عملکردهای اکولوژیکی مهمی مانند سازگاری با تغییرات آب و هوا و کاهش یا بهبود شرایط آب و هوا از طریق ایجاد سایه، کاهش تابش خورشیدی، تغییرات دما و متعاقباً کاهش مصرف انرژی را برای انسان انجام می‌دهند (گیلانی و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۵). زیرساخت سبز شهری که به درستی طراحی شده‌اند می‌توانند به مدیریت و کاهش خطر بلایا و تقویت حفاظت از تنوع زیستی کمک کنند (کیم و میلر^۱، ۲۰۱۹: ۱۳۱). زیرساخت سبز شهری همچنین مزایای اجتماعی و فرهنگی، مانند افزایش طول عمر و بهبود سلامت و رفاه انسان از طریق کاهش آلودگی جوی، بهبود اثرات امواج گرما، ارتقای سلامت روانی (به‌عنوان مثال، کاهش استرس)، فعالیت بدنی، ارتباطات اجتماعی و فرصت‌های تفریحی و در عین حال به ایجاد نشاط فرهنگی کمک می‌کند (کومار و موپلیمننت^۲، ۲۰۲۱: ۵۲). زیرساخت سبز شهری همچنین می‌تواند به‌عنوان دارایی‌های اقتصادی در نظر گرفته شود، زیرا می‌تواند با افزایش ارزش زمین و دارایی و تامین غذا بر رشد اقتصادی تأثیر بگذارد. مزایای فیزیکی و روانی زیرساخت سبز شهری می‌تواند نشان دهنده مزایای اقتصادی برجسته برای جمعیت باشد (روسو و همکاران^۳، ۲۰۱۷: ۴۹). در طول قرن حاضر، علاقه علمی فزاینده‌ای به مطالعه زیرساخت سبز شهری، پس از اجلاس‌های بزرگ زیست محیطی مشاهده شده‌است. با توجه به اینکه پیاده سازی عملی راه حل‌های نیمه طبیعی برای بهبود زیرساخت سبز شهری نیازمند یک ارزیابی مبتنی بر شواهد اما مقرون به صرفه است، طراحی ابزارهای ارزشیابی ساده اما دقیق متناسب با توسعه زیرساخت سبز شهری ضروری است.

شهر یک محیط تحت سلطه و تغییر یافته توسط انسان است که با فرایند شهرنشینی توسعه یافته است. شهرها به دلیل رشد سریع جمعیت در حال تغییر اندازه و تراکم خود هستند. طبق گزارش سازمان ملل متحد از چشم‌انداز شهرنشینی جهانی، در سال ۱۹۷۰، ۳۶/۶ درصد از جمعیت جهان در مناطق مسکونی شهری زندگی می‌کردند. امروزه، این رقم به ۵۵ درصد رسیده است و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، بیش از دو سوم جمعیت جهان در مناطق شهری ساکن خواهند شد که اکثریت این تغییر در آسیا و آفریقا رخ می‌دهد (وو و همکاران^۴، ۲۰۲۱: ۱۲۹). در نتیجه، رشد شتاب‌زده جمعیت شهری اغلب باعث گسترش شهری و تغییر الگوهای پوشش زمین کاربری زمین شهری (LULC) می‌شود. اگر چه گسترش شهری در کمتر از ۵ درصد از سطح زمین رخ می‌دهد، اما عامل بسیاری از تغییرات محیطی جهانی است. در سال‌های اخیر، آسیا، روند شهرنشینی را تسریع کرده و منجر به گسترش بی سابقه مناطق شهری شده‌است (فلوریان و جنور^۵، ۲۰۱۶: ۲۱). با این حال، مشکلات زیست محیطی و اکولوژیکی متعددی مانند تغییرات آب و هوایی، از بین رفتن زیستگاه‌ها و تنوع زیستی، تکه تکه شدن زمین، آلودگی هوا، از بین رفتن خدمات اکوسیستم و زوال محیط آبی، در فرایند چشمگیر گسترش شهری پدیدار شده‌است؛ بنابراین، بسیاری از شهرها، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، بیشتر تحت تأثیر رشد سریع و تصادفی شهری هستند و فشار بر محیط طبیعی و به ویژه پوشش سبز شهری را افزایش می‌دهند (فن و همکاران^۶، ۲۰۲۲: ۸۷) برای مقابله با این چالش‌ها، توسعه و مدیریت زیرساخت‌های سبز شهری با رویکرد آمایش سرزمین می‌تواند راهکاری موثر باشد.

در کشور ایران نیز گسترش شهرنشینی همواره با کاهش سطوح زیرساخت سبز مواجه بوده است که این امر به کاهش چشمگیر سرمایه‌های سبز در نواحی شهری منجر شده و ضرورت به‌کارگیری توسعه میان‌افزا برای حفظ و بازتولید این فضاها را آشکار می‌سازد (مه آبادی پور و همکاران، ۱۴۰۳: ۳۱). شهر زنجان نیز از این قاعده مستثنا نیست و حتی در این راستا بیشتر از سایر شهرهای بزرگ کشور

¹ Kim and Miller² Kumar and Vuillimienet³ Russo⁴ Wu⁵ Florian and Januar⁶ Fan



زیان‌دیده است. در دهه‌های اخیر این شهر با دنبال کردن روند روبه رشد خود، زمین‌های کشاورزی و فضاهای سبز اطراف خود را به زیرساخت‌های خاکستری شهری^۱ مانند جاده، پارکینگ، ساختمان‌ها و سایر کاربری‌های غیر سبز تبدیل کرده است. این تبدیل زمین و تغییر کاربری‌ها به کاهش فضاهای باز سبز موجب شده است که هم اکنون شهر با مشکل مواجه شود و آینده آن تهدید شود. این پژوهش با هدف بررسی و تحلیل فضایی تغییرات زیرساخت سبز شهر زنجان انجام شده است. محور اصلی این مطالعه، بررسی وضعیت موجود و فرایندهای مرتبط با زیرساخت سبز شهری است. در این راستا، دو سؤال فرعی مطرح شده است: نخست، اینکه الگوهای فضایی تغییرات زیرساخت سبز شهر زنجان به چه صورتی نمایان شده است؟ و دیگر، الگوهای فضایی زیرساخت‌های سبز شهر زنجان طی دوره زمانی مورد مطالعه چگونه تغییر کرده است؟

مبانی نظری

پس از انقلاب کمی، تحلیل فضایی به تدریج رواج یافت و بیشتر بر استفاده از روش‌ها و فرایندهای کمی در بررسی آرایش فضایی و توزیع پدیده‌ها تمرکز داشت. به طور کلی، این رویکرد با بهره‌گیری از تکنیک‌های کمی، الگوهای نقطه‌ای، خطی و سطحی را بر روی نقشه به صورت دقیق و عمیق تحلیل می‌کند (آهنگری، زنگانه و سلیمانی، ۱۴۰۳: ۱۶). در ادامه، روش‌های مدل‌سازی و ریاضیات نیز به پردازش داده‌های جغرافیایی افزوده شدند. تحلیل فضایی داده‌ها تلاش می‌کند تا دانش نهفته در پراکندگی داده‌های جغرافیایی، یعنی قوانین نظام و الگوهای فضایی را کشف کند. در تعریف جامع‌تر، تحلیل فضایی مجموعه‌ای از مهارت‌های کارتوگرافی و روش‌های ریاضی و آماری است که برای پردازش و تحلیل داده‌های فضایی به کار می‌روند. به عبارتی ساده‌تر، تحلیل فضایی با استفاده از مهارت‌ها و روش‌های گوناگون کمی، سعی در توضیح و تبیین الگوهای فضایی پراکندگی‌ها دارد. مهم‌ترین ویژگی تحلیل فضایی تأکید بر بعد فضایی داده‌ها است (علیچانی، ۱۳۹۴: ۲۹). مفهوم زیرساخت سبز یک رویکرد آینده نگر برای رسیدگی به این اثرات منفی شهرنشینی و تغییرات آب‌وهوایی در نظر گرفته می‌شود (کرمی و همکاران، ۱۴۰۲: ۶۵). هدف زیرساخت سبز حفاظت و ارتقای طبیعت با ادغام آگاهانه فرایندهای طبیعی در برنامه‌ریزی فضایی و توسعه سرزمینی است و از این طریق مزایایی مانند تنظیم آب‌وهوایی یا تفریح و درعین حال حمایت از تنوع زیستی را فراهم می‌کند. زیرساخت سبز را می‌توان به عنوان یک شبکه برنامه‌ریزی شده استراتژیک از مناطق طبیعی و نیمه طبیعی با سایر ویژگی‌های محیطی طراحی و مدیریت کرد تا طیف گسترده‌ای از خدمات اکوسیستم را ارائه دهد (کمسیون اروپا، ۲۰۱۳: ۲۱۱). در این راستا، زیرساخت سبز شهری به مجموعه‌ای از عناصر طبیعی و نیمه طبیعی در محیط شهری اطلاق می‌شود که به بهبود کیفیت زندگی و پایداری شهری کمک می‌کنند. این زیرساخت‌ها شامل سطوح نفوذپذیر، فضاهای سبز عمومی، بام‌ها و دیوارهای سبز، جنگل‌های شهری، خیابان‌ها و گذرگاه‌های سبز، باغ‌های اجتماعی و تالاب‌های شهری هستند که همگی نقش مهمی در مدیریت آب‌های سطحی، کاهش آلودگی و ارتقای زیست‌پذیری شهرها ایفا می‌کنند (زنگانه و معماری، ۱۴۰۰: ۳۶).

زیرساخت سبز اصطلاحی است که از اوایل قرن حاضر به طور فزاینده‌ای در مباحث حفاظت از زمین و توسعه آن در سراسر جهان مطرح شده است. پیشینه زیرساخت سبز به موضوعات و مصادیقی از فضای باز مانند سبزه‌راه، باغشهر و بوم‌شناسی منظر بازمی‌گردد، اما تولد و گسترش این مفهوم با عنوان اصلی آن را می‌توان در سه دوره معرفی کرد.

دوره اول، به اکتشاف و شناسایی مفهوم در اواخر قرن بیستم و اوایل قرن حاضر (۱۹۹۸-۲۰۰۷) برمی‌گردد. در این دوره، با انتشار منابعی مانند سند توسعه پایدار در آمریکا و مقاله معروف بندیکت و مک ماهون در سال ۲۰۰۲، مفهوم و اصطلاح زیرساخت سبز معرفی شد و کاربرد آن در پژوهش‌ها و گزارش‌های حرفه‌ای رواج یافت. دوره دوم، شامل گسترش و بسط این مفهوم در اوایل قرن حاضر (۲۰۰۵-۲۰۱۰) است. در این دوره، مباحث، اسناد سیاست‌گذاری و پروژه‌های تحقیقاتی با نگاه ویژه به سودمندی‌ها و کاربرد زیرساخت سبز در توسعه

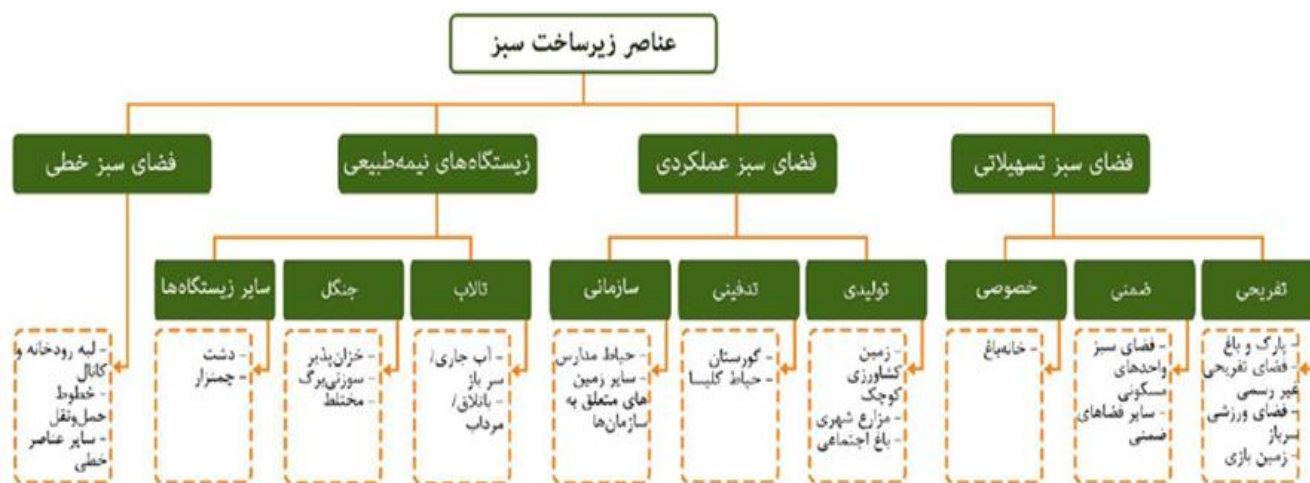
¹ grey infrastructure

² European Commission



منطقه‌ای و راهبردی مطرح شد. دوره سوم (از سال ۲۰۱۰ تاکنون)، شامل تثبیت مفهوم زیرساخت سبز در ادبیات و پژوهش‌ها و دستیابی به اجماعی مشترک درباره تعریف این مفهوم و چگونگی توسعه و کاربرد آن است. در این دوره، بدنه‌ای از شواهد تفصیلی‌تر و معتبرتر شکل گرفته است که به درک بهتر و استفاده گسترده‌تر از زیرساخت سبز کمک می‌کند (کامجو، ۱۴۰۲: ۴۲)

