Scientific Journal of
Sustainable Development of Geographical Environment

Vol. 8, No. 16, Spring 2026

Original Article

The Role of the Metaverse in Crisis Simulation and Decision Support in Urban Planning with an Emphasis on Urban Morphology and Environmental Sustainability: The Case Study of Dubai

Behnaz Amin Nayeri[1], Dariush Sattarzadeh[*1], Manouchehr Tabibian[2], Lida Balilan Asl [1]

1. Department of architecture & urbanism, Ta.c, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2. Department of Urban Planning, Faculty of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Introduction: The aim of this study is to examine the function of the metaverse in simulating crisis scenarios and to evaluate its role in enhancing urban decision-making, with a focus on its implications for urban morphology and environmental sustainability in the city of Dubai. Due to its rapid urban growth, implementation of large-scale development projects, and substantial investment in advanced technologies, Dubai is considered one of the world's most advanced cities on the path toward smart urban development and can serve as an appropriate model for applying the metaverse in crisis management. The city faces various types of crises, including environmental challenges, limitations on natural resources, and transportation-related issues—crises that often occur suddenly and require fast, accurate, and data-driven decisions. In such circumstances, the metaverse, as an interactive three-dimensional digital environment, enables the simulation of different crisis scenarios before they occur in reality and allows the impacts of managerial decisions to be evaluated in a safe and controlled setting. The use of this technology can enhance the predictive, analytical, and responsive capacities of urban managers during critical situations while reducing decision-making risks.

Materials and Methods: This study adopts a quantitative, explanatory–applied approach to examine the role of the metaverse in redesigning urban morphology and enhancing environmental sustainability in Dubai. The methodological framework is based on testing causal relationships among theoretical constructs using Structural Equation Modeling (SEM). Metaverse-based scenario building and simulation were employed to operationalize morphological variables and reinforce the quantitative analysis. The study population comprised urban planning and design experts, including managers and technical specialists working in Dubai Municipality, the Smart Dubai Office, and institutions involved in urban development as well as digital twin and metaverse projects. Stratified random sampling proportional to organizational representation was applied. Sample size was determined using Cohen's formula with a significance level of 0.05 and statistical power of 0.80, yielding a minimum of 220 respondents; to account for potential attrition, 250 valid questionnaires were analyzed. Data were collected through a researcher-designed questionnaire consisting of 30 items across four main constructs. Analysis was conducted using SmartPLS version 4. The measurement model was first assessed, followed by evaluation of the structural model using path coefficients, coefficients of determination (R^2), predictive relevance (Q^2), effect sizes (f^2), and bootstrapping with 5,000 resamples. The overall goodness-of-fit index (GOF = 0.65) indicated a strong model fit. External validity was supported by aligning the results with spatial data and urban development reports of Dubai, including Expo 2020.

Results and Discussion: The results of the structural equation modeling indicate that the research model demonstrates strong fit and explanatory power, with an overall goodness-of-fit value of GOF = 0.65. The measurement model shows adequate quality, as all constructs report AVE values above 0.50 and both composite reliability and Cronbach's alpha exceed 0.70. In the structural model, the coefficients of determination are $R^2 = 0.67$ for environmental sustainability, $R^2 = 0.59$ for urban morphology, and $R^2 = 0.54$ for socio-economic outcomes. Path coefficients reveal that metaverse application has a direct and significant effect on environmental sustainability ($\beta = 0.42$), which is further strengthened through urban morphological change ($\beta = 0.35$). Socio-economic outcomes show positive but mainly indirect effects, emerging after morphological adjustments are implemented.

Conclusion: This study concludes that the metaverse represents an effective and reliable framework for urban planning and design in Dubai, particularly when applied to the reconfiguration of urban morphology. The findings demonstrate that environmental sustainability is achieved mainly through measurable spatial and morphological transformations rather than through social or economic factors alone. By enabling scenario-based simulations and data-driven evaluation of urban form, the metaverse reduces planning risks and supports informed decision-making. Consequently, integrating metaverse-based tools into urban policy can provide a strategic pathway for sustainable urban development, with urban morphology serving as the core lever for long-term environmental improvement.

Keywords: Dubai City, Environmental Sustainability, Metaverse, Urban Morphology, Urban Planning.

Citation: Amin Nayeri, B., Sattarzadeh, D., Tabibian, M., & Balilan Asl, L. (2026). The Role of the Metaverse in Crisis Simulation and Decision Support in Urban Planning with an Emphasis on Urban Morphology and Environmental Sustainability: The Case Study of Dubai. Sustainable Development of Geographical Environment, Vol. 8, No. 16,(17-35). https://doi.org/10.48308/sdge.2026.243204.1291

Reccived:08/01/2026 Revised:28/04/2026 Accepted:06/05/2026

* Corresponding Author's Email: sattarzadeh@iau.ac.ir

فصلنامه علمی توسعه پایدار محیط جغرافیایی
دوره ۸، شماره ۱۶، بهار ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی

نقش متاورس در شبیه‌سازی بحران و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی شهری با تأکید بر ریخت‌شناسی و پایداری محیطی: مطالعه موردی دبی

بهناز امین نیری[۱]، داریوش ستارزاده[۱*]، منوچهر طبیبیان[۲]، لیدا بلیلان اصل[۱]

۱. گروه معماری و شهرسازی، دانشکده جامعه و رسانه، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲. گروه شهرسازی، دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: هدف این پژوهش بررسی کارکرد متاورس در شبیه‌سازی سناریوهای بحران و ارزیابی نقش آن در بهبود تصمیم‌گیری شهری، با تمرکز بر پیامدهای آن برای ریخت‌شناسی شهری و پایداری محیطی در شهر دبی است. دبی به دلیل رشد سریع شهری، اجرای پروژه‌های بزرگ‌مقیاس و سرمایه‌گذاری گسترده در فناوری‌های نوین، یکی از پیشرفته‌ترین شهرهای جهان در مسیر هوشمندسازی به شمار می‌رود و می‌تواند به‌عنوان الگویی مناسب برای به‌کارگیری متاورس در مدیریت بحران مطرح شود. این شهر با انواع بحران‌ها از جمله بحران‌های زیست‌محیطی، محدودیت منابع طبیعی و چالش‌های حمل‌ونقل مواجه است؛ بحران‌هایی که اغلب به‌صورت ناگهانی رخ می‌دهند و مستلزم تصمیم‌گیری سریع، دقیق و مبتنی بر داده هستند. در چنین شرایطی، متاورس به‌عنوان یک محیط دیجیتال تعاملی و سه‌بعدی، این امکان را فراهم می‌کند که سناریوهای مختلف بحران پیش از وقوع واقعی شبیه‌سازی شوند و پیامدهای تصمیمات مدیریتی در محیطی امن و کنترل‌شده مورد ارزیابی قرار گیرند. استفاده از این فناوری می‌تواند توان پیش‌بینی، تحلیل و واکنش مدیران شهری را در شرایط بحرانی افزایش دهد و ریسک تصمیم‌گیری را کاهش دهد. این پژوهش با هدف تحلیل کاربرد متاورس در بهبود تصمیم‌گیری‌های شهری در زمان بحران، فرصت‌ها و چالش‌های پیاده‌سازی آن در دبی را بررسی می‌کند.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر کمّی و تبیینی–کاربردی است و چارچوب روش‌شناختی آن بر آزمون روابط علّی میان سازه‌های نظری با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری استوار است. برای عملیاتی‌سازی متغیرهای ریخت‌شناختی، از سناریونویسی و شبیه‌سازی مبتنی بر متاورس بهره گرفته شد. جامعه آماری شامل خبرگان برنامه‌ریزی و طراحی شهری، مدیران و کارشناسان فنی فعال در شهرداری دبی، دفتر دبی هوشمند و نهادهای مرتبط با پروژه‌های توسعه شهری، دوقلوی دیجیتال و متاورس بود. نمونه‌گیری به‌صورت تصادفی طبقه‌ای متناسب با سهم هر سازمان انجام شد. حجم نمونه با استفاده از فرمول کوهن و با سطح معناداری ۰/۰۵ و توان آماری ۰/۸۰ محاسبه گردید که حداقل ۲۲۰ نفر به دست آمد و در نهایت ۲۵۰ پرسشنامه معتبر تحلیل شد. ابزار گردآوری داده‌ها پرسشنامه‌ای محقق‌ساخته شامل ۳۰ گویه در چهار سازه اصلی بود. تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SmartPLS نسخه چهار انجام شد و مدل اندازه‌گیری و سپس مدل ساختاری با استفاده از ضرایب مسیر، R^2، Q^2، f^2 و بوت‌استرپینگ با ۵۰۰۰ بازنمونه ارزیابی گردید. برای تقویت روایی بیرونی، نتایج با داده‌های مکانی و گزارش‌های توسعه شهری دبی از جمله پروژه اکسپو ۲۰۲۰ تطبیق داده شد.

نتایج و بحث: نتایج مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که مدل پژوهش از برازش و قدرت تبیینی بالایی برخوردار است؛ به‌طوری‌که مقدار شاخص برازش کلی GOF برابر ۰/۶۵ به دست آمد. نتایج مدل اندازه‌گیری نشان داد مقادیر AVE بیش از ۰/۵ و پایایی ترکیبی و آلفای کرونباخ برای همه سازه‌ها بیش از ۰/۷ است. در مدل ساختاری، مقدار R^2 پایداری محیطی ۰/۶۷، ریخت‌شناسی شهری ۰/۵۹ و پیامدهای اجتماعی–اقتصادی ۰/۵۴ برآورد شد. ضرایب مسیر نشان داد کاربرد متاورس اثر مستقیم و معناداری بر پایداری محیطی با ضریب ۰/۴۲ دارد و از طریق تغییرات ریخت‌شناسی شهری با ضریب ۰/۳۵ این اثر تقویت می‌شود. پیامدهای اجتماعی–اقتصادی نقش مثبت اما غیرمستقیم ایفا می‌کنند و پس از اصلاحات کالبدی ظاهر می‌شوند.

نتیجه‌گیری: این پژوهش به این نتیجه می‌رسد که متاورس چارچوبی کارآمد و قابل اتکا برای برنامه‌ریزی و طراحی شهری در دبی فراهم می‌آورد، به‌ویژه زمانی که در بازپیکربندی ریخت‌شناسی شهری به کار گرفته شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که تحقق پایداری محیطی بیش از آنکه صرفاً متکی بر عوامل اجتماعی یا اقتصادی باشد، عمدتاً از طریق دگرگونی‌های ریخت‌شناختی قابل اندازه‌گیری حاصل می‌شود. متاورس با امکان‌پذیر ساختن شبیه‌سازی‌های سناریومحور و ارزیابی داده‌محور فرم شهری، ریسک‌های برنامه‌ریزی را کاهش داده و از تصمیم‌گیری آگاهانه پشتیبانی می‌کند. بر این اساس، ادغام ابزارهای مبتنی بر متاورس در سیاست‌های شهری می‌تواند مسیر راهبردی مؤثری برای توسعه پایدار شهری فراهم سازد. مسیری که در آن ریخت‌شناسی شهری به‌عنوان اهرم اصلی بهبود بلندمدت محیطی ایفای نقش می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پایداری زیست‌محیطی، متاورس، ریخت‌شناسی شهری، برنامه‌ریزی شهری، شهر دبی

استناد: امین نیری. ب.، ستارزاده. د.، طبیبیان. م.، و بلیلان اصل. ل. (۱۴۰۵). نقش متاورس در شبیه‌سازی بحران و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی شهری با تأکید بر ریخت‌شناسی و پایداری محیطی: مطالعه موردی دبی. توسعه پایدار محیط جغرافیایی، دوره ۸، شماره ۱۶، بهار ۱۴۰۵، (۱۷-۳۵). https://doi.org/۱۰,٤٨٣٠٨/sdge.۲۰۲٦,۲٤۳۲۰٤,۱۲۹۱

دریافت:۱۴۰۴/۱۰/۱۸ بازنگری:۱۴۰۵/۰۲/۰۸ پذیرش:۱۴۰۵/۰۲/۱۶

* رایانامه نویسنده مسئول: sattarzadeh@iau.ac.ir

مقدمه

تحولات پرشتاب فناوری‌های دیجیتال و پیچیدگی فزاینده چالش‌های شهری در دهه اخیر، ضرورت بهره‌گیری از ابزارهای نوین برای تحلیل، برنامه‌ریزی و مدیریت شهرها را بیش از پیش برجسته کرده است. رشد جمعیت، فشار بر زیرساخت‌ها، افزایش مصرف انرژی، تهدیدهای اقلیمی و نیاز به تصمیم‌گیری‌های سریع و کم‌ریسک، موجب شده است که رویکردهای سنتیِ خطی و ایستا در برنامه‌ریزی شهری کارآمدی خود را از دست بدهند و جای خود را به رویکردهای داده‌محور، تعاملی و سناریومحور بدهند (Batty, 2023؛ Zeynali Azim et al., 2025). در چنین بستری، متاورس به‌عنوان یک محیط دیجیتال سه‌بعدی مبتنی بر واقعیت مجازی، واقعیت افزوده، هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال[1] امکان بازنمایی دقیق شهر و آزمون پیامدهای کالبدی و زیست‌محیطی تصمیمات پیش از اجرا را فراهم می‌کند (Allam & Jones, 2022؛ Paez- Perez & Sánchez-Almodóvar, 2024). این ظرفیت به‌ویژه در شهرهایی که با رشد سریع، پروژه‌های کلان‌مقیاس و ریسک‌های زیست‌محیطی بالا مواجه‌اند، اهمیت مضاعفی می‌یابد.

