



REVIEW PAPER

Optimizing Urban Project Implementation Processes through a Digital Twin-Based Smart City

Hamed Rasoli Farah ^{(1)*} 

1. Ph.D. Candidiat in Urban Planning, Department of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0009-0004-8299-6071>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received:03/02/2025 Revised:28/02/2025 Accepted:08/03/2025 PP. 100-130 Keywords: <i>Urban Digital Twin, Smart City, Execution Optimization, Project Management, Data-Driven Decision-Making.</i>	Introduction: Urban digital twins are transforming urban planning and management by creating dynamic connections between physical and virtual environments, enabling real-time monitoring, data integration, scenario simulation, predictive analysis, and data-driven decision-making. In smart cities, Digital Twin Smart Cities (DTSCs) provide dynamic representations of urban conditions and integrate spatial, temporal, economic, environmental, and operational data. This integration supports a shift from static and retrospective planning toward dynamic, predictive, and evidence-based urban management. Given the complexity of urban project implementation, stakeholder diversity, and constraints of time, cost, and resources, DTSCs can improve project efficiency, transparency, adaptability, and coordination. They also enable planners and managers to test alternative scenarios, evaluate potential impacts, identify deviations, and optimize operations within an integrated decision-support environment. Thus, their strategic value extends beyond visualization and simulation to data integration, monitoring, prediction, optimization, and intelligent urban management. The Purpose of the Research: This study aims to investigate the role and capabilities of digital twin smart cities in optimizing the implementation of urban projects and to identify the principal dimensions through which this technology can contribute to more effective project delivery. Methodology: The research adopts a qualitative approach based on content analysis of scientific documents and publications. In addition, VOSviewer was employed to analyze the knowledge structure, research trends, and keyword co-occurrence patterns within the existing literature and identify the main thematic relationships surrounding digital twin applications in urban contexts. The analysis was complemented by a review of international experiences to examine how digital twins have been applied in different urban and infrastructure contexts. The selected cases represent geographical and functional diversity, including applications in urban planning and policy, transportation, energy, environmental management, infrastructure, and port operations. Findings and Discussion: The study examines Digital Twin Smart Cities (DTSCs) across four spatial scales: building, street, neighborhood, and city, demonstrating their diverse applications in urban planning, mobility, environmental analysis, infrastructure management, and urban operations. Alongside spatial scales, four functional maturity levels are identified: passive, predictive, programmable, and autonomous, representing a progression from basic monitoring and visualization toward prediction, scenario evaluation, optimization, and automated decision-making. International cases, including Virtual Singapore, Dublin, and Rotterdam, demonstrate the practical application of digital twins across different urban contexts and technological levels. The findings indicate that DTSCs can improve project scheduling, implementation speed, and resource allocation while reducing costs and enhancing



Use your device to scan and read the article online

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	execution quality and environmental sustainability. They also strengthen stakeholder participation, coordination, transparency, and urban decision-making by integrating real-time data, dynamic modeling, simulation, and predictive analysis. A key contribution of digital twins is their ability to reduce uncertainty during project implementation by continuously monitoring project conditions and enabling the early identification of deviations, potential problems, and alternative solutions. The results further show that the contribution of DTSCs increases as systems move from passive toward predictive, programmable, and autonomous levels, allowing urban managers to progress from monitoring conditions to forecasting, optimizing processes, and performing selected automated control functions. From an urban planning perspective, digital twins can help bridge the gap between planning and implementation by connecting planned objectives with real-time urban conditions. They support plan evaluation, implementation monitoring, development scenario assessment, organizational coordination, and evidence-based policymaking. However, effective implementation requires more than technological investment and depends on data quality and availability, interoperability and standardization, digital infrastructure, skilled human resources, institutional capacity, cybersecurity, data ownership, privacy, and appropriate governance mechanisms. Higher levels of digital twin maturity also require greater computational capacity and organizational readiness, which may limit adoption in contexts with underdeveloped digital and institutional infrastructures. Conclusion: Overall, the study concludes that digital twin smart cities should be understood not merely as simulation or visualization tools, but as strategic infrastructures for integrated data management, intelligent urban governance, and continuous optimization of project implementation. Their principal value emerges from connecting monitoring, analysis, prediction, simulation, optimization, and management within a continuously updated digital environment. Consequently, DTSCs can provide an effective framework for improving the efficiency and realizability of urban projects, strengthening stakeholder coordination, and supporting more adaptive, transparent, and evidence-based urban planning and policymaking. Future research should focus on developing context-sensitive implementation frameworks, assessing economic feasibility and organizational readiness, establishing standardized evaluation criteria, and investigating governance mechanisms that can support responsible and sustainable deployment of digital twins in different urban contexts. Funding: There is no funding support. Authors' Contribution: The author approved the content of the manuscript and accepts responsibility for all aspects of the work. Conflict of Interest: Authors declared no conflict of interest. AI Usage Declaration: The author declares that the AI tool ChatGPT was used in a limited manner to assist with language refinement and to support the identification of relevant primary sources related to the reviewed international experiences. The use of AI was restricted to these supporting purposes, and the main scientific content of the article was developed based on the cited scientific literature and sources. The author reviewed and verified the generated suggestions and assumes full responsibility for the scientific content, analyses, results, and final version of the manuscript. Acknowledgments: We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Highlight

- Advancing urban project implementation research by highlighting the role of digital twin smart cities in integrating real-time data, simulation, and data-driven decision-making;
- Developing a comprehensive framework that examines digital twin smart cities across spatial scales and functional maturity levels, from passive monitoring to autonomous management;
- Demonstrating the potential of digital twin smart cities to optimize project time, cost, quality, environmental sustainability, stakeholder participation, and urban decision-making.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Rasoli Farah, H. (2025). Optimizing Urban Project Implementation Processes through a Digital Twin-Based Smart City. *Art of Green Management*, 2(4), 100-130. 10.30480/agm.2026.6510.1069



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6510.1069>



https://agm.journal.art.ac.ir/article_1529.html



*. Corresponding Author (Email: h.rasoli@student.art.ac.ir) / (Phone: +989921234872)



بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری با بهره‌گیری از شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال

حامد رسولی فرح^(۱)

۱- دانشجوی دکتری شهرسازی، گروه برنامه‌ریزی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0009-0004-8299-6071>

ناشر: دانشگاه هنر ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ صص: ۱۳۰-۱۰۰ واژگان کلیدی: دوقلوی دیجیتال شهری، شهر هوشمند، بهینه‌سازی اجرا، مدیریت پروژه، تصمیم‌گیری داده‌محور 	مقدمه: دوقلوی دیجیتال شهری به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی انقلاب صنعتی چهارم، با ایجاد پیوندی پویا میان محیط فیزیکی و مجازی، امکان پایش لحظه‌ای، یکپارچه‌سازی داده‌ها، شبیه‌سازی سناریوها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم می‌سازد. با توجه به پیچیدگی اجرای پروژه‌های شهری، تعدد ذی‌نفعان و محدودیت‌های زمانی، مالی و منابع، بهره‌گیری از این فناوری می‌تواند به افزایش کارایی و هماهنگی در فرآیند اجرای پروژه‌های شهری کمک کند. هدف پژوهش: هدف این پژوهش، تبیین نقش و ظرفیت‌های شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال در بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری و شناسایی ابعاد اصلی اثرگذاری این فناوری بر تحقق مؤثرتر پروژه‌ها است. روش‌شناسی: پژوهش با رویکرد کیفی و از طریق تحلیل محتوای اسناد و مقالات علمی انجام شده است. همچنین، برای تحلیل ساختار دانش، روندهای پژوهشی و هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها از نرم‌افزار VOSviewer استفاده شده است. در ادامه، تجارب موفق بین‌المللی و سطوح فضایی شامل ساختمان، خیابان، محله و شهر و سطوح عملکردی شامل غیرفعال، پیش‌بین، برنامه‌پذیر و خودکار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یافته‌ها و بحث: یافته‌ها نشان می‌دهد که شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال، از طریق یکپارچه‌سازی داده‌های لحظه‌ای، مدل‌سازی پویا، شبیه‌سازی و قابلیت‌های تحلیلی و پیش‌بینانه، به بهبود زمان‌بندی و سرعت اجرای پروژه‌ها، تخصیص کارآمدتر منابع، کاهش هزینه‌ها، ارتقای کیفیت اجرا، افزایش پایداری محیطی، تقویت مشارکت ذی‌نفعان و بهبود مدیریت و تصمیم‌گیری شهری کمک می‌کند. همچنین، با حرکت از سطح غیرفعال به سطوح پیش‌بین، برنامه‌پذیر و خودکار، ظرفیت این فناوری برای کاهش عدم قطعیت و بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی افزایش می‌یابد. نتیجه‌گیری: شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال فراتر از یک ابزار شبیه‌سازی، به‌عنوان زیرساختی راهبردی برای یکپارچه‌سازی داده‌ها، مدیریت هوشمند و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در فرآیند اجرای پروژه‌های شهری عمل می‌کند. از این رو، این فناوری می‌تواند چارچوبی مؤثر برای کاهش فاصله میان برنامه‌ریزی و اجرا، ارتقای تحقق‌پذیری پروژه‌های شهری و تقویت برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد فراهم آورد.
نکات برجسته: - پیشبرد پژوهش‌های مرتبط با اجرای پروژه‌های شهری با تأکید بر نقش شهرهای هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال در یکپارچه‌سازی داده‌های بالادرنک، شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده؛ - توسعه یک چارچوب جامع برای بررسی شهرهای هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال در مقیاس‌های فضایی و سطوح بلوغ عملکردی مختلف، از پایش غیرفعال تا مدیریت خودکار؛ - تبیین ظرفیت شهرهای هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال در بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت پروژه، پایداری محیط‌زیستی، مشارکت ذی‌نفعان و تصمیم‌گیری شهری.	

ارجاع به این مقاله: رسولی فرح، حامد (۱۴۰۵). بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری با بهره‌گیری از شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال. هنر مدیریت سبز، ۲(۴)، ۱۰۰-۱۳۰. [10.30480/agm.2026.6510.1069](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6510.1069)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6510.1069>



https://agm.journal.art.ac.ir/article_1529.html



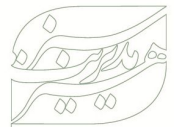
این مقاله به صورت دسترسی باز و با

مجوز [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

قابل استفاده است.

©2024, UST. All rights reserved.

