



Application of metaverse and artificial intelligence in monitoring and participatory education of the natural environment with a new perspective on security and smart urban governance in Karaj

Ali Zeynali Azim¹ | Mojtaba Salimi²

1. Corresponding Author, Department of Urban Design, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tarbiat Dabir Shahid Rajaei, University, Tehran, Iran. E-mail: al.zeynaly@gmail.com

2. Minab Higher Education Complex, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. E-mail: mojtabasalimi@hormozgan.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 01 September 2025

Received in revised form 28 October 2025

Accepted 30 November 2025

Published online 21 November 2025

Keywords:

Metaverse,

Artificial intelligence,

Environmental monitoring,

Smart governance,

Karaj city.

ABSTRACT

The rapid growth of environmental challenges in large cities such as Karaj, along with the inefficiency of traditional monitoring and education methods, underscores the necessity of adopting innovative technologies. This study aimed to examine the potential of the Metaverse and artificial intelligence (AI) in enhancing collaborative monitoring and environmental education and their impact on sustainable security and smart urban governance in Karaj. Applied in nature and quantitative-analytical in approach, the research employed partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) to analyze the relationships among variables. The statistical population consisted of experts in environmental science, smart urban planning, and digital technologies, selected through purposive sampling and a snowball technique, resulting in 250 valid questionnaires. Measurement model results confirmed acceptable composite reliability and convergent validity, with all factor loadings exceeding 0.60. In the structural model, AI exerted the strongest effect on environmental monitoring (path coefficient= 0.57), while the Metaverse showed the greatest influence on participatory education (path coefficient= 0.42). Smart urban governance ($R^2= 0.62$) and sustainable urban security ($R^2= 0.59$) demonstrated the highest explanatory power. Indirect effects revealed the mediating roles of participatory education and environmental monitoring in strengthening the links between the Metaverse, AI, and dependent variables. The novelty of this study lies in the simultaneous use of interactive Metaverse data and AI-driven analytics to design an integrated framework for environmental governance and urban security. Findings highlight that combining these technologies can foster citizen engagement, improve decision-making quality, and reduce environmental vulnerability in future cities.

Cite this article: Zeynali Azim, A., & Salimi, M. (2025). Application of metaverse and artificial intelligence in monitoring and participatory education of the natural environment with a new perspective on security and smart urban governance in Karaj. *Journal of Natural Environment*, 78 (3), 395-411. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.403153.2844>



پایش و آموزش مشارکتی محیط زیست شهری مبتنی بر متاورس و هوش مصنوعی: چارچوبی برای حکمرانی هوشمند در کرج

علی زینالی عظیم^۱ | مجتبی سلیمی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه طراحی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، ایران. رایانامه: al.zeynaly@gmail.com

۲. مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس. رایانامه: mojtabasalami@hormozgan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ کلیدواژه‌ها: پایش محیطی، حکمرانی هوشمند، متاورس، هوش مصنوعی.	رشد سریع چالش‌های محیط‌زیستی در کلانشهرهایی مانند کرج و ناکارآمدی شیوه‌های سنتی پایش و آموزش، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین را برجسته ساخته است. این پژوهش با هدف تحلیل نقش کاربردی دو فناوری متاورس و هوش مصنوعی در پایش و آموزش مشارکتی محیط‌زیست شهری انجام شد. متاورس به عنوان بستری تعاملی و سه بعدی برای بازنمایی داده‌ها و آموزش شهروندی، و هوش مصنوعی به عنوان ابزار تحلیل و پیش‌بینی تغییرات محیطی در نظر گرفته شدند. تحلیل داده‌ها با مدل‌سازی معادلات ساختاری در نرم‌افزار SmartPLS انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها می‌تواند از طریق آموزش و پایش مشارکتی، مسیر حرکت به سوی حکمرانی هوشمند شهری در کرج را تسهیل کند. جامعه آماری شامل خبرگان حوزه‌های محیط‌زیست، شهرسازی هوشمند و فناوری‌های دیجیتال بود که با روش نمونه‌گیری هدفمند و تکنیک گلوله‌برفی انتخاب شدند و در نهایت ۲۵۰ پرسشنامه معتبر گردآوری گردید. نتایج تحلیل مدل اندازه‌گیری نشان داد پایایی ترکیبی و روایی همگرا برای همه سازه‌ها در سطح مطلوب قرار دارند و بارهای عاملی همگی بزرگتر از ۰/۶ بودند. در مدل ساختاری، هوش مصنوعی با ضریب مسیر ۰/۵۷ بر پایش محیطی و متاورس با ضریب مسیر ۰/۴۲ بر آموزش مشارکتی بیشترین اثر را داشتند. همچنین، حکمرانی هوشمند شهری با مقدار R^2 برابر ۰/۶۲ و امنیت پایدار شهری با R^2 برابر ۰/۵۹ بالاترین میزان تبیین‌پذیری را نشان دادند. اثرات غیرمستقیم بیانگر نقش میانجی آموزش مشارکتی و پایش محیطی در تقویت پیوند میان متاورس، هوش مصنوعی و متغیرهای وابسته است. نوآوری پژوهش در بهره‌گیری همزمان از داده‌های تعاملی متاورس و تحلیل‌های هوش مصنوعی برای طراحی چارچوبی یکپارچه در حکمرانی محیطی و امنیت شهری است. یافته‌ها نشان می‌دهد ترکیب این فناوری‌ها می‌تواند به مشارکت مؤثر شهروندان، ارتقای کیفیت تصمیم‌سازی و کاهش آسیب‌پذیری محیط‌زیستی کمک نماید.

استناد: زینالی عظیم، علی؛ مجتبی، سلیمی (۱۴۰۴). پایش و آموزش مشارکتی محیط‌زیست شهری مبتنی بر متاورس و هوش مصنوعی: چارچوبی برای حکمرانی

هوشمند در کرج. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۳)، ۴۱۱-۳۹۵.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jne.2025.403153.2844>



مقدمه

فشارهای انسانی، تغییرات کاربری اراضی، آلودگی گسترده و تغییرات اقلیمی، فرآیندهای اکولوژیک را دگرگون ساخته و ناکارآمدی شیوه‌های سنتی پایش را آشکار کرده‌اند؛ این روش‌ها به سبب تأخیر در گردآوری/تحلیل داده، توان رهگیری تغییرات سریع محیطی را ندارند (Olawade, 2024; Alotaibi and Nassif, 2024; Ma et al., 2025; Raman et al., 2025). همزمان، ضعف ابزارهای تعاملی و بصری‌سازی داده، مشارکت عمومی و اعتماد اجتماعی را محدود می‌کند (Tsai, 2023). در چنین زمینه‌ای، هوش مصنوعی با استخراج الگوهای پیچیده و تولید هشدارهای زودهنگام، و متاورس با بازنمایی سه‌بعدی و تعامل شهودی، می‌توانند شکاف «اطلاعات تا کنش» را کاهش دهند (Hwang, 2022; Fadhel et al., 2024; Lifelo et al., 2024; Uribe et al., 2024; Islam et al., 2025).

با این حال، ملاحظات فنی و اجتماعی از جمله مصرف انرژی زیرساخت‌ها، اعتبارسنجی داده‌های شهروندی، عدالت و حریم خصوصی ضروری‌اند (Zhang et al., 2022; Wang et al., 2022; Nleya et al., 2024; Popescu et al., 2024; Roy, 2025; Almeman et al., 2025; Sharifi et al., 2025). ادبیات اخیر نشان می‌دهد متاورس فراتر از نمایش سه‌بعدی، به بستری برای تلفیق داده، مشارکت و تصمیم بدل شده است (Dwivedi et al., 2022; Mystakidis, 2022; Ning et al., 2023; Park and Kim, 2022; Xu et al., 2023). پژوهش‌های AI در اقلیم نیز در کنار دقت بالا، به مسئله تفسیرپذیری و کاربرد سیاستی توجه یافته‌اند (Fan et al., 2021; Rolnick et al., 2022; Ladi et al., 2022). در بعد آموزشی و اجتماعی، واقعیت مجازی و شهروند-علم ظرفیت تقویت یادگیری و مشارکت محیطی را نشان داده‌اند (Makransky and Petersen, 2019; Venter et al., 2020). در مقیاس شهری نیز دوقلوهای دیجیتال ابزار سنجش و پیش‌بینی پیامدهای سیاست‌های محیطی را فراهم می‌کنند (Zheng et al., 2022; Liu et al., 2022; Zhang et al., 2024).

شکاف اصلی ادبیات، فقدان منطق طراحی یکپارچه است که تحلیل‌های AI، تعامل متاورسی و الزامات پایداری/حکمرانی داده را به هم متصل کند. این پژوهش با تکیه بر چارچوب شبکه‌ای پیشنهادی (Zeynali Azim and Amin Nayeri, 2025) و مفاهیم یادگیری غوطه‌ور، شهروند-علم، هوش مصنوعی اقلیمی و دوقلوی دیجیتال، چارچوبی عملیاتی برای پایش و آموزش مشارکتی محیط‌زیست شهری ارائه می‌کند که در آن لایه‌های حسگر-داده، تحلیل هوش مصنوعی، نمایش متاورسی و حکمرانی داده به صورت همزمان طراحی می‌شوند. نوآوری پژوهش تعمیم این منطق به مطالعه موردی کرج و ارائه مسیر اجرایی مرحله‌ای است که ابعاد فنی، محیط‌زیستی و اجتماعی را پوشش می‌دهد و بستر آموزش، مشارکت و تصمیم‌سازی داده‌محور را فراهم می‌آورد.