دبی نمونه شاخص چنین بستر شهری است؛ شهری که طی دو دهه اخیر با پروژه‌های عظیم عمرانی، برج‌سازی گسترده، توسعه جزایر مصنوعی و گسترش فضاهای تجاری و گردشگری، دچار تغییرات بنیادین در ساختار فضایی خود شده و هم‌زمان با چالش‌هایی مانند مصرف بالای انرژی، وابستگی شدید به سیستم‌های سرمایشی، محدودیت منابع آب، فشار بر اکوسیستم‌های طبیعی و افزایش آلودگی مواجه است (Hemmati, 2021؛ Zeynali Azim, 2025). این وضعیت، ضرورت به‌کارگیری ابزارهایی را برجسته می‌کند که بتوانند سناریوهای مختلف توسعه را پیش از تحقق کالبدی آن‌ها شبیه‌سازی و پیامدهای فضایی، شبکه‌ای و محیطی را ارزیابی کنند (Allam et al., 2022؛ Bénaben et al., 2024). متاورس در چنین شرایطی قابلیت آن را دارد که ارتباط میان ساختار فضایی، الگوهای حرکت و فعالیت، مصرف انرژی و آسایش حرارتی را در یک فضای مجازی پویا آشکار سازد و از این طریق، مسیر تصمیم‌سازی شهری را به‌صورت داده‌پایه هدایت کند.

با وجود رشد قابل‌توجه ادبیات مربوط به کاربردهای متاورس در حوزه‌هایی مانند طراحی شهری، دوقلوی دیجیتال، مدیریت زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل و حکمرانی شهری (Dienhart et al., 2025؛ Chen et al., 2024؛ Lifelo et al., 2024)، هنوز بخش عمده پژوهش‌ها تنها بر یکی از ابعاد فناورانه، کالبدی یا محیطی تمرکز کرده و کمتر مطالعه‌ای به‌صورت یکپارچه به بررسی نقش متاورس در بازطراحی ریخت‌شناسی شهری و بهبود پایداری محیطی در یک شهر واقعی پرداخته است. بیشتر تحقیقات موجود همچنین در سطح مفهومی باقی مانده‌اند و روابط میان متاورس، ساختار فضایی و شاخص‌های محیطی را با ترکیب روش‌های کمی مبتنی بر داده—از جمله مدل‌سازی ساختاری PLS-SEM—و شبیه‌سازی سناریوهای فضایی ارزیابی نکرده‌اند. این خلأ زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که توجه کنیم شهرهایی مانند دبی دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند؛ از رشد کالبدی شتابان گرفته تا سیاست‌های رسمی در زمینه توسعه متاورس که می‌توانند بستری کاربردی برای آزمون تجربی تأثیر این فناوری بر ساختار فضایی و پیامدهای زیست‌محیطی فراهم کنند.

بنابراین شکاف اصلی پژوهش در نبود چارچوبی است که بتواند نقش متاورس را در بازپیکربندی ریخت‌شناسی شهری و پایداری محیطی در یک محیط واقعی و داده‌محور بررسی کند و هم‌زمان قادر باشد مسیر اثرگذاری متاورس بر پایداری را از خلال تغییرات ساختار فضایی شهر تبیین نماید. نوآوری این پژوهش در آن است که با تلفیق سه لایه «ریخت‌شناسی شهری»، «پایداری محیطی» و «متاورس/دوقلوی دیجیتال» و با بهره‌گیری هم‌زمان از یافته‌های مدل‌سازی PLS-SEM و شبیه‌سازی سناریوهای متاورسی، تأثیر متاورس بر ساختار فضایی و پیامدهای محیطی شهر دبی را به‌صورت تجربی و داده‌محور بررسی می‌کند. درنتیجه، سؤال اصلی پژوهش به این صورت شکل می‌گیرد که متاورس چگونه می‌تواند در فرآیند برنامه‌ریزی و طراحی شهری به بازطراحی ساختار فضایی و ارتقای پایداری محیطی دبی منجر شود. بر این اساس، این پژوهش با تمرکز بر ارتباط میان فناوری‌های متاورسی، ریخت‌شناسی شهری و شاخص‌های پایداری محیطی، مدلی مفهومی برای تحلیل این روابط ارائه

[1] Digital Twin

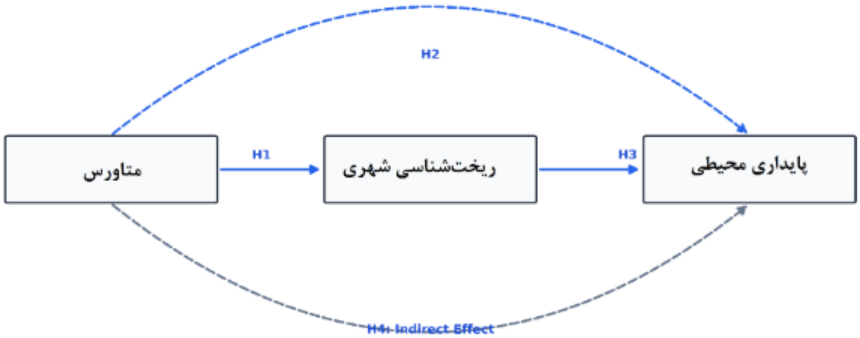
می‌کند. در چارچوب این مدل، فرض می‌شود که متاورس از طریق فراهم‌سازی بسترهای شبیه‌سازی فضایی و تحلیل داده‌محور می‌تواند بر نحوه سازماندهی ساختار کالبدی شهر تأثیر گذاشته و در نهایت پیامدهای محیطی توسعه شهری را تحت تأثیر قرار دهد. بر این اساس، فرضیات پژوهش به شرح زیر تدوین شده‌اند:

H1. متاورس تأثیر معناداری بر ریخت‌شناسی شهری در شهر دبی دارد.

H2. متاورس تأثیر معناداری بر پایداری محیطی در شهر دبی دارد.

H3. ریخت‌شناسی شهری تأثیر معناداری بر پایداری محیطی در شهر دبی دارد.

H4. ریخت‌شناسی شهری نقش میانجی در رابطه بین متاورس و پایداری محیطی ایفا می‌کند.



شکل ۱. مدل مفهومی تحقیق (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

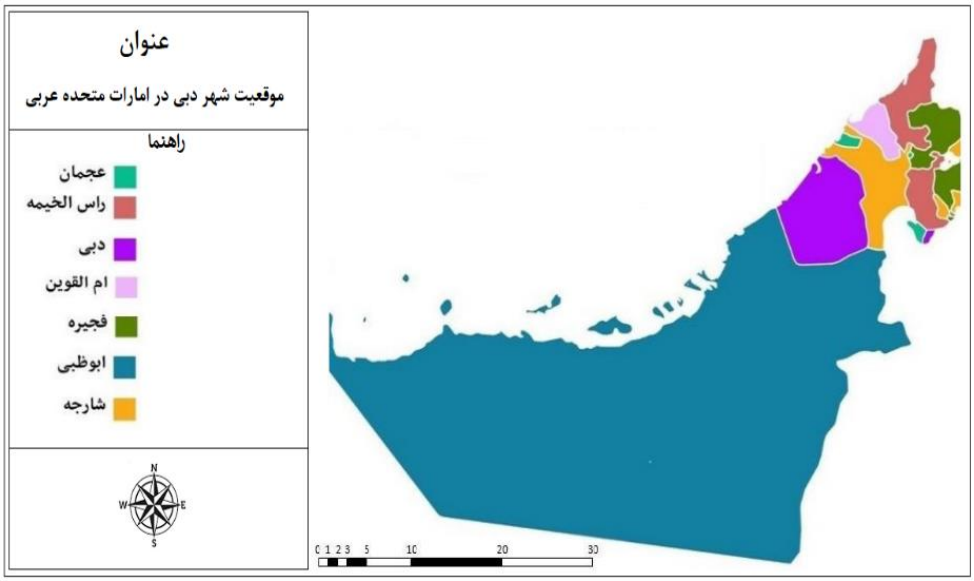
جدول ۱. متغیرها و گویه‌های تحقیق (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

بعد	شاخص اصلی	گویه (زیرشاخص)	منابع
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری (AMUPD)	مدل‌سازی سه‌بعدی تعاملی	استفاده از واقعیت مجازی و افزوده در طراحی	Almeida, 2025
		قابلیت تغییر طرح‌ها پیش از اجرا	Mosharraf, 2025, Kuru, & Kuru, 2024, Kuru, 2023
		دسترسی مدیران به مدل‌های تعاملی	Lifelo et al, 2024
	شبیه‌سازی سناریوهای توسعه	پیش‌بینی تغییرات کالبدی و محیطی	Liu et al, 2022
		ارزیابی اثرات اجتماعی–زیست‌محیطی	Almeida, 2025, Lifelo et al, 2024
		مقایسه سناریوها برای انتخاب بهینه	Mosharraf, 2025
	پلتفرم‌های مشارکت شهروندی مجازی	میزان استفاده از پلتفرم متاورسی	Owojori, 2025, Almeida, 2025
		بهره‌گیری از بازخورد شهروندان در پروژه‌ها	Liu et al, 2022
تغییرات ریخت‌شناسی شهری (UMC)	فشردگی و تراکم شهری	تراکم ساختمانی در سناریوهای متاورسی	Esmi & Hashemi, 2025
		کاهش پراکندگی و بهبود انسجام کالبدی	Mosharraf, 2025
	الگوی کاربری زمین	اختلاط کاربری‌ها	Bibri & Allam, 2022
		نسبت زمینِ ساخته‌شده به فضای باز	Bibri & Allam, 2022
	انعطاف‌پذیری فضایی	تغییر عملکرد فضا در طول زمان	Owojori, 2025, Almeida, 2025
		سازگاری سریع با نیازهای جدید	Mosharraf, 2025, Liu et al, 2022
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی (ESPM)	بهره‌وری منابع	صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آب	Dwivedi et al, 2023
		استفاده از منابع تجدیدپذیر	Almeida, 2025, Lifelo et al, 2024
	کاهش انتشار آلاینده‌ها	کاهش انتشار کربن با بهینه‌سازی طراحی	Owojori, 2025, Almeida, 2025
		کاهش آلودگی هوا با مدیریت حمل‌ونقل	Rahmati, 2023
	ارتقای کیفیت محیط‌زیست	بهبود کیفیت هوا و کاهش گردوغبار	Bibri & Allam, 2022,
		افزایش سرانه فضای سبز	Mosharraf, 2025, Bibri & Allam, 2022
		ارتقای تنوع زیستی شهری	Allam et al., 2022
پیامدهای اجتماعی–اقتصادی (SEC)	بهبود کیفیت زندگی شهری	افزایش دسترسی به خدمات	Liu et al, 2022
		بهبود امنیت و ایمنی	Almeida, 2025, Lifelo et al, 2024
	توسعه اقتصاد دیجیتال شهری	ایجاد مشاغل جدید مرتبط با متاورس	Mosharraf, 2025
		جذب سرمایه‌گذاری خارجی	Owojori, 2025, Almeida, 2025

مواد و روش‌ها

محدوده موردمطالعه

محدوده موردمطالعه این پژوهش شهر دبی در امارات متحده عربی است که در مختصات جغرافیایی حدود ۲۵°۱۲′ عرض شمالی و ۵۵°۱۸′ طول شرقی و در امتداد سواحل جنوبی خلیج‌فارس قرار دارد. دبی با مساحتی حدود ۱۱۴٬۴ کیلومترمربع و جمعیتی نزدیک به ۳/۸ میلیون نفر در سال ۲۰۲۴، دارای اقلیم گرم و خشک بیابانی با بارندگی اندک و دماهای بسیار بالا در فصول گرم سال است (Dubai Statistics Center, 2025). این شرایط اقلیمی، همراه با رشد سریع شهری و زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته، دبی را به بستری مناسب برای بررسی کمی نقش متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری و ارتقای پایداری محیطی تبدیل کرده است (UAE Government, 2024).



