Sustainable Urban & Regional Development Studies Quarterly

Volume 7, Issue 2 - Serial Number 24, Summer 2026 **Online ISSN: 2783-0764**
Journal Hompage https://www.srds.ir/
https://www.srds.ir/article_234556.html?lang=en

The Impact of Green Infrastructure on the Development of a Smart Sustainable City (Case Study: The Metropolis of Karaj)

Atta Ghaffari Gilandeh [1*], Mansour Rahmati [2], Mohamad Mahdi Mahabadi pour[3], Yasser Afshoun[4]
[1.] Professor, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[2.] Associate Professor, Department of Geography and Urban and Rural Planning, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[3.] PhD Student, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[4.] PhD Student, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received Date: 29 June 2025 **Accepted Date:** 18 November 2025

Abstract

Background and Objective: With the rapid pace of urbanization and its associated environmental challenges, novel approaches such as the smart sustainable city and green infrastructure have become essential. However, the gap between theory and practice, particularly regarding the prioritization of interventions, persists. This study was conducted with the objective of analyzing the impact of green infrastructure on the realization of a smart sustainable city and providing a data-driven framework for spatial prioritization in the metropolis of Karaj.

Methodology: This is an applied study employing a descriptive-analytical method. Initially, 24 key variables were identified and distributed to 30 experts via a questionnaire. Subsequently, using a hybrid approach, the Cross-Impact Matrix Multiplication Applied to Classification (MICMAC) technique was utilized to identify key drivers, and the Combined Compromise Solution (CoCoSo) method was employed to rank the readiness of the 11 urban districts of Karaj.

Results and Findings: The results indicated that seven drivers, including "permeable surfaces," "ecological corridors," "investment," and "integrated governance," are the most powerful factors influencing the system. Furthermore, the CoCoSo analysis identified District 5 as the most suitable area for initiating projects. The findings emphasize that a successful transition to a smart sustainable city requires an integrated strategy that simultaneously focuses on physical infrastructure, governance factors, and economic incentives, and that policies must be formulated based on spatial priorities. Ultimately, this study shows that the realization of a smart sustainable city in Karaj is only possible through an integrated strategy that incorporates the key physical, governance, and economic drivers within specific spatial priorities.

Keywords: "Green Infrastructure", "Smart Sustainable City", "Karaj Metropolis", "MICMAC", "CoCoSo".

[*] **Correspong Author Email**: a_ghafarigilandeh@uma.ac.ir
Cite this article: Ghaffari Gilandeh,A. , Rahmati,M. , Mahabadi pour,M. M. and Afshoun,Y. (2026). The Impact of Green Infrastructure on the Development of a Smart Sustainable City (Case Study: The Metropolis of Karaj). Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS), 7(2), 207-229.

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

دوره ۷، شماره ۲، شماره پیاپی ۲۴، تابستان ۱۴۰۵ شاپا:۰۷۶۴-۲۷۸۳

Journal Hompage https://www.srds.ir/
https://www.srds.ir/article_234556.html?lang=fa

تأثیر زیرساخت‌های سبز بر ایجاد شهر هوشمند پایدار در کلانشهر کرج

عطا غفاری گیلانده [۱*]، منصور رحمتی[۲]، محمد مهدی مه‌آبادی پور[۳]، یاسر افشون [۴]

۱. استاد گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲. دانشیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری و روستایی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۴. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

چکیده

زمینه و هدف: با افزایش سریع شهرنشینی و چالش‌های زیست‌محیطی، رویکردهای نوینی چون شهر هوشمند پایدار و زیرساخت سبز ضروری شده است. با این حال، شکاف میان تئوری و عمل، به‌ویژه در زمینه اولویت‌بندی اقدامات، همچنان پابرجاست. این پژوهش با هدف تحلیل تأثیر زیرساخت‌های سبز بر تحقق شهر هوشمند پایدار و ارائه یک چارچوب مبتنی بر داده برای اولویت‌بندی مکانی در کلان‌شهر کرج انجام شد.

روش‌شناسی: این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی-تحلیلی است. ابتدا ۲۴ متغیر کلیدی شناسایی و از طریق پرسشنامه در اختیار ۳۰ خبره قرار گرفت. سپس با استفاده از یک رویکرد ترکیبی، از تکنیک تحلیل ساختاری اثر متقابل (MICMAC) برای شناسایی پیشران‌های کلیدی و از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (CoCoSo) برای رتبه‌بندی آمادگی ۱۱ منطقه شهری کرج بهره گرفته شد.

نتایج و یافته‌ها: نتایج نشان داد که هفت پیشران، از جمله «سطوح نفوذپذیر»، «کریدورهای زیستی»، «سرمایه‌گذاری» و «حکمرانی یکپارچه»، قدرتمندترین عوامل اثرگذار بر سیستم هستند. همچنین، تحلیل کوکوسو، منطقه ۵ را به عنوان مناسب‌ترین ناحیه برای شروع پروژه‌ها معرفی نمود. یافته‌ها تأکید می‌کند که گذار موفق به شهر هوشمند پایدار، نیازمند یک استراتژی یکپارچه است که همزمان بر زیرساخت‌های فیزیکی، عوامل حاکمیتی و محرک‌های اقتصادی تمرکز دارد و سیاست‌گذاری‌ها باید بر اساس اولویت‌های مکانی صورت گیرند. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج، تنها از طریق یک استراتژی یکپارچه که پیشران‌های کلیدی فیزیکی، حاکمیتی و اقتصادی را در اولویت‌های مکانی مشخص به کار می‌گیرد، ممکن می‌شود.

کلید واژه‌ها: "زیرساخت سبز"، "شهر هوشمند پایدار"، "کلان‌شهر کرج"، "میک‌مک"، "کوکوسو".

* **نویسنده مسئول:** a_ghafarigilandeh@uma.ac.ir

ارجاع به این مقاله: غفاری گیلانده,عطا , رحمتی,منصور , مه آبادی پور,محمد مهدی و افشون,یاسر . (۱۴۰۵).تأثیر زیرساخت‌های سبز بر ایجاد شهر هوشمند پایدار در کلانشهر کرج. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای, ۷(۲), ۲۰۷-۲۲۹.

مقدمه و بیان مسأله

در دهه‌های اخیر، با افزایش سریع شهرنشینی و فزاینده چالش‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی، پارادایم‌های سنتی مدیریت شهری کارایی خود را از دست داده‌اند. این امر منجر به ظهور رویکردهای نوینی چون شهر هوشمند و شهر پایدار شده است که به دنبال بهینه‌سازی منابع، افزایش کیفیت سکونت و تقویت تاب‌آوری شهری هستند (ساسان‌پور و همکاران، ۱۴۰۳). این دو رویکرد، اگرچه در نگاه اول متفاوت به نظر می‌رسند، اما در نهایت به یک هدف مشترک یعنی شهر هوشمند پایدار می‌رسند که در آن، فناوری در خدمت پایداری به کار گرفته می‌شود. این مفهوم بر آن است که فناوری‌های نوین تنها در صورتی می‌توانند به پایداری شهری کمک کنند که با نیازهای بومی و ظرفیت‌های مدیریتی هم‌راستا شوند (ساسان پور و حاتمی، ۱۴۰۲).

در میان ابزارها و راهکارهای متعدد برای دستیابی به شهر پایدار، «زیرساخت‌های سبز[1]» به عنوان یکی از کلیدی‌ترین و کارآمدترین رویکردها معرفی شده است. زیرساخت‌های سبز، شبکه‌ای استراتژیک از فضاهای طبیعی و نیمه‌طبیعی است که برای ارائه خدمات زیست‌محیطی (مانند کاهش آلودگی هوا)، اجتماعی (افزایش سلامت روانی) و اقتصادی (کاهش هزینه‌های زیرساختی) طراحی می‌شوند (زنگانه و همکاران، ۱۴۰۳). این زیرساخت‌ها فراتر از نقش زیبایی‌شناختی، خدمات اکوسیستمی حیاتی مانند مدیریت آب‌های سطحی، کاهش اثر جزیره گرمایی شهری، بهبود کیفیت هوا و افزایش تنوع زیستی را ارائه می‌دهند (جمشیدی و صحرائی‌نژاد، ۱۴۰۳) و به عنوان ستون فقرات کالبدی یک شهر پایدار عمل می‌کنند.

با این حال، به تنهایی ایجاد زیرساخت‌های سبز برای پاسخ به پیچیدگی‌های شهرهای امروز کافی نیست و به حداکثر رساندن کارایی و اثربخشی این زیرساخت‌ها، یک چالش کلیدی محسوب می‌شود. اینجاست که پیوند میان زیرساخت‌های سبز و شهر هوشمند، یک گام فراتر به شمار می‌رود. شهر هوشمند با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال، داده‌ها و ارتباطات، به دنبال مدیریت بهینه و هوشمند زیرساخت‌های شهری است و تحقیقات نوین نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی زیرساخت‌های سبز با فناوری‌های هوشمند، مانند استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای برنامه‌ریزی و یادگیری ماشین برای پایش و مدیریت، می‌تواند کارایی این زیرساخت‌ها را به شکل چشمگیری افزایش دهد (پاتاک و همکاران[2]، ۲۰۲۵).

برای مثال، سنسورهای هوشمند می‌توانند رطوبت خاک را در پارک‌ها پایش کرده و سیستم آبیاری را بهینه‌سازی کنند یا پنل‌های خورشیدی هیبریدی در کنار فضاهای سبز، به تولید انرژی پایدار برای تأسیسات شهری کمک کنند (بومِگودا و شیواپراکاشا[3]، ۲۰۲۵). بنابراین، زیرساخت سبز دیگر یک عنصر منفعل در شهر نیست، بلکه به بخشی فعال و هوشمند از شبکه شهری تبدیل می‌شود که به تحقق پایداری در شهرهای هوشمند یاری می‌رساند (عزیزی و فتحی، ۱۴۰۲).

با وجود شفافیت مبانی یکپارچه‌سازی زیرساخت سبز و شهر هوشمند، کلانشهرهای ایران در عمل با چالش‌های جدی روبرو هستند (ساسانپور و حاتمی، ۱۴۰۲) و کلانشهر کرج نمونه بارز این وضعیت است. این شهر با وجود برخورداری از طبیعت بکر در حاشیه، در بافت داخلی با بحران کمبود و توزیع ناعادلانه فضای سبز مواجه است. بر اساس آمار رسمی، سرانه فضای سبز شهری در کرج تنها ۱/۱۵ متر مربع به ازای هر نفر است که فاصله بسیار زیادی با استانداردها دارد (سالنامه آماری استان البرز، ۱۴۰۳). این میانگین پایین، به دلیل توزیع بسیار نابرابر فضای سبز در مناطق شهری است؛ به طوری که این عدد از ۲۱/۵ متر مربع در منطقه ۱۱ به تنها ۰/۴۰ متر مربع در منطقه ۵ می‌رسد (سازمان سیما و منظر و فضای سبز شهری کرج، ۱۴۰۳). این شکاف عمیق، نشان‌دهنده عدم وجود یک برنامه یکپارچه است و کرج را به شهری با تاب‌آوری پایین در برابر بحران‌هایی نظیر سیلاب، آلودگی هوا و گرمای شدید تبدیل کرده است.

از سوی دیگر، رویکردهای فعلی مدیریت شهری بیشتر پراکنده و واکنشی هستند و پتانسیل هوشمندسازی این زیرساخت‌ها برای حل مشکلات مغفول مانده است. توسعه آینده کرج بدون بهره‌گیری از یک رویکرد یکپارچه که در آن زیرساخت‌های سبز به عنوان ستون فقرات شهر هوشمند پایدار طراحی شوند، با شکست مواجه خواهد شد. این پژوهش به دنبال پاسخ به این خلاء و حل آن است که چگونه می‌توان از زیرساخت‌های سبز به عنوان یک پیشران هوشمند برای تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج

[1] Green Infrastructure
[2] Pathak et al
[3] Bommegowda and Shivaprakasha

استفاده کرد. بنابراین، مسئله اصلی این تحقیق این است که: چگونه زیرساخت‌های سبز می‌توانند به تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج کمک کنند و کدام مناطق برای این امر آمادگی بیشتری دارند؟

مبانی نظری پژوهش

مبانی نظری این پژوهش برای تبیین رابطه میان زیرساخت‌های سبز و شهر هوشمند پایدار، بر دو بخش استوار است: نخست، تعریف مفاهیم بنیادین و دوم، ارائه چهار نظریه کلیدی به عنوان چارچوبی برای تحلیل تجربی.

شهر هوشمند پایدار به‌عنوان سیستمی یکپارچه تعریف می‌شود که از فناوری‌های پیشرفته اطلاعات و ارتباطات برای بهبود کارایی خدمات شهری، کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارتقای کیفیت سکونت بهره می‌گیرد (نصیری و همکاران، ۱۴۰۴). این مفهوم بر سه محور کلیدی پایداری زیست‌محیطی، عدالت اجتماعی و رشد اقتصادی استوار است (ییگیتجانلار[1] و همکاران، ۲۰۲۰). ابعاد و شاخص‌های اساسی این مفهوم، امکان ارزیابی عملکرد شهری و جهت‌دهی به سیاست‌های آینده‌نگرانه را فراهم می‌سازند (ساسان پور و حاتمی، ۱۴۰۲). در این میان، زیرساخت‌های سبز به عنوان یکی از کلیدی‌ترین ابزارهای عملیاتی برای دستیابی به این اهداف معرفی می‌شود (سعیدی و دارابی، ۱۴۰۴). این زیرساخت‌ها شامل شبکه‌ای از عناصر طبیعی و نیمه‌طبیعی مانند پارک‌ها، بام‌های سبز و کریدورهای زیستی هستند که برای ارائه خدمات زیست‌محیطی (مانند کاهش آلودگی هوا)، اجتماعی (افزایش سلامت روانی) و اقتصادی (کاهش هزینه‌های زیرساختی) طراحی می‌شوند (زنگانه و همکاران، ۱۴۰۳) لذا بهره‌گیری از رویکردهای یکپارچه برای ظرفیت‌سنجی و رتبه‌بندی نواحی شهری، برای تحقق پایداری ضروری است (مه آبادی پور و همکاران, ۱۴۰۳).این رویکرد، با دیدگاه‌ها و نظریات متعددی که به تبیین اهمیت فضای سبز در بستر شهری می‌پردازند، پشتیبانی می‌شود.