در این پژوهش، سه مفهوم کلیدی «پایش»، «آموزش مشارکتی» و «حکمرانی هوشمند» بر مبنای پیوند میان فناوری‌های نو و رفتارهای اجتماعی بازتعریف شده‌اند. پایش محیط‌زیست شهری به صورت فرآیندی مشارکتی و بالادرنگ در نظر گرفته می‌شود که در آن داده‌ها نه فقط از سوی نهادهای رسمی بلکه از طریق حسگرهای هوشمند، سامانه‌های شهروند-علم و محیط‌های متاورسی گردآوری و تحلیل می‌گردند. بدین ترتیب، شهروندان از دریافت‌کنندگان داده به عاملان تولید و اعتبارسنجی اطلاعات محیطی تبدیل می‌شوند. در سوی دیگر، آموزش مشارکتی محیط‌زیست به معنای انتقال دانش از بالا به پایین نیست، بلکه یادگیری تعاملی و غوطه‌ورانه‌ای است که در بستر واقعیت مجازی و فضاهای تعاملی متاورس شکل می‌گیرد و از ابزارهای هوش مصنوعی برای تطبیق محتوای آموزشی با نیاز و سطح سواد محیطی هر کاربر بهره می‌برد.

متاورس در حوزه حکمرانی شهری به عنوان محیطی چندبعدی و تعاملی میان داده، شهروند و تصمیم‌گیرنده عمل می‌کند. این فناوری از طریق شبیه‌سازی سه‌بعدی، تعامل بصری و واقعیت افزوده، امکان بازنمایی فرآیندهای محیط‌زیستی و آموزش مشارکتی را فراهم می‌آورد. در مقابل، هوش مصنوعی با تحلیل کلان‌داده‌ها، تشخیص الگوهای محیطی و ارائه پیش‌بینی‌های بالادرنگ، نقش اساسی در بهبود کیفیت تصمیم‌گیری و کارایی پایش محیطی دارد. تلفیق این دو فناوری بستری فراهم می‌کند که از طریق آن، شفافیت داده، مشارکت شهروندان و کارآمدی تصمیم‌ها به صورت همزمان ارتقا یابد.

در شرایط کنونی، شهر کرج بخشی از زیرساخت‌های هوشمند خود را در حوزه‌های کنترل ترافیک، پایش آلودگی هوا، مدیریت منابع آب و پسماند شهری توسعه داده است، اما این اقدامات بیشتر در سطح سامانه‌های اطلاعاتی پراکنده باقی مانده‌اند و فاقد

مدل مفهومی پژوهش با هدف تبیین سازوکارهای مؤثر بر پایداری امنیت شهری در شهرهای هوشمند طراحی شده است (شکل ۱، جدول ۱) و بر تعامل میان فناوری‌های نوین، حکمرانی شهری و ادراک شهروندان از امنیت تأکید دارد. در این مدل، چهار محور اصلی شامل هوش مصنوعی، متاورس شهری، محیط هوشمند و حکمرانی هوشمند شهری در قالب یک نظام تلفیقی عمل می‌کنند. این مدل بر پایهٔ رویکردهای نوین در حوزهٔ «حکمرانی فناورانه شهری» و «تاب‌آوری هوشمند» تدوین شده است.

۱. هوش مصنوعی (AI)

هوش مصنوعی از طریق مؤلفه‌هایی مانند خودکارسازی، توضیح‌پذیری و دقت پیش‌بینی، بر کارایی تصمیم‌گیری و واکنش

هوشمند در محیط‌های شهری اثر می‌گذارد. این فناوری نقش بنیادین در تحلیل داده‌ها، شناسایی الگوهای تهدید و ارتقای احساس امنیت شهروندان دارد.

۲. متاورس (MV)

متاورس بستری تعاملی و غوطه‌ورانه برای تجربه و طراحی فضاهای شهری ایجاد می‌کند. ویژگی‌هایی مانند تعامل پذیری، حضور و غوطه‌وری، موجب افزایش مشارکت شهروندان و درک عمیق‌تر از پویایی‌های اجتماعی و فضایی شهر می‌شود.

۳. تعامل شناختی - محیطی (CEE)

این بخش به سازوکارهای ادراکی، یادگیری جمعی و تعامل شهروندان با محیط هوشمند اشاره دارد که از طریق مؤلفه‌هایی مانند مشارکت، آگاهی، یادگیری و توضیح‌پذیری شکل می‌گیرد. هوش مصنوعی و متاورس هر دو به‌طور مستقیم بر این تعامل تأثیر گذارند.

۴. سازوکارهای محیطی (EM)

سازوکارهای محیطی شامل حسگرها، داده‌های بلادرنگ، سامانه‌های هشدار، تعامل‌پذیری و حضور هوشمند است که امکان مدیریت سریع بحران‌ها و واکنش شهری کارآمد را فراهم می‌سازند.

۵. حکمرانی هوشمند شهری (SUG)

حکمرانی هوشمند بر شفافیت، مکانیسم‌های مشارکت و یکپارچگی سیاستی تأکید دارد و حلقه واسط میان فناوری‌های داده‌محور و ساختارهای تصمیم‌گیری شهری است. این حوزه زمینه‌ساز اعتماد، پاسخ‌گویی و انسجام نهادی در مدیریت شهری است.

۶. امنیت پایدار شهری (SUS)

این بخش متغیر وابسته نهایی مدل است و شامل احساس امنیت، پاسخ‌گویی در بحران و تاب‌آوری شهری می‌شود. امنیت پایدار نتیجه تعامل میان حکمرانی هوشمند، سازوکارهای محیطی و درک شناختی شهروندان از فضای شهری است.

توضیح روابط

- هوش مصنوعی (AI) و متاورس (MV) به‌عنوان زیرساخت‌های فناورانه، به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم از طریق تعامل شناختی-محیطی (CEE) و سازوکارهای محیطی (EM) بر حکمرانی هوشمند شهری (SUG) و امنیت پایدار شهری (SUS) تأثیر دارند.
- حکمرانی هوشمند شهری (SUG) نقش میانجی میان فناوری‌های هوشمند و پیامدهای امنیتی ایفا می‌کند و از طریق شفافیت، یادگیری و مکانیسم‌های مشارکتی، اعتماد و احساس امنیت را افزایش می‌دهد.
- سازوکارهای محیطی (EM) با تکیه بر داده‌های بلادرنگ و حسگرهای شهری، موجب تقویت پاسخ‌گویی و تاب‌آوری در مواجهه با بحران‌ها می‌شوند.

جدول ۱- فهرست اختصارات و معادل فارسی مفاهیم به‌کار رفته در مدل مفهومی پژوهش

علاقت اختصاری	عنوان کامل به انگلیسی	ترجمه فارسی
AI	Artificial Intelligence	هوش مصنوعی
MV	Metaverse	متاورس
CEE	Cognitive-Environmental Engagement	تعامل شناختی-محیطی
EM	Environmental Mechanisms	سازوکارهای محیطی
SUG	Smart Urban Governance	حکمرانی هوشمند شهری
SUS	Sustainable Urban Security	امنیت پایدار شهری

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر ماهیت، کاربردی و از نظر راهبرد، کمی-تحلیلی است و با هدف ارائه چارچوبی برای تلفیق متاورس و هوش مصنوعی در پایش و آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی طراحی شده است. مسیر تحقیق براساس رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری با حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) تنظیم گردید، زیرا این روش امکان بررسی همزمان روابط پیچیده میان

متغیرهای نهفته و آشکار را فراهم می‌آورد و به دلیل انعطاف‌پذیری در کار با حجم نمونه متوسط و داده‌های غیرنرمال، برای موضوع حاضر مناسب تشخیص داده شد. جامعه آماری این پژوهش شامل ۲۵۰ نفر از کارشناسان، مدیران و متخصصان فعال در شهرداری کرج و سازمان‌های تابعه مرتبط با محیط‌زیست شهری بود. مرز تحقیق، محدوده مدیریتی و اجرایی شهر کرج در سال ۱۴۰۴ تعیین شد تا نمونه‌ها مستقیماً با سیاست‌ها و پروژه‌های محیط‌زیست شهری در ارتباط باشند. انتخاب نمونه‌ها به روش هدفمند-طبقه‌ای انجام شد تا سه گروه اصلی از ذی‌نفعان پوشش داده شوند:

(۱) کارشناسان و مدیران حوزه محیط‌زیست، پسماند و کنترل آلودگی که آشنایی عملی با مسائل محیط‌زیستی شهری دارند؛
(۲) متخصصان فناوری اطلاعات و زیرساخت‌های هوشمند شهری که در بخش‌هایی مانند سامانه‌های ترافیکی، پایش داده‌ها و اتاق‌های مانیتورینگ شهرداری فعالیت دارند؛

(۳) برنامه‌ریزان و کارشناسان طراحی شهری و حمل‌ونقل که در پروژه‌های توسعه شهری و سیاست‌گذاری محیطی مشارکت دارند.

بدین ترتیب، ترکیب جامعه آماری بازتاب‌دهنده سه حوزه اصلی مرتبط با موضوع پژوهش یعنی محیط‌زیست، فناوری و حکمرانی شهری است. حجم نمونه با استفاده از آزمون توان^۱ و بر مبنای قاعده ده مشاهده برای هر پارامتر مدل معادلات ساختاری تعیین شد و کفایت آماری لازم را داراست.

