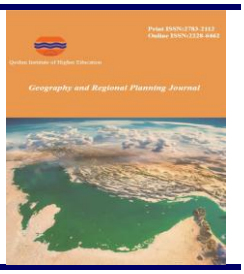
Iranian Association of Geopolitical

Geography and Regional Planning

ISSN (Print): 2783-2112 - ISSN (Online): 2228-6462

Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/



Spatial Analysis of Ecological Sustainability Indicators Based on the Core–Periphery Model, with an Emphasis on Carbon Emission Reduction

Saeed Ghasemizadeh[1], Ahmad Khademolhosseiny✉[2], Amir Gandomkar[3], Hamid Saberi[4]

1. Department of Geography, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: sz.ghasemizadeh@shu.iaun.ac.ir
2. Department of Geography, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: Khademolhoseiny@iau.ac.ir
3. Department of Geography, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: aagandomkar@iau.ac.ir
4. Department of Geography, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email:hamid.saberi@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:
Received: August 19, 2026
Revised: September 21, 2026
Accepted: November 14, 2026
Published online: November 14, 2026

Keywords:
Spatial–Ecological Justice
Core–Periphery Analysis
Knowledge–Consumption Paradox
Infrastructural Reconfiguration
Structural Resilience

Abstract

The exacerbation of ecological inequalities resulting from the disproportionate concentration of infrastructure, public amenities, and environmental burdens has confronted the spatial development of Isfahan Metropolis with pronounced physical disruptions and escalating pressures across its fifteen municipal districts. Grounded in the core–periphery paradigm, this study evaluated the spatial patterns of ecological sustainability indicators and analyzed carbon emission dynamics to foster spatial justice and low-carbon urban development. A mixed-methods research design was employed, integrating objective spatial layers—including urban form, transportation networks, green spaces, and density metrics within a Geographic Information System (GIS)—with perceptual data gathered via a structured survey administered to 384 citizens (demonstrating Cronbach's alpha , confirmed construct validity, and robust factor structure). Empirical findings revealed that the urban ecological structure strictly conforms to a core–periphery logic: District 3 emerged as the most sustainable urban core due to superior spatial contiguity, optimal accessibility, enhanced connectivity to green transit, and service concentration. Conversely, Districts 14 and 15 were identified as critical ecological hotspots, characterized by severe green infrastructure deficits, physical fragmentation, and proximity to major industrial hubs. Furthermore, a "knowledge–consumption paradox" was observed in southern zones, alongside a macro-level "strategic spatial mismatch" in resource distribution. Layer overlay synthesis demonstrated that ecological hotspots coincide with the convergence of industrial pressures, carbon-intensive behaviors, and infrastructural deprivation. Consequently, achieving urban sustainability in Isfahan necessitates transitioning from sectoral planning to integrated environmental governance, equitable redistribution of green transit infrastructures, and structural reconfiguration of vulnerable peripheral zones.

How to cite: Ghasemizadeh, S., Khademolhosseiny, A., Gandomkar, A. & Saberi, H. (2026). Spatial Analysis of Ecological Sustainability Indicators Based on the Core–Periphery Model, with an Emphasis on Carbon Emission Reduction. Geography and Regional Planning, 16(4), 304-323. https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.598060.4526

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
DOI: https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.598060.4526

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

In recent decades, rapid urbanization and the horizontal and vertical expansion of built environments have intensified environmental pressures in cities. Among the most significant challenges is the increase in greenhouse-gas emissions, particularly carbon dioxide, which contributes to climate change, declining air quality, and urban heat-island effects. International commitments, including the Paris Agreement, emphasize reducing carbon emissions and strengthening carbon sequestration through environmental policies and urban green infrastructure. Research indicates that compact urban forms, coherent spatial structures, accessible public transportation, cycling networks, and equitably distributed green spaces can improve environmental performance and reduce per-capita emissions. In Iran, studies have examined urban form, land use, and air pollution, but integrated spatial assessments of ecological inequalities remain limited. Isfahan, an industrial, cultural, and historical center, faces environmental pressures associated with unbalanced spatial development, declining green space per capita, and energy consumption. Accordingly, this study analyzes ecological sustainability indicators across Isfahan's fifteen municipal districts through the core–periphery model, emphasizing spatial inequalities and carbon-emission reduction for sustainable urban development.

Methodology

This applied-developmental study employed a descriptive-analytical, mixed-methods design across Isfahan's fifteen municipal districts. Data were collected through documentary sources, geographic information system layers, and a questionnaire administered to 384 residents. Twenty experts assessed content validity; reliability and construct validity were examined using Cronbach's alpha and confirmatory factor analysis. Descriptive, inferential, and GIS-based spatial analyses were conducted to map perceived and objectively measured conditions.

Results and Discussion

The findings reveal a pronounced center–periphery pattern in ecological sustainability across Isfahan's fifteen municipal districts. District 3 performs most favorably, benefiting from coherent urban form, integrated infrastructure, and better environmental management. Its scores for energy consumption and carbon-emission control are high, indicating the advantages of spatial continuity and coordinated land use. By contrast, peripheral Districts 14 and 15, and partly District 12, experience ecological disadvantages, including limited green space, fragmented urban structure, inadequate infrastructure, and pollution-intensive transport patterns. The average scores for ecological sustainability and infrastructure development indicate that urban resilience remains constrained. A significant spatial relationship is observed between energy consumption and carbon emissions: although energy-use conditions show relative improvement, emissions remain problematic, because of transportation and industrial activities. The combined analysis of data and residents' perceptions identifies ecological hotspots where industrial pressure, high-carbon behavior, and infrastructure deprivation overlap. These results suggest that Isfahan's development model concentrates services and environmental advantages unevenly in central areas while leaving peripheral districts increasingly vulnerable. Therefore, reducing ecological inequality requires integrated governance, equitable distribution of green infrastructure and public transport, and targeted low-carbon interventions in disadvantaged districts.

Conclusion

This study examined the spatial distribution of ecological sustainability indicators in Isfahan's metropolitan area through the core–periphery model, focusing on carbon-emission reduction and sustainable urban development. The findings demonstrate that ecological sustainability is not distributed evenly across the city; rather, it follows a polarized spatial pattern in which central districts enjoy better environmental conditions and infrastructure, while several peripheral districts face ecological vulnerability. District 3 represents the most favorable area, reflecting the benefits of spatial continuity, accessibility, and green infrastructure. Conversely, Districts 14 and 15, together with District 12, show

weaknesses associated with insufficient green spaces, fragmented urban form, industrial proximity, and limited access to sustainable transportation. These spatial disparities indicate that urban development policies have not adequately addressed the environmental needs of peripheral communities. The coexistence of high environmental pressure, carbon-intensive mobility, and infrastructural deprivation in vulnerable districts highlights the need to reconsider the spatial distribution of urban resources. Differences between residents' perceptions and objective spatial indicators suggest that effective planning should combine environmental data with citizens' experiences and participation. Accordingly, sustainable development in Isfahan requires an integrated and spatially differentiated approach. Priority should be given to expanding accessible green spaces, improving public transportation and cycling networks, strengthening vegetation and green infrastructure, and establishing low-carbon interventions in areas exposed to high traffic and industrial emissions. Local authorities should also promote environmental awareness, public participation, and environmental governance. Equitable investment in disadvantaged districts can reduce ecological inequalities while improving urban resilience and environmental quality. Applying the core–periphery model provides a useful framework for identifying spatial disparities and directing targeted interventions. Achieving a sustainable and low-carbon Isfahan depends on aligning urban planning decisions with ecological capacities and ensuring that environmental benefits and burdens are distributed more fairly across the city.

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Third author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Fourth author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای

شاپا چاپی: ۶۴۶۲- ۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲ -۲۷۸۳

Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/

انجمن ژئوپلیتیک ایران

تحلیل الگوی فضایی شاخص‌های پایداری اکولوژیکی بر اساس مدل مرکز-پیرامون با تاکید کاهش میزان انتشار کربن در راستای توسعه پایدار شهری (مطالعه موردی: کلان شهر اصفهان)

سعید قاسمی زاده[۱]، احمد خادم الحسینی✉[۲]، امیر گندمکار[۳]، حمید صابری[٤]

۱. گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. رایانامه:sz.ghasemizadeh@shu.iaun.ac.ir

۲. نویسنده مسئول. گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. رایانامه:Khademolhoseiny@iau.ac.ir

۳. گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. رایانامه:aagandomkar@iau.ac.ir

٤. گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. رایانامه:hamid.saberi@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۳

کلیدواژه ها:

عدالت فضایی–اکولوژیک

پارادوکس آگاهی و مصرف

بازآرایی زیرساختی تحلیل مرکز–پیرامون تاب‌آوری ساختاری

چکیده

تشدید نابرابری‌های اکولوژیک ناشی از تمرکز نامتوازن زیرساخت‌ها، خدمات و بارهای محیط‌زیستی در کلان‌شهر اصفهان، توسعه فضایی این کلان‌شهر را با گسست‌های کالبدی و فشارهای فزاینده در سطح مناطق پانزده‌گانه روبه‌رو کرده است. این پژوهش با هدف ارزیابی فضایی شاخص‌های پایداری اکولوژیکی و تحلیل الگوی انتشار کربن با تکیه بر رویکرد مرکز–پیرامون در راستای دستیابی به عدالت فضایی و توسعه کم‌کربن انجام پذیرفت. روش‌شناسی پژوهش از نوع آمیخته بود که داده‌های عینیِ لایه‌های فضاییِ فرم شهری، حمل‌ونقل، فضای سبز و تراکم‌ها را در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی با داده‌های ادراکی حاصل از پرسشنامه ۳۸۴ نفر از شهروندان (با آلفای کرونباخ بالاتر از ۸۰/۰ و تأیید روایی و ساختار عاملی) تلفیق کرد. ترکیب لایه‌ها با مدل هم‌پوشانی وزنی و اعتبارسنجی آن با آمار فضایی صورت گرفت. یافته‌ها آشکار ساخت ساختار اکولوژیک شهر کاملاً تابع منطق مرکز–پیرامون است؛ به‌گونه‌ای که منطقه ۳ به‌دلیل پیوستگی فضایی، دسترسی بهینه، اتصال به حمل‌ونقل سبز و تمرکز خدمات، پایدارترین هسته شهری شناخته شد و در مقابل، مناطق ۱۴ و ۱۵ به‌سبب فقر زیرساخت سبز، گسست کالبدی و همجواری با کانون‌های صنعتی، بحرانی‌ترین نقاط داغ اکولوژیک ارزیابی شدند. همچنین در پهنه‌های جنوبی نوعی «پارادوکس آگاهی و مصرف» و در سطح کلان یک «گسست استراتژیک» در توزیع منابع مشاهده گردید. هم‌پوشانی لایه‌ها نشان داد نقاط داغ اکولوژیک منطبق بر تلاقی فشارهای صنعتی، رفتارهای پرکربن و فقر زیرساختی شکل گرفته‌اند؛ ازاین‌رو، تحقق پایداری شهری در اصفهان نیازمند گذار از برنامه‌ریزی قطاعی به‌سوی مدیریت یکپارچه، بازتوزیع عادلانه زیرساخت‌های سبز و حمل‌ونقل و بازآرایی ساختاری پهنه‌های بحرانی پیرامونی است.

استناد: قاسمی زاده، سعید، خادم الحسینی، احمد، گندمکار، امیر و صابری، حمید. (۱۴۰۵). تحلیل الگوی فضایی شاخص‌های پایداری اکولوژیکی بر اساس مدل مرکز–پیرامون با تاکید کاهش میزان انتشار کربن در راستای توسعه پایدار شهری (مطالعه موردی: کلان شهر اصفهان). جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای، ۱۶(۴)، ۳۰۴-۳۲۳ DOI: 10.22034/jgeoq.2026.598060.4526

© نویسندگان.