زیرساخت‌های سبز شامل طیف گسترده‌ای از اکوسیستم‌های طبیعی مانند مرداب، جنگل، رود، باغ، پارک ملی و... می‌شوند. با توجه به زمینه موجود، عناصر این شبکه می‌توانند متفاوت باشند و لازم است ابتدا مجموعه‌ای از عناصر زیرساخت سبز برای هر سایت و زمینه مورد مطالعه شناسایی شود. نظریه‌پردازان و نهادهای مختلف، دسته‌بندی‌های متنوعی از عناصر زیرساخت سبز ارائه کرده‌اند. به عنوان مثال، ویلیامسون^۱ (۲۰۰۳)، تمامی عناصر را در دو دسته کلی «قطب‌ها»^۲ و «پیوندها»^۳ بررسی کرده است. قطب‌ها شامل مناطق حفاظت‌شده، مناظر بومی، زمین‌های زراعی و کشاورزی، پارک‌ها و فضاهای باز، و زمین‌های بازیافت شده می‌شوند. پیوندها به دلیل ویژگی خطی بودن، شامل کریدورهای حفاظت‌شده، کمربندهای سبز و عناصر پیونددهنده منظر هستند. زیرساخت‌های سبز علاوه بر حفظ عملکردهای اکولوژیکی، نقش مؤثری در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و ارتقای کیفیت زندگی شهری دارند (کیم^۴ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۱) زیرساخت‌های سبز با کاهش اثرات امواج گرمایی و آلودگی هوا، تأثیر مستقیمی بر بهبود شرایط محیطی و حتی قیمت مسکن دارند (لای و زوپپی^۵، ۲۰۲۴: ۶۳). پژوهشگران بر اهمیت برنامه‌ریزی فضایی پایدار مبتنی بر خدمات اکوسیستمی و زیرساخت‌های سبز تأکید کرده‌اند و معتقدند می‌تواند به ایجاد شهرهای مقاوم‌تر و پایدارتر کمک کند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که زیرساخت‌های سبز نه تنها به عنوان عناصر اکولوژیکی، بلکه به عنوان ابزارهای کلیدی در مدیریت چالش‌های شهری عمل می‌کنند (ساتھیانارایانان^۶ و همکاران، ۲۰۲۵: ۳۱).



شکل ۱- گونه‌بندی پیشنهادی فضاهای سبز شهری توسط دپارتمان حمل و نقل، دولت محلی و مناطق لندن

مأخذ: دونت^۷ ۲۰۲۲: ۱۷

¹ Williamson

² Hubs

³ Links

⁴ Kim

⁵ Lai & Zoppi

⁶ Sathianarayanan

⁷ Dunnett



راه حل‌های مبتنی بر طبیعت^۱ یک مفهوم گسترده است که از اکوسیستم‌های طبیعی برای مقابله با چالش‌های اجتماعی استفاده می‌کند. زیرساخت سبز یکی از زیرمجموعه‌های مهم راه حل‌های مبتنی بر طبیعت است که به‌طور خاص به‌عنوان «شبکه سبزی که ارزش‌ها و عملکردهای اکوسیستم طبیعی را حفظ می‌کند و به انسان‌ها مزایایی ارائه می‌دهد» تعریف می‌شود (قادریان و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۴). این اصطلاح به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته و اصول اساسی آن، از جمله مناظر چندمنظوره و مزایای اجتماعی فضای سبز، به‌کارگیری توسط فردریک لاو اولمستد^۲ و ابنزر هاوارد^۳ مورد تأکید قرار می‌گیرد (بندیکت و مک‌ماهون^۴، ۲۰۲۲: ۱۸).

میل^۵ (۲۰۱۶)، در تاریخچه زیرساخت سبز به سه مرحله اصلی اشاره می‌کند. در مرحله اول، مرحله «اکتشاف»^۶ (۱۹۹۵-۲۰۰۵)، تعاریف و مزایای مختلفی برای زیرساخت سبز مطرح شد. در مرحله دوم، «گسترش»^۷ (۲۰۰۵-۲۰۱۰)، زیرساخت سبز با حمایت بیشتر از محققان، سازمان‌ها و افراد مورد توجه قرار گرفت و شهرها برنامه‌های جامع برای اجرای آن را آغاز کردند. در سومین مرحله، از سال ۲۰۱۰ به بعد، به نظر می‌رسد که «تجمع»^۸ یا توافق بیشتری در مورد مفهوم، اجرا و ارزش زیرساخت سبز رخ داده است. به عبارت دیگر، زیرساخت سبز به‌عنوان یک الگوی حرکت در برنامه‌ریزی منظر معاصر مطرح شده است که به تغییرات آب‌وهوا، توسعه اجتماعی و ارزش‌گذاری اقتصادی به‌طور هم‌زمان توجه می‌کند.

نظریه عملکرد زیست محیطی: زیرساخت سبز خدمات ضروری اکولوژیکی مانند تصفیه هوا و آب، تنظیم آب و هوا و زیستگاه حیات وحش را ارائه می‌دهد. این خدمات برای حفظ تعادل اکولوژیکی و حمایت از تنوع زیستی بسیار مهم هستند (چرچوک و خوماروا^۹، ۲۰۲۳: ۱۴۵).

نظریه ساختار شبکه: زیرساخت سبز با ساختار شبکه‌ای مشخص می‌شود که اتصال بین فضاها و سبزه‌ها را تضمین می‌کند. این اتصال برای حرکت گونه‌ها، جریان فرایندهای اکولوژیکی و انعطاف‌پذیری اکوسیستم‌ها حیاتی است (فریا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱: ۵۶). نظریه عدالت اجتماعی و عدالت زیست محیطی: اجرای زیرساخت سبز باید عدالت اجتماعی و عدالت زیست محیطی را در نظر بگیرد (شائو و کیم^{۱۱}، ۲۰۲۲: ۱۱۸). این امر مستلزم حصول اطمینان از این است که همه جوامع، به ویژه جوامع به حاشیه رانده شده، به مزایای GI دسترسی داشته باشند و به‌طور نامتناسبی تحت تأثیر بارهای زیست محیطی قرار نگیرند (زنگانه و همکاران، ۲۰۲۳: ۲۸).

نظریه زیرساخت سبز به‌عنوان رویکردی یکپارچه و بدون محدودیت: در برنامه‌ریزی زیرساخت سبز، با در نظر گرفتن ویژگی‌ها و منابع مختلف، توجه زیادی به ادغام ادبیات نامتجانس در علوم اجتماعی، اقتصادی و اکولوژیکی می‌شود. اصول توسعه‌یافته برای دستیابی به یکپارچگی در برنامه‌ریزی را می‌توان در سه سطح بیان کرد:

ادغام فضایی: این سطح شامل افزایش ارتباطات بین مردم، اتصال مناظر و پیوند مردم با طبیعت است. همچنین داشتن یک رویکرد برنامه‌ریزی چندمقیاسی برای بهبود این ارتباطات ضروری است.

¹ Nature-based solutions

² Frederick Law Olmsted

³ Ebenezer Howard

⁴ Benedict & McMahon

⁵ Mell

⁶ exploration

⁷ expansion

⁸ consolidation

⁹ Cherchyk & Khumarova

¹⁰ Ferreira

¹¹ Shao & Kim



یکپارچه‌سازی منابع: این سطح با گسترش مؤلفه‌ها در برنامه‌ریزی زیرساخت سبز شهری (برنامه‌ریزی چند هدفه) و پیوند دادن مفاهیم اکولوژیکی به مفاهیم اجتماعی-اقتصادی حاصل می‌شود. این رویکرد مزایا و خدمات اکوسیستم را در نظر گرفته و چند کارکردی بودن در برنامه‌ریزی را ترویج می‌دهد.

یکپارچگی اجتماعی-اقتصادی: این سطح با پیشبرد پیوندهای بین علم اکولوژیکی و تمرین طراحی و برنامه‌ریزی شهری تحقق می‌یابد. همچنین ادغام زیرساخت سبز با سایر روش‌های برنامه‌ریزی برای سیستم‌های شهری (اجتماعی-اقتصادی-اکولوژیکی) را شامل می‌شود (رامیار^۱ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۳).

زیرساخت سبز شهری از چهار نوع استراتژی کلی برای پاسخ به نیازها و اهداف برنامه‌ریزی استفاده می‌کند: این استراتژی‌ها به‌عنوان تدافعی، تهاجمی، حفاظتی یا فرصت‌طلب طبقه‌بندی می‌شوند (پورمحمدی و سعادت‌جو، ۱۴۰۳: ۵۱). در مواجهه با تغییرات، برنامه‌ریزان باید از عوامل این تغییرات آگاه بوده و استراتژی‌های خود را با توجه به اهداف برنامه‌شان انتخاب کنند. تعریف و استفاده از استراتژی‌های تدافعی (واکنشی)، تهاجمی (پیشگیرانه)، حفاظتی (غیرفعال)، یا فرصت‌طلبانه (فعالانه) به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی چندهدفه و چندانظوره‌ای را انجام دهند (آهرن^۲، ۲۰۰۷: ۲۶).

نظریه برنامه‌ریزی زیرساخت‌های سبز شهری برای ایجاد محیط‌های شهری تاب‌آور: در برنامه‌ریزی زیست‌محیطی، تاب‌آوری نشان می‌دهد که یک اکوسیستم تا چه حد می‌تواند تغییر کند قبل از اینکه یک تغییر اساسی در رژیم‌های سیستم اتفاق بیفتد و سیستم به یک موقعیت و الگوی غیرقابل تشخیص تبدیل شود (پیترسون^۳، ۲۰۰۰: ۱۷). در دیدگاه تاب‌آوری شهری، دگرگونی به معنای اصلاح فرآیند برنامه‌ریزی برای داشتن انعطاف‌پذیری و سازگاری بیشتر در پاسخ به تغییرات است. این رویکرد در پیوند با مفهوم شهر چابک اهمیت می‌یابد، چرا که شهر چابک نیز بر ارتقای ظرفیت نهادهای جوامع، اقتصادها و محیط‌ها برای واکنش سریع و مؤثر در برابر مخاطرات و آسیب‌پذیری‌ها تأکید دارد. در برنامه‌ریزی شهری، چنین تحولی به‌عنوان توانایی تسهیل‌گذار به مسیرهای جایگزین و تحقق پایداری بلندمدت از طریق تصمیم‌گیری‌های سریع و کارآمد شناخته می‌شود (زنگانه و همکاران، ۱۴۰۳: ۲۷). تحول بیشتر در سیاست‌های برنامه‌ریزی یا فرآیند برنامه‌ریزی مورد بحث قرار می‌گیرد، اما این مفهوم کمتر در برنامه‌ریزی فضایی یا منابع اکولوژیکی به کار رفته است (شریفی و یاماگاتا^۴، ۲۰۱۸: ۴۶).