برای درک عمیق‌تر پیوند میان زیرساخت سبز و شهر هوشمند پایدار، از چهار نظریه کلیدی به عنوان چارچوب پشتیبان پژوهش استفاده شده است:

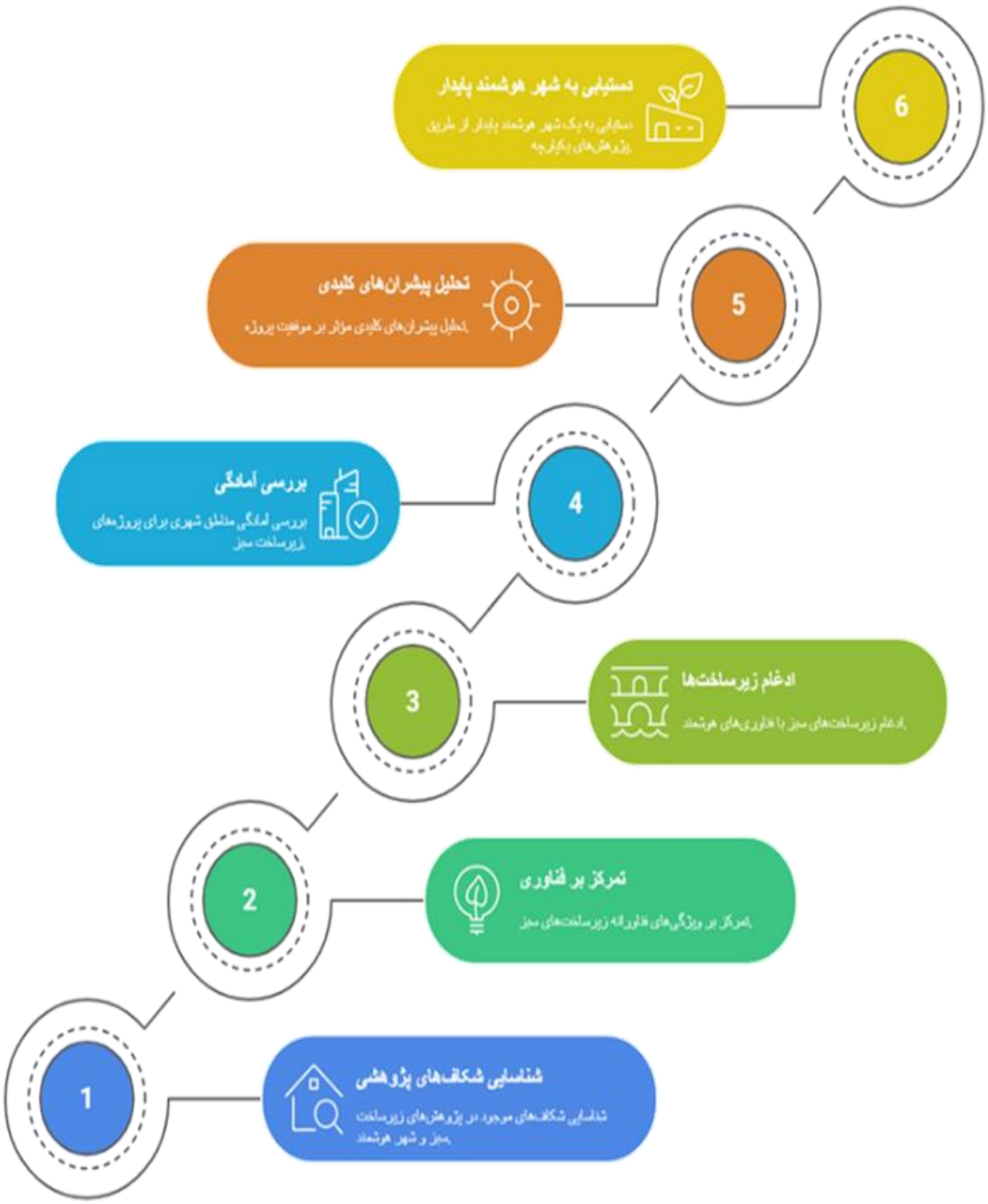
نظریه شهر سبز: این نظریه بر مبنای پیوند میان محیط زیست طبیعی و ساختار کالبدی شهر شکل گرفته و بر این باور است که پایداری شهری بدون بازاندیشی در رابطه انسان با طبیعت ممکن نیست. در این چارچوب، فضاهای سبز نه به‌عنوان عناصر زینتی، بلکه به‌مثابه بخشی حیاتی از سیستم تنفسی و حیاتی شهر در نظر گرفته می‌شوند که نقشی کلیدی در تاب‌آوری و کیفیت سکونت ایفا می‌کنند (بتلی و نیوم[2]، ۲۰۲۱).

نظریه اکولوژی شهری: این نظریه شهرها را به‌عنوان اکوسیستم‌های پویا در نظر می‌گیرد و بر اهمیت ادغام زیرساخت‌های سبز در برنامه‌ریزی شهری برای بهبود پایداری و انعطاف‌پذیری آن‌ها تأکید دارد (وو و همکاران[3]، ۲۰۲۲). این رویکرد، تحلیلی برای بررسی تعاملات میان عناصر طبیعی و مصنوع در کلان‌شهر کرج فراهم می‌کند.

نظریه شهر سالم: این نظریه که توسط سازمان جهانی بهداشت توسعه یافته، بر ایجاد محیط‌های شهری برای ارتقای سلامت جسمی و روانی شهروندان متمرکز است (محمود زاده و همکاران، ۱۴۰۴). زیرساخت‌های سبز در این چارچوب نقش مهمی در کاهش استرس، بهبود کیفیت هوا و افزایش فعالیت‌های فیزیکی دارند و مستقیماً به کیفیت سکونت در شهرهای پرجمعیت مرتبط می‌شوند (زارعی و همکاران، ۱۴۰۳).

نظریه طراحی با طبیعت: این نظریه بر هماهنگی توسعه شهری با فرآیندهای طبیعی تأکید دارد و از تحلیل‌های اکولوژیکی برای طراحی زیرساخت‌های سبز به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی استفاده می‌کند (یانگ و لی[4]، ۲۰۲۲). این نظریه مبنای طراحی پروژه‌های کاربردی و مکان‌محور در پژوهش حاضر است.

---
[1] Yigitcanlar et al
[2] Beatley and Newman
[3] Wu et al
[4] Yang and Li



شکل ۱: روابط مفهومی میان مبانی نظری پژوهش (مأخذ: نگارندگان).

در مجموع، این نظریات چارچوبی را فراهم می‌آورند که در آن، «شهر هوشمند پایدار» هدف غایی، «زیرساخت‌های سبز» ابزار کالبدی اصلی و نظریات مذکور، ستون‌های فکری و توجیهی برای اثربخشی این ابزار در دستیابی به آن هدف هستند. این چارچوب نظری، اساس شکل‌گیری مدل مفهومی و انتخاب شاخص‌های این پژوهش را تشکیل می‌دهد.

به‌منظور عملیاتی کردن مبانی ارائه شده و سنجش متغیرهای تحقیق، مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی از منابع معتبر استخراج شده است. این شاخص‌ها که در جدول (۱) ارائه شده، ابعاد مختلف زیرساخت سبز، فناوری‌های هوشمند، پایداری زیست‌محیطی، کیفیت سکونت و عملکرد اقتصادی را پوشش می‌دهند و مبنای تحلیل‌های کمّی در بخش‌های بعدی قرار خواهند گرفت.

جدول (۱): شاخص های مورد بررسی پژوهش

دسته‌بندی شاخص	شاخص‌های کلیدی	منبع
زیرساخت‌های سبز	میزان فضای سبز سرانه، پوشش گیاهی، تراکم درختان، کیفیت هوا، مدیریت آب باران	(تزولاس [1] و همکاران، ۲۰۰۷؛ ابهیجیت [2] و همکاران، ۲۰۱۷)
فناوری‌های هوشمند	سنسورها وI oT ، مدیریت داده‌های هوشمند، پلتفرم‌های دیجیتال، شبکه‌های ارتباطی	(بیبری و کروگستی[3]، ۲۰۱۷؛ ییگیتجانلار [4] و همکاران، ۲۰۱۹؛ زنگانه و همکاران، ۱۴۰۳)
پایداری زیست‌محیطی	کاهش انتشار کربن، کارایی انرژی، مدیریت پسماند، حفاظت از تنوع زیستی	(آلبرتی [5] و همکاران، ۲۰۰۳؛ آندرسون [6] و همکاران، ۲۰۱۴)
کیفیت سکونت	سلامت عمومی، دسترسی به خدمات، رضایت شهروندان، عدالت اجتماعی	(ایلز-کورتی [7] و همکاران، ۲۰۱۶؛ بارتن و گرنت[8]، ۲۰۰۶)
عملکرد اقتصادی	ارزش املاک، اشتغال، کاهش هزینه‌های زیرساختی، جذب سرمایه	(گاسکون [9] و همکاران، ۲۰۱۶؛ المکوئیست [10] و همکاران، ۲۰۱۵)

(مأخذ: نگارندگان).

این شاخص‌ها در نهایت به صورت یکپارچه در مدل مفهومی پژوهش برای تبیین روابط میان متغیرها به کار گرفته شده‌اند. بر اساس مبانی نظری و شاخص‌های استخراج شده، مدل مفهومی زیر برای تحلیل تأثیر زیرساخت‌های سبز بر تحقق شهر هوشمند پایدار در کلان‌شهر کرج تدوین شده است.

در مجموع، بخش مبانی نظری با تبیین مفاهیم، نظریات و شاخص‌های کلیدی، چارچوب فکری را برای پژوهش حاضر فراهم آورد. این چارچوب، اساس روش‌شناسی تحقیق و تحلیل یافته‌ها در بخش‌های آتی قرار خواهد گرفت و مسیری برای پاسخ به سوالات اصلی پژوهش ترسیم می‌نماید.

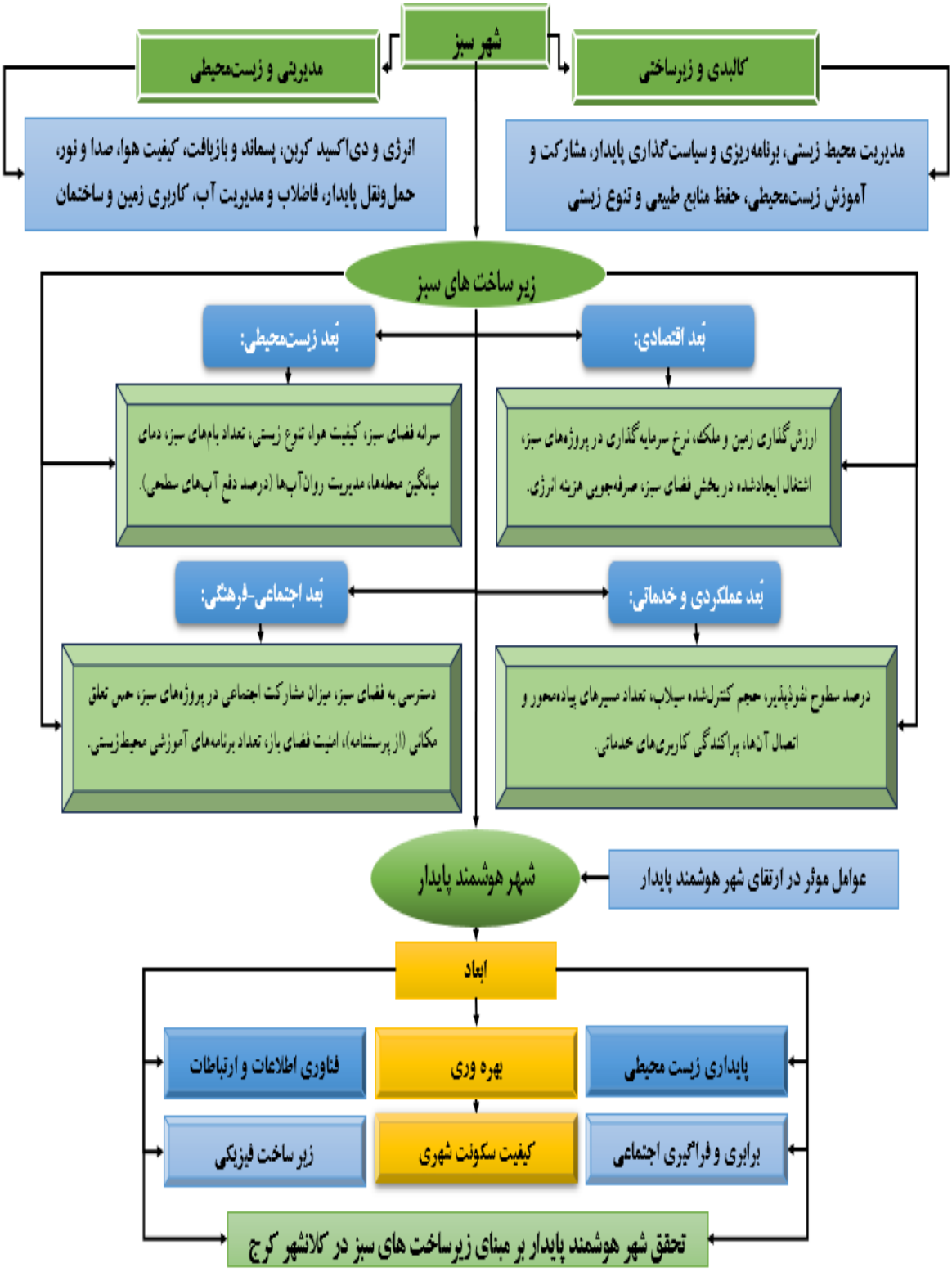
پیشینه پژوهش

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در سطح بین‌المللی و داخلی به بررسی ارتباط میان زیرساخت سبز، شهر هوشمند و پایداری شهری پرداخته‌اند. این بخش با مرور و دسته‌بندی این مطالعات، به دنبال تبیین جایگاه خالی پژوهشی و مشخص کردن نقطه شروع پژوهش حاضر است. در ادامه به بررسی پژوهش‌های داخلی پرداخته می‌شود.