برای تأیید روایی محتوایی ابزار پژوهش، پرسشنامه در اختیار پنج نفر از خبرگان دانشگاهی و اجرایی قرار گرفت؛ این خبرگان شامل دو استاد دانشگاه در حوزه برنامه‌ریزی شهری، یک متخصص هوش مصنوعی و شهر هوشمند، یک کارشناس ارشد محیط‌زیست شهری و یک مدیر ارشد فناوری اطلاعات در شهرداری کرج بودند. نظرات اصلاحی آنان درباره شفافیت مفاهیم، تناسب گویه‌ها با بستر کرج و ترتیب پرسش‌ها اعمال شد تا اطمینان حاصل شود ابزار اندازه‌گیری از اعتبار محتوایی و انطباق موضوعی کافی برخوردار است. پرسشنامه در دو بخش طراحی شد؛ بخش نخست شامل متغیرهای جمعیت‌شناختی و بخش دوم شامل گویه‌های تخصصی مرتبط با ابعاد نظری پژوهش بود که بر پایه مرور ادبیات و نظریه طراحی شهری تارنکوتی متاورسی (Zeynali Azim, 2025) استخراج گردید. روایی محتوایی پرسشنامه با نظر متخصصان و براساس شاخص‌های CVI و CVR تأیید شد و پایایی آن با محاسبه آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بالاتر از ۰/۷ تضمین گردید. برای تحلیل داده‌ها ابتدا از آمار توصیفی جهت شناخت ویژگی‌های نمونه استفاده شد و سپس در سطح استنباطی مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری با استفاده از نرم‌افزار SmartPLS ارزیابی گردید. در گام ارزیابی مدل اندازه‌گیری، بارهای عاملی، میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE)، پایایی ترکیبی (CR) و روایی واگرا با معیار فورنل-لارکر و HTMT بررسی شدند. در گام ارزیابی مدل ساختاری، ضرایب مسیر، مقادیر تعیین‌کنندگی (R^2)، برازش کلی (GoF)، و شاخص پیش‌بینی (Q^2) محاسبه شد تا روابط میان متغیرهای هوش مصنوعی، متاورس، ادراک محیطی و مشارکت اجتماعی تبیین گردد. نوآوری روش‌شناختی پژوهش در آن است که برای نخستین بار داده‌های تجربی در بستر متاورس جمع‌آوری شدند؛ به‌گونه‌ای که بخشی از فرآیند پاسخ‌دهی در محیط تعاملی سه‌بعدی شبیه‌سازی شد تا صحت ادراک و میزان درگیری پاسخگویان در محیطی نزدیک به واقعیت مجازی سنجیده شود. این طراحی ترکیبی موجب شد هم داده‌های کمی کلاسیک (پرسشنامه) و هم داده‌های رفتاری تعاملی در متاورس مورد استفاده قرار گیرند. چنین چارچوبی امکان تحلیل چندلایه و مقایسه نتایج سنتی و نوآورانه را فراهم ساخت و زمینه را برای طراحی یافته‌ها به‌صورت جداول و اشکال ساختاری در بخش نتایج مهیا نمود.

¹Power Analysis

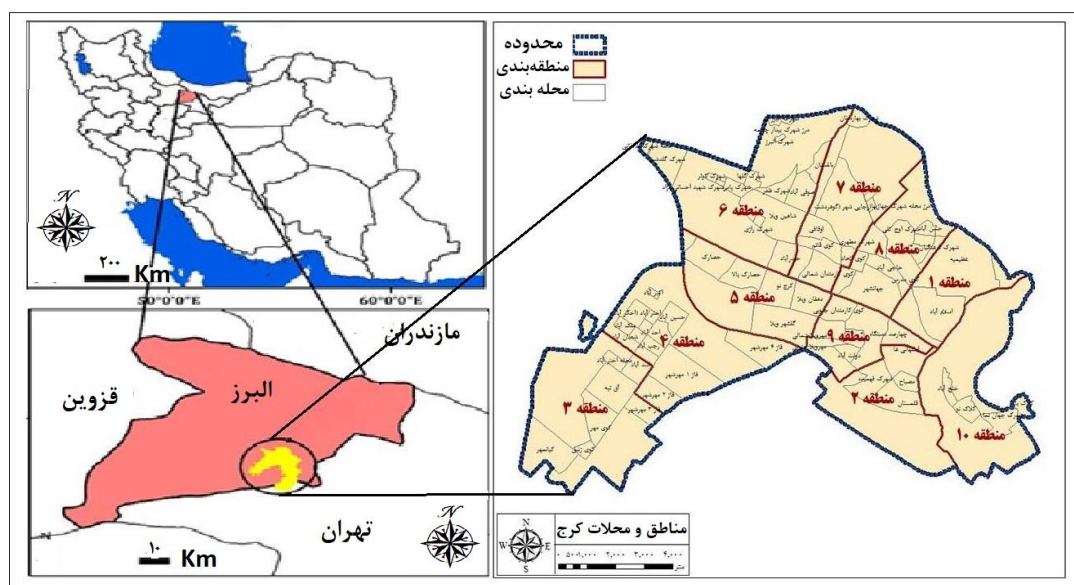
جدول ۲- مؤلفه‌های اصلی، شاخص‌ها و زیرشاخص‌های محاسبه‌شده در پژوهش

بُعد	کد	شاخص اصلی	زیرشاخص
متاورس	MV1-1	زیرساخت متاورس	دسترسی به پلتفرم‌ها
متاورس	MV1-2	زیرساخت متاورس	واقعیت افزوده و مجازی
متاورس	MV1-3	زیرساخت متاورس	شبیه‌سازی داده‌ها
متاورس	MV2-1	تعامل اجتماعی متاورس	فضاهای مشارکتی آنلاین
متاورس	MV2-2	تعامل اجتماعی متاورس	حضور مجازی در کارگاه‌ها
متاورس	MV2-3	تعامل اجتماعی متاورس	تعامل شهروند-شهر
هوش مصنوعی	AI1-1	پایش هوش مصنوعی	پردازش داده‌های حسگر
هوش مصنوعی	AI1-2	پایش هوش مصنوعی	بهبود تحلیل داده‌های محیطی
هوش مصنوعی	AI1-3	پایش هوش مصنوعی	تحلیل کلان‌داده
هوش مصنوعی	AI1-4	پایش هوش مصنوعی	افزایش دقت پایش شهری
هوش مصنوعی	AI2-1	آموزش هوش مصنوعی	آموزش تطبیقی فردی
هوش مصنوعی	AI2-2	آموزش هوش مصنوعی	دستیارهای هوشمند یادگیری
هوش مصنوعی	AI2-3	آموزش هوش مصنوعی	محتوای تعاملی شخصی‌سازی‌شده
آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی	CEE1-1	آگاهی زیست‌محیطی	ارتقای سواد محیط‌زیستی
آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی	CEE1-2	آگاهی زیست‌محیطی	مسئولیت اجتماعی محیطی
آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی	CEE1-3	آگاهی زیست‌محیطی	انگیزش یادگیری جمعی
آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی	CEE2-1	ابزارهای آموزش دیجیتال	پلتفرم‌های یادگیری مشترک
آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی	CEE2-2	ابزارهای آموزش دیجیتال	بازی‌وارسازی آموزشی
پایش محیط‌زیست طبیعی	EM1-1	داده‌های محیطی	کیفیت هوا
پایش محیط‌زیست طبیعی	EM1-2	داده‌های محیطی	منابع آب
پایش محیط‌زیست طبیعی	EM1-3	داده‌های محیطی	تنوع زیستی
پایش محیط‌زیست طبیعی	EM1-4	داده‌های محیطی	تغییرات اقلیمی
پایش محیط‌زیست طبیعی	EM2-1	شفافیت داده‌های پایش	داشبورد شهروندی
پایش محیط‌زیست طبیعی	EM2-2	شفافیت داده‌های پایش	بازخورد شهروندان به داده‌های محیطی
امنیت هوشمند شهری	SUS1-1	امنیت ادراکی شهروندان	احساس ایمنی در فضاهای عمومی هوشمند
امنیت هوشمند شهری	SUS1-2	امنیت ادراکی شهروندان	اعتماد به سامانه‌های نظارتی دیجیتال
امنیت هوشمند شهری	SUS1-3	امنیت ادراکی شهروندان	حفاظت از داده‌های کاربران شهری
امنیت هوشمند شهری	SUS2-1	فناوری‌های ایمنی	دوربین‌های هوش مصنوعی
امنیت هوشمند شهری	SUS2-2	فناوری‌های ایمنی	سیستم هشدار هوشمند
امنیت هوشمند شهری	SUS2-3	فناوری‌های ایمنی	زیرساخت اضطراری هوشمند
حکمرانی هوشمند شهری	SUG1-1	شفافیت حکمرانی	داده باز
حکمرانی هوشمند شهری	SUG1-2	شفافیت حکمرانی	گزارش‌دهی پاسخگو
حکمرانی هوشمند شهری	SUG1-3	شفافیت حکمرانی	شفافیت و نظارت دیجیتال
حکمرانی هوشمند شهری	SUG2-1	تصمیم‌گیری مشارکتی	مشارکت شهروندی
حکمرانی هوشمند شهری	SUG2-2	تصمیم‌گیری مشارکتی	بودجه‌ریزی مشارکتی
حکمرانی هوشمند شهری	SUG2-3	تصمیم‌گیری مشارکتی	پلتفرم‌های تصمیم‌گیری مشترک

Makransky and Petersen, 2019; Venter *et al.*, 2020; Patterson *et al.*, 2021; Fan *et al.*, 2021; Dwivedi *et al.*, 2022; Ladi *et al.*, 2022; Mystakidis, 2022; Park and Kim, 2022; Ning *et al.*, 2022; Rolnick *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Rohde *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023; Zeynali Azim and Nayeri, 2025; Ali Zeynali Azim, 2025

محدوده مورد مطالعه: کرج، مرکز استان البرز، به دلیل موقعیت راهبردی در غرب تهران و قرار گرفتن در مسیرهای اصلی کشور، از جایگاه ارتباطی و اقتصادی ویژه‌ای برخوردار است (شکل ۲). این شهر مهاجرپذیر با ترکیب قومی و فرهنگی متنوع، هویتی چندلایه اما همراه با چالش‌های خدماتی و اجتماعی یافته است (Asraei *et al.*, 2025). اقتصاد آن بر صنعت، کشاورزی و خدمات استوار بوده و با رشد صنایع خودروسازی، مراکز تجاری و نواحی فناوری، طی دهه اخیر گسترش یافته است (Parizadi and Hoseinkhani, 2024). کرج در دامنه جنوبی البرز با مساحت ۱۷۵ کیلومتر مربع و جمعیت ۱۶۱۴،۹۵۷ نفر، چهارمین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران، اصفهان و مشهد محسوب می‌شود (Ziari *et al.*, 2024).