تایزو^۵، یک کلانشهر واقع در سواحل جنوب شرقی چین با مساحت حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مربع و جمعیت فعلی ۵/۵ میلیون نفر است. این شهر انتظار افزایش ۱۱۵ درصدی جمعیت در ۲۵ سال آینده را دارد. برای مقابله با سیل‌های معمولی، تایزو یک شبکه آب گسترده ایجاد کرده است که مسیرهای آب طبیعی و تالاب‌ها را یکپارچه می‌کند. معمار منظر کونگ‌یان یو به همراه تورن‌اسکیپ و دانشگاه پکن یک طرح زیرساختی زیست‌محیطی طراحی کرده‌اند تا از منابع غیرزیستی، زیستی و فرهنگی حمایت کند و در عین حال ساختار توسعه شهری آینده را بهبود بخشد. این زیرساخت‌های زیست‌محیطی به‌منظور حمایت از عملکردهای غیرزنده، زیستی و فرهنگی طراحی شده‌اند و به‌عنوان الگوهای امنیتی برای ارائه خدمات اکوسیستم پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الگوهای امنیتی مناطقی را نشان می‌دهند که خدمات مهم اکوسیستمی مانند حفاظت در برابر سیل را فراهم می‌کنند و بنابراین امنیت منطقه را تضمین می‌کنند (تورن‌اسکیپ^۶، ۲۰۰۶). طرح تایزو از دستورالعمل‌های بوم‌شناسی چشم‌انداز به‌عنوان رویکرد چند مقیاسی استفاده می‌کند، که جایگزین‌های طرح‌های توسعه‌یافته در مقیاس‌های منطقه‌ای را دربرمی‌گیرد و الگوهای امنیتی را از طریق پیوند الگو و فرآیند به کار می‌برد، به‌ویژه با تأکید بر اتصالات، به‌خصوص در زمینه

¹ Ramyar

² Ahern

³ Peterson

⁴ Sharifi & Yamagata

⁵ Taizhou

⁶ Turenscape



مدیریت آب چندمنظوره. الگوهای امنیتی طرح مفهوم فضایی واضحی را ارائه می‌دهند که طبیعت و ماهیت طرح را به‌طور مؤثری ارتباط می‌دهند. استفاده چندگانه در بخش‌های مختلف طرح، از جمله سیستم آب و آبیگرهای سبز که به محله‌ها نفوذ می‌کنند طرح زیرساخت اکولوژیکی تأثیر و به‌عنوان یک پاسخ نوآورانه و پیشگیرانه برای منطقه‌ای با فشار شدید شهرنشینی طراحی شده‌است. این منطقه کلان‌شهری حاوی ۵.۵ میلیون نفر است و تصمیمات مهمی درباره شکل آینده‌ای منطقه و شهری گرفته می‌شود که بر پایداری آینده تأثیرگذار است. این مفهوم احتمالاً قابل انتقال به مناطق شهری دیگر که در آنها تأثیرات رشد جمعیت قابل مشاهده باشد است که می‌تواند تصمیم‌گیرندگان را برای کشف و اجرای ایده‌های نوآورانه ترغیب کند (آهرن^۱، ۲۰۰۷: ۱۷۸).

برنامه زیرساخت سبز منطقه سبز برلین در آلمان، یک مدل نوآورانه از زیرساخت‌های شهری سبز است که به‌صورت قطعه‌بندی یا در سطح ساختمانی پیاده‌سازی شده‌است. از سال ۱۹۴۵ تا ۱۹۹۰، برلین غربی به‌عنوان یک جزیره شهری در جمهوری دموکراتیک آلمان وجود داشت که این وضعیت منحصربه‌فرد، علاقه‌مندی به اکولوژی شهری را تشویق کرد. از دهه ۱۹۸۰، برلین غربی یک جنبش سبز پویا داشته که نشانگر سیاست‌های ملی مانند قانون ملی حفاظت از محیط‌زیست بود، که به مقامات محلی قدرت می‌دهد تا طرح‌های چشم‌انداز مناطق شهری را توسعه دهند، از جمله برنامه بیوتوپ. این برنامه بر اصل زیرساخت سبز متمرکز بر مقیاس متوسط، افزایشی و غیرمتمرکز است که می‌تواند تأثیرات چشم‌گیری برای بهبود اکولوژی شهری داشته‌باشد. تحت این برنامه، هر بسته باید اثرات خود را در محل کاهش دهد (هرد و بی^۲، ۲۰۲۴: ۵۶). هدف اصلی این برنامه، مقابله با «نفوذناپذیری خزنده» با تعیین سطح عامل سبز برای ساختمان‌های جدید یا بازسازی شده است. سبزی‌سازی برای ارائه چندین عملکرد مانند تبخیر و تعرق آب، حفظ و نفوذ آب طوفان، حذف ذرات معلق در هوا، پشتیبانی از عملکرد طبیعی خاک و ایجاد زیستگاه گیاهان و حیوانات در نظر گرفته شده‌است. این برنامه در سطح محله اجرا می‌شود، جایی که تصمیمات اولویت‌بندی می‌شوند، فناوری‌ها انتخاب می‌شوند و داده‌های عملکرد جمع‌آوری و ارزیابی می‌شوند تا پیشرفت به سمت اهداف اندازه‌گیری شود. این برنامه اهداف منطقه سبز را بر اساس کاربری زمین تعیین می‌کند: مسکونی ۶۰ درصد، کاربری مختلط ۴۰ درصد و تجاری / مرکز شهر ۳۰ درصد، با توجه به اینکه اهداف باید در پاسخ به کاربری زمین متفاوت باشند (سیرب^۳ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۹).

مواد و روش‌ها

تحقیق یک فعالیت سیستماتیک است که با هدف کشف و توسعه مجموعه‌ای از دانش سازمان‌یافته انجام می‌شود و به‌منظور حل مشکلات موجود یا افزودن به دانش بشری در یک زمینه خاص صورت می‌گیرد. از آنجاکه پژوهش حاضر، به دنبال توسعه دانش کاربردی در حوزه جغرافیا و برنامه‌ریزی شده می‌باشد، لذا پژوهش حاضر از نظر هدف در حیطه پژوهش‌های کاربردی (هدف تحقیقات کاربردی یافتن راه‌حل‌های عملی و مؤثر برای مشکلات واقعی و بهبود فرآیندها و فناوری‌ها در دنیای عملی است)، از نظر شیوه گردآوری داده‌ها یک پژوهش پیمایشی، از نظر نوع پژوهش توصیفی - تحلیلی (هدف پژوهش توصیفی - تحلیلی، توصیف دقیق ویژگی‌ها و وضعیت موجود یک پدیده و سپس تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده برای درک الگوها، روابط و علل مرتبط با آن پدیده است) از نوع تحلیل فضایی (هدف از پژوهش تحلیل فضایی، بررسی و درک الگوها، روابط مکانی و فرآیندهای جغرافیایی برای تبیین پدیده‌ها و مسائل در فضا و مکان‌های مختلف است). محسوب می‌شود. از نظر زمانی به‌دلیل اینکه گردآوری داده‌ها، چند بار و در مقطع زمانی مختلف صورت می‌گیرد نوع پژوهش به‌صورت سری‌های زمانی (هدف پژوهش سری‌های زمانی در

¹ Ahern

² Herath & Bai

³ Syrbe



تحقیقات جغرافیایی، تحلیل و درک تغییرات و روندهای مکانی-زمانی پدیده‌ها و فرآیندهای جغرافیایی در طول زمان است تا الگوها و دینامیک‌های گذشته، حال و آینده را شناسایی و تبیین کند. می‌باشد. در تحقیق پیش رو گردآوری داده‌ها و اطلاعات موردنیاز به سه شکل کتابخانه‌ای، میدانی و روش تحلیل ثانوی بوده است که ذیلاً توضیح داده شده‌است.

الف) کتابخانه‌ای: این شامل تمامی متون، اسناد، گزارش‌ها و مقالات مرتبط با تحلیل فضایی زیرساخت سبز شهری می‌شود. همچنین، مقالات علمی و پژوهشی دانشگاه‌های داخلی و خارجی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. بررسی و بیان پیشینه تحقیق و همچنین بخش مبانی و چارچوب نظری بر اساس منابع کتابخانه‌ای انجام شده‌است و در این میان به کتاب‌ها، مقالات و گزارش‌های تحقیقی مرتبط مانند گزارش‌های طرح جامع زنجان و طرح‌های توسعه مراجعه شده‌است.

ب) داده‌های اسنادی و مکانی: روش‌های اسنادی و موجود، شامل:

- داده‌های ماهواره‌ای؛ شامل تصاویر هوایی و ماهواره لندست (شامل تصاویر لندست ۴-۵ و ۸-۹)
- داده‌های اولیه شامل بلوک‌های آماری و لایه کاربری اراضی شهر، سازمان‌های تخصصی مرکز آمار ایران و شهرداری زنجان.

- داده‌های ثانویه (طرح‌های توسعه شهری داده‌های طرح‌های جامع و تفصیلی شهر زنجان و داده‌های طرح‌ها و گزارش‌های تحقیقاتی).

در تحلیل فضایی تغییرات زیرساخت‌های سبز شهری زنجان، مقیاس شهر زنجان به‌عنوان محور اصلی مطالعه می‌تواند به چندین نحو مورد بررسی قرار گیرد:

مقیاس مکانی: بررسی توزیع و مکان‌یابی فضاهای سبز در شهر زنجان، از جمله باغ‌ها، پارک‌ها، میدان‌ها و فضاهای عمومی مشابه.

مقیاس زمانی: بررسی تغییرات در زیرساخت‌های سبز شهری زنجان در طول زمان، از جمله افزایش یا کاهش فضاهای سبز، تغییر در کیفیت و کمیت آنها و تحولات در الگوی استفاده از فضاهای سبز.

مقیاس مفهومی: بررسی ارزش و اهمیت فضاهای سبز در شهر زنجان از دیدگاه محیط‌زیست، اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی. در این پژوهش از روش‌ها، فنون، ابزارهای تحلیل داده‌ها و اطلاعات برای بررسی الگوهای فضایی زیرساخت‌های سبز شهری و تغییرات آن استفاده شده‌است. ابتدا، تصاویر ماهواره لندست برای دوره‌های زمانی مشخص (با فواصل ده ساله) از منطقه مورد مطالعه دانلود شده‌اند. سپس، تصاویر به محدوده مورد مطالعه برش داده و با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی (الگوریتم ماشین بردار پشتیبان) در نرم‌افزارهای سنجش‌ازدور، نقشه کاربری اراضی تهیه شده‌است. در گام بعدی با استفاده از ابزارهای آمار فضایی و شاخص خودهمبستگی فضایی موران در ArcMap، نسبت به تعیین الگوهای فضایی زیرساخت‌های سبز (خوشه‌ای بودن یا تصادفی یا پراکنده بودن) و تغییرات آن اقدام شده‌است. با درک اینکه رشد شهر در تغییرات زیرساخت‌های سبز شهری اثر گذار می‌باشد، به موازات تحلیل‌های فضایی، مراحل رشد و توسعه شهر نیز از تصاویر اخذ شده مورد پردازش و نقشه کاربری اراضی و پوشش اراضی ساخته شده استخراج شده‌است. در مرحله بعدی، با تحلیل داده‌های مکانی، الگوهای رشد شهر (از جمله توسعه درونی، توسعه حاشیه‌ای و توسعه بیرونی) در طول دوره‌های مشخص شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از شاخص پوشش گیاهی، تغییرات در زیرساخت‌های سبز شهر مورد مطالعه قرار گرفته و در نهایت، با روش‌های مربعات و تحلیل رگرسیون وزنی جغرافیایی اثرات فضایی رشد شهر بر زیرساخت‌های سبز شهر ارزیابی شده‌است. این مراحل به‌منظور درک عمیق‌تر الگوهای رشد شهر و تأثیر آن بر زیرساخت‌های سبز شهری به کار گرفته می‌شوند.

مدل‌های تحلیلی

آمار فضایی: در عرصه پیشرفت‌های فناوری در سال‌های اخیر، تعداد قابل توجهی نرم‌افزار که هر کدام برخی از تحلیل‌های آمار فضایی را انجام می‌دهند به بازار عرضه شده‌اند. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به بسط ابزارهای آمار فضایی موجود در افزار Arc/GIS اشاره کرد که مؤسسه تحقیقات سیستم‌های محیطی^۱ آن را تهیه و به بازار ارائه کرده است. در برخی از این موارد این ابزارها همان کارهایی را انجام می‌دهند که محقق می‌تواند با نگاه به نقشه‌ها و با استفاده از چشم و ذهن خود نیز انجام دهد، ولی در مواردی که حجم داده‌ها زیاد است و توزیع یا پراکندگی آنها در فضا پیچیده‌تر است، استفاده از آمارهای فضایی می‌تواند به ما در افزایش دقت نتایج و مشاهدات کمک زیادی کند (عسگری، ۱۳۹۰).