کاظمی و رضایی (۱۴۰۳) در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی تأثیر زیرساخت‌های سبز بر تاب‌آوری شهری در تهران» با استفاده از روش کمی-تحلیلی نشان دادند که این زیرساخت‌ها در افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و بحران‌های طبیعی مؤثر هستند و به نقش فناوری‌های نوین و نیاز به داده‌های هوشمند برای بهبود این ساختارها اشاره کردند.

جمشیدی‌اصل و صحرائی‌نژاد (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان «بازطراحی منظر شهری مناطق متراکم شهری با رویکرد زیرساخت سبز شهری (مطالعه موردی: محله شیخ هادی منطقه ۱۱ شهرداری تهران)» با رویکرد طراحی شهری و بهره‌گیری از مفاهیم اکولوژیکی، به این نتیجه رسیدند که طراحی مجدد فضاهای متراکم با استفاده از اصول زیرساخت سبز، می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی، کاهش آلودگی‌های محیطی و افزایش تعاملات اجتماعی منجر شود.

[1] Tzoulas
[2] Abhijith
[3] Bibri and Krogstie
[4] Yigitcanlar
[5] Alberti
[6] Andersson
[7] Giles-Corti
[8] Barton and Grant
[9] Gascon
[10] Elmqvist



شکل ۲: مدل مفهومی پژوهش

ساسان پور و حاتمی(۱۴۰۲) در کتاب «شهرهای آینده، شهرهای هوشمند پایدار» با مرور ادبیات نظری و تجارب جهانی، چارچوب‌هایی برای درک ابعاد مختلف شهر هوشمند از منظر پایداری ارائه شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که تحقق شهر هوشمند پایدار نیازمند رویکردی یکپارچه در زمینه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فناورانه است. همچنین، تأکید

شده است که فناوری‌های نوین تنها در صورتی می‌توانند به پایداری شهری کمک کنند که با نیازهای بومی، ظرفیت‌های مدیریتی و مشارکت شهروندان هم‌راستا شوند.

فارغ‌زاده و جمشیدی (۱۴۰۰) در پژوهشی با عنوان «شهر هوشمند با رویکرد توسعه پایدار» با استفاده از روش تحلیل اسنادی به این نتیجه رسیدند که تحولات تکنولوژیک به سوی سیستم‌های جهانی حرکت می‌کند و فاصله گرفتن از این سیستم‌ها به معنی کند شدن حرکت کشور در زمینه‌های اقتصادی، فرهنگی، علمی، اجتماعی و به‌ویژه شهرسازی است. آن‌ها تأکید کردند که گرایش‌ها و الگوهای تکامل شهر هوشمند به عوامل زمینه‌ای و محیطی بستگی دارد و بنابراین سیاست‌گذاران باید این عوامل را به‌درستی شناسایی کرده و راهبردهای مناسب برای توسعه شهر هوشمند تدوین کنند. همچنین در تبدیل شهر به شهر هوشمند، نقش تکنولوژی، انسان‌ها، مؤسسات و نهادها بسیار مؤثر است.

محمودی (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان «بررسی وضعیت زیرساخت‌های سبز در تهران و تأثیر آن‌ها بر کیفیت زندگی شهری» از روش پیمایشی بهره گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که زیرساخت‌های سبز نقش مؤثری در کاهش آلودگی هوا، بهبود شرایط زیست‌محیطی و ارتقای سلامت عمومی دارند. همچنین موانع و چالش‌های توسعه این زیرساخت‌ها در تهران مورد توجه قرار گرفت.

کاظمی (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان «شهرهای هوشمند و زیرساخت‌های سبز: تحلیل تجربه تهران» با استفاده از روش کیفی و تحلیلی به بررسی رابطه میان توسعه زیرساخت‌های سبز و اهداف شهرهای هوشمند پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از فناوری‌های هوشمند در مدیریت فضاهای سبز می‌تواند به افزایش تاب‌آوری شهری و کاهش مسائل زیست‌محیطی منجر شود.

در ادامه بررسی پیشینه، به مطالعات خارجی پرداخته می‌شود.

پاتاک [1]و همکاران (۲۰۲۵) در مقاله‌ای با عنوان «شهرهای هوشمند و زیرساخت‌های آبی-سبز: نقش یادگیری ماشین در راهکارهای پایدار» که در کتاب «ادغام زیرساخت‌های آبی-سبز در توسعه شهری» منتشر شده است، بیان می‌کنند که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری زیرساخت‌های شهری شود و راهکارهای هوشمند و پایدار در مدیریت منابع طبیعی ارائه دهد. آن‌ها معتقدند که این ترکیب می‌تواند آینده‌نگری بهتری در مدیریت بحران‌ها و توسعه پایدار فراهم کند.

بومه‌گوادا [2]و شیواپرکاشا (۲۰۲۵) در پژوهشی تحت عنوان «بهره‌گیری از پنل‌های خورشیدی هیبریدی برای راهکارهای انرژی پایدار شهری در زیرساخت آبی-سبز» با رویکرد مهندسی و فنی، کاربرد پنل‌های خورشیدی هیبریدی را در تأمین انرژی پاک شهری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از این فناوری می‌تواند وابستگی به منابع فسیلی را کاهش داده و به توسعه انرژی پاک شهری کمک کند.

باسکار [3]و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی تحت عنوان «شهر هوشمند کوانتومی: ترویج پایداری و زیرساخت سبز در شهر هوشمند» با روش تحلیل محتوا و مرور نظری، به بررسی نقش فناوری‌های نوین مانند محاسبات کوانتومی در بهبود زیرساخت‌های سبز و پایداری شهری پرداختند. نتایج نشان داد که این فناوری‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری زیرساخت‌های شهری کمک کنند.

آواشتی [4]و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی تحت عنوان «تحلیل دقیق طراحی زیرساخت پایدار و مزایای آن برای شهرهای شهری» با استفاده از مرور سیستماتیک منابع، مزایا و اهمیت زیرساخت‌های پایدار را در شهرهای مدرن مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آنها نشان داد که این زیرساخت‌ها باعث بهبود مصرف انرژی، کاهش آلودگی و ارتقای کیفیت زندگی شهری می‌شوند.

ژو [5]و یانگ (۲۰۲۳) در مقاله‌ای با عنوان «نقش زیرساخت‌های سبز در توسعه شهر هوشمند» با استفاده از روش مطالعه موردی نشان دادند که زیرساخت‌های سبز موجب بهبود کیفیت محیط‌زیست، کاهش آلودگی و افزایش تاب‌آوری شهری می‌شوند و استفاده از فناوری‌های هوشمند می‌تواند در ارتقاء عملکرد این زیرساخت‌ها بسیار مؤثر باشد.

---

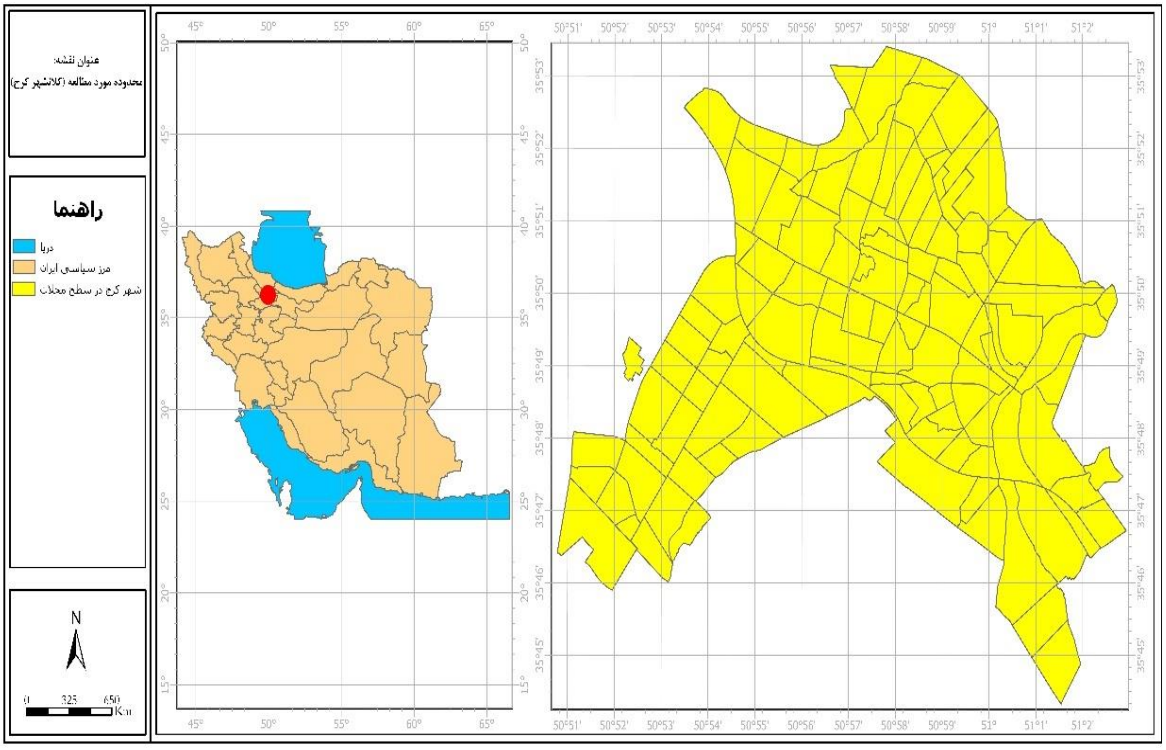
[1] Pathak
[2] Bommegowda and Shivaprakasha
[3] Baskar
[4] Awasthi
[5] Zhou

تسولاس [1]و همکاران (۲۰۰۷) در مقاله‌ای با عنوان «ارتقاء سلامت اکوسیستم و انسان در مناطق شهری با بهره‌گیری از زیرساخت‌های سبز» با مرور ادبیات علمی به این نتیجه رسیدند که زیرساخت‌های سبز نقش مهمی در بهبود سلامت انسان و اکوسیستم‌های شهری دارند و موجب کاهش آلودگی هوا و ارتقاء سلامت جسمی و روانی شهروندان می‌شوند.

در مرور کلی مطالعات گذشته می‌توان دریافت که تمرکز اصلی پژوهش‌ها بر تأثیر زیرساخت‌های سبز بر پایداری شهری، تاب‌آوری در برابر بحران‌ها، بهبود کیفیت سکونت، کاهش آلودگی هوا و استفاده از فناوری‌های هوشمند در مدیریت این زیرساخت‌ها بوده است. با وجود اهمیت این موضوعات، خلأهایی نیز در این حوزه وجود دارد. از جمله اینکه اغلب مطالعات به‌صورت پراکنده به هر یک از ابعاد زیرساخت سبز یا شهر هوشمند پرداخته‌اند و کمتر پژوهشی به شکل منسجم به بررسی نقش فناوری‌های نوین سبز در تحقق شهر هوشمند پایدار پرداخته است .علاوه بر این، به بررسی آمادگی مناطق شهری و تحلیل پیشران‌های کلیدی مؤثر بر موفقیت این پروژه‌ها نیز کمتر توجه شده است. همچنین بسیاری از تحقیقات بر وضعیت موجود متمرکز بوده و به تحلیل راهکارهای تلفیقی و آینده‌نگرانه نپرداخته‌اند. پژوهش حاضر در تلاش است تا با تمرکز بر ویژگی‌های فناورانه زیرساخت‌های سبز، پیوندی میان آن‌ها و دستیابی به شهر هوشمند پایدار برقرار کرده و ضمن بررسی آمادگی مناطق و تحلیل پیشران‌های کلیدی، خلأ موجود در مطالعات میان‌رشته‌ای و کاربردی را پوشش دهد.

معرفی محدوده مورد مطالعه

کلان‌شهر کرج به عنوان یکی از قطب‌های جمعیتی کشور، با چالش‌های جدی در حوزه زیرساخت‌های سبز روبرو است. سرانه فضای سبز در این شهر با جمعیتی بالغ بر ۱/۵ میلیون نفر، تنها حدود ۱/۱۵ متر مربع به ازای هر نفر است که این امر، به همراه نابرابری شدید در توزیع آن، شهر را در برابر بحران‌هایی نظیر آلودگی هوا و سیلاب آسیب‌پذیر کرده است (شهرداری کرج، ۱۳۹۵). بنابراین، کرج به عنوان مطالعه موردی ایده‌آلی برای تحقیق حاضر انتخاب شده است تا بتوان تأثیر زیرساخت‌های سبز را در حرکت به سوی شهر هوشمند پایدار بررسی و مناطق آماده برای این تحول شناسایی نمود.