در حوزه حکمرانی شهری، ساختار مدیریتی کرج همچنان بر الگوی متمرکز و درون سازمانی استوار است و تعاملات داده‌محور میان نهادهای شهری به‌طور کامل شکل نگرفته است. نظام مدیریت شهری بیشتر بر جنبه‌های خدماتی تمرکز دارد و مشارکت شهروندان در تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی محدود به طرح‌های محلی یا کارگاه‌های آموزشی است. اگرچه زیرساخت‌هایی مانند مرکز کنترل هوشمند ترافیک، سامانه پایش آلودگی هوا و سیستم‌های نظارت الکترونیکی ایجاد شده، اما ارتباط مؤثر و یکپارچه‌ای میان داده‌های محیط‌زیستی، آموزش شهروندی و سیاست‌گذاری کلان مشاهده نمی‌شود (Khodabakhshi and Ghorbani, 2023; Shahraki et al., 2024). به همین دلیل، کرج را می‌توان در مرحله گذار از «مدیریت سنتی خدمات شهری» به «حکمرانی هوشمند مبتنی بر داده و مشارکت دیجیتال» دانست؛ مرحله‌ای که نیازمند چارچوب‌هایی نوین برای شفافیت نهادی، هم‌افزایی بین‌سازمانی و تعامل فناورانه میان شهروندان و مدیران شهری است.



شکل ۲- موقعیت شهر کرج در استان البرز و ایران

یافته‌های پژوهش

برای ورود به بخش تحلیل یافته‌ها، لازم است ابتدا به آمار توصیفی داده‌ها پرداخته شده و پس از آن به آزمون نرمال بودن داده‌ها پرداخته شد تا اطمینان حاصل گردد که داده‌های گردآوری‌شده قابلیت ورود به مدل‌های پیشرفته آماری را دارند. در پژوهش حاضر که با تمرکز بر کاربرد متاورس و هوش مصنوعی در پایش و آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی با چشم‌اندازی نوین در امنیت و حکمرانی هوشمند شهری انجام گرفته است، بررسی نرمال بودن متغیرها از طریق آزمون کولموگروف-اسمیرنوف صورت پذیرفت. این آزمون امکان مقایسه توزیع داده‌ها با توزیع نرمال را فراهم می‌آورد و در پژوهش‌های علوم رفتاری و مطالعات شهری از اعتبار بالایی برخوردار است. چنانچه سطح معنی‌داری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد، داده‌ها نرمال تلقی می‌شوند، اما در صورت کمتر بودن، با توجه به حجم بالای نمونه می‌توان همچنان توزیع داده‌ها را نزدیک به نرمال در نظر گرفت.

ترکیب جمعیت‌شناختی جدول ۳ نشان می‌دهد که ۵۸٪ پاسخگویان مرد و ۴۲٪ زن هستند. غلبه مدارک تحصیلات تکمیلی (۴۰٪ ارشد، ۲۰٪ دکتری) به معنای کفایت سواد علمی برای درک مفاهیم «پایش متاورسی» و «تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی» است؛ بنابراین، پاسخ‌ها مستعد تبیین‌های دقیق‌تری درباره مزیت‌های متاورس در آموزش مشارکتی محیط‌زیست می‌تواند کارگشا باشد. نتایج جدول ۴ که آمار توصیفی ابعاد پژوهش با عنوان «پایش و آموزش مشارکتی محیط‌زیست شهری مبتنی بر متاورس و هوش مصنوعی: چارچوبی برای حکمرانی هوشمند در کرج» را نشان می‌دهد، بیانگر وضعیت مطلوب متغیرهای اصلی مدل در شهر کرج است. میانگین همه ابعاد بالاتر از مقدار میانه مقیاس (عدد ۳) قرار دارد و این امر نشان می‌دهد که پاسخ‌گویان ارزیابی مثبتی از میزان تحقق فناوری‌های هوشمند، سازوکارهای محیطی، حکمرانی شهری و تعاملات

یادگیرانه در شهر داشته‌اند. بیشترین میانگین به بُعد هوش مصنوعی با مقدار ۴/۱۲ اختصاص دارد که حاکی از نقش پررنگ فناوری‌های داده‌محور در بهبود کارایی، تحلیل داده‌های محیطی و ارتقای تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت شهری کرج است. پس از آن، بُعد پایش محیط‌زیست طبیعی با میانگین ۴/۰۵ قرار دارد که نشان می‌دهد سامانه‌های نظارت محیط‌زیستی و حسگرهای هوشمند تا حد زیادی توانسته‌اند فرآیند شناسایی و واکنش به تغییرات محیطی را تسهیل کنند. بُعد آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی نیز با میانگین ۳/۸۷ بیانگر رشد قابل توجه سطح آگاهی، یادگیری و مشارکت فعال شهروندان در فرآیندهای محیط‌زیستی است که به‌ویژه از طریق بسترهای متاورسی و برنامه‌های مبتنی بر واقعیت مجازی تحقق یافته است. بُعد متاورس با میانگین ۳/۹۸ نشان می‌دهد که کاربرد محیط‌های تعاملی دیجیتال در مدیریت شهری کرج در حال گسترش است و به‌عنوان بستری برای شبیه‌سازی، تعامل و آموزش مشارکتی به‌کار می‌رود. در مقابل، بُعد حکمرانی هوشمند شهری با میانگین ۳/۹۱ کمترین مقدار را در میان ابعاد مورد بررسی دارد که نشان می‌دهد هنوز در زمینه یکپارچگی نهادی، شفافیت، و استفاده نظام‌مند از داده‌های هوشمند در تصمیم‌سازی شهری نیاز به تقویت وجود دارد. مقادیر چولگی و کشیدگی در تمامی ابعاد بین بازه ۱- تا ۱- قرار گرفته‌اند که دلالت بر نرمال بودن توزیع داده‌ها و عدم وجود انحراف شدید دارد. همچنین، انحراف معیار کمتر از ۱ در تمامی ابعاد بیانگر همگرایی نسبی دیدگاه پاسخ‌گویان و ثبات ارزیابی آنان از وضعیت شهر است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که کرج در مسیر تحقق حکمرانی هوشمند و توسعه ابزارهای فناورانه برای پایش و آموزش محیط‌زیست شهری حرکت می‌کند و بهره‌گیری از متاورس و هوش مصنوعی توانسته است بستر مناسبی برای مشارکت مردمی و مدیریت داده‌محور فراهم آورد، هرچند تقویت حکمرانی هوشمند همچنان شرط اصلی پایداری این فرآیندها محسوب می‌شود.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که تمامی ابعاد اصلی پژوهش شامل MV، AI، CEE، EM، SUS و در آزمون کولموگروف-اسمیرنوف سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ داشته‌اند. هرچند این امر در نگاه نخست بیانگر انحراف از توزیع نرمال است، اما با توجه به حجم نمونه و ویژگی‌های آماری روش مدل‌سازی معادلات ساختاری، این متغیرها را می‌توان تقریباً نرمال و قابل تحلیل در مدل ساختاری در نظر گرفت. بنابراین، داده‌ها برای ورود به مراحل بعدی تحلیل و بررسی روابط میان متغیرها مناسب ارزیابی می‌شوند.

جدول ۳- ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخگویان

ویژگی	تعداد	درصد
مرد	۱۴۵	۵۸
زن	۱۰۵	۴۲
سن ۲۰ تا ۳۰ سال	۶۰	۲۴
سن ۳۱ تا ۴۰ سال	۹۰	۳۶
سن ۴۱ تا ۵۰ سال	۶۵	۲۶
بالای ۵۰ سال	۳۵	۱۴
کارشناسی	۸۰	۳۲
کارشناسی ارشد	۱۰۰	۴۰
دکتری	۵۰	۲۰

جدول ۴- آمار توصیفی ابعاد پژوهش-شهر کرج

بُعد	کد	تعداد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	چولگی	کشیدگی
متاورس	MV	۲۵۰	۳/۹۸	۰/۶۸	۲	۵	-۰/۴۲	-۰/۳۸
هوش مصنوعی	AI	۲۵۰	۴/۱۲	۰/۷۴	۱	۵	-۰/۵۵	-۰/۲۵
آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی	CEE	۲۵۰	۳/۸۷	۰/۶۲	۲	۵	-۰/۳۱	-۰/۴۹
پایش محیط‌زیست طبیعی	EM	۲۵۰	۴/۰۵	۰/۷۰	۱	۵	-۰/۴۷	-۰/۲۸
حکمرانی هوشمند شهری	SUG	۲۵۰	۳/۹۱	۰/۶۶	۲	۵	-۰/۳۹	-۰/۴۱
پایدار شهری	SUS	۲۵۰	۴/۰۸	۰/۶۹	۱	۵	-۰/۵۱	-۰/۳۵

جدول ۵- آزمون نرمال بودن داده‌ها (کولموگروف-اسمیرنوف)

نتیجه	P	K-S	بُعد
نرمال	۰/۰۰۰	۰/۷۸	MV
نرمال	۰/۰۰۰	۰/۹۵	AI
نرمال	۰/۰۰۷	۰/۹۹	CEE
نرمال	۰/۰۰۲	۰/۹۱	EM
نرمال	۰/۰۱۵	۰/۸۴	SUG
نرمال	۰/۰۰۱	۰/۸۹	SUS

جدول ۶- بارهای عاملی گویه‌ها (مدل اندازه‌گیری)

