

A Meta-Analytical Urban Digital Twin Governance in the Systematic Development of Tehran Smart City

Ali Shamaï¹ , Alireza Dehzadegan²

1. Professor, Department of Geography and Urban Planning, Kharazmi University of Tehran, Faculty of Geographical Sciences, Tehran, Iran. (Corresponding author), E: shamai@khu.ac.ir
3. Ph. D Student of Department of Geography and Urban Planning, Kharazmi University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO ABSTRACT

Keywords
Governance
Urban Digital Twins
Systematic
Development
Smart City
Meta-analysis
Tehran

Article History:
Received:
26 May 2026
Received in revised:
27 Ju 2026
Accepted:
29 Ju 2026
Available online:
23 Au 2026

Digital twin governance, leveraging advanced technologies, plays a pivotal role in the systematic and sustainable development of smart cities by enhancing resource management and optimizing urban planning. Accordingly, this study aims to examine urban digital twin governance in the systematic development of Tehran's smart city. The research follows a descriptive-analytical method, integrating a meta-analysis, systematic review, and path analysis approach. In the systematic review phase, 305 selected articles were extracted from an initial pool of 6,226 publications (2010–2025) using the Scopus database and refined through the PRISMA protocol, followed by bibliometric analysis via VOSviewer. The research variables were identified based on systematic review outputs, and data were analyzed using Structural Equation Modeling (PLS3). The statistical population included experts and managers involved in smart city and urban digital twin governance, with a purposive sample of 96 participants. The systematic review results revealed that data management, data security, and urban modeling have the greatest influence on the success of digital twin governance, while challenges such as institutional misalignment, lack of data-driven infrastructure, and absence of transparent data regulations persist. The structural modeling findings indicated that data management and modeling are crucial for enhancing decision-making and urban sustainability. Urban digital twin governance provides the necessary institutional framework for coordinating actions, although issues of data security and integration remain significant. Therefore, transitioning toward an efficient digital twin ecosystem requires institutional integration, citizen participation, and the use of artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and cloud computing technologies—factors that could collectively strengthen Tehran's urban sustainability in the future.

Citation: Shamaï, A. & Dehzadegan, A. (2026). A Meta-Analytical Urban Digital Twin Governance in the Systematic Development of Tehran Smart City, *Geography*, 24 (89), 23-44.

 <https://10.22034/jiga.2026.2089269.1490>



© The Author (s).
article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Publisher: Iranian Geographical Association This is an open access

Introduction

Unprecedented 21st-century urbanisation – 57% of the world population (4.6 billion) in 2023, expected to reach 70% by 2050 – has intensified pressures on infrastructure, housing, traffic, social equity, and the environment. The Urban Digital Twin (UDT) has emerged as a novel smart-city framework that provides real-virtual representation, modelling, and simulation for planners, integrated with IoT, AI, and big data to enhance predictive analytics, resource optimisation, and citizen participation. However, systematic reviews (Diaz-Sarachaga, 2025; Cao et al., 2025; Khazina et al., 2025; Liu et al., 2025; Houzat et al., 2025; Weil et al., 2023; Shariatpour & Behzadfar, 2022, among others) show that most studies focus on technical aspects, leaving governance challenges unresolved: data integration, security, privacy, limited public participation, fragmented data ownership, and weak institutional coordination. A clear knowledge gap exists regarding a balanced framework that addresses technological, institutional, social, and environmental dimensions simultaneously, particularly for a complex metropolis like Tehran. Tehran faces multi-layered problems: poor data management, institutional discontinuity, lack of data-sharing standards, and no coherent governance framework for UDT deployment (Shariatpour & Behzadfar, 2022; Fartash et al., 2021). The research problem is how to establish and govern a UDT in Tehran so that, using meta-analysis, systematic review, and path analysis, the effects of governance components on smart-city development, institutional coordination, transparency, and forward-looking accountability can be assessed. The main research question is: “What governance framework (principles, mechanisms, key indicators) can be formulated for effective UDT deployment in Tehran, and what impact does it have on institutional coordination, transparency, and forward-looking accountability?” The main objective is to provide a comprehensive, operational governance framework for Tehran’s UDT that overcomes data, institutional, and participatory challenges. Secondary objectives are: (1) identify and rank key governance components (institutional, technical, social, environmental); (2) analyse the gap between current and desired data governance and institutional coordination; (3) measure the effect of these components on smart-city indicators (transparency, accountability, sustainability). The link between objectives and the problem is that without developing this framework and understanding existing gaps, the practical deployment and impact assessment of UDT in Tehran cannot be achieved; thus the objectives directly answer the “how to establish/govern” and “assess effects” questions.

Methodology

This applied, descriptive-analytical study uses meta-analysis, systematic review, and path analysis. For the systematic review, the PRISMA 2020 software was used on Scopus database: from 6,226 initial articles, after filtering by publication type, title/abstract/keyword screening, searching relevant keywords (smart city, urban planning, digital twin, virtual reality, systematic urban development), and selecting English articles via Python, 305 articles remained for final analysis. VOSviewer was used for data visualisation. Based on the review output, 5 urban digital twin governance components (independent variables) and 6 smart city systematic development components (dependent variables) were identified. The sample (n=96, purposive/Cochran without N method) comprised university professors (34%), Tehran municipality managers/experts (27%), urban planning/technology consultants (21%), and smart city/digital twin specialists (18%). A 5-point Likert scale was used, and data were analysed using structural equation modelling with partial least squares.

Results and Discussion

With the expansion of urbanisation and digital technologies, urban digital twin governance has become a novel approach for data-driven decision-making in smart cities, and research in this field has grown significantly since 2015, especially during 2024-2025. The thematic focus is mainly on computer science and engineering, but social and environmental sciences also hold an important place; geographically, Asian countries (China, India) are leading, while the US and Europe also play a significant role. The co-occurrence network of keywords indicates a transition from traditional technologies to artificial intelligence, big data, and blockchain, and a shift in orientation from mere modelling to data-driven and managerial approaches. Path analysis results show that data dissemination, storage, modelling, visualisation, and security respectively play a vital role in planning, forecasting, transparency, and trustworthiness of the smart city. Finally, digital twin governance (the institutional dimension) was identified as the coordinating framework for technical and data components, and the systematic development of Tehran's smart city requires the integration of these dimensions along with addressing security and privacy challenges

Conclusion

Digital twin governance, with data-driven infrastructure and modern technologies (AI, big data), transforms decision-making in Tehran from reactive to proactive, enhancing transparency, accountability, and resilience. Research limitations include limited access to local data and neglecting socio-cultural dimensions. Proposals: develop online monitoring, improve data security, interactive simulation, strengthen digital governance, and integrate AI into Tehran's urban management.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the author approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Author declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

- Abdeen, F. N., Shirowzhan, S., & Sepasgozar, S. M. E. (2023). Citizen-centric digital twin development with machine learning and interfaces for maintaining urban infrastructure. *Telematics and Informatics*, 84, 102032. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2023.102032>.
- Afzal, M., Li, R. Y. M., Shoaib, M., Ayyub, M. F., Tagliabue, L. C., Bilal, M., Ghafoor, H., & Manta, O. (2023). Delving into the digital twin developments and applications in the construction industry: A PRISMA approach. *Sustainability*, 15(23), 16436. <https://doi.org/10.3390/su152316436>
- AL-Dabbagh, R. (2022). Dubai, the sustainable, smart city. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 7, 3. <https://doi.org/10.1051/rees/2021049>.
- Avezbaev, S., Avezbaev, O., Tashpulatov, S., & Sharipov, S. (2023). Implementation of GIS-based smart community information system and concepts of digital twin in the field of urban planning in Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*, 386, 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338605006>
- Barresi, A. (2023). Urban digital twin and urban planning for sustainable cities. *TECHNE*, (25), 78–83. <https://doi.org/10.36253/techne-13568>.
- Bibri, S. E., Alahi, A., Sharifi, A., & Krogstie, J. (2023). Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: An integrated approach to an extensive literature review. *Energy Informatics*, 6, 9. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00259-2>
- Cao, J., Spulbar, C., Eti, S., Horobet, A., Yuksel, S., & Dincer, H. (2025). Innovative approaches to green digital twin technologies of sustainable smart cities using a novel hybrid decision-making system. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10(1), 100651. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100651>.
- Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M., & Malvezzi, R. (2022). Digital twin for urban planning in the Green Deal era: A state of the art and future perspectives. *Sustainability*, 14, 6263. <https://doi.org/10.3390/su14106263>
- Charitonidou, M. (2022). Urban scale digital twins in data-driven society: Challenging digital universalism in urban planning decision-making. *International Journal of Architectural Computing*, 20, 238–253. <https://doi.org/10.1177/14780771211070005>
- Cook, M., & Valdez, A. M. (2022). Curating smart cities. *Urban Geography*, 44(6), 1192–1210. <https://doi.org/10.1080/02723638.2022.2072077>.
- Danilina, N., & Majorzadehzahiri, A. (2019). Investigating the capability of Smart City in Tehran. *E3S Web of Conferences*, 97, 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199701005>
- Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z.-J. (.) (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.03.003>.
- Depretre, A., Jacquinson, F., & Mielniczek, A. (2022). Exploring digital twin adaptation to the urban environment: Comparison with CIM to avoid silo-based approaches. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W2-2022-117-2022>
- Diaz-Sarachaga, J. M. (2025). Developing an assessment governance framework for urban digital twins: Insights from smart cities. *Cities*, 156, 105558. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105558>.
- Ehwi, R. J., Holmes, H., Maslova, S., & Burgess, G. (2022). The ethical underpinnings of Smart City governance: Decision-making in the smart Cambridge programme. *UK. Urban Studies*, 59(14), 2968–2984. <https://doi.org/10.1177/00420980211064983>.

- Elsehrawy, R., Kumar, B., & Watson, R. (2021). A digital twin uses classification system for urban planning & city infrastructure management. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 832–862. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.045>
- Fartash, K., Azizi, A., Khayatyan Yazdi, M. (2021). Tehran in the Path of Transition to a Smart City: Initiatives, Implementation, and Governance. In: Augusto, J.C. (eds) *Handbook of Smart Cities*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69698-6_76.
- Fattahi Tabasi, S., Rafizadeh, H. R., Andaji Garmaroudi, A., & Banihashemi, S. (2023). Optimizing urban layouts through computational generative design: Density distribution and shape optimization. *Architectural Engineering and Design Management*. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2182836>
- Ferré-Bigorra, J., Casals, M., & Gangolells, M. (2022). The adoption of urban digital twins. *Cities*, 131, Article 103905. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905>.
- Guo, F., Ma, L., Wu, J., Chen, K., Fang, W., & Broyd, T. (2025). A systematic review of multi-scale digital modelling in sustainable urban design and management. *Sustainable Cities and Society*, 119, 106103. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106103>
- Haraguchi, M., Funahashi, T., & Biljecki, F. (2024). Assessing governance implications of city digital twin technology: A maturity model approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 204, 123409. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123409>.
- Huang, H., Tsou, J.Y. (2025). From Concept to Reality: A Systematic Review of Urban Digital Twin and Their Applications in Smart Cities. In: Francis, A., Miresco, E., Melhado, S. (eds) *Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering. ICCCBE 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 628. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84208-5_40.
- Huang, W., Zhang, Y., & Zeng, W. (2022). Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36, 100781. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100781>.
- Huzzat, A., Anpalagan, A., Khwaja, A. S., Woungang, I., Alnoman, A. A., & Pillai, A. S. (2025). A comprehensive review of digital twin technologies in smart cities. *Digital Engineering*, 4, 100040. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040>.
- Jin, C., Lee, Y., Lee, S., & Hyun, C. (2024). Lightweighting process of digital twin information models for smart city services. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(4), 1304–1320. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-2354-z>.
- Ketzler, B., Naserentin, V., Latino, F., Zangelidis, C., Thuvander, L., & Logg, A. (2020). Digital twins for cities: A state of the art review. *Built Environment*, 46(4), 547–573. <https://doi.org/10.2148/benv.46.4.547>.
- Khazina, N., Umer, T., Asghar, A. B., Aslam, M., Ejsmont, K., Metwally, A. S. M., & Thanh, K. N. (2025). Machine learning assisted predictive urban digital twin for intelligent monitoring of air quality index for smart city environment. *Environmental Modelling & Software*, 192, 106559. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106559>.
- Kiviaho, A., & Einolander, J. (2023). Digital transformation, well-being and shrinking communities: Narrowing the divides between urban and rural. *Heliyon*, 9(8), Article e18801. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18801>.
- Klar, R., Fredriksson, A., & Angelakis, V. (2023). Digital twins for ports: Derived from smart city and supply chain twinning experience. *IEEE Access*, 11, 71777–71799. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3295495>.
- Lehtola, V. V., Koeva, M., Elberink, S. O., Raposo, P., Virtanen, J. P., Vahdatikhaki, F., & Borsci, S. (2022). Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, Article 102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>.
- Lei, B., Janssen, P., Stoter, J., & Biljecki, F. (2023). Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. *Automation in Construction*, 147, Article 104716. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104716>.
- Li, B., & Tan, W. (2023). A novel framework for integrating solar renewable source into smart cities through digital twin simulations. *Solar Energy*, 262, 111869. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111869>.
- Liu, Y., Pan, S., & Ballot, E. (2025). Federated digital twins platform for smart city logistics: A knowledge-driven approach. *International Journal of Production Economics*, 109772. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109772>.
- Macatulad, E., & Biljecki, F. (2024). Continuing from the Sendai Framework midterm: Opportunities for urban digital twins in disaster risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102, Article 104310. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104310>.

- Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C., & Muñoz, L. (2021). Digital twins from smart manufacturing to smart cities: A survey. *IEEE Access*, 9, 143222–143249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843>
- Nochta, T., Wan, L., Schooling, J. M., & Parlikad, A. K. (2021). A socio-technical perspective on urban analytics: The case of city-scale digital twins. *Journal of Urban Technology*, 28(1–2), 263–287. <https://doi.org/10.1080/10630732.2020.1798177>.
- Noori, N., de Jong, M., & Hoppe, T. (2020). Towards an integrated framework to measure smart city readiness: The case of Iranian cities. *Smart Cities*, 3(3), 676–704. <https://doi.org/10.3390/smartcities3030035>
- O'Brien, P., Pike, A., & Tomaney, J. (2019). Governing the 'ungovernable'? Financialisation and the governance of transport infrastructure in the London global city-region. *Progress in Planning*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2018.02.001>
- Parsa, S., Pourahmad, A., Parsa, M., & Piri, E. (2021). Explaining the dimensions and components of smart governance in Tehran. *International Journal of European Studies*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.11648/j.ijes.20210501.12>
- Peldon, D., Banihashemi, S., Le Nguyen, K., & Derrible, S. (2024). Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*, 111, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105583>.
- Pereira, G. V., Parycek, P., Falco, E., & Kleinhans, R. (2018). Smart governance in the context of smart cities: A literature review. *Information Polity*, 23(2), 143–162. <https://doi.org/10.3233/IP-170067>.
- Shariatpour, F., & Behzadfar, M. (2022). Digital twin: A step towards smart cities in urban planning, design and management. *Sofeh: Journal of Art, Architecture and Urban Studies*, 32(4), 93–106. <https://doi.org/10.52547/sofeh.32.4.93>.
- Shariatpour, F., Behzadfar, M., & Zareei, F. (2024). Urban 3D modeling as a precursor of city information modeling and digital twin for smart city era: A case study of the Narmak neighborhood of Tehran City, Iran. *Journal of Urban Planning and Development*, 150(2). <https://doi.org/10.1061/JUPDDM.UPENG-46>.
- Talkhabi, H., Jafarpour Ghalehtemouri, K., & Toulabi Nejad, M. (2024). Integrating Tehran metropolitan air pollution into the current transport system and sprawl growth: An emphasis on urban performance and accessibility. *Discover Cities*, 1, Article 8. <https://doi.org/10.1007/s44327-024-00008-4>
- The World Bank. (2023). Urban population (% of total population). In , 2023. World Bank open data. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>.
- Turek, T., & Pawełszek, I. (2024). Digital twins technology for smart city development. A case study of Poland's largest cities. *Procedia Computer Science*, 246, 4863–4872. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.352>.
- Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C. E., Rajabifard, A., & Acuto, M. (2022). Potential and limitations of digital twins to achieve the sustainable development goals. *Nature Sustainability*, 5, 822–829. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00923-7>.
- UN-Habitat. (2024). Urban governance. Retrieved from <https://unhabitat.org/top ic/urban-governance>.
- Wang, B., Wang, Q., Cheng, J. C. P., & Yin, C. (2022). Object verification based on deep learning point feature comparison for scan-to-BIM. *Automation in Construction*, 142, Article 104515. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104515>.
- Weil, C., Bibri, S. E., Longchamp, R., Golay, F., & Alahi, A. (2023). A systemic review of urban digital twin challenges, and perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 99, Article 104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
- Ye, X., Du, J., Han, Y., Newman, G., Retchless, D., Zou, L., ... Cai, Z. (2023). Developing human-centered urban digital twins for community infrastructure resilience: A research agenda. *Journal of Planning Literature*, 38(2), 187–199. <https://doi.org/10.1177/08854122221137860>
- Zali, N., Soltani, A., Najafi, P., Ebadi Qajari, S., & Mehrju, M. (2024). Digital Twins for Smarter Iranian Cities: A Future Studies Perspective. *Computational Urban Science*, 4(1), Article 43. <https://doi.org/10.1007/s43762-024-00155-9>.
- Zhang, J., Chen, C., Zhang, Y., Cui, Y., Han, P., Meng, N., & Xu, Y. (2022). The framework and practices of digital twin city. In *ICEIEC 2022 - Proceedings of 2022 IEEE 12th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*. <https://doi.org/10.1109/ICEIEC54567.2022.9835091>
- Zhou, Y., Lei, H., Zhang, X., Wang, S., Xu, Y., Li, C., Zhang, J. (2023). Using the dual concept of evolutionary game and reinforcement learning in support of decision-making process of community regeneration — case study in Shanghai. *Buildings*, 13(1), 175. <https://doi.org/10.3390/buildings13010175>.

فرا تحلیل حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری در توسعه نظام مند شهر هوشمند تهران

علی شماعی ^۱، علیرضا دهزادگان^۲

۱. استاد گروه آموزشی جغرافیای انسانی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول).

E: Eskandar.moradi@pnu.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری جغرافیای انسانی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
واژگان کلیدی: حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری توسعه نظام مند شهر هوشمند فرا تحلیل تهران	حکمرانی دوقلوهای دیجیتال با بهره‌گیری از فناوری پیشرفته، نقش حیاتی در توسعه نظام‌مند و پایدار شهرهای هوشمند ایفا می‌کند و مدیریت منابع و برنامه‌ریزی بهینه مناطق شهری را بهبود می‌بخشد. در این راستا، پژوهش باهدف حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری در توسعه نظام‌مند شهر هوشمند تهران تدوین شده است. رو پژوهش به‌صورت توصیفی - تحلیلی با ترکیب رویکرد فرا تحلیل، مرور نظام‌مند و تحلیل مسیر طراحی شده است. در بخش مرور نظام‌مند، ۳۰۵ مقاله منتخب از بین ۶۲۲۶ مقاله اولیه منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ با استفاده از پایگاه Scopus و نرم‌افزار PRISMA پالایش شده و سپس با نرم‌افزار VOSviewer تحلیل شدند. متغیرهای پژوهش بر اساس خروجی مرور نظام‌مند تعیین و داده‌ها با روش مدل‌سازی معادلات ساختاری (PLS۳) پردازش شدند. جامعه آماری متخصصان و مدیران مرتبط با حوزه شهر هوشمند و دوقلو دیجیتال شهری بود که نمونه آماری ۹۶ نفر به روش هدفمند انتخاب شد. نتایج مرور نظام‌مند نشان داد که مدیریت داده، امنیت داده و مدل‌سازی شهری بیشترین تأثیر را بر موفقیت حکمرانی دوقلو دیجیتال دارند و چالش‌هایی مانند فقدان هماهنگی نهادی، کمبود زیرساخت داده‌محور و نبود قوانین شفاف داده‌ای وجود دارد. نتایج مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که مدیریت و مدل‌سازی داده‌ها برای ارتقای تصمیم‌گیری و پایداری شهری اساسی است و حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری چارچوب نهادی لازم برای هماهنگی فعالیت‌ها را فراهم می‌کند، هرچند چالش‌هایی نظیر امنیت و یکپارچگی داده‌ها همچنان باقی است؛ بنابراین گذار به سمت دوقلو دیجیتال کارآمد مستلزم یکپارچگی نهادی، مشارکت شهروندان و استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و رایانش ابری است؛ امری که می‌تواند به افزایش پایداری شهر تهران در آینده منجر شود.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۳/۰۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۵/۰۷

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۶/۰۱

استناد: شماعی، علی و دهزادگان، علیرضا. (۱۴۰۵). فرا تحلیل حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری در توسعه نظام‌مند شهر هوشمند تهران،

جغرافیا، ۲۴(۸۹)، ۲۴-۴۳.

doi <https://10.22034/jiga.2026.2089269.1490>

مقدمه و پیشینه

آغاز قرن بیست و یکم شاهد افزایش بی‌سابقه شهرنشینی بوده که چالش‌های عمیقی را در عرصه مدیریت و توسعه شهری به همراه داشته است (Avezbaev et al, 2023). طبق برآوردهای بانک جهانی برای سال ۲۰۲۳، جمعیت شهری تقریباً ۵۷ درصد از جمعیت جهان را تشکیل می‌داد که حدود ۶/۴ میلیارد نفر در مناطق شهری زندگی می‌کردند (The World Bank, 2023). انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ نسبت جمعیت شهری جهان افزایش بیشتری یابد و به ۷۰ درصد برسد (Guo et al, 2025). این امر مسائل ساختاریابی شهری نظیر فشار بر زیرساخت‌ها، کمبود مسکن، ازدحام ترافیکی، نابرابری اجتماعی و تخریب زیست‌محیطی را تشدید می‌نماید (O'Brien et al, 2019). در این زمینه، مفهوم شهر هوشمند با اتکا به فناوری‌های دیجیتال، به‌ویژه دوقلوی دیجیتال شهری (UDT)، به‌عنوان چارچوبی نوین برای ارتقای کارآمدی، پایداری و پاسخگویی پدیدار شده است (Depretre, 2022).

دوقلوی دیجیتال شهری با فراهم‌آوردن بازنمایی هم‌زمان واقعی - مجازی از ساختارهای شهری، ابزارهای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی را در اختیار برنامه‌ریزان قرار می‌دهد و بدین ترتیب، تصمیم‌گیری‌های استراتژیک، هماهنگی میان نهادها و شفافیت فرایندها را تسهیل می‌کند (Zhang et al. , 2022). این فناوری، با بهره‌گیری از داده‌های آنلاین و تحلیل‌های پیشرفته، قابلیت مدیریت بحران، کاهش ریسک‌ها و برنامه‌ریزی بلندمدت را فراهم می‌آورد (Caprari et al. , 2022). کاربردهای دوقلوی دیجیتال شهری از برنامه‌ریزی زیربنایی تا پایداری زیست‌محیطی امتداد می‌یابد و با یکپارچگی با اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی (AI)، تحلیل‌های پیش‌بینانه، بهینه‌سازی منابع و تقویت مشارکت شهروندی را ممکن می‌سازد (Fattahi Tabasi et al. , 2023).

دوقلوی دیجیتال شهری به‌عنوان بازنمایی مجازی از دارایی‌های فیزیکی، سیمای سرزمینی و فعالیت‌های انسانی شهر، از طریق داده‌ها، تحلیل‌های پیشرفته و روش‌های محاسباتی ساختار می‌یابد (Lei et al. , 2023). این فرایند، با کدگذاری ویژگی‌های معنایی و مکانی عناصر شهری، تمایز دوقلوی دیجیتال شهری را در تعامل دوسویه با جهان فیزیکی برجسته می‌سازد و تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها را در قلمرو مجازی ممکن می‌کند (Lehtola et al. , 2023). دوقلوی دیجیتال شهری نه‌تنها محیط‌های ساخته‌شده، بلکه پویایی‌های انسانی را نیز در بر می‌گیرد و به ابزاری حیاتی برای برنامه‌ریزان تبدیل می‌شود تا پیامدهای مداخلات شهری، از پروژه‌های عمرانی تا مدیریت بحران را ارزیابی نمایند (Ketzler et al. , 2020). چنین شبیه‌سازی‌هایی، امکان بررسی اثرات سیاست‌ها و گزینش گزینه‌های بهینه را فراهم می‌آورند. کاربردهای دوقلوی دیجیتال شهری در ارتقای برنامه‌ریزی شهری، تقویت مشارکت شهروندی، یکپارچگی عملیاتی سامانه‌ها و دسترسی عمومی به داده‌ها، ابعاد گوناگونی از شهر هوشمند را غنی می‌سازد (Afzal et al, 2023). مفهوم دوقلوی دیجیتال به‌عنوان مدلی مجازی و پویا از سامانه‌های فیزیکی، در حوزه‌های مختلفی چون تولید، انرژی، حمل‌ونقل و بهداشت به‌کارگرفته‌شده است (Wang et al. , 2023; Klar et al. , 2022). در بستر شهری، این فناوری با ظرفیت تحول‌آفرین خود در برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها و ارتقای پایداری زیست‌محیطی، به ابزاری کلیدی برای مدیریت و بهبود اکوسیستم‌های شهری تبدیل شده و به‌عنوان استعاره‌ای محوری در شهرهای هوشمند پایدار، قابلیت‌های پیشرفته مدل‌سازی و شبیه‌سازی را برای ارائه راه‌حل‌های نوین زیست‌محیطی بسیج می‌کند (Ferré-Bigorra et al. , 2022; Weil, 2023). دوقلوی دیجیتال، جریان داده‌ها را میان قلمروهای واقعی و دیجیتال برقرار ساخته و امکان تحلیل و تصمیم‌گیری هوشمندانه را فراهم می‌سازد (Al-Sehrawy et al, 2021). یکپارچگی آن با فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، داده‌های کلان مدل‌سازی، اطلاعات ساختمان، یادگیری ماشین و پهپادها، افق‌های نوینی برای طراحی،