شکل ۲. موقعیت شهر دبی در امارات متحده عربی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

روش پژوهش

روش تحقیق این پژوهش کمّی و از نظر هدف تبیینی–کاربردی است و با تمرکز بر تبیین نقش متاورس در بازطراحی ریخت‌شناسی شهری و ارتقای پایداری محیطی شهر دبی انجام شده است. منطق روش‌شناختی پژوهش بر آزمون روابط علّی میان سازه‌های نظری در چارچوب مدل‌سازی معادلات ساختاری استوار بوده و سناریونویسی و شبیه‌سازی متاورسی به‌عنوان ابزار عملیاتی‌سازی مفاهیم ریخت‌شناختی و تقویت تحلیل کمّی به کار گرفته شده است.

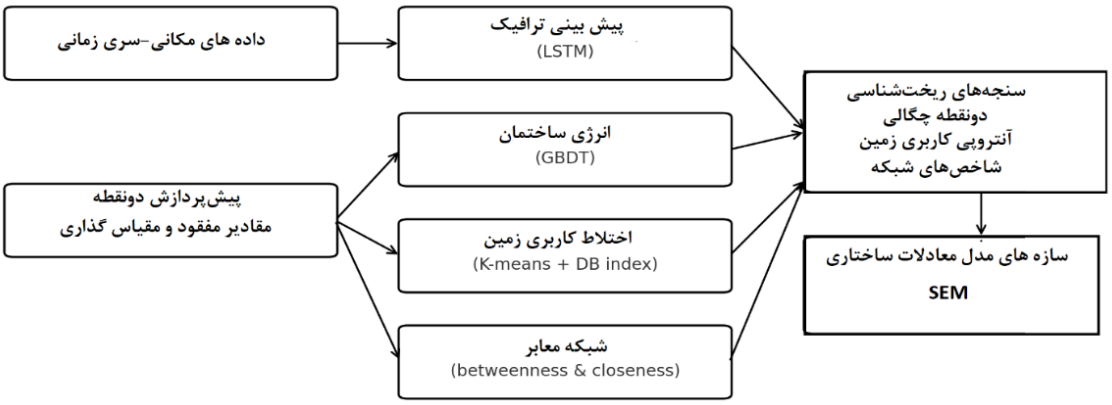
جامعه آماری پژوهش شامل خبرگان حوزه برنامه‌ریزی و طراحی شهری، مدیران و کارشناسان فنی فعال در شهرداری دبی، دفتر دبی هوشمند و نهادهای مرتبط با توسعه شهری و پروژه‌های دوقلوی دیجیتال و متاورس بوده است. انتخاب پاسخ‌گویان بر اساس معیار تخصص حرفه‌ای، سابقه فعالیت اجرایی و آشنایی با فناوری‌های دیجیتال شهری انجام شد و نمونه‌گیری به‌صورت تصادفی طبقه‌ای متناسب با سهم هر سازمان صورت گرفت تا نمایندگی گروه‌های مختلف خبرگان تضمین شود. حجم نمونه پژوهش بر اساس الزامات مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) تعیین شد. در این راستا، ابتدا قاعده ده برابری (۱۰-times rule) به‌عنوان حداقل معیار حجم نمونه در PLS مورد توجه قرار گرفت. همچنین به‌منظور برآورد دقیق‌تر، محاسبه حجم نمونه با استفاده از فرمول کوهن و با در نظر گرفتن سطح معناداری ۰/۰۵ و توان آماری ۰/۸۰ انجام شد که حداقل حجم نمونه موردنیاز ۲۲۰ نفر برآورد گردید. بر این اساس و با هدف افزایش پایایی نتایج و جبران احتمال داده‌های ناقص، تعداد ۲۵۰ پرسشنامه معتبر جمع‌آوری و در تحلیل

نهایی مورد استفاده قرار گرفت. این حجم نمونه با توجه به تعداد سازه‌ها و مسیرهای ساختاری مدل، کفایت آماری لازم برای برآورد پایدار ضرایب مسیر و آزمون روابط علّی در مدل PLS-SEM را فراهم می‌کند.

ابزار گردآوری داده‌ها پرسشنامه محقق‌ساخته‌ای بود که بر اساس ادبیات نظری، مدل مفهومی پژوهش و سنجه‌های ریخت‌شناختی استخراج‌شده از شبیه‌سازی‌های متاورسی طراحی گردید و شامل ۳۳ گویه در چهار سازه اصلی و یازده شاخص تحلیلی بود. پرسشنامه به دو زبان فارسی و انگلیسی در اختیار خبرگان قرار گرفت. روایی محتوایی و سازه‌ای ابزار با استفاده از روش‌های متعارف و نظر خبرگان بررسی شد و پایایی آن نیز با شاخص‌های استاندارد سنجش پایایی ارزیابی گردید. به‌منظور عملیاتی‌سازی متغیرهای ریخت‌شناختی، از سناریونویسی مبتنی بر شبیه‌سازی در بستر متاورس و دوقلوی دیجیتال شهر دبی استفاده شد. داده‌های ورودی شامل مدل سه‌بعدی دارایی‌های شهری، لایه‌های GIS، شبکه معابر، کاربری زمین، مدل ارتفاعی و داده‌های مکانی مرتبط با تردد پیاده، سایه و شرایط اقلیمی بود که در محیط دوقلوی دیجیتال یکپارچه‌سازی شدند. در این پژوهش، شش سناریوی ریخت‌شناسی شهری در بستر متاورس به‌منظور شبیه‌سازی شرایط مختلف بحران و ارزیابی پیامدهای فضایی و محیطی آن‌ها طراحی شد. این سناریوها بر اساس شاخص‌های کلیدی ریخت‌شناسی شهری مانند تراکم، الگوی دسترسی، سازمان فضایی کاربری‌ها و ظرفیت شبکه حمل‌ونقل تدوین گردیدند. در مرحله بعد، برای عملیاتی‌سازی این سناریوها در قالب متغیرهای قابل سنجش، ابعاد و پیامدهای هر سناریو استخراج و به مجموعه‌ای از شاخص‌های مفهومی تبدیل شد.

بر مبنای این شاخص‌ها، گویه‌های پرسشنامه طراحی گردید تا میزان ادراک و ارزیابی خبرگان نسبت به کارایی سناریوهای شبیه‌سازی‌شده در بهبود تصمیم‌گیری شهری، تغییرات ریخت‌شناسی و ارتقای پایداری محیطی سنجیده شود. به بیان دیگر، سناریوهای شبیه‌سازی‌شده ابتدا به شاخص‌های تحلیلی تبدیل شدند و سپس این شاخص‌ها در قالب گویه‌های پرسشنامه در چهار سازه اصلی پژوهش عملیاتی شدند. این فرآیند امکان پیوند میان نتایج شبیه‌سازی متاورسی و مدل تحلیلی مبتنی بر پرسشنامه را فراهم ساخت.

تحلیل داده‌های پرسشنامه‌ای با نرم‌افزار SmartPLS نسخه چهار انجام شد. در گام نخست، مدل اندازه‌گیری از حیث کفایت شاخص‌ها بررسی شد و سپس مدل ساختاری برای آزمون روابط علّی میان سازه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. به‌منظور تقویت روایی بیرونی پژوهش، نتایج مدل با داده‌های مکانی و اسناد توسعه شهری دبی تطبیق داده شد. در این راستا، از گزارش‌های توسعه مرتبط با پروژه Expo 2020 و برنامه‌های توسعه شهری دبی استفاده گردید و شاخص‌هایی مانند الگوی توزیع کاربری اراضی، تراکم ساختمانی، توسعه شبکه حمل‌ونقل و شکل‌گیری مراکز جدید فعالیت شهری مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه این شاخص‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از مدل نشان داد که الگوهای پیشنهادی مبتنی بر متاورس در زمینه تغییرات ریخت‌شناسی شهری و بهبود پایداری محیطی، با روندهای واقعی توسعه فضایی شهر دبی هم‌خوانی قابل‌توجهی دارد.



شکل ۳. جریان یکپارچه‌سازی متاورس و ریخت‌شناسی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

نتایج و بحث

به‌منظور افزایش شفافیت روش‌شناسی و ساختار تحلیل‌ها، نتایج این پژوهش در دو بخش متمایز ارائه شده است. بخش نخست که در قالب جداول ۲ تا ۹ ارائه شده، مبتنی بر داده‌های کمی حاصل از پرسشنامه خبرگان با حجم نمونه ۲۵۰ نفر است و تحلیل آن از طریق مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) در نرم‌افزار SmartPLS.4 انجام شده است. در این بخش، آمار توصیفی متغیرها، آزمون نرمال بودن داده‌ها، ارزیابی روایی و پایایی ابزار اندازه‌گیری، تحلیل مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری، ضرایب مسیر، اثرات مستقیم و غیرمستقیم و شاخص برازش کلی مدل گزارش شده است.

در مقابل، بخش دوم نتایج به تحلیل‌های مبتنی بر شبیه‌سازی اختصاص دارد که در زیربخش «یکپارچه‌سازی متاورس، ریخت‌شناسی شهری و هوش مصنوعی در دبی» ارائه شده است. در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای فضایی در بستر متاورس و دوقلوی دیجیتال شهر دبی، همراه با به‌کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تحلیل الگوهای ریخت‌شناسی شهری و ارزیابی پیامدهای آن‌ها بر شاخص‌های پایداری محیطی بررسی شده است. بدین‌ترتیب، مرز میان تحلیل‌های آماری مبتنی بر داده‌های پرسشنامه‌ای و تحلیل‌های سناریویی مبتنی بر شبیه‌سازی فضایی به‌صورت روشن و نظام‌مند تفکیک شده است.