ناشر: موسسه آموزش عالی قشم

مقدمه

در دهه‌های اخیر، شتاب فزاینده شهرنشینی و گسترش افقی و عمودی ساختارهای کالبدی در فضاهای شهری، به بروز و تشدید مجموعه‌ای از مسائل پیچیده و چندلایه زیست‌محیطی انجامیده است. در میان این مسائل، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن (CO_2)، از بنیادی‌ترین چالش‌هایی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در برهم‌زدن تعادل اقلیم جهانی و افزایش میانگین دمای سطح زمین ایفا می‌کند. به بیان مخدوم (۱۳۸۷)، یکی از معضلات اقلیمی بلندمدت که ریشه در مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی، از جمله زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی دارد، تولید فزاینده دی‌اکسید کربن و فرآورده‌های ثانویه ناشی از آن است. افزایش غلظت این گازها در اتمسفر طی دهه‌های اخیر، اثر گلخانه‌ای را تشدید کرده و این وضعیت می‌تواند در آینده‌ای نه‌چندان دور، پیامدهایی چون تغییر در کمربندهای سبز، جابه‌جایی الگوهای بارش و دگرگونی جغرافیایی نواحی ساحلی را در پی داشته باشد. این تحولات، به‌روشنی نشان‌دهنده پیوند مستقیم و انکارناپذیر میان فعالیت‌های انسانی، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی است (مخدوم، ۱۳۸۷). در واکنش به این بحران جهانی، توافقنامه پاریس (۲۰۱۵) دولت‌ها را متعهد ساخته است که با تدوین و اجرای سیاست‌های کارآمد، زمینه کنترل و کاهش انتشار کربن و نیز ارتقای ظرفیت جذب آن را از طریق تقویت عناصر طبیعی، به‌ویژه توسعه زیرساخت‌های سبز شهری، فراهم آورند (United Nations, 2015). با وجود اهمیت اساسی این چارچوب‌های بین‌المللی، تحقق اهداف کاهش کربن در مقیاس محلی، بدون شناخت عمیق از ساختار اکولوژیکی شهرها و درک پویایی فضایی انتشار آلاینده‌ها امکان‌پذیر نیست. به بیان دیگر، اثربخشی سیاست‌های محیط‌زیستی در شهرها زمانی افزایش می‌یابد که تحلیل فضایی و مدل‌سازی اکولوژیکی به‌صورت تلفیقی به کار گرفته شوند تا نابرابری‌های محیطی، کانون‌های فشار و ظرفیت‌های جذب کربن در پهنه‌های مختلف شهری به‌درستی شناسایی شوند (Xiao & Zhang, 2021). با این حال، در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، چالش‌های ساختاری همچون توسعه غیرهم‌پیوند شهری، کمبود سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های اکولوژیکی و وابستگی شدید به انرژی‌های فسیلی، مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار را با موانع جدی مواجه ساخته است. هرچند پیشینه نهادی حفاظت از محیط زیست در ایران به دهه ۳۰ خورشیدی بازمی‌گردد، اما سیاست‌های محیط‌زیستی در عمل تا دهه‌ها جدا از برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای پیگیری شده‌اند و همین گسست نهادی و اجرایی، به یکی از موانع اصلی دستیابی به پایداری اکولوژیکی در فضاهای شهری تبدیل شده است (سلطانی، ۱۳۸۷).

در این چارچوب، کلان‌شهر اصفهان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های صنعتی، فرهنگی و تاریخی کشور، نمونه‌ای برجسته از شهری است که هم‌زمان با رشد نامتوازن فضایی، با افت کیفیت شاخص‌های محیطی، کاهش سرانه فضای سبز و افزایش شتابان مصرف انرژی روبه‌رو شده و به‌صورت فزاینده در معرض بحران اکولوژیکی قرار گرفته است. بر پایه داده‌های رسمی اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان (۱۴۰۱)، روند تغییرات شاخص‌های آلودگی در این شهر از تشدید فشارهای زیست‌محیطی حکایت دارد. در فاصله زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۱، همه آلاینده‌ها به‌جز NO_2روندی صعودی داشته‌اند؛ به‌گونه‌ای که بیشترین افزایش مربوط به دی‌اکسید گوگرد (SO_2)با ۱۵۰ درصد رشد و پس از آن ذرات معلق $PM_{2.5}$با ۲۵/۸ درصد رشد بوده است. افزون بر این، سهم منابع ثابت، از جمله صنایع پیرامونی و نیروگاه‌ها، به بیش از ۶۲ درصد از کل انتشار کربن در محدوده شهری رسیده است. هم‌زمان، میانگین سالانه روزهای دارای هوای قابل قبول در اصفهان از ۲۳۷ روز در سال ۱۳۹۴ به حدود ۱۸۴ روز در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته است؛ روندی که حاکی از تحلیل ظرفیت تهویه اکولوژیکی شهر و افزایش کیفیت محیطی آن است (اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان، ۱۴۰۱). از سوی دیگر، مسئله صرفاً به آلاینده‌های شیمیایی محدود نمی‌شود؛ زیرا تشدید خشکسالی، خشک‌شدن زاینده‌رود و تالاب گاوخونی، و فعال‌شدن کانون‌های گردوغبار در شرق اصفهان، فشار مضاعفی بر نظام اکولوژیکی این کلان‌شهر وارد کرده است؛ به‌طوری‌که سالانه بالغ بر ۳۱۹۲۹۱ تن ریزگرد وارد اتمسفر این منطقه می‌شود (سالنامه کیفیت هوا اصفهان، ۱۴۰۱). در ادبیات نوین اقلیم‌شناسی شهری، رابطه میان الگوی فرم شهری و پایداری اکولوژیکی، رابطه‌ای ساده و خطی نیست، بلکه ماهیتی فرآیندی، درهم‌تنیده و چندبعدی دارد. تراکم بالای ساختمانی و شکل‌گیری بافت‌های متراکم می‌تواند از یک سو موجب افزایش تقاضای انرژی و مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی شود و از سوی دیگر، از طریق کاهش تبادل هوای افقی میان بلوک‌های شهری، به افزایش تجمع موضعی (CO_2)و تقویت پدیده جزیره حرارتی شهری بینجامد (Oke et

al., 2020). در مقابل، گسترش زیرساخت‌های سبز-آبی قادر است کارکردی دوگانه در کاهش آلاینده‌ها و تعدیل خرداقلیم شهری ایفا کند؛ به‌گونه‌ای که نتایج برخی مطالعات، ظرفیت جبران تا ۹/۸۱ درصد از انتشارات کربنی محلی را برای این زیرساخت‌ها گزارش کرده‌اند (Chen et al., 2024). با این همه، در مناطق نیمه‌خشک، از جمله اصفهان، تداوم خشکسالی‌های پیاپی می‌تواند به بروز وضعیتی منجر شود که از آن با عنوان «گسست اکو-هیدرولوژیک» یاد می‌شود؛ وضعیتی که در آن حتی در صورت وجود پوشش گیاهی، توان ترسیب کربن به دلیل بسته‌شدن روزنه‌های گیاهی برای حفظ رطوبت، به‌شدت کاهش می‌یابد و در نتیجه، شهر با نوعی «جریمه کربنی» مواجه می‌شود (Zhang et al., 2024; Li et al., 2023).

در سطح نظری، دستیابی به پایداری اکولوژیکی شهری نیازمند گذار از نگرش‌های صرفاً کالبدی به پارادایم‌های یکپارچه‌نگر است. ریشه مفهومی واژه پایداری (Sustain) که به معنای نگه‌داشتن و تداوم‌بخشی است، امروزه در شهرسازی بر ایجاد تعاملات پایدار میان مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی با هدف تحقق برابری متقابل تأکید دارد(بحرینی و مکنون، ۱۳۸۰؛ Bousekabadi et al., 2022).در این میان، پایداری اکولوژیکی به عنوان یکی از ارکان سه‌گانه توسعه پایدار، فراتر از حفاظت صرف از طبیعت، نیازمند اتصال نیازهای انسانی به خدمات اکوسیستمی است؛ به‌گونه‌ای که سلامت اکوسیستم‌ها قربانی بهره‌برداری‌های انسانی نشود (Morelli, 2011). این مفهوم که در دهه‌های اخیر با مفاهیم تکمیلی نظیر تاب‌آوری اکولوژیکی و ظرفیت زیستی .(Burger et al., 2012; Berkes et al., 2003) پیوند خورده است، در ادبیات معاصر با رویکردهایی چون «اکولوژی چشم‌انداز»، «سیستم‌های پیچیده شهری» و «شهر کم‌کربن» بازخوانی می‌شود (Griebler et al., 2025; Russo et al., 2023).بر اساس این چارچوب نظری، پایداری در کلان‌شهرها نه‌تنها متأثر از رفتارهای مصرفی و اصلاح سیاست‌های انرژی است، بلکه قویاً از پیکربندی فضایی و نحوه توزیع زیرساخت‌های سبز در بطن ساختار شهر تأثیر می‌پذیرد (Tan et al., 2021; Sachs, 2015).از همین رو، تحلیل نابرابری‌های اکولوژیکی در اصفهان نیازمند نگاهی سیستمی است که در آن، شهر نه به مثابه مجموعه‌ای از فضاهای منفصل، بلکه به عنوان یک سیستم پیچیده و پویا در نظر گرفته شود تا بتواند تعادل میان ظرفیت زیستی و فشارهای کالبدی-توسعه‌ای را در قالب الگوی مرکز–پیرامون تبیین نماید.

بررسی ساختار فضایی و نحوه توزیع منابع اکولوژیکی از محورهای اصلی در توسعه شهری پایدار و کاهش انتشار کربن است. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد شهرهای متراکم و دارای انسجام فضایی، عملکرد اکولوژیکی بهتری داشته و انتشار سرانه کربن کمتری تولید می‌کنند؛ موضوعی که بر اهمیت الگوی توسعه مرکز–پیرامون و انسجام کالبدی تاکید دارد (Sun et al., 2022؛ Castells Quintana et al., 2021). همچنین گسترش و توزیع عادلانه شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی و زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری به طور معناداری کیفیت محیطی را ارتقا داده و انتشار کربن را کاهش می‌دهد (Jing et al., 2022؛ Montoya Torres et al., 2023). در تکمیل این رویکرد، توسعه یکپارچه زیرساخت سبز شهری می‌تواند تا ۲۹.۵ درصد از انتشار آلاینده‌ها بکاهد (Liu et al., 2024) و کمبود فضای سبز در مناطق حاشیه‌ای با کاهش ظرفیت جذب کربن و تشدید نابرابری محیطی همراه است (Guo et al., 2023). در مطالعات داخلی، اگرچه پژوهش‌هایی به ارتباط فرم شهری، کاربری زمین و آلودگی هوا پرداخته‌اند و بر نقش فضاهای سبز در بهبود کیفیت هوا به‌ویژه در اقلیم‌های نیمه‌خشک تاکید کرده‌اند (پوراحمد و همکاران، ۱۳۹۵؛ جبارپور و همکاران، ۱۴۰۲؛ رهنما و همکاران، ۱۴۰۲)، اما این مطالعات عمدتا مقطعی و فاقد مدل‌سازی فضایی یکپارچه بوده‌اند. در مقایسه با رویکردهای داده‌محور و مبتنی بر GIS در سطح بین‌المللی، خلأ تحلیل همزمان ساختار کالبدی، حمل‌ونقل و فضای سبز در سنجش نابرابری‌های اکولوژیکی در پژوهش‌های داخلی مشهود است. با وجود مطالعات متعدد در زمینه پایداری شهری، آنچه در پیکربندی فضایی کلان‌شهر اصفهان کمتر مورد واکاوی دقیق قرار گرفته، بررسی نظام‌مند «نابرابری‌های کالبدی-محیطی» و توزیع فضایی نامتوازن منابع اکولوژیکی میان مناطق مختلف شهری است. الگوی توسعه فضایی اصفهان نشان‌دهنده یک قطب‌بندی شدید میان بافت‌های مرکزی (توسعه‌یافته) و حاشیه‌ای (کمتر توسعه‌یافته) است. شواهد اولیه حاکی از آن است که مناطق مرکزی و جنوبی (به‌ویژه مناطق ۱، ۳ و ۶) به دلیل انسجام کالبدی و برنامه‌ریزی‌های پیشین، از وضعیت مطلوب‌تری در شاخص‌های پایداری برخوردارند، در حالی که مناطق پیرامونی، شمالی و شرقی (به‌ویژه مناطق ۱۴ و ۱۵) با گسست کالبدی، فقر زیرساخت‌های سبز و ناهماهنگی در فرم شهری مواجه بوده و در وضعیت بحران اکولوژیکی قرار دارند. علاوه بر این، تضادهای درونی در برخی مناطق (نظیر مناطق ۵، ۶ و ۸) نشان‌دهنده عدم همگونی کالبدی و طبقاتی در درون یک منطقه واحد است که