برنامه‌ریزی و پایش بلادرنگ در مقیاس‌های مختلف شهری گشوده و دقت و پاسخگویی مدل‌ها را به شکل بی‌سابقه‌ای ارتقا داده است. (Al-Dabbagh, 2022; Bibri et al., 2023; Ye et al., 2023) بدین ترتیب، دوقلوی دیجیتال با ساده‌سازی استراتژیک سیستم‌های پیچیده، شهرهای هوشمند را به اکوسیستم‌هایی پایدار بازتعریف کرده و مدیریت شهری، پایداری و تصمیم‌گیری آگاهانه را بهینه می‌سازد. (Almusaed et al., 2022) حکمرانی شهری به‌عنوان چارچوبی کلان، بر اصولی چون شفافیت، پاسخگویی، مشارکت و شمول استوار است. (UN-Habitat, 2024) پیشرفت‌های فناورانه، به‌ویژه دوقلوی دیجیتال شهری، این الگو را متحول ساخته و آن را به ابزاری کلیدی برای نوآوری، تصمیم‌گیری داده‌محور و مدیریت جامع اکوسیستم‌های شهری بدل کرده است. (Kiviahio & Einolander, 2023; Barresi, 2023)

دوقلوی دیجیتال شهری با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، امکان پیش‌بینی پیامدهای سیاست‌ها، برنامه‌ریزی زیرساختی و مدیریت بحران را فراهم می‌سازد. (Macatulad & Biljecki, 2024) در شهرهای هوشمند، این فناوری با اتکا بر فناوری اطلاعات و ارتباطات، محیط‌های تعاملی برای مشارکت شهروندان و سیاست‌گذاری مبتنی بر داده ایجاد کرده و از طریق غنی‌سازی هوش جمعی و تقویت همکاری نهادی، ظرفیت حکمرانی را ارتقا می‌دهد. (Ehwi et al., 2022; Cook et al., 2022; Valdez, 2022; Zhou et al., 2023)

مشارکت عمومی، پاسخگویی داده‌محور و تمرکز بیش از حد بر جنبه‌های فنی در برابر ابعاد حکمرانی، اجتماعی و زیست‌محیطی پابرجاست. (Tzachor et al., 2022) افزون بر این، محدودیت دسترسی به داده‌ها به دلیل پراکندگی مالکیت، فقدان سازوکارهای اشتراک‌گذاری، نگرانی‌های امنیتی و نبود ارزش افزوده ملموس برای ذی‌نفعان، چالش‌های منحصر به فرد دوقلوی دیجیتال شهری را برجسته می‌سازد. (Nochta et al., 2021) این موانع با مسائل حکمرانی همچون شمولیت و مشارکت عمومی پیوند خورده و ضرورت ارزیابی کیفیت و بلوغ فناوری، همکاری میان‌رشته‌ای و توسعه زیرساخت‌های نوین را دوچندان می‌کند. (Charitonidou, 2022) از این رو، ادغام دوقلوی دیجیتال در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری تنها در صورتی می‌تواند به ابزاری اثربخش برای توسعه پایدار و سیاست‌گذاری هوشمند بدل شود که چارچوب‌های حکمرانی و ابعاد اجتماعی - اقتصادی در کنار پیشرفت‌های فناورانه به‌طور متوازن مدنظر قرار گیرند. (Pereira et al., 2023; Mylonas et al., 2021)

کلان‌شهر تهران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز جمعیتی، اقتصادی و مدیریتی کشور، با مجموعه‌ای از مسائل پیچیده و به‌هم‌پیوسته از جمله ترافیک و ناکارآمدی حمل‌ونقل، آلودگی هوا، مصرف بالای انرژی، فشار بر زیرساخت‌ها، ناهماهنگی میان نهادهای مدیریت شهری و پراکندگی اطلاعات و سامانه‌های تصمیم‌گیری مواجه است. برای نمونه، مطالعات انجام‌شده در تهران ارتباط قابل‌توجه میان الگوهای حمل‌ونقل و آلودگی هوا را نشان داده‌اند و ترافیک، فرسودگی وسایل نقلیه و زیرساخت‌ها و محدودیت دسترسی به گزینه‌های متنوع حمل‌ونقل را از چالش‌های مهم شهر معرفی کرده‌اند. (Talkhabi et al., 2024) از سوی دیگر، ضعف مدیریت یکپارچه، هماهنگی ناکافی میان نهادها و محدودیت مشارکت در تصمیم‌گیری شهری از موانع مهم تحقق حکمرانی هوشمند در تهران گزارش شده است. (Parsa et al., 2021) به‌گونه‌ای که در ارزیابی قابلیت شهر هوشمند تهران، بخش عمده شاخص‌های مورد بررسی در وضعیت مطلوب قرار نداشته‌اند. (Majorzadehzahiri, & Danilina, 2019) این شرایط نشان می‌دهد که مسئله تهران صرفاً کمبود فناوری نیست، بلکه چگونگی یکپارچه‌سازی داده‌ها، سامانه‌ها و نهادهای تصمیم‌گیر برای مدیریت هم‌زمان و پیش‌نگرانه مسائل شهری است؛ ضرورتی که در پژوهش‌های مرتبط با آمادگی شهرهای ایران برای هوشمندسازی نیز بر اهمیت اصلاح ساختارهای حکمرانی، اشتراک‌گذاری داده و سیاست‌های داده باز تأکید شده است. (Noori et al., 2020) در این شرایط، دوقلوهایی دیجیتال شهری می‌توانند با ایجاد بستر یکپارچه

برای گردآوری و هم‌زمان‌سازی داده‌های حوزه‌هایی مانند حمل‌ونقل، انرژی و محیط‌زیست و فراهم‌کردن امکان شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مختلف، ظرفیت تصمیم‌گیری پیش‌نگرانه و هماهنگی نهادی در تهران را تقویت کند؛ باین‌حال، تحقق این ظرفیت به حکمرانی داده، قابلیت همکاری سامانه‌ها، شفافیت، امنیت و هماهنگی بین‌سازمانی وابسته است (Behzadfar, 2021; Fartash, & Shariatpour, 2022). از این‌رو، ضرورت پژوهش حاضر در این است که به‌جای بررسی صرف دوقلوهای دیجیتال به‌عنوان یک فناوری، مسئله اصلی تهران را در سطح حکمرانی مورد توجه قرار دهد و با استفاده از فراتحلیل، مرور نظام‌مند و تحلیل مسیر مشخص کند کدام مؤلفه‌های حکمرانی می‌توانند بیشترین نقش را در استقرار دوقلوهای دیجیتال و در نتیجه، توسعه نظام‌مند شهر هوشمند تهران، ارتقای هماهنگی نهادی، شفافیت تصمیم‌گیری و پاسخگویی پیش‌نگرانه ایفا کنند.

هدف پژوهش بررسی حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری در توسعه نظام‌مند شهر هوشمند تهران و سنجش اثر مؤلفه‌های حکمرانی بر هماهنگی نهادی، شفافیت تصمیم‌گیری و پاسخگویی پیش‌نگرانه. مطالعات پیشین عمدتاً بر کاربردهای فنی یا حوزه‌های خاص دوقلوهای دیجیتال شهری تمرکز داشته‌اند و ارتباط یکپارچه ابعاد فناورانه، داده‌ای، نهادی و حکمرانی در مقیاس کلان‌شهر کمتر بررسی شده است.

پژوهش حاضر با تلفیق فراتحلیل، مرور نظام‌مند، تحلیل مسیر و مدل‌سازی معادلات ساختاری، چارچوبی بومی برای حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری در بستر مدیریت شهری تهران ارائه و اعتبارسنجی می‌کند.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که دوقلوهای دیجیتال شهری به‌عنوان فناوری توانمندساز، نقش اساسی در ارتقای حکمرانی و توسعه نظام‌مند شهرهای هوشمند دارند. در این راستا، دیاز - ساراشاگا (۲۰۲۵)، در پژوهشی با عنوان توسعه چارچوب ارزیابی حکمرانی برای دوقلوهای دیجیتال شهرهای هوشمند نشان داد که بعد نهادی در حکمرانی دوقلوهای دیجیتال بر سایر ابعاد برتری دارد و سطح بالای حکمرانی در مدیریت شهر هوشمند را تأیید کرد. کائو و همکاران (۲۰۲۵)، در مطالعه خود با عنوان رویکردهای نوآورانه به فناوری‌های دوقلو دیجیتال سبز در شهرهای هوشمند پایدار نشان دادند که ادغام شبکه هوشمند و اقتصاد چرخشی، معیارهای کلیدی برای توسعه پایدار دوقلوهای دیجیتال در شهرهای هوشمند است و سیستم انرژی غیرمتمرکز با ریزشبکه‌ها بهترین گزینه محسوب می‌شود. خزینا و همکاران (۲۰۲۵)، در پژوهشی با عنوان دوقلو دیجیتال شهری پیش‌بینی‌شده با کمک یادگیری ماشین برای پایش هوشمند شاخص کیفیت هوا در محیط شهرهای هوشمند گزارش کردند که دوقلو دیجیتال مبتنی بر یادگیری ماشین شاخص کیفیت هوا را در شهرهای هوشمند بادقت ۹۷/۹۵ درصد پیش‌بینی و مناطق آلوده را سب‌بعدی نمایش می‌دهد. لیو و همکاران (۲۰۲۵)، در مقاله خود با عنوان دوقلوهای دیجیتال شناختی برای مدیریت پارکینگ شهرهای هوشمند به این نتیجه دست یافتند که ادغام دوقلوهای دیجیتال فدرال در لجستیک شهری موجب بیش از ۵۰ درصد کاهش هزینه و بیش از ۳۰ درصد کاهش انتشار آلاینده‌ها در شهرهای هوشمند می‌شود. هوزات و همکاران (۲۰۲۵)، در پژوهش خود نحت عنوان بررسی جامع فناوری‌های دوقلو دیجیتال در شهرهای هوشمند، کاربرد گسترده دوقلوهای دیجیتال در حوزه‌های سلامت، حمل‌ونقل، انرژی و امنیت شهر هوشمند را تأیید کردند، اگرچه چالش‌های یکپارچگی داده و مقیاس‌پذیری همچنان باقی است. هاراگوچی و همکاران (۲۰۲۴)، در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی پیامدهای حکمرانی دوقلو دیجیتال شهری، تأکید کردند که دوقلوهای دیجیتال مشارکت عمومی، شفافیت و پاسخگویی در حکمرانی شهر هوشمند را ارتقا می‌دهند، ولی ضعف در یکپارچگی داده‌ها و دغدغه‌های حریم خصوصی چالش‌برانگیز است. توروک و پولوشک (۲۰۲۴)، در پژوهش خود با عنوان فناوری دوقلوهای دیجیتال برای توسعه شهر هوشمند، نشان دادند که