*. نویسنده مسئول (رایانامه: h.rasoli@student.art.ac.ir) / (تلفن: +۹۸۹۹۲۱۲۳۴۸۷۲)



۱- مقدمه

مرز میان محیط‌های فیزیکی و دیجیتال شهری در حال محو شدن است و عصر جدیدی از توسعه شهری با محوریت فناوری دیجیتال آغاز شده است (Bai et al., 2025). شهر هوشمند به عنوان پارادایمی نوظهور، آینده شهرها را با فناوری دیجیتال گره زده است. فناوری دیجیتال، امروزه نه تنها به عنوان کاتالیزوری جهت توسعه شهرهای پیشرفته است، بلکه به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از آینده تمامی شهرها نیز شناخته می‌شود (Yeo, 2023).

در دنیای دیجیتال امروز، شهرها به سوی اکوسیستم‌های هوشمند پیش می‌روند؛ جایی که حسگرها و دستگاه‌های متصل با گردآوری و تحلیل داده‌ها، مدیریت منابع و زیرساخت‌ها را بهینه می‌کنند (Kozlowski & Suwar, 2021). دیجیتالی‌سازی برنامه‌ریزی شهری به معنای انتقال کل فرآیند تصمیم‌گیری به یک بستر یکپارچه دیجیتال است که با امکان تجسم و شبیه‌سازی سناریوها، شفافیت تبادل داده‌ها و قابلیت پیگیری تصمیمات، فرآیند اجرا را کارآمدتر، دقیق‌تر و مشارکتی‌تر کرده و اعتماد عمومی به نتایج را افزایش می‌دهد (Schrotter & Hürzeler, 2020). با این حال، گسترده شدن کاربرد فناوری‌های دیجیتال و الگوریتم‌ها باعث شده که بخش مهمی از تصمیم‌گیری‌ها به صورت خودکار و مبتنی بر منطق الگوریتمی انجام شود. در نتیجه، کنترل مستقیم برنامه‌ریزان بر نتایج طراحی کاهش می‌یابد و راه‌حل‌های شهری به صورت هم‌زمان محصول تصمیمات انسانی و عملکرد سیستم‌های دیجیتال هستند (Christmann & Schinagl, 2023).

در سطح جهانی، پیشرفت‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیا باعث تقویت سرمایه‌گذاری‌ها در توسعه شهرهای هوشمند شده‌اند و تحولات چشمگیری در حوزه‌های مختلف ایجاد کرده‌اند. این تمرکز استراتژیک بر فناوری، نقش کلیدی آن را در افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری شهری برجسته کرده و شهرها را به مثابه الگوهای جهانی متعهد به توسعه‌ای انسان‌محور و بهبود کیفیت زندگی معرفی می‌کند (Haque et al., 2022). با این حال، چالش‌ها و پیش‌نیازهای متعددی برای برنامه‌ریزی، اجرا و استقرار موفق یک شهر هوشمند وجود دارد (Law & Lynch, 2019).

یک دوقلوی دیجیتال شهری یکپارچه، می‌تواند ابزار مدیریتی مؤثرتری نسبت به روش‌های سنتی جهت پاسخگویی به این چالش‌ها باشد. از آنجایی که شهرها به طور مستمر در حال تغییر هستند، برنامه‌ریزی‌ها باید به‌طور مداوم به‌روز شوند؛ اما این کار پرهزینه و ناپایدار است. بنابراین، یک مدل سه‌بعدی چندمنظوره یکپارچه از شهر جایگزین مناسبی محسوب می‌شود (Peldon et al., 2024). بنابراین، بررسی ظرفیت‌های رو به رشد کاربردهای شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال^۱، با تمرکز بر بهینه‌سازی سناریوهای شهری، ضرورتی انکارناپذیر است (Luo et al., 2025).

هم‌اکنون پروژه‌های متعددی با هدف ثبت و شبیه‌سازی پیچیدگی‌های پویای شهرها و ویژگی‌های آن‌ها برای توسعه دوقلوهایی دیجیتال شهری در جریان است که توانسته‌اند و همچنان می‌توانند موجب ارتقای کارایی و کیفیت اجرای پروژه‌های شهری شوند (Alvi et al., 2025). فناوری دوقلوی دیجیتال^۲، با ویژگی‌هایی چون بازنمایی لحظه‌ای اشیای فیزیکی، مدل‌سازی و زمینه‌سازی الگوهای رفتاری پیچیده و به‌روزرسانی در لحظه میان جهان فیزیکی و دیجیتال، گزینه‌ای مناسب برای کمک به توسعه مؤثر شهر هوشمند و کاهش چالش‌های شهری در حوزه بهینه‌سازی اجرای پروژه‌ها به شمار می‌رود. دوقلوی دیجیتال، به عنوان یکی از اجزای محوری در تحول دیجیتال، این امکان را فراهم می‌کند که شهرها از طریق پایش لحظه‌ای از راه دور، به تصمیم‌گیری‌های مؤثرتر و مبتنی بر داده دست یابند.

این مقاله مروری بر فناوری دوقلوی دیجیتال و نقش آن در بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری ارائه می‌دهد و با توجه به ادبیات پژوهشی اخیر، رویکردها و روش‌شناسی‌های فعلی در این حوزه را بررسی می‌کند. پرسش‌های اصلی این مقاله این است که فناوری دوقلوی دیجیتال چند سطح دارد؟ چگونه سطوح مختلف این فناوری، می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری کمک کند؟ و میزان پیچیدگی اجرایی هر سطح چه تأثیری بر کاربرد عملی آن دارد؟

۱-۱- مروری بر پیشینه پژوهش

در هر مقطع تاریخی، پیشرفت‌های فناوری چشم‌انداز جهان را دگرگون ساخته‌اند. در قرن بیستم، شهرهایی چون منچستر و لیورپول پیشگام انقلاب صنعتی نخست و نیویورک و لس‌آنجلس پیشرو انقلاب صنعتی دوم بودند. امروزه، تحول دیجیتال جایگاهی کلیدی در آینده حکمرانی شهری دارد. بطوری‌که جهانی‌شدن دیجیتال با اتکا به فناوری‌های نوینی همچون اینترنت، کلان‌داده و هوش مصنوعی، با شتابی بی‌سابقه در حال گسترش است (Deng et al., 2021). از جمله فناوری‌های مهم در این

حوزه، شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال است که با ایجاد نسخه‌ای دقیق و مجازی از شهر، امکان پایش، تحلیل و بهینه‌سازی لحظه‌ای فرآیند اجرای پروژه‌های شهری را فراهم می‌کند.

اولین مدل‌های شهری در دهه ۱۹۵۰ با ظهور رایانه‌ها شکل گرفتند، از جمله در سال ۱۹۵۵، مطالعه حمل‌ونقل منطقه‌ای شیکاگو^۲ یکی از موارد شاخص در این حوزه است. از آن زمان، مدل‌های متعددی برای حمایت از برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری شهری، به‌ویژه با تمرکز بر جنبه‌های اجتماعی، توسعه یافته‌اند (Ferré-Bigorra et al., 2022). مدل‌های سنتی شهری ایستا بودند، در حالی که دوقلوی دیجیتال شهری پویا و جامع است و امکان مدیریت بهینه منابع، تصمیم‌گیری بهتر و ارتقای کیفیت زندگی را فراهم می‌کند.

این مفهوم نخستین‌بار در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه میشیگان توسط پروفیسور گریوز، به‌عنوان مدلی برای مدیریت چرخه عمر محصول معرفی شد (Grieves & Vickers, 2016). دکتر مایکل گریوز مفهوم دوقلوی دیجیتال را به‌عنوان مدلی معرفی کرد که بر یکپارچگی مستمر میان فضای فیزیکی و مجازی و تبادل دائمی داده‌ها بین آن‌ها تأکید دارد؛ در این مدل، سیستم مجازی بازنمایی اطلاعاتی کاملی از همتهای فیزیکی خود است (Grieves, 2015). مفهوم دوقلوی دیجیتال در سال ۲۰۱۰ با استفاده ناسا از آن در حوزه تحلیل ساختار و پیش‌بینی چرخه عمر هواپیماها در اجرا مورد توجه قرار گرفت. ناسا این فناوری را به‌عنوان ابزاری برای بهبود و بازطراحی روش‌های پیش‌بینی و مدیریت عمر مفید سازه‌های فیزیکی تعریف کرد (Shafto et al., 2010 & Alvi et al., 2025). در سال ۲۰۱۲، تعریف دوقلوی دیجیتال به‌عنوان سیستمی یکپارچه توسعه یافت که داده‌ها و شبیه‌سازی‌ها را برای بازتاب دقیق چرخه عمر فیزیکی ترکیب می‌کند و ایمنی و قابلیت اطمینان را بهبود می‌بخشد (Wang et al., 2023). اگرچه نخستین کاربردهای دوقلوی دیجیتال در حوزه هوانوردی بود، اما به‌تدریج به حوزه‌های دیگر نیز راه یافت و برای کاربردهای گوناگون تطبیق داده شد.

باوجود پیشینه‌ای طولانی دوقلوی دیجیتال در صنایع مختلف، از سال ۲۰۱۶ به بعد توجه قابل‌توجهی در زمینه‌های شهری و جغرافیایی به این حوزه و کاربردهای آن جلب شد (Ketzier et al., 2020). به‌کارگیری گسترده حسگرها و تحلیل داده‌ها در شهرها، زمینه را برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری بهتر فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که فناوری شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال چه ظرفیتهایی برای تحول در مدیریت شهری دارد (Berntzen et al., 2016). در سال ۲۰۱۷، مفهوم دوقلوی دیجیتال وارد مدیریت شهری شد و نقطه عطفی در حوزه برنامه‌ریزی شهری و توسعه شهرهای هوشمند پدید آورد (Mohammadi & Taylor, 2017).

تعاریف دوقلوی دیجیتال بر این اصل استوارند که این مفهوم، بازنمایی دیجیتال دقیق و همزمان یک موجودیت یا سیستم زنده است که به‌صورت پویا تغییرات و رفتارهای نمونه واقعی را بازتاب می‌دهد. این فناوری امکان نظارت، تحلیل و پیش‌بینی عملکرد نمونه فیزیکی را فراهم کرده و به تصمیم‌گیری‌های بهتر کمک می‌کند (Julien & Martin, 2021). در پروژه‌های شهری، دوقلوی دیجیتال با پایش لحظه‌ای و تحلیل داده‌محور، بهره‌وری را افزایش، هزینه‌ها را کاهش و اجرای پروژه‌ها را تسریع و انعطاف‌پذیر می‌کند. مزایای برجسته استفاده از دوقلوهایی دیجیتال در شهرهای هوشمند، توجه گسترده‌ای را در میان پژوهشگران این حوزه به خود جلب کرده است. تاکنون، مقالات متعددی به بررسی روندهای نوظهور و پیشرفت‌های مرتبط با این فناوری پرداخته‌اند.