شاخص موران (Moran's I): ابزار تحلیل خودهمبستگی فضایی موران به بررسی خودهمبستگی فضایی بر اساس مکان دو مقدار و خصیصه موردنظر عوارض جغرافیایی می‌پردازد. این تحلیل الگوی توزیع عوارض در فضا را با ملاحظه هم‌زمان موقعیت مکانی و خصیصه مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که آیا عوارض به صورت تصادفی، پراکنده و یا خوشه‌ای در فضا توزیع شده‌اند. شاخص موران را محاسبه می‌کند و با استفاده از امتیاز استاندارد Z و P-Value به ارزیابی و معنادار بودن شاخص محاسبه شده می‌پردازد. این ابزار نشان می‌دهد که الگوی پراکنش این عوارض با در نظر گرفتن مقادیر خصیصه مورد مطالعه از الگوی خوشه‌ای و یا پراکنده برخوردار است. اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد مثبت یک (+۱) باشد، داده‌ها دارای خودهمبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای بوده و اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد منفی یک (-۱) باشد، آنگاه داده‌ها از هم گسسته و پراکنده می‌باشند (عسگری، ۱۳۹۰). شاخص موران برای خودهمبستگی فضایی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} w_{i,j} (x_i - \bar{x})$$

لکه‌های داغ: تحلیل لکه‌های داغ از آمار گتیس آرد جی^۲ برای کلیه عوارض موجود در داده‌ها استفاده می‌کند. نمره Z محاسبه شده نشان می‌دهد که در کدام مناطق داده‌ها با مقادیر زیاد یا کم خوشه‌بندی شده‌اند. چهارچوب مفهومی این تحلیل این گونه عمل می‌کند که اگر عارضه‌ای مقدار بالا داشته باشد جالب و مهم است، ولی به این معنی نیست که یک لکه داغ باشد عارضه‌ای لکه داغ تلقی می‌شود که هم خود عارضه و هم عارضه‌های همسایه آن از نظر آماری معنادار باشد امتیاز Z برای خروجی نهایی زمانی به دست خواهد آمد که مجموع محلی عارضه^۳ و همسایه آن به طور نسبی با جمع کل عارضه‌ها مقایسه گردد (ژانگ^۴، ۲۰۰۸: ۱۴). آماره گتیس - آرد جی به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} - x \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{n-1}}}$$

رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR^۵): مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی به منظور به دست آوردن معادلات رگرسیونی برای هر منطقه به صورت جداگانه اجرا می‌گردد. مدل پایه‌ای رگرسیون وزنی جغرافیایی به صورت زیر است:

^۱ Environmental system research institute

^۲ Getis - Ord Gi

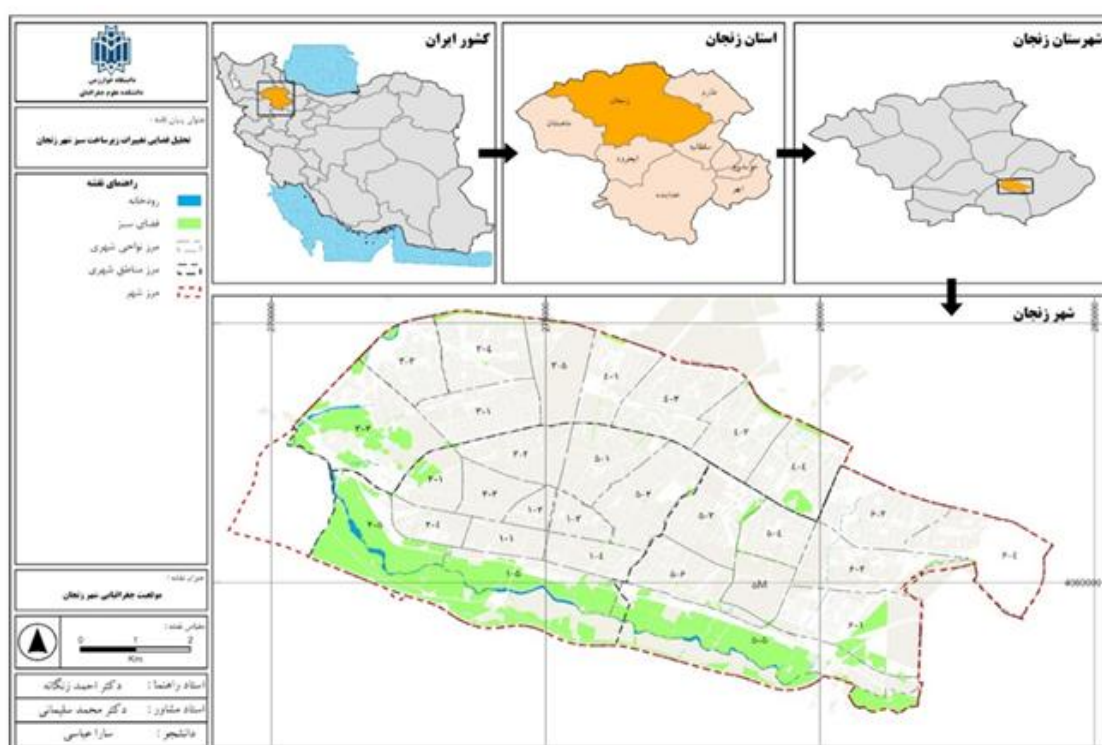
^۳ Local sum

^۴ Zhang

^۵ Geographically Weighted Regressions

$$y_i = \beta(u_i, v_i) + \sum \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

شهر زنجان، بر روی مسیر تهران-تبریز در بخش شرقی استان زنجان قرار دارد و در ارتفاع متوسط ۱۶۶۳ متر از سطح دریا واقع شده است. این شهر در محدوده های ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی واقع شده و همچنین در مجموعه ای از ارتفاعات شمالی، شمال شرقی، جنوب و جنوب غربی قرار دارد. مساحت شهر زنجان حدود ۲۴۶۹ کیلومتر مربع است که حدود ۱۷ درصد مساحت شهرستان را تشکیل می دهد. شیب زمین از شمال به طرف جنوب بوده و اختلاف ارتفاع حدود ۱۰۰ متر به علت ملایم بودن شیب، چندان محسوس نیست. شهر زنجان در سمت راست، رودخانه ای به همین نام واقع شده است. نزدیک ترین کوه به شهر، کوه گرده در شمال شرقی است که با فاصله ۴/۵ کیلومتر از میدان آزادی و اختلاف ارتفاع ۱۳۵ متر از سطح میدان و ۱۹۸۵ متر از سطح دریا قرار دارد.



شکل ۲- نقشه موقعیت جغرافیایی شهر زنجان

یافته های تحقیق

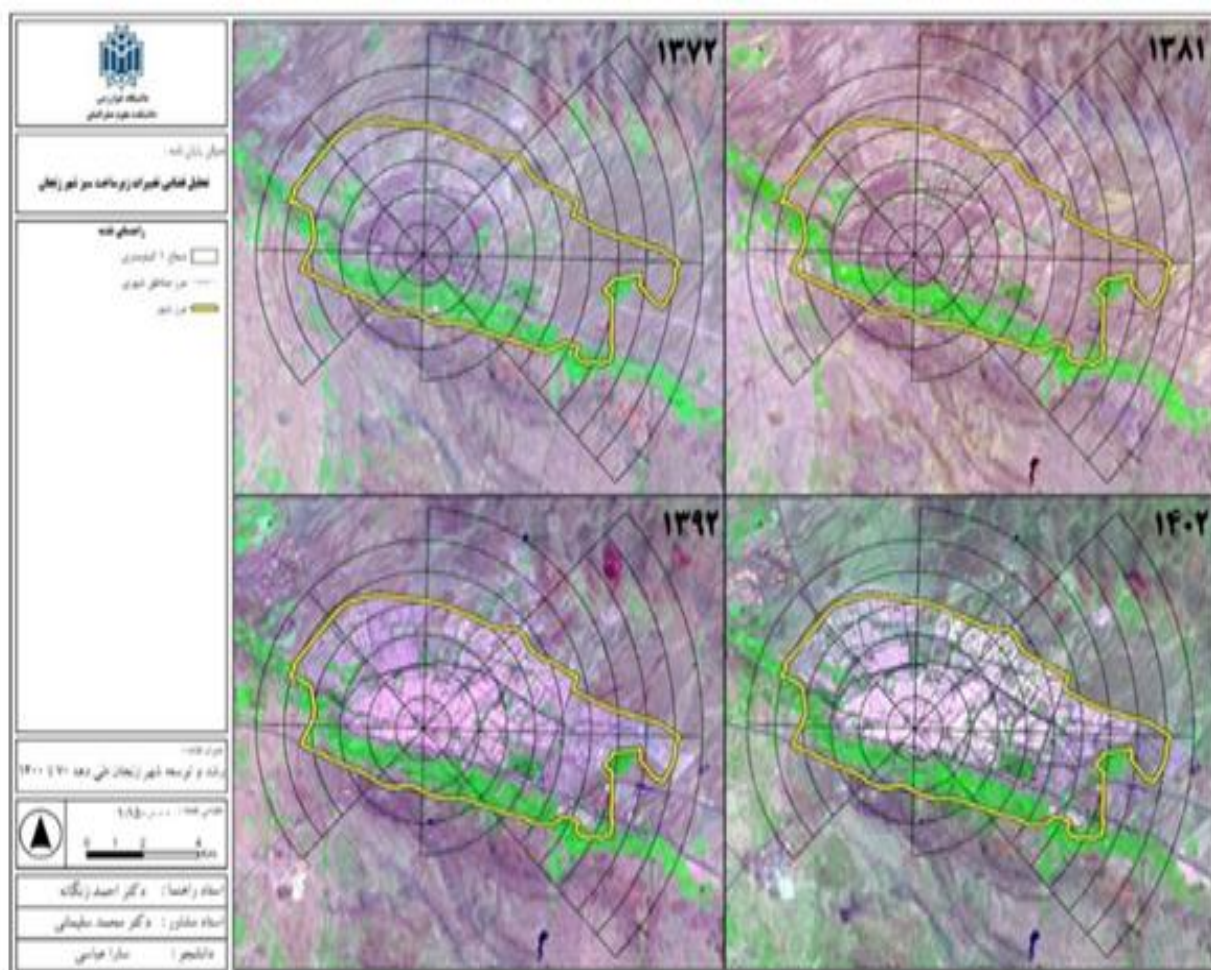
رشد و توسعه شهری در دهه های اخیر باعث افزایش نیاز به تحلیل و بررسی عمیق تر از عوامل مختلفی شده است که در این فرآیند موثرند. یکی از این عوامل، زیرساخت های سبز شهری است که نقش بسزایی در بهبود کیفیت زندگی شهروندان، مدیریت منابع طبیعی و حفظ محیط زیست دارند. با توجه به اهمیت این زیرساخت ها و نیاز به درک عمیق تر از رابطه آنها با الگوهای رشد شهری، این تحقیق به تجزیه و تحلیل نقش الگوهای فضایی-زمانی رشد شهر در تغییر زیرساخت های سبز شهری زنجان می پردازد. تصاویر ماهواره ای مورد استفاده در این تحقیق از سایت زمین شناسی آمریکا دانلود گردید. جدول (۵-۱) شامل تاریخ های اخذ تصاویر ماهواره ای و نوع سنجده و شماره تصاویر می باشد:

جدول ۱- مشخصات و اطلاعات تصاویر اخذ شده منطقه مورد مطالعه

ماهواره	تاریخ اخذ تصویر	سنجنده	شماره تصاویر
LANDSAT_5	۱۹۹۳-۰۷-۲۱	TM	LT05_L2SP_166035_19930721_20200913_02_T1
LANDSAT_5	۲۰۰۲-۰۷-۱۴	TM	LT05_L2SP_166035_20020714_20200905_02_T1
LANDSAT_8	۲۰۱۳-۰۷-۲۸	OLI_TIRS	LC08_L2SP_166035_20130728_20200912_02_T1
LANDSAT_9	۲۰۲۳-۰۶-۳۰	OLI_TIRS	LC09_L2SP_166035_20230630_20230706_02_T1

*** با توجه به نبود تصویر در سال ۱۳۸۲ تصویر سال ۱۳۸۱ انتخاب گردید.

با توجه به محدوده‌ی شهر زنجان، تصاویر ماهواره‌ای به اندازه‌ی محدوده‌ی مورد مطالعه برش شدند تا در گام بعد از آن‌ها برای تولید نقشه کاربری اراضی استفاده گردد. در گام بعدی این تحقیق، به اهمیت شناسایی منطقه مورد مطالعه نسبت به ترکیب باند تصاویر اخذ شده پرداخته شد. ترکیب باند تصاویر می‌تواند در شناسایی پهنه‌های موجود در منطقه دارای اهمیت باشد. به‌عنوان مثال، برای شناسایی پهنه‌های ساخته‌شده، می‌توان از ترکیب باندهای ۷، ۵ و ۳ استفاده نمود. همچنین، برای شناسایی پهنه‌های سبز، می‌توان از ترکیب باندهای ۴، ۳ و ۲ استفاده نمود. این روش‌ها با استفاده از اطلاعات موجود در ترکیب باندها، به تفکیک و شناسایی دقیق‌تر پهنه‌های مختلف در منطقه کمک می‌کنند و در درک بهتری از منطقه مورد مطالعه و شناسایی زیرساخت‌های شهری ارائه می‌دهند.