دوقلوهای دیجیتال قادرند روابط پیچیده زیرساختی، اقتصادی و اجتماعی شهر هوشمند را شبیه‌سازی و کیفیت زندگی شهری را بهبود بخشند. پلدون و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای با عنوان جهت‌یابی در پیچیدگی شهری: نقش تحول‌آفرین دوقلوهای دیجیتال در توسعه شهر هوشمند و جین و همکاران، (۲۰۲۴) در مقاله خود تحت عنوان فرآیند سبک‌سازی مدل‌های اطلاعات دوقلوی دیجیتال برای خدمات شهر هوشمند، به اهمیت همگام‌سازی بلادرنگ داده‌ها و سبک‌سازی مدل‌های دوقلوهای دیجیتال برای ارائه خدمات هوشمند شهری تأکید کردند. ویل و همکاران (۲۰۲۳)، در مقاله‌ای با عنوان چالش‌های دوقلوی دیجیتال شهری: مرور نظام‌مند و چشم‌اندازها برای شهرهای هوشمند پایدار، موانع اجرای دوقلوهای دیجیتال در شهرهای هوشمند شامل کیفیت داده، مدل‌سازی و حکمرانی را شناسایی کردند. عبدین و همکاران (۲۰۲۳)، در پژوهشی با عنوان توسعه دوقلوی دیجیتال شهروند-محور با یادگیری ماشینی و رابط‌ها برای نگهداری زیرساخت‌های شهری، دریافتند که پلتفرم‌های داده باز، حسگرهای اینترنت اشیا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مشارکت شهروندان در دوقلوهای دیجیتال شهر هوشمند را افزایش می‌دهند. لی و تان (۲۰۲۳)، در مطالعه خود تحت عنوان چارچوبی نوین برای ادغام منابع تجدیدپذیر خورشیدی در شهرهای هوشمند از طریق شبیه‌سازی‌های دوقلوی دیجیتال، نشان دادند که شبیه‌سازی دوقلوهای دیجیتال برای ادغام انرژی خورشیدی و بادی، هزینه‌ها را کاهش و بهره‌وری شهر هوشمند را افزایش می‌دهد. هوانگ و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهش خود با عنوان توسعه و کاربرد فناوری دوقلو دیجیتال برای سیستم‌های انرژی منطقه‌ای یکپارچه در شهرهای هوشمند، دریافتند که دوقلوهای دیجیتال می‌توانند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را کاهش و بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند را بهبود دهند. دنگ و همکاران (۲۰۲۱)، در مقاله خود با عنوان مرور نظام‌مند یک شهر دوقلو دیجیتال: الگوی جدید حکمرانی شهری در راستای شهرهای هوشمند، نشان دادند که دوقلوهای دیجیتال مدیریت منابع، پایداری محیطی و تصمیم‌گیری در شهرهای هوشمند را ارتقا می‌دهند. شریعت‌پور و بهزادفر (۱۴۰۱)، در پژوهشی با عنوان دوقلوی دیجیتال؛ گامی نوین به سمت هوشمندسازی شهر در زمینه برنامه‌ریزی، طراحی، و مدیریت شهری، نشان دادند که به‌روزرسانی بلادرنگ داده‌ها، شفافیت، تصمیم‌گیری و کارآمدی مدیریت شهری را در شهرهای هوشمند بهبود می‌بخشد. در مجموع، مطالعات پیشین نشان می‌دهند که دوقلوهای دیجیتال شهری ظرفیت قابل‌توجهی برای ارتقای حکمرانی هوشمند، تصمیم‌گیری داده‌محور، مدیریت زیرساخت‌ها، پایش و پیش‌بینی بلادرنگ و تحقق توسعه پایدار شهری دارند؛ بااین‌حال، بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده بر کاربردهای خاص یا ابعاد فناورانه دوقلوهای دیجیتال تمرکز داشته و ارتباط میان ابعاد فناورانه، داده‌ای، مدیریتی، نهادی و حکمرانی را به‌صورت یکپارچه بررسی نکرده‌اند. همچنین، مسائلی همچون کیفیت و یکپارچگی داده‌ها، امنیت و حریم خصوصی، تعامل‌پذیری سامانه‌ها، کمبود زیرساخت‌های داده‌محور، ضعف هماهنگی میان نهادهای شهری و نبود چارچوب‌های شفاف حکمرانی داده همچنان از چالش‌های اساسی توسعه دوقلوهای دیجیتال شهری محسوب می‌شوند. از سوی دیگر، بسیاری از مطالعات در مقیاس محدود یا در قالب یک حوزه کاربردی مشخص انجام شده‌اند و کمتر به روابط متقابل میان عوامل مؤثر بر حکمرانی دوقلوهای دیجیتال در مقیاس کلان‌شهر پرداخته‌اند؛ بنابراین، تعمیم مستقیم یافته‌های موجود به شرایط پیچیده و چندلایه کلان‌شهری مانند تهران با محدودیت مواجه است. بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب جامع و بومی برای حکمرانی دوقلوهای دیجیتال در توسعه نظام‌مند شهر هوشمند تهران است که با تلفیق فراتحلیل، مرور نظام‌مند، تحلیل مسیر و مدل‌سازی معادلات ساختاری، ضمن شناسایی عوامل کلیدی از ادبیات موجود، روابط میان آن‌ها را در بستر مدیریت شهری تهران تبیین و اعتبارسنجی می‌کند. در این چارچوب، برخلاف رویکردهای صرفاً فناورانه، مدیریت داده، امنیت داده، مدل‌سازی شهری، زیرساخت

داده‌محور، هماهنگی نهادی و مشارکت ذی‌نفعان در ارتباط با حکمرانی دوقلوهای دیجیتال و پیامدهای آن برای تصمیم‌گیری و پایداری شهری مورد توجه قرار می‌گیرند. از این‌رو، پژوهش حاضر علاوه بر پرکردن خلأ موجود در ادبیات علمی، با بومی‌سازی مؤلفه‌های حکمرانی دوقلوهای دیجیتال متناسب با شرایط نهادی و مدیریتی تهران، مبنایی برای یکپارچه‌سازی داده‌ها، افزایش هماهنگی نهادی، بهبود تصمیم‌گیری شهری و حرکت به سوی حکمرانی هوشمند، پایدار و داده‌محور فراهم می‌سازد.

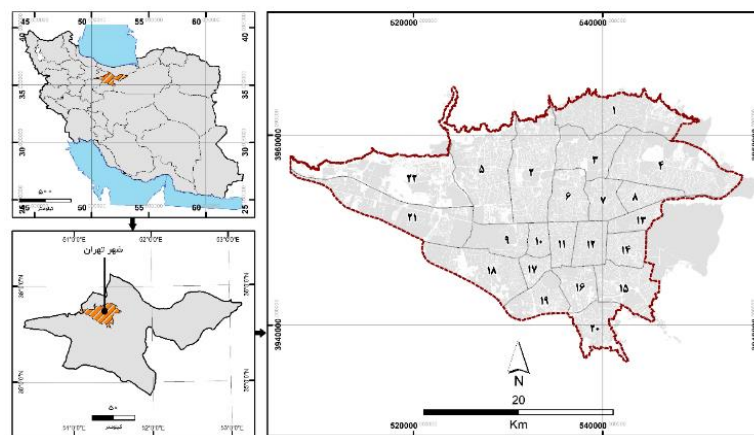
مبانی نظری

مفهوم دوقلوی دیجیتال در ابتدا توسط VanDerHorn and Mahadevan (2021) به‌عنوان بازنمایی مجازی از یک سیستم فیزیکی و محیط و فرآیندهای مرتبط با آن که از طریق تبادل اطلاعات میان سیستم فیزیکی و مجازی به‌روز می‌شود، تعریف شده است. این مفهوم نخستین بار در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه میشیگان به‌عنوان مدلی برای مدیریت چرخه عمر محصول مطرح گردید (Grieves & Vickers, 2016). با این حال، عنوان دوقلوی دیجیتال تا سال ۲۰۱۰ و در نقشه راه فناوری یکپارچه ناسا برای اشاره به این مفهوم مورد استفاده قرار نگرفت. اگرچه نخستین کاربردهای دوقلوهای دیجیتال در حوزه هوانوردی بود، اما استفاده از آن‌ها به سایر بخش‌ها نیز گسترش یافته و با موارد استفاده متعددی سازگار شده است (Jiang et al., 2021). دوقلوهای دیجیتال متمرکز بر مدیریت شهری نیز حدود سال ۲۰۱۸ شروع به توسعه کردند. بر این اساس، امروزه مفهوم دوقلوی دیجیتال به یکی از استعاره‌های نمادین در حوزه شهرهای هوشمند پایدار (مشابه مفاهیمی چون مغز شهر و شهر پلتفرمی) تبدیل شده است (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). این پارادایم نوظهور شهرگرایی می‌تواند از قابلیت‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی دوقلوی دیجیتال شهری برای توسعه راه‌حل‌های پیشرفته در راستای پایداری محیطی بهره‌گیرد. دوقلوی دیجیتال در بهینه‌سازی مدیریت شهری، ارتقای برنامه‌ریزی و ایجاد حکمرانی هوشمند پایدار نقش مهمی یافته است (Ferré-Bigorra et al., 2022). فرایند دوقلوی دیجیتال شهری با کدگذاری ویژگی‌های معنایی و مکانی عناصر شهری، تمایز دوقلوی دیجیتال شهری را در تعامل دوسویه با جهان فیزیکی برجسته می‌سازد و تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها را در قلمرو مجازی ممکن می‌کند (Lehtola et al., 2022). دوقلوی دیجیتال شهری نه تنها محیط‌های ساخته‌شده، بلکه پویایی‌های انسانی را نیز در بر می‌گیرد و به ابزاری حیاتی برای برنامه‌ریزان تبدیل می‌شود تا پیامدهای مداخلات شهری، از پروژه‌های عمرانی تا مدیریت بحران را ارزیابی نمایند (Ketzler et al., 2020). این فناوری، با بهره‌گیری از داده‌های آنلاین و تحلیل‌های پیشرفته، قابلیت مدیریت بحران، کاهش ریسک‌ها و برنامه‌ریزی بلندمدت را فراهم می‌آورد (Caprari et al., 2022). کاربردهای دوقلوی دیجیتال شهری از برنامه‌ریزی زیربنایی تا پایداری زیست‌محیطی امتداد می‌یابد و با یکپارچگی با اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، تحلیل‌های پیش‌بینانه، بهینه‌سازی منابع و تقویت مشارکت شهروندی را ممکن می‌سازد (Fattahi Tabasi et al., 2023)؛ بنابراین، دوقلوی دیجیتال شهری با فراهم‌آوردن بازنمایی هم‌زمان واقعی-مجازی از ساختارهای شهری، ابزارهای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی را در اختیار برنامه‌ریزان قرار می‌دهد و بدین ترتیب، تصمیم‌گیری‌های استراتژیک، هماهنگی میان نهادها و شفافیت فرایندها را در راستای بهبود حکمرانی شهری تسهیل می‌کند (Zhang et al., 2022). در چهارچوب نظری مرتبط با دوقلوهای دیجیتال شهری، حکمروایی نقشی بنیادین در پیشرفت و کاربست این فناوری ایفا می‌کند و ابعادی نظیر پاسخ‌گویی، شفافیت، مشارکت و شمولیت را در بر می‌گیرد (Waddington et al., 2018). مباحث حکمروایی در این حوزه در دو مضمون اصلی قابل دسته‌بندی است. نخست، حکمروایی بر فناوری دوقلوی دیجیتال

شهری است که به مدیریت مؤثر این فناوری با تأکید بر پروتکل‌ها، مقررات و به‌ویژه حکمرانی داده‌ها اشاره دارد. در این زمینه، حکمرانی داده به‌عنوان بنیادین‌ترین چالش شناسایی شده و حل آن مستلزم اتخاذ رویکردی مشارکتی و چندذی‌نفعی است. (Haraguchi et al., 2024) دومین مضمون، به کارگیری دوقلوهای دیجیتال شهری برای بهبود حکمروایی شهری اشاره دارد. این فناوری‌ها به‌عنوان ابزاری بنیادین برای تصمیم‌گیری مشارکتی و سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد تلقی می‌شوند و فرصت‌های ارزشمندی را در راستای مقابله با چالش‌هایی نظیر تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورند (Ludlow et al., 2023). با این حال، هنوز بحث‌های انتقادی کافی در مورد چگونگی حل چالش‌های حکمروایی ذاتی در شهرهای هوشمند توسط دوقلوهای دیجیتال شهری صورت نگرفته است. (Pereira et al., 2023)

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه: شهر تهران، پایتخت و بزرگ‌ترین کلان‌شهر ایران، در موقعیت جغرافیایی $35^{\circ}56'N$ شمالی و $51^{\circ}39'00''E$ شرقی، در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز قرار دارد و مساحت آن حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع است. این شهر با بیش از ۹/۸ میلیون نفر جمعیت در محدوده شهری و بیش از ۱۵ میلیون نفر در منطقه کلان‌شهری، دارای ۲۲ منطقه، ۱۳۴ ناحیه و ۳۷۴ محله است (Nazari et al, 2021). تهران در دهه اخیر با اجرای «طرح تهران هوشمند» به‌طور جدی وارد مسیر هوشمندسازی شهری شده و زیرساخت‌های داده‌محور خود را در حوزه‌هایی چون حمل‌ونقل، مدیریت شهری و خدمات دیجیتال گسترش داده است. در این راستا، مفهوم دوقلوهای دیجیتال شهری با هدف شبیه‌سازی سه‌بعدی فضاهای شهری در حال پیاده‌سازی است (Behzadfar, & Shariatpour, 2024). این تحولات، بستر مناسبی برای حکمرانی داده‌محور و تصمیم‌گیری هوشمند در مدیریت شهری فراهم کرده است و تهران را در مسیر توسعه نظام‌مند شهر هوشمند قرار می‌دهد (Zali et al. , 2024).