بخش عمده‌ای از پژوهش‌های پیشین به مرور نظام‌مند ادبیات، تبیین مفاهیم، ظرفیت‌ها، الزامات و چالش‌های دوقلوی دیجیتال شهری اختصاص یافته است. پژوهش‌های فریگورا و همکاران (Ferré-Bigorra et al., 2022)، وانگ و همکاران (Wang et al., 2023)، یعقوب و همکاران (Jeddoub et al., 2023)، آزادی و همکاران (Azadi et al., 2025) و علوی و همکاران (Alvi et al., 2025) در این دسته قرار می‌گیرند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در حوزه فناوری و مدل‌سازی رخ داده است، اما ابعاد مدیریتی، اجتماعی و اجرایی دوقلوی دیجیتال هنوز نیازمند پژوهش‌های عمیق‌تر است.

دسته دوم پژوهش‌ها بر نقش حکمرانی شهری، ظرفیت‌های نهادی، مشارکت ذی‌نفعان و فرآیند اجرای شهرهای هوشمند تمرکز دارند. این مطالعات نشان می‌دهند که موفقیت پروژه‌های شهر هوشمند بیش از آنکه وابسته به فناوری باشد، به کیفیت حکمرانی، هماهنگی بین نهادها، مشارکت شهروندان و ظرفیت سازمانی وابسته است. پژوهش‌های هان و همکاران (Han et al., 2023) و شروتتر و هورتسلر (Schrotter & Hürzeler, 2020) از مهم‌ترین مطالعات این حوزه محسوب می‌شوند.



دسته سوم شامل پژوهش‌هایی است که به کاربردها و تجارب اجرایی شهر هوشمند و دوقلوی دیجیتال شهری پرداخته‌اند. این مطالعات با ارائه نمونه‌های عملی، ظرفیت‌های دوقلوی دیجیتال را در برنامه‌ریزی، مدیریت و تصمیم‌گیری شهری ارزیابی کرده‌اند. در این زمینه، روهومکی و همکاران (Ruohomäki et al., 2018) نشان دادند که پلتفرم‌های شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال، مدل‌های سه‌بعدی را از ابزاری صرفاً برای تجسم به بستری برای تحلیل انرژی، ارزیابی ظرفیت خورشیدی و مشارکت شهروندان در مدیریت شهری تبدیل کرده‌اند. همچنین، ترنچر (Trencher, 2019) بر این نکته تأکید می‌کند که تحقق شهر هوشمند صرفاً به توسعه فناوری وابسته نیست، بلکه نیازمند توجه به سیاست‌گذاری اجتماعی، مشارکت شهروندان و پاسخگویی به نیازهای محلی است. از سوی دیگر، شاحات و همکاران (Shahat et al., 2021) نیز با معرفی دوقلوی دیجیتال شهر زوریخ، نقش این فناوری را در ارتقای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری شهری نشان داده‌اند.

برخی پژوهش‌ها تمرکز خود را بر زیرساخت‌های فناورانه دوقلوی دیجیتال، به‌ویژه یکپارچه‌سازی داده‌ها، معماری سامانه‌ها و اتصال داده‌های فیزیکی و دیجیتال قرار داده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که کیفیت عملکرد دوقلوی دیجیتال تا حد زیادی به نحوه مدیریت، همگام‌سازی و یکپارچه‌سازی داده‌ها وابسته است. پژوهش‌های یعقوب و همکاران (Jeddoub et al., 2023) و گریوز (Grieves, 2015) مهم‌ترین مطالعات این حوزه به شمار می‌روند.

بررسی پیشینه پژوهش حاکی از آن است که مطالعات پیشین عمدتاً بر ابعاد مفهومی دوقلوی دیجیتال، زیرساخت‌های فناورانه، نمونه‌های کاربردی و الزامات حکمرانی شهر هوشمند تمرکز داشته‌اند. با این حال، تاکنون پژوهشی که با اتکا به شاخص‌های استخراج‌شده از مبانی نظری، نقش شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال را در بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری به‌صورت جامع مورد تحلیل قرار دهد، کمتر انجام شده است. از این رو، پژوهش حاضر با تحلیل نظام‌مند مبانی نظری، ابتدا شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری را استخراج کرده و سپس ظرفیت‌ها و کارکردهای شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال را در تحقق این شاخص‌ها تبیین می‌کند.

۲- روش پژوهش

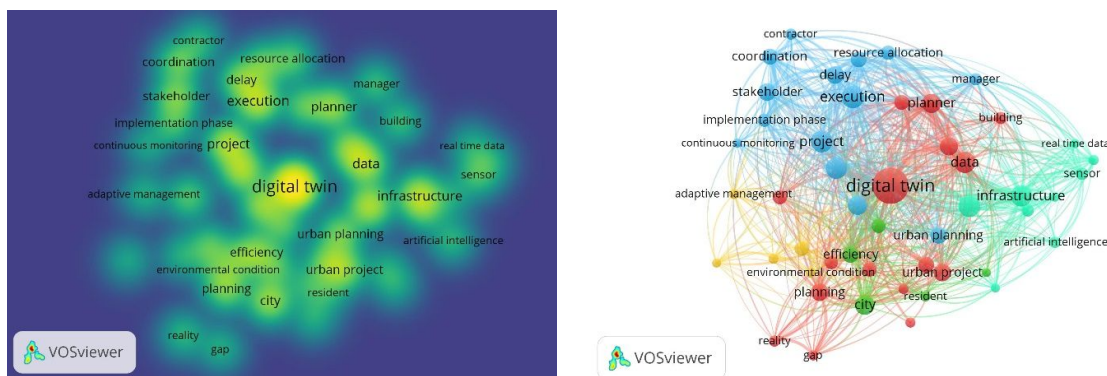
این پژوهش از نظر رویکرد، کیفی و از نظر پارادایم، تفسیری است؛ زیرا هدف آن تفسیر و تبیین نقش و ظرفیت‌های شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال در بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری، بر اساس بررسی و تحلیل دانش و تجارب موجود است. پژوهش با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی انجام شده و داده‌های مورد نیاز از طریق بررسی و تحلیل اسناد، مقالات علمی و مطالعات موردی مرتبط با دوقلوی دیجیتال شهری گردآوری شده‌اند. در این فرآیند، مفاهیم، قابلیت‌ها، کاربردها و ابعاد مختلف دوقلوی دیجیتال در اجرای پروژه‌های شهری استخراج و مورد تفسیر قرار گرفته‌اند. همچنین، به‌منظور تکمیل تحلیل کیفی و شناسایی ساختار دانش، روندهای پژوهشی و روابط میان مفاهیم، از تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer بهره گرفته شده است. فرآیند انجام پژوهش، چهار مرحله اصلی را دربرمی‌گیرد:

- شناسایی دوقلوهای دیجیتال شهری موجود از طریق جستجو و استخراج منابع کتاب‌شناختی مرتبط؛
- نحوه بهینه‌سازی اجرای پروژه‌ها و اقدامات شهری از طریق بررسی تجارب جهانی و اسناد موجود؛
- تحلیل و دسته‌بندی دوقلوهای دیجیتال شهری شناسایی‌شده با استخراج داده‌ها از منابع کتاب‌شناختی منتخب و بررسی جامع آن‌ها؛
- شناسایی میزان و نحوه کاربرد دوقلوی دیجیتال به‌مثابه ابزاری برای بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری در منابع موجود.

شناسایی دوقلوهای دیجیتال شهری موجود

برای شناسایی مفهوم و کاربرد دوقلوهای دیجیتال شهری، ابتدا یک جستجوی گسترده در منابع کتاب‌شناختی بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ (۱۰ سال اخیر) انجام شد و مقالات خارجی (انگلیسی) مرتبط از پایگاه‌های Scopus، Google Scholar، ScienceDirect و ResearchGate استخراج و بررسی گردید تا منابع نامرتب حذف شوند. در فرآیند مرور منابع، تمامی منابع با ارزش علمی پایین همچون مقالات کنفرانسی سطح پایین، گزارش‌های سازمانی و همچنین رساله‌های دانشجویی از دامنه بررسی کنار گذاشته شدند. از این رو، تنها مقالات ژورنالی و نیز مقالات کنفرانسی معتبر که یا نتایج مشخص و کاربردی ارائه کرده‌اند، یا نویسنده آن‌ها از صاحب‌نظران برجسته حوزه بوده است، در تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند. کلیدواژه‌های پژوهش

با استفاده از تحلیل هم‌واژگانی و شبکه‌ای در نرم‌افزار VOSviewer انتخاب شدند، به‌طوری که پرتکرارترین و اثرگذارترین مفاهیم شناسایی شوند. در این تحلیل، شبکه هم‌ظهوری واژگان تعریف شد، واژگان کم‌اهمیت حذف و وزن واژگان بر اساس شمارش کامل و با نرمال‌سازی Association Strength محاسبه شد. یک فایل واژه‌نامه اصلاح‌شده نیز برای یکپارچه‌سازی مترادف‌ها و حذف واژگان عمومی به نرم‌افزار وارد شد. جزئیات دقیق پارامترهای تحلیل در پیوست ارائه شده است. مطابق تصویر ۱، تحلیل خوشه‌بندی نشان می‌دهد که مفهوم دوقلوی دیجیتال در مرکز شبکه قرار دارد و به پنج خوشه اصلی متصل است که هر یک بر ابعاد مدیریتی، فناوری، محیطی، شهر و پایداری تمرکز دارند و ارتباط نزدیک میان آن‌ها نشان می‌دهد که دوقلوی دیجیتال به‌عنوان حلقه اتصال، این ابعاد را در جهت بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری یکپارچه می‌کند.



تصویر ۱- نقشه خوشه‌بندی واژگان کلیدی مرتبط با شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال (نرم افزار VOSviewer)

حاصل جستجو در این پایگاه داده‌ها، بیش از ۵۰۰ مقاله داوری‌شده درباره دوقلوی دیجیتال شهری بود که ۱۶۳ مورد از آن‌ها بر برنامه‌ریزی شهری و اجرای این فناوری تمرکز دارند. با این حال، از میان این ۱۶۳ مقاله، ۵۱ مقاله مروری‌اند و هیچ‌یک به‌طور مستقیم به پرسش‌های مهمی مانند نحوه و میزان تاثیر شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال بر بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری، دلایل تحقق این اهداف، علت ناکارآمدی و راهکارهای تحقق ایده‌های نظری مرتبط با این موضوع نمی‌پردازند. بنابراین، ۱۱۲ مقاله را می‌توان مرتبط با این حوزه دانست؛ حوزه‌ای که مبانی آن همچنان در حال توسعه است. پارامترهای به‌کار رفته در تحلیل نرم‌افزار VOSviewer، به‌طور خلاصه در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱- خلاصه پارامترهای به‌کاررفته در تحلیل

پارامتر	مقدار استفاده شده
نوع شبکه	Co-occurrence (All keywords)
حداقل تعداد ظهور	5
روش شمارش	Full counting
روش نرمال‌سازی	Association strength
واژه‌نامه	فایل thesaurus اصلاح‌شده شامل مرچ‌ها و stop-words

در این بخش، یافته‌های پژوهش بر اساس تحلیل تجارب جهانی، اسناد موجود و داده‌های استخراج‌شده از منابع علمی ارائه می‌شود. هدف، بررسی نقش دوقلوی دیجیتال شهری در بهینه‌سازی اجرای پروژه‌ها، شناسایی سطوح مختلف کاربرد آن و تبیین ظرفیت‌ها و محدودیت‌های این فناوری در فرآیندهای اجرایی شهری است.