تحلیل آن نیازمند رویکردی مقایسه‌ای و فضایی است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل فضایی نابرابری‌های اکولوژیکی در کلان‌شهر اصفهان (مناطق ۱۵گانه) و با تأکید بر الگوی توسعه مرکز–پیرامون تدوین شده است. این مطالعه در پی آن است تا با بهره‌گیری از آمار فضایی و شاخص‌های کالبدی (نظیر فرم شهری، تراکم ساختمانی، شبکه حمل‌ونقل و سرانه فضای سبز)، شکاف عمیق موجود در توزیع منابع اکولوژیکی را به تصویر کشیده و اثبات نماید که توسعه شهر اصفهان از منظر زیست‌محیطی دچار یک قطب‌بندی فضایی مخرب شده است.

بر این اساس، مسئله اصلی تنها افزایش مقدار آلاینده‌ها یا افت برخی شاخص‌های محیطی نیست، بلکه نحوه توزیع فضایی این فشارها و ظرفیت‌ها در درون ساختار شهری نیز اهمیت اساسی دارد؛ زیرا نابرابری در دسترسی به عناصر اکولوژیکی، تفاوت در تراکم ساخت‌وساز، ناهمگونی در استقرار زیرساخت‌ها و تمرکز نامتوازن منابع و مخاطرات محیطی، می‌تواند الگوی روشنی از تمایز مرکز و پیرامون در شهر ایجاد کند. از این منظر، اصفهان نه فقط با بحران زیست‌محیطی، بلکه با نوعی قطبی‌شدگی اکولوژیکی در پهنه‌های درون‌شهری مواجه است؛ وضعیتی که شناسایی و تحلیل آن، پیش‌شرط طراحی سیاست‌های کارآمد در زمینه کاهش انتشار کربن، بهبود عدالت محیطی و ارتقای پایداری شهری محسوب می‌شود. بنابراین، پرداختن به الگوی فضایی شاخص‌های اکولوژیکی در مناطق پانزده‌گانه شهر اصفهان، در چارچوب مدل مرکز–پیرامون، می‌تواند زمینه مناسبی برای تبیین دقیق‌تر نابرابری‌های محیطی و ارائه درک منسجم‌تری از نسبت میان ساختار فضایی شهر و ظرفیت آن در مواجهه با بحران‌های اکولوژیکی فراهم آورد. در همین راستا، پرسش محوری پژوهش به‌شرح زیر است: الگوی فضایی شاخص‌های پایداری اکولوژیکی در کلان‌شهر اصفهان بر اساس مدل مرکز–پیرامون (مطالعه موردی: مناطق ۱۵گانه شهری) چگونه توزیع شده است؟

سپهر مفهومی

در راستای تکمیل قطعات پازل نوشتار حاضر، باید برخی از مؤلفه‌های مفهومی مطلوب در جهت رسیدن به پاسخ مناسب برای پرسش اصلی مدنظر قرار گیرد. به همین منظور در این بخش، مفاهیم پایداری اکولوژیک، کربن و توسعه پایدار بررسی می‌شود.

۱. پایداری اکولوژیک

پایداری اکولوژی به‌عنوان مفهومی نوظهور در زمینهٔ حفاظت و سلامت اکوسیستم است (Mumford & Callicott, 1997). توالی اکولوژیکی پدیده یا فرایندی است که طی آن یک جامعه به‌تدریج خود را تغییر می‌دهد؛ زمانی که یک جامعه پایدار تشکیل شود (Durgasrilakshmi, 2021). پایداری اکولوژیکی به توانایی سیستم‌های طبیعی برای حفظ ساختار، عملکرد و تنوع زیستی در طول زمان اشاره دارد؛ به‌گونه‌ای که فرایندهای حیاتی اکوسیستم‌ها بدون ازبین‌رفتن ظرفیت بازسازی و خودتنظیمی ادامه یابد(Morelli,2011; Liu, 2009). در نتیجه، در تعاریف معاصر، پایداری اکولوژیکی نه‌تنها به‌معنای حفظ تعادل محیطی است؛ بلکه شامل توانایی اکوسیستم برای تطبیق‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی و پاسخ‌گویی به فشارهای انسانی نیز می‌شود(Griebler et al, 2025; Engelman, 2013). برخی پژوهشگران آن را حفظ ظرفیت اکوسیستم‌ها برای پشتیبانی از نظام‌های اجتماعی می‌دانند که بر تعاملات پویای انسان و طبیعت استوار است(Berkes et al, 2003).

مطالعات جدید نشان می‌دهند که تحقق پایداری اکولوژیکی نیازمند تغییر در الگوهای مصرف، اصلاح سیاست‌های انرژی، استفاده از فناوری‌های سبز و مدیریت منابع در چارچوب ظرفیت طبیعی کرهٔ زمین است(Griebler et al, 2025; Russo et al, 2023).

۲. کربن

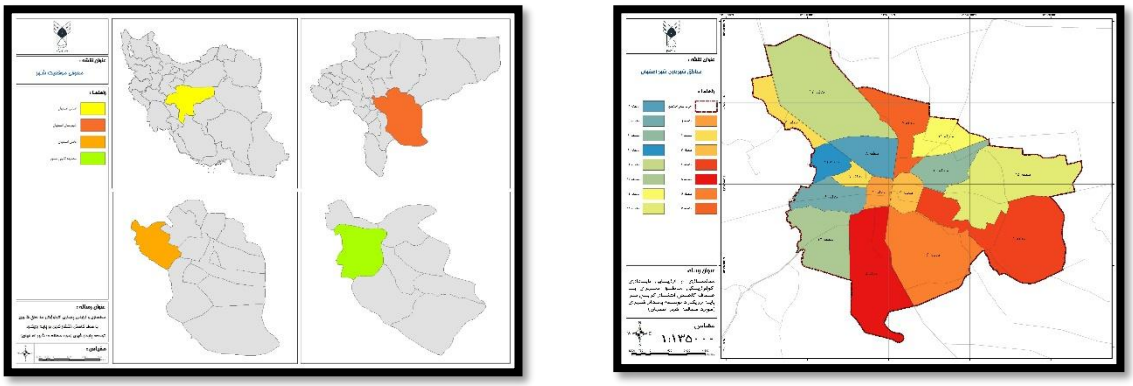
کربن در ادبیات محیط‌زیست، تغییر اقلیم و مطالعات شهری، مفهومی بنیادین و چندلایه است که هم در چرخه‌های زیستی–اکولوژیکی و هم در فرایندهای انسانی نقش تعیین‌کننده دارد. این مفهوم در ساده‌ترین معنا به یک عنصر شیمیایی اشاره دارد، اما در بستر پژوهش‌های مرتبط با پایداری شهری، بیش از آنکه صرفاً یک عنصر باشد، به‌عنوان شاخصی برای تبیین ارتباط میان فعالیت‌های انسانی، مصرف انرژی، تغییر کاربری زمین، و پیامدهای اقلیمی به کار می‌رود. از این منظر، کربن به‌ویژه در پیوند با گازهای گلخانه‌ای دارای منشأ کربنی و آثار ناشی از افزایش آن‌ها در جو زمین مورد توجه قرار می‌گیرد. در واقع، هنگامی که از کربن در مطالعات شهری و محیط‌زیستی سخن گفته می‌شود، مراد عمدتاً دی‌اکسیدکربن و سایر ترکیبات مرتبطی است که در فرایندهای مختلف تولید، حمل‌ونقل، احتراق سوخت‌های فسیلی و دگرگونی‌های کالبدی و اکولوژیکی شهرها وارد جو می‌شوند.

۳. توسعه پایدار

واژه توسعهٔ پایدار نشانگر فرایندی است که طی آن پایداری می‌تواند اتفاق بیوفتند (Maclaren, 1996). مفهوم توسعهٔ پایدار، مفهومی بحث برانگیز و در حال تحول است. رایج ترین تعریف توسعهٔ پایدار توسط کمیسیون برانت‌لند با عنوان "آینده مشترک ما ارائهٔ شده است؛ توسعهٔای که نیازهای نسل کنونی را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده برای تامین نیازهایشان برطرف نماید(Conley and Smith, 1999). همچنین براساس تعریف کمیسیون جهانی محیط‌زیست، توسعهٔای که نیازهای امروز را بدون از دست دادن توانایی پاسخ‌گویی به نیازهای نسل آینده، ممکن سازد، توسعهٔ پایدار است(Barton et al, 2003). در واقع مفهوم توسعهٔ پایدار ناظر بر این واقعیت انکار ناپذیر است که ملاحظات مربوط به اکولوژی می‌تواند در فعالیت‌های اقتصادی به‌کار گرفته شود. این ملاحظات شامل ایده ایجاد محیطی منطقی است که در آن ادعای توسعهٔ به منظور پیشبرد کیفیت همه جانبه زندگی مورد چالش قرار گیرد.

روش پژوهش

مطابق شکل ۱، استان اصفهان در مرکز فلات ایران قرار دارد و به دلیل موقعیت جغرافیایی خود یکی از کریدورهای مهم ارتباطی کشور محسوب می‌شود؛ موقعیتی که آن را به یکی از قطب‌های اصلی توسعه صنعتی، تجاری و خدماتی در نظام سکونتگاهی ایران تبدیل کرده است. محدوده مورد مطالعه این شهر از نظر مختصات جغرافیایی در پهنه ای از طول ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه و ۳۳ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۵۲ دقیقه و ۱۸ ثانیه و از عرض ۳۲ درجه و ۳۰ دقیقه و ۱۳ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۴۹ دقیقه و ۱۵ ثانیه قرار دارد. در این میان، شهرستان اصفهان به عنوان مرکز سیاسی و اداری استان، پرجمعیت‌ترین واحد تقسیماتی است و تمرکز بالای جمعیت و خدمات در آن به شکل‌گیری الگوی نخست‌شهری و برتری عملکردی این کلان‌شهر نسبت به شهرهای پیرامونی انجامیده است. شهر اصفهان در محدوده قانونی خود شامل ۱۵ منطقه شهرداری است که بخش عمده فعالیت‌های تاریخی، اقتصادی و فرهنگی را دربر می‌گیرند. با این حال، تمرکزگرایی فضایی و الگوی توسعه کالبدی شهر موجب شکل‌گیری نابرابری‌های فضایی میان مناطق شده است؛ به‌گونه‌ای که هسته مرکزی با تراکم بالای جمعیت و خدمات، بیش از سایر بخش‌ها تحت تأثیر پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های پیرامونی قرار دارد و بررسی الگوی مرکز- پیرامون را در تحلیل نابرابری‌های اکولوژیکی اصفهان ضروری می‌سازد.