جدول ۲. آمار توصیفی مؤلفه‌ها و شاخص‌های تحقیق، (مقیاس لیکرت پنج‌درجه‌ای) (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

بُعد و شاخص	میانگین	انحراف معیار	تعداد نمونه
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری	۴٫۳۵	۰٫۵۳	۲۵۰
مدل‌سازی سه‌بعدی تعاملی	۴٫۴۰	۰٫۵۰	۲۵۰
شبیه‌سازی سناریوهای توسعه	۴٫۲۸	۰٫۵۵	۲۵۰
پلتفرم‌های مشارکت شهروندی مجازی	۴٫۳۷	۰٫۵۳	۲۵۰
تغییرات ریخت‌شناسی شهری	۴٫۸۹	۰٫۵۶	۲۵۰
فشردگی و تراکم شهری	۴٫۲۵	۰٫۵۷	۲۵۰
الگوی کاربری زمین	۴٫۲۹	۰٫۵۴	۲۵۰
انعطاف‌پذیری فضایی	۴٫۲۷	۰٫۵۶	۲۵۰
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی	۴٫۳۶	۰٫۵۱	۲۵۰
بهره‌وری منابع	۴٫۳۸	۰٫۴۹	۲۵۰
کاهش انتشار آلاینده‌ها	۴٫۳۶	۰٫۵۲	۲۵۰
ارتقای کیفیت محیط‌زیست	۴٫۳۴	۰٫۵۳	۲۵۰
پیامدهای اجتماعی–اقتصادی	۴٫۲۸	۰٫۵۵	۲۵۰
بهبود کیفیت زندگی شهری	۲٫۵۰	۰٫۵۴	۲۵۰
توسعه اقتصاد دیجیتال شهری	۴٫۳۰	۰٫۵۶	۲۵۰

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که «سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی» با میانگین ۴/۳۶ و «کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری» با میانگین ۴/۳۵ بیشترین پذیرش را داشته‌اند. «تغییرات ریخت‌شناسی شهری» با پراکندگی بالاتر (انحراف معیار ۰/۵۶) بیانگر حساسیت و ناهمگونی دیدگاه‌ها نسبت به مداخلات کالبدی است. در سطح شاخص‌ها، میانگین بالای «مدل‌سازی سه‌بعدی تعاملی» (۴/۴۰) و «مشارکت مجازی» (۴/۳۷) نقش تعامل را در پذیرش تصمیمات طراحی تأیید می‌کند. در بُعد پایداری، «بهره‌وری منابع» (۴/۳۸) بالاتر از «کاهش انتشار» (۴/۳۶) و «ارتقای کیفیت محیط» (۴/۳۴) قرار دارد و در بُعد اجتماعی–اقتصادی، «بهبود کیفیت زندگی» (۴/۳۰) بر «اقتصاد دیجیتال» (۴/۲۶) تقدم دارد. مجموعاً، داده‌ها از زنجیره علّی «طراحی تعاملی ← اصلاح کالبدی ← پایداری محیطی ← پیامدهای اجتماعی–اقتصادی» پشتیبانی می‌کنند.

آزمون نرمال بودن و غیر نرمال بودن داده‌های تحقیق

جدول ۳. آزمون شاپیرو ویلک (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

سازه اصلی	شاخص زیرمجموعه	آماره شاپیرو ویلکW	sig	نتیجه
تغییرات ریخت‌شناسی شهری	فشردگی و تراکم شهری	۰٫۹۳	۰٫۰۰۲	غیرنرمال
تغییرات ریخت‌شناسی شهری	الگوی کاربری زمین	۰٫۹۴	۰٫۰۰۸	غیرنرمال
تغییرات ریخت‌شناسی شهری	انعطاف‌پذیری فضایی	۰٫۹۵	۰٫۰۱۲	غیرنرمال
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی	بهره‌وری منابع	۰٫۹۶	۰٫۰۷۳	غیرنرمال
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی	کاهش انتشار آلاینده‌ها	۰٫۹۴	۰٫۰۰۵	غیرنرمال
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی	ارتقای کیفیت محیط‌زیست	۰٫۹۵	۰٫۰۴۱	غیرنرمال
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی	مدل‌سازی سه‌بعدی تعاملی	۰٫۹۶	۰٫۰۶۱	غیرنرمال
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی	شبیه‌سازی سناریوهای توسعه	۰٫۹۵	۰٫۰۲۷	غیرنرمال
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی	مشارکت شهروندی مجازی	۰٫۹۶	۰٫۰۵۶	غیرنرمال
پیامدهای اجتماعی اقتصادی	بهبود کیفیت زندگی شهری	۰٫۹۴	۰٫۰۰۹	غیرنرمال
پیامدهای اجتماعی اقتصادی	توسعه اقتصاد دیجیتال شهری	۰٫۹۵	۰٫۰۳۳	غیرنرمال

نتایج آزمون شاپیرو–ویلک نشان داد که توزیع برخی از متغیرهای پژوهش از نرمالیت کامل تبعیت نمی‌کند. با این حال، باید توجه داشت که این آزمون در حجم نمونه‌های نسبتاً بزرگ (مانند ۲۵۰ مشاهده در این پژوهش) حساسیت بالایی دارد و حتی انحراف‌های جزئی از نرمالیت را نیز معنادار گزارش می‌کند. ازاین‌رو، انتخاب روش مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) صرفاً بر مبنای مسئله نرمال نبودن داده‌ها صورت نگرفته است، بلکه با توجه به ماهیت پیش‌بینی‌محور این رویکرد، توانایی آن در تحلیل مدل‌های پیچیده شامل چندین سازه پنهان و شاخص‌های مشاهده‌پذیر و همچنین مناسب بودن آن برای مطالعات اکتشافی و توسعه نظری انجام شده است. بر اساس دیدگاه Hair و همکاران (۲۰۲۱)، رویکرد PLS-SEM به‌ویژه در پژوهش‌هایی که هدف آن‌ها تبیین روابط علّی و پیش‌بینی سازه‌های کلیدی در مدل‌های مفهومی است، رویکردی مناسب و قابل اتکا محسوب می‌شود.

جدول ۴. نتایج محاسبه شاخص‌های CVR و CVI برای گویه‌های پرسشنامه (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

شماره گویه	توضیح گویه	تعداد خبرگان موافق	CVR	CVI	CVI	CVI	نتیجه
۱	استفاده از مدل‌های واقعیت مجازی در طراحی	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۳	۰٫۹۰	۰٫۹۱	تأیید
۲	دسترسی مدیران شهری به مدل‌های تعاملی	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۹۰	۰٫۸۷	۰٫۸۹	تأیید
۳	قابلیت تغییر طرح‌ها در محیط مجازی پیش از اجرا	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۲	۰٫۸۸	۰٫۹۰	تأیید
۴	امکان پیش‌بینی تغییرات کالبدی و محیطی	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۵	۰٫۹۳	۰٫۹۴	تأیید
۵	ارزیابی تأثیرات اجتماعی–زیست‌محیطی هر سناریو	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۸۹	۰٫۸۷	۰٫۸۸	تأیید
۶	مقایسه سناریوها برای انتخاب بهینه	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۱	۰٫۸۸	۰٫۸۹	تأیید
۷	میزان استفاده از پلتفرم‌های متاورسی برای مشارکت عمومی	۱۲	۰٫۶۰	۰٫۸۴	۰٫۸۲	۰٫۸۳	تأیید
۸	سطح رضایت شهروندان از مشارکت مجازی	۱۰	۰٫۳۳	۰٫۷۵	۰٫۷۰	۰٫۷۲	حذف
۹	تعداد پروژه‌های شهری بهره‌مند از بازخورد شهروندان مجازی	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۰	۰٫۸۹	۰٫۹۱	تأیید
۱۰	تراکم ساختمانی در سناریوهای متاورسی	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۴	۰٫۹۲	۰٫۹۳	تأیید
۱۱	کاهش پراکندگی فضایی و بهبود انسجام کالبدی	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۸۹	۰٫۸۶	۰٫۸۷	تأیید
۱۲	بهره‌وری در استفاده از زمین	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۶	۰٫۹۳	۰٫۹۵	تأیید
۱۳	اختلاط کاربری‌ها	۱۲	۰٫۶۰	۰٫۸۵	۰٫۸۳	۰٫۸۴	تأیید
۱۴	تغییر نسبت زمین‌های ساخته‌شده به فضای باز	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۱	۰٫۹۰	۰٫۹۲	تأیید
۱۵	ایجاد فضاهای چندمنظوره در طراحی	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۸۹	۰٫۸۷	۰٫۸۸	تأیید
۱۶	قابلیت تغییر عملکرد فضاها در طول زمان	۱۲	۰٫۶۰	۰٫۸۵	۰٫۸۴	۰٫۸۵	تأیید
۱۷	سازگاری سریع با نیازهای جدید	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۲	۰٫۸۹	۰٫۹۰	تأیید
۱۸	کاهش هزینه‌های تغییر کاربری	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۸۸	۰٫۸۷	۰٫۸۹	تأیید
۱۹	صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آب	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۰٫۹۵	تأیید

شماره گویه	توضیح گویه	تعداد خبرگان موافق	CVR	CVI	CVI	CVI	نتیجه
۲۰	استفاده از منابع تجدیدپذیر	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۴	۰٫۹۲	۰٫۹۳	تأیید
۲۱	کاهش هدررفت مصالح ساختمانی	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۰	۰٫۸۹	۰٫۹۱	تأیید
۲۲	کاهش انتشار کربن	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۶	۰٫۹۴	۰٫۹۵	تأیید
۲۳	کاهش آلودگی هوا	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۳	۰٫۹۰	۰٫۹۱	تأیید
۲۴	کاهش آلودگی صوتی	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۸۹	۰٫۸۸	۰٫۸۹	تأیید
۲۵	بهبود کیفیت هوا	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۰٫۹۵	تأیید
۲۶	افزایش سرانه فضای سبز	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۲	۰٫۹۱	۰٫۹۳	تأیید
۲۷	ارتقای تنوع زیستی	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۸۸	۰٫۸۷	۰٫۸۹	تأیید
۲۸	افزایش دسترسی به خدمات	۱۲	۰٫۶۰	۰٫۸۴	۰٫۸۳	۰٫۸۵	تأیید
۲۹	بهبود امنیت و ایمنی	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۲	۰٫۹۰	۰٫۹۱	تأیید
۳۰	ارتقای تجربه کاربر از فضا	۱۵	۱٫۰۰	۰٫۹۵	۰٫۹۴	۰٫۹۵	تأیید
۳۱	ایجاد مشاغل جدید مرتبط با متاورس	۱۴	۰٫۸۷	۰٫۹۰	۰٫۸۹	۰٫۹۱	تأیید
۳۲	جذب سرمایه‌گذاری خارجی	۱۲	۰٫۶۰	۰٫۸۵	۰٫۸۴	۰٫۸۶	تأیید
۳۳	تقویت برند شهری	۱۳	۰٫۷۳	۰٫۸۹	۰٫۸۸	۰٫۸۹	تأیید

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که بیشترین حذف گویه مربوط به شاخص «سطح رضایت شهروندان از مشارکت مجازی» بوده است که به دلیل همپوشانی مفهومی با سایر گویه‌های مشارکت مجازی و دشواری سنجش تجربی، از دید خبرگان روایی محتوایی کافی نداشته است. در مقابل، حفظ سایر گویه‌ها نشان می‌دهد که ابزار پژوهش توانسته چهار بُعد مدل را به‌صورت جامع و بدون کاستی پوشش دهد. مقادیر بالای CVR برای گویه‌های «بهره‌وری منابع» برابر با ۱٫۰۰ و «کاهش انتشار آلاینده‌ها» برابر با ۰٫۸۷ بیانگر توافق قوی خبرگان بر اهمیت بُعد پایداری محیطی در سنجش نقش متاورس است. همچنین نتایج CVI نشان می‌دهد گویه‌های مرتبط با «مدل‌سازی سه‌بعدی تعاملی» و «شبیه‌سازی سناریوهای توسعه» از بالاترین وضوح و تناسب برخوردارند. در مجموع، تثبیت ۳۳ گویه نهایی با روایی محتوایی مناسب، موجب بهینه‌سازی ابزار، کاهش همپوشانی مفهومی و افزایش دقت برآورد روابط علّی در تحلیل معادلات ساختاری شده و قابلیت اتکای پرسشنامه را برای تحلیل‌های کمی تقویت کرده است.