نحوه بهینه‌سازی اجرای پروژه‌ها و اقدامات شهری از طریق بررسی تجارب جهانی و اسناد موجود

در این بخش، برای بررسی ابعاد کاربردی دوقلوی دیجیتال در مدیریت و اجرای پروژه‌های شهری، مجموعه‌ای از تجارب بین‌المللی و اسناد معتبر مورد مطالعه قرار گرفتند. نمونه‌های انتخاب‌شده شامل پروژه‌هایی هستند که به‌طور عملیاتی از دوقلوی دیجیتال در سطوح مختلف شهری بهره گرفته‌اند. در نهایت کاربرد اجرایی، وضعیت اجرا و سطح دوقلوی دیجیتال به‌کار رفته در هر تجربه، جمع‌بندی شد. برای سنجش شاخص‌های کلیدی عملکرد^۴ هر تجربه، از نمودار شبکه استفاده می‌کنیم. نمودار شبکه ابزاری تصویری برای مقایسه همزمان چند شاخص است. هر محور نمودار نمایانگر یک شاخص است و مقدار هر شاخص با



فاصله نقطه از مرکز مشخص می‌شود؛ هرچه مقدار شاخص بیشتر باشد، نقطه مربوطه از مرکز دورتر قرار می‌گیرد. اتصال نقاط روی محورهای مختلف مساحتی ایجاد می‌کند که عملکرد کلی مجموعه شاخص‌ها را نشان می‌دهد و امکان مشاهده همزمان نقاط قوت و ضعف در شاخص‌های مختلف را فراهم می‌سازد. در این بخش، هر تجربه بر اساس منابع و مقالات به پنج شاخص کلیدی عملکرد ارزیابی شده است. برای هر شاخص، امتیاز عددی بین ۱ تا ۱۰ اختصاص یافته است، به طوری که عدد ۱۰ نشان‌دهنده بالاترین سطح عملکرد است. شاخص‌ها شامل زمان، هزینه، کیفیت اجرا، پایداری، مشارکت و مدیریت هستند. این امتیازها در نمودار شبکه نمایش داده می‌شوند و مساحت ایجادشده در نمودار، عملکرد کلی تجربه را نشان می‌دهد. با مقایسه مساحت‌ها، می‌توان رتبه موفقیت اجرای تجارب مختلف را در سطح بین‌المللی مشخص کرد. جدول امتیازدهی شاخص کلیدی عملکرد در هر تجربه در پیوست آمده است.

تحلیل و دسته‌بندی دوقلوهای دیجیتال شهری

در این مرحله، داده‌های به‌دست‌آمده از شناسایی دوقلوهای دیجیتال شهری و همچنین تجارب مرتبط با نحوه بهینه‌سازی اجرای پروژه‌ها و اقدامات شهری، با رویکرد تحلیل محتوای کیفی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این تحلیل، دسته‌بندی فناوری دوقلوی دیجیتال بر اساس ابعاد کاربردی و ارزیابی میزان اثرگذاری هر دسته در بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی بود. نتایج این بررسی نشان داد که هرچه حرکت از مدل‌های سب‌بعدی ایستا به سمت دوقلوهای دیجیتال پویا و تعاملی بیشتر می‌شود، سطح کارایی و اثربخشی در اجرای پروژه‌های شهری به شکل محسوسی افزایش می‌یابد. با این حال، هم‌زمان با ارتقای سطح بلوغ این فناوری، پیچیدگی‌های فنی و چالش‌های مربوط به پیاده‌سازی زیرساخت‌های موردنیاز آن نیز افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، به‌کارگیری دوقلوهای دیجیتال پیشرفته‌تر مستلزم سرمایه‌گذاری بیشتر در حوزه‌های فناوریانه، زیرساخت داده‌ای و مدیریت بین‌بخشی است. از این‌رو، در این مرحله اهمیت توجه به تجارب موفق جهانی و همچنین در نظر گرفتن شرایط بومی و زمینه‌ای هر شهر دوچندان می‌شود؛ چرا که این تجارب می‌توانند مسیر مناسبی برای کاهش ریسک‌ها، شناسایی فرصت‌ها و انتخاب سطح مناسب از دوقلوی دیجیتال برای اجرای پروژه‌های شهری در هر بستر خاص فراهم سازند.

کاربرد شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال در بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری

در مرحله نهایی، از طریق تحلیل محتوای کیفی مبانی نظری و تجارب عملیاتی موجود، میزان و نحوه کاربرد دوقلوی دیجیتال به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری در سطوح مختلف شناسایی شد. داده‌ها و اطلاعات استخراج‌شده از منابع کتاب‌شناختی و تجارب بین‌المللی مورد بررسی قرار گرفتند تا مشخص شود هر دسته از دوقلوهای دیجیتال چگونه و تا چه اندازه می‌تواند کارایی، زمان‌بندی و هماهنگی اجرای پروژه‌ها را بهبود بخشد. همچنین چالش‌ها و محدودیت‌های موجود، شامل پیچیدگی‌های فنی، نیاز به زیرساخت داده‌ای و هماهنگی بین‌بخشی، شناسایی شد تا تصویر جامعی از توانمندی‌ها و محدودیت‌های دوقلوهای دیجیتال در بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری ارائه شود.

۳- مبانی نظری

این بخش ابتدا به تبیین مفاهیم و مبانی پایه مرتبط با پژوهش، از جمله شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال و نقش آن در فرآیند اجرای پروژه‌های شهری می‌پردازد. سپس با بررسی ظرفیت‌ها و سازوکارهای اثرگذاری این فناوری در بهبود عملکرد اجرایی، چارچوبی برای ارزیابی تجارب جهانی ارائه می‌شود. در این راستا، با تحلیل ادبیات نظری و مطالعات موردی موجود، شاخص‌های کلیدی موثر در ارزیابی و بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری استخراج شده و وضعیت تحقق هر یک از این شاخص‌ها در تجارب منتخب جهانی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال

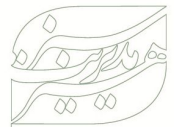
در دهه‌های اخیر، فناوری‌های نوین با ایجاد فرصت‌ها و چالش‌های ناشی از صنعتی‌شدن و رشد جمعیت در کلان‌شهرها، زمینه‌ساز شکل‌گیری مفهوم «شهر هوشمند» به‌عنوان الگوی آینده زندگی شهری شده‌اند (Garg & Sharma, 2023). شهرهای هوشمند شهرهایی هستند که با بهره‌گیری از فناوری اطلاعات و ارتباطات^۵ در مدیریت شهری، از شیوه‌های سنتی به رویکردهای دیجیتال گذار می‌کنند تا در ارائه خدمات و اداره شهر به کارایی بیشتری دست یابند. از این منظر، شهر هوشمند با محوریت رفاه اجتماعی را می‌توان شهری دانست که هدف نهایی آن ارتقای کیفیت زندگی شهروندان از طریق تحول دیجیتال است (Bringas, 2024).

در شهرهای هوشمند، هم‌افزایی میان فناوری‌های دیجیتال و جامعه نقشی اساسی در تحقق توسعه پایدار و ایجاد ارزش‌های شهروندمحور ایفا می‌کند (Bai et al., 2025). در جریان این تحول دیجیتال، دوقلوی دیجیتال به‌عنوان رویکردی اجتناب‌ناپذیر، امکان نظارت لحظه‌ای و از راه دور را برای شهرها فراهم کرده و زمینه تصمیم‌گیری‌های کارآمدتر را مهیا می‌سازد. گسترش استفاده از ابزارهای دیجیتال در عصر فناوری، تعریف تازه‌ای از مناطق شهری و شیوه مدیریت آن‌ها ارائه داده است (Kiviahio & Einolander, 2023). در این راستا، شهرهای هوشمند و دوقلوهایی دیجیتال شهری، در چند دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (Trencher, 2019). همگرایی دوقلوی دیجیتال با مفهوم شهر هوشمند، بر پایه اصول بنیادین خود، به یکپارچه‌سازی سامانه‌های فیزیکی و مجازی انجامیده و امکان پایش، تحلیل، اجرا و کنترل کارآمدتر را فراهم می‌سازد. تفاوت این دو به‌طور مجزا این است که برخلاف ماهیت ایستا و سنتی شهرهای هوشمند و همسو با تحلیل داده‌های زمان واقعی (Tan & Taeihagh, 2020)، دوقلوهایی دیجیتال شهری یک قدم جلوتر هستند. آن‌ها سناریوهای مجازی پویا از منظره شهری موجود ایجاد می‌کنند تا توسعه و عملکرد شهرها را با رویکردهای مبتنی بر داده شبیه‌سازی کنند (Bolton et al., 2018). این بازنمایی‌های مجازی ویژگی‌های کلیدی مدل‌سازی شهری مانند مقیاس‌پذیری، پیش‌بینی‌پذیری، یکپارچگی، همکاری و دسترسی‌پذیری را ارائه می‌دهند (Castelli et al., 2019).

دوقلوهایی دیجیتال این امکان را برای برنامه‌ریزان و مدیران شهری فراهم می‌کنند تا نسخه‌های دیجیتال دقیق و بلادرنگی از محیط شهری ایجاد کنند؛ به‌گونه‌ای که بتوانند سناریوهای مختلف را آزمایش، عملیات را بهینه‌سازی و تأثیر تغییرات را پیش‌بینی کنند، بدون آن‌که زیرساخت‌های واقعی دستخوش تغییر شوند (Mohammadi & Taylor, 2017). براساس دایره‌المعارف مهندسی تولید، دوقلوی دیجیتال بازنمایی دیجیتال بلادرنگ یک شیء فیزیکی است که از راه دور به آن متصل بوده و می‌تواند شامل محصول، دستگاه، زیرساخت یا حتی سیستم‌های ترکیبی باشد (Attaran & Gokhan Celik, 2023). دوقلوهایی دیجیتال شهری نه تنها می‌توانند بعد فیزیکی شهر را بازنمایی و شبیه‌سازی کنند، بلکه می‌توانند بر ابعاد اجتماعی و اقتصادی نیز متمرکز باشند (Ferré-Bigorra et al., 2022). بنابراین، شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال، کاربرد خود را در مدیریت شهری با شبیه‌سازی پویا و یکپارچه نشان می‌دهد و به برنامه‌ریزان امکان بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری را می‌دهد.