(ب) (الف)

شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

پژوهش حاضر با اتخاذ رویکردی کاربردی–توسعه‌ای، به دنبال تبیین نابرابری‌های اکولوژیکی و واکاوی الگوی مرکز–پیرامون در کلان‌شهر اصفهان است. این مطالعه با بهره‌گیری از ماهیت توصیفی–تحلیلی و روش‌شناسی ترکیبی (Mixed Methods)، فرآیند استخراج داده‌ها و تحلیل فضایی را در دو گام موازیِ مبتنی بر ادراک شهروندی و داده‌های عینیِ زیرساختی طراحی کرده است. در بخش نخست، جامعه آماری شامل تمامی شهروندان ساکن در مناطق ۱۵گانه کلان‌شهر اصفهان است که با بهره‌گیری از فرمول کوکران، نمونه‌ای به حجم ۳۸۴ نفر به صورت تصادفی طبقه‌بندی شده انتخاب گردیدند تا بازتاب‌دهنده تنوع سکونتی و

اجتماعی در پهنه‌های مختلف شهری باشند. ابزار گردآوری داده‌ها در این بخش، پرسشنامه‌ای محقق‌ساخته با طیف لیکرت ۵ گزینه‌ای جهت سنجش شاخص‌های فرم شهری، پایداری حمل‌ونقل و عملکرد زیست‌محیطی است که روایی محتوایی آن توسط پنل خبرگان (شامل ۲۰ تن از متخصصین حوزه برنامه‌ریزی شهری و اقلیم‌شناسی) و پایایی آن از طریق ضریب آلفای کرونباخ (بالای ۰.۸) و تحلیل عاملی تأییدی (CFA) در محیط نرم‌افزاری تایید گردید. در بخش دوم (داده‌های عینی)، نقشه موقعیت و لایه‌های اطلاعاتی کلان‌شهر اصفهان شامل شبکه زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی (مترو، اتوبوس و دوچرخه)، تراکم جمعیتی و سرانه فضای سبز از معاونت خدمات شهری و مرکز آمار و اطلاعات مکانی اخذ و جهت تحلیل‌های فضایی آماده‌سازی شد.

فرایند تحلیل داده‌ها با هدف دستیابی به نتایج دقیق فضایی، در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و در قالب سه گام منسجم صورت پذیرفت؛ در گام اول، داده‌های پرسشنامه پس از پردازش‌های آماری، با استفاده از مدل‌های میانیابی فضایی (مانند IDW یا Kriging بسته به توزیع داده‌ها) به لایه‌های رستری تبدیل شدند تا تحلیل ادراک شهروندی در هر منطقه امکان‌پذیر گردد. در گام دوم، لایه‌های عینی زیرساختی بر اساس شاخص‌های اکولوژیکی استاندارد، وزن‌دهی و پهنه‌بندی شدند. در گام نهایی، به منظور یکپارچه‌سازی و استخراج الگوی فضایی پایداری اکولوژیکی، از مدل هم‌پوشانی وزنی (Weighted Overlay) استفاده گردید. این رویکرد تحلیل ترکیبی اجازه می‌دهد تا ضمن انطباق داده‌های ذهنی با واقعیت‌های کالبدی، نقاط داغ (Hotspots) نابرابری و پایداری اکولوژیکی در پهنه‌های مرکز و پیرامون کلان‌شهر اصفهان شناسایی شده و در قالب نقشه‌های نهایی با کُد رنگیِ استاندارد (از وضعیت بهینه سبز تا بحرانی قرمز) جهت ارزیابی شکاف‌های توسعه منعکس شوند. این مدل‌سازی فضایی، هسته اصلی تبیین نابرابری‌ها را تشکیل داده و مبنای علمی بحث و نتیجه‌گیری پژوهش قرار می‌گیرد.

بحث و یافته‌ها

این بخش در ۵ عنوان به تفکیک، بحث و یافته های پژوهش، بررسی می گردد که به شرح زیر می باشد.

۱. آمار توصیفی

۲. تحلیل فضایی شاخص های پایداری از منظر ادراک شهروندان(ذهنی)

۳. تحلیل فضایی شاخص های پایداری بر اساس داده های شهری(عینی)

۴. تلفیق نهایی و شناسایی نقاط داغ

۵.بحث

۱.آمار توصیفی

بررسی ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان نشان می‌دهد که توزیع جنسیتی نمونه (۵۲ درصد مرد و ۴۸ درصد زن) از تعادل متناسبی برخوردار است که سوگیری جنسیتی در ادراک مسائل اکولوژیکی را به حداقل می‌رساند. تمرکز بیش از نیمی از حجم نمونه (۵۳ درصد) در بازه سنی ۲۰ تا ۴۰ سال، مؤید آن است که پژوهش حاضر دیدگاه‌های نسل فعال و پویای جامعه را هدف قرار داده است؛ نسلی که بیشترین تعامل و تأثیرپذیری را از محیط‌های شهری و شاخص‌های پایداری اکولوژیک دارد.

از منظر سطح دانش، برخورداری بیش از ۷۰ درصد پاسخ‌دهندگان از تحصیلات دانشگاهی (کارشناسی و بالاتر)، اعتبار داده‌های جمع‌آوری‌شده را ارتقا داده و تضمین‌کننده توانایی تحلیل و درک مفاهیم تخصصیِ «پایداری اکولوژیک» و «کیفیت محیط‌زیست شهری» در پرسشنامه است. همچنین، ترکیب شغلی نمونه با اکثریت کارمندان (۳۸ درصد) و مشاغل آزاد (۲۴ درصد) نشان‌دهنده دسترسی پژوهش به گروه‌هایی است که دارای الگوی جابه‌جایی روزانه مشخص در شهر هستند و این امر، تحلیل‌های مرتبط با حمل‌ونقل و الگوی مرکز–پیرامون را مستندتر می‌سازد. در نهایت، تمرکز ۴۲ درصدی جمعیت بر ساکنان بومی و نرخ پایین مالکیت خودرو (نزدیک به نیمی از خانوارها دارای یک خودرو)، حاکی از وابستگی طیف قابل‌توجهی از جامعه به سیستم حمل‌ونقل عمومی و فضاهای پیاده‌مدار است؛ متغیری کلیدی که در مراحل بعدی پژوهش، به‌عنوان شاخصی برای سنجش فشار بر ظرفیت‌های اکولوژیکی مناطق ۱۵گانه اصفهان و همچنین میزان دسترسی آن‌ها به مراکز خدمات شهری مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۲.تحلیل فضایی شاخص های پایداری اکولوژیکی از منظر ادراک شهروندان

در این پژوهش، ارزیابی وضعیت شاخص‌های کالبدی، زیست‌محیطی و عملکردی بر اساس داده‌های حاصل از پرسشنامه (جدول ۱) و تلفیق آن‌ها در محیطGIS ، الگوی مشخصی از «قطب‌بندی فضایی» در کلان‌شهر اصفهان را آشکار می‌سازد. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که پایداری اکولوژیکی در اصفهان تابع یک نظام سلسله‌مراتبی است که در آن هسته مرکزی شهر، از برتری کالبدی و زیرساختی برخوردار بوده و مناطق پیرامونی در حاشیه این پایداری قرار دارند.

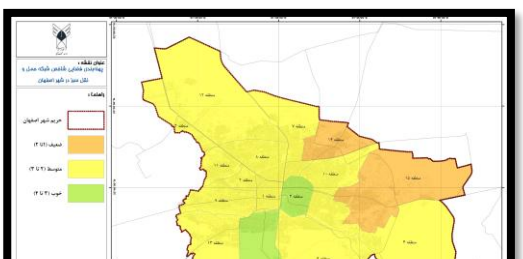
جدول ۱. ارزیابی شاخص‌های پایداری کالبدی و فضایی در مناطق کلان‌شهر اصفهان(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

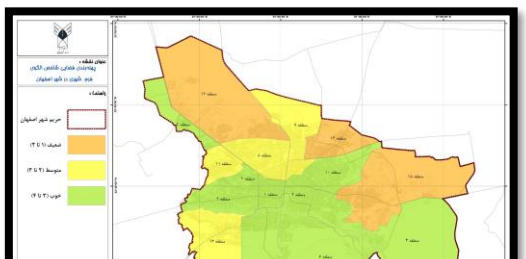
مناطق	الگوی فرم شهری	شبکه حمل‌ونقل سبز	سرانه فضای سبز	تراکم ساختمانی
منطقه ۱	۳.۹۸	۳.۲۶	۳.۵۱	۳.۳۱
منطقه ۲	۳.۶۶	۳.۱۸	۳.۰۴	۳.۱۲
منطقه ۳	۴.۰۸	۳.۶۰	۳.۵۰	۳.۳۸
منطقه ٤	۳.۵۶	۳.۲۳	۳.۰۳	۳.۰۳
منطقه ٥	۳.۴۵	۳.۴۴	۳.۳۴	۳.۲۹
منطقه ٦	۳.۷۲	۳.۳۴	۲.۹۹	۳.۴۳
منطقه ۷	۲.۸۷	۳.۰۳	۲.۸۰	۲.۹۰
منطقه ۸	۳.۲۵	۲.۹۸	۲.۸۴	۳.۰۸
منطقه ۹	۳.۶۵	۳.۲۵	۳.۵۲	۳.۲۵
منطقه ۱۰	۳.۷۳	۲.۹۳*	۳.۰۲	۳.۲۷
منطقه ۱۱	۲.۹۲	۲.۷۷	۲.۶۵	۲.۶۴
منطقه ۱۲	۲.۵۹	۲.۷۹	۲.۷۲	۲.۷۴
منطقه ۱۳	۲.۹۶	۳.۱۹	۳.۴۳	۳.۳۹
منطقه ۱٤	۲.۰۴	۲.۲۷	۲.۰۳	۲.۰۷
منطقه ۱۵	۲.۳۲	۲.۵۵	۲.۲۴	۲.۳۶
میانگین کل	۳.۲۰	۳.۰۶	۲.۹۴	۳.۰۰

واکاوی ابعاد نابرابری کالبدی و زیرساختی

داده‌های جدول ۱ و شکل ۲، حاکی از آن است که شاخص الگوی فرم شهری با میانگین کل ۳.۲۰، در مناطق ۳ (۴.۰۸) و ۱ (۳.۹۸) به اوج پایداری رسیده است. این وضعیت، نتیجه‌ی مستقیمِ «تمرکز تاریخی زیرساخت‌ها» و استخوان‌بندی منسجم کالبدی در هسته مرکزی است. در مقابل، مناطق ۱۴ و ۱۵ (با میانگین‌های ۲.۰۴ و ۲.۳۲) نشان‌دهنده گسست کالبدی شدیدی هستند که با مدل «مرکز–پیرامون» همخوانی دارد؛ به این معنا که فرآیند توسعه شهری، منابع کیفی را در مرکز انباشت کرده و مناطق پیرامونی را با فقدان استانداردهای فرمِ پایدار مواجه ساخته است.

در حوزه شبکه حمل‌ونقل سبز، تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی (شکل ۲) مؤیدِ شکافی است که میان «دسترسی پیاده‌مدار» در پهنه‌های مرکزی و «وابستگی به حمل‌ونقل خودرو–محور» در حاشیه وجود دارد. در حالی که منطقه ۳ با امتیاز ۳.۶۰، الگوی پیاده‌مدار را نهادینه کرده است، مناطق ۱۴ و ۱۵ با امتیازهای ۲.۲۷ و ۲.۵۵، نه تنها از نقص در پیوستگی مسیرها رنج می‌برند، بلکه با غلبه الگوهای جابه‌جایی آلاینده، عملاً در چرخه‌ی «ناپایداری اکولوژیکی» گرفتار شده‌اند.