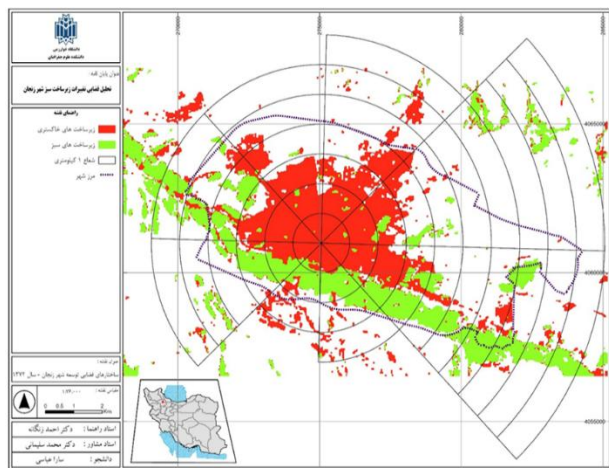


شکل ۳- نقشه ترکیب باند تصاویر لندست

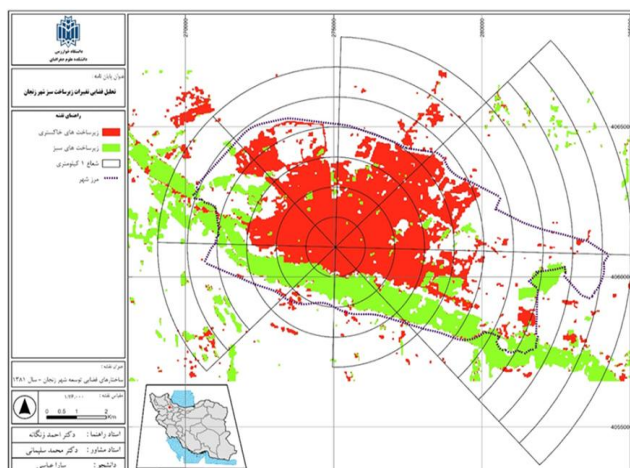


تهیه نقشه‌های کاربری اراضی

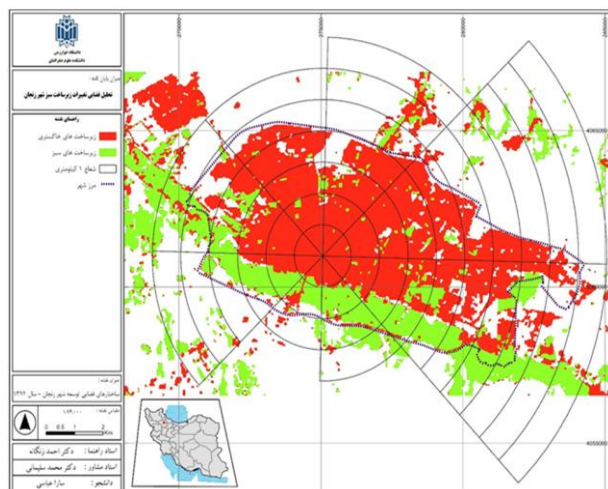
متغیرهای پژوهش، زیرساخت‌های خاکستری که دربرگیرنده پهنه‌های ساخته‌شده انسانی مانند معابر، شهرک‌های صنعتی، ساختمان‌ها و دیگر عناصر شهری می‌شوند. همچنین، زیرساخت‌های سبز که شامل پهنه‌های سبز مانند پارک‌ها، باغات، رفوژهای سبز، و درختان می‌باشند نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند.



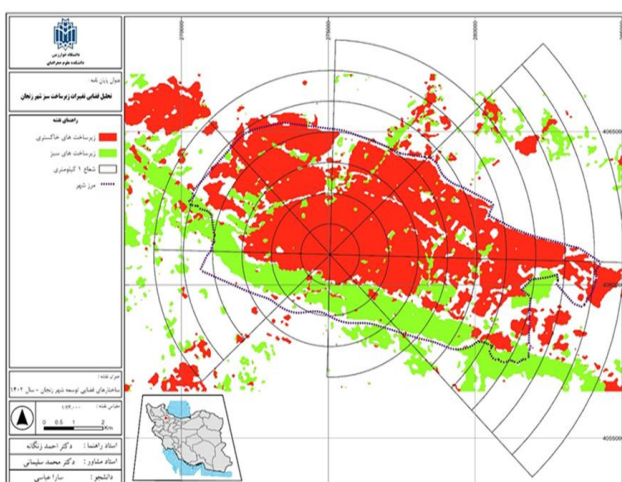
شکل ۵- نقشه کاربری اراضی شهر زنجان در سال ۱۳۷۲



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی شهر زنجان در سال ۱۳۸۱

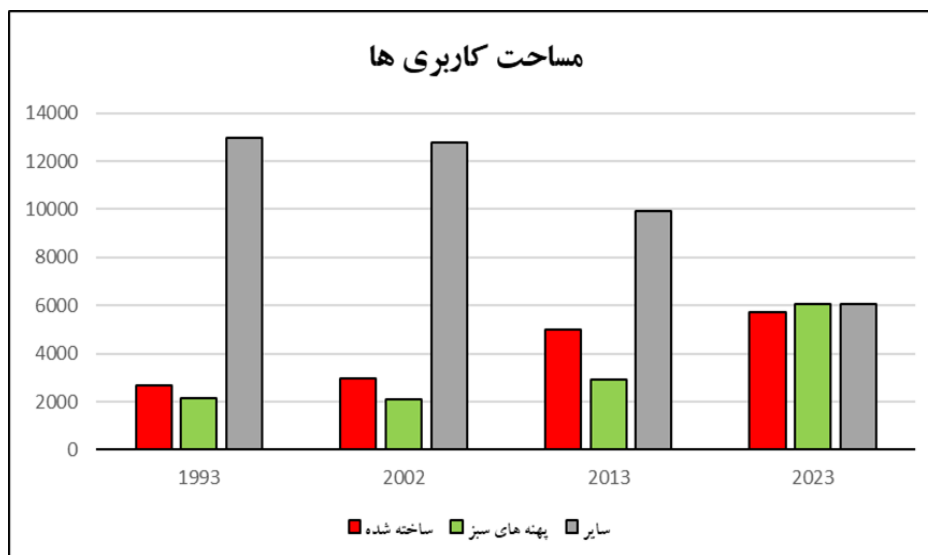


شکل ۷- نقشه کاربری اراضی شهر زنجان در سال ۱۳۹۲



شکل ۶- نقشه کاربری اراضی شهر زنجان در سال ۱۴۰۲

در سال ۱۳۷۲، مساحت ساخته‌شده به مقدار $2697/39$ هکتار بوده است که در سال ۱۴۰۲ به $5725/35$ هکتار افزایش یافته‌است، نشان از افزایش مساحت ساخته‌شده و رشد شهری است. همچنین، مساحت پهنه‌های سبز در سال ۱۳۷۲ به $2167/02$ هکتار بوده است و این مساحت تا سال ۱۴۰۲ به $6071/22$ هکتار افزایش یافته‌است که نشان از افزایش مساحت فضاهای سبز توجه بیشتر به مسائل محیطی است. از سوی دیگر، مساحت سایر کاربری‌ها در سال ۱۳۷۲ به $12989/34$ هکتار بوده است و این مساحت تا سال ۱۴۰۲ به $6057/18$ هکتار کاهش یافته‌است.



شکل ۸- نمودار تغییرات کاربری های شهر زنجان طی دوره ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲

تحلیل الگوهای فضایی رشد

درک بنیادی دینامیک رشد شهری نتیجه ای است که روابط مکانی بین لکه های جدید ساخته شده و لکه های شهری موجود را تفسیر و تحلیل می کند (جیاو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ کوراه^۲، ۲۰۲۴). اگر چه ابهامات روش شناختی در مورد چگونگی شناسایی حالت های مختلف رشد شهری وجود دارد (شی^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). در این راستا، پژوهشگران عمدتاً توافق دارند که رشد شهری نتیجه سه حالت اصلی رشد است:

الف. رشد درونی^۴ - توسعه های جدیدی که به طور کامل یا عمدتاً توسط زمین های ساخته شده موجود احاطه شده اند.

ب. گسترش حاشیه ای^۵ - رشد یک جهته لکه های جدید ساخته شده از حاشیه یک لکه شهری موجود.

ج. رشد بیرونی یا جهشی^۶ - رشد شهری که رخ می دهد اما از نواحی ساخته شده موجود جدا است. برای شناسایی این سه حالت مختلف، در این مطالعه از شاخص گسترش منظر^۷ که توسط (لیو^۸ و همکاران، ۲۰۱۰) پیشنهاد شده بود، استفاده شد. این شاخص یک معادله ساده رابطه ای را برای محاسبه تلاقی بین لکه های شهری جدید و موجود نشان می دهد و به صورت زیر نوشته می شود:

$$LEI = \frac{A_0}{A_0 + A_v} \times 100.$$

در سال ۱۳۷۲، مجموع مساحت ساخته شده برای رشد شهر زنجان ۲۶۹۷/۴ هکتار بوده است. این سال به عنوان سال پایه در نظر گرفته شده است و الگوهای فضایی رشد شهر نسبت به این سال بررسی و محاسبه گردیده شده است. در سال های بعدی، الگوی رشد شهری تغییر کرده است. در سال ۱۳۸۱، مجموع مساحت ساخته شده به ۲۹۵۴/۶ هکتار افزایش یافته است که این افزایش نسبت به سال ۱۳۷۲ از