اخیراً کمیته فنی مشترک سازمان بین‌المللی استانداردسازی^۷ و کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک^۸، استاندارد جدیدی با عنوان با موضوع "دوقلوی دیجیتال - مفاهیم و اصطلاحات"^۹ منتشر کرده است. در این استاندارد، سیستم دوقلوی دیجیتال به‌عنوان یک نهاد ترکیبی یا سیستم سیستم‌ها^{۱۰} معرفی شده است که شامل بخش فیزیکی، بخش دیجیتال و ارتباط بین این دو می‌باشد که این سه بخش، عناصر اصلی ساختار مفهومی دوقلوی دیجیتال را شکل می‌دهند. علاوه بر ساختار مفهومی، استاندارد مذکور، عناصر خدمات (تحلیل، شبیه‌سازی، مصورسازی، بهینه‌سازی و ...)، زیرساخت (مانند حسگرها، شبکه، سامانه اطلاعات جغرافیایی و ...) و ابعاد سیستمی (شامل یکپارچگی، حکمرانی، امنیت، حریم خصوصی، اخلاق داده و ...) را نیز جهت ارائه ساختار فنی سیستم دوقلوی دیجیتال معرفی می‌کند (Abdelrahman et al., 2025).

پژوهش‌های گسترده‌ای به‌منظور دستیابی به دوقلوی دیجیتال صورت گرفته است. بطورمثال آنجلیدو (۲۰۱۷) طرح‌های شهر هوشمند ۱۵ شهر بزرگ جهان را بررسی کرد و به هماهنگی‌های بالا به پایین و اقدامات آن‌ها اشاره کرد. شهر نیویورک استراتژی‌ای برای تبدیل شدن به «دیجیتال‌ترین شهر جهان» تدوین کرد که چهار محور اصلی داشت: دسترسی، دولت باز، مشارکت و صنعت. سان‌فرانسیسکو هدف بلندپروازانه‌ای برای رسیدن به وضعیت «بدون پسماند» تا سال ۲۰۲۰ تعیین کرده بود و با استفاده از سازوکارهای حمایتی شهر هوشمند از شرکت‌های فعال در حوزه فناوری پاک و نوآوری حمایت می‌کرد. دولت بریتانیا طرح «لندن هوشمند» را پیشنهاد داد که هدف آن استفاده از قدرت خلاقانه فناوری‌های نوین برای خدمت به شهر لندن و بهبود زندگی شهروندان آن بود. سنگاپور از سال ۲۰۱۵ طرح «ملت هوشمند سنگاپور» را آغاز کرد و به‌طور منحصربه‌فردی خود را به‌عنوان یک ملت هوشمند معرفی کرد (Deng et al., 2021). همچنین راه‌های متنوع دیگری نیز برای استفاده از دوقلوهایی دیجیتال شهری وجود دارد. در سئول، این فناوری با ترکیب فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند واقعیت مجازی نقش مهمی در گردشگری شهری ایفا می‌کند. همچنین در سنگاپور، از آن به منظور پلتفرمی برای انواع اقتصاد اشتراکی استفاده می‌شود (Yang & Kim, 2021). این‌ها نمونه‌هایی از تلاش‌های جهانی برای استفاده از فناوری‌های نوین در توسعه شهرهای هوشمند و بهره‌گیری از دوقلوی دیجیتال شهری هستند. دیجیتالی‌شدن روندی جهانی و گریزناپذیر است که



تمامی شهرها را دربرمی‌گیرد. توجه به این روند، زمینه بهره‌گیری سریع‌تر از مزایا و توسعه دوقلوی دیجیتال دقیق‌تر و کارآمدتر را فراهم می‌سازد.

۳-۲- کاربردهای شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال

استفاده از دوقلوهای دیجیتال می‌تواند هزینه، زمان و منابع نمونه‌سازی را کاهش دهد، زیرا آزمایش‌ها می‌توانند روی نمونه مجازی انجام شوند بدون آنکه عملیات واقعی تحت تأثیر قرار گیرد (Sharma et al., 2020). شرکت گارتنر دوقلوهای دیجیتال را در فهرست ۱۰ روند فناوری برتر سال ۲۰۱۷ قرار داد (Attaran & Gokhan Celik, 2023). همچنین طبق نظرسنجی در سال ۲۰۱۹، این فناوری به سرعت در حال تبدیل شدن به یک استاندارد در سازمان‌هاست. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۷، بیش از ۴۰ درصد شرکت‌های بزرگ جهانی، پروژه‌هایی با استفاده از این فناوری را اجرا کنند تا درآمد خود را افزایش دهند. علاوه بر این، نزدیک به ۶۰ درصد مدیران در صنایع مختلف اعلام کرده‌اند که قصد دارند تا سال ۲۰۲۸ دوقلوی دیجیتال را در فرآیند اجرایی خود به کار گیرند (Attaran & Gokhan Celik, 2023). بنابراین کاربردهای اجرایی کلان دوقلوی دیجیتال در تصویر ۲ به صورت مشخص در صنایع مختلف، مشخص شده است.



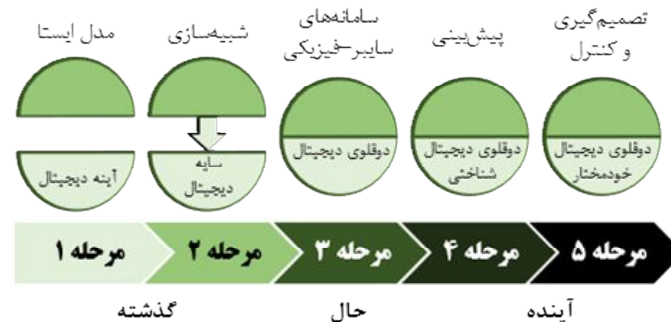
تصویر ۲- کاربرد اجرایی دوقلوی دیجیتال در صنایع مختلف (Attaran & Gokhan Celik, 2023)

موارد ذکرشده، نمونه‌هایی از به‌کارگیری دوقلوی دیجیتال در طیف گسترده‌ای از حوزه‌های علمی و صنعتی به‌شمار می‌روند. با این حال، فرآیند انتقال مفهوم دوقلوی دیجیتال از صنایع دیگر به شهرسازی و محیط شهری به‌سادگی انجام نمی‌شود، چرا که پیچیدگی‌ها و گستردگی‌های فضایی و زمانی در مقیاس شهری بسیار زیاد است (Jeddoub et al., 2023). یکی از مهم‌ترین مزایای دوقلوی دیجیتال شهری، تقویت تعامل و هماهنگی میان کنشگران شهری است. علاوه بر این، در مدیریت زیرساخت‌ها با هم‌زمان‌سازی عملیات، در حمل‌ونقل با شبیه‌سازی ترافیک، در مدیریت بحران با پیش‌بینی سناریوهای اضطراری و... نقش‌آفرینی می‌کند. همه این موارد در نهایت منجر به بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری می‌شوند.

۳-۳- طبقه‌بندی‌های دوقلوی دیجیتال شهر هوشمند

در دو دهه گذشته، برای محدود کردن دامنه دوقلوهای دیجیتال شهری به حوزه داده‌های مکانی و رشته شهرسازی، مهندسی و ساخت، پیچیدگی‌های این نوع شهرها با مدل‌های سه‌بعدی شهری، مدل‌های اطلاعات ساختمان، مدل‌های مجازی شهر و اخیراً مدل‌های اطلاعات شهری مواجه شده‌ایم (Jeddoub et al., 2023). کاربردهای دوقلوی دیجیتال شهری بر اساس مقیاس فضایی به چهار سطح تقسیم می‌شوند. در سطح ساختمان که شبیه‌سازی‌های مرتبط با ساختمان‌ها با استفاده از داده‌های مدل‌های اطلاعات ساختمان انجام می‌شود. در سطح خیابان؛ کاربردها بیشتر به مسائل حمل‌ونقل و بهبود شبکه‌های خیابانی می‌پردازند، مانند پیش‌بینی ریسک تصادفات. در مقیاس محله؛ تحلیل‌های محلی مثل پدیده جزیره حرارتی یا پیش‌بینی

جرم انجام می‌شود. در نهایت، در مقیاس کل شهر؛ داده‌ها برای کل شهر جمع‌آوری شده و تحلیل‌هایی مانند تغییرات کاربری زمین، فضاهای سبز و شبکه‌های انرژی هوشمند صورت می‌گیرد (Yang & Kim, 2021). بطور کلی فرآیند تکامل و بلوغ دوقلوی دیجیتال در تصویر ۳ مشخص شده است.



تصویر ۳- فرآیند تکامل و بلوغ دوقلوی دیجیتال (Julien & Martin, 2021)

همچنین براساس میزان تعامل با دنیای واقعی، سطح پیچیدگی تحلیل و توانمندی در پاسخ‌گویی به تغییرات محیطی، این دوقلوها را می‌توان در یک طیف تکاملی جای داد. براساس این طبقه‌بندی محتوایی، دوقلوی دیجیتال به چهار دسته متمایز تقسیم می‌شود: دوقلوهایی غیرفعال^۱، پیش‌بینی کننده^۲، برنامه‌پذیر^۳ و خودکار^۴ (Alvi et al., 2025). دوقلوهایی دیجیتال از سطح غیرفعال که تنها نمایشگر داده‌های لحظه‌ای هستند، به سطح پیش‌بینی کننده با قابلیت مدل‌سازی آینده و سناریوسازی می‌رسند. سپس در قالب دوقلوهایی برنامه‌پذیر می‌توانند پیشنهاد مداخله داده و حتی اجرای آن را برعهده گیرند. در پیشرفته‌ترین حالت، دوقلوهایی خودمختار با اتکا به یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، به‌طور مستقل تصمیم‌گیری و مدیریت هوشمند شهر را اجرا می‌کنند. هر یک از این سطوح دوقلوی دیجیتال، با وجود تفاوت در میزان پیچیدگی و قابلیت‌ها، می‌توانند نقشی در بهینه‌سازی اجرا ایفا کنند. در تصویر ۴، دوقلوی دیجیتال از دو بعد مقیاس و عملکرد طبقه‌بندی شده است.