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی شهر تهران
منبع (ترسیم نگارندگان، ۱۴۰۵)

روش تحقیق

پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد فراتحلیل، مرور نظام‌مند و تحلیل مسیر طراحی شده و از نظر هدف کاربردی و از لحاظ نوع، توصیفی - تحلیلی است. در بخش مرور نظام‌مند، فرایند جمع‌آوری و پالایش مقالات پژوهشی با بهره‌گیری از نرم‌افزار PRISMA نسخه ۲۰۲۰ و پایگاه علمی معتبر اسکاپوس در چند مرحله انجام شد. در مرحله اول، تعداد کل

مقالات جستجو شده ۶۲۲۶ مقاله شناسایی شد. در مرحله دوم، مقالات بر اساس نوع انتشار شامل مقاله چاپ شده، مقاله کنفرانسی، فصل کتاب و مرور ادبیات بررسی شدند که در این مرحله ۵۸۷۲ مقاله باقی ماند و ۳۵۴ مقاله حذف شدند. در مرحله سوم، غربالگری بر اساس عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها صورت گرفت که طی آن ۳۶۹ مقاله حفظ شدند و ۵۵۰۳ مقاله حذف شدند. در مرحله چهارم، جستجو و پالایش بر اساس کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع پژوهش شامل شهر هوشمند، برنامه‌ریزی شهری، دوقلوی دیجیتال، واقعیت مجازی و توسعه نظام‌مند شهری انجام شد و در این مرحله ۳۱۱ مقاله باقی ماند و ۵۸ مقاله حذف شدند. در مرحله نهایی، انتخاب مقالات بر اساس زبان انگلیسی و با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام شد که در نهایت ۳۰۵ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. در پایان این بخش، از نرم‌افزار VOSviewer نسخه ۱/۱۶.۲۰ برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و ایجاد نقشه‌های تجسمی استفاده شد. در بخش دوم، با استفاده از تحلیل مسیر و با توجه به خروجی نهایی مرور نظام‌مند، ۵ مؤلفه حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری به‌عنوان متغیر مستقل شناسایی گردید تا اثرات آن بر روی توسعه نظام‌مند شهر هوشمند با ۶ مؤلفه به‌عنوان متغیر وابسته تحلیل شود (جدول ۱). جامعه آماری شامل اساتید دانشگاه (۳۴ درصد)، مدیران و کارشناسان شهرداری تهران (۲۷ درصد)، مشاوران شرکت‌های مشاور شهرسازی و فناوری شهری (۲۱ درصد) و متخصصان مرتبط با شهر هوشمند و دوقلوی دیجیتال شهری (۱۸ درصد) است که توجه به عدم وجود یک پایگاه داده جامع برای فهرست افراد حرفه‌ای، از روش نمونه‌گیری هدفمند به روش کوکران بدون N، ۹۶ نمونه انتخاب شده است. مقیاس تحلیل بر اساس طیف لیکرت پنج سطحی کاملاً مخالف، مخالف، تاحدودی موافق، موافق و کاملاً موافق تنظیم شده است. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری و رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS) ۳ (استفاده شده است. نمودار فرایند گام به گام پژوهش در شکل (۱) ارائه شده است.

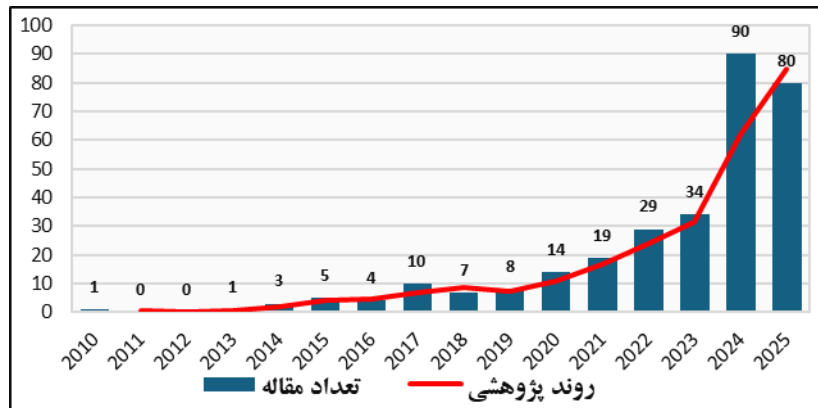


شکل ۱. فرایند اجرای پژوهش

بحث و یافته‌ها

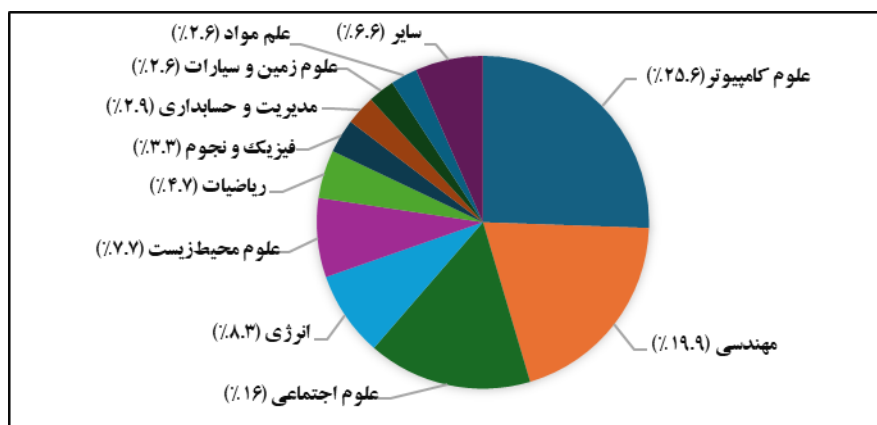
روند زمانی انتشار پژوهشی: بررسی توزیع مقاله‌ها در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که توجه به موضوع حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری و توسعه شهر هوشمند در سال‌های اخیر رشدی چشمگیر داشته است. در حالی که تا سال ۲۰۱۵ تعداد مقالات بسیار محدود و کمتر از ۵ مورد در سال بود، از سال ۲۰۲۰ به بعد روند صعودی آغاز شد و در

سال ۲۰۲۳ با ۳۴ مقاله شتاب بیشتری گرفت. اوج این روند در سال‌های ۲۰۲۴ (۹۰ مقاله) و ۲۰۲۵ (۸۰ مقاله) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تبدیل این موضوع به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های علمی است. این الگو حاکی از آن است که طی یک دهه اخیر، با پیشرفت فناوری‌های دیجیتال و ضرورت حکمرانی داده‌محور، پژوهشگران به‌طور فزاینده‌ای به بررسی نقش دوقلوهای دیجیتال در شهرهای هوشمند پرداخته‌اند (شکل ۳).



شکل ۳. روند زمانی انتشار پژوهشی (۲۰۱۰-۲۰۲۵)
منبع (ترسیم نگارندگان، ۱۴۰۵)

توزیع حوزه‌های موضوعی پژوهش‌ها: نتایج نشان داد که بیشترین سهم پژوهش‌ها به حوزه‌های علوم کامپیوتر (۶/۲۵ درصد) و مهندسی (۹/۱۹ درصد) اختصاص یافته است که بیانگر تمرکز اصلی بر توسعه فناوری‌های دیجیتال و زیرساخت‌های هوشمند در شهرهاست. پس از آن، علوم اجتماعی (۱۶ درصد) اهمیت ابعاد انسانی، اجتماعی و حکمرانی را در کنار فناوری آشکار می‌سازد. حوزه‌های انرژی (۳/۸ درصد) و علوم محیط‌زیست (۷/۷ درصد) نیز جایگاه ویژه‌ای در ارتباط با پایداری و مدیریت منابع شهری دارند. در کنار این موارد، سهم حوزه‌هایی مانند ریاضیات (۷/۴ درصد) و فیزیک و نجوم (۳/۳ درصد)، مدیریت و حسابداری (۹/۲ درصد) علوم زمین و سیارات (۶/۲ درصد) و علم مواد (۶/۲ درصد) نشان‌دهنده ورود رویکردهای میان‌رشته‌ای به این عرصه است. در نهایت، سایر حوزه‌ها (۶/۶ درصد) نیز بیانگر ظرفیت‌های پراکنده اما مکملی هستند که می‌توانند به غنای بیشتر مباحث حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری کمک کنند (شکل ۴).

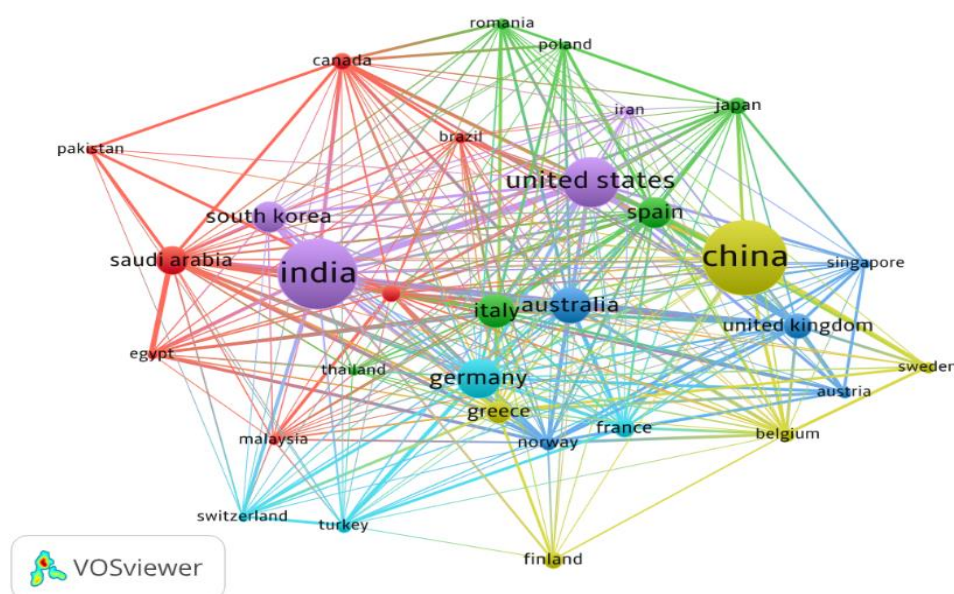


شکل ۴. توزیع حوزه‌های موضوعی پژوهش‌ها (۲۰۱۰-۲۰۲۵)
منبع (ترسیم نگارندگان، ۱۴۰۵)

توزیع جغرافیایی پژوهش‌ها: نتایج بر اساس جدول (۲) نشان داد که بیشترین تولیدات علمی در زمینه حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری متعلق به کشورهای آسیایی است، به‌ویژه چین (۴۳ مقاله) و هند (۴۰ مقاله) که نقش محوری در پیشبرد این حوزه دارند. پس از آن، ایالات متحده آمریکا (۲۸ مقاله) و کشورهای اروپایی از جمله آلمان (۲۱ مقاله)، ایتالیا (۱۸ مقاله)، اسپانیا (۱۶ مقاله) و بریتانیا (۱۳ مقاله) سهم قابل توجهی در تولید دانش جهانی ایفا می‌کنند. همچنین، کره جنوبی (۱۶ مقاله) و ژاپن (۸ مقاله) نشان‌دهنده تمرکز شرق آسیا بر توسعه فناوری‌های دیجیتال و شهرهای هوشمند هستند. در کنار این کشورها، استرالیا (۱۹ مقاله) و عربستان سعودی (۱۵ مقاله) حضور این حوزه را در اقیانوسیه و خاورمیانه نیز نمایان می‌کنند. مشارکت کشورهای یونان (۱۱ مقاله)، فرانسه (۹ مقاله)، کانادا و فنلاند (هر کدام ۸ مقاله) نیز گستردگی جغرافیایی پژوهش‌ها را تأیید می‌کند؛ با این حال، تمرکز اصلی همچنان بر آسیا، به‌ویژه چین و هند، باقی مانده است (شکل ۵).