شکل ۳: محدوده مورد مطالعه پژوهش (کلانشهر کرج)

[1] Tzoulas

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر نوع (روش)، توصیفی-تحلیلی است. داده‌های پژوهش از طریق روش میدانی، اسنادی و کتابخانه‌ای گردآوری شده اند. در ابتدا، منابع داخلی و بین‌المللی مرتبط با زیرساخت‌های سبز و شهر هوشمند پایدار بررسی گردیده و مفاهیم، تعاریف، ابعاد، شاخص‌ها، عناصر و راهبردهای مدیریتی استخراج خواهند شد. سپس اطلاعات مورد نیاز از طریق فیش‌برداری علمی گردآوری، تحلیل و تبیین شده و در نهایت، نتایج پژوهش تدوین گردید. در مرحله میدانی، نمونه آماری پژوهش، شامل ۳۰ نفر از کارشناسان، متخصصان و مدیران حوزه‌های شهرسازی، محیط‌زیست و برنامه‌ریزی شهری در کلان‌شهر کرج است که به صورت هدفمند از شهرداری کرج، سازمان حفاظت محیط زیست استان البرز و دانشگاه‌های البرز از جمله دانشگاه خوارزمی واحد کرج، انتخاب شده‌اند. برای جمع‌آوری داده‌های میدانی، از پرسشنامه‌ای پاسخ بسته استفاده شد که روایی آن توسط خبرگان و پایایی آن از طریق ضریب آلفای کرونباخ (بیشتر از ۰/۷) به تأیید رسید. به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، از ترکیبی از روش‌های آماری و تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره گرفته شده است. در بخش تصمیم‌گیری، از روش کوکوسو[۱] استفاده شده و برای تحلیل روابط ساختاری میان شاخص‌ها و تعیین متغیرهای کلیدی، از تحلیل ساختاری اثر متقابل (میک مک[۲]) بهره گرفته شد. در این راستا، ابتدا ۲۴ متغیر کلیدی شناسایی و از طریق پرسشنامه در اختیار خبرگان قرار گرفت. سپس، ماتریس اثرات متقابل متغیرها تهیه و در نرم‌افزار میک‌مک تحلیل گردید تا متغیرهای کلیدی بر اساس میزان اثرگذاری و اثرپذیری شناسایی و در نقشه پراکندگی دسته‌بندی شوند. همچنین در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار جی آی اس[۳] برای تهیه نقشه محدوده مورد مطالعه (کلان‌شهر کرج) استفاده شد.

بحث و یافته‌های پژوهش

مشخصات توصیفی جامعه آماری این پژوهش، متشکل از ۳۰ نفر از متخصصان و خبرگان، حاکی از ترکیبی متنوع و متعادل است. از نظر جنسیت، ۱۶ نفر مرد و ۱۴ نفر زن بودند که نماینده‌ای گسترده از دیدگاه‌های تخصصی را شامل می‌شود. گروه سنی ۳۰-۴۰ سال با ۱۳ نفر، بیشترین فراوانی را در میان شرکت‌کنندگان داشت که نشان‌دهنده تسلط متخصصان میانسال بر موضوع است. سطح تحصیلات پاسخگویان نیز بالاتر از حد متوسط بود؛ به طوری که ۷ نفر دارای مدارک تحصیلات تکمیلی (فوق لیسانس و دکتری) بودند. از نظر وضعیت شغلی، نمونه آماری ترکیبی از نظریه و عمل را به نمایش می‌گذارد؛ به طوری که پژوهشگران شهری (۱۴ نفر)، کارمندان شهرداری (۱۱ نفر) و اعضای هیئت علمی (۷ نفر) اصلی‌ترین گروه‌ها را تشکیل می‌دادند. این ترکیب اعتبار و قابلیت تعمیم نتایج پژوهش را در تقاطع دانش آکادمیک و تجربه عملی تقویت می‌کند.

یافته های حاصل از بررسی نرم افزار میک مک[۴]

به منظور درک روابط پیچیده و درهم‌تنیده میان متغیرهای مؤثر بر تحقق شهر هوشمند پایدار از طریق زیرساخت‌های سبز در کلان‌شهر کرج، از روش تحلیل ساختاری و نرم‌افزار میک مک استفاده شد. در این راستا، ۲۴ متغیر کلیدی شناسایی‌شده در قالب یک ماتریس ۲۴×۲۴ دسته‌بندی و پس از دو مرحله تکرار، تحلیل گردید. نتایج اولیه حاکی از وجود یک شبکه ارتباطی بسیار متراکم است؛ به طوری که از مجموع ۴۶۹ ارتباط ممکن، ۲۴۷ مورد ضعیف، ۱۵۷ مورد متوسط و ۶۵ مورد قوی ارزیابی شد. نکته قابل توجه، تعداد بالای روابط قوی در مقایسه با روابط ضعیف‌تر است که نشان‌دهنده وجود تأثیرات مستقیم و قابل‌توجه میان بسیاری از متغیرهای سیستم است. نرخ پرشدگی ماتریس نیز ۸۱/۴۲ درصد محاسبه شد که این تراکم بالای ارتباطات را تأیید کرده و بیانگر آن است که سیستم مورد مطالعه، سیستمی به شدت درهم‌تنیده است. همچنین، هیچ متغیری فاقد اثرگذاری مستقیم (P=0) شناسایی نشد که این امر بر اهمیت همگی عوامل در ساختار کلان تأکید دارد. این یافته بر این نکته تأکید

---

[۱] CoCoSo
[۲] MICMAC
[۳] Arc GIS
[۴] MICMAC

می‌کند که هرگونه مداخله در یکی از ابعاد زیرساخت سبز یا عوامل هوشمندسازی، به دلیل وابستگی متقابل، لزوماً بر سایر ابعاد نیز تأثیرگذار خواهد بود.

جدول ۲: ویژگی‌های ماتریس تحلیل میک‌مک

ویژگی‌های ماتریس	مقدار
اندازه ماتریس	۲۴
تعداد تکرارها	۲
تعداد صفرها	۱۰۷
(۱) تعداد روابط ضعیف	۲۴۷
تعداد روابط متوسط (۲)	۱۵۷
تعداد روابط قوی (۳)	۶۵
مجموع ارتباطات	۴۶۹
نرخ پرشدگی ماتریس	٪۸۱,۴۲

امتیاز متغیرها در دو بعد اثرگذاری و اثرپذیری

بر اساس تحلیل ساختاری و خروجی نرم‌افزار میک مک، امتیاز هر یک از متغیرها در دو بعد اثرگذاری و اثرپذیری محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که این متغیرها در تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج، نه به صورت منفرد، بلکه در قالب یک شبکه پیچیده از تعاملات متقابل عمل می‌کنند. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، برخی متغیرها نقش پیشران و محرک اصلی را ایفا می‌کنند؛ به‌ویژه سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز (اثرگذاری: ۴۲)، کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک (اثرگذاری: ۴۰)، تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز (اثرگذاری: ۴۰) و زیرساخت‌های مدیریت آب باران (اثرگذاری: ۳۹) به‌عنوان کلیدی‌ترین عوامل اثرگذار شناسایی شدند. این متغیرها می‌توانند موتور محرک فرآیند توسعه پایدار باشند و سیاست‌گذاری‌ها باید با اولویت بر آن‌ها متمرکز شوند. در بُعد مقابل، متغیرهایی مانند سیاست‌گذاری‌های شهرداری و مشوق‌ها (اثرپذیری: ۴۱)، شبکه یکپارچه فضاهای سبز (اثرپذیری: ۳۸) و زیرساخت‌های سبز ساختمانی (اثرپذیری: ۳۸) بیشترین میزان وابستگی به سایر عوامل را دارند. این متغیرها در واقع نتایج تحولات در سایر حوزه‌ها محسوب می‌شوند و به شدت تحت تأثیر تغییرات در زیرساخت‌ها قرار می‌گیرند.

شناسایی متغیرهایی که همزمان اثرگذاری و اثرپذیری بالایی دارند، یک یافته کلیدی محسوب می‌شود. سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی (اثرگذاری: ۳۷، اثرپذیری: ۳۹) و تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز (اثرگذاری: ۴۰، اثرپذیری: ۳۷) نمونه‌های بارزی از این دست هستند. وجود این متغیرها نشان‌دهنده حلقه‌های بازخوردی قدرتمند در سیستم است؛ برای مثال، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سبز، تقاضای بازار را افزایش می‌دهد و این تقاضای رو به رشد، به نوبه خود جذب سرمایه‌گذاری‌های جدید را تسهیل می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در کلان‌شهر کرج، متغیرهای مرتبط با زیرساخت‌های فیزیکی خاص (مانند سطوح نفوذپذیر)، عوامل اقتصادی (تقاضای بازار) و راهکارهای فنی (مدیریت آب باران) نقش پیشران را ایفا می‌کنند، در حالی‌که متغیرهای کلان‌تر حاکمیتی و کالبدی (مانند سیاست‌گذاری‌ها و شبکه فضای سبز) بیشتر نقش پیامدی دارند.

جدول ۳: میزان اثرپذیری و اثرگذاری متغیرها

ردیف	متغیرها	(اثرگذاری) جمع ردیف‌ها	(اثرپذیری) جمع ستون‌ها
۱	شبکه یکپارچه فضاهای سبز	۳۰	۳۸
۲	زیرساخت‌های سبز ساختمانی	۳۲	۳۸
۳	زیرساخت‌های مدیریت آب باران	۳۹	۲۹
۴	کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک	۴۰	۳۱
۵	سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز	۴۲	۲۲
۶	پایش و سنجش هوشمند	۲۴	۳۲

ردیف	متغیرها	(اثرگذاری) جمع ردیف‌ها	(اثرپذیری) جمع ستون‌ها
۷	پلتفرم‌های تحلیل داده و مدیریت متمرکز	۲۷	۳۵
۸	سیستم‌های کنترل و بهینه‌سازی خودکار	۳۲	۳۵
۹	ابزارهای مشارکت شهروندان	۲۸	۳۳
۱۰	بهبود کیفیت هوا	۳۰	۲۸
۱۱	مدیریت پایدار منابع آب و انرژی	۲۸	۳۵
۱۲	کاهش اثر جزیره گرمایی شهری	۳۰	۲۴
۱۳	افزایش تاب‌آوری در برابر بحران‌ها	۳۱	۳۰
۱۴	ارتقای سلامت عمومی و رفاه	۱۹	۲۴
۱۵	کاهش آلودگی صوتی	۳۰	۲۷
۱۶	ایجاد عدالت اجتماعی و دسترسی عادلانه	۳۵	۳۰
۱۷	تقویت اقتصاد سبز و اشتغال‌زایی	۲۸	۲۸
۱۸	سیاست‌گذاری‌های شهرداری و مشوق‌ها	۲۷	۴۱
۱۹	سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی	۳۷	۳۹
۲۰	آگاهی، فرهنگ عمومی و تقاضای اجتماعی	۳۲	۳۵
۲۱	هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه	۳۵	۳۰
۲۲	دسترسی به فناوری و نیروی انسانی متخصص	۲۶	۲۷
۲۳	چارچوب‌های قانونی و مقرراتی	۳۴	۲۸
۲۴	تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز	۴۰	۳۷
مجموع	-	۷۵۶	۷۵۶

مأخذ: نگارندگان.

پراکندگی متغیرها و تحلیل نواحی

نقشه پراکندگی متغیرها که در نرم‌افزار میک مک ترسیم گردیده است (شکل ۴)، یک درک بصری و استراتژیک از نقش هر یک از عوامل در سیستم تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج ارائه می‌دهد. این نقشه، متغیرها را بر اساس میزان اثرگذاری (محور افقی) و اثرپذیری (محور عمودی) در چهار ناحیه مجزا دسته‌بندی می‌کند که هر کدام معنای خاصی برای سیاست‌گذاری دارند.

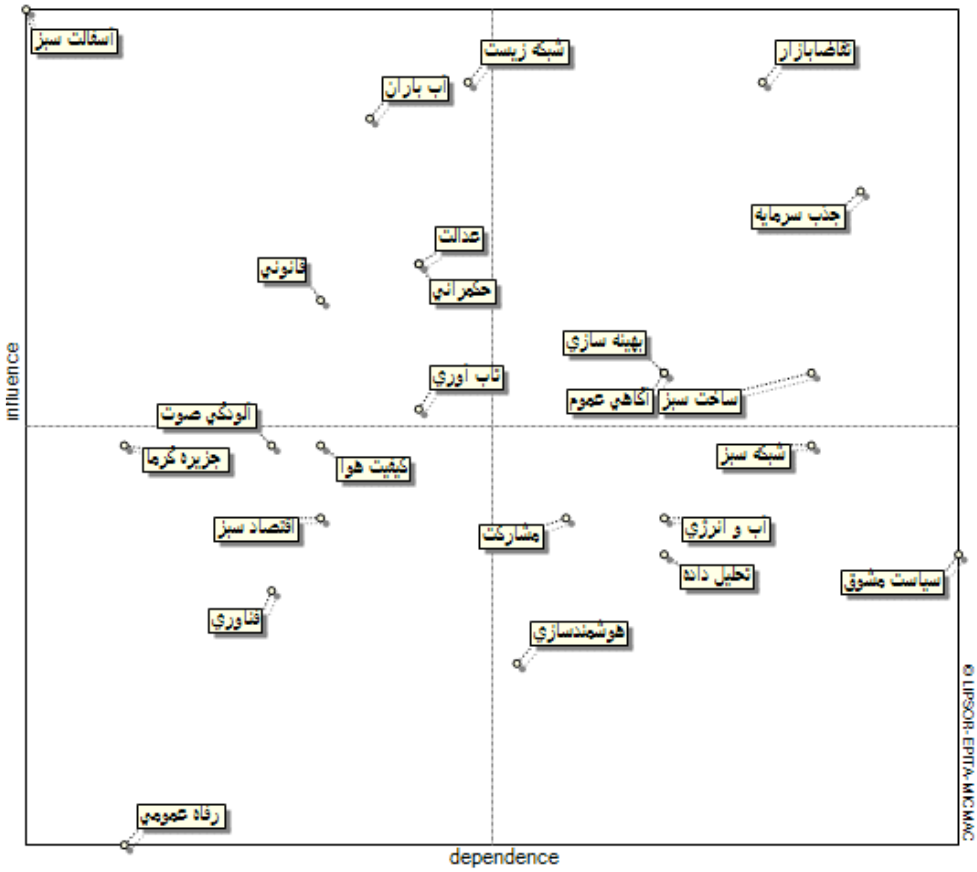
ناحیه اول: متغیرهای مستقل و اثرگذار بالا (پیشران‌های اصلی) این ناحیه (گوشه بالا و چپ نقشه) شامل متغیرهایی است که بیشترین قدرت برای تغییر سیستم را دارند و کمتر تحت تأثیر سایر عوامل قرار می‌گیرند. این متغیرها، اهرم‌های اصلی سیاست‌گذاری و مداخله هستند. بر اساس نقشه، مهم‌ترین پیشران‌ها عبارتند از: سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز (۵)، کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک (۴)، زیرساخت‌های مدیریت آب باران (۳)، تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز (۲۴)، ایجاد عدالت اجتماعی و دسترسی عادلانه (۱۶)، هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه (۲۱)، چارچوب‌های قانونی و مقرراتی (۲۳). این یافته نشان می‌دهد که حرکت به سوی شهر هوشمند پایدار در کرج، بیش از آنکه به نتایج نهایی وابسته باشد، به مداخلات بنیادین در زیرساخت‌های فیزیکی سبز و تقویت ساختارهای حاکمیتی، قانونی و اجتماعی بستگی دارد.