تصویر ۴- دسته‌بندی شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال (برگرفته از مقاله (Alvi et al., 2025))

۳-۴- اجرای بهینه پروژه‌های شهری

با بهره‌گیری از فناوری‌های شهر هوشمند، از جمله دوقلوهایی دیجیتال پویا، شهرها می‌توانند طراحی و برنامه‌ریزی متابولیسم شهری را بهبود بخشیده و امکان شبیه‌سازی راهکارهای جایگزین در محیط مجازی قبل از اجرای نهایی را فراهم کنند (Hämäläinen, 2021). شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال، مدل‌های پیشرفته‌ای هستند که با تحلیل داده‌ها، شبیه‌سازی و پیش‌بینی وضعیت شهری، تصمیم‌گیری و اجرای برنامه‌ها را بهینه می‌کنند (Jeddoub et al., 2023). دوقلوی دیجیتال با مقایسه مستمر داده‌های واقعی و مدل طراحی‌شده، امکان شناسایی سریع مغایرت‌ها و اصلاح به‌موقع فرایندها را فراهم می‌کند؛ در نتیجه، حلقه‌ی بازخورد میان طراحی و اجرا به‌طور موثری تنگ‌تر و کارآمدتر می‌شود (Grieves, 2015). با



این حال، شهر هوشمند، به‌عنوان «فرآیند پویا از تعامل مداوم میان کنش‌ها، ارزش‌ها و محیط فیزیکی»، در اجرا پیچیده و متنوع است (Han et al., 2023).

مفهوم دوقلوهای دیجیتال جدید نیست، اما در سال‌های اخیر این فناوری با سرعت بسیار بیشتری از ایده به اجرا درآمده است. دوقلو دیجیتال با نظارت و کنترل دقیق فرآیندها در شرایط مختلف، مشکلات را پیش از وقوع شناسایی و برطرف می‌کند و سازمان را از رویکرد واکنشی به پیش‌بینی‌کننده و پیشگیرانه می‌برد. علاوه بر بهینه‌سازی اجرای فرآیندها، این فناوری هزینه‌ها را کاهش داده و سرعت نوآوری را افزایش می‌دهد (Attaran & Gokhan Celik, 2023).

در صورتی که دوقلوهای دیجیتال شهری به شکل صحیح و کامل پیاده‌سازی شوند، می‌توانند برای کنشگران مختلف و نهادهای فعال در شهر، فواید قابل توجهی به همراه داشته باشند (Ferré-Bigorra et al., 2022). دوقلو دیجیتال با تسهیل دسترسی به اطلاعات، امکان همکاری بلادرنگ و واکنش سریع به تغییرات شهر و نیازهای شهروندان را فراهم می‌آورد. بدین ترتیب، متخصصان (مثل مدیران یا پژوهشگران) و کاربران عادی (مثل شهروندان یا گردشگران) می‌توانند با توجه به داده‌های لحظه‌ای، راهکارهای مناسب را اتخاذ و تغییرات لازم را بدون وقفه در برنامه‌های اجرایی اعمال کنند. این ویژگی، انعطاف‌پذیری و پاسخ‌گویی مدیریت شهری و مشارکت شهروندان در برنامه‌ریزی شهری را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌بخشد و باعث همسویی بیشتر برنامه‌ها با واقعیت‌های پویا و پیچیده زندگی شهری می‌شود (White et al., 2021).

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی اجرا یکی از مهم‌ترین کاربردهای دوقلو دیجیتال در مدیریت هوشمند شهری به شمار می‌آید. این بهینه‌سازی را می‌توان در سه مرحله‌ی اصلی دسته‌بندی کرد: پیش از اجرا، حین اجرا و پس از اجرا. مرحله پیش از اجرا اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا با شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوها می‌توان مسیر بهینه را انتخاب و هزینه، ریسک و موفقیت پروژه را مدیریت کرد. بدین منظور شاخص‌های کلیدی عملکرد دوقلو دیجیتال در شهرها بررسی می‌شوند.

شاخص‌های کلیدی عملکرد معیارهایی هستند که برای سنجش اثربخشی و موفقیت راهکارهای برنامه‌ریزی و طراحی شهری به کار می‌روند و باید با اهداف و استراتژی‌های مورد مطالعه شهری هم‌راستا باشند (Ammouriova et al., 2024). بدین ترتیب، براساس مطالعات انجام‌شده در حوزه بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری با استفاده از دوقلو دیجیتال، مجموعه‌ای از حوزه‌های اصلی برای ارزیابی عملکرد تعریف شده است. با این حال، باید توجه داشت که به دلیل محدودیت‌های موجود در گردآوری داده‌ها و امکان‌سنجی سنجش در نمونه‌های مورد مطالعه، همه شاخص‌های پیشنهادی در ادبیات قابل کاربرد نیستند. از این رو، در این پژوهش تنها به شاخص‌های کلیدی عملکردی پرداخته می‌شود که هم قابلیت سنجش در بستر واقعی پروژه‌ها را دارند و هم در سطحی کلی، تصویری روشن از میزان بهینگی اجرای پروژه‌های شهری ارائه می‌کنند. این حوزه‌ها شامل زمان (رعایت برنامه‌زمان‌بندی)، هزینه (کنترل بودجه و صرف منابع)، کیفیت اجرا (رعایت استانداردها و الزامات فنی)، پایداری محیطی (تأثیر پروژه بر محیط زیست)، مشارکت کنشگران (درگیری و همکاری جامعه و مدیران) و تصمیم‌گیری و مدیریت (کارایی برنامه‌ریزی و نظارت) می‌شوند.

جدول ۲- ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه‌ها مبتنی بر خط مبنا

حوزه	شاخص کلیدی عملکرد	خط مبنا	منطق مقایسه	منابع پشتیبان شاخص
زمان	مدت زمان تکمیل پروژه (ماه)	میانگین مدت اجرای پروژه‌های مشابه بدون دوقلو دیجیتال	مقایسه کاهش/افزایش زمان اجرا	Attaran & Gokhan Celik, 2023; Bryde et al., 2013; Bosch-Sijtsema et al., 2019
هزینه	هزینه نهایی پروژه به ازای هر واحد (مثلاً هر مترمربع یا هر ایستگاه)	داده‌های پروژه‌های سنتی مشابه	مقایسه صرفه‌جویی یا افزایش هزینه‌ها	Bryde et al., 2013; Love et al., 2014; Boje et al., 2020
کیفیت اجرا	درصد خطاهای اجرایی (خطاهای طراحی، تأخیرها، دوباره‌کاری‌ها)	گزارش خطاها در پروژه‌های سنتی	ارزیابی کاهش خطا و دوباره‌کاری	Jeddoub et al., 2023; Love et al., 2014; Sacks et al., 2020
پایداری محیطی	مصرف انرژی یا مصالح به ازای هر مترمربع	پروژه‌های مشابه بدون استفاده از دوقلو دیجیتال	مقایسه میزان مصرف منابع و انرژی یا آلودگی	Alvi et al., 2025; Fuller et al., 2020; Batty, 2018; Boje et al., 2020
مشارکت کنشگران	میزان مشارکت شهروندان/سازمان‌ها (تعداد جلسات یا درصد مشارکت)	مشارکت در پروژه‌های سنتی	مقایسه ارتقای شفافیت و تعامل	White et al., 2021; Albino et al., 2015; Schuurman et al., 2012; Kitchin, 2014
تصمیم‌گیری	سرعت و کیفیت تصمیم‌گیری (زمان)	روش‌های سنتی مدیریت پروژه	مقایسه بهبود کارآمدی و	Ferré-Bigorra et al., 2022; Fuller et al., 2020; Batty,

و مدیریت	واکنش به تغییرات یا بحران‌ها)	انعطاف‌پذیری	2018 White et al., 2021
----------	-------------------------------	--------------	-------------------------

۳-۵- تجربیات جهانی در پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال شهری

در این بخش، تجارب شاخص جهانی در زمینه به‌کارگیری شهرهای هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال با هدف تحلیل نقش این فناوری در بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. انتخاب این نمونه‌ها به‌صورت هدفمند و بر اساس چهار معیار اصلی انجام شده است: (۱) تنوع جغرافیایی به‌منظور پوشش تجربه کشورهای مختلف، (۲) تنوع حوزه‌های کاربردی شامل برنامه‌ریزی شهری، مدیریت زیرساخت، حمل‌ونقل، انرژی، محیط‌زیست و مدیریت بنادر، (۳) تفاوت در سطح بلوغ و پیچیدگی دوقلوی دیجیتال از نمونه‌های اولیه تا سامانه‌های پیشرفته و خودکار و (۴) برخورداری از مستندات علمی و گزارش‌های معتبر که امکان تحلیل و مقایسه را فراهم می‌کنند. این تنوع سبب شده است ظرفیت‌ها و کارکردهای دوقلوی دیجیتال در شرایط و مقیاس‌های مختلف شهری به‌صورت جامع ارزیابی شود.

جدول ۳ مشخصات نمونه‌های منتخب و دلایل انتخاب آن‌ها را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها به دلیل برخورداری از تجربه عملی در پیاده‌سازی دوقلوی دیجیتال و ارائه شواهد قابل استناد درباره تاثیر این فناوری بر شاخص‌هایی مانند زمان، هزینه، کیفیت اجرا، پایداری محیطی، مشارکت ذی‌نفعان و مدیریت پروژه، برای تحلیل تطبیقی انتخاب شده‌اند.