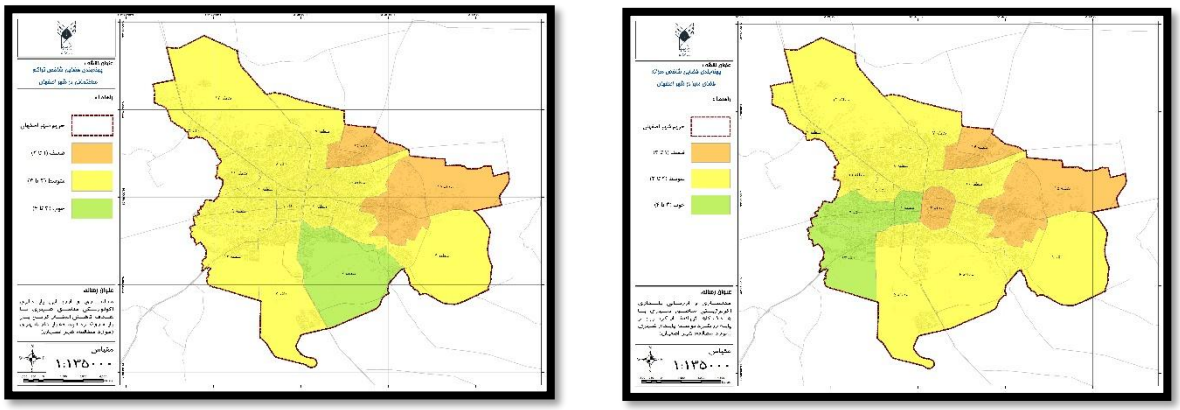
(الف) (ب)

شکل ۲. الف)پهنه بندی فضایی شاخص الگوی فرم شهری ب) پهنه بندی فضایی شاخص شبکه حمل و نقل سبز(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۵)

تبیین بحران سرانه فضای سبز و تراکم ساختمانی

مطابق جدول ۱ و شکل ۳، تحلیل شاخص سرانه فضای سبز (میانگین ۲.۹۴) و تراکم ساختمانی (میانگین ۳.۰۰)، عمق نابرابری اکولوژیکی را به‌وضوح نشان می‌دهد. برخلاف مناطق مرکزی و غربی (۱، ۳ و ۵) که به پشتوانه مجاورت با زاینده‌رود و حفظ هویت باغ‌شهری، شاخص‌های بالایی در فضای سبز کسب کرده‌اند، مناطق شمال‌شرقی اصفهان (۱۴ و ۱۵) در وضعیتی بحرانی قرار دارند.

نکته حائز اهمیت در تحلیلِ «تراکم ساختمانی»، ناهماهنگیِ میان توده و فضاست. در حالی که منطقه ۳ با امتیاز ۳.۳۸ تعادل کالبدی را حفظ کرده، منطقه ۱۴ با امتیاز ۲۰.۷، نشان‌دهنده توسعه‌ای است که در آن «تراکم» به جای آنکه تابعی از زیرساخت‌های پایدار باشد، حاصلِ غلبه بافت‌های ناهمگون است. این تفاوت معنادار، فرضیه پژوهش مبنی بر «برتریِ هسته‌ی مرکز در جذبِ توان اکولوژیک» را تأیید می‌کند.



(الف) (ب)

شکل ۳. الف)پهنه بندی فضایی سرانه فضای سبز ب) پهنه بندی فضایی شاخص تراکم ساختمانی(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۵)

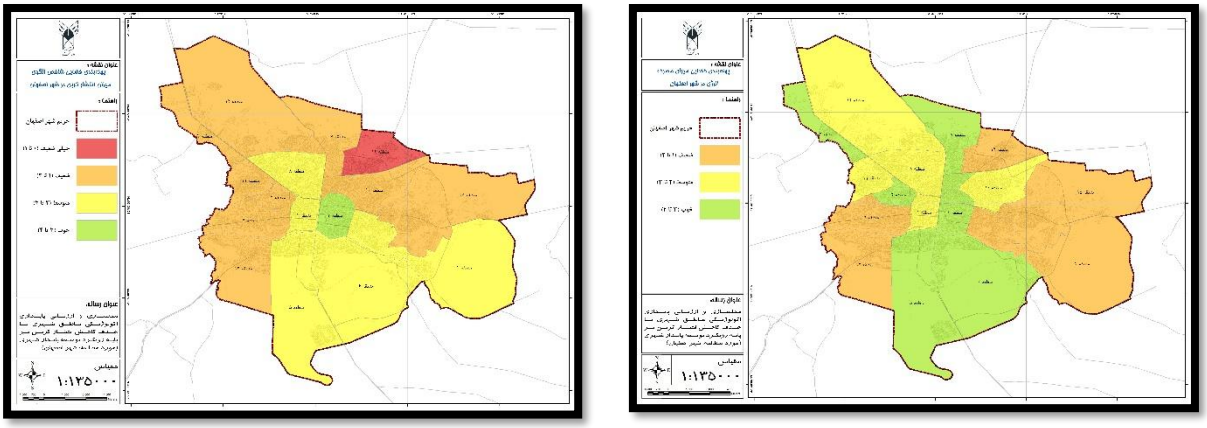
در ادامه مطابق جدول شماره ۲، ادامه ارزیابی شاخص های پایداری محیطی را از منظر ادراک شهروندان نشان می دهد.

جدول ۲. ارزیابی شاخص‌های پایداری محیطی و عملکردی در مناطق کلان‌شهر اصفهان(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۵)

مناطق	مصرف انرژی	انتشار کربن	پایداری اکولوژیکی	توسعه زیرساخت‌ها
منطقه ۱	۳.۰۷	۲.۹۹	۲.۴۱	۲.۱۷
منطقه ۲	۳.۲۰	۲.۰۰	۱.۹۷	۲.۰۰
منطقه ۳	۳.۲۳	۳.۸۷	۴.۲۳	۴.۲۱
منطقه ٤	۳.۲۳	۲.۷۹	۲.۷۸	۲.۸۰
منطقه ٥	۳.۱۸	۲.۸۱	۲.۸۰	۲.۸۰
منطقه ٦	۳.۳۰	۲.۶۸	۲.۶۸	۲.۶۸
منطقه ۷	۳.۱۶	۲.۱۴	۲.۱۵	۲.۱۵
منطقه ۸	۳.۰۵	۲.۸۳	۲.۸۵	۲.۸۳
منطقه ۹	۲.۹۷	۲.۰۷	۲.۰۷	۲.۰۸
منطقه ۱۰	۳.۰۱	۲.۳۰	۲.۲۹	۲.۲۹
منطقه ۱۱	۳.۰۵	۲.۰۹	۲.۰۹	۲.۰۹
منطقه ۱۲	۳.۰۴	۲.۲۳	۲.۲۷	۲.۲۳
منطقه ۱۳	۲.۹۷	۲.۰۸	۲.۰۳	۲.۰۸
منطقه ۱٤	۲.۹۱	۱.۷۹	۱.۷۱	۲.۰۶
منطقه ۱۵	۲.۹۳	۱.۸۶	۱.۹۱	۱.۹۶
میانگین کل	۳.۰۸	۲.۴۵	۲.۴۴	۲.۴۷

تحلیل الگوهای محیطی: مصرف انرژی و انتشار کربن

بررسی یافته‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که میان شاخص‌های مصرف انرژی (میانگین ۳.۰۸) و میزان انتشار کربن (میانگین ۲.۴۵) یک همبستگی معنادار فضایی وجود دارد. در حالی که مصرف انرژی در سطح کلان‌شهر اصفهان به پایداری نسبی نزدیک شده، اما شاخص انتشار کربن در وضعیت ناپایداری قرار دارد؛ این شکاف نشان می‌دهد که حتی در صورت مدیریت نسبی مصرف انرژی، فرآیندهای آلاینده (به‌ویژه در حوزه حمل‌ونقل و فعالیت‌های صنعتی) همچنان از ظرفیت بازتولید اکولوژیکی شهر فراتر هستند. در این میان، منطقه ۳ با عملکرد برتر در هر دو شاخص (امتیاز ۳.۲۳ در مصرف انرژی و ۳.۸۷ در کنترل انتشار کربن)، الگویی از «اقتصاد کم‌آلاینده» را در هسته مرکزی به نمایش می‌گذارد که احتمالاً نتیجه‌ی پیوستگیِ کالبدی و مدیریت یکپارچه‌ی کاربری‌هاست. در مقابل، مناطق حاشیه‌ای، به‌ویژه مناطق ۱۴ و ۱۵ (با میانگین‌های پایین در هر دو شاخص)، در وضعیت شکنندگی مضاعف قرار دارند. پایین بودن نمرات در این پهنه‌ها، ناشی از ترکیب «فرسودگی تجهیزات» و «غلبه الگوهای حمل‌ونقل آلاینده» است که نشان می‌دهد بحران کربن در اصفهان، پدیده‌ای متمرکز در پیرامون است. پهنه‌بندی این دو شاخص (شکل ۴) به‌روشنی بازتولیدِ الگوی «مرکز–پیرامون» را تأیید می‌کند؛ جایی که هسته‌ی مرکزی از مزیت نسبی بهره‌مند بوده و مناطق پیرامونی به کانون‌های انباشت آلایندگی تبدیل شده‌اند.

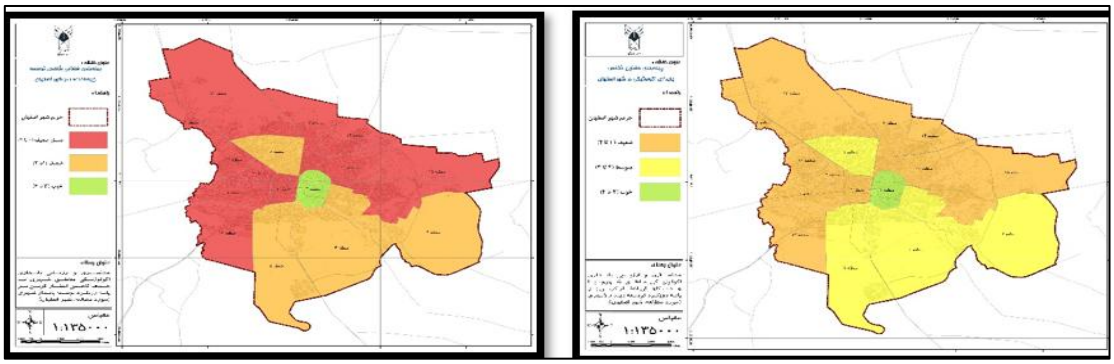


(الف) (ب)

شکل ٤. الف)پهنه بندی فضایی مصرف انرژی ب) پهنه بندی فضایی شاخص انتشار کربن (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۵)

واکاوی تاب‌آوری اکولوژیکی و زیرساختی در توسعه شهری

تحلیل نهایی شاخص‌های پایداری اکولوژیکی (میانگین ۲.۴۴) و توسعه زیرساخت‌ها (میانگین ۲.۴۷) نشان می‌دهد که تاب‌آوری محیطی اصفهان به‌شدت وابسته به بسترهای کالبدی است. ضعف عمومی در زیرساخت‌ها در اکثر مناطق، مانع اصلیِ تحقق پایداری اکولوژیکی در مقیاس شهری شده است. در این میان، منطقه ۳ با برخورداری از زیرساخت‌های منسجم و تجهیزات یکپارچه (امتیاز ۴.۲۱)، توانسته است تنها هسته‌ی پایدار اکولوژیکی شهر را ایجاد کند. با فاصله گرفتن از این مرکز، با کاهش معنادار کیفیت و کمیت زیرساخت‌ها مواجه هستیم که مستقیماً بر شاخص پایداری اکولوژیکی اثر می‌گذارد. مناطق حاشیه‌ای از جمله ۱۴ و ۱۵، با کمبود شدید بسترهای کالبدی مواجه‌اند و پایین‌ترین سطوح پایداری اکولوژیکی (۱.۷۱ و ۱.۹۱) را ثبت کرده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که زیرساخت‌ها در اصفهان به مثابه‌ی یک «متغیر تعیین‌کننده» عمل می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که تمرکز سرمایه‌گذاری در مرکز، موجب حفظ ظرفیت‌های زیستی شده و فقدان آن در پیرامون، توسعه‌ی ناپایدار و تراکم‌های جمعیتیِ بدونِ پشتوانه را به همراه داشته است. پهنه‌بندی فضایی (شکل ۵) مؤید این است که مداخلاتِ آتی، به‌ویژه در مناطق شمال‌شرقی، نباید صرفاً بر بهبود شاخص‌های محیطی متمرکز باشد، بلکه باید به عنوان بخشی از یک استراتژیِ جامعِ «بازآفرینی زیرساختی» تعریف شود تا شکاف مرکز—پیرامون تعدیل گردد.