¹ Jiao

² Korah

³ Shi

⁴ Infilling

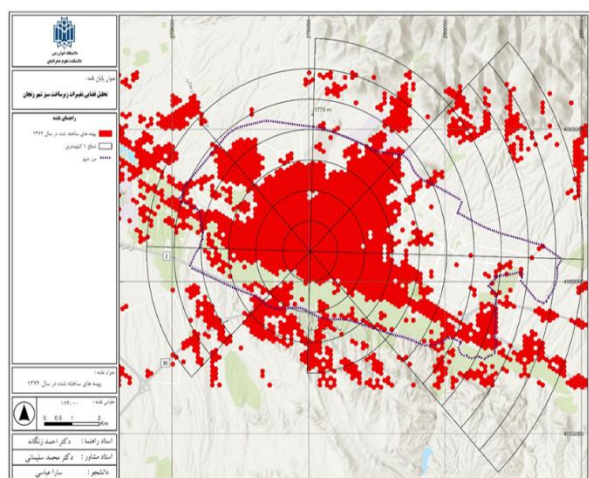
⁵ Edge expansion

⁶ Outlying or leapfrog growth

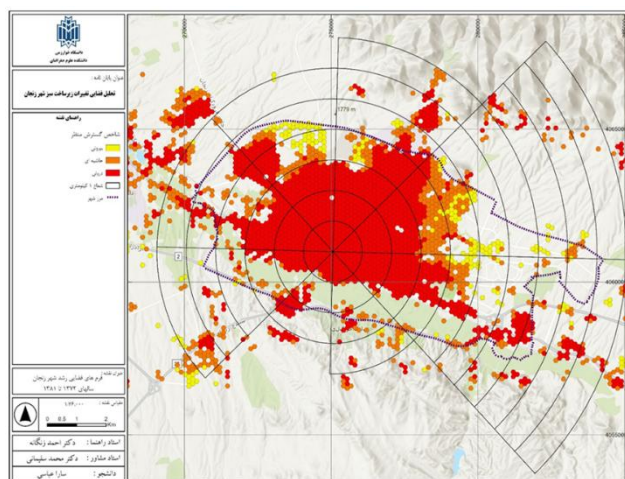
⁷ LEI

⁸ Liu

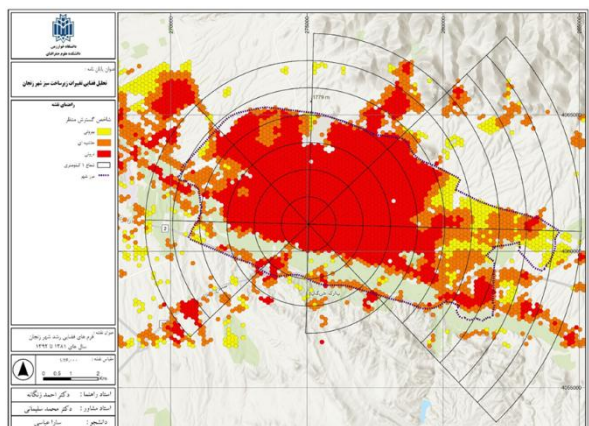
رشد درونی شهر نشأت گرفته است. در سال ۱۳۹۲، مساحت ساخته شده به $۵۰۱۰/۸$ هکتار افزایش یافته و این افزایش اصلی از رشد درونی شهر ناشی شده است. در نهایت، در سال ۱۴۰۲، مجموع مساحت ساخته شده کاهش یافته و به $۴۹۳۹/۴$ هکتار رسیده است که در این سال نیز رشد درونی شهر بیشترین سهم را دارد. با توجه به این تحلیل، مشخص است که در طول زمان، رشد درونی شهر زنجان به عنوان یک الگوی اصلی برای توسعه شهری بیشترین تأثیر را داشته است. این الگوی رشد نشان می‌دهد که بخش زیادی از توسعه شهری درون مرزهای قدیمی شهر اتفاق افتاده است. اشکال زیر روند تغییرات رشد شهر طی دوره‌های مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰- نقشه پهنه های ساخته شده در سال ۱۳۷۲

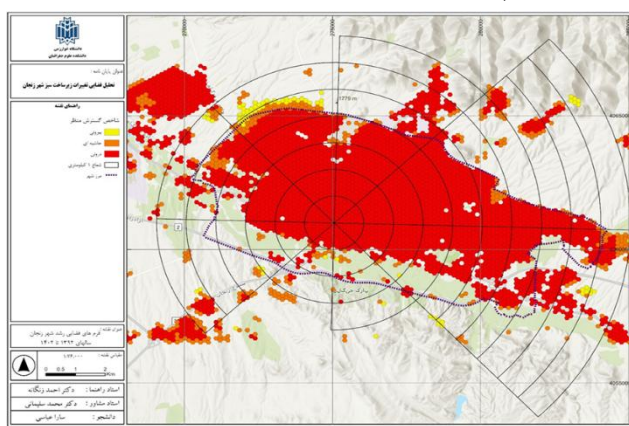


شکل ۹- نقشه پهنه های ساخته شده طی سال های ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۱



شکل ۱۲- نقشه پهنه های ساخته شده طی سال های

۱۳۸۲ تا ۱۳۹۲



شکل ۱۱- نقشه پهنه های ساخته شده طی سال های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲

تحلیل تغییرات زیرساخت‌های سبز

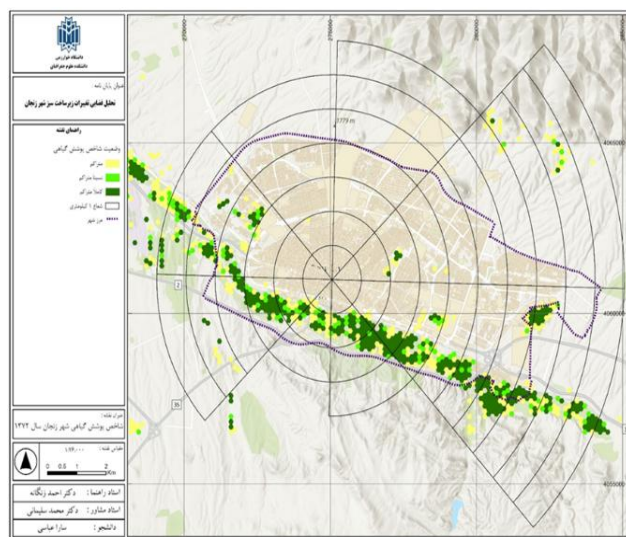
در این بخش از تحلیل، ابتدا شاخص پوشش گیاهی در چهار دوره زمانی مختلف، یعنی سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۸۱، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲، با استفاده از نرم افزار ArcGIS Pro محاسبه گردید. سپس، با توجه به منطقه مورد مطالعه، یک لایه به شکل خانه زنبور با مساحت دو هکتار ایجاد گردید تا به عنوان واحد تحلیلی در تجزیه و تحلیل شاخص پوشش گیاهی استفاده شود. سپس با بهره‌گیری از ابزار زونال استاتیستیک^۱ در

¹ Zonal Statistics

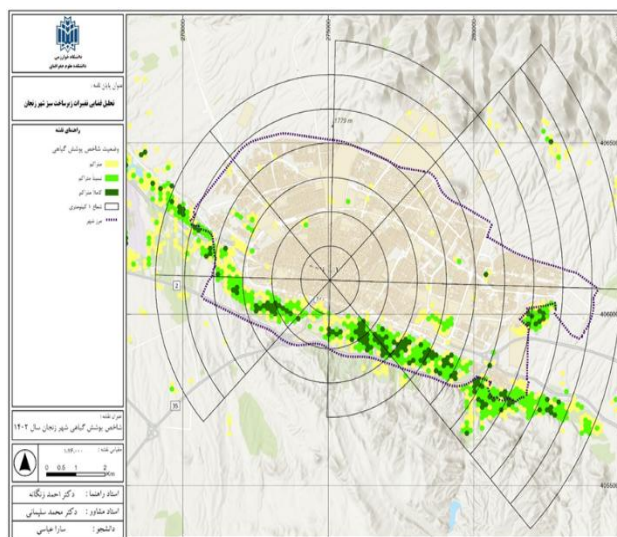
ArcGIS Pro، ارزش‌های شاخص پوشش گیاهی در هر خانه زنبوری محاسبه شدند. در مرحله بعدی، لایه ایجاد شده برای شاخص پوشش گیاهی به سه کلاس مختلف طبقه‌بندی شد و مساحت هر کلاس به دقت محاسبه گردید. محدوده مقدار شاخص پوشش گیاهی بین ۱- تا ۱ است. مقادیر منفی شاخص پوشش گیاهی (مقادیر نزدیک به ۱-) با آب مطابقت دارد. مقادیر نزدیک به صفر (۰/۱- تا ۰/۱) عموماً مربوط به مناطق بایر سنگ، ماسه یا برف است. مقادیر پایین و مثبت نشان دهنده بوته‌ها و علفزارها (تقریباً ۰/۲ تا ۰/۴) است، در حالی که مقادیر بالا نشان دهنده جنگل‌های بارانی معتدل و گرمسیری است (مقادیر نزدیک به ۱). جدول ۵-۲ نشان می‌دهد که چگونه میزان شاخص پوشش گیاهی در سه رده‌ی مختلف (بین ۰ تا ۰/۲، بین ۰/۲ تا ۰/۵ و بیشتر از ۰/۵) در چهار دوره‌ی زمانی مورد مطالعه توزیع شده‌است. همچنین مساحت متناظر با هر یک از این رده‌ها نیز در جدول آورده شده‌است. در سال ۱۳۷۲، مساحت پوشش گیاهی با وضعیت متراکم بیشترین مساحت را دارا بوده است که به میزان ۶۰۰ هکتار بوده است. در سال‌های بعدی، این مساحت کاهش یافته و به وضعیت کاملاً متراکم منتقل شده‌است که میزان آن در سال ۱۳۸۱ به ۵۰۰ هکتار و در سال ۱۳۹۲ به ۴۸۶ هکتار کاهش یافته‌است. اما در سال ۱۴۰۲، این مساحت دوباره افزایش یافته و به ۲۹۲ هکتار رسیده است که این ممکن است نشانگر یک تغییر الگویی یا سیاستی در توسعه فضاهای سبز شهری باشد. نمودار تغییرات شاخص پوشش گیاهی طی دوره‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول ۲- تغییرات شاخص پوشش گیاهی شهر زنجان طی سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲

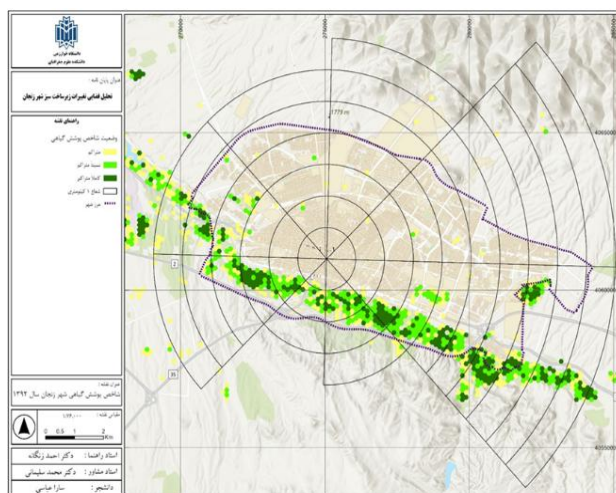
وضعیت پوشش گیاهی	۱۳۷۲	۱۳۸۱	۱۳۹۲	۱۴۰۲
بین ۰ تا ۰/۲	۶۰۰	۴۴۶	۶۰۶	۸۲۴
بین ۰/۲ تا ۰/۵	۲۲۰	۳۶۲	۶۴۲	۶۸۴
بیشتر از ۰/۵	۷۱۲	۵۰۰	۴۸۶	۲۹۲



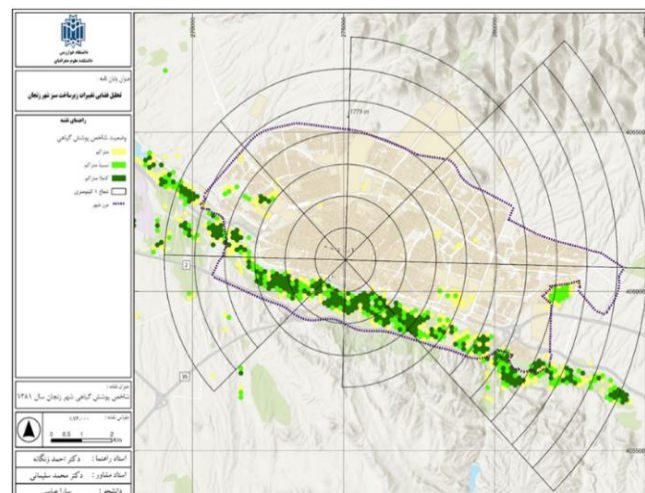
شکل ۱۴- نقشه شاخص پوشش گیاهی شهر زنجان طی سال های ۱۳۷۲



شکل ۱۳- نقشه شاخص پوشش گیاهی شهر زنجان طی سال های ۱۳۸۱



شکل ۱۶- نقشه شاخص پوشش گیاهی شهر زنجان طی سال های ۱۳۹۲



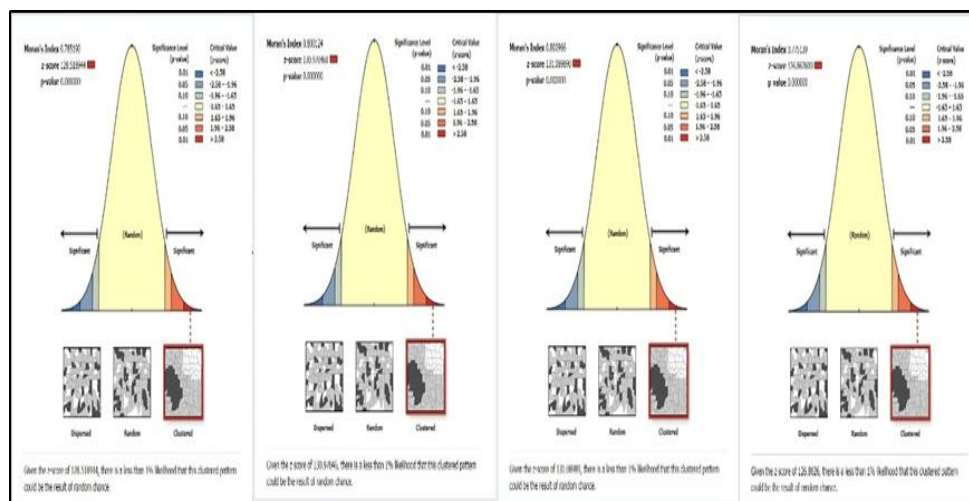
شکل ۱۵- نقشه شاخص پوشش گیاهی شهر زنجان طی سال های ۱۴۰۲