جدول ۱. توزیع جغرافیایی پژوهش‌ها (۲۰۱۰-۲۰۲۵)

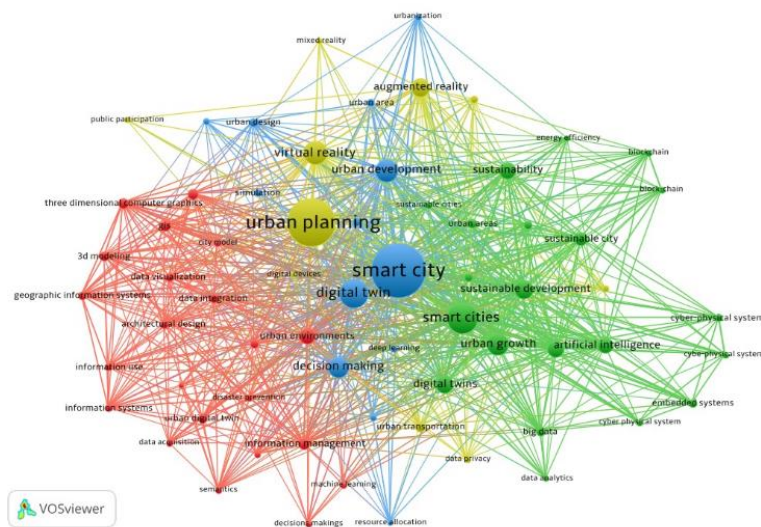
کشور	تعداد مقاله	کشور	تعداد مقاله
چین	۴۳	یونان	۱۱
هند	۴۰	فرانسه	۹
ایالات متحده آمریکا	۲۸	کانادا	۸
آلمان	۲۱	فنلاند	۸
استرالیا	۱۹	ژاپن	۸
ایتالیا	۱۸	هلند	۸
کره جنوبی	۱۶	نروژ	۷
اسپانیا	۱۶	بلژیک	۶
عربستان سعودی	۱۵	اتریش	۵
بریتانیا	۱۳	برزیل	۵



شکل ۵. نقشه توزیع جغرافیایی پژوهش‌ها (۲۰۱۰-۲۰۲۵)

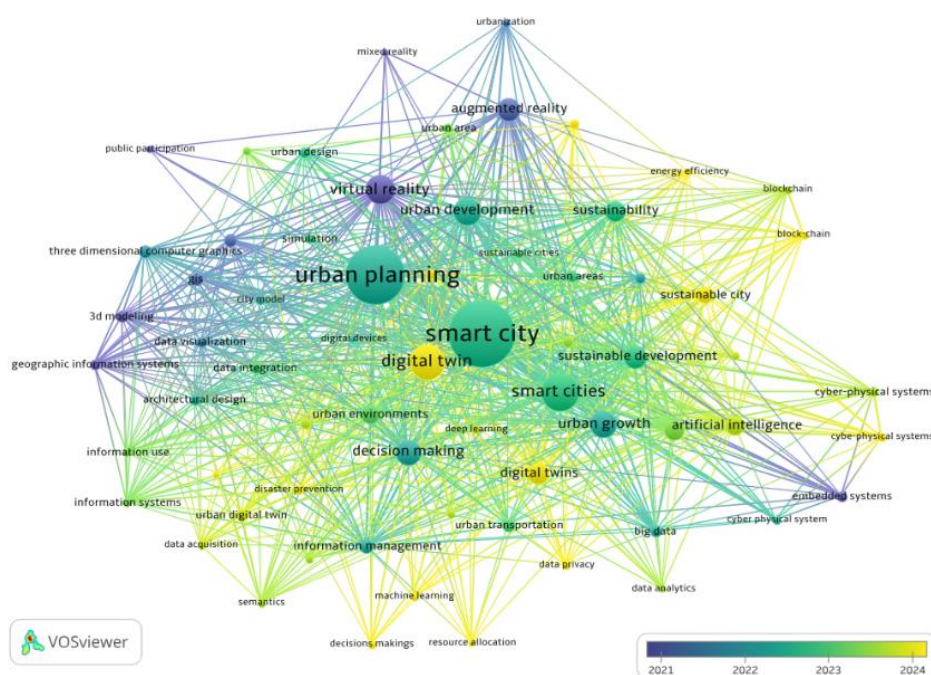
منبع: ترسیم نگارندگان، ۱۴۰۵

شبکه هم‌رخدادی خوشه ای واژگان کلیدی: نتایج نشان داد که مفاهیم کلیدی در پژوهش‌های اخیر به چند خوشه متمایز تقسیم شده‌اند. خوشه قرمز شامل مفاهیم مرتبط با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، طراحی معماری و مدل‌سازی سه‌بعدی است که بر جنبه‌های فنی و داده‌ای تمرکز دارد. خوشه آبی حول شهر هوشمند، دوقلوی دیجیتال و توسعه شهری شکل گرفته و نشان‌دهنده مفاهیم محوری و مدیریتی در پژوهش‌هاست. خوشه زرد به فناوری‌های واقعیت مجازی و افزوده اختصاص دارد که در سال‌های ابتدایی بازه بیشتر برجسته بوده‌اند. خوشه سبز نیز مفاهیم نوین مانند هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ، سیستم‌های سایبر-فیزیکی و بلاک‌چین را پوشش می‌دهد که در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. اندازه گره‌ها نشان‌دهنده فراوانی مفاهیم و ضخامت یال‌ها نشان‌دهنده میزان هم‌رخدادی بین واژگان است که به‌وضوح انتقال جهت‌گیری علمی از روش‌ها و فناوری‌های سنتی به فناوری‌های نوآورانه و داده‌محور را نمایان می‌کند (شکل ۶).



شکل ۶. شبکه هم‌رخدادی خوشه ای واژگان کلیدی (۲۰۲۵-۲۰۱۰)
منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)

شبکه هم‌رخدادی زمانی واژگان کلیدی: شبکه هم‌رخدادی واژگان کلیدی نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴، مفاهیم برنامه‌ریزی شهری، شهر هوشمند و دوقلوی دیجیتال بیشترین تکرار و نقش محوری را در پژوهش‌ها داشته‌اند. گره‌های مرتبط با فناوری‌های بصری و مدل‌سازی نظیر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، مدل‌سازی سه‌بعدی و واقعیت مجازی بیشتر در سال‌های ابتدایی بازه (۲۰۲۱-۲۰۲۲) پررنگ بوده و به رنگ آبی و سبز دیده می‌شوند. در مقابل، مفاهیمی نوظهور مانند بلاک‌چین، حریم خصوصی داده، سیستم‌های سایبر-فیزیکی و یادگیری ماشین که به رنگ زرد مشخص شده‌اند، بیشتر به سال‌های اخیر (۲۰۲۳-۲۰۲۴) تعلق دارند و بیانگر روندهای نوین در پژوهش‌های مرتبط با شهر هوشمند و دوقلوی دیجیتال هستند. این الگو نشان می‌دهد که جهت‌گیری علمی حوزه از مباحث سنتی‌تر همچون برنامه‌ریزی شهری و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به سوی موضوعات نوآورانه‌تر مرتبط با هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ و فناوری‌های غیرمتمرکز در حال تحول است (شکل ۷).



شکل ۷. شبکه هم‌رخدادی زمانی واژگان کلیدی (۲۰۲۵-۲۰۱۰)
منبع (ترسیم نگارندگان، ۱۴۰۵)

تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری: با توجه به نتایج مروری نظام‌مند و در جهت تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری، متغیرها، مؤلفه‌ها و شاخص‌های پژوهش شامل متغیر مستقل زیرساخت سبز شهری با ۵ مؤلفه و ۱۵ گویه و متغیر وابسته خدمات اکوسیستم شهری با ۵ مؤلفه و ۱۵ گویه شناسایی شدند (جدول ۲).

جدول ۲. شناسایی متغیرهای پژوهش

شاخص	مؤلفه	متغیر
۱. میزان استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدور و پهپادها برای جمع‌آوری داده‌های شهری ۲. سطح به‌کارگیری حسگرها و شبکه‌های اینترنت اشیا برای پایش محیطی ۳. دسترسی و کارایی داده‌های مکانی (نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای دیجیتال) ۴. سهولت و گستردگی استفاده از نرم‌افزارهای تلفن همراه برای تبادل داده	انتشار و گردآوری داده‌ها	حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری
۱. میزان بهره‌برداری از بسترهای رایانش ابری برای ذخیره و پردازش داده ۲. سطح یکپارچگی داده‌ها از طریق پایگاه‌های داده متنوع ۳. کارایی روش‌های همپوشی و یکپارچه‌سازی داده‌ها برای تحلیل دقیق ۴. وجود و اثربخشی استانداردها و پروتکل‌های مشترک	ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها	حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری
۱. میزان استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در حوزه‌هایی مانند ترافیک، انرژی یا محیط‌زیست ۲. سطح بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی ۳. کارایی مدل‌های سب‌بعدی در طراحی و مدیریت شهری ۴. میزان استفاده از مدل‌های رفتاری برای تحلیل الگوهای شهری	مدل‌سازی و شبیه‌سازی داده‌ها	حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری
۱. میزان دسترسی کاربران به سامانه‌های نمایشی و داشبوردهای تحلیلی ۲. سطح استفاده از فناوری‌های واقعیت مجازی و واقعیت افزوده برای نمایش داده‌ها ۳. قابلیت درک‌پذیری داده‌های پیچیده از طریق مصورسازی ۴. کارایی سامانه‌های نقشه دیجیتال و نمای سب‌بعدی در تصمیم‌گیری	مصورسازی و دسترسی به داده‌ها	حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری

شاخص	مؤلفه	متغیر
۱. میزان اثربخشی مدیریت دسترسی و مجوزها در حفاظت از داده ۲. سطح اجرای روش‌های ناشناس‌سازی و حفاظت از داده‌های حساس ۳. میزان استفاده از هوش مصنوعی در ارائه خدمات هوشمند ۴. قابلیت سامانه‌های پایش و کنترل در تضمین امنیت و کیفیت داده	امنیت داده و خدمات هوشمند	حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری
۱. نوآوری و کارآفرینی ۲. زیرساخت دیجیتال و اتصال‌پذیری ۳. ایجاد اشتغال و توسعه اقتصادی ۴. بهره‌وری و بازار کار	اقتصاد هوشمند	توسعه نظام‌مند شهر هوشمند
۱. شمول دیجیتال و تنوع قومی ۲. خلاقیت فرهنگی و نوآوری اجتماعی ۳. گرایش به یادگیری مادام‌العمر ۴. مشارکت و درگیرشدن شهروندان	جامعه هوشمند	توسعه نظام‌مند شهر هوشمند
۱. مدیریت پایدار انرژی و منابع ۲. زیرساخت سبز و ساختمان‌های پایدار ۳. پایش و کنترل آلودگی ۴. حفاظت از محیط زیست	محیط هوشمند	توسعه نظام‌مند شهر هوشمند
۱. کیفیت زندگی و رفاه اجتماعی ۲. شرایط سلامت و کیفیت مسکن ۳. ایمنی عمومی و مدیریت مخاطرات ۴. فرصت‌های گردشگری و تفریحی	زندگی هوشمند	توسعه نظام‌مند شهر هوشمند
۱. دسترسی محلی و بین‌المللی ۲. سامانه‌های حمل‌ونقل پایدار، نوآورانه و ایمن ۳. دسترسی به زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات ۴. مدیریت هوشمند ترافیک و پارکینگ	تحرك هوشمند	توسعه نظام‌مند شهر هوشمند
۱. راهبردها و چشم‌اندازهای سیاسی ۲. حکمرانی شفاف و حفاظت از حریم خصوصی ۳. خدمات عمومی و اجتماعی ۴. حکمرانی مشارکتی و تصمیم‌گیری جمعی	حکمرانی هوشمند	توسعه نظام‌مند شهر هوشمند

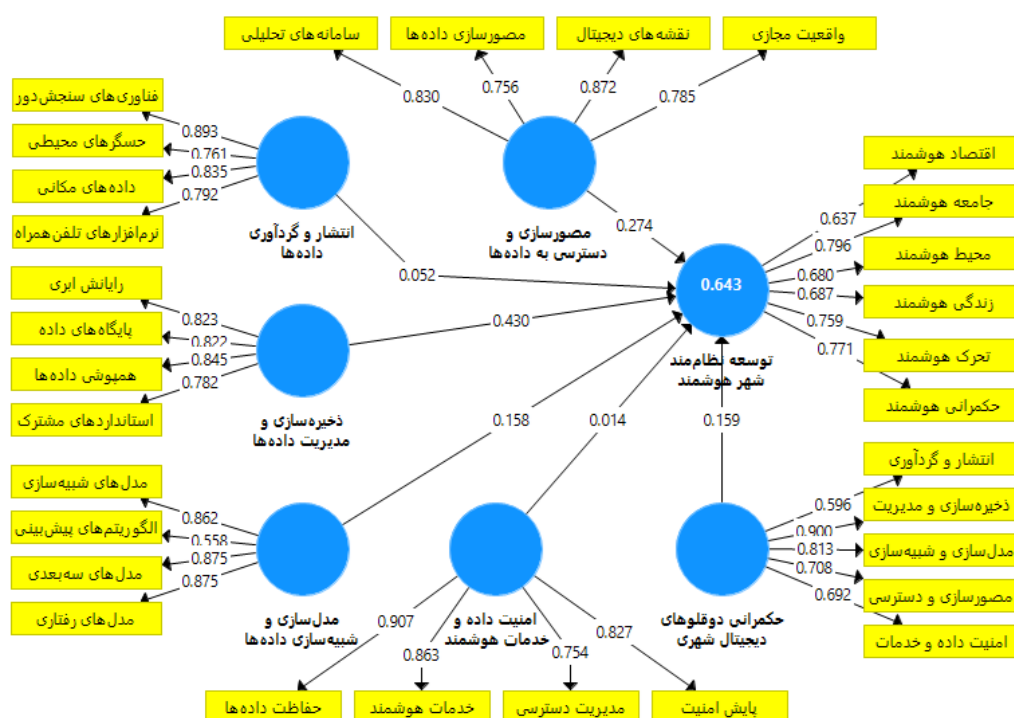
منبع: (Huang and, Tsou, 2025)

مدل اندازه‌گیری: برآزش مدل اندازه‌گیری بر اساس تحلیل عاملی تأییدی نشان داد که بارهای عاملی تمامی شاخص‌ها بالاتر از حد آستانه ۴/۰ بوده و هر سازه حداقل ۵۰ درصد از واریانس شاخص‌های مربوط را توضیح می‌دهد. پایایی ترکیبی و ضریب آلفای کرونباخ برای تمامی متغیرها بالاتر از ۷/۰ است که بیانگر قابلیت اطمینان و انسجام درونی مناسب شاخص‌ها است. همچنین، شاخص روایی همگرا برای همه متغیرها بالاتر از ۵/۰ بوده و دلالت بر روایی قابل قبول و واریانس توضیح داده شده کافی دارد؛ بنابراین، مدل اندازه‌گیری از نظر پایایی و روایی در سطح قابل قبولی قرار دارد و می‌تواند پایه مناسبی برای تحلیل مدل ساختاری باشد (جدول ۳) و (شکل ۸).