مدل اندازه‌گیری

جدول ۵. مدل اندازه‌گیری متغیرها و گویه‌های تحقیق (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

بعد	شاخص اصلی	گویه (زیرشاخص)	بار عاملی		آلفای کرونباخ		CR		AVE	
			گویه	شاخص	بعد	شاخص	بعد	شاخص	بعد	شاخص
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری (AMUPD)	مدل‌سازی سه‌بعدی تعاملی	استفاده از واقعیت مجازی و افزوده در طراحی	۰٫۸۵	۰٫۸۳	۰٫۸۳	۰٫۸۳	۰٫۸۵	۰٫۸۸	۰٫۶۶	۰٫۶۵
		قابلیت تغییر طرح‌ها پیش از اجرا	۰٫۸۲							
		دسترسی مدیران به مدل‌های تعاملی	۰٫۸۳							
	شبیه‌سازی سناریوهای توسعه	پیش‌بینی تغییرات کالبدی و محیطی	۰٫۸۴	۰٫۸۲		۰٫۸۱		۰٫۸۶		۰٫۶۳
		ارزیابی اثرات اجتماعی–زیست‌محیطی	۰٫۸۱							
		مقایسه سناریوها برای انتخاب بهینه	۰٫۸۰							
	پلتفرم‌های مشارکت	میزان استفاده از پلتفرم متاورسی	۰٫۸۲	۰٫۸۴		۰٫۷۶		۰٫۸۲		۰٫۷۰

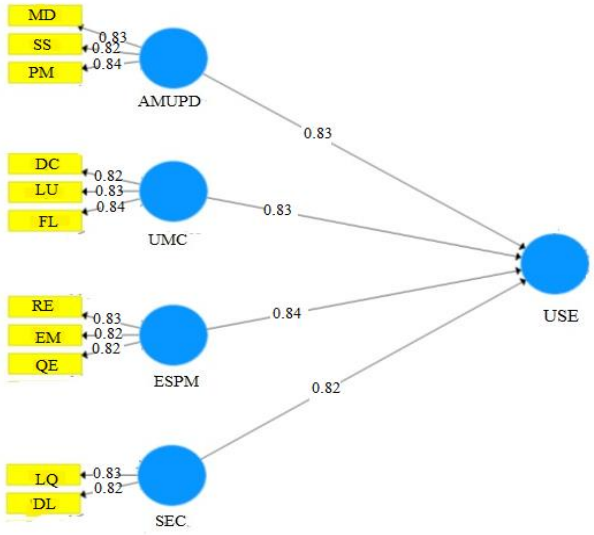
بعد	شاخص اصلی	گویه (زیرشاخص)	بار عاملی		آلفای کرونباخ		CR		AVE	
			گویه	شاخص	بعد	شاخص	بعد	شاخص	بعد	شاخص
	شهروندی مجازی	بهره‌گیری از بازخورد شهروندان در پروژه‌ها	۰٫۸۵							
تغییرات ریخت‌شناسی شهری (UMC)	فشردگی و تراکم شهری	تراکم ساختمانی در سناریوهای متاورسی	۰٫۸۱	۰٫۸۲	۰٫۸۳	۰٫۸۰	۰٫۸۶	۰٫۸۵	۰٫۶۴	۰٫۶۱
		کاهش پراکندگی و بهبود انسجام کالبدی	۰٫۸۳							
	الگوی کاربری زمین	اختلاط کاربری‌ها	۰٫۸۲	۰٫۸۳		۰٫۸۲		۰٫۸۶		۰٫۶۳
		نسبت زمینِ ساخته‌شده به فضای باز	۰٫۸۳							
	انعطاف‌پذیری فضایی	تغییر عملکرد فضا در طول زمان	۰٫۸۵	۰٫۸۴		۰٫۸۴		۰٫۸۸		۰٫۶۵
		سازگاری سریع با نیازهای جدید	۰٫۸۳							
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی (ESPM)	بهره‌وری منابع	صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آب	۰٫۸۴	۰٫۸۳	۰٫۸۴	۰٫۸۲	۰٫۸۷	۰٫۸۷	۰٫۶۴	۰٫۶۴
		استفاده از منابع تجدیدپذیر	۰٫۸۲							
	کاهش انتشار آلاینده‌ها	کاهش انتشار کربن با بهینه‌سازی طراحی	۰٫۸۳	۰٫۸۲		۰٫۸۱		۰٫۸۵		۰٫۶۲
		کاهش آلودگی هوا با مدیریت حمل‌ونقل	۰٫۸۱							
	ارتقای کیفیت محیط‌زیست	بهبود کیفیت هوا و کاهش گردوغبار	۰٫۸۶	۰٫۸۴		۰٫۸۳		۰٫۸۸		۰٫۶۶
		افزایش سرانه فضای سبز	۰٫۸۴							
		ارتقای تنوع زیستی شهری	۰٫۸۳							
پیامدهای اجتماعی–اقتصادی (SEC)	بهبود کیفیت زندگی شهری	افزایش دسترسی به خدمات	۰٫۸۲	۰٫۸۳	۰٫۸۲	۰٫۸۲	۰٫۸۶	۰٫۸۶	۰٫۶۲	۰٫۶۳
		بهبود امنیت و ایمنی	۰٫۸۳							
	توسعه اقتصاد دیجیتال شهری	ایجاد مشاغل جدید مرتبط با متاورس	۰٫۸۳	۰٫۸۲		۰٫۸۱		۰٫۸۵		۰٫۶۲
		جذب سرمایه‌گذاری خارجی	۰٫۸۱							

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که مدل اندازه‌گیری پژوهش از روایی همگرا و پایایی بالایی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر AVE برای همه سازه‌ها بیش از ۰/۶ و مقادیر CR و آلفای کرونباخ به ترتیب بالاتر از ۰/۸ و ۰/۷۵ به دست آمده‌اند. این یافته‌ها کفایت بارهای عاملی، انسجام درونی مناسب و ثبات ابزار سنجش را تأیید می‌کند. چهار بُعد اصلی مدل شامل کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری، تغییرات ریخت‌شناسی شهری، سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی و پیامدهای اجتماعی–اقتصادی، هر یک به‌طور معنادار ابعاد فنی، کالبدی، زیست‌محیطی و اجتماعی–اقتصادی توسعه شهری را پوشش داده‌اند. در مجموع، ساختار منسجم و چندبعدی مدل اندازه‌گیری نشان می‌دهد که ابزار پژوهش از قابلیت اتکای لازم برای تحلیل نقش متاورس در توسعه پایدار و هوشمند شهر دبی برخوردار است.

جدول ۶. ارزیابی روایی واگرا با استفاده از شاخص HTMT برای ابعاد مدل تحقیق (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

سازه	کاربرد متاورس	تغییرات ریخت‌شناسی	پایداری محیطی	پیامدهای اجتماعی–اقتصادی
کاربرد متاورس	-	۰٫۷۸	۰٫۷۳	۰٫۷۶
تغییرات ریخت‌شناسی	۰٫۷۸	-	۰٫۷۰	۰٫۸۱
پایداری محیطی	۰٫۷۳	۰٫۷۰	-	۰٫۷۷
پیامدهای اجتماعی–اقتصادی	۰٫۷۶	۰٫۸۱	۰٫۷۷	-

بر اساس نتایج جدول ۶ و شکل ۴، مقادیر شاخص HTMT برای تمامی جفت سازه‌ها کمتر از آستانه پیشنهادی ۰/۸۵ به دست آمده است که بیانگر وجود روایی واگرای مناسب و تمایز مفهومی قابل قبول میان ابعاد مدل پژوهش است. این نتایج نشان می‌دهد که سازه‌های تحقیق، با وجود ارتباط و هم‌افزایی عملکردی، از همپوشانی نظری قابل توجهی برخوردار نیستند و هر یک بُعدی متمایز از کاربرد متاورس در توسعه شهری دبی را تبیین می‌کنند. بیشترین مقدار HTMT مربوط به رابطه «تغییرات ریخت‌شناسی شهری» و «پیامدهای اجتماعی–اقتصادی» برابر با ۰/۸۱ است، در حالی‌که کمترین مقدار مربوط به رابطه «تغییرات ریخت‌شناسی شهری» و «پایداری محیطی» برابر با ۰/۷۰ گزارش شده است. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که چهار بُعد اصلی مدل از روایی واگرای قابل قبول برخوردار بوده و می‌توانند به‌طور هم‌زمان در مدل ساختاری پیشنهادی برای تبیین توسعه شهری دبی در بستر متاورس مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۴. ارزیابی اعتبار مدل نقش متاورس در بازطراحی ریخت‌شناسی شهری و ارتقای پایداری محیطی شهر دبی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

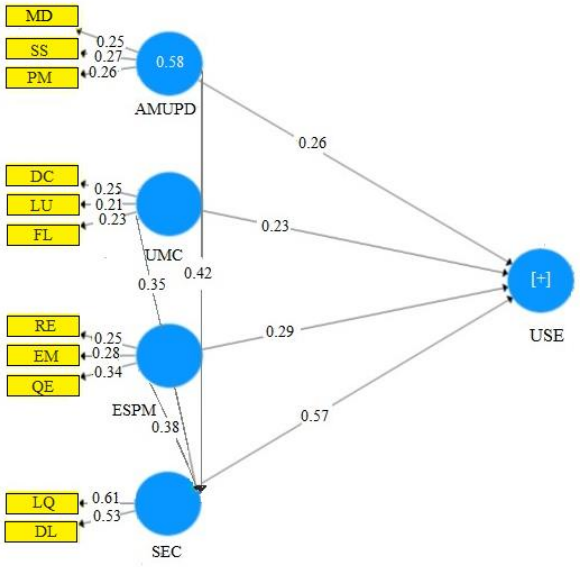
تحلیل مدل ساختاری و برآورد ضرایب مسیر بین متغیرهای تحقیق

جدول ۷. ضرایب مسیر، R^2، f^2 و Q^2 بین متغیرهای تحقیق (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

مسیر ارتباطی	(β)	R^2	t	Sig	f^2	Q^2
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری ← پیامدهای اجتماعی–اقتصادی	۰٫۴۲	۰٫۵۸	۹٫۱۵	۰٫۰۰۰	۰٫۲۱	۰٫۳۴
تغییرات ریخت‌شناسی شهری ← پیامدهای اجتماعی–اقتصادی	۰٫۳۵	—	۷٫۸۴	۰٫۰۰۰	۰٫۱۸	—
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی ← پیامدهای اجتماعی–اقتصادی	۰٫۳۸	—	۸٫۲۱	۰٫۰۰۰	۰٫۱۹	—
پیامدهای اجتماعی–اقتصادی ← اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی	۰٫۵۷	۰٫۶۴	۱۲٫۰۴	۰٫۰۰۰	۰٫۳۷	۰٫۴۱
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری ← اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی	۰٫۲۶	—	۵٫۹۸	۰٫۰۰۰	۰٫۱۴	—
تغییرات ریخت‌شناسی شهری ← اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی	۰٫۲۳	—	۵٫۲۱	۰٫۰۰۰	۰٫۱۲	—
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی ← اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی	۰٫۲۹	—	۶٫۴۵	۰٫۰۰۰	۰٫۱۶	—

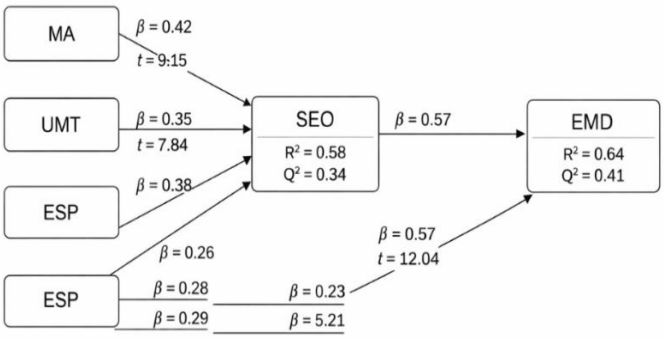
نتایج جدول ۷ و شکل ۵ در مدل‌سازی معادلات ساختاری با استفاده از SmartPLS نشان می‌دهد که هر سه متغیر مستقل شامل کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری، تغییرات ریخت‌شناسی شهری و سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی، اثر مثبت و معناداری بر متغیر میانجی پیامدهای اجتماعی–اقتصادی دارند. در این میان، مسیر کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری با ضریب مسیر برابر با ۰،۴۲ و اندازه اثر f^2 برابر با ۰،۲۱، قوی‌ترین تأثیر را نشان می‌دهد.