ناحیه دوم: متغیرهای کلیدی با اثرگذاری و اثرپذیری بالا (قلب تپنده سیستم) این ناحیه (گوشه بالا و راست نقشه) قلب تپنده و حساس‌ترین بخش سیستم است. متغیرهای این بخش همزمان اثرگذار و اثرپذیر هستند و هر تغییری در آن‌ها می‌تواند به سرعت در کل سیستم انتشار یابد. متغیرهای کلیدی عبارتند از: سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی (۱۹)، زیرساخت‌های سبز ساختمانی (۲)، شبکه یکپارچه فضاهای سبز (۱)، آگاهی، فرهنگ عمومی و تقاضای اجتماعی (۲۰)، سیستم‌های کنترل و بهینه‌سازی خودکار (۸)، پلتفرم‌های تحلیل داده و مدیریت متمرکز (۷)، مدیریت پایدار منابع آب و انرژی (۱۱)، ابزارهای مشارکت شهروندان (۹)

تمرکز این متغیرها در حوزه تأمین مالی، فناوری‌های هوشمند و پیامدهای کالبدی نشان می‌دهد که این عوامل، پل ارتباطی میان پیشران‌های ناحیه اول و نتایج نهایی هستند. موفقیت در این ناحیه، تضمین‌کننده تبدیل سیاست‌های کلان به دستاوردهای ملموس شهری است.

ناحیه سوم: متغیرهای اثرپذیر بالا (متغیرهای نتیجه) این ناحیه (گوشه پایین و راست) شامل متغیرهایی است که عمدتاً پیامد و نتیجه اقدامات در سایر نواحی هستند. این متغیرها برای ارزیابی موفقیت سیاست‌ها حیاتی‌اند. مهم‌ترین متغیرهای نتیجه عبارتند از: سیاست‌گذاری‌های شهرداری و مشوق‌ها (۱۸)، پایش و سنجش هوشمند (۶)، دسترسی به فناوری و نیروی انسانی متخصص (۲۲)، بهبود کیفیت هوا (۱۰)، کاهش اثر جزیره گرمایی شهری (۱۲)، کاهش آلودگی صوتی (۱۵)، افزایش تاب‌آوری در برابر بحران‌ها (۱۳)، ارتقای سلامت عمومی و رفاه (۱۴). این نتایج نشان می‌دهد که اهداف نهایی مانند "کیفیت هوا" و "تاب‌آوری" بیشتر از آنکه یک علت باشند، یک معلول و پیامد مستقیم سیاست‌گذاری در حوزه‌های دیگر هستند. نکته تحلیلی بسیار مهم، قرار گرفتن "سیاست‌گذاری‌های شهرداری" در این ناحیه است که بیانگر آن است که در مدل فعلی، سیاست‌ها بیشتر واکنشی به پیشران‌های دیگر هستند تا اینکه خود پیشران اصلی محسوب شوند.

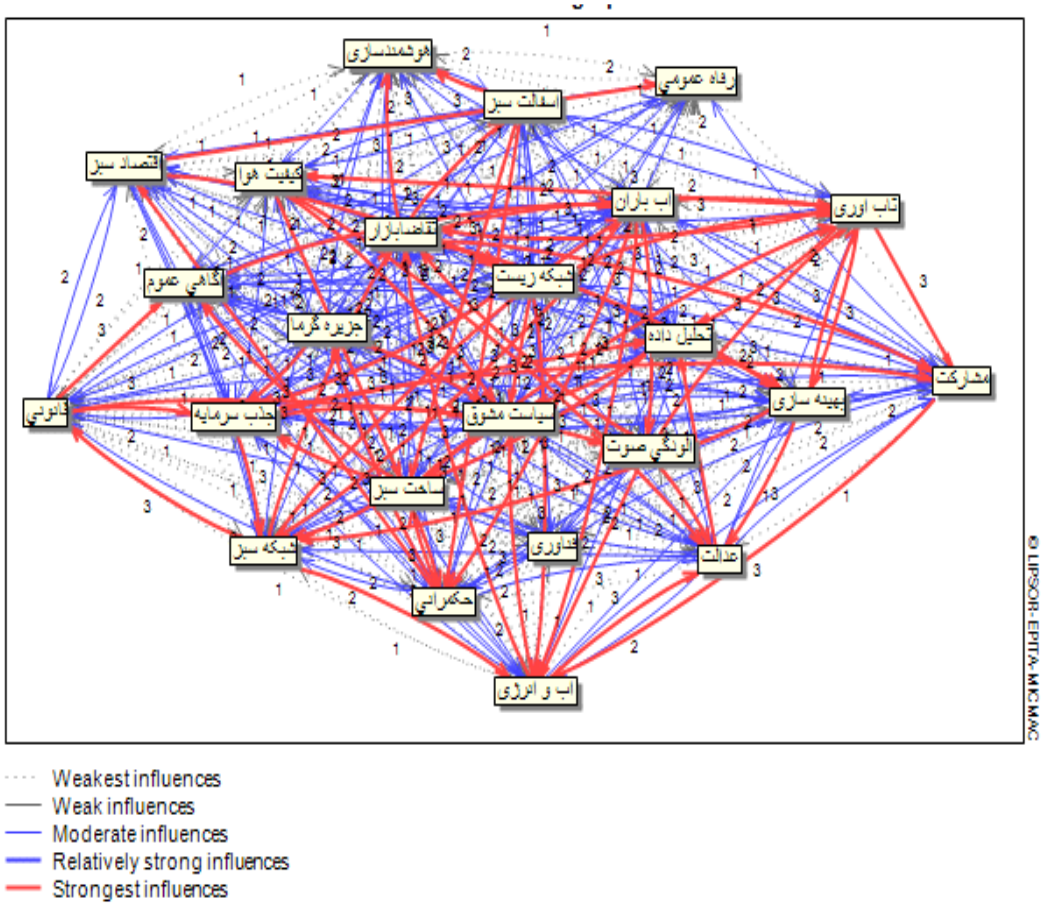
ناحیه چهارم: متغیرهای خودمختار یا کم‌اثر (عناصر منفعل) نکته قابل توجه، خالی بودن این ناحیه از متغیرهاست. این یافته نشان می‌دهد که سیستم مورد مطالعه، سیستمی کاملاً یکپارچه و درهم‌تنیده است و هیچ‌یک از متغیرهای شناسایی‌شده، منفعل یا بی‌اثر نیستند. این امر بر اهمیت رویکرد سیستمی و لزوم توجه به هم‌افزایی میان تمام عوامل در فرآیند برنامه‌ریزی برای کلان‌شهر کرج تأکید دارد.



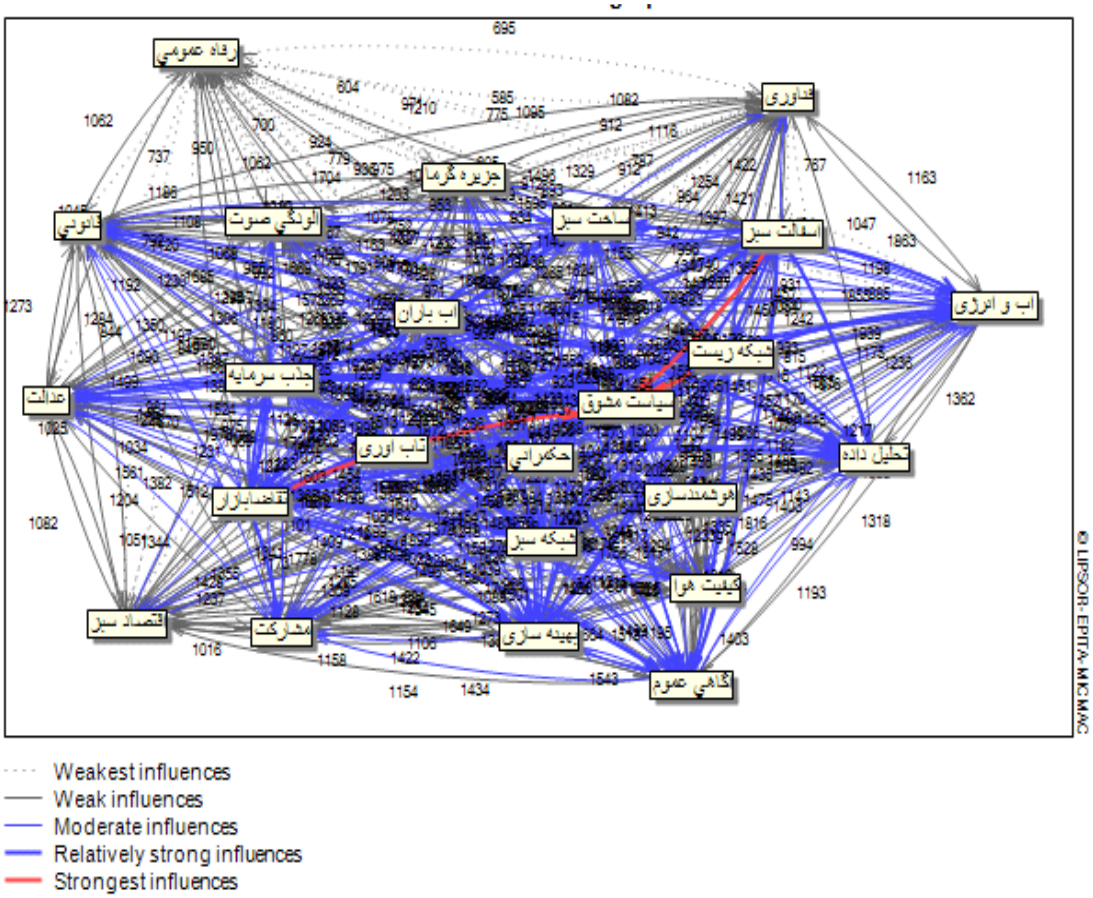
شکل ۴: موقعیت متغیرها بر روی نقشه به صورت مستقیم (مأخذ: محاسبات نگارندگان).

نمودار اثرگذاری مستقیم و غیر مستقیم

تحلیل نمودارهای اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم (شکل‌های ۵ و ۶) یک تصویر یکپارچه از سیستم تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج ارائه می‌دهد. هر دو نمودار، شبکه‌ای بسیار پیچیده و درهم‌تنیده را نشان می‌دهند که در آن چهار متغیر به عنوان پیشران‌های کلیدی و گره‌های اصلی (هاب‌ها) عمل می‌کنند: سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی (۱۹)، سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز (۵)، کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک (۴) و هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه (۲۱). این متغیرها که به ترتیب اهرم‌های مالی، فیزیکی و حاکمیتی سیستم هستند، بیشترین تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم را بر سایر عوامل دارند. در مقابل، متغیرهایی نظیر شبکه یکپارچه فضاهای سبز (۱)، سیاست‌گذاری‌های شهرداری (۱۸)، بهبود کیفیت هوا (۱۰) و افزایش تاب‌آوری (۱۳) به عنوان پیامدها و نتایج کلیدی سیستم شناسایی شدند که کیفیت آن‌ها به شدت به عملکرد پیشران‌های اصلی وابسته است. این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که برای ایجاد تغییرات پایدار در کرج، سیاست‌گذاری باید بر این چهار پیشران کلیدی متمرکز شود.



شکل ۵: گراف اثرگذاری مستقیم متغیرها(مأخذ: محاسبات نگارندگان).



شکل ۶: گراف اثر گذاری غیر مستقیم متغیرها(مأخذ: محاسبات نگارندگان).

شناسایی و تحلیل پیشران‌های کلیدی

در مرحله پایانی تحلیل میک‌مک، مهمترین متغیرهایی که دارای اثرگذاری بالایی بر فرآیند تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج هستند، شناسایی شدند. این متغیرها که بر اساس امتیاز اثرگذاری (جمع ردیف‌ها) انتخاب شده‌اند، به عنوان پیشران‌های کلیدی جهت تحلیل‌های بعدی و ارائه راهکارهای سیاستی معرفی می‌گردند.

جدول ۴: پیشران‌های کلیدی تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج

ردیف	پیشران‌های کلیدی	میزان اثرگذاری
۱	زیرساخت‌های مدیریت آب باران	۳۹
۲	کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک	۴۰
۳	سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز	۴۲
۴	تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز	۴۰
۵	سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی	۳۷
۶	هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه	۳۵
۷	ایجاد عدالت اجتماعی و دسترسی عادلانه[1]	۳۵

مأخذ: محاسبات نگارندگان.

[1] امتیازهای مساوی نشان‌دهنده اهمیت یکسان متغیرها در رتبه‌بندی است

نتایج نشان می‌دهد که این هفت متغیر، بیشترین اثرگذاری را بر سایر مؤلفه‌های سیستم دارند و از همین رو می‌توانند به عنوان محرک‌های اصلی تدوین سیاست‌گذاری‌ها و راهبردهای آینده‌نگرانه در مسیر تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج مورد استفاده قرار گیرند. تحلیل این پیشران‌ها نکات کلیدی زیر را آشکار می‌سازد.

تسلط زیرساخت‌های فیزیکی و اکولوژیک: سه متغیر برتر (سطوح نفوذپذیر، کریدورهای زیستی و مدیریت آب باران) همگی به لایه‌های فیزیکی و بنیادی زیرساخت سبز مربوط می‌شوند. این یافته نشان می‌دهد که اقدامات عملی و ساختاری، قدرتمندترین اهرم‌ها برای تغییر سیستم در کرج هستند.