جدول ۳. برآورد نتایج برازش مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری

مؤلفه	بار عاملی	پایایی ترکیبی (CR)	آلفای کرونباخ (Alpha)	روایی همگرا (AVE)
انتشار و گردآوری داده‌ها	۵۹۶/۰	۸۹۲/۰	۸۳۹/۰	۶۷۵/۰
ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها	۹۰۰/۰	۸۹۰/۰	۸۳۵/۰	۶۷۰/۰
مدل‌سازی و شبیه‌سازی داده‌ها	۸۱۳/۰	۸۷۷/۰	۸۳۶/۰	۶۴۷/۰
مصورسازی و دسترسی به داده‌ها	۷۰۸/۰	۸۸۵/۰	۸۲۹/۰	۶۵۹/۰
امنیت داده و خدمات هوشمند	۶۹۲/۰	۹۰۵/۰	۸۵۹/۰	۷۰۵/۰
اقتصاد هوشمند	۶۳۷/۰	-	-	-
جامعه هوشمند	۷۹۶/۰	-	-	-
محیط هوشمند	۶۸۰/۰	-	-	-
زندگی هوشمند	۶۸۷/۰	-	-	-
تحرک هوشمند	۷۵۹/۰	-	-	-
حکمرانی هوشمند	۷۷۱/۰	-	-	-
حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری	-	۸۶۲/۰	۸۳۵/۰	۵۶۱/۰
توسعه نظام‌مند شهر هوشمند	-	۸۶۸/۰	۸۲۱/۰	۵۲۴/۰

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۸. مدل معادلات ساختاری پژوهش همراه با ضرایب مسیر (بارهای عاملی)

منبع: (ترسیم نگارندگان، ۱۴۰۵)

مدل ساختاری: نتایج تحلیل مدل ساختاری برای متغیر وابسته توسعه نظام‌مند شهر هوشمند نشان می‌دهد که معیار GoF برای برابر با ۷۳۹/۰ است که از حداقل استاندارد ۳۶/۰ فراتر رفته و نشان‌دهنده برازش کلی قوی و قابل قبول مدل است. مقدار VIF معادل ۷۰/۳ است که کمتر از آستانه مجاز ۵ بوده و بیانگر عدم وجود هم‌خطی شدید میان متغیرهای مستقل و قابل اعتماد بودن برآورد ضرایب می‌باشد. همچنین، مقدار R^2 برابر با ۶۴۳/۰ نشان می‌دهد متغیرهای مستقل

توان بالایی در تبیین واریانس متغیر وابسته دارند. در نهایت، مقدار Q^2 برابر با $287/0$ قدرت پیش‌بینی مطلوب مدل را تأیید می‌کند (جدول ۴).

جدول ۴. برآورد نتایج برازش مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری

مؤلفه	معیار GoF	معیار VIF	معیار R^2	معیار Q^2
توسعه نظام‌مند شهر هوشمند	۵۸۰/۰	۸۰/۲	۶۴۳/۰	۲۸۷/۰

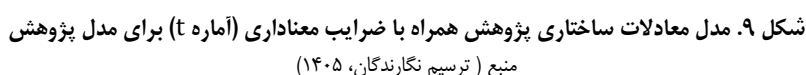
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

بر اساس نتایج حاصل از برازش مدل ساختاری در جدول (۵)، تمامی مؤلفه‌های اصلی بر توسعه نظام‌مند شهر هوشمند اثر معنادار داشته‌اند. مسیر انتشار و گردآوری داده‌ها با ضریب معنی‌داری $176/4$ معنادار است. مسیر ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها با ضریب معنی‌داری $556/4$ نیز اثر معناداری نشان می‌دهد. همچنین، مسیر مدل‌سازی و شبیه‌سازی داده‌ها با ضریب معنی‌داری $912/3$ و مسیر مصورسازی و دسترسی به داده‌ها با ضریب معنی‌داری $537/3$ به‌طور معنادار بر توسعه نظام‌مند شهر هوشمند تأثیر دارند. مسیر امنیت داده و خدمات هوشمند با ضریب معنی‌داری $858/15$ و در نهایت مسیر حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری با ضریب معنی‌داری $267/2$ نیز تأثیر معنادار خود را بر توسعه نظام‌مند شهر هوشمند نشان می‌دهند. این نتایج بیانگر آن است که تمامی مؤلفه‌ها به‌طور آماری معنادار و قابل توجه در هم‌افزایی با یکدیگر برای تحقق توسعه نظام‌مند شهر هوشمند نقش دارند. (شکل ۹).

جدول ۵. برآورد نتایج برازش مدل ساختاری (ضریب معنی‌داری t)

مسیر اثرگذاری	وابسته	ضریب مسیر	ضرایب معنی‌داری	سطح معنی‌داری	نتیجه
انتشار و گردآوری داده‌ها	توسعه نظام‌مند شهر هوشمند	۵۵۲/۰	۱۷۶/۴	۰۰۱/۰	تأیید و معنادار
ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها		۴۳۰/۰	۵۵۶/۴	۰۰۰/۰	تأیید و معنادار
مدل‌سازی و شبیه‌سازی داده‌ها		۱۵۸/۰	۹۱۲/۳	۰۰۳/۰	تأیید و معنادار
مصورسازی و دسترسی به داده‌ها		۲۷۴/۰	۵۳۷/۳	۰۰۰/۰	تأیید و معنادار
امنیت داده و خدمات هوشمند		۰۱۴/۰	۸۵۸/۱۵	۰۰۰/۰	تأیید و معنادار
حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری		۱۵۹/۰	۲۶۷/۲	۰۲۴/۰	تأیید و معنادار

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



بر اساس تحلیل برازش مدل ساختاری نتایج نشان داد که انتشار و گردآوری داده‌ها نقش حیاتی در فراهم کردن اطلاعات دقیق و به‌روز برای تصمیم‌گیری شهری دارد؛ این امر با مطالعات شریعت‌پرو و بهزادفر (۱۴۰۱) و لی و تان (۲۰۲۳)، همسو است و نشان می‌دهد بدون داده‌های منظم، برنامه‌ریزی و مدیریت شهر هوشمند با چالش مواجه خواهد شد. ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ سازماندهی مناسب داده‌ها و دسترسی سریع به آن‌ها امکان بهره‌وری

بالا تر و پایداری فرآیندهای شهری را فراهم می‌کند که با یافته‌های کائو و همکاران (۲۰۲۵)، مطابقت دارد و نشان می‌دهد مدیریت داده‌ها پایه‌ای برای سیستم‌های هوشمند کارآمد است. مدل‌سازی و شبیه‌سازی داده‌ها توانایی پیش‌بینی روندها و تحلیل پیچیدگی‌های شهری را تقویت می‌کند و مطابق با نتایج توروک و پاولوشک (۲۰۲۴) و خزینا و همکاران (۲۰۲۵)، نشان می‌دهد که شبیه‌سازی دقیق می‌تواند کیفیت زندگی و کارکرد زیرساخت‌ها را بهبود بخشد. مصورسازی و دسترسی به داده‌ها باعث می‌شود اطلاعات به شکل قابل فهم و کاربردی ارائه شود و تصمیم‌گیری را برای مدیران و شهروندان تسهیل کند، که با مطالعات پلدون و همکاران (۲۰۲۴) و جین و همکاران (۲۰۲۴)، همخوانی دارد و اهمیت ارائه داده‌ها به شکل بصری و تعاملی را نشان می‌دهد. امنیت داده و خدمات هوشمند نقش محافظتی و اعتمادساز دارد؛ حفاظت از داده‌ها و اطمینان از ارائه خدمات ایمن، همانند یافته‌های ویل و همکاران (۲۰۲۳) و هوزات و همکاران (۲۰۲۵)، برای پذیرش و موفقیت شهرهای هوشمند ضروری است. در نهایت، حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری چارچوب نهادی و مدیریتی لازم برای هماهنگی و یکپارچگی فعالیت‌ها را فراهم می‌آورد، که با نتایج دیاز-ساراشاگا (۲۰۲۵) و هاراگوچی و همکاران (۲۰۲۴)، همسو است و نشان می‌دهد بعد نهادی در موفقیت شهر هوشمند نقش محوری دارد. بنابراین، یافته‌ها نشان می‌دهند که توسعه نظام‌مند شهر هوشمند تهران نیازمند هماهنگی مؤلفه‌های فنی، داده‌ای و حکمرانی است، در حالی که چالش‌هایی مانند یکپارچگی داده، امنیت و حریم خصوصی همچنان باقی مانده‌اند.

نتیجه‌گیری

حکمرانی دوقلوهای دیجیتال شهری با فراهم کردن زیرساخت‌های داده‌محور، چارچوب مدیریتی منسجم و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ و سیستم‌های سایبر-فیزیکی، نقش بنیادینی در توسعه نظام‌مند و آینده‌نگر شهر هوشمند تهران ایفا می‌کند. این رویکرد با ترکیب داده‌های واقعی و مدل‌های شبیه‌سازی، امکان درک عمیق‌تر پویایی‌های شهری را فراهم ساخته و فرآیند تصمیم‌گیری مدیریتی را از حالت واکنشی به پیش‌نگرانه و داده‌محور تبدیل می‌کند. دوقلوهای دیجیتال نه تنها ابزاری برای بهینه‌سازی زیرساخت‌های فیزیکی شهر هستند، بلکه بستری برای شفافیت، پاسخ‌گویی و ارتقای تاب‌آوری شهری نیز محسوب می‌شوند. با استقرار این نظام، امکان رصد لحظه‌ای تغییرات شهری، تحلیل دقیق الگوهای مصرف منابع، پیش‌بینی بحران‌های احتمالی و مدیریت هوشمند خدمات شهری فراهم می‌شود. بدین ترتیب، حکمرانی دوقلوهای دیجیتال می‌تواند به افزایش کارایی سیستم‌های شهری، کاهش هزینه‌های مدیریتی، تقویت اعتماد شهروندان و ارتقای کیفیت زندگی در شهر تهران منجر شود. همچنین، تقویت تعامل میان بخش‌های فنی، نهادی و انسانی، زمینه‌ساز شکل‌گیری شهری یکپارچه، هوشمند و پایدار است که در آن تصمیم‌گیری‌ها بر مبنای شواهد، داده و تحلیل دقیق صورت می‌گیرد. با این حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی همراه است؛ از جمله تمرکز بر داده‌های ثانویه و غیرمحلی، دسترسی محدود به داده‌های دقیق شهری و عدم بررسی جامع ابعاد اجتماعی، فرهنگی و رفتاری شهروندان در پذیرش فناوری‌های نوین، که می‌تواند بر قابلیت تعمیم نتایج تأثیرگذار باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با رویکردی چندبعدی به تحلیل میدانی داده‌ها، مشارکت فعال شهروندان در فرآیند حکمرانی دیجیتال و بررسی اثرات فرهنگی و اجتماعی دوقلوهای دیجیتال بپردازند. همچنین، انجام مطالعات تطبیقی میان تهران و سایر کلان‌شهرهای هوشمند، طراحی مدل‌های شبیه‌سازی تعاملی برای سنجش تاب‌آوری شهری، ارزیابی چالش‌های اخلاقی و امنیتی در مدیریت داده‌ها و تدوین چارچوب بومی حکمرانی دیجیتال می‌تواند مسیر توسعه و تصمیم‌گیری شهری را غنی‌تر سازد. همچنین، پیشنهادها کاربردی و اجرایی شامل موارد زیر است:

۱. توسعه سامانه‌های پایش آنلاین برای جمع‌آوری و مدیریت داده‌های شهری تهران به منظور رصد تغییرات شهری و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیران؛
۲. ارتقای امنیت و حفاظت از داده‌ها و زیرساخت‌های هوشمند شهر تهران برای افزایش اعتماد و اطمینان در استفاده از خدمات هوشمند؛
۳. طراحی مدل‌های شبیه‌سازی دقیق و تعاملی برای بهبود تصمیم‌گیری شهری و پیش‌بینی اثرات تصمیمات مختلف؛
۴. تقویت چارچوب حکمرانی دیجیتال برای افزایش شفافیت، پاسخگویی و مشارکت شهروندان در فرآیندهای مدیریت شهری؛
۵. یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ و سیستم‌های سایبر-فیزیکی در مدیریت شهری تهران برای بهینه‌سازی فرآیندها و تصمیم‌گیری داده‌محور.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

پژوهشگران در انجام این پژوهش سهم برابر دارند.