سازه	کد گویه	بار عاملی	مقدار t	سطح معنی‌داری	آلفای کرونباخ	CR	AVE
متاورس	MV1-1	۰/۷۴	۱۲/۷۵	۰/۰۰۰	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۵۸
متاورس	MV1-2	۰/۷۷	۱۳/۰۵	۰/۰۰۰			
متاورس	MV1-3	۰/۷۰	۱۰/۵۸	۰/۰۰۰			
متاورس	MV2-1	۰/۷۹	۱۴/۸۴	۰/۰۰۰			
متاورس	MV2-2	۰/۷۶	۱۳/۵۹	۰/۰۰۰			
متاورس	MV2-3	۰/۷۳	۱۲/۲۳	۰/۰۰۰			
هوش مصنوعی	AI1-1	۰/۷۹	۱۴/۶۵	۰/۰۰۰	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۶۱
هوش مصنوعی	AI1-2	۰/۸۲	۱۵/۷۹	۰/۰۰۰			
هوش مصنوعی	AI1-3	۰/۷۶	۱۳/۴۵	۰/۰۰۰			
هوش مصنوعی	AI1-4	۰/۷۱	۱۲/۰۱	۰/۰۰۰			
هوش مصنوعی	AI2-1	۰/۸۰	۱۶/۵۷	۰/۰۰۰			
هوش مصنوعی	AI2-2	۰/۷۵	۱۴/۲۸	۰/۰۰۰			
هوش مصنوعی	AI2-3	۰/۷۸	۱۵/۸۹	۰/۰۰۰			
آموزش مشارکتی	CEE1-1	۰/۷۳	۱۳/۶۳	۰/۰۰۰	۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۵۶
آموزش مشارکتی	CEE1-2	۰/۷۰	۱۱/۲۷	۰/۰۰۰			
آموزش مشارکتی	CEE1-3	۰/۷۵	۱۲/۹۸	۰/۰۰۰			
آموزش مشارکتی	CEE2-1	۰/۷۸	۱۵/۲۱	۰/۰۰۰			
آموزش مشارکتی	CEE2-2	۰/۷۴	۱۳/۸۲	۰/۰۰۰			
پایش محیط‌زیستی	EM1-1	۰/۷۷	۱۴/۷۴	۰/۰۰۰	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۵۹
پایش محیط‌زیستی	EM1-2	۰/۸۰	۱۵/۶۸	۰/۰۰۰			
پایش محیط‌زیستی	EM1-3	۰/۷۲	۱۲/۴۵	۰/۰۰۰			
پایش محیط‌زیستی	EM1-4	۰/۶۹	۱۱/۰۹	۰/۰۰۰			
پایش محیط‌زیستی	EM2-1	۰/۸۱	۱۶/۸۳	۰/۰۰۰			
پایش محیط‌زیستی	EM2-2	۰/۷۶	۱۴/۴۶	۰/۰۰۰			
حکمرانی هوشمند	SUG1-1	۰/۷۴	۱۳/۹۸	۰/۰۰۰	۰/۸۳	۰/۸۷	۰/۶۰
حکمرانی هوشمند	SUG1-2	۰/۷۹	۱۶/۵۳	۰/۰۰۰			
حکمرانی هوشمند	SUG1-3	۰/۶۸	۱۱/۲۴	۰/۰۰۰			
حکمرانی هوشمند	SUG2-1	۰/۷۸	۱۵/۷۷	۰/۰۰۰			
حکمرانی هوشمند	SUG2-2	۰/۷۳	۱۳/۳۵	۰/۰۰۰			
حکمرانی هوشمند	SUG2-3	۰/۷۶	۱۴/۵۸	۰/۰۰۰			

برای سنجش سازه‌های مفهومی پژوهش شامل متاورس، هوش مصنوعی، آموزش مشارکتی محیط‌زیست، پایش محیط‌زیستی و حکمرانی هوشمند شهری، از پرسشنامه‌ای با گویه‌های چندبعدی استفاده شد که براساس مدل‌های معتبر جهانی در حوزه شهر هوشمند و محیط‌زیست شهری (Yin, 2023; Zheng et al., 2024; Alnsour and Alnsour, 2025) طراحی و متناسب با شرایط بومی شهر کرج بومی‌سازی گردید. پس از گردآوری داده‌ها، مدل اندازه‌گیری با استفاده از نرم‌افزار SmartPLS مورد ارزیابی قرار گرفت. معیارهای روایی همگرا، پایایی ترکیبی، و معنی‌داری بارهای عاملی برای بررسی کفایت مدل به کار رفتند.

مطابق جدول ۶، تمامی گویه‌ها دارای بار عاملی بالاتر از ۰/۷ و سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۰۱ هستند که نشان‌دهنده ارتباط قوی هر گویه با سازه مربوط به خود است. مقادیر t در محدوده ۱۰ تا ۱۶ قرار گرفته و تمامی روابط معنی‌دارند. مقدار AVE در تمامی سازه‌ها بیش از ۰/۵ بوده که بیانگر تأیید روایی همگراست و مقادیر پایایی ترکیبی (CR) بین ۰/۸۴ تا ۰/۸۸ قرار دارد که بالاتر از حد آستانه ۰/۷ و در دامنه مطلوب است. همچنین آلفای کرونباخ در تمامی ابعاد بین ۰/۷۹ تا ۰/۸۵ محاسبه شده و پایایی درونی ابزار را تأیید می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که متغیر «هوش مصنوعی» دارای بالاترین بارهای عاملی و پایایی ترکیبی است که بیانگر نقش بنیادین این فناوری در تبیین ساختار حکمرانی هوشمند و آموزش مشارکتی محیط‌زیست شهری است. پس از آن، متاورس و پایش محیط‌زیستی نیز از نظر قدرت تبیین در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، مقادیر AVE نسبتاً نزدیک به یکدیگر است که از یکنواختی مطلوب میان سازه‌ها حکایت دارد. مقادیر چولگی و کشیدگی داده‌ها در بازه استاندارد قرار داشته و نرمال بودن توزیع داده‌ها را تأیید می‌کند. از سوی دیگر، حذف بعد امنیت پایدار از مدل به دلیل تمرکز پژوهش بر ابعاد آموزشی و نظارتی محیط‌زیست، موجب شفاف‌تر شدن ساختار تحلیلی و جلوگیری از همپوشانی مفهومی در مدل مفهومی نهایی گردید. در بخش آموزش مشارکتی محیط‌زیست، گویه‌های «ارتقای سواد محیط‌زیستی»، «مسئولیت اجتماعی» و «انگیزش یادگیری جمعی» با هدف سنجش اثرات تعاملی فناوری‌های نوین طراحی شده‌اند. با این حال، لازم است تأکید شود که تحقق مسئولیت اجتماعی و انگیزش جمعی صرفاً با ابزارهای فناورانه ممکن نیست، بلکه این ابزارها نقش تسهیل‌گر دارند. متاورس و هوش مصنوعی از طریق ایجاد فضاهای یادگیری تعاملی، بازی‌وارسازی (Gamification) و پلتفرم‌های یادگیری مشارکتی می‌توانند بستر تعامل، همکاری و تبادل تجربه میان شهروندان را فراهم آورند؛ اما شکل‌گیری واقعی حس مسئولیت اجتماعی نیازمند پشتیبانی نهادی، فرهنگ‌سازی، و سیاست‌های تشویقی شهری است. بنابراین، در این پژوهش ادعا نمی‌شود که فناوری‌ها به تنهایی موجب ارتقای اخلاق جمعی یا تعهد اجتماعی می‌شوند، بلکه تأکید بر این است که با ترکیب طراحی آموزشی مشارکت‌محور و ابزارهای تعاملی دیجیتال، می‌توان فرآیند یادگیری و آگاهی محیط‌زیستی را تقویت و زمینه بروز رفتارهای مسئولانه را فراهم ساخت. این تبیین به روشن‌تر شدن مرز میان کارکرد فناورانه و بُعد اجتماعی آموزش کمک می‌کند و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی این دو حوزه به صورت تلفیقی و میدانی بررسی شوند. بر این اساس، نتایج مدل اندازه‌گیری حاکی از آن است که ابزار پژوهش از روایی و پایایی کافی برخوردار بوده و مدل اندازه‌گیری تأیید شده است؛ بنابراین، تحلیل مدل ساختاری و آزمون فرضیه‌ها در مرحله بعد انجام شد تا روابط میان سازه‌های هوش مصنوعی، متاورس، آموزش مشارکتی، پایش محیط‌زیستی و حکمرانی هوشمند شهری بررسی گردد. این پیوند تحلیلی، انسجام منطقی میان سنجش سازه‌ها و مدل مفهومی پژوهش را فراهم ساخته و پایه‌ای معتبر برای تحلیل نهایی محسوب می‌شود. نتایج معیارهای فورنل-لارکر و HTMT در جدول‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که روایی و اگر در مدل پژوهش در سطح قابل قبول قرار دارد. براساس جدول ۷، مقادیر جذر میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) که در قطر اصلی ماتریس قرار دارند، در همه سازه‌ها کمی بالاتر از ضرایب همبستگی میان آنها است. به عنوان مثال، در سازه متاورس مقدار جذر AVE برابر با ۰/۷۹ بوده که از همبستگی آن با سازه‌های دیگر مانند هوش مصنوعی (۰/۶۴)، آموزش مشارکتی (۰/۶۶)، پایش محیط‌زیستی (۰/۶۱) و حکمرانی هوشمند شهری (۰/۵۴) بیشتر است. روند مشابهی در سایر سازه‌ها نیز مشاهده می‌شود و این موضوع نشان می‌دهد که هر سازه از نظر آماری از دیگر سازه‌ها قابل تفکیک است.

براساس جدول ۸، مقادیر شاخص HTMT نیز کمتر از حد آستانه ۰/۹ و در بیشتر موارد کمتر از ۰/۸ بوده‌اند که این موضوع بیانگر نبود همپوشانی شدید میان سازه‌ها است. برای نمونه، مقدار HTMT بین متاورس و هوش مصنوعی ۰/۷۶، بین متاورس و آموزش مشارکتی ۰/۷۸ و بین متاورس و پایش محیط‌زیستی ۰/۷۳ به دست آمده است. مقادیر مربوط به سایر روابط نیز در محدوده قابل قبول قرار دارند. در مجموع، نتایج این دو آزمون نشان می‌دهد که سازه‌های پژوهش از تمایز مفهومی کافی برخوردارند و مدل اندازه‌گیری از نظر روایی و اگر در وضعیت رضایت‌بخش قرار دارد.