نقش حیاتی تأمین مالی و حکمرانی: متغیر "سرمایه‌گذاری" و "هماهنگی بین‌سازمانی" تأیید می‌کنند که بدون تخصیص منابع مالی کافی و یک مدیریت یکپارچه، اجرای پروژه‌های فیزیکی ممکن نخواهد بود.

اهمیت عوامل اجتماعی و بازار: متغیرهایی مانند "عدالت اجتماعی" و "تقاضای بازار" نیز در بالاترین سطح اثرگذاری قرار دارند. این نشان می‌دهد که موفقیت پروژه‌ها به شدت به پذیرش اجتماعی، توزیع عادلانه منافع و وجود تقاضای واقعی در بازار وابسته است. بنابراین، تحلیل میک مک، به وضوح نشان می‌دهد که راهبرد موفق برای تحقق شهر هوشمند پایدار در کرج، یک رویکرد یکپارچه است که همزمان بر ساخت زیرساخت‌های فیزیکی، تأمین مالی پایدار، تقویت حکمرانی و تضمین عدالت اجتماعی تمرکز دارد. این پیشران‌ها، نقاط کلیدی هستند که سیاست‌گذاری متمرکز بر آن‌ها می‌تواند بیشترین اثربخشی را در کل سیستم شهری کرج به همراه داشته باشد و مسیر توسعه را به شکل معناداری تسریع کند.

نتایج حاصل از تکنیک کوکوسو

به منظور رتبه‌بندی نواحی ۱۱ گانه کلان‌شهر کرج از منظر آمادگی برای پیاده‌سازی زیرساخت سبز هوشمند، از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره کوکوسو استفاده شد. در گام اول، ماتریس تصمیم اولیه بر اساس ارزیابی خبرگان از عملکرد هر منطقه (گزینه‌ها) بر اساس ۷ پیشران کلیدی (معیارها) که پیش‌تر از تحلیل میک‌مک استخراج شده بود، تشکیل گردید. این ماتریس، که در جدول ۵ ارائه شده، داده‌های ورودی را برای مراحل بعدی تحلیل فراهم می‌آورد.

جدول ۵: ماتریس تصمیم کوکوسو

*	زیرساخت‌های مدیریت آب باران	کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک	سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز	تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز	سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی	هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه	ایجاد عدالت اجتماعی و دسترسی عادلانه
N1	۲/۰۰	۵/۵۰	۵/۷۵	۰/۰۸	۲/۰۰	۴/۲۵	۲/۲۵
N2	۰/۷۵	۴/۲۵	۳/۰۰	۳/۵۰	۱/۷۵	۲/۵۰	۳/۲۵
N3	۴/۷۵	۵/۵۰	۳/۷۵	۴/۵۰	۳/۲۵	۳/۰۰	۲/۷۵
N4	۲/۲۵	۳/۵۰	۲/۵۰	۶/۰۰	۵/۷۵	۴/۷۵	۴/۵۰
N5	۲/۷۵	۲/۵۰	۳/۵۰	۱/۷۵	۶/۲۵	۴/۵۰	۴/۷۵
N6	۴/۵۰	۳/۵۰	۲/۵۰	۴/۵۰	۴/۵۰	۴/۵۰	۰/۰۲
N7	۴/۳۳	۲/۰۰	۲/۶۷	۲/۰۰	۱/۰۰	۳/۳۳	۲/۰۰
N8	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۰/۵۰	۰/۰۲	۲/۵۰	۲/۵۰
N9	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۰/۰۳	۲/۵۰	۰/۵۰
N10	۳/۰۰	۲/۰۰	۴/۰۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۳/۵۰	۰/۰۸
N11	۰/۶۷	۳/۵۷	۳/۰۹	۲/۶۲	۰/۵۰	۱/۵۷	۲/۶۱
جهت معیار	+	−	+	+	+	+	+
max	۴/۷۵	۵/۵۰	۵/۷۵	۶/۰۰	۶/۲۵	۴/۷۵	۴/۷۵
min	۰/۶۷	۲/۰۰	۲/۵۰	۰/۰۸	۰/۰۲	۱/۵۷	۰/۰۲
max-min	۴/۰۸	۳/۵۰	۳/۲۵	۵/۹۳	۶/۲۳	۳/۱۸	۴/۷۳

مأخذ: محاسبات نگارندگان.

در گام دوم، با توجه به اینکه تمامی پیشران‌های شناسایی‌شده (مانند سرمایه‌گذاری، حکمرانی و تقاضای بازار) از نوع مثبت هستند (مقدار بیشتر، مطلوب‌تر است)، از رابطه استاندارد نرمال‌سازی برای همگی استفاده شد. این فرآیند، تمام مقادیر را به بازه [۰, ۱] تبدیل کرد و یک ماتریس نرمال‌شده ایجاد نمود که برای مراحل بعدی محاسبات وزن‌دار در تکنیک کوکوسو آماده بود.

جدول ۶: محاسبه مقادیر s

*	زیرساخت‌های مدیریت آب باران	کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک	سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز	تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز	سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی	هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه	ایجاد عدالت اجتماعی و دسترسی عادلانه	S
N1	۰/۰۵۶	۰/۰۰۰	۰/۱۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۳	۰/۱۱۳	۰/۰۴۶	۰/۳۵۸
N2	۰/۰۰۳	۰/۰۲۰	۰/۰۱۷	۰/۱۸۸	۰/۰۲۹	۰/۰۳۹	۰/۰۶۷	۰/۳۶۴
N3	۰/۱۷۱	۰/۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۲۴۳	۰/۰۵۴	۰/۰۶۰	۰/۰۵۶	۰/۶۲۷
N4	۰/۰۶۶	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰	۰/۳۲۶	۰/۰۹۶	۰/۱۳۴	۰/۰۹۳	۰/۷۴۷
N5	۰/۰۸۷	۰/۰۴۹	۰/۰۳۴	۰/۰۹۲	۰/۱۰۵	۰/۱۲۳	۰/۰۹۸	۰/۵۸۸
N6	۰/۱۶۰	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰	۰/۲۴۳	۰/۰۷۵	۰/۱۲۳	۰/۰۰۰	۰/۶۳۵
N7	۰/۱۵۳	۰/۰۵۷	۰/۰۰۶	۰/۱۰۶	۰/۰۱۶	۰/۰۷۴	۰/۰۴۱	۰/۴۵۳
N8	۰/۰۷۷	۰/۰۴۹	۰/۰۰۰	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰	۰/۰۳۹	۰/۰۵۱	۰/۲۳۹
N9	۰/۰۷۷	۰/۰۴۹	۰/۰۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۰۰	۰/۰۳۹	۰/۰۱۰	۰/۳۰۸
N10	۰/۰۹۸	۰/۰۵۷	۰/۰۵۱	۰/۱۳۳	۰/۰۴۲	۰/۰۸۱	۰/۰۰۱	۰/۴۶۳
N11	۰/۰۰۰	۰/۰۳۱	۰/۰۲۰	۰/۱۴۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۵۴	۰/۲۵۳

مأخذ: محاسبات نگارندگان.

جدول ۷: محاسبه مقادیر P

*	زیرساخت‌های مدیریت آب باران	کریدورهای زیستی و شبکه‌های اکولوژیک	سطوح نفوذپذیر و آسفالت‌های سبز	تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز	سرمایه‌گذاری عمومی و جذب سرمایه خصوصی	هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه	ایجاد عدالت اجتماعی و دسترسی عادلانه	P
N1	۰/۸۲۶	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۸۸۷	۰/۹۷۷	۰/۹۲۹	۲/۷۱۳
N2	۰/۵۱۴	۰/۹۴۳	۰/۸۱۳	۰/۸۳۷	۰/۸۷۴	۰/۸۴۸	۰/۹۶۳	۳/۹۸۲
N3	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۰۰	۰/۹۰۹	۰/۹۳۴	۰/۸۹۹	۰/۹۴۸	۳/۷۴۳
N4	۰/۸۵۱	۰/۹۶۹	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۹۱	۱/۰۰۰	۰/۹۹۵	۳/۸۱۱
N5	۰/۸۹۱	۰/۹۹۱	۰/۸۷۸	۰/۶۶۳	۱/۰۰۰	۰/۹۸۹	۱/۰۰۰	۴/۴۲۳
N6	۰/۹۸۹	۰/۹۶۹	۰/۰۰۰	۰/۹۰۹	۰/۹۶۶	۰/۹۸۹	۰/۰۰۰	۳/۸۳۳
N7	۰/۹۸۲	۱/۰۰۰	۰/۷۲۰	۰/۶۹۳	۰/۸۲۴	۰/۹۲۴	۰/۹۱۸	۴/۲۱۹
N8	۰/۸۷۲	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰	۰/۴۲۴	۰/۰۰۰	۰/۸۴۸	۰/۹۳۹	۲/۲۸۷
N9	۰/۸۷۲	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰	۰/۷۴۸	۰/۴۷۴	۰/۸۴۸	۰/۸۰۰	۳/۰۸۵
N10	۰/۹۰۹	۱/۰۰۰	۰/۹۱۸	۰/۷۴۸	۰/۹۰۸	۰/۹۳۵	۰/۶۵۲	۴/۴۸۳
N11	۰/۰۰۰	۰/۹۶۷	۰/۸۲۸	۰/۷۵۹	۰/۷۶۵	۰/۰۰۰	۰/۹۴۳	۳/۳۱۹

مأخذ: محاسبات نگارندگان.

در بخش بعدی، امتیاز نهایی هر یک از گزینه‌ها (نواحی ۱۱ گانه کرج) بر اساس سه استراتژی ترکیبی محاسبه شد تا ارزیابی جامعی حاصل گردد: استراتژی اول؛ میانگین امتیازات S_i (از مدلWSM و) P_i (از مدلWPM) برای ارائه یک دیدگاه متعادل از عملکرد کلی مناطق. استراتژی دوم؛ مقایسه عملکرد هر منطقه با بهترین منطقه به منظور سنجش فاصله تا وضعیت ایده‌آل و شناسایی شکاف‌ها.

استراتژی سوم؛ مصالحه با ضریب لاندا (λ=0.5) برای ترکیب هوشمندانه مدل‌های WSM و WPM با وزنی برابر. خروجی این گام، سه مجموعه امتیاز نهایی برای هر منطقه بود که در گام بعدی برای رتبه‌بندی نهایی ترکیب شدند.

جدول ۸: نمره ارزیابی مناطق یازده گانه کلانشهر کرج برا اساس ۳ استراتژی مدل کوکوسو

مناطق ارزیابی	Ka	Kb	Kc
منطقه ۱	۰/۲۶۱	۲/۰۰۰	۰/۵۹۴
منطقه ۲	۰/۳۶۹	۲/۴۸۳	۰/۸۴۱
منطقه ۳	۰/۳۷۱	۳/۱۳۰	۰/۸۴۵
منطقه ۴	۰/۳۸۷	۳/۴۸۹	۰/۸۸۲
منطقه ۵	۰/۴۲۵	۳/۲۷۰	۰/۹۶۹
منطقه ۶	۰/۳۷۹	۳/۱۸۳	۰/۸۶۴
منطقه ۷	۰/۳۹۶	۲/۸۲۰	۰/۹۰۴
منطقه ۸	۰/۲۱۴	۱/۵۱۰	۰/۴۸۹
منطقه ۹	۰/۲۸۸	۱/۹۹۶	۰/۶۵۶
منطقه ۱۰	۰/۴۲۰	۲/۹۴۳	۰/۹۵۶
منطقه ۱۱	۰/۳۰۳	۱/۹۲۸	۰/۶۹۱

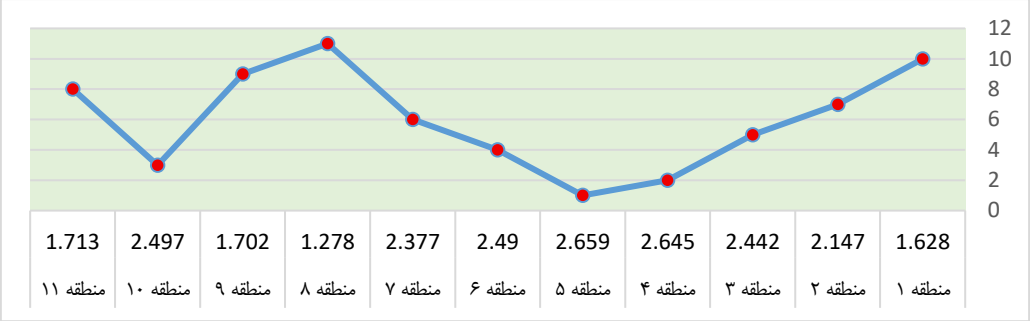
مأخذ: محاسبات نگارندگان.

گام بعدی یعنی (تعیین امتیاز نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها) نقطه عطف نهایی در تحلیل کوکوسو است و به تعیین امتیاز نهایی و رتبه‌بندی قطعی نواحی ۱۱ گانه کرج اختصاص دارد. در این بخش، امتیاز نهایی هر منطقه (k_i) بر اساس یک رابطه ترکیبی از سه استراتژی ارزیابی که در گام قبل محاسبه شدند، به دست می‌آید. مدل کوکوسو با ترکیب هوشمندانه نتایج این سه استراتژی، یک امتیاز نهایی جامع و قابل اعتماد تولید می‌کند. بر اساس این مدل، هر منطقه‌ای که امتیاز نهایی (k_i) بالاتری کسب کند، به عنوان گزینه برتر و مناسب‌ترین منطقه برای پیاده‌سازی پروژه‌های زیرساخت سبز هوشمند شناخته می‌شود.

جدول ۹: امتیاز پایانی مناطق یازده گانه کلانشهر کرج براساس زیرساخت‌های سبز بر ایجاد شهر هوشمند پایدار

نواحی ارزیابی	K	rank
منطقه ۱	۱/۶۲۸	۱۰
منطقه ۲	۲/۱۴۷	۷
منطقه ۳	۲/۴۴۲	۵
منطقه ۴	۲/۶۴۵	۲
منطقه ۵	۲/۶۵۹	۱
منطقه ۶	۲/۴۹۰	۴
منطقه ۷	۲/۳۷۷	۶
منطقه ۸	۱/۲۷۸	۱۱
منطقه ۹	۱/۷۰۲	۹
منطقه ۱۰	۲/۴۹۷	۳
منطقه ۱۱	۱/۷۱۳	۸

مأخذ: محاسبات نگارندگان.