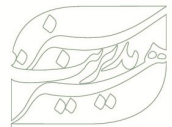
جدول ۳ - مشخصات نمونه‌های منتخب

نمونه	کشور	حوزه شاخص کاربرد	سطح دوقلوی دیجیتال	دلیل انتخاب
دوقلوهای دیجیتال شهری اروپا	اتحادیه اروپا	برنامه‌ریزی شهری و سیاست‌گذاری	برنامه‌پذیر	یکی از مهم‌ترین پروژه‌های تحقیقاتی اروپا در توسعه دوقلوهای دیجیتال شهری
سنگاپور مجازی	سنگاپور	برنامه‌ریزی شهری، حمل‌ونقل و محیط‌زیست	برنامه‌پذیر	نخستین نمونه ملی و یکی از موفق‌ترین تجارب عملیاتی در مقیاس شهر
دوبلین	ایرلند	انرژی، اقلیم و زیرساخت شهری	برنامه‌پذیر	نمونه‌ای از به‌کارگیری دوقلوی دیجیتال برای تاب‌آوری و مدیریت شهری
روتردام	هلند	مدیریت بندر و زیرساخت‌های هوشمند	برنامه‌پذیر	نمونه موفق استفاده از دوقلوی دیجیتال در مدیریت زیرساخت‌های حیاتی
هلسینکی	فنلاند	برنامه‌ریزی شهری و مشارکت شهروندان	پیش‌بین	یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های سده‌ی شهری در اروپا
شیونگ‌آن	چین	مدیریت یکپارچه شهر جدید	برنامه‌پذیر	نمونه شاخص توسعه شهر مبتنی بر دوقلوی دیجیتال از ابتدای طراحی
بوستون	آمریکا	شبکه‌های G6 و واقعیت توسعه‌یافته	برنامه‌پذیر	نمایش کاربردهای نوظهور دوقلوی دیجیتال در زیرساخت‌های ارتباطی
هانگژو	چین	مدیریت هوشمند ترافیک و خدمات شهری	خودکار	نمونه پیشرو در استفاده از هوش مصنوعی و خودکارسازی مدیریت شهری
زوریخ	سوئیس	تحلیل‌های محیطی و برنامه‌ریزی شهری	برنامه‌پذیر	نمونه شاخص کاربرد دوقلوی دیجیتال در تحلیل‌های محیطی و تصمیم‌گیری شهری

در این بخش، تجربیات جهانی پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال شهری مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تاثیر این فناوری نوین بر بهبود و تسریع اجرای پروژه‌های شهری به‌طور دقیق تحلیل شود. هدف، شناخت نقش کلیدی دوقلوهای دیجیتال در افزایش کارایی، هماهنگی و مدیریت هوشمند پروژه‌های شهری در شهرهای مختلف جهان است.

دوقلوهای دیجیتال شهری اروپا^{۱۵}

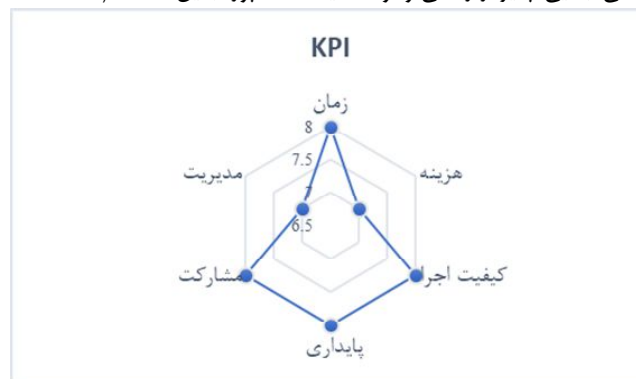
این پروژه تحقیقاتی که با تکیه بر ظرفیت‌های رایانش ابری و پردازش پیشرفته طراحی شده، به دنبال دگرگونی چرخه سنتی سیاست‌گذاری شهری بر پایه داده‌های باز است. در این چارچوب، محیطی سده‌ی و شبیه‌سازی شده فراهم می‌شود تا مدیران و برنامه‌ریزان شهری بتوانند ایده‌های خود را آزمایش کنند، به رخدادهای واقعی به‌سرعت واکنش نشان دهند و تصمیمات بلندمدت را بر مبنای داده اتخاذ نمایند. هدف نهایی این پروژه، توسعه پلتفرمی داده‌محور در قالب خدمت^{۱۶} است که قابلیت استفاده در شهرهای مختلف اروپا را داشته و زمینه‌ساز ارتقای مدیریت منابع، تقویت توسعه اقتصادی، بهبود پایداری



زیست‌محیطی و افزایش کیفیت زندگی شهروندان گردد (Horizon, 2023). این پلتفرم چندلایه‌ای با بخش‌های مدیریت داده، خدمات سیستم، امنیت و رابط کاربری، عملکرد ایمن، کارآمد و تعامل‌پذیر را فراهم می‌کند. پروژه دوقلوهای دیجیتال شهری اروپا با این ویژگی‌ها نمونه تحقیقاتی موفق از کاربرد دوقلوهای دیجیتال در ارتقای کیفیت و کارایی اجرای پروژه‌های شهری است و به‌منزله یک پلتفرم مدرن، شهرها را قادر می‌سازد تا در مواجهه با چالش‌های پیچیده شهری، راهکارهای داده‌محور و کارآمد اتخاذ کنند (Abdelrahman et al., 2025).

– سنگاپور مجازی

سنگاپور با مساحت ۷۱۰ کیلومتر مربع و جمعیت ۵ میلیون نفر، از سال ۲۰۱۴ ابتکار «ملت هوشمند» را آغاز کرده و طی یک دهه به دستاوردهای چشمگیری رسیده است. این کشور اکنون رتبه نخست جهان در شمول دیجیتال را دارد، سهم اقتصاد دیجیتال از تولید ناخالص داخلی به ۱۷,۷ درصد افزایش یافته و ۹۹ درصد خدمات دولتی به‌صورت آنلاین ارائه می‌شود. فناوری‌های دیجیتال و بخصوص دوقلوی دیجیتال با ارتقای سلامت، آموزش و زیرساخت، زندگی روزمره شهروندان را ساده‌تر و باکیفیت‌تر کرده و به بخشی جدایی‌ناپذیر از زندگی و توسعه آینده سنگاپور تبدیل شده‌اند (SmartNation, 2024).



تصویر ۵- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد

دولت سنگاپور از طریق ابتکار «ملت هوشمند» با تمرکز بر دولت دیجیتال، اقتصاد دیجیتال و جامعه دیجیتال، ۷۳ میلیون دلار سرمایه‌گذاری کرده تا نسخه‌ای دیجیتال از کل کشور ایجاد کند. پروژه «سنگاپور مجازی» که در ۲۰۲۲ تکمیل شد، به مسئولان و شهروندان امکان پیش‌بینی تحولات شهری و اتخاذ تصمیمات بهتر در زمینه مدیریت بحران و ارتقای کیفیت زندگی را می‌دهد و نمونه‌ای موفق از کاربرد فناوری‌های نوین در شهرهای هوشمند است (Diaz-Sarachaga, 2025). در سال ۲۰۲۳، سنگاپور با همکاری گوگل کلود برنامه پیشگامان هوش مصنوعی^{۱۷} را اجرا کرد تا کسب‌وکارها و نهادهای دولتی به‌صورت رایگان به ابزارهای هوش مصنوعی دسترسی داشته باشند و در ۱۰۰ روز، کاربرد عملی هوش مصنوعی مولد را توسعه دهند (NAIS, 2023). گرچه در پروژه دوقلوی دیجیتال سنگاپور، برخی پردازش‌ها و شبیه‌سازی‌ها به صورت خودکار انجام می‌شوند، اما این دوقلوی دیجیتال همچنان برای تصمیم‌گیری نیازمند مداخله انسانی است و با دوقلوهای دیجیتال خودکار که به‌طور مستقل عمل می‌کنند، تفاوت دارد (Alvi et al., 2025).

– دوبلین، ایرلند

مرکز تحقیقاتی پیشرو در ایرلند^{۱۸} در دانشگاه ماینوت با شورای شهر دوبلین پروژه‌ای دو ساله برای توسعه اکوسیستم دوقلوی دیجیتال و تقویت مشارکت شهروندان آغاز کرده است. این پروژه با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و هوش مصنوعی، امکان برنامه‌ریزی بهتر شهری، مدیریت زیرساخت‌ها و تعامل مردم با خدمات شهری را فراهم می‌کند. هدف آن ایجاد رویکردی مشارکت‌محور است که نیازها، اولویت‌ها و فرصت‌های دوقلوی دیجیتال را شناسایی و به تولید داده و دانش جدید برای تصمیم‌گیری شهری منجر شود (Maynooth University, 2025). در پروژه شهر هوشمند دوبلین، فناوری دوقلوی دیجیتال به‌مثابه یک نسخه مجازی از شهر به کار گرفته شده که اطلاعات سه‌بعدی از زیرساخت‌ها، ساختمان‌ها و خیابان‌ها را در بر می‌گیرد و امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی اثرات سناریوهای مختلف توسعه شهری را فراهم می‌کند. این سیستم به مقامات

شهری و شهروندان امکان می‌دهد در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی مشارکت داشته باشند و کیفیت مدیریت شهری و زندگی شهروندان بهبود یابد، ضمن آن که فرایندها مبتنی بر داده و تحلیل‌های دقیق طراحی می‌شوند (Data.europa.eu, 2025).



تصویر ۶- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد

- روتردام، هلند

پروژه دوقلوی دیجیتال بندر روتردام با همکاری شرکت فناوری اطلاعات و هوش مصنوعی آمریکا^{۱۹} و شرکت تخصصی در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^{۲۰}، نمونه‌ای برجسته از کاربرد فناوری‌های نوین در مدیریت بندر هوشمند است. این پروژه با ایجاد یک مدل دیجیتال دقیق از زیرساخت‌ها، وضعیت آب و هوا، حرکت کشتی‌ها و شرایط آب، امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای مختلف عملیاتی را برای مدیران بندر فراهم می‌کند. هدف اصلی، افزایش کارایی، بهینه‌سازی زمان لنگراندازی و عملیات بارگیری/تخلیه و آماده‌سازی بندر برای پذیرش کشتی‌های خودران تا سال ۲۰۳۰ است. این تجربه نشان‌دهنده نقش کلیدی دوقلوهای دیجیتال در بهبود تصمیم‌گیری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کیفیت خدمات در محیط‌های پیچیده شهری و صنعتی است (Smits, 2019). بندر روتردام، بزرگ‌ترین بندر اروپا، با استفاده از فناوری دوقلوی دیجیتال به سطحی نوین از مدیریت و بهره‌وری دست یافته است. این دوقلوی دیجیتال یک شبیه‌سازی جامع از کل فعالیت‌های بندر ارائه می‌دهد. این سیستم علاوه بر افزایش کارایی و بهره‌وری، به بهبود ایمنی و پایداری محیطی نیز کمک می‌کند و نمونه‌ای موفق از ادغام تحول دیجیتال و فناوری‌های پیشرفته در مدیریت زیرساخت‌های حیاتی است. دوقلوی دیجیتال روتردام نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با شبیه‌سازی هوشمند و تحلیل داده‌های واقعی، تصمیم‌گیری‌ها را سریع‌تر، دقیق‌تر و مبتنی بر واقعیت انجام داد (Neugebauer et al., 2024).