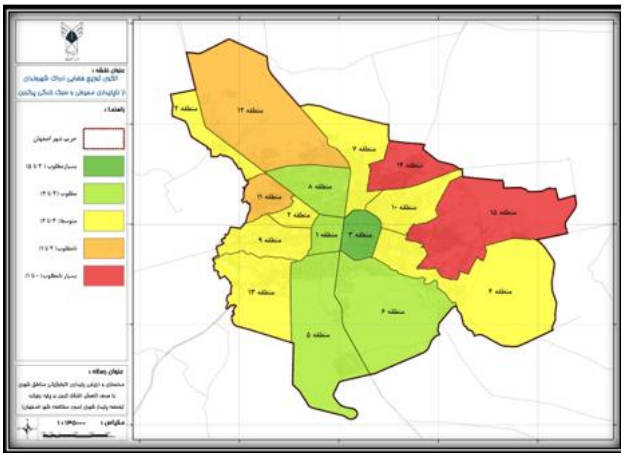


(الف) (ب)

شکل ۵. الف)پهنه بندی فضایی شاخص پایداری اکولوژیکی ب) پهنه بندی فضایی شاخص توسعه زیر ساخت ها(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۵)

تحلیل کلی شاخص های پایداری اکولوژیکی از منظر ادراک شهروندان

در این پژوهش، به‌منظور تبیین «لایه‌ی ذهنیِ» پایداری، تحلیل فضایی مبتنی بر پیمایش میدانی از دیدگاه شهروندان در مناطق ۱۵گانه اصفهان انجام گرفت. مطابق شکل ۶، الگوی توزیع فضاییِ ادراک شهروندان از ناپایداری محیطی و سبک زندگی پرکربن، مؤید شکافی عمیق با سوگیریِ «شرقی–شمالی» است. تحلیل این پهنه‌ها نشان می‌دهد که مناطق ۱۴ و ۱۵ (به‌واسطه مجاورت با کانون‌های صنعتی و کمبود ملموس زیرساخت‌های سبز و پاک) و همچنین منطقه ۱۲، به عنوان «کانون‌های بحران ادراکی» شناخته می‌شوند؛ جایی که شهروندان به‌طور مستقیم فشارِ ناشی از محرومیت‌های محیطی را در کیفیت زندگی خود لمس می‌کنند. در مقابل، منطقه ۳ به‌واسطه‌ی غنای ساختار محله‌محور و دسترسی به خدمات، بالاترین سطح رضایت و پایداری ذهنی را ثبت کرده است. نکته حائز اهمیت در این تحلیل، مشاهده‌ی «تضادهای معنادار» میانِ ادراکِ شهروندان و واقعیت‌های عینی در برخی مناطق جنوبی (همچون مناطق ۱، ۵ و ۶) است؛ این ناهمگونی، نشان‌دهنده «پارادوکسِ آگاهی و مصرف» است؛ به این معنا که در مناطق برخوردار، علی‌رغم شاخص‌های مثبتِ کالبدی، میزانِ آگاهی محیط‌زیستی با الگوهای مصرفِ بالای انرژی در تضاد است. این یافته‌ها ضرورتِ بازنگری در سیاست‌های آموزشی و مدیریت فضایی را بیش از پیش نمایان می‌سازد و تأکید می‌کند که تحقق پایداری در اصفهان، نیازمندِ هم‌افزایی میانِ بهبودِ کالبدی در پیرامون و ارتقای فرهنگِ مصرفی در مرکز است.



شکل ٦. الگوی توزیع فضایی ادراک شهروندان از ناپایداری محیطی و سبک زندگی پرکربن(منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

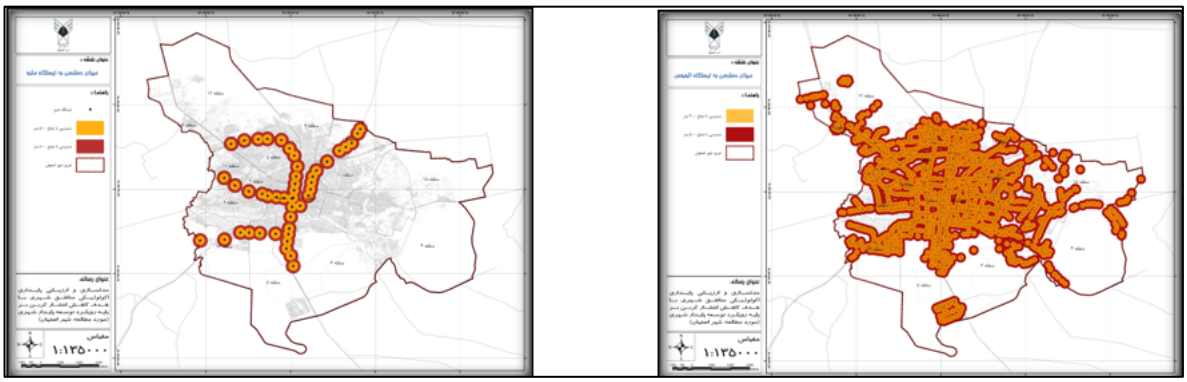
۳.تحلیل فضایی شاخص های پایداری اکولوژیکی بر اساس داده های شهری

در این بخش، به منظور واکاوی دقیق‌تر نابرابری‌های اکولوژیک، توزیع فضایی زیرساخت‌های حمل‌ونقل و سرانه‌های سبز با الگوی تراکم جمعیتی تطبیق داده شده است تا کارایی شبکه‌ی شهری در گذار به «شهر کم‌کربن» مشخص گردد.

کارآمدی شبکه حمل‌ونقل عمومی و ریلی (اتوبوس و مترو)

تحلیل شبکه‌ی اتوبوسرانی (شکل ۷–الف) نشان‌دهنده‌ی الگویی از «عدالتِ دسترسیِ نابرابر» است. اگرچه تمرکز ایستگاه‌ها در مناطق ۱۰ و ۵ (به ترتیب ۹.۷۳٪ و ۹.۲۳٪) نشان‌دهنده‌ی پوشش مطلوب در هسته‌های پرجمعیت است، اما مناطق پیرامونی نظیر ۹، ۱۱ و ۱۴ با سهم ۴ درصدی، در وضعیت محرومیت زیرساختی قرار دارند. این شکاف دسترسی، به صورت مستقیم با افزایش وابستگی به خودروی شخصی و تشدید انتشار آلاینده‌ها در پیرامون همبستگی دارد.

در بُعد ریلی (شکل ۷–ب)، خط ۱ مترو با اتصال کریدور شمال به جنوب، در نقش ستون فقراتِ پایداری عمل می‌کند؛ با این حال، عدم انطباق کاملِ این خط با کانون‌های فوق‌متراکم شمال‌شرق (مناطق ۱۰ و ۱۴)، یک «گسست استراتژیک» در شبکه ایجاد کرده است. بنابراین، تکمیل خطوط ۲ و ۳ و تقویت ایستگاه‌های تبادلی، نه صرفاً یک پروژه عمرانی، بلکه ضرورتی برای رفع نابرابری فضایی و جذب سفرهای آلاینده به سمت حمل‌ونقل پاک است.

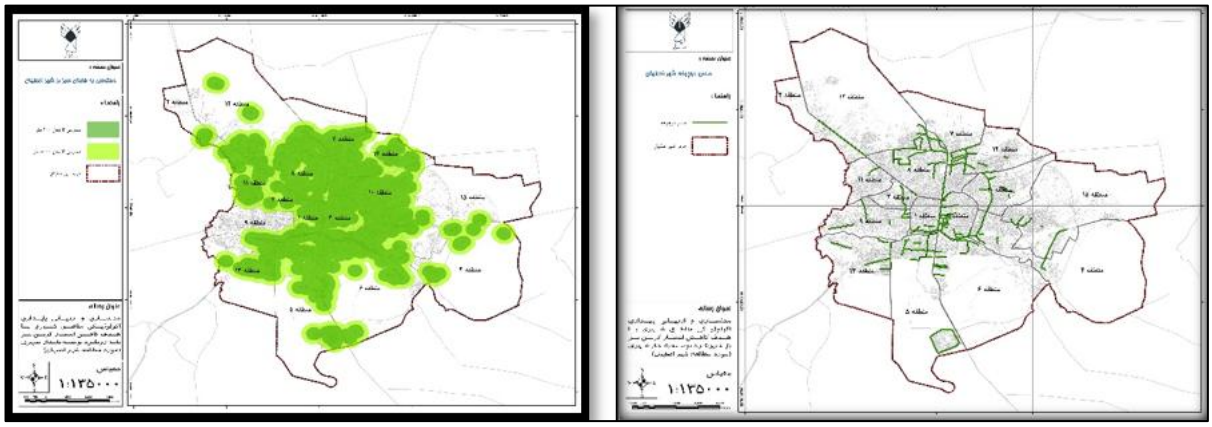


(ب) (الف)

شکل ۷. الف)میزان دسترسی به ایستگاه های اتوبوس ب) میزان دسترسی به استگاه مترو(منبع: معاونت حمل و نقل و ترافیک اصفهان، ۱٤۰۵)

زیرساخت‌های جابه‌جایی نرم و عدالتِ زیست‌محیطی (دوچرخه و فضای سبز)

مطابق شکل ۸، توزیع مسیرهای دوچرخه و فضای سبز، الگوی «تمرکزِ مرکزی–محوری» را به وضوح بازتولید می‌کند. این زیرساخت‌ها عمدتاً در کریدور زاینده‌رود و هسته مرکزی (مناطق ۱، ۳، ۴ و ۵) متمرکز شده‌اند که نه‌تنها از دسترسیِ استانداردِ پیاده برخوردارند، بلکه ظرفیت‌های ترسیب کربن و تصفیه بیولوژیک هوا را در اختیار دارند. در مقابل، پهنه‌های شمالی و شرقی (به‌ویژه مناطق ۱۲ و ۱۵) با «کمبود جزیره‌ای» زیرساخت‌های سبز مواجه‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که فضای سبز در اصفهان بیش از آنکه یک زیرساختِ عدالت‌محور باشد، به یک کالایِ فضاییِ متمرکز در هسته بدل شده است؛ موضوعی که تاب‌آوریِ نواحی پیرامونی در برابر جزایر حرارتی را به شدت کاهش داده است.



(ب) (الف)

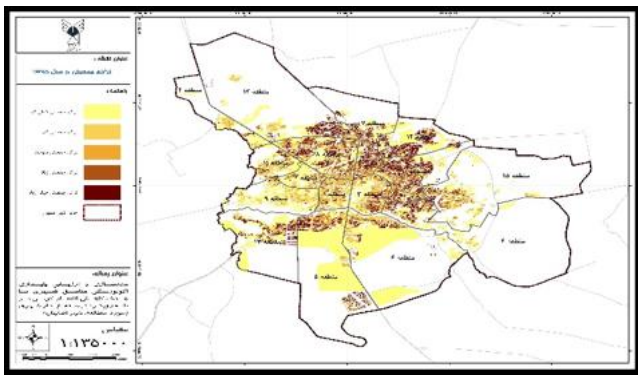
شکل ۸. الف)مسیر دوچرخه شهر اصفهان ب) میزان دسترسی به فضای سبز(منبع: معاونت حمل و نقل و ترافیک اصفهان، ۱٤۰۵)

سنتزِ تراکم و پایداری: تضاد میان مرکز و پیرامون

تطبیق نقشه‌ی تراکم جمعیتی سال ۱۳۹۵ (شکل ۹) با شاخص‌های فوق، پارادوکسِ اصلیِ پایداری در اصفهان را آشکار می‌سازد: مناطق ۷، ۸، ۱۰ و ۱۴ دارای بیشترین تراکم جمعیتی هستند، اما از کمترین بهره‌مندی از زیرساخت‌های پایداریِ اکولوژیک (فضای سبز و مسیرهای دوچرخه) برخوردارند.