نمودار ۱: امتیاز نهایی مناطق یازده گانه بر مبنای ایجاد شهر هوشمند پایدار

جدول شماره ۹ و نمودار آن که خروجی نهایی مدل تحلیل کوکوسو را ارائه می‌دهند یک رتبه‌بندی جامع و مبتنی بر داده از مناطق یازده‌گانه کلان‌شهر کرج بر اساس آمادگی برای پیاده‌سازی زیرساخت سبز هوشمند است. این رتبه‌بندی که از ترکیب هوشمندانه هفت پیشران کلیدی و سه استراتژی ارزیابی به دست آمده، تصویری روشن و قابل اتکا برای سیاست‌گذاری‌های آینده فراهم می‌کند. تحلیل کلی نتایج نشان‌دهنده یک شکاف معنادار میان مناطق کرج است. فاصله امتیاز منطقه برتر (منطقه ۵ با امتیاز ۲,۶۵۹) و ضعیف‌ترین منطقه (منطقه ۸ با امتیاز ۱,۲۷۸) تأیید می‌کند که شهر کرج از نظر آمادگی برای تحقق شهر هوشمند پایدار، یکپارچه نیست. این یافته، ضرورت اتخاذ رویکردهای مکانی-موضوعی متنوع را به جای سیاست‌گذاری یکسان برای کل شهر، دوچندان می‌کند.

بر اساس نتایج، می‌توان مناطق را به سه دسته اصلی تقسیم کرد:

-**مناطق پیشرو:** شامل مناطق ۵، ۴، ۱۰، ۶ و ۳ که بالاترین امتیازها را کسب کرده‌اند و به عنوان نقاط کانونی برای شروع پروژه‌های پایلوت و سرمایه‌گذاری‌های اولیه پیشنهاد می‌شوند.

-**مناطق دارای پتانسیل:** شامل مناطقی مانند ۷، ۲، ۱۱ و ۹ که پتانسیل خوبی دارند اما نیازمند تقویت برخی از پیشران‌های کلیدی مانند حکمرانی یا تقاضای بازار هستند.

-**مناطق نیازمند توجه ویژه:** شامل مناطق ۱ و ۸ که نیازمند مداخلات بنیادین و تقویت زیرساخت‌های پایه قبل از هرگونه اقدام پیشرفته در حوزه زیرساخت سبز هوشمند هستند.

منطقه ۵ با کسب امتیاز نهایی ۲,۶۵۹، به عنوان مناسب‌ترین منطقه برای پیاده‌سازی زیرساخت سبز هوشمند در کرج شناسایی شده است. این موفقیت، نتیجه یک ترکیب برنده از موقعیت استراتژیک و پتانسیل‌های بالقوه است. منطقه ۵ که شامل محلات کلیدی مانند گلشهر، درختی، گلزار و حصارک پایین می‌شود، در قلب شهر کرج قرار دارد. این موقعیت مرکزی، به خودی خود یک مزیت بزرگ است و دلایل فنی برتری این منطقه را روشن می‌سازد:

۱.تقاضای بالای بازار و سرمایه‌گذاری: به عنوان یک منطقه مرکزی و مسکونی-تجاری پرجمعیت، تقاضا برای بهبود کیفیت محیط زندگی و افزایش ارزش املاک در این منطقه بسیار بالاست. این امر، پیشران کلیدی "تقاضای بازار برای املاک و فضاهای سبز" را به شدت تقویت می‌کند و جذب سرمایه‌گذاری خصوصی را تضمین می‌کند.

۲.ظرفیت بالای حکمرانی و دسترسی: مناطق مرکزی معمولاً از نظر دسترسی به خدمات شهری، حضور ادارات و ظرفیت مدیریتی قوی‌تر هستند. این امر به پیشران "هماهنگی بین‌سازمانی و حکمرانی یکپارچه" کمک کرده و اجرای پروژه‌های پیچیده را تسهیل می‌کند.

۳.اثرگذاری اجتماعی گسترده: به دلیل تراکم جمعیت بالا، هرگونه بهبود در زیرساخت‌های سبز در این منطقه (مانند توسعه سطوح نفوذپذیر یا ایجاد پارک‌های هوشمند) تأثیر مستقیم و مثبتی بر تعداد زیادی از شهروندان دارد و به پیشران "ایجاد عدالت اجتماعی و دسترسی عادلانه" پاسخ می‌دهد.

در حالی که منطقه ۴ (مهرشهر) به دلیل داشتن بالاترین سرانه فضای سبز، یک گزینه قوی به نظر می‌رسد، برتری منطقه ۵ در "موقعیت استراتژیک و اثربخشی بالقوه "آن نهفته است. سرمایه‌گذاری در منطقه ۵، یک انتخاب کم‌ریسک و با بازدهی بالا برای کلان‌شهر است، زیرا بیشترین نیاز شهری را با بالاترین پتانسیل تأثیرگذاری اجتماعی و اقتصادی ترکیب می‌کند. بنابراین،

منطقه ۵ به عنوان گزینه برتر شناخته می‌شود زیرا نه تنها آمادگی زیرساختی دارد، بلکه شرایط اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی برای موفقیت یک پروژه هوشمند و پایدار در آن فراهم‌تر از هر جای دیگری است.

بررسی یافته‌ها و بحث

این پژوهش با هدف تحلیل اثرگذاری زیرساخت‌های سبز بر تحقق شهر هوشمند پایدار و ارائه یک چارچوب اولویت‌بندی مکانی در کلان‌شهر کرج انجام شد. یافته‌های کلیدی این تحقیق، که بر پایه یک رویکرد ترکیبی (میک مک و کوکوسو) استوار است، تصویری چندلایه و استراتژیک از این فرآیند ارائه می‌دهد و با نتایج پژوهش‌های پیشین در تعامل است. در سطح داخلی، یافته‌های این پژوهش به‌ویژه با تحقیقات ساسان‌پور و حاتمی (۱۴۰۲) و فارغ‌زاده و جمشیدی (۱۴۰۰) همخوانی و در عین حال، تکمیل‌کننده آن‌هاست. ساسان‌پور و حاتمی (۱۴۰۲) به‌شدت بر لزوم یک رویکرد یکپارچه برای تحقق شهر هوشمند پایدار تأکید کرده و بیان می‌دارند که فناوری‌های نوین تنها در صورت هم‌راستایی با نیازهای بومی و ظرفیت‌های مدیریتی مؤثر خواهند بود. پژوهش حاضر به صورت تجربی این ادعا را تأیید می‌کند؛ نتایج تحلیل میک‌مک نشان داد که موفقیت سیستم به ترکیبی همزمان از زیرساخت‌های فیزیکی، عوامل حاکمیتی و محرک‌های اقتصادی وابسته است و فناوری‌های هوشمند بیشتر نقش تسهیل‌گر و پیوندی دارند. این یافته، چارچوب نظری آن‌ها را به یک مدل عملیاتی و قابل اندازه‌گیری برای شهرهایی مانند کرج تبدیل می‌کند.

از سوی دیگر، فارغ‌زاده و جمشیدی (۱۴۰۰) بر اهمیت عوامل زمینه‌ای و محیطی در موفقیت شهر هوشمند تأکید ورزیده‌اند. تحقیق حاضر با شناسایی دقیق پیشران‌های کلیدی (مانند سرمایه‌گذاری و حکمرانی یکپارچه)، این عوامل زمینه‌ای را از حالت انتزاعی خارج کرده و به متغیرهای قابل سیاست‌گذاری تبدیل نموده است. در واقع، این پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر تکنولوژی بدون توجه به این پیشران‌های بنیادین، در عمل به شکست منجر خواهد شد که این امر، نتیجه‌گیری تحقیقات آن‌ها را به صورت ملموس تأیید می‌کند. در سطح بین‌المللی، تحقیقاتی مانند ژو و یانگ (۲۰۲۳) نقش حیاتی زیرساخت‌های سبز را در بهبود کیفیت محیط‌زیست و سلامت شهری به خوبی مستند کرده‌اند.

این پژوهش‌ها، اهمیت کلی موضوع را تأیید می‌کنند، اما تحقیق حاضر یک گام فراتر برداشته و به این پرسش کلیدی پاسخ می‌دهد که "چگونه و کجا" باید این زیرساخت‌ها توسعه یابند. در حالی که ژو و یانگ (۲۰۲۳) به تأثیرات مثبت زیرساخت سبز در تهران اشاره کردند، این پژوهش با ارائه یک نقشه راه استراتژیک مبتنی بر داده برای کرج، ابزاری برای مدیریت مؤثر منابع و جلوگیری از سرمایه‌گذاری‌های پراکنده فراهم می‌آورد. این رویکرد، شکاف موجود میان تئوری‌های کلی و اقدامات عملیاتی در سطح محلی را پر می‌کند.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که یافته‌های این پژوهش با ادبیات جهانی و ملی همسو بوده و آن را با یک بُعد کاربردی و مکانی غنی‌تر می‌سازد. نوآوری اصلی این تحقیق، ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری منسجم است که به مدیران شهری اجازه می‌دهد تا از شناسایی پیشران‌های کلیدی تا اولویت‌بندی مناطق برای اقدام، یک فرآیند علمی و مبتنی بر شواهد را طی کنند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش بیان کرد که گذار به سوی شهر هوشمند پایدار، فرآیندی یکسان و سراسری نیست، بلکه یک هماهنگی استراتژیک از پیشران‌های کلیدی و اولویت‌های مکانی است. تحلیل یافته‌ها آشکار ساخت که موتور محرک تحول شهری، نه توسط فناوری به تنهایی، بلکه از طریق تعامل هم‌افزایانه میان سه حوزه اصلی نیرو می‌گیرد: زیرساخت‌های فیزیکی بنیادین، سازوکارهای حاکمیتی توانمندساز و محرک‌های اقتصادی-اجتماعی. این درک عمیق، پارادایم را از تمرکز صرف بر راهکارهای فناورانه به سمت ایجاد یک بستر یکپارچه و چندبعدی تغییر می‌دهد و بر آن تأکید می‌کند که موفقیت در این عرصه، بیش از هر چیز به یک تصمیم‌گیری هوشمند و مبتنی بر شواهد وابسته است. از جمله نوآوری‌های اصلی این پژوهش می‌توان به ارائه یک تحلیلی برای مدیریت شهری اشاره داشت که امکان عبور از سیاست‌گذاری‌های کلی و فراگیر را فراهم می‌سازد. نتایج رتبه‌بندی مناطق کلان‌شهر کرج، این واقعیت انکارناپذیر را آشکار ساخت که شهرها از مناطق ناهمگون تشکیل شده‌اند که هر کدام آمادگی‌ها و ظرفیت‌های

متفاوتی دارند. چارچوب ترکیبی به کار رفته این امکان را می‌دهد که سرمایه‌گذاری‌ها و مداخلات خود را به صورت هدفمند و متمرکز بر مناطقی هدایت کنند که بیشترین پتانسیل بازدهی را دارند و از هدررفت منابع در نواحی نا مستعد جلوگیری نمایند. این رویکرد، شکاف میان نظریه‌های کلان شهری و اقدامات عملیاتی در سطح محلی را به شکلی مؤثر پر می‌کند. در نهایت، این پژوهش بر یک اصل بنیادین برای حکمرانی شهری معاصر تأکید دارد: آینده شهرها از طریق مداخلات پراکنده و واکنشی شکل نمی‌گیرد، بلکه حاصل برنامه‌ریزی‌های یکپارچه، مبتنی بر داده و استراتژیک است. مدل ارائه‌شده در این پژوهش با فراتر رفتن از مطالعه موردی کرج، شاید یک الگوی قابل تکرار برای سایر کلان‌شهرها فراهم آورد تا بتوانند با اطمینان بالاتری، مسیر حرکت به سوی پایداری و هوشمندی را ترسیم و طی کنند.

بر اساس نتایج رتبه‌بندی و تحلیل پیشران‌ها، پیشنهادات زیر به صورت مکانی-موضوعی برای هر دسته از مناطق ارائه می‌شود:

الف) مناطق پیشرو: تمرکز بر پروژه‌های پایلوت و نوآورانه

۱.منطقه ۵ (گلشهر، درختی): به عنوان برترین منطقه، پیشنهاد می‌شود اولین پروژه "خیابان هوشمند و سبز" در محور اصلی گلشهر اجرا شود. این پروژه شامل نصب سطوح نفوذپذیر، روشنایی هوشمند و سنسورهای پایش کیفیت هوا باشد.

۲.منطقه ۴ (مهرشهر، احدآباد): با توجه به بالاترین سرانه فضای سبز، پیشنهاد می‌شود یک "کریدور زیستی هوشمند" برای اتصال پارک‌های اصلی مهرشهر طراحی و اجرا شود تا از پیشران "کریدورهای زیستی" عملیاتی شود.

۳.منطقه ۱۰ (سیمین‌دشت، رزکان): به عنوان منطقه با پتانسیل رشد، پیشنهاد می‌شود در طرح‌های توسعه جدید شهرک وحدت، الزامات زیرساخت سبز (بام سبز، دیوار سبز، آسفالت نفوذپذیر) به صورت اجباری لحاظ گردد.

۴.منطقه ۶ (باغستان، حصارک بالا): با تکیه بر پیشران "زیرساخت‌های مدیریت آب باران"، پیشنهاد می‌شود سیستم‌های نوین جمع‌آوری و مدیریت آب باران در پارک‌های این منطقه به صورت پایلوت اجرا شود.

ب) مناطق دارای پتانسیل: تقویت شاخص‌های کلیدی ضعیف‌تر

۵.منطقه ۷ (گوهردشت، کوی امامیه): برای تقویت پیشران "ایجاد عدالت اجتماعی"، پیشنهاد می‌شود با مشارکت شهروندان، فضاهای سبز کوچک و محلی در بافت‌های متراکم این منطقه ایجاد شود.