تحلیل الگوهای فضایی زیرساخت های سبز

شاخص موران یک معیار آماری است که برای اندازه گیری الگوهای مکانی در داده های مکانی استفاده می شود. در جدول (۴-۶) مقادیر شاخص موران برای سال های مختلف ارائه شده است. به عنوان مثال، در سال ۱۳۷۲، مقدار ایندکس موران $0/78519$ بوده است. این مقدار معمولاً بین -1 و $+1$ است؛ ارزش مثبت نشان دهنده وجود الگوی مکانی مثبت و ارزش منفی نشان دهنده وجود الگوی مکانی منفی است. میانگین موران مورد انتظار (Expected Inde) در همه سال ها به صورت منفی و بسیار کوچک است و نشان دهنده این است که در صورت تصادفی بودن الگوی مکانی، انتظار وجود دارد که مقدار شاخص موران مثبت یا منفی باشد. واریانس در همه سال ها بسیار کوچک است و نشان دهنده این است که میزان انحراف از میانگین موران مورد انتظار در نقاط مختلف بسیار کم است. امتیاز z (z-score) نیز در همه سال ها بسیار بالاست، که نشان می دهد که مقادیر شاخص موران بسیار فراتر از انتظارات تصادفی هستند. ارزش p برای همه سال ها صفر است که نشان می دهد که مقادیر شاخص موران به طور معناداری از صفر متمایز هستند و الگوهای مکانی معناداری در داده های مورد بررسی وجود دارند (شکل ۱۷).

جدول ۳- نتایج شاخص موران تغییرات پوشش گیاهی شهر زنجان طی سال های ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲

شاخص پوشش گیاهی				شاخص
۱۴۰۲	۱۳۹۲	۱۳۸۱	۱۳۷۲	
$0/775139$	$0/800966$	$0/800124$	$0/78519$	Index Moran's
$-0/00011$	$-0/00011$	$-0/00011$	$-0/00011$	Index Expected
$0/000037$	$0/000037$	$0/000037$	$0/000037$	Variance
$126/8626$	$131/08989$	$130/97046$	$128/518944$	z-score
.	.	.	.	p-value



شکل ۱۷- نمودار شاخص خودهمبستگی موران برای شاخص پوشش گیاهی شهر زنجان

تحلیل همبستگی بین رشد شهر و زیرساخت‌های سبز

همبستگی پیرسون یکی از روش‌های رایج برای بررسی ارتباط بین دو متغیر است که به ما کمک می‌کند تا میزان و شدت ارتباط بین رشد شهر و زیرساخت‌های سبز را درک کنیم. در این روش، در مرحله اول، ارزش‌های به‌دست آمده از فایل‌های رستری مربوط به رشد شهر و شاخص پوشش گیاهی به یک فایل برداری شش ضلعی انتقال داده شدند. سپس، با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل همبستگی به‌منظور بررسی ارتباط بین این دو متغیر صورت گرفت.

این روش تحلیلی به محققان کمک می‌کند تا به‌صورت کمی درجه همبستگی بین گسترش شهری و زیرساخت‌های سبز را ارزیابی کنند و به نتایجی قابل تفسیر درباره دینامیک‌های شهرنشینی و پایداری محیط‌زیست دست یابند. با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، محققان می‌توانند وابستگی‌ها و تعاملات ممکن بین توسعه شهری و وجود فضاهای سبز را کشف کنند.

جدول (۷-۴) ماتریس همبستگی نشان می‌دهد که چگونه میزان ساخته‌شده^۱ با تغییرات در شاخص پوشش گیاهی^۲ در چهار سال مختلف (۱۳۷۲، ۱۳۸۱، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۲) همبستگی دارد. مقادیر همبستگی در این جدول نشان‌دهنده میزان ارتباط بین دو متغیر است، که از -۱ تا +۱ می‌تواند متغیر باشد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده همبستگی مستقیم و مقادیر منفی نشان‌دهنده همبستگی معکوس است.

با توجه به این جدول، مشاهده می‌شود که در تمام سال‌ها، وجود همبستگی منفی معنی‌داری بین میزان ساخته‌شده و تغییرات شاخص پوشش گیاهی وجود دارد. این نشان می‌دهد که با افزایش میزان ساخته‌شده، تغییرات در پوشش گیاهی کاهش می‌یابد. مثلاً، در سال ۱۴۰۲، همبستگی (-۰/۳۵۲) بیشترین مقدار را دارد. این نشان می‌دهد که تغییرات در میزان ساخته‌شده در این سال بیشترین تأثیر را بر تغییرات پوشش گیاهی داشته است. در کل، این جدول نشان می‌دهد که میزان ساخته‌شده می‌تواند به‌طور مستقیم بر تغییرات پوشش گیاهی منطقه اثر داشته‌باشد.

¹ Built up

² NDVI



جدول ۴- همبستگی بین میزان اراضی ساخته شده و شاخص پوشش گیاهی شهر زنجان

شاخص پوشش گیاهی				
۱۴۰۲	۱۳۹۲	۱۳۸۱	۱۳۷۲	-
-۰/۱۷۳	-۰/۱۳	-۰/۱۳۳	-۰/۱۵۳	۱۳۷۲
-۰/۱۹۸	-۰/۱۶۱	-۰/۱۸۱	-۰/۱۷	۱۳۸۱
-۰/۲۹۴	-۰/۲۶۳	-۰/۲۳۱	-۰/۱۸۹	۱۳۹۲
-۰/۳۵۲	-۰/۲۹	-۰/۲۳۴	-۰/۱۹۶	۱۴۰۲
a Listwise N=9108				

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تغییرات فضایی زیرساخت های سبز در شهر زنجان طی دوره زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲ پرداخته است. نتایج تحلیل های انجام شده بر پایه دو سؤال اصلی پژوهش، به طور جامع مورد بررسی قرار گرفته اند. با استفاده از روش خودهمبستگی مکانی موران، الگوهای فضایی زیرساخت های سبز در شهر زنجان تحلیل شدند. نتایج نشان داد که این زیرساخت ها در طی دوره مورد مطالعه دارای خودهمبستگی فضایی مثبت و قوی بوده اند، به این معنی که پوشش گیاهی به صورت خوشه ای در نقاط خاصی از شهر متمرکز شده است. این امر نشان دهنده توزیع غیر تصادفی و برنامه ریزی شده پوشش گیاهی در شهر است که به حفظ و تقویت زیرساخت های سبز کمک می کند. با این حال، کاهش مختصر در خودهمبستگی فضایی در سال های اخیر می تواند نشانه ای از تأثیرات محیطی و تغییرات در سیاست های شهری باشد که نیازمند توجه بیشتری است. این نتایج با یافته های لین و همکاران (۲۰۲۴)، مطابقت دارد که نشان دادند الگوی فضایی زمین های زراعی و فضای سبز به شدت تحت تأثیر شرایط جغرافیایی منطقه ای قرار می گیرد و شاخص های در دسترس بودن فضای سبز در شهرهای مختلف چین به طور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین، ونگ و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان دادند که در منطقه دلتای رودخانه یانگ تسه، فضای سبز شهری در دهه اول به طور قابل توجهی کاهش یافته و سپس از سال ۲۰۱۲ کمی افزایش یافته است که مشابه روند مشاهده شده در شهر زنجان می باشد.

برای تحلیل تأثیر رشد و توسعه شهری بر زیرساخت های سبز، همبستگی پیرسون بین تغییرات در ساخت و ساز و زیرساخت های سبز محاسبه شد. نتایج نشان داد که افزایش مناطق ساخته شده همزمان با کاهش پوشش گیاهی در مناطق شهری بوده است. این همبستگی منفی نشان می دهد که با افزایش ساخت و ساز، مناطق سبز کاهش یافته اند. تحلیل نقشه کاربری اراضی در دوره های مختلف نشان داد که مساحت مناطق ساخته شده به طور چشمگیری افزایش یافته است. اگرچه پهنه های سبز نیز افزایش یافته اند، اما این افزایش نسبت به ساخت و ساز کمتر بوده و نشان دهنده تأثیرات منفی رشد شهری بر زیرساخت های سبز است. این نتایج نشان می دهد که رشد شهری به طور مستقیم به کاهش زیرساخت های سبز منجر شده است. ویلانوا و همکاران (۲۰۲۴) نیز در پژوهش خود در مادرید به نتیجه مشابهی دست یافتند، به طوری که نشان دادند که پیشرفت قابل توجهی در برنامه ریزی کمربند سبز در شهر مادرید حاصل شده است، اما این نوآوری در درجه اول در مقیاس بزرگ متمرکز شده و منجر به حداقل تأثیر بر هسته شهر شده است.

برنامه های توسعه شهری جدید و تحولات محیطی، اگرچه به افزایش پهنه های سبز منجر شده اند، اما نتوانسته اند از کاهش کلی زیرساخت های سبز جلوگیری کنند. این امر نیازمند برنامه ریزی جامع تر و پایدارتر شهری است که همزمان با توسعه شهری، به حفظ و گسترش زیرساخت های سبز نیز توجه داشته باشد. برای رسیدن به این هدف، توصیه می شود که سیاست های شهری به



گونه‌ای تنظیم شوند که ضمن ارتقا زیرساخت‌های سبز، از تخریب آن‌ها جلوگیری کرده و تعامل مثبتی بین توسعه شهری و حفظ محیط‌زیست ایجاد شود. وویجیچیچ و همکاران (۲۰۲۴) نیز بر اهمیت بهبود هماهنگی و همکاری میان سهام‌داران، افزایش مشارکت عمومی و افزایش شفافیت در فرآیند نظارتی برای توسعه زیرساخت‌های سبز تأکید کرده‌اند.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه شهر زنجان در طی دوره مورد مطالعه شاهد افزایش مناطق سبز بوده است، اما رشد سریع ساخت و سازهای شهری تأثیرات منفی قابل توجهی بر زیرساخت‌های سبز داشته است. برای مقابله با این چالش‌ها، تدوین سیاست‌ها و برنامه‌های توسعه شهری پایدار که تعامل متعادل بین توسعه و حفظ محیط‌زیست ایجاد کنند، ضروری است. برنامه‌ریزی‌های آینده باید به گونه‌ای باشد که توسعه شهر همراه با حفظ و ارتقا زیرساخت‌های سبز صورت گیرد، تا نه تنها کیفیت زندگی شهروندان بهبود یابد، بلکه پایداری محیط‌زیست نیز تضمین شود.