این «قطب‌بندی فضایی»، موجب شده است که کانون‌های پرجمعیتِ اصفهان، به «نقاط داغِ انتشار کربن» تبدیل شوند. تحلیلِ همزمانِ این داده‌ها مؤید آن است که مدل توسعه‌ی اصفهان، کماکان بر مدارِ «تمرکز در مرکز و رهاشدگی در پیرامون» می‌چرخد. برای گذار به شهر کم‌کربن، مداخله در مناطق پیرامونی (۱۴ و ۱۵) نباید صرفاً بر توسعه‌ی کالبدی متمرکز باشد، بلکه باید به سوی

«توزیع عادلانه‌ی زیرساخت‌های سبز و حمل‌ونقل عمومی» تغییر جهت دهد تا شکافِ اکولوژیکِ ایجاد شده در ساختار فضایی شهر ترمیم گردد.



شکل ۹. تراکم جمعیتی در سال ۱۳۹۵(منبع: معاونت خدمات شهری) اصفهان، ۱۴۰۵

تحلیل فضایی کلی متغیرها بر اساس پایگاه داده های شهری

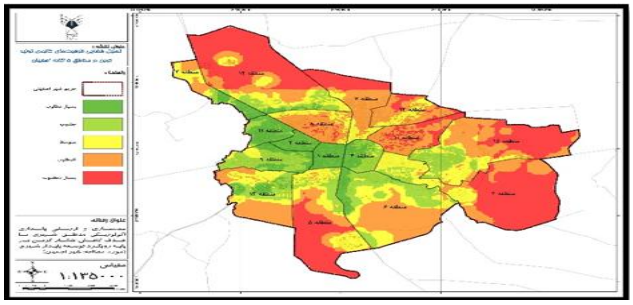
در این بخش، به‌منظور واکاوی دقیق‌تر نابرابری‌های اکولوژیک، توزیع فضایی زیرساخت‌های حمل‌ونقل و سرانه‌های سبز با الگوی تراکم جمعیتی تطبیق داده شد تا کارایی شبکه‌ی شهری در گذار به «شهر کم‌کربن» سنجیده شود. یافته‌ها در چهار محورِ اصلی تحلیل گردید:

الف) کارآمدی شبکه حمل‌ونقل عمومی: شکاف دسترسی، مشهود است؛ در حالی که مناطق مرکزی (۵ و ۱۰) پوشش مطلوبی دارند، مناطق ۹، ۱۱ و ۱۴ با محرومیت زیرساختی روبرو هستند که منجر به وابستگی به خودروی شخصی و افزایش آلایندگی گردیده است. تکمیل خطوط مترو ۲ و ۳، یک ضرورت برای رفع این گسست استراتژیک است.

ب) عدالتِ زیست‌محیطی در زیرساخت‌های نرم: مسیرهای دوچرخه و فضای سبز، الگوی «تمرکز مرکزی-محوری» را بازتولید می‌کنند. این زیرساخت‌ها در هسته‌ی مرکزی، کالایی در دسترس و در پهنه‌های پیرامونی (۱۵، ۱۲، ۴) «کالایی نایاب» هستند که تاب‌آوریِ این مناطق در برابر جزایر حرارتی را مخدوش کرده است.

ج) پارادوکس تراکم و انتشار: انطباقِ تراکم جمعیتی با کانون‌های فاقد زیرساختِ پاک (شمال و شمال‌شرق)، این مناطق را به «نقاط داغِ انتشار کربن» تبدیل کرده است.

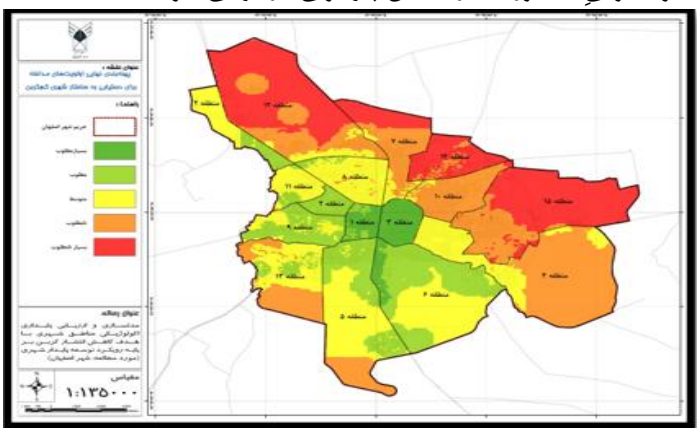
ارزیابی یکپارچه متغیرهای کالبدی، شکافی ساختاری میان هسته‌ی مرکزی و پهنه‌های پیرامونی را در مواجهه با انتشار کربن هویدا می‌سازد (شکل ۱۰). در حالی‌که مناطق ۱، ۳ و ۹ به مدد زیرساخت‌های حمل‌ونقل پاک و تراکم بهینه‌ی فضای سبز به پایداری نسبی دست یافته‌اند، مناطق ۱۲، ۱۴، ۱۵ و ۴ به دلیل مجاورت با کانون‌های صنعتی و ضعف شبکه همگانی، در وضعیت «فوق‌بحرانی» قرار دارند. در سوی دیگر، مصرف بالای انرژی در بافت‌های مسکونی جنوب شهر، علی‌رغم برخورداری از پوشش سبز، ماهیت «کربن‌مبنا»ی سبک زندگی در این مناطق را برجسته می‌کند. این عدم توازن، نشان می‌دهد که پایداری در اصفهان، نیازمند بازآفرینیِ زیرساختی در پیرامون و مدیریت هوشمند انرژی در مرکز است. بنابراین، مداخله در مناطق حاشیه‌ای نه یک انتخاب، بلکه یک «ضرورتِ راهبردی» برای گذار به الگوی شهر کم‌کربن است.



شکل ۱۰. تحلیل فضایی ظرفیت های کالبدی تولید کربن در مناطق ۱۵ گانه اصفهان (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

٤. تلفیق نهایی و شناسایی نقاط داغ (Ecological Hotspots)

مطابق شکل ۱۱، تلفیق لایه‌های عینی و ذهنی با بهره‌گیری از Weighted Overlay در محیط ArcGIS نشان داد که نقاط داغ اکولوژیک اصفهان، محل هم‌زمانیِ بافت‌های پرآلاینده، رفتارهای پرکربن و نارضایتی اجتماعی‌اند. در این میان، مناطق ۱۴ و ۱۵ در شرق و شمال‌شرق شهر به‌سبب هم‌پوشانیِ فشارهای صنعتیِ جی و سجزی با تراکم کالبدی و واکنش منفی ساکنان، بحرانی‌ترین پهنه‌ها به‌شمار می‌آیند و باید در اولویت مداخله قرار گیرند. منطقه ۱۲ نیز اگرچه در برخی بخش‌ها از ادراک متوسط شهروندان برخوردار است، اما به‌دلیل مجاورت با شهرک صنعتی محمودآباد و محورهای ترانزیتی، با بحرانی کالبدی-صنعتی و تحمیلی مواجه است. در مقابل، منطقه ۳ به‌عنوان مرکز تاریخی اصفهان، در هر دو لایه عینی و ذهنی پایدارترین وضعیت را نشان می‌دهد و مؤید کارآمدی الگوی محله‌محور و دسترسی پیاده در کاهش ردپای کربن است. بر این اساس، بازطراحیِ پهنه‌های بحرانی با الهام از منطق پایداریِ مرکز تاریخی، مهم‌ترین راهبرد برای کاهش شکاف اکولوژیک و ارتقای تاب‌آوری شهری در اصفهان است. بر این اساس، بازطراحیِ پهنه‌های بحرانی با الهام از منطقِ پایداریِ مرکزِ تاریخی، نه یک انتخابِ تزیینی، بلکه حیاتی‌ترین استراتژی برای تقلیلِ شکافِ اکولوژیک و ارتقای تاب‌آوریِ ساختاری در کلان‌شهر اصفهان است. این فرآیندِ مداخله، مستلزمِ حرکت از «برنامه‌ریزیِ قطاعی و جزیره‌ای» به سمت «مدیریتِ یکپارچه‌ی مرکز–پیرامون» است که در آن، ظرفیت‌های تاریخیِ منطقه ۳ به عنوان الگوی بومیِ تاب‌آوری، در مناطق پیرامونی بازآفرینی شود.



شکل ۱۱. تلفیق نهایی و شناسایی نقاط داغ جهت شناسایی اولویت مداخله (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۵)

۵. بحث

بررسی ساختار فضایی و نحوه توزیع منابع اکولوژیکی از محورهای اصلی در توسعه شهری پایدار و کاهش انتشار کربن است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در کلان‌شهر اصفهان نیز، همانند آنچه در مطالعات بین‌المللی گزارش شده، انسجام کالبدی و تراکم متعادل می‌تواند به بهبود عملکرد اکولوژیکی و کاهش انتشار سرانه کربن منجر شود. در این زمینه، نتایج پژوهش با تأکید بر الگوی توسعه مرکز–پیرامون، با دیدگاه Sun et al. (۲۰۲۲) و Castells Quintana et al. (۲۰۲۱) هم‌راستاست؛ زیرا این مطالعات نیز نشان داده‌اند که شهرهای متراکم و دارای انسجام فضایی، در مقایسه با پهنه‌های پراکنده و خودرومحور، از کارایی اکولوژیکی بالاتری برخوردارند. در همین راستا، گسترش و توزیع عادلانه شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی و زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری نیز به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های تعیین‌کننده در ارتقای کیفیت محیطی و کاهش ردپای کربن شناخته می‌شود؛ موضوعی که با نتایج Jing et al. (۲۰۲۲) و Montoya Torres et al. (۲۰۲۳) نیز انطباق دارد. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه یکپارچه زیرساخت سبز شهری می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در کاهش آلاینده‌ها و تعدیل نابرابری‌های اکولوژیکی داشته باشد. این نتیجه با یافته Liu et al. (۲۰۲۴) که از امکان کاهش ۲۹.۵ درصدی انتشار آلاینده‌ها در اثر توسعه یکپارچه زیرساخت سبز سخن گفته‌اند، قابل مقایسه است. همچنین، کمبود فضای سبز در مناطق حاشیه‌ای اصفهان با کاهش ظرفیت جذب کربن و تشدید نابرابری محیطی همراه است؛ وضعیتی که Guo et al. (۲۰۲۳) نیز در مطالعات خود بر آن تأکید

کرده‌اند. بنابراین، می‌توان گفت که در اصفهان نیز مانند بسیاری از شهرهای مورد مطالعه در ادبیات بین‌المللی، توزیع نابرابر زیرساخت‌های سبز و حمل‌ونقل، به بازتولید شکاف اکولوژیکی در مقیاس فضایی منجر شده است.