همچنین، پیامدهای اجتماعی–اقتصادی اثر بسیار قوی و معناداری بر اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی دارد؛ به‌طوری‌که ضریب مسیر برابر با ۰،۵۷، مقدار t برابر با ۱۲،۰۴ و اندازه اثر f^2 برابر با ۰،۳۷ به دست آمده و مقدار R^2 این سازه برابر با ۰،۶۴ گزارش شده است که بیانگر تبیین مناسب واریانس متغیر وابسته است. افزون بر این، مسیر مستقیم سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی به اثربخشی متاورس نیز معنادار و قابل توجه بوده و ضریب مسیر آن برابر با ۰،۲۹ و اندازه اثر f^2 برابر با ۰،۱۶ گزارش شده است. در نهایت، مقادیر شاخص Q^2 برای پیامدهای اجتماعی–اقتصادی برابر با ۰،۳۴ و برای اثربخشی متاورس برابر با ۰،۴۱ به دست آمده که بیانگر قدرت پیش‌بینی مطلوب مدل پژوهش است.



شکل ۵. ارزیابی ضریب مسیر نقش متاورس در بازطراحی ریخت‌شناسی شهری و ارتقای پایداری محیطی شهر دبی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

شکل ۵. ضرایب مسیر مدل ساختاری مربوط به نقش متاورس در بازطراحی ریخت‌شناسی شهری و ارتقای پایداری محیطی شهر دبی را نشان می‌دهد. مقادیر ضرایب بیانگر جهت و شدت تأثیر سازه‌ها بوده و مبنای تفسیر روابط علّی و تحلیل پیامدهای کالبدی و محیطی در مدل پژوهش محسوب می‌شوند.



شکل ۶. آماره t -val ue نقش متاورس در بازطراحی ریخت‌شناسی شهری و ارتقای پایداری محیطی شهر دبی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

شکل ۶ مقادیر آماره t-value مسیرهای مدل ساختاری مربوط به نقش متاورس در بازطراحی ریخت‌شناسی شهری و ارتقای پایداری محیطی شهر دبی را نشان می‌دهد. مقادیر آماره t بیانگر معناداری آماری روابط میان سازه‌های پژوهش بوده و نشان می‌دهد که مؤلفه‌های مرتبط با کاربرد متاورس، تغییرات ریخت‌شناسی شهری، سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی و پیامدهای اجتماعی–اقتصادی، از نظر آماری تأثیر معناداری بر تبیین الگوی نهایی پژوهش دارند. عبور مقادیر t از آستانه‌های متعارف معناداری، اعتبار روابط علّی فرض‌شده در مدل را تأیید می‌کند.

جدول ۸. اثرات مستقیم، غیرمستقیم و کل بوت‌استرپینگ (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

مسیر	اثر مستقیم β	مقدار t	مقدار p	اثر غیرمستقیم β	مقدار t	مقدار p	اثر کل β	مقدار t	مقدار p
کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری ⟶ اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی	۰٫۲۶	۵٫۹۸	۰٫۰۰۰	۰٫۲۴	۱۱٫۶۴	۰٫۰۰۰	۰٫۵۰	۸٫۷۹	۰٫۰۰۰
تغییرات ریخت‌شناسی شهری ⟶ اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی	۰٫۲۳	۵٫۲۱	۰٫۰۰۰	۰٫۲۰	۱۰٫۰۳	۰٫۰۰۰	۰٫۴۳	۷٫۶۸	۰٫۰۰۰
سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی ⟶ اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی	۰٫۲۹	۶٫۴۵	۰٫۰۰۰	۰٫۲۲	۱۲٫۰۷	۰٫۰۰۰	۰٫۵۱	۸٫۱۸	۰٫۰۰۰

یادداشت محاسباتی :اثر غیرمستقیم هر مسیر برابر با حاصل‌ضرب مسیر بُعد ⟶ پیامدهای اجتماعی–اقتصادی در مسیر پیامدهای اجتماعی–اقتصادی ⟶ اثربخشی متاورس بوده است؛ ضرایب مربوط به این دو مسیر به ترتیب برای سه بُعد برابر با ۰٫۴۲، ۰٫۳۵، ۰٫۳۸ و ۰٫۵۷ بوده‌اند، بنابراین اثرهای غیرمستقیم تقریباً برابر با ۰٫۲۴، ۰٫۲۰ و ۰٫۲۲ برآورد شده‌اند و اثر کل برای هر مسیر برابر با جمع اثر مستقیم و غیرمستقیم گزارش شده است.

نتایج جدول ۸ و شکل ۶ نشان می‌دهد که سیاست‌ها و اقدامات پایداری محیطی با اثر کل برابر با ۰/۵۱، قوی‌ترین نقش را در افزایش اثربخشی متاورس در توسعه شهری دبی ایفا می‌کنند. هم‌زمانی اثر مستقیم برابر با ۰/۲۹ و اثر غیرمستقیم برابر با ۰/۲۲ بیانگر میانجی‌گری تکمیلی پیامدهای اجتماعی–اقتصادی است که از طریق ارتقای کیفیت زندگی و تقویت اقتصاد دیجیتال، اثر سیاست‌های محیطی را تشدید می‌کند. کاربرد متاورس در برنامه‌ریزی و طراحی شهری با اثر کل برابر با ۰/۵۰، توازنی معنادار میان اثر مستقیم برابر با ۰/۲۶ و غیرمستقیم برابر با ۰/۲۴ نشان می‌دهد که حاکی از ترکیب هم‌زمان توان فنی متاورس و تقویت پیامدهای اجتماعی–اقتصادی است. تغییرات ریخت‌شناسی شهری نیز با اثر کل برابر با ۰/۴۳، از طریق اثرگذاری مستقیم بر کیفیت اجرا و اثرگذاری غیرمستقیم بر بهبود تجربه کاربر و دسترسی، نقش مؤثری در ارتقای اثربخشی ایفا می‌کند. معنی‌داری آماری همه مسیرها با مقادیر t بزرگ‌تر از ۵ و سطح معناداری ۰٫۰۰۰، اعتبار قوی روابط مدل را تأیید می‌کند.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که نقش میانجی پیامدهای اجتماعی–اقتصادی در دبی ساختاری و تعیین‌کننده است و هم‌افزایی میان سیاست‌های محیطی، کاربرد متاورس و مداخلات ریخت‌شناختی، مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی مرحله‌بندی و اجرای پروژه‌های متاورسی در توسعه شهری دبی فراهم می‌آورد.

جدول ۹. شاخص‌های برازش کلی مدل در PLS-SEM (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

شاخص	مقدار مدل	HI95	HI99	آستانه پیشنهادی	تفسیر
SRMR	۰/۰۶۷	—	—	کمتر از ۰/۰۸	برازش مناسب
d_ULS	۱/۴۲۳	۱/۷۹۵	۲/۰۴۶	مقدار مدل باید کمتر از HI99 باشد	قابل قبول
d_G	۰/۵۸۷	۰/۷۴۲	۰/۸۳۶	مقدار مدل باید کمتر از HI99 باشد	قابل قبول
Chi-Square	۸۴۵/۳۱۲	—	—	—	شاخص توصیفی
NFI	۰/۹۰۲	—	—	بیشتر از ۰/۹۰	برازش مناسب

نتایج ارزیابی برازش کلی مدل در جدول ۹ نشان می‌دهد که مقدار شاخص SRMR برابر با ۰/۰۶۷ است که کمتر از آستانه پیشنهادی ۰/۰۸ بوده و بیانگر برازش مناسب مدل پژوهش است. همچنین مقدار شاخص NFI برابر با ۰/۹۰۲ به دست آمد که از مقدار مرجع ۰/۹۰ بیشتر بوده و حاکی از برازش مطلوب مدل است.

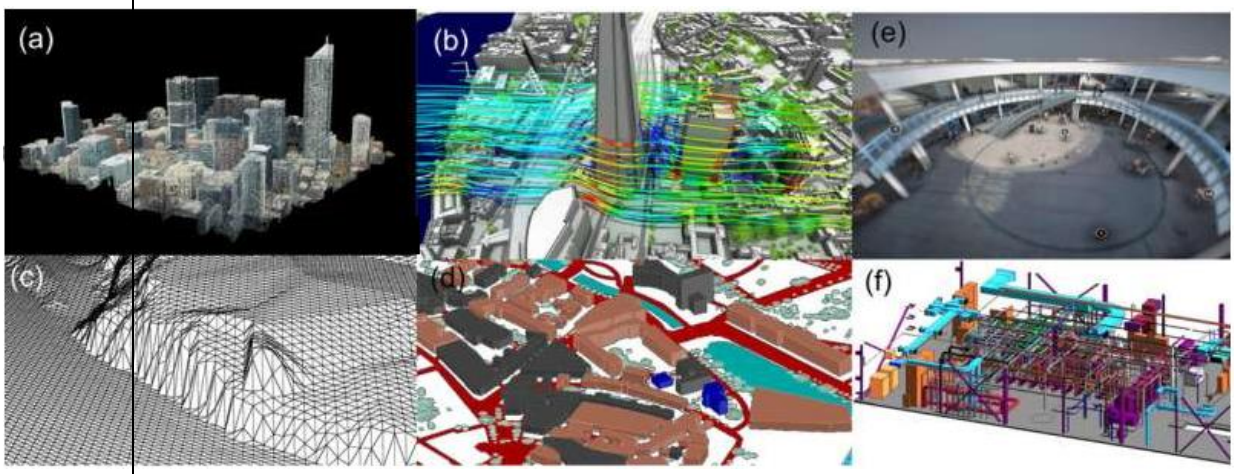
علاوه بر این، مقادیر شاخص‌های d_ULS و d_G کمتر از مقادیر مرجع HI99 هستند که نشان می‌دهد فاصله میان ماتریس همبستگی مشاهده‌شده و ماتریس برآوردشده توسط مدل در سطح قابل قبولی قرار دارد؛ بنابراین، بر اساس مجموعه شاخص‌های برازش ارائه‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مفهومی پژوهش از برازش کلی مناسبی برخوردار است و قابلیت اتکای لازم برای تحلیل روابط میان متغیرهای پژوهش و بررسی نقش متاورس در تحولات ریخت‌شناسی و پایداری محیطی شهر دبی را داراست.

یکپارچه‌سازی متاورس، ریخت‌شناسی و هوش مصنوعی در دبی: سناریوهای شبیه‌سازی‌شده

این زیربخش، نحوه به‌کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بستر دوقلوی دیجیتال برای ارزیابی دگرگونی‌های ریخت‌شناختیِ دبی را بیان می‌کند. داده‌های مکانی شامل مدل سه‌بعدی دارایی‌ها و لایه‌های GIS شهری، شبکه معابر، کاربری زمین، مدل ارتفاع و برداشت‌های میدانی سایه و تردد پیاده است. شاخص‌های ارزیابی کاملاً ریخت‌محور تعریف شدند تا رابطه علت و معلولی «ریخت ⟶ پیامد محیطی» شفاف بماند.