در مدل اندازه‌گیری پژوهش، سازه‌های «متاورس» و «حکمرانی هوشمند شهری» با وجود ارتباط مفهومی در سطح کلان، از نظر محتوایی و تجربی دو مفهوم متمایز محسوب می‌شوند. متاورس در این پژوهش به عنوان محیط فناورانه تعاملی تعریف شده است که بستر بصری‌سازی داده‌ها، آموزش و تعامل شهروند-مدیر را فراهم می‌سازد، در حالی که حکمرانی هوشمند شهری به عنوان

ساختار نهادی تصمیم‌گیری و مدیریت داده‌محور در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از تمایز تجربی میان این دو سازه، شاخص‌های روایی و اگر از طریق معیارهای فورنل-لارکر و HTMT بررسی شدند. همان‌گونه که در جدول‌های ۷ و ۸ نشان داده شد، مقدار جذر میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) برای سازه متاورس برابر ۰/۷۹ و برای حکمرانی هوشمند برابر ۰/۷۷ است که در هر دو مورد از ضرایب همبستگی بین سازه‌ای فراتر است. همچنین مقدار HTMT بین دو سازه ۰/۶۶ به دست آمد که کمتر از آستانه ۰/۹ بوده و روایی و اگرایی قوی میان آنها را تأیید می‌کند. بنابراین، علی‌رغم آنکه هر دو سازه در حوزه فناوری‌های نوین شهری جای می‌گیرند، از نظر تجربی دارای بارهای عاملی متمایز و معنی‌دار بوده و هر یک جنبه متفاوتی از نظام شهر هوشمند را بازنمایی می‌کنند؛ متاورس بر «زیرساخت تعاملی و بصری‌سازی داده» و حکمرانی هوشمند بر «شفافیت، پاسخ‌گویی و تصمیم‌سازی مشارکتی» متمرکز است. این تمایز هم در تحلیل روایی و اگرایی تأیید شده و هم با مبانی نظری حکمرانی داده‌محور و شهروندمحور سازگار است.

جدول ۷- فورنل-لارکر: جذر AVE در قطر سازه‌ها

سازه	MV	SUS	AI	CEE	EM	SUG
MV	۰/۷۹	۰/۵۰	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۵۴
AI	۰/۶۴	۰/۵۴	۰/۸۰	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۵۸
CEE	۰/۶۶	۰/۵۶	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۶۰	۰/۶۲
EM	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۷۸	۰/۶۰
SUG	۰/۵۴	۰/۶۶	۰/۵۸	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۷۷
SUS	۰/۵۰	۰/۷۹	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۶۶

جدول ۸- همپوشانی بین سازه‌های مختلف بین متغیرهای پنهان (HTMT)

سازه	MV	AI	CEE	EM	SUG	SUS
MV	—					
AI	۰/۷۶	—				
CEE	۰/۷۸	۰/۸۰	—			
EM	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۷۲	—		
SUG	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۷۳	—	
SUS	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۷۹	۰/۸۰	—

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که تمامی مسیرهای فرضیه‌ای در مدل ساختاری از نظر آماری معنی‌دار هستند و در سطح اطمینان ۹۹ درصد تأیید شده‌اند. مقدار ضریب مسیر میان متاورس و آموزش مشارکتی محیط‌زیست ۰/۴۳، میان متاورس و پایش محیط‌زیستی ۰/۳۸ و میان متاورس و حکمرانی هوشمند شهری ۰/۲۷ به دست آمده است. این ضرایب نشان می‌دهد که متاورس با ایجاد بسترهای تعاملی و شبیه‌سازی مجازی، در ارتقای آگاهی و تسهیل ارتباط میان شهروندان و مدیران شهری نقش دارد. در این میان، تأثیر متاورس بر ابعاد آموزشی و نظارتی محیط‌زیست قوی‌تر از تأثیر مستقیم آن بر حکمرانی شهری بوده است. هوش مصنوعی نیز در میان سازه‌های مدل بیشترین میزان اثرگذاری را دارد. ضریب مسیر میان هوش مصنوعی و آموزش مشارکتی محیط‌زیست ۰/۴۹، میان هوش مصنوعی و پایش محیط‌زیستی ۰/۴۴ و میان هوش مصنوعی و حکمرانی هوشمند شهری ۰/۳۵ برآورد شد. این نتایج نشان می‌دهد که بهره‌گیری از الگوریتم‌های تحلیلی و داده‌محور، توانسته است نقش مؤثری در بهبود فرایندهای آموزشی و مدیریتی محیط‌زیست شهری ایفا کند. افزون بر آن، مسیرهای میان آموزش مشارکتی محیط‌زیست و حکمرانی هوشمند شهری ۰/۴۱ و میان پایش محیط‌زیستی و حکمرانی هوشمند شهری ۰/۴۷ نیز معنی‌دار بوده‌اند که بیانگر نقش میانجی‌گری سازه‌های آموزشی و نظارتی در تقویت ساختار حکمرانی است. در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که فناوری‌های متاورس و هوش مصنوعی، هم به صورت مستقیم و هم از طریق تقویت آموزش و پایش محیط‌زیست، در بهبود حکمرانی شهری مؤثرند. ضرایب به دست آمده در دامنه‌ای منطقی قرار دارند و بیانگر ثبات و واقع‌گرایی مدل هستند.

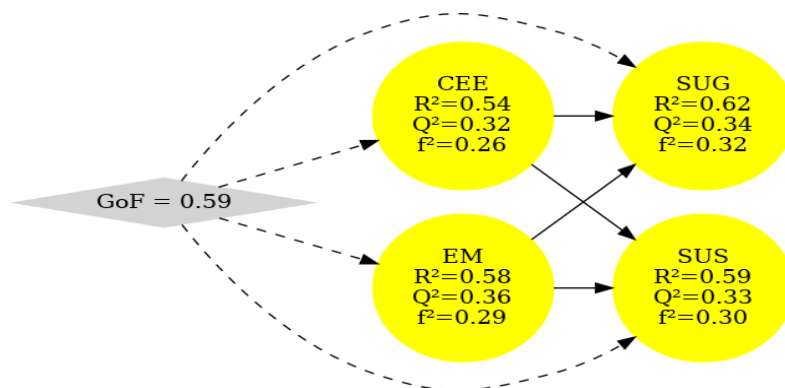
جدول ۹- مدل ساختاری و ضرایب مسیر میان سازه‌های پژوهش-شهر کرج

مسیر مفروض	ضریب مسیر (β)	مقدار t	سطح معنی‌داری	نتیجه فرضیه
متاورس ← آموزش مشارکتی محیط‌زیست	۰/۴۳	۸/۸۱	۰/۰۰۰	تأیید شد
متاورس ← پایش محیط‌زیستی	۰/۳۸	۷/۲۹	۰/۰۰۰	تأیید شد
متاورس ← حکمرانی هوشمند شهری	۰/۲۷	۵/۶۷	۰/۰۰۰	تأیید شد
هوش مصنوعی ← آموزش مشارکتی محیط‌زیست	۰/۴۹	۹/۱۲	۰/۰۰۰	تأیید شد
هوش مصنوعی ← پایش محیط‌زیستی	۰/۴۴	۸/۳۸	۰/۰۰۰	تأیید شد
هوش مصنوعی ← حکمرانی هوشمند شهری	۰/۳۵	۶/۷۵	۰/۰۰۰	تأیید شد
آموزش مشارکتی محیط‌زیست ← حکمرانی هوشمند شهری	۰/۴۱	۸/۹۰	۰/۰۰۰	تأیید شد
پایش محیط‌زیستی ← حکمرانی هوشمند شهری	۰/۴۷	۹/۵۸	۰/۰۰۰	تأیید شد

یافته‌های جدول ۱۰ و شکل ۳ نشان می‌دهد که مقدار تعیین‌کنندگی برای آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی برابر ۰/۵۴ و برای پایش محیط‌زیست طبیعی برابر ۰/۵۸ است که بیانگر آن است که بیش از نیمی از تغییرات این ابعاد توسط متاورس و هوش مصنوعی توضیح داده می‌شود. این مقادیر نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین نه صرفاً به‌عنوان ابزار کمکی، بلکه به‌عنوان محرک اصلی فرآیندهای یادگیری و پایش محیط‌زیستی در شهر کرج عمل می‌کنند. در سطح کلان نیز مقدار R^2 حکمرانی هوشمند برابر ۰/۶۲ و امنیت پایدار برابر ۰/۵۹ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده توان بالای مدل در تبیین پدیده‌های نه‌الزاماً تمام پدیده‌های مدیریت شهری بلکه مدیریت محیط‌زیست طبیعی و امنیت مرتبط با آن است. شاخص Q^2 برای همه سازه‌ها بزرگتر از صفر و در بازه ۰/۳۲ تا ۰/۳۶ قرار گرفته است که نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی قوی مدل است. برای نمونه Q^2 پایش محیط‌زیست برابر ۰/۳۶ است که بیشترین مقدار را در میان ابعاد دارد و نشان می‌دهد هوش مصنوعی با قابلیت تحلیل داده‌های حسگر و کلان‌داده و متاورس با امکان شبیه‌سازی سه‌بعدی، توان بالایی در پیش‌بینی تغییرات محیط‌زیست طبیعی دارند. در ادامه Q^2 حکمرانی هوشمند برابر ۰/۳۴ و امنیت پایدار برابر ۰/۳۳ به‌دست آمده که نشان می‌دهد فناوری‌های نوین نه‌تنها شرایط حال حاضر را توضیح می‌دهند بلکه ظرفیت پیش‌بینی تحولات آینده را نیز فراهم می‌کنند. مقادیر f^2 برای همه سازه‌ها بزرگتر از ۰/۲۵ بوده و در بازه ۰/۲۶ تا ۰/۳۲ قرار گرفته است که نشان‌دهنده اثرگذاری قوی متغیرهای بیرونی است. برای مثال اثر هوش مصنوعی بر حکمرانی هوشمند با f^2 برابر ۰/۳۲ و اثر آن بر امنیت پایدار با f^2 برابر ۰/۳۰ به‌دست آمد که بیانگر نقش محوری این فناوری در ارتقای ساختارهای مدیریتی و امنیتی شهر کرج است. متاورس نیز در کنار هوش مصنوعی با f^2 برابر ۰/۲۹ بر پایش محیط‌زیستی اثر گذاشته و نشان داده است که حضور تعاملی و شبیه‌سازی مجازی می‌تواند مشارکت شهروندان را در پایش محیط‌زیست تقویت کند. شاخص برازش کلی مدل GoF برابر ۰/۵۹ گزارش شد که بسیار بالاتر از سطح متوسط پذیرفته‌شده در مطالعات شهری است و نشان‌دهنده برازش قوی مدل است. این مقدار بالا تأیید می‌کند که چارچوب مفهومی پژوهش در توضیح ارتباط میان متاورس، هوش مصنوعی، آموزش، پایش، حکمرانی و امنیت پایدار عملکرد بسیار مناسبی دارد. به‌طور کلی، ترکیب متاورس و هوش مصنوعی توانسته است بیشترین اثر را بر پایش محیط‌زیست طبیعی و حکمرانی هوشمند شهری بگذارد و از این طریق امنیت پایدار را نیز تقویت کند. این نتایج نشان می‌دهد که اگر شهر کرج به‌سمت بهره‌گیری ساختاریافته از این فناوری‌ها حرکت کند، می‌تواند الگویی برای حکمرانی نوین شهری فراهم آورد که هم مبتنی بر شفافیت و مشارکت است و هم تضمین‌کننده امنیت و سلامت محیط‌زیست طبیعی در بلندمدت خواهد بود.