۶.منطقه ۲ (مصباح، قلمستان): با توجه به نیاز به تقویت حکمرانی، پیشنهاد می‌شود یک "کمیته هماهنگی زیرساخت سبز" در منطقه‌داری این منطقه تشکیل شود تا بر پیشران "هماهنگی بین‌سازمانی" عمل کند.

۷.منطقه ۱۱ (کلاک، حصار): برای فعال‌سازی پیشران "تقاضای بازار"، پیشنهاد می‌شود مشوق‌هایی (مانند کاهش عوارض ساختمانی) برای مالکینی که اقدام به ساخت زیرساخت سبز در املاک خود می‌کنند، ارائه گردد.

ج) مناطق نیازمند توجه ویژه: اقدامات بنیادین و زیرساختی

۸.منطقه ۸ (برغان، خیابان بهار): به عنوان کمترین رتبه، پیشنهاد می‌شود برنامه " پارک‌های کوچک محلی[1] " در اولویت اصلی این منطقه قرار گیرد تا حداقل سرانه فضای سبز تأمین شود.

۹.منطقه ۱ (عظیمیه، خلج‌آباد): پیشنهاد می‌شود با استفاده از ظرفیت اقتصادی این منطقه، طرح‌های تشویقی عمومی-خصوصی برای توسعه فضای سبز در محلات کلیدی مانند خیابان بهار اجرا شود.

د) پیشنهادات فراگیر و حاکمیتی

۱۰.ایجاد کمیته راهبری: پیشنهاد می‌شود یک کمیته راهبری شهر هوشمند پایدار با حضور نمایندگان مناطق ۵ و ۴ (به عنوان پیشران‌ها) و سازمان‌های کلیدی شهری تشکیل شود تا بر اجرای پروژه‌ها نظارت کند.

۱۱.توسعه پلتفرم شهروندی: برای تقویت پیشران تقاضای اجتماعی، پیشنهاد می‌شود یک اپلیکیشن موبایل برای ثبت پیشنهادات و گزارش مشکلات مرتبط با فضای سبز در سراسر شهر راه‌اندازی شود.

---

[1] Pocket Parks

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله به شکل توضیح داده شده از سوی مجله، مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی است.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند سپاسگزاری می‌کنیم.

منابع و مأخذ

جمشیدی، بیتا, صحرائی نژاد، نسیم. (۱۴۰۳). بازطراحی منظر شهری مناطق متراکم شهری با رویکرد زیرساخت سبز شهری (مطالعه موردی: محله شیخ هادی منطقه ۱۱ شهرداری تهران). پدافند غیرعامل، ۱۵(۴)، ۱۱۳-۱۳۱. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20086849.1403.15.4.8.1

حاتمی افشار، ساسان پور فرزانه، زیپارو آلبرتو، سلیمانی محمد.(۱۴۰۰). شهر هوشمند پایدار: مفاهیم، ابعاد و شاخص ها تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی ۲۱ (۶۰) :۳۳۹-۳۱۵.http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.60.315

زارعی، ن.، صادقی، ع.، و نصراللهی، م. (۱۴۰۳). نقش فضاهای سبز در ارتقای سلامت شهروندان در شهرهای ایرانی. مجله سلامت و محیط زیست، ۱۶(۲)، ۸۹–۱۰۴.http://dx.doi.org/%2010.18502/tbj.v19i1.2813

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. https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.382952.1996

زنگانه, عباسی، کرمی، تاج الدین. (۱۴۰۳). تحلیل فضایی تغییرات زیرساخت سبز شهر زنجان. مطالعات مدیریت توسعه سبز، ۴(۳).https://doi.org/10.22077/jgdms.2025.8558.1226

ساسان پور، فرزانه و حاتمی، افشار(۱۴۰۲) شهرهای آینده، شهرهای هوشمند پایدار، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.

ساسان پور، فرزانه، اسدزاده، هانیه، حاتمی، افشار. (۱۴۰۳). شهرهای فراگیر، رویکرد نوین شهرهای آینده. پژوهش های جغرافیای انسانی، ۵۶(۲)، ۱۷-۳۴. https://doi.org/10.22059/jhgr.2023.266196.1007777

سعیدی، ایمان و دارابی، حسن . (۱۴۰۴). تحلیل فضایی بیش از سه دهه تغییرات زیرساخت‌های سبز با استفاده از رویکرد اکولوژی سیمای سرزمین در شهر بروجرد. مطالعات علوم محیط زیست، ۱۰(۳), ۱۰۶۷۶-۱۰۶۸۹. doi: 10.22034/jess.2025.544552.2402

فارغزاده، سجاد و جمشیدی، مهدی. (۱۴۰۰). شهر هوشمند با رویکرد توسعه پایدار. مجله علوم شهرسازی، دوره ۱۲، شماره ۳، صفحات ۱۵۲-۱۷۵.https://www.sid.ir/paper/895390/fa

کاظمی، رضا و رضایی، مریم. (۱۴۰۳). نقش زیرساخت‌های سبز و فناوری‌های هوشمند در تاب‌آوری شهری تهران. فصلنامه فناوری و توسعه شهری، دوره ۹، شماره ۲، صفحات ۹۸-۱۲۰. https://doi.org/10.22108/jtud.2024.139561.1286

کاظمی، رضا. (۱۳۹۸). بررسی ارتباط توسعه زیرساخت‌های سبز و شهر هوشمند در تهران. مجله برنامه‌ریزی شهری، دوره ۸، شماره ۱، صفحات ۸۰-۹۹.https://doi.org/10.22108/jurd.2019.107342.1354

کلارک ، دیوید؛ ۱۳۸۸؛ جهان شهری، شهر جهانی، ترجمهٔ مهدی قرخلو و فروغ خزاعی نژاد، نشر انتخاب، تهران.

محمودزاده،حسن ، جعفری،فیروز و دین پرور،نسرین . (۱۴۰۴). ۲۲.تحلیل ظرفیت کاهش حرارتی بر اساس فضاهای سبز در شهر مراغه با استفاده از مدل سرمایش شهری. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای، ۶(۴)، ۳۵۰-۳۶۶. https://www.srds.ir/article_229442.html

محمودی، ناصر. (۱۳۹۹). نقش زیرساخت‌های سبز در ارتقای کیفیت زندگی شهری تهران. فصلنامه مدیریت شهری، دوره ۱۰، شماره ۲، صفحات ۱۰۲-۱۲۵.https://doi.org/10.22108/jurm.2020.110394.1351

مه آبادی پور، محمد مهدی ، زنگانه، احمد و تلخابی، حمیدرضا . (۱۴۰۳). ظرفیت سنجی و رتبه‌بندی نواحی شهر ورامین با رویکرد توسعه میان افزا. فصلنامه علمی توسعه پایدار محیط جغرافیایی، ۶(۱۱)، ۱-۲۰. https://doi.org/10.48308/sdge.2025.237840.1224

نصیری،پریا ، محمّدی،علیرضا ، رحمتی،منصور و غفاری گیلانده،عطا . (۱۴۰۵). ۶. ارزیابی فضاهای عمومی شهری بر سلامت روان در چارچوب شاخص‌های شهر دوستدار زنان (مطالعه موردی: شهر اردبیل). فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای، ۷(۲)، ۹۶-۱۱۶.https://www.srds.ir/article_228791.html

Awasthi, A., et al. (2024). Detailed analysis of sustainable infrastructure design and benefits for urban cities. In E3S Web of Conferences (Vol. 552, p. 01054). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455201054

Barton, H., Grant, M., & Thompson, S. (2020). Healthy urban planning: From theory to practice. Journal of Urban Health, 97(5), 678–689. https://doi.org/10.1007/s11524-011-9649-3

Baskar, P., et al. (2024). Quantum Computing Smart City: Fostering Sustainability and Green Infrastructure with Smart City. In Applications and Principles of Quantum Computing (pp. 162–213). IGI Global. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1168-4.ch010

Beatley, T., & Newman, P. (2021). Green cities: Planning for a sustainable future. Urban Studies, 58(3), 456–472. https://doi.org/10.70389/PJSS.100003

Bibri, S. E. (2021). Data-driven smart sustainable cities: A conceptual framework. Sustainable Cities and Society, 66, 102610. https://doi.org/10.5334/fce.120

Bommegowda, K. B., & Shivaprakasha, K. S. (2025). Harnessing Hybrid Solar Panels for Sustainable Urban Energy Solutions into Blue-Green Infrastructure. In Integrating Blue-Green Infrastructure into Urban Development (pp. 291–326). IGI Global.DOI: 10.4018/979-8-3693-8069-7.ch014

Clark, D. (2009). *Urban world, global city* (M. Qarkhloo & F. Khazaei Nejad, Trans.). Nashr-e Entekhab Publications. **[In Persian].**

Faraghzadeh, S., & Jamshidi, M. (2021). Smart city with a sustainable development approach. *Journal of Urban Sciences*, 12(3), 152–175. https://www.sid.ir/paper/895390/fa **[In Persian].**

Hatami Afshar, S., Pourfarzaneh, F., Ziparo, A., & Soleimani, M. (2021). Sustainable smart city: Concepts, dimensions, and indicators. *Applied Research in Geographical Sciences*, 21(60), 315–339. http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.60.315 **[In Persian].**

Jamshidi, B., & Sahraei Nejad, N. (2024). Redesigning the urban landscape of dense urban areas with the green infrastructure approach (Case study: Sheikh Hadi neighborhood, District 11 of Tehran Municipality). *Passive Defense*, 15(4), 113–131. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20086849.1403.15.4.8.1 **[In Persian].**

Kazemi, R. (2019). Investigating the relationship between green infrastructure development and smart city in Tehran. *Journal of Urban Planning*, 8(1), 80–99. https://doi.org/10.22108/jurd.2019.107342.1354 [In Persian].

Kazemi, R., & Rezaei, M. (2024). The role of green infrastructure and smart technologies in the urban resilience of Tehran. *Journal of Technology and Urban Development*, 9(2), 98–120. https://doi.org/10.22108/jtud.2024.139561.1286 **[In Persian].**

Mahabadi poor, M. M. , Zanganeh, A. and Talkhabi, H. R. (2025). Assessing the Capacity and Ranking Regions of Varamin City with Infill Development Approach. Sustainable Development of Geographical Environment, 6(11), 1-20. https://doi.org/10.48308/sdge.2025.237840.1224 **[In Persian].**

Mahmoodi, N. (2020). The role of green infrastructure in improving the quality of life in Tehran. *Journal of Urban Management*, 10(2), 102–125. https://doi.org/10.22108/jurm.2020.110394.1351 **[In Persian].**

Mahmoodzadeh, H., Jafari, F., & Dinparvar, N. (2025). Analysis of heat reduction capacity based on green spaces in Maragheh city using the urban cooling model. *Quarterly Journal of Urban and Regional Sustainable Development Studies*, 6(4), 350–366. https://www.srds.ir/article_229442.html **[In Persian].**

Nasiri, P., Mohammadi, A., Rahmati, M., & Ghaffari Gilandeh, A. (2026). Evaluation of urban public spaces on mental health in the framework of women-friendly city indicators (Case study: Ardabil city). *Quarterly Journal of Urban and Regional Sustainable Development Studies*, 7(2), 96–116. https://www.srds.ir/article_228791.html **[In Persian].**

Pathak, S., Negi, N., & Dadhich, P. (2025). Smart Cities and Blue-Green Infrastructure: The Role of Machine Learning in Sustainable Solutions. In Integrating Blue-Green Infrastructure into Urban Development (pp. 469–488). IGI Global.DOI: 10.4018/979-8-3693-8069-7.ch021

Saeidi, I., & Darabi, H. (2025). Spatial analysis of more than three decades of green infrastructure changes using the landscape ecology approach in Borujerd city. *Journal of Environmental Science Studies*, 10(3), 10676-10689. https://doi.org/10.22034/jess.2025.544552.2402 **[In Persian].**

Sasangar, F., & Hatami, A. (2023). *Future cities, sustainable smart cities*. Jihad Daneshgahi Publications, University of Tehran. **[In Persian].**

Sasangar, F., Asadzadeh, H., & Hatami, A. (2024). Inclusive cities: A new approach for future cities. *Human Geographical Research*, 56(2), 17–34. https://doi.org/10.22059/jhgr.2023.266196.1007777 **[In Persian].**

Tzoulas, K., et al. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. Landscape and Urban Planning, 81(3), 167–178. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

Wu, J., Wang, Z., & Zhang, X. (2021). Urban ecology and sustainability: A global review. Ecological Applications, 31(6), e02345. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.018

Yang, B., & Li, S. (2016). Design with Nature: Ian McHarg's ecological wisdom as actionable and practical knowledge. Landscape and Urban Planning, 155, 21-32.https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.010

Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, M., & Teriman, S. (2020). Smart cities and sustainability: A conceptual framework. Sustainability, 12(17), 7021. https://doi.org/10.3390/sustainability12177021

Zanganeh, A. , Talkhabi, H. , abaszadeh, M. and Mahabadipour, M. (2024). Agile City: Concept, Principles, Characteristics, and Implementation Challenges. Geographical Urban Planning Research (GUPR), 12(4), 119-133. https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.382952.1996 **[In Persian].**

Zanganeh, A., Abbasi, A., Karami, A., & Tajeddin, T. (2024). Spatial analysis of green infrastructure changes in Zanjan city. *Journal of Green Development Management Studies*, 4(3). https://doi.org/10.22077/jgdms.2025.8558.1226 **[In Persian].**

Zarei, N., Sadeghi, A., & Nasrollahi, M. (2024). The role of green spaces in promoting the health of citizens in Iranian cities. *Journal of Health and Environment*, 16(2), 89–104. http://dx.doi.org/10.18502/tbj.v19i1.2813 **[In Persian].**

Zhou, W., & Yang, X. (2023). The role of green infrastructure in smart city development. Journal of Urban Sustainability, 12(2), 231–244. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130845