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

بنابر اظهار نویسنده مسئول، این مقاله مستخرج از پایان نامه ارشد است و از مسئولین انتشار تشکر می‌کنند.

منابع

- (۱) شریعت‌پور، ف. و بهزادفر، م. (۱۴۰۱). دوقلوی دیجیتال؛ گامی نوین به سمت هوشمندسازی شهر در زمینه برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت شهری. صفحه ۳۲ (۴)، ۹۳-۱۰۶. <https://doi.org/10.52547/sofeh.32.4.93>
- 2) Abdeen, F. N., Shirowzhan, S., & Sepasgozar, S. M. E. (2023). Citizen-centric digital twin development with machine learning and interfaces for maintaining urban infrastructure. *Telematics and Informatics*, 84, 102032. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2023.102032>.
- 3) Afzal, M., Li, R. Y. M., Shoaib, M., Ayyub, M. F., Tagliabue, L. C., Bilal, M., Ghafoor, H., & Manta, O. (2023). Delving into the digital twin developments and applications in the construction industry: A PRISMA approach. *Sustainability*, 15(23), 16436. <https://doi.org/10.3390/su152316436>
- 4) AL-Dabbagh, R. (2022). Dubai, the sustainable, smart city. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 7, 3. <https://doi.org/10.1051/rees/2021049>.
- 5) Avezbaev, S., Avezbaev, O., Tashpulatov, S., & Sharipov, S. (2023). Implementation of GIS-based smart community information system and concepts of digital twin in the field of urban planning in Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*, 386, 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338605006>
- 6) Barresi, A. (2023). Urban digital twin and urban planning for sustainable cities. *TECHNE*, (25), 78–83. <https://doi.org/10.36253/techne-13568>.
- 7) Bibri, S. E., Alahi, A., Sharifi, A., & Krogstie, J. (2023). Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: An integrated approach to an extensive literature review. *Energy Informatics*, 6, 9. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00259-2>
- 8) Cao, J., Spulbar, C., Eti, S., Horobet, A., Yuksel, S., & Dincer, H. (2025). Innovative approaches to green digital twin technologies of sustainable smart cities using a novel hybrid decision-making system. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10(1), 100651. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100651>.

- 9) Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M., & Malvezzi, R. (2022). Digital twin for urban planning in the Green Deal era: A state of the art and future perspectives. *Sustainability*, 14, 6263. <https://doi.org/10.3390/su14106263>
- 10) Charitonidou, M. (2022). Urban scale digital twins in data-driven society: Challenging digital universalism in urban planning decision-making. *International Journal of Architectural Computing*, 20, 238–253. <https://doi.org/10.1177/14780771211070005>
- 11) Cook, M., & Valdez, A. M. (2022). Curating smart cities. *Urban Geography*, 44(6), 1192–1210. <https://doi.org/10.1080/02723638.2022.2072077>.
- 12) Danilina, N., & Majorzadehzahiri, A. (2019). Investigating the capability of Smart City in Tehran. *E3S Web of Conferences*, 97, 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199701005>
- 13) Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z.-J.(.) (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.03.003>.
- 14) Depretre, A., Jacquinod, F., & Mielniczek, A. (2022). Exploring digital twin adaptation to the urban environment: Comparison with CIM to avoid silo-based approaches. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W2-2022-117-2022>
- 15) Diaz-Sarachaga, J. M. (2025). Developing an assessment governance framework for urban digital twins: Insights from smart cities. *Cities*, 156, 105558. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105558>.
- 16) Ehwi, R. J., Holmes, H., Maslova, S., & Burgess, G. (2022). The ethical underpinnings of Smart City governance: Decision-making in the smart Cambridge programme. *UK. Urban Studies*, 59(14), 2968–2984. <https://doi.org/10.1177/00420980211064983>.
- 17) Elsehrawy, R., Kumar, B., & Watson, R. (2021). A digital twin uses classification system for urban planning & city infrastructure management. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 832–862. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.045>
- 18) Fartash, K., Azizi, A., Khayatian Yazdi, M. (2021). Tehran in the Path of Transition to a Smart City: Initiatives, Implementation, and Governance. In: Augusto, J.C. (eds) *Handbook of Smart Cities*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69698-6_76.
- 19) Fattahi Tabasi, S., Rafizadeh, H. R., Andaji Garmaroudi, A., & Banihashemi, S. (2023). Optimizing urban layouts through computational generative design: Density distribution and shape optimization. *Architectural Engineering and Design Management*. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2182836>
- 20) Ferré-Bigorra, J., Casals, M., & Gangolells, M. (2022). The adoption of urban digital twins. *Cities*, 131, Article 103905. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905>.
- 21) Guo, F., Ma, L., Wu, J., Chen, K., Fang, W., & Broyd, T. (2025). A systematic review of multi-scale digital modelling in sustainable urban design and management. *Sustainable Cities and Society*, 119, 106103. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106103>
- 22) Haraguchi, M., Funahashi, T., & Biljecki, F. (2024). Assessing governance implications of city digital twin technology: A maturity model approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 204, 123409. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123409>.
- 23) Huang, H., Tsou, J.Y. (2025). From Concept to Reality: A Systematic Review of Urban Digital Twin and Their Applications in Smart Cities. In: Francis, A., Miresco, E., Melhado, S. (eds) *Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering. ICCCB E 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 628. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84208-5_40.
- 24) Huang, W., Zhang, Y., & Zeng, W. (2022). Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36, 100781. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100781>.
- 25) Huzzat, A., Anpalagan, A., Khwaja, A. S., Woungang, I., Alnoman, A. A., & Pillai, A. S. (2025). A comprehensive review of digital twin technologies in smart cities. *Digital Engineering*, 4, 100040. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040>.
- 26) Jin, C., Lee, Y., Lee, S., & Hyun, C. (2024). Lightweighting process of digital twin information models for smart city services. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(4), 1304–1320. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-2354-z>.
- 27) Ketzler, B., Naserentin, V., Latino, F., Zangelidis, C., Thuvander, L., & Logg, A. (2020). Digital twins for cities: A state of the art review. *Built Environment*, 46(4), 547–573. <https://doi.org/10.2148/benv.46.4.547>.
- 28) Khazina, N., Umer, T., Asghar, A. B., Aslam, M., Ejsmont, K., Metwally, A. S. M., & Thanh, K. N. (2025). Machine learning assisted predictive urban digital twin for intelligent monitoring of air quality index for smart city environment. *Environmental Modelling & Software*, 192, 106559. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106559>.

- 29) Kiviahho, A., & Einolander, J. (2023). Digital transformation, well-being and shrinking communities: Narrowing the divides between urban and rural. *Heliyon*, 9(8), Article e18801. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18801>.
- 30) Klar, R., Fredriksson, A., & Angelakis, V. (2023). Digital twins for ports: Derived from smart city and supply chain twinning experience. *IEEE Access*, 11, 71777–71799. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3295495>.
- 31) Lehtola, V. V., Koeva, M., Elberink, S. O., Raposo, P., Virtanen, J. P., Vahdatikhaki, F., & Borsci, S. (2022). Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, Article 102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>.
- 32) Lei, B., Janssen, P., Stoter, J., & Biljecki, F. (2023). Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. *Automation in Construction*, 147, Article 104716. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104716>.
- 33) Li, B., & Tan, W. (2023). A novel framework for integrating solar renewable source into smart cities through digital twin simulations. *Solar Energy*, 262, 111869. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111869>.
- 34) Liu, Y., Pan, S., & Ballot, E. (2025). Federated digital twins platform for smart city logistics: A knowledge-driven approach. *International Journal of Production Economics*, 109772. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109772>.
- 35) Macatulad, E., & Biljecki, F. (2024). Continuing from the Sendai Framework midterm: Opportunities for urban digital twins in disaster risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102, Article 104310. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104310>.
- 36) Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C., & Muñoz, L. (2021). Digital twins from smart manufacturing to smart cities: A survey. *IEEE Access*, 9, 143222–143249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843>.
- 37) Nocht, T., Wan, L., Schooling, J. M., & Parlikad, A. K. (2021). A socio-technical perspective on urban analytics: The case of city-scale digital twins. *Journal of Urban Technology*, 28(1–2), 263–287. <https://doi.org/10.1080/10630732.2020.1798177>.
- 38) Noori, N., de Jong, M., & Hoppe, T. (2020). Towards an integrated framework to measure smart city readiness: The case of Iranian cities. *Smart Cities*, 3(3), 676–704. <https://doi.org/10.3390/smartcities3030035>.
- 39) O'Brien, P., Pike, A., & Tomaney, J. (2019). Governing the 'ungovernable'? Financialisation and the governance of transport infrastructure in the London global city-region. *Progress in Planning*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2018.02.001>.
- 40) Parsa, S., Pourahmad, A., Parsa, M., & Piri, E. (2021). Explaining the dimensions and components of smart governance in Tehran. *International Journal of European Studies*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.11648/j.ijes.20210501.12>.
- 41) Peldon, D., Banihashemi, S., Le Nguyen, K., & Derrible, S. (2024). Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*, 111, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105583>.
- 42) Pereira, G. V., Parycek, P., Falco, E., & Kleinhans, R. (2018). Smart governance in the context of smart cities: A literature review. *Information Polity*, 23(2), 143–162. <https://doi.org/10.3233/IP-170067>.
- 43) Shariatpour, F., & Behzadfar, M. (2022). Digital twin: A step towards smart cities in urban planning, design and management. *Sofeh: Journal of Art, Architecture and Urban Studies*, 32(4), 93–106. <https://doi.org/10.52547/sofeh.32.4.93>.
- 44) Shariatpour, F., Behzadfar, M., & Zareei, F. (2024). Urban 3D modeling as a precursor of city information modeling and digital twin for smart city era: A case study of the Narmak neighborhood of Tehran City, Iran. *Journal of Urban Planning and Development*, 150(2). <https://doi.org/10.1061/JUPDDM.UPENG-46>.
- 45) Talkhabi, H., Jafarpour Ghalehtemouri, K., & Toulabi Nejad, M. (2024). Integrating Tehran metropolitan air pollution into the current transport system and sprawl growth: An emphasis on urban performance and accessibility. *Discover Cities*, 1, Article 8. <https://doi.org/10.1007/s44327-024-00008-4>.
- 46) The World Bank. (2023). Urban population (% of total population). In , 2023. World Bank open data. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>.
- 47) Turek, T., & Paweloszek, I. (2024). Digital twins technology for smart city development. A case study of Poland's largest cities. *Procedia Computer Science*, 246, 4863–4872. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.352>.

- 48) Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C. E., Rajabifard, A., & Acuto, M. (2022). Potential and limitations of digital twins to achieve the sustainable development goals. *Nature Sustainability*, 5, 822–829. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00923-7>.
- 49) UN-Habitat. (2024). Urban governance. Retrieved from <https://unhabitat.org/top ic/urban-governance>.
- 50) Wang, B., Wang, Q., Cheng, J. C. P., & Yin, C. (2022). Object verification based on deep learning point feature comparison for scan-to-BIM. *Automation in Construction*, 142, Article 104515. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104515>.
- 51) Weil, C., Bibri, S. E., Longchamp, R., Golay, F., & Alahi, A. (2023). A systemic review of urban digital twin challenges, and perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 99, Article 104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
- 52) Ye, X., Du, J., Han, Y., Newman, G., Retchless, D., Zou, L., ... Cai, Z. (2023). Developing human-centered urban digital twins for community infrastructure resilience: A research agenda. *Journal of Planning Literature*, 38(2), 187–199. <https://doi.org/10.1177/08854122221137860>
- 53) Zali, N., Soltani, A., Najafi, P., Ebadi Qajari, S., & Mehrju, M. (2024). Digital Twins for Smarter Iranian Cities: A Future Studies Perspective. *Computational Urban Science*, 4(1), Article 43. <https://doi.org/10.1007/s43762-024-00155-9>.
- 54) Zhang, J., Chen, C., Zhang, Y., Cui, Y., Han, P., Meng, N., & Xu, Y. (2022). The framework and practices of digital twin city. In *ICEIEC 2022 - Proceedings of 2022 IEEE 12th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*. <https://doi.org/10.1109/ICEIEC54567.2022.9835091>
- 55) Zhou, Y., Lei, H., Zhang, X., Wang, S., Xu, Y., Li, C., Zhang, J. (2023). Using the dual concept of evolutionary game and reinforcement learning in support of decision-making process of community regeneration — case study in Shanghai. *Buildings*, 13(1), 175. <https://doi.org/10.3390/buildings13010175>.