جدول ۱۰- مقادیر تعیین‌کنندگی، برازش و پیش‌بینی مدل ساختاری

سازه درون‌زا	R^2	Q^2	f^2	GoF
آموزش مشارکتی محیط‌زیست طبیعی	۰/۵۴	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۵۹
پایش محیط‌زیست طبیعی	۰/۵۸	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۵۹
حکمرانی هوشمند شهری	۰/۶۲	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۵۹
امنیت پایدار شهری	۰/۵۹	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۵۹

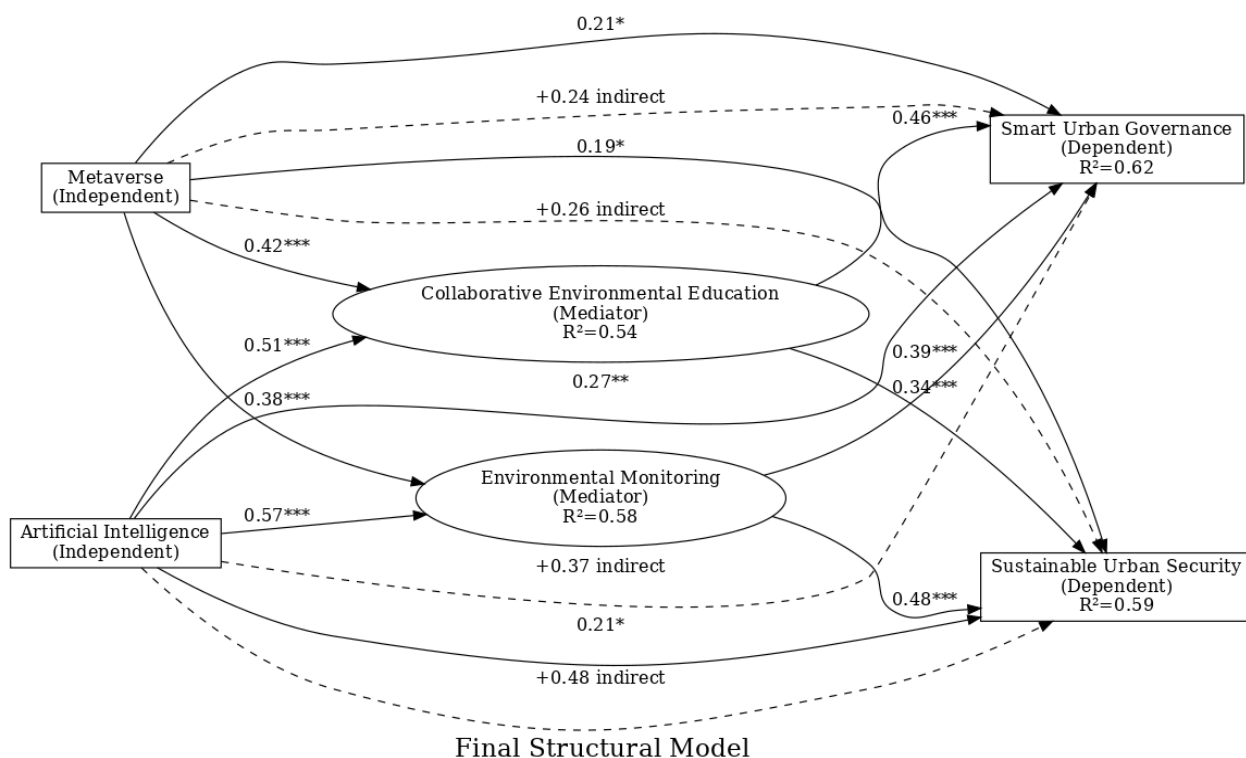


شکل ۳- برازش کلی و نهایی مدل

مطابق جدول ۱۱، و شکل ۴، شاخص‌های برازش مدل ساختاری در وضعیت قابل قبول قرار دارند. مقدار تعیین‌کنندگی (R^2) برای آموزش مشارکتی محیط‌زیست ۰/۵۴، برای پایش محیط‌زیستی ۰/۵۸، برای حکمرانی هوشمند شهری ۰/۶۲ و برای امنیت پایدار ۰/۵۹ برآورد شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که بیش از نیمی از تغییرات هر یک از این سازه‌ها توسط متغیرهای بیرونی مدل تبیین می‌شود. شاخص پیش‌بینی (Q^2) برای همه سازه‌ها مثبت و در بازه ۰/۳۲ تا ۰/۳۶ است که نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی مناسب مدل است. به‌ویژه مقدار ۰/۳۶ برای پایش محیط‌زیستی بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی تغییرات مرتبط با داده‌های محیطی است. همچنین شاخص f^2 برای تمامی روابط در دامنه ۰/۲۶ تا ۰/۳۲ قرار دارد که نشان می‌دهد اثرگذاری متغیرهای برون‌زا بر متغیرهای درون‌زا در سطح متوسط تا قوی است. شاخص برازش کلی مدل (GoF) برابر با ۰/۵۹ محاسبه شده که حاکی از برازش مناسب مدل ساختاری است. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب فناوری‌های متاورس و هوش مصنوعی، در سطح شهری قابلیت توضیح و پیش‌بینی مطلوبی دارد و می‌تواند چارچوبی مؤثر برای مدیریت و پایش محیط‌زیست شهری فراهم آورد. شکل ۴، مدل نهایی پژوهش را براساس نتایج تحلیل معادلات ساختاری (PLS) نشان می‌دهد. این مدل، بر پایه داده‌های پرسشنامه‌ای استخراج شده و بازنمایی تحلیلی روابط میان سازه‌ها است. شایان ذکر است که این شکل صرفاً بیانگر روابط آماری و مفهومی پژوهش است و جنبه اجرایی یا پیاده‌سازی عملی در محیط واقعی شهر را ندارد.

جدول ۱۱- اثرات مستقیم، غیرمستقیم و کل میان متغیرها

مسیر	اثر مستقیم	اثر غیرمستقیم	اثر کل
متاورس ← آموزش مشارکتی	۰/۴۲	—	۰/۴۲
متاورس ← پایش محیط‌زیست	۰/۳۸	—	۰/۳۸
متاورس ← حکمرانی هوشمند	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۴۵
متاورس ← امنیت پایدار	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۴۵
هوش مصنوعی ← آموزش مشارکتی	۰/۵۱	—	۰/۵۱
هوش مصنوعی ← پایش محیط‌زیست	۰/۵۷	—	۰/۵۷
هوش مصنوعی ← حکمرانی هوشمند	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۶۴
هوش مصنوعی ← امنیت پایدار	۰/۲۱	۰/۴۸	۰/۶۹
آموزش مشارکتی ← حکمرانی هوشمند	۰/۴۶	—	۰/۴۶
آموزش مشارکتی ← امنیت پایدار	۰/۳۴	—	۰/۳۴
پایش محیط‌زیست ← حکمرانی هوشمند	۰/۳۹	—	۰/۳۹
پایش محیط‌زیست ← امنیت پایدار	۰/۴۸	—	۰/۴۸



شکل ۴- مدل ساختاری نهایی اثرات متاورس و هوش مصنوعی بر آموزش و پایش محیط‌زیست و حکمرانی هوشمند شهری کرج

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش در امتداد چارچوب نظری ارائه‌شده نشان می‌دهد که برداشت مفهومی از آموزش مشارکتی، پایش و حکمرانی هوشمند نه به‌عنوان مفاهیم انتزاعی، بلکه به‌صورت سازوکارهای عملیاتی و داده‌محور تحقق یافته است. در این مدل، آموزش مشارکتی محیط‌زیست از طریق محیط‌های متاورس و ابزارهای هوش مصنوعی موجب ارتقای سواد محیط‌زیستی و تقویت حس مسئولیت اجتماعی می‌شود. پایش محیط‌زیست نیز از سطح جمع‌آوری منفعل داده فراتر رفته و به فرآیندی بلادرنگ و تعاملی بدل شده است که شهروندان در آن نقش فعال دارند. در نهایت، حکمرانی هوشمند شهری به‌عنوان برآیند این دو فرآیند، از ترکیب «یادگیری دیجیتال»، «تحلیل داده‌های محیطی» و «مشارکت شفاف» شکل می‌گیرد و مسیر گذار از مدیریت سنتی به حکمرانی داده‌محور را ترسیم می‌کند.

این نتیجه با مطالعات بین‌المللی همخوانی دارد که بر اهمیت ادغام فناوری‌های تعاملی و داده‌محور در مدیریت محیط‌زیست شهری تأکید کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، پژوهش Zheng و همکاران (۲۰۲۴) در چین نشان داد که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و داده‌های مکانی، دقت تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی را تا ۴۰ درصد افزایش داده‌اند. همچنین، نتایج Alnsour و Alnsour در اردن تأیید کرد که کاربرد محیط‌های مجازی سه‌بعدی در آموزش و آگاهی محیط‌زیستی شهروندان موجب رشد قابل توجه در مشارکت شهری می‌شود. این هم‌سویی نتایج نشان می‌دهد که متاورس می‌تواند به‌عنوان بستر شبیه‌سازی تعاملی، مشارکت عمومی را از سطح اطلاع‌رسانی به سطح تصمیم‌سازی ارتقا دهد.