جدول ۱۰. سناریوهای ریخت‌شناسی متاورسی در دبی و منطق الگوریتمی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

ردیف	کد سناریو	ورودی‌های ریختیِ کلیدی	الگوریتم هوش مصنوعی	اعتبارسنجی داده‌محور	خروجی‌های محوری	شاخص‌های ارزیابی ریخت‌شناسی
۱	S1	افزایش نسبت سطح زیربنا پیرامون ایستگاه؛ افزایش آنتروپی کاربری در شعاع پیاده	شبکه بازگشتی زمانمند برای پیش‌بینی ترافیک ساعتی	تطبیق با شمارش‌های واقعی ایستگاهی	تغییر سهم سفر غیر خودرویی؛ تغییر انتشار حمل‌ونقل	Δ تراکم خالص؛ Δ آنتروپی کاربری؛ Δ پیوستگی پیاده
۲	S2	بازپیکربندی سوپربلاک با حلقه پیرامونی؛ آرام‌سازی معابر درونی	تحلیل مرکزیت بینابینی و نزدیکی در گراف شهری	تطبیق با ردیابی ناشناس تردد پیاده	بازتوزیع جریان؛ افزایش دسترسی کاربری‌های روزمره	Δ مرکزیت بینابینی؛ Δ طول مسیر پیاده ایمن؛Δ اندازه و تناوب بلوک
۳	S3	پیوند آبراه‌ها و فضاهای سبز؛ افزایش سطح نفوذپذیر	جانشینِ سی‌اف‌دی مبتنی بر وکسل برای باد شهری	تطبیق با میادین باد و ایستگاه‌های هواشناسی شهری	شکل‌گیری کریدور تهویه؛ بهبود آسایش حرارتی فضاهای باز	Δ پیوستگی شبکه آبی–سبز؛ Δ شاخص دید آسمان
۴	S4	اختلاط عمودی کاربری؛ فعال‌سازی جبهه خیابان	خوشه‌بندی کی‌میانگین و اعتبارسنجی با دیویس–بولدین	تطبیق با برداشت میدانی و داده نقاط علاقه	افزایش تنوع کاربری و جبهه فعال	Δ آنتروپی کاربری؛ Δ طول جبهه فعال؛ Δ تراکم عابر
۵	S5	بهینه‌سازی چندهدفه نسبت سطح زیربنا، اندازه بلوک، درصد فضای باز	جست‌وجوی چندهدفه	همسنجی با برآورد انرژی دیوا در سطح خوشه بلوک	جبهه پارتو برای مصرف انرژی و انتشار حمل‌ونقل	Δ تراکم–اندازه بلوک–فضای باز (موازنه بهینه)
۶	S6	طراحی کریدورهای پیاده سایه‌دار در ساعات بحرانی	یادگیری تقویتی مسیریابی با قید سایه	تطبیق با نقشه‌های سایه و دماسنجی مادون‌قرمز	بیشینه‌سازی طول مسیر سایه؛ کاهش تنش گرمایی	Δ طول مسیر سایه‌دار؛ Δ شاخص دمای مؤثرِ پیاده



شکل a. سناریو – S۱ تراکم‌گذاری پیرامون ایستگاه و اختلاط کاربری
نقشه سه‌بعدی حوزه پنج دقیقه پیاده با حلقه افزایش نسبت سطح زیربنا و گرادیان آنتروپی کاربری؛ بالای تصویر نمودار سری زمانی پیش‌بینی ترافیک ساعتی
شکل b. سناریو – S۲ سوپربلاک با حلقه پیرامونی.
گراف شبکه معابر قبل و بعد از مداخله با نقشه گرما برای مرکزیت بینابینی؛ جدول کوچک گوشه تصویر: تغییر اندازه و تناوب بلوک‌ها.
شکل c. سناریو – S۳ شبکه آبی–سبز و کریدور تهویه
مسیرهای باد شبیه‌سازی‌شده روی مدل حجمی؛ خطوط جریان از آبراه به فضای باز؛ نمودارΔ شاخص دید آسمان در مقاطع.
شکل d. سناریو – S٤ اختلاط عمودی و جبهه فعال
بلوک نمونه با کاربری‌های هم‌نشین در ارتفاع؛ نقشه جبهه‌های فعال در لبه خیابان؛ نمودار سیلوئت خوشه‌ها.
شکل e. سناریو – S٥ بهینه‌سازی چندهدفه ریخت‌شناسی
پراکنش جبهه پارتو در صفحه «مصرف انرژی بنا – انتشار حمل‌ونقل – طول مسیر پیاده پیوسته»؛ نقاط منتخب با برچسب ترکیب‌های ریختی
شکل f. سناریو – S٦ کریدورهای پیاده سایه‌دار
نقشه سایه در ساعت بحرانی و مسیرهای منتخبِ عاملِ RL؛ نمودار طول مسیر سایه‌دار نسبت به کوتاه‌ترین مسیر.

شکل ۷. شش سناریوی منتخب برای ریخت‌شناسی شهری دبی با استفاده از تکنولوژی متاورس (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

به‌منظور ایجاد پیوند روشن میان تحلیل سناریوها و نتایج مدل ساختاری، خروجی سناریوهای S1–S6 به‌عنوان مکمل تجربی یافته‌های PLS-SEM تفسیر شد. نتایج مدل ساختاری نشان داد که «ریخت‌شناسی شهری» به‌عنوان متغیر مرکزی پژوهش، اثر معناداری بر شاخص‌های پایداری محیطی دارد. سناریوهای شبیه‌سازی‌شده در متاورس این رابطه آماری را در سطح فضایی و عملیاتی قابل مشاهده کردند. به‌طور مشخص، تغییرات اعمال‌شده در شاخص‌های ریختی نظیر Δتراکم خالص، Δپیوستگی پیاده، Δاندازه بلوک، Δآنتروپیِکاربری، Δدید آسمان و Δپیوستگی شبکه آبی–سبز در هر یک از سناریوها، منجر به تغییرات قابل اندازه‌گیری در پیامدهای محیطی شد و الگوی این تغییرات با جهت و شدت ضرایب مسیر (β) به‌دست‌آمده از مدل PLS-SEM هم‌راستایی داشت. این همگرایی نشان می‌دهد که روابط آماری شناسایی‌شده در مدل ساختاری تنها نتایج انتزاعی نیستند، بلکه در بستر واقعی و مکانی نیز قابلیت بازنمایی و آزمون دارند. از این رو، شبیه‌سازی سناریوها در محیط دوقلوی دیجیتال شهر دبی نقش نوعی اعتبارسنجی فضایی و بیرونی برای یافته‌های مدل ساختاری ایفا می‌کند و نشان می‌دهد که دست‌کاری متغیر ریخت‌شناسی در محیط متاورس می‌تواند به‌طور مستقیم پیامدهای محیطی را پیش‌بینی و تبیین کند. این هم‌پوشانی میان تحلیل آماری و شبیه‌سازی فضایی، انسجام روش‌شناختی پژوهش را تقویت کرده و پشتوانه‌ای تجربی برای تفسیر علّی روابط میان ریخت‌شناسی شهری و پایداری محیطی فراهم می‌آورد.

اعتبارسنجی بیرونی با شواهد دوقلوی دیجیتال دبی

در راستای اعتبارسنجی بیرونی مدل پژوهش، از شواهد تجربی مرتبط با پروژه‌های دوقلوی دیجیتال و متاورس شهری در دبی استفاده شد. دوقلوی دیجیتال زنده Expo 2020 Dubai (زیمنس)، سامانه‌های دیجیتال‌توئین زیرساختی اداره برق و آب دبی (DEWA)، مدل سه‌بعدی و اطلس دیجیتال دبی (CityGML، شهرداری دبی) و همچنین سیاست‌ها و برنامه‌های «مجمع متاورس دبی»[1]، در مجموع نشان می‌دهند که این شهر از زیرساخت داده‌ای و مکانی پیشرفته‌ای برای اتصال «ریخت کالبدی» و «عملکرد شهری» برخوردار است. در این بسترها، داده‌های مکان‌مرجع با سطح جزئیات بالا (۲LOD و ۳LOD) امکان استخراج مستقیم شاخص‌های ریخت‌شناسی نظیر تراکم ساختمانی، آنتروپی کاربری زمین، اندازه و آرایش بلوک‌ها، نسبت فضاهای باز به ساخته‌شده و پیوستگی شبکه معابر را فراهم می‌کنند. همچنین یکپارچه‌سازی این داده‌ها با سناریوهای عملیاتی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تردد، مصرف انرژی و الگوهای استفاده از فضا، نشان می‌دهد که تغییر در الگوهای ریختی، به‌طور معناداری با تغییر در پیامدهای عملکردی و محیطی همراه است. این منطق «تغییر ریخت ← تغییر عملکرد» که در مدل ساختاری پژوهش با رویکرد PLS-SEM آزمون شده است، در محیط‌های دوقلوی دیجیتال دبی نیز به‌صورت تجربی مشاهده و به کار گرفته می‌شود. بدین ترتیب، مجموعه پروژه‌های یادشده به‌عنوان شواهد دنیای واقعی، نقش اعتبارسنجی بیرونی یافته‌های پژوهش را ایفا کرده و هم‌خوانی روابط برآوردشده در مدل با روندهای داده‌محور توسعه شهری دبی را تأیید می‌کنند (شکل ۸).

پنج تصویر مفهومی از پروژه‌های «متاورس/دوقلوی دیجیتال دبی» با محوریت ریخت‌شناسی شهری و داشبوردهای هوشمند:

1.اتاق کنترل شهر هوشمند با نمای برج خلیفه و داشبورد زیرساخت

2.داشبورد دوقلوی دیجیتال محله با مدل سه‌بعدی ساختمان‌ها و شاخص‌های ترافیک و انرژی

3.نقشه سه‌بعدی CityGML با رنگ‌بندی کاربری زمین و آیکون‌های سنسوری

4.محیط تعامل واقعیت افزوده برای ارزیابی سناریوهای تراکم و سایه‌اندازی

5.کنسول مدیریت دارایی‌های شهری برای بهره‌برداری و نگهداری

شکل ۸. نمونه‌های عینی ۵ پروژه دیجیتالی شهر دبی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

نتیجه‌گیری

در قیاس با مطالعات پیشین، نوآوری اصلی این پژوهش در آن است که برای نخستین بار سه لایه «ریخت‌شناسی شهری»، «پایداری محیطی» و «شبیه‌سازی متاورسی» را در قالب یک چارچوب یکپارچه نظری و تجربی به هم پیوند می‌دهد. برخلاف پژوهش‌هایی که متاورس را عمدتاً به‌عنوان بستری فناورانه یا محیطی آزمایشی برای تعاملات اجتماعی بررسی کرده‌اند، این مطالعه نشان می‌دهد که متاورس می‌تواند به‌طور مستقیم برای ارزیابی اثرات سناریوهای کالبدی بر پیامدهای محیطی به کار رود و از این طریق شکاف موجود میان ادبیات ریخت‌شناسی شهری و پژوهش‌های مبتنی بر دوقلوی دیجیتال را پر کند. استفاده ترکیبی از شبیه‌سازی سناریوهای فضایی، تحلیل روابط علّی با PLS-SEM و تطبیق نتایج با

۱. Dubai Metaverse Assembly

شواهد دوقلوی دیجیتال دبی، مشارکت اصلی این پژوهش را شکل می‌دهد و نشان می‌دهد که بازیگر مرکزی در تحقق پایداری محیطی، ریخت‌شناسی شهری است نه مداخلات صرفاً اجتماعی یا اقتصادی. به‌این‌ترتیب، این پژوهش گامی فراتر از ادبیات موجود برداشته و چارچوبی ارائه می‌کند که در آن «طراحی ریختی»، «تحلیل مبتنی بر داده» و «شبیه‌سازی دیجیتالی» در یک چرخه منسجم تصمیم‌سازی شهری قرار می‌گیرند.

بررسی نتایج مدل ساختاری نشان داد که بیشترین نقش متاورس در بهبود پیامدهای محیطی از مسیر ریخت‌شناسی شهری صورت می‌گیرد؛ موضوعی که به‌طور مستقیم از بیشترین مقدار ضرایب مسیر (β) و بیشترین سهم اثرات غیرمستقیم در مدل قابل استناد است. در مدل PLS-SEM، مسیر «متاورس ⟶ ریخت‌شناسی شهری» بالاترین ضریب استانداردشده را در میان روابط معنادار داشت و مسیر «ریخت‌شناسی شهری ⟶ پیامدهای محیطی» نیز قوی‌ترین نقش پیش‌بینی‌کننده را نشان داد؛ در حالی‌که اثر مستقیم متاورس بر پیامدهای محیطی نسبتاً کمتر بود. این الگو نشان می‌دهد که بخش عمده اثرگذاری متاورس بر پایداری محیطی از طریق میانجی‌گری ریخت‌شناسی شهری منتقل می‌شود، نه از روابط مستقیم یا مسیرهای اجتماعی ـ اقتصادی. به همین ترتیب، تحلیل اثرات کل و تفکیک مسیرهای مستقیم/غیرمستقیم نشان داد که پیامدهای اجتماعی و اقتصادی، اگرچه معنادار و مثبت‌اند، اما سهم آن‌ها در مقایسه با مسیر کالبدی کمتر است و نقش آن‌ها عمدتاً پسینی و حمایتی بوده و پس از تثبیت اصلاحات ریختی بروز می‌کند؛ بنابراین، یافته‌ها نشان می‌دهند که در شهرهایی همچون دبی ـ که با رشد سریع و پروژه‌های بزرگ‌مقیاس شناخته می‌شوند ـ اثربخشی سیاست‌های پایداری زمانی تضمین می‌شود که بر سنجه‌های کمیِ ریخت‌شناسی شهری (نظیر تراکم، اختلاط کاربری، پیوستگی شبکه و سازمان فضایی بافت) استوار باشد. در مجموع، نتایج مدل ساختاری و تحلیل مسیرها تأیید می‌کند که متاورس، زمانی که با داده‌های واقعی و آزمایش سناریوهای فضایی ترکیب می‌شود، می‌تواند به بستری یادگیرنده برای برنامه‌ریزی شهری تبدیل شود و ریخت‌شناسی شهری در این فرآیند نقش هسته‌ای پایداری محیطی را ایفا می‌کند.