در نهایت برپایه مطالعه صورت گرفته، پیشنهادها و راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- تدوین و اجرای برنامه جامع توسعه سبز شهری که دربرگیرنده اهداف کوتاه مدت و بلند مدت باشد و تضمین کند که توسعه شهری همراه با حفظ و ارتقا زیرساخت‌های سبز انجام می‌شود؛
- ۲- تدوین و تصویب مقررات و سیاست‌هایی که به حفظ و ارتقا زیرساخت‌های سبز کمک کند، از جمله مشوق‌های مالی و قانونی برای حفظ فضاهای سبز و جلوگیری از تخریب آنها؛
- ۳- تخصیص بودجه کافی و منابع مالی برای توسعه، نگهداری و ارتقا زیرساخت‌های سبز و جذب و آموزش نیروهای متخصص در حوزه‌های مرتبط با محیط‌زیست و توسعه شهری سبز به منظور اجرای بهتر پروژه‌ها و برنامه‌ها؛
- ۴- ایجاد سازوکاری برای بهبود هماهنگی و همکاری میان نهادهای دولتی، شهرداری، سازمان‌های غیردولتی و جامعه محلی به منظور تضمین همگرایی اهداف و فعالیت‌ها در حوزه توسعه زیرساخت‌های سبز

منابع

- آهنگری، نوید، زنگانه، احمد و سلیمانی مهرنجان، محمد. (۱۴۰۳). تبیین پیامدهای فضایی تراکم کارکردهای فراشهری بر کیفیت محیط محله‌ای (مورد پژوهش: منطقه ۱۲ شهر تهران). *جغرافیا و توسعه*، ۲۲(۷۷)، ۱۳۵-۱۶۴. doi: 10.22111/gdij.2024.8684
- پورمحمدی، محمدرضا و سعادت جو، مهری. (۱۴۰۳). ارزیابی ابعاد رویکرد توسعه پایدار شهری در بهبود فضاهای سبز شهری (نمونه موردی: منطقه ۱۰ کلانشهر تبریز). *فضای شهری و حیات اجتماعی*، ۳(۸)، ۴۴-۱۹. doi: 10.22034/jprd.2024.59688.1072
- زنگانه، احمد، تلخابی، حمیدرضا، عباس زاده، مهدی و مه آبادی پور، محمد مهدی. (۱۴۰۳). شهر چابک: مفهوم، اصول، ویژگی‌ها و چالش‌های پیاده‌سازی. *پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری*، ۱۲(۴)، ۱۱۹-۱۳۳. doi: 10.22059/jurbangeo.2025.382952.1996
- زنگانه، احمد، عباس زاده، مهدی، تلخابی، حمیدرضا و مه آبادی پور، محمد مهدی. (۱۴۰۳). تحلیل و رتبه بندی زیست پذیری نواحی شهر در راستای توسعه پایدار نمونه مور مطالعه: نواحی ۳ گانه شهر ورامین. (e209146). *برنامه ریزی و طراحی شهری*، ۱۴۰۳(۲)، ۱۴۶-۲۰۹. doi: 10.22034/jprd.2024.59688.1072
- زنگانه، احمد، و معماری، ابراهیم. (۱۴۰۰). واکاوی و پایش سیاست‌های اجتماعی-فضایی در پهنه جغرافیایی شهر (موردپژوهی: شهر گرگان). *پژوهش‌های جغرافیای انسانی (پژوهش‌های جغرافیایی)*، ۵۳(۲)، ۴۷۵-۴۹۷.
- عسگری، علی (۱۳۹۰). *تحلیل‌های آمار فضایی با ARC GIS*، انتشارات شرکت پردازش و برنامه‌ریزی شهری، چاپ اول، ۱۲۷ ص.
- علیجانی، بهلول (۱۳۹۴). تحلیل فضایی در مطالعات جغرافیایی، *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۲(۳)، ۱-۱۴.
- قادریان، مسعود، گلکار، کورش و حکیمیان، پانته آ. (۱۴۰۱). مفهوم بایب زیرساخت سبز در شهرهای حاشیه کویر. *علوم محیطی*، ۲۰(۴)، ۱۰۱-۱۲۴. doi: 10.48308/envs.2022.1150
- کرمی تاج الدین، شمعی علی، محبی فاطمه. تحلیل نقش تغییرات زیرساخت سبز شهری در تاب‌آوری اکولوژیک منطقه یک شهرداری تهران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۰(۴)، ۵۹-۷۸.



- گیلانی، سیده مریم، خطیبی، سید محمدرضا، داوودپور، زهره و خستو، مریم. (۱۴۰۱). بررسی اقدامات مدیریتی شهری در برنامه‌ریزی‌های بازآفرینی زیرساخت سبز (مطالعه موردی: لاهیجان). *مهندسی جغرافیایی سرزمین*، ۶(۱)، ۱-۱۶.
- مه آبادی پور، محمد مهدی، زنگانه، احمد و تلخابی، حمیدرضا. (۱۴۰۳). ظرفیت سنجی و رتبه‌بندی نواحی شهر ورامین با رویکرد توسعه میان افزا. توسعه پایدار محیط جغرافیایی، ۶(۱۱)، ۲۰-۱. doi: 10.48308/sdge.2025.237840.1224
- Ahern, J. (2007). Green infrastructure for cities: The spatial dimension. In V. Novotny & P. Brown (Eds.), *Cities of the future: Towards integrated sustainable water and landscape management* (pp. 267–283). IWA Publishing.
- Ahmadi, N., Zanganeh, A., & Soleimani Mehranjani, M. (2024). Explaining the spatial consequences of the density of metropolitan functions on neighborhood environmental quality (Case study: District 12 of Tehran). *Geography and Development*, 22(77), 135–164. <https://doi.org/10.22111/gdij.2024.8684> (In Persian)
- Alijani, B. (2015). Spatial analysis in geographical studies, spatial analysis of environmental hazards. *Environmental Hazards Spatial Analysis*, 2(3), 14–21. (In Persian)
- Asgari, A. (2011). *Spatial statistical analysis with ARC GIS* (1st ed.). Urban Planning and Processing Company. (In Persian)
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2002). Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 20(3), 12–17.
- Cherchuk, L., & Khumarova, N. I. (2023). Green infrastructure management of urban ecosystems. *Economic Innovations*.
- European Commission. (2013). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital*. https://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/pdf/Green_Infrastructure/COM_2013_249_EN.pdf
- Fan, X., Zhang, L., Yuan, L., Guo, B., Zhang, Q., & Huang, H. (2022). Urbanization and water quality dynamics and their spatial correlation in coastal margins of mainland China. *Ecological Indicators*, 138, 108812. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108812>
- Ferreira, J. F., Monteiro, R., & Silva, V. (2021). Planning a green infrastructure network from theory to practice: The case study of Setúbal, Portugal. *Sustainability*, 13(15), 8351. <https://doi.org/10.3390/su13158351>
- Florian, S., & Januar, H. (2016). *Urban development and urbanization in the Greater Mekong Subregion*. Asian Development Bank.
- Ghaderian, M., Golkar, K., & Hakimian, P. (2022). Conceptualization of green infrastructure in desert fringe cities. *Environmental Sciences Quarterly*, 20(4), 101–124. <https://doi.org/10.48308/envs.2022.1150> (In Persian)
- Gilani, S. M., Khatibi, S. M. R., Davoudpour, Z., & Khasto, M. (2022). Examining urban management measures in green infrastructure regeneration planning (Case study: Lahijan). *Geographical Land Engineering*, 6(1), 1–16. (In Persian)
- Herath, P., & Bai, X. (2024). Benefits and co-benefits of urban green infrastructure for sustainable cities: Six current and emerging themes. *Sustainability Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01609-2>
- Jiao, L., Liu, J., Xu, G., Dong, T., Gu, Y., Zhang, B., Liu, Y., & Liu, X. (2018). Proximity expansion index: An improved approach to characterize evolution process of urban expansion. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.003>



- Kamjou, E., Scott, M., & Lennon, M. (2024). A bottom-up perspective on green infrastructure in informal settlements: Understanding nature's benefits through lived experiences. *Urban Forestry & Urban Greening*, 94, 128231. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128231>
- Karami Tajoddin, Sh., Shama, A., & Mohibi, F. (2023). Analyzing the role of urban green infrastructure changes in ecological resilience of District 1 of Tehran Municipality. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 10(4), 59–78. (In Persian)
- Kim, G., & Miller, P. A. (2019). The impact of green infrastructure on human health and well-being: The example of the Huckleberry Trail and the Heritage Community Park and Natural Area in Blacksburg, Virginia. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101562. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101562>
- Kim, J., Ewing, R., & Rigolon, A. (2024). Does green infrastructure affect housing prices via extreme heat and air pollution mitigation? A focus on green and climate gentrification in Los Angeles County, 2000–2021. *Sustainable Cities and Society*, 102, 105225. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105225>
- Korah, A., Koch, J. A., & Wimberly, M. C. (2024). Understanding urban growth modeling in Africa: Dynamics, drivers, and challenges. *Cities*, 146, 104734. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104734>
- Kumar, V., & Vuillomenet, A. (2021). Urban nature: Does green infrastructure relate to the cultural and creative vitality of European cities? *Sustainability*, 13(14), 8052. <https://doi.org/10.3390/su13148052>
- Lai, S., & Zoppi, C. (2024). Sustainable spatial planning based on ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions. *Sustainability*, 16(6), 2591. <https://doi.org/10.3390/su16062591>
- Lin, T., Cai, J., Geng, H., Zheng, Y., Zeng, Z., & Zheng, Y. (2024). Incorporating suburban cropland into urban green infrastructure: A perspective of nature-based solutions in China. *Nature-Based Solutions*, 5, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100122>
- Mahabadi Pour, M. M., Zanganeh, A., & Talkhabi, H. R. (2025). Capacity assessment and ranking of Varamin city districts with an infill development approach. *Journal of Sustainable Development of Geographical Environment*, 6(11), 1–20. <https://doi.org/10.48308/sdge.2025.237840.1224> (In Persian)
- Mell, I. C. (2017). Green infrastructure: Reflections on past, present and future praxis. *Landscape Research*, 42(2), 135–145. <https://doi.org/10.1080/01426397.2016.1237632>
- Peterson, G. (2000). Political ecology and ecological resilience: An integration of human and ecological dynamics. *Ecological Economics*, 35(3), 323–336. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00227-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00227-9)
- Pourmohammadi, M. R., & Saadatjou, M. (2024). Evaluating the dimensions of the sustainable urban development approach in improving urban green spaces (Case study: District 10 of Tabriz metropolis). *Urban Space and Social Life*, 3(8), 19–44. <https://doi.org/10.22034/jprd.2024.59688.1072> (In Persian)
- Ramyar, R., Ackerman, A., & Johnston, D. M. (2021). Adapting cities for climate change through urban green infrastructure planning. *Cities*, 117, 103316. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103316>
- Russo, A., Cirella, G. T., & Zerbe, S. (2017). Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 242, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.026>
- Sathianarayanan, M., Kirdemir, U., & Gianoli, A. (2025). Urban intelligence: Navigating climate challenges with AI. In *Nexus of AI, climatology, and urbanism for smart cities* (pp. 59–90). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3302-4.ch004>
- Shao, H., & Kim, G. (2022). A comprehensive review of different types of green infrastructure to mitigate urban heat islands: Progress, functions, and benefits. *Land*, 11(10), 1792. <https://doi.org/10.3390/land11101792>
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2018). Resilience-oriented urban planning. In A. Sharifi & Y. Yamagata (Eds.), *Resilience-oriented urban planning* (pp. 3–27). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99819-7_1



- Shi, Y., Sun, X., Zhu, X., Li, Y., & Mei, L. (2012). Characterizing growth types and analyzing growth density distribution in response to urban growth patterns in peri-urban areas of Lianyungang City. *Landscape and Urban Planning*, 105(4), 425–433. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.010>
- Syrbe, R. U., Meier, S., Moyzes, M., Dworczyk, C., & Grunewald, K. (2024). Assessment and monitoring of local climate regulation in cities by green infrastructure—A national ecosystem service indicator for Germany. *Land*, 13(5), 689. <https://doi.org/10.3390/land13050689>
- Turenscape. (2006). Homepage. <http://www.turenscape.com/english/index.asp>
- William, R., Garg, J., & Stillwell, A. S. (2017). A game theory analysis of green infrastructure stormwater management policies. *Water Resources Research*, 53(9), 8003–8019. <https://doi.org/10.1002/2017WR020942>
- Wu, R., Li, Z., & Wang, S. (2021). The varying driving forces of urban land expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis. *Science of the Total Environment*, 766, 142591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142591>
- Zanganeh, A., & Moammeri, E. (2021). Exploration and monitoring of socio-spatial policies in the geographical context of the city (Case study: Gorgan). *Human Geography Research (Geographical Research)*, 53(2), 475–497. (In Persian)
- Zanganeh, A., Abbaspour, M., Talkhabi, H. R., & Mahabadi Pour, M. M. (2024). Analysis and ranking of urban areas' livability in the path of sustainable development: Case study of Varamin's three districts. *Journal of Urban Planning and Design*, 2024(2), Article e209146. <https://doi.org/10.22067/jupd.2024.e209146> (In Persian)
- Zanganeh, A., Talkhabi, H. R., Abbaspour, M., & Mahabadi Pour, M. M. (2025). Agile city: Concept, principles, features, and implementation challenges. *Journal of Urban Planning Geography Research*, 12(4), 119–133. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.382952.1996> (In Persian)
- Zhang, S., & Muñoz Ramírez, F. (2019). Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: The case of Barcelona, Spain. *Cities*, 92, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.03.013>