در مقایسه با پژوهش‌های داخلی، اگرچه مطالعاتی به ارتباط فرم شهری، کاربری زمین و آلودگی هوا پرداخته‌اند و بر نقش فضاهای سبز در بهبود کیفیت هوا به‌ویژه در اقلیم‌های نیمه‌خشک تأکید داشته‌اند (پوراحمد و همکاران، ۱۳۹۵؛ جبارپور و همکاران، ۱۴۰۲؛ رهنما و همکاران، ۱۴۰۲)، اما این پژوهش‌ها عمدتاً مقطعی بوده و از مدل‌سازی فضایی یکپارچه برخوردار نبوده‌اند. از این منظر، پژوهش حاضر با به‌کارگیری آمار فضایی و شاخص‌های کالبدی، تلاش کرده است خلأ موجود در تحلیل هم‌زمان ساختار کالبدی، حمل‌ونقل و فضای سبز را پر کند. این امر به‌ویژه از آن جهت اهمیت دارد که در مطالعات داخلی، کمتر به پیوند ساختار فضایی با نابرابری‌های اکولوژیکی در مقیاس مناطق شهری پرداخته شده است. در نتیجه، این تحقیق نه‌تنها با ادبیات داخلی هم‌خوانی دارد، بلکه با افزودن لایه‌ای تحلیلی و فضایی، آن را تکمیل و تعمیق می‌کند.

یافته‌های پژوهش همچنین نشان می‌دهد که الگوی توسعه فضایی اصفهان دچار قطب‌بندی شدید میان بافت‌های مرکزی و حاشیه‌ای است. مناطق مرکزی و جنوبی، به‌ویژه مناطق ۱، ۳ و ۶، به دلیل انسجام کالبدی و برنامه‌ریزی‌های پیشین، از وضعیت مطلوب‌تری در شاخص‌های پایداری برخوردارند؛ در حالی که مناطق پیرامونی، شمالی و شرقی، به‌ویژه مناطق ۱۴ و ۱۵، با گسست کالبدی، فقر زیرساخت‌های سبز و ناهماهنگی در فرم شهری مواجه‌اند و در وضعیت بحران اکولوژیکی قرار دارند. این الگو بیانگر آن است که توسعه شهری اصفهان، به‌جای حرکت به سمت توزیع متوازن منابع اکولوژیکی، به بازتولید نابرابری‌های فضایی منجر شده است. افزون بر این، تضادهای درونی در برخی مناطق نظیر ۵، ۶ و ۸ نشان می‌دهد که حتی در درون یک منطقه نیز همگنی فضایی و طبقاتی کامل وجود ندارد و تحلیل این ناهمگونی‌ها نیازمند رویکردی مقایسه‌ای، چندلایه و فضایی است.

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که کلان‌شهر اصفهان از منظر زیست‌محیطی با یک قطب‌بندی فضایی مخرب مواجه است؛ قطب‌بندی‌ای که در آن مناطق مرکزی و جنوبی از مزیت نسبی در انسجام کالبدی، دسترسی بهتر و منابع اکولوژیکی بیشتر برخوردارند، اما مناطق پیرامونی، شمالی و شرقی با کمبود زیرساخت‌های سبز، ناهماهنگی کالبدی و ضعف در شبکه‌های حمل‌ونقل پایدار روبه‌رو هستند. این وضعیت نشان می‌دهد که نابرابری‌های اکولوژیکی در اصفهان نه‌تنها محصول تفاوت‌های کالبدی، بلکه نتیجه هم‌افزایی عوامل فضایی، زیرساختی و برنامه‌ریزی نامتوازن است. در واقع، الگوی توسعه مرکز–پیرامون در این شهر به‌طور مستقیم در شکل‌گیری شکاف اکولوژیکی و توزیع نامتوازن منابع محیطی نقش داشته است. مقایسه نتایج این پژوهش با پیشینه داخلی و خارجی نشان می‌دهد که یافته‌های حاضر با ادبیات موجود درباره اهمیت فرم شهری فشرده، شبکه حمل‌ونقل عمومی کارآمد و زیرساخت سبز همسو است، اما در عین حال، نشان می‌دهد که در اصفهان این مؤلفه‌ها به‌صورت نابرابر و ناهمگون توزیع شده‌اند و همین امر، کارکردهای مثبت آن‌ها را در برخی مناطق محدود کرده است. از این رو، اگرچه پژوهش‌های پیشین به‌صورت کلی بر نقش فضای سبز، فرم شهری و کاربری زمین در بهبود کیفیت محیطی تأکید کرده‌اند، این مطالعه با تمرکز بر مقیاس درون‌شهری و تحلیل فضایی مناطق ۱۵گانه، ابعاد عینی نابرابری اکولوژیک را آشکار ساخته است.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که برای کاهش شکاف اکولوژیکی و ارتقای پایداری شهری، لازم است مداخلات برنامه‌ریزی و مدیریتی به‌صورت هدفمند در مناطق کم‌برخوردارتر، به‌ویژه مناطق ۱۴ و ۱۵، متمرکز شود و در عین حال، الگوهای موفق انسجام فضایی در مناطق مرکزی به‌عنوان مبنایی برای بازآرایی و بهبود سایر پهنه‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، بازتوزیع عادلانه منابع اکولوژیکی، تقویت پیوندهای فضایی، توسعه شبکه حمل‌ونقل پایدار و افزایش سرانه فضای سبز در مناطق پیرامونی، مهم‌ترین راهبردهای پیشنهادی برای کاهش نابرابری‌های اکولوژیکی و حرکت به سوی توسعه شهری پایدار در کلان‌شهر اصفهان هستند.

با توجه به نتایج، موارد زیر جهت بهبود وضعیت نامطلوب در پایداری پیشنهاد می گردد.

۱-استقرار نواحی کم‌انتشار کربن در کریدورهای حمل‌ونقل پرتراکم و نقاط داغ انتشار.

۲- توسعه سریع پوشش گیاهی شهری از طریق بام‌های سبز و فضاهای سبز خردمقیاس.

۳-تقویت برنامه‌های آموزشی و مشارکت اجتماعی در ترویج سبک زندگی کم‌کربن.

منابع

اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان. (۱۴۰۱). سالنامه کیفیت هوای اصفهان. اداره‌کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان. https://esfahanmet.ir/uploads/researches/1401 final.pdf

بحرینی، حسین، و مکنون، رضا. (۱۳۸۱). توسعه پایدار: از اندیشه تا عمل. مجله محیط زیست، (۲۷). https://journal.ut.ac.ir/article_25626.html

پوراحمد، احمد، عمو، ابراهیم، و امان‌اللهی، محمد. (۱۳۹۵). بررسی نقش برنامه‌ریزی کاربری زمین و تأثیر آن بر ایجاد آلاینده‌های هوا. در نخستین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های محیط‌زیستی ایران: راهکارها و چالش‌ها.

مخدوم، محمدمهدی. (۱۳۸۷). زندگی در محیط زیست. انتشارات دانشگاه تهران.

رهنما، محمدرضا، و صبوری، مهدی. (۱۳۹۳). تحلیل فضایی تأثیر فضای سبز شهری بر آلودگی هوا و مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های تنفسی با استفاده از رگرسیون خطی در شهر مشهد. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک.

سلطانی، کامران. (۱۳۸۷). محیط زیست در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای (جلدهای ۱ و ۲). مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران.

References

Esfahan Province Department of Environmental Protection. (2022). *Esfahan Air Quality Yearbook*. Esfahan Province Department of Environmental Protection. https://esfahanmet.ir/uploads/researches/1401%20final.pdf [In Persian]

Bahreini, H., & Maknoun, R. (2002). Sustainable development: From thought to practice. *Journal of Environment*, (27). https://journal.ut.ac.ir/article_25626.html [In Persian]

Pourahmad, A., Amou, E., & Amanollahi, M. (2016). Examining the role of land-use planning and its impact on the generation of air pollutants. In *Proceedings of the First International Conference on Natural Hazards and Environmental Crises in Iran: Solutions and Challenges*. [In Persian]

Makhdoum, M. M. (2008). *Living in the Environment*. University of Tehran Press. [In Persian]

Rahnama, M. R., & Sabouri, M. (2014). Spatial analysis of the impact of urban green spaces on air pollution and mortality caused by respiratory diseases using linear regression in Mashhad. *Geographical Studies of Arid Regions*. [In Persian]

Soltani, K. (2008). *Environment in Urban and Regional Planning* (Vols. 1–2). Iran Center for Urban Planning and Architecture Studies and Research. [In Persian]

Barton, Hugh, et al(2003), shaping Neighbourhoods: A guide for health, sustainability and vitality, spon press, London and New York

Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2003). Navigating Social–Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change. Cambridge University Press.

Burger, J. R., Brown, J. H., & Allen, C. D. (2012). The Macroecology of Sustainability. PLoS Biology, 10(6), e1001345. 10.1371/journal.pbio.1001345

Castells-Quintana, D., Dienesch, E., & Krause, M. (2021). Air pollution in an urban world:

A global view on density, cities and emissions. Ecological Economics, 190, 107134. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107153

Chen, H., Wang, L., Wang, Y., Ni, Z., Xia, B., & Qiu, R. (2024). New perspective to evaluate the carbon offsetting by urban blue-green infrastructure: Direct carbon sequestration and indirect carbon reduction. Environmental Science & Technology. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c07337

Chen, H., Zhang, X., & Li, Y. (2024). Spatial differentiation of urban land use intensity and carbon emissions: A multi-scale geographically weighted regression approach. Sustainable Cities and Society, 105, 105455.

Durgasrilakshmi, H. (2021). Environmental Science: Lecture notes (Vardhaman College of Engineering) [PDF]. Vardhaman College of Engineering.

Elkington, J. (1997). Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Capstone.

Guo, Y., Ren, Z., Wang, C., Zhang, P., Ma, Z., Hong, S., Hong, W., & He, X. (2023). Spatiotemporal patterns of urban forest carbon sequestration capacity: Implications for urban CO2

emission mitigation during China’s rapid urbanization. Science of the Total Environment, 903, 167964.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168781

Griebler, A., Holzinger, E.-M., & Tost, M. (2025). Towards Absolute Sustainability: Reflections on Ecological and Social Sustainability Frameworks. Journal of Sustainability, 17(12), 5477. 10.3390/su17125477

Jing, Q.-L., Liu, H., Yu, W., & He, X.-F. (2022). The impact of public transportation on carbon emissions—From the perspective of energy consumption. Sustainability, 14(10), 6038. https://doi.org/10.3390/su14106248

Liu, Y., Han, B., Jiang, C., & Ouyang, Z. (2024). Uncovering the role of urban green infrastructure in carbon neutrality: A novel pathway from the urban green infrastructure and cooling power saving. Journal of Cleaner Production, 141234. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142193

Maclaren, , v.w 1996. "urban sustainability reporting". Journal of the American planning Association. Chicago, Illinois: Americanplaning Association, v.62, N.2, spring, 1996. PPI 84-202

Montoya-Torres, J., Akizu-Gardoki, O., Alejandre, C., & Iturrondobeitia, M. (2023). Towards sustainable passenger transport: Carbon emission reduction scenarios for a medium-sized city. Journal of Cleaner Production, 138441. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138149

Morelli, J. (2011). Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals. Journal of Environmental Sustainability, 1(1), 1–9. 10.14448/jes.01.0002

Mumford, L., & Callicott, J. B. (1997). Ecological Sustainability as a Conservation Concept, Environmental Science, Philosophy, DOI:10.1046/j.1523-1739.1997.95468.x

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2020). Urban Climates. Cambridge University Press.

Sun, C., Zhang, Y., Ma, W., Wu, R., & Wang, S. (2022). The impacts of urban form on carbon emissions: A comprehensive review. Land, 11(9), 1497. https://doi.org/10.3390/land11091430

Sachs, J. D. (2015). The Age of Sustainable Development. Columbia University Press.

United Nations. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. UN General Assembly.

Zhang, R., Li, X., Zhang, Y., Ma, X., Liu, H., & Chen, T. (2024). An urban agricultural block construction method based on low-carbon concepts: A case study of the Beijing-Tianjin area in China. Journal of Cleaner Production, 140000.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143874