با وجود نتایج به‌دست‌آمده، این پژوهش با چند محدودیت همراه است که در تفسیر یافته‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. نخست، بخش کمی تحلیل‌ها مبتنی بر داده‌های ادراکی خبرگان بوده است؛ بنابراین نتایج مدل ساختاری بازتاب‌دهنده برداشت‌ها و قضاوت‌های حرفه‌ای پاسخ‌دهندگان است و نه لزوماً رفتار واقعی سیستم شهری در تمام شرایط. دوم، اعتبار نتایج شبیه‌سازی متاورسی به کیفیت، دقت و به‌روز بودن داده‌های دوقلوی دیجیتال مورد استفاده وابسته است و هرگونه نقص یا ساده‌سازی در این داده‌ها می‌تواند بر خروجی سناریوها اثرگذار باشد. سوم، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و مدل‌های شبیه‌سازی به‌کاررفته ناگزیر بر مجموعه‌ای از فرضیات اولیه و پارامترهای تنظیمی متکی هستند که اگرچه بر اساس ادبیات و شرایط موردمطالعه انتخاب شده‌اند، اما ممکن است تمامی پیچیدگی‌های پویای سیستم شهری واقعی را به‌طور کامل بازنمایی نکنند. در نتیجه، یافته‌ها باید در چارچوب این محدودیت‌ها تفسیر شوند.

- بر مبنای یافته‌های پژوهش، می‌توان چند توصیه کاربردی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری ارائه کرد: نخست، پیشنهاد می‌شود در تدوین پروژه‌های متاورسی، سنجه‌های کمی ریخت‌شناسی شهری ـ مانند تراکم، پیوستگی شبکه، اختلاط کاربری و نسبت فضاهای باز در اولویت قرار گیرند؛ زیرا نتایج نشان دادند که بیشترین سهم اثرگذاری متاورس بر پایداری محیطی از مسیر تغییرات کالبدی تحقق می‌یابد.
- دوم، توصیه می‌شود شهرداری‌ها و نهادهای برنامه‌ریزی، شبیه‌سازی‌های متاورسی را به‌عنوان ابزار ارزیابی قبل از تصمیم‌گیری برای سناریوهای توسعه به کار گیرند، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس که نیازمند تحلیل هم‌زمان پیامدهای فضایی، زیست‌محیطی و شبکه‌ای هستند
- سوم، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران در چارچوب دوقلوی دیجیتال شهر، نسبت به استانداردسازی و یکپارچه‌سازی داده‌های کالبدی و محیطی اقدام نمایند تا امکان استفاده پایدار، دقیق و کم‌خطا از فناوری‌های مبتنی بر متاورس برای مدیریت بحران، ارتقای کارایی فضایی و تصمیم‌سازی شهری فراهم شود.

سپاسگزاری: مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری می‌باشد. بدین‌وسیله از همکاری مشارکت‌کنندگان در این مقاله که سهم مؤثری در جمع‌آوری داده‌ها داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

حامی مالی: بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش: همه نویسندگان، در نگارش و تنظیم مقاله حاضر نقش و سهم برابر دارند.

تضاد منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

Allam, Z., Bibri, S. E., Jones, D. S., Chabaud, D., & Moreno, C. (2022). Unpacking the ‘15-Minute City’ via 6G, IoT, and Digital Twins: Towards a New Narrative for Increasing Urban Efficiency, Resilience, and Sustainability. Sensors, 22(4), 1369. https://doi.org/10.3390/s22041369

Allam, Z., Sharifi, A., Bibri, S. E., & Jones, D. S. (2022). The metaverse as a virtual form of smart cities: Opportunities and challenges for environmental, economic, and social sustainability in urban futures. Smart Cities, 5(3), 771–801. https://doi.org/10.3390/smartcities5030040.

Almeida, G. G. F. (2025). Metaverse City: Conceptual Views and Formation Factors Towards the Digital Society. Encyclopedia, 5(2), 62. https://doi.org/10.3390/encyclopedia5020062.

Argota Sánchez-Vaquerizo J. (2025), Urban Digital Twins and metaverses towards city multiplicities: uniting or dividing urban experiences? Ethics Inf Technol ;27(1):4. https://doi.org/10.1007/s10676-024-09812-3.

Bénaben, F., Congès, A., & Fertier, A. (2025). *A prospective vision of the evolution of immersive technologies: Towards a definition of metaverse.* Technovation, 140, 103154. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2024.103154

Bibri, S. E., & Allam, Z. (2022). The Metaverse as a Virtual Form of Data-Driven Smart Urbanism: On Post-Pandemic Governance through the Prism of the Logic of Surveillance Capitalism. Smart Cities, 5(2), 715-727. https://doi.org/10.3390/smartcities5020037.

Cantú, C., Franco, C., & Frost, J. (2024). *The economic implications of services in the metaverse.* In H.-Y. Chen, P. Jenweeranon, & N. Alam (Eds.), *Global Perspectives in the Metaverse: Law, Economics, and Finance* (pp. 83–118). Springer Nature, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54802-4_6

Chen, Z., Gan, W., Wu, J., Lin, H., & Chen, C.-M. (2024). Metaverse for smart cities: A survey. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 4, 203–216. https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.12.002.

Dienhart, C., Kaufhold, L., & Piller, F. (2025). *Urban Metaverse: The Smart City in the Industrial Metaverse*. RWTH Aachen University. https://www.researchgate.net/publication/390954008_Urban_Metaverse_The_Smart_City_in_the_Industrial_Metaverse_Opportunities_of_the_metaverse_for_real-time_interactive_and_inclusive_infrastructure_applications_in_urban_areas

Dubai *Statistics* Center. (2025). Population and vital statistics. Government of Dubai. https://www.dsc.gov.ae.

Dwivedi YK, Hughes L, Wang Y, et al. Metaverse marketing: How the metaverse will shape the future of consumer research and practice. Psychology & Marketing. 2023, 40(4): 750–776. https://doi.org/10.1002/mar.21767.

Esmi S, Hashemi SS. A meta-synthesis on the role of metaverse technology in the sustainable development of tourism. *International Journal of Web Research*. 2025;8(1):79–95. https://doi.org/10.22133/ijwr.2025.500642.1263.

Hemmati, M. (2022). The Metaverse: An Urban Revolution Effect of the Metaverse on the Perceptions of Urban Audience. *Tourism of Culture*, *2*(7), 49-56. https://doi.org/10.22034/toc.2022.323276.1067. (**In Persian**).

Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. Journal of the Academy of Marketing Science, 43(1), 115–135. https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8.

Kuru K, Kuru K. Blockchain-based decentralised privacy-preserving machine learning authentication and verification with immersive devices in the urban metaverse ecosystem. In: Proceedings of the 20th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA); 2–4 September 2024; Genova, Italy. https://doi.org/10.1109/MESA61532.2024.10704877.

Kuru, K. (2023). Meta Omni City: Toward immersive urban metaverse cyberspaces using smart city digital twins. IEEE Access, 11, 43844–43868. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272890.

Lifelo, Z., Ding, J., Ning, H., Qurat-Ul-Ain, & Dhelim, S. (2024). Artificial intelligence-enabled metaverse for sustainable smart cities: Technologies, applications, challenges, and future directions. *Electronics*, *13*(24), 4874. https://doi.org/10.3390/electronics13244874.

Liu, F., Pei, Q., Chen, S., Yuan, Y., Wang, L., & Mühlhäuser, M. (2022). When the metaverse meets carbon neutrality: Ongoing efforts and directions. IEEE. Advance online publication. https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10235

Mohammadnejad, M. and Abedini, A. (2025). The Metaverse: Opportunities and Challenges for Sustainable Future Cities. *Sustainable city*, *8*(1), 1-16 https://doi.org/10.22034/jsc.2025.473396.1796. (**In Persian**).

Mosharraf, M. (2025). Data governance in metaverse: Addressing security threats and countermeasures across the data lifecycle. *Technology in Society*, *82*, 102910. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2025.102910

Owojori, O. M., & Erasmus, L. (2025). Urban sustainability reporting through the metaverse: Advancing transparency and accountability in the built environment. EDPACS, 70(6), 1–29. https://doi.org/10.1080/07366981.2025.2500799

Rahmati, S. (2025). The Role of the Metaverse in Addressing the Consequences of Climate Change to Enhance Urban Resilience. *Human Ecology*, *4*(11), 957-977. https://doi.org/10.22034/el.2025.511464.1070. (**In Persian**).

UAE Government. (2024). Dubai. https://u.ae/en/about-the-uae/the-seven-emirates/dubai.

United Nations ESCWA. (2024). *The Metaverse and the Future of the Arab Region*. United Nations Economic and Social Commission for Western Asia. https://www.researchgate.net/publication/390201715_The_Metaverse_and_the_Future_of_the_Arab_Region_-_Public_Policy_Choices_and_Actions_UNESCWA_August_2024

Wetzels, M., Odekerken-Schröder, G., & Van Oppen, C. (2009). Using PLS path modeling for assessing hierarchical construct models: Guidelines and empirical illustration. *MIS Quarterly*, *33*(1), 177–195. https://doi.org/10.2307/20650284.

Xu, H., Omitaomu, F., Sabri, S. et al. (2024). Leveraging generative AI for urban digital twins: a scoping review on the autonomous generation of urban data, scenarios, designs, and 3D city models for smart city advancement. Urban Info 3, 29 (2024). https://doi.org/10.1007/s44212-024-00060-w.

Youssef, E., Medhat, M., Abdellatif, S., & Yousif, N. B. (2024). Analyzing the Impact of Metaverse Technology on Social Development: A Field Study on Generation Z in the United Arab Emirates. Social Sciences, 13(9), 446. https://doi.org/10.3390/socsci13090446.

Zallio, M., Ohashi, T., Clarkson, J. (2023). Designing the Metaverse: A Scoping Review to Map Current Research Effort on Ethical Implications. Human-Centered Metaverse and Digital Environments, 99, 92–100. https://doi.org/10.54941/ahfe1003935.

Zeynali Azim, A, Monadi, A, Zarbakhsh,F. and Monadi, M. A. (2025). Structural Analysis of the Factors Influencing Smart Environmental Development in the City of Tabriz. *Journal of Urban Environmental Management*, *3*(1), 56-73. https://doi.org/10.48306/juem.2025.528698.1076. (**In Persian**).

Zeynali Azim, A. and 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. https://doi.org/10.22059/jne.2025.403153.2844. (**In Persian**).

Zeynali Azim, A. and Mehmani, R. (2025). Metaverse and Digital Urbanism: A Bridge Towards Cultural Diplomacy. (e233432). *Scientific journal on culture of diplomacy studies*, *4*(1), e233432. https://www.sjcds.ir/article_233432.html. (**In Persian**)

Zeynaly Azim, A. (2025). Metaverse Spider-Web Urban Design Theory. https://doi.org/10.5281/zenodo.17009517.

Zhang J, Quoquab F. Metaverse in the urban destinations in China: some insights for the tourism players. International Journal of Tourism Cities. 2023, 9(4): 1016–1024.: https://doi.org/10.1108/IJTC-04-2023-0062.