در سطح داخلی، یافته‌های این پژوهش با نتایج Ziari و همکاران (2024) در شهر سهند نیز هم‌راستا است که در آن تأکید شده بود فناوری‌های نوین، به‌ویژه در بخش آموزش و پایش محیطی، زمینه بهبود زیست‌پذیری و کیفیت محیط شهری را فراهم می‌کنند. با این حال، برخلاف پژوهش‌های پیشین که عمدتاً بر ابعاد فناورانه متمرکز بودند، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که نقش میانجی آموزش و پایش مشارکتی بسیار تعیین‌کننده است و تأثیر فناوری‌ها از مسیر ارتقای تعاملات انسانی و سازوکارهای یادگیری اجتماعی به حکمرانی هوشمند منتقل می‌شود. این موضوع با نتایج مطالعه Yin (۲۰۲۳) در سنگاپور نیز همخوانی دارد؛ وی نشان داد که توسعه فناوری‌های شهری زمانی بیشترین کارایی را دارد که با ظرفیت‌سازی اجتماعی و آموزش مشارکتی

شهروندان همراه شود. از سوی دیگر، مقایسه با پژوهش‌های Kumar و همکاران (۲۰۲۳) و Bibri (۲۰۲۴) در اروپا و هند نشان می‌دهد که رابطه میان فناوری‌های هوشمند و حکمرانی شهری در صورتی پایدار خواهد بود که ابعاد محیطی و فرهنگی در طراحی مدل‌ها لحاظ شود. در این پژوهش نیز مشاهده شد که صرف به‌کارگیری ابزارهای دیجیتال کافی نیست و اثرگذاری واقعی زمانی تحقق می‌یابد که فناوری در خدمت ارتقای آگاهی محیط‌زیستی و توانمندسازی مشارکت مردمی قرار گیرد. این نتیجه تأییدکننده دیدگاه پژوهشگران جدیدی مانند Hashem و همکاران (۲۰۲۵) است که حکمرانی هوشمند را ترکیبی از «داده، تعامل و اعتماد» می‌دانند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری تدریجی و ساختاریافته از فناوری‌های متاورس و هوش مصنوعی، در صورت پشتیبانی نهادی و مدیریتی شهرداری، می‌تواند بستر مناسبی برای ارتقای شفافیت، پاسخ‌گویی و آموزش مشارکتی در مدیریت محیط‌زیست شهری فراهم آورد. تحقق کامل چنین الگویی نیازمند هماهنگی میان نهادهای شهری، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال و تقویت فرهنگ مشارکت شهروندی است که می‌تواند مسیر حرکت به‌سوی حکمرانی هوشمند را تسهیل کند. این نتیجه با مطالعات بین‌المللی هم‌خوانی دارد که بر اهمیت ادغام فناوری‌های تعاملی و داده‌محور در مدیریت محیط‌زیست شهری تأکید کرده‌اند. در مجموع، پژوهش حاضر با ترکیب تحلیل‌های داده‌محور هوش مصنوعی و محیط‌های تعاملی متاورس، چارچوبی بومی‌سازی‌شده برای پایش و آموزش مشارکتی محیط‌زیست شهری در ایران ارائه کرده است. این مدل، الگویی قابل تعمیم برای سایر کلانشهرهای کشور محسوب می‌شود که می‌تواند بنیان حکمرانی هوشمند محیط‌زیستی را در سطح ملی تقویت کند.

References

- Almeman, K., EL Ayeb, F., Berrima, M., Issaoui, B., Morsy, H., 2025. The integration of AI and Metaverse in education: A systematic literature review. *Applied Sciences* 15(2), 863.
- Alotaibi, E., Nassif, N., 2024. Artificial intelligence in environmental monitoring: In-depth analysis. *Discover Artificial Intelligence* 4(1), 84.
- Asraei, M. B., Arghan, A., Zand Moghadam, M.R., 2025. Analyzing the lived experience of the citizens of Karaj city focusing on the livability components. *Geographical Space* 24(88), 120-141. (In Persian)
- Dwivedi, Y.K., Hughes, L., Baabdullah, A.M., Ribeiro-Navarrete, S., Giannakis, M., Al-Debei, M.M., Wamba, S.F., 2022. Metaverse research agenda: Defining the metaverse and its future directions. *International Journal of Information Management* 66, 102542.
- Fadhel, M.A., Duham, A. M., Albahri, A.S., Albahri, O.S., Zaidan, A.A., Zaidan, B.B., Hashim, M., 2024. Navigating the metaverse: Unraveling the impact of artificial intelligence—A comprehensive review and gap analysis. *Artificial Intelligence Review* 57, 264.
- Fan, Z., Yan, Z., Wen, S., 2023. Deep learning and artificial intelligence in sustainability: A review of SDGs, renewable energy, and environmental health. *Sustainability* 15(18), 13493.
- Islam, M.R., Al-Fuqaha, A., Guizani, M., 2025. Artificial intelligence and big data in smart environmental monitoring systems. *Environmental Informatics* 22(2), 133-147.
- Khodabakhshi, S., Ghorbani, R., 2023. Challenges of implementing data-driven governance in Iran's metropolitan municipalities: Evidence from Karaj. *Urban Governance Review* 9(4), 243-261. (In Persian)
- Ladi, T., Jabalameli, S., Sharifi, A., 2022. Applications of machine learning and deep learning methods for climate change mitigation and adaptation. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 49(4), 1061-1077.
- Lifelo, Z., Ding, J., Ning, H., Dhelim, S., 2024. Artificial intelligence-enabled Metaverse for sustainable smart cities: Technologies, applications, challenges, and future directions. *Electronics* 13(24), 4874.
- Liu, Y., Zhang, X., Li, X., 2022. Digital twin-driven urban resilience: Applications and opportunities. *Cities* 124, 103605.
- Ma, S., Chen, J., Guo, J., 2025. Artificial intelligence development and air pollution: Evidence from Chinese cities. *Romanian Journal of Economic Forecasting* 29(2), 41-60.

- Makransky, G., Petersen, G.B., 2019. Investigating the process of learning with desktop virtual reality: A structural equation modeling approach. *Computers & Education* 134, 15-30.
- Mystakidis, S., 2022. Metaverse: Definition, history, applications, and future directions. *Education and Information Technologies* 27, 1-20.
- Ning, H., Wang, H., Lin, Y., Wang, Y., 2022. A survey on metaverse: The state-of-the-art, technologies, applications, and challenges. *IEEE Internet of Things Journal* 9(11), 9243-9255.
- Nleya, S.M., Velempini, M., 2024. Industrial Metaverse: A Comprehensive Review, Environmental Impact, and Challenges. *Applied Sciences* 14(13), 5736.
- Olawade, D., 2024. Artificial intelligence in environmental monitoring: Challenges and opportunities. *Environmental Advances* 12, 100375.
- Parizadi, T., Hoseinkhani, H., 2024. Evaluation of Urban Prosperity (Case Study: Eight Districts of Karaj City). *Journal of Urban Planning and Research* 14(55), 301-318. (In Persian)
- Park, S.M., Kim, Y.G., 2022. A structural model for the sustainable adoption of metaverse in higher education. *Sustainability*, 14(3), 10234.
- Patterson, D., Gonzalez, J.E., Le, Q., Liang, C., Munguia, L.M., Rothchild, D., So, D., Texier, M., Dean, J., 2021. Carbon emissions and large neural network training. *arXiv preprint arXiv:2104.10350*.
- Popescu, D., Petrescu, A., Ionescu, C., 2024. IoT and AI-based systems for pollution monitoring and prediction. *Sensors* 24(7), 2890.
- Raman, K., Gupta, A., Lee, J., 2025. The role of Metaverse technologies in energy systems: Opportunities and risks. *Energy Reports* 11, 551-569.
- Rohde, F., Wagner, M., Meyer, J., 2023. Broadening the perspective for sustainable AI: Comprehensive sustainability criteria and indicators. *AI and Ethics* 3(4), 489-505.
- Rolnick, D., Donti, P.L., Kaack, L.H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Bengio, Y., 2022. Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys* 55(2), 1-96.
- Roy, A., 2025. Metaverse-based education for sustainable development. *Technology in Society* 74, 102562.
- Shahraki, A. A., Rahmani, M., Amini, M., 2024. Institutional barriers to smart urban governance in Iranian mid-sized cities. *Cities* 148, 104611. (In Persian)
- Sharifi, A., Ghanbari, A., Lim, C., 2025. Digital twins, AI and the Metaverse in sustainable urban governance. *Sustainable Cities and Society* 109, 105612.
- Uribe, C., Martinez, J., Delgado, M., 2024. Comparing learning outcomes in Metaverse-based classrooms. *Frontiers in Education* 9, 1451859.
- Venter, Z.S., Barton, D.N., Gundersen, V., Figari, H., Nowell, M., 2020. Urban nature in a time of crisis: Recreational use of green space increases during the COVID-19 outbreak in Oslo, Norway. *Environmental Research Letters* 15(10), 104075.
- Wang, Y., Su, Z., Zhang, N., 2022. A survey on Metaverse: Fundamentals, security, and privacy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 24(1), 1-35.
- Xu, M., Lim, W.Y.B., Xiong, Z., Niyato, D., Miao, C., Kim, D.I., 2023. Towards green metaverse networking technologies. *IEEE Wireless Communications* 30(1), 110-117.
- Xu, X., Sun, Y., Liu, X., Wang, H., 2023. Edge intelligence in the metaverse: Architecture, applications, and challenges. *IEEE Internet of Things Journal* 10(15), 13429-13441.
- Zeynali Azim, A., Nayeri, B., 2025. Metaverse spider-web urban design theory. *International Journal of Innovation Studies* 9(1), 1459-1478.
- Zhang, Q., Lim, W., Kim, H., 2022. Towards green Metaverse networking technologies. *arXiv preprint arXiv: 2211.03057*.
- Zhang, X., Chen, H., Liu, Q., 2024. AI-enabled smart governance for resilient urban ecosystems. *Sustainable Cities and Society* 110, 105089.
- Zheng, Y., Yang, S., Cheng, J., 2022. Digital twin for sustainable cities: A review. *Sustainable Cities and Society* 76, 103415.
- Ziari, K., Sharifi, A., Fattahi, F., 2024. Spatial hierarchy and metropolitan governance in Iranian large cities. *Journal of Urban and Regional Analysis* 16(1), 87-104. (In Persian)