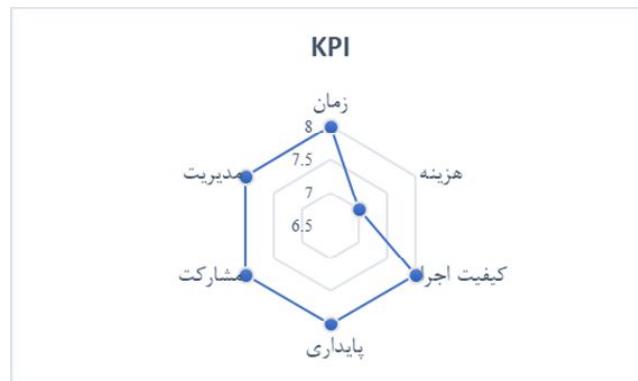


تصویر ۷- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد

- هلسینکی، فنلاند

هلسینکی با بهره‌گیری از استاندارد زبان نشانه‌گذاری جغرافیایی در شهر^{۲۱} و مدل‌سازی سه‌بعدی پویا، دوقلوی دیجیتال شهری را ایجاد کرده است که امکان شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مختلف شهری را پیش از اجرای واقعی فراهم می‌کند. پیشرفت‌های فناوریانه و سرمایه‌گذاری در آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی باعث شده است که تولید و استفاده از دوقلوی

دیجیتال در سطح شهر سریع‌تر، کم‌هزینه‌تر و موثرتر شود (Hämäläinen, 2021). شهر هلسینکی از دهه ۱۹۸۰ به آزمایش مدل‌های سه‌بعدی پرداخته است. در سال ۱۹۹۹، شبیه‌ساز سه‌بعدی مبتنی بر موتور واقعی سازی^{۲۲} معرفی شد. سپس در سال ۲۰۰۲، طرح جامع بازنگری شده شهر با استفاده از مدل سه‌بعدی به شهروندان ارائه گردید و در سال ۲۰۰۳ نیز، طرح منطقه جدید پاسلا با چندین گزینه طراحی به تصویر کشیده شد. این مدل سه‌بعدی به سرعت به ابزاری موثر در برنامه‌ریزی شهری تبدیل شد. در پروژه «زندگی هوشمند من»، شهر هلسینکی با استفاده از مدل سه‌بعدی و داده‌های باز، اطلاعات انرژی ساختمان‌ها را در دسترس قرار داده است تا بهره‌وری انرژی و استفاده از منابع تجدیدپذیر افزایش یابد و اهداف اقلیمی شهر محقق شود. این داده‌ها به مالکین، کسب‌وکارها، سرمایه‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری در زمینه بازسازی، نصب فناوری‌های هوشمند و بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها بگیرند. این تجربه نشان می‌دهد که استفاده از دوقلوی دیجیتال و داده باز می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی و تصمیم‌گیری هوشمندانه در شهرها کمک کند (Ruohomäki et al., 2018).



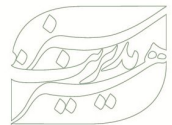
تصویر ۸- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد

شیونگ‌آن، چین

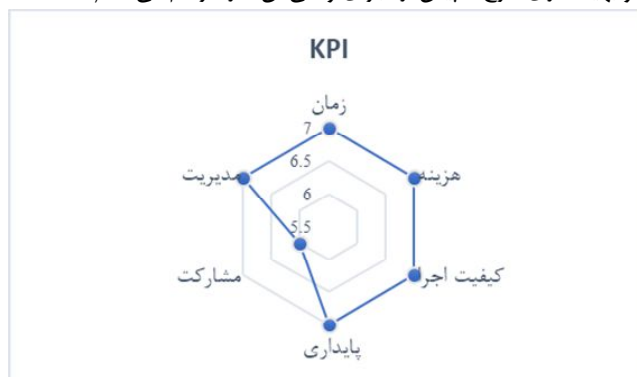
مفهوم «شهرهای دوقلوی دیجیتال» در نیمه دوم سال ۲۰۱۷ و طی برنامه‌ریزی و ساخت منطقه جدید شیونگ‌آن در چین پایه‌گذاری شد، که شامل برنامه‌ریزی نوآورانه برای این مفهوم، ساختار پایه‌ای و مکانیزم‌های اجرایی آن بود. در واقع منطقه جدید شیونگ‌آن اولین جایی بود که مفهوم شهرهای دوقلوی دیجیتال را وارد پروژه‌های ساخت شهری در چین کرد و پس از آن این مفهوم در سراسر کشور در قالب پروژه‌های نمایشی و ترویجی اجرا شد. به‌عنوان یک شهر دوقلوی دیجیتال بومی، منطقه شیونگ‌آن دارای ویژگی‌های همزیستی، مزایای هم‌افزا و یکپارچگی سیستمی است که سایر شهرها از آن برخوردار نیستند. این ویژگی‌ها در چهار بخش اصلی نمایان می‌شوند (Liu & Tian, 2023):

- ساخت زیرساخت‌های دیجیتال: شامل جمع‌آوری و انتقال داده‌های بزرگ فضایی-زمانی جهانی مبتنی بر علوم اطلاعات جغرافیایی، داده‌های دقیق نقشه‌برداری شهری، و داده‌های کامل اقتصادی، اجتماعی و انسانی منطقه.
- ساخت همزمان پلتفرم مدیریتی: استفاده از مدل اطلاعات ساختمان^{۲۳} یا مدل اطلاعات شهری^{۲۴} برای تحقق ساخت دیجیتال قبل از ساخت فیزیکی.
- سیستم استاندارد داده‌های دوقلو: شامل فرهنگ لغت داده‌های شهری و سیستم استاندارد مدیریت یکپارچه.
- قابلیت‌های همکاری و عملکرد هوشمند در سطح شهر: امکان هماهنگی و مدیریت هوشمند شهری در سطح کل شهر.

این منطقه با بهره‌گیری از زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته شامل مرکز محاسبات شهری، اینترنت اشیاء، رایانش ابری و شبکه‌های داده‌ای، امکان ایجاد دوقلوی دیجیتال شهر و شبیه‌سازی فرآیندهای شهری را فراهم کرده است. همچنین، با استفاده از فناوری‌های هوشمند در حوزه حمل‌ونقل، ترافیک، مدیریت پسماند و زیرساخت‌های شهری، پروژه‌های شهری این منطقه به صورت داده‌محور و قابل پیش‌بینی طراحی و مدیریت می‌شوند. به کارگیری مدل‌سازی سه‌بعدی و استانداردهای



استفاده از مدل اطلاعات ساختمان در پروژه‌های راه‌آهن و ساختمان‌ها، سطح تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی شهری را بهبود بخشیده و امکان آزمایش و بهینه‌سازی طرح‌ها پیش از اجرای واقعی آن‌ها را فراهم می‌کند (Hongyan & Zhen, 2022).



تصویر ۹- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد

– بوستون، ماساچوست

دوقلوی دیجیتال بوستون یک مدل سه‌بعدی دقیق شهری است که به‌طور خاص برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه‌های بی‌سیم نسل ششم^{۲۵} و کاربردهای واقعیت افزوده^{۲۶} طراحی شده است. این مدل شامل داده‌های سه‌بعدی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری، موقعیت ایستگاه‌های پایه سلولی و سایر نقاط شاخص در سطح شهر است و با ابزارهای پیشرفته ردیابی پرتو سازگار است. یک رابط برنامه‌نویسی کاربردی امکان تعامل با مدل، تنظیم دقت و استخراج زیرصحنه‌های موردنظر را فراهم می‌کند. دوقلوی دیجیتال بوستون، به‌عنوان محیطی امن برای آزمایش، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد شبکه‌ها، آموزش مدل‌های هوش مصنوعی و طراحی راه‌حل‌های نوآورانه، به پژوهشگران و مهندسان کمک می‌کند. این مدل به‌صورت منبع باز در دسترس است و یکی از پیشرفته‌ترین نمونه‌های دوقلوی دیجیتال شهری در جهان محسوب می‌شود (Testolina et al., 2024). دوقلوی دیجیتال بوستون با استفاده از مدل سه‌بعدی سامانه اطلاعات جغرافیایی^{۲۷}، ابزاری قدرتمندی برای تحلیل محیطی و بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی است که به مقامات، سرمایه‌گذاران و شهروندان امکان ارزیابی تأثیرات توسعه‌ها و اتخاذ تصمیمات بهتر را می‌دهد. این مدل با داده‌های باز اداره برنامه‌ریزی و توسعه بوستون یکپارچه شده و تحلیل‌های دقیقی مانند پیش‌بینی افزایش سطح آب دریا و تأثیرات آن بر مناطق ساحلی فراهم می‌کند. هدف اصلی آن شبیه‌سازی و تحلیل سناریوهای توسعه شهری و ارتقای تصمیم‌گیری در فرآیندهای بازنگری شهری است (Patrick, 2018). بوستون در مسیر تبدیل دوقلوی دیجیتال خود به یک زیرساخت وب‌محور جامع است که اطلاعات را از منابع معتبر برای کاربردهای مختلف جمع‌آوری می‌کند. در حال حاضر پروژه‌های مدل‌سازی شهری مستقلاً در منطقه متروپولیتن بوستون وجود دارد که همپوشانی دارند و هر کدام آسیب‌پذیری‌های خاص خود را دارند (Wan et al., 2023).

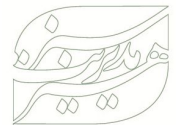


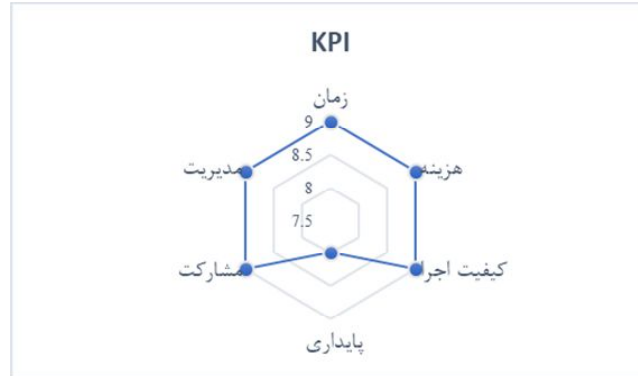
تصویر ۱۰- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد

- هانگژو، چین

پس از انتشار گزارش آی‌بی‌ام در سال ۲۰۰۹ تحت عنوان «شهرهای هوشمند در چین»، این کشور به سرعت مفهوم شهر هوشمند را در سیاست‌های خود پذیرفت و از توسعه شتابان به رویکرد کیفیت‌محور با منافع فراگیر تغییر مسیر داد، روندی که از سال ۲۰۱۴ با اجرای «طرح ملی شهرنشینی نوین (۲۰۱۴-۲۰۲۰)» رسمی شد. هانگژو از سال ۲۰۱۰ با سامانه‌ی «مدیریت و کنترل یکپارچه ترافیک هوشمند» تلاش کرد زمان پاسخ‌دهی پلیس و رعایت قوانین ترافیکی را بهبود دهد، اما تراکم ترافیک همچنان چالش بود. سال ۲۰۱۶، شرکت علی‌بابا سامانه‌ی هوش مصنوعی مغز شهری^{۲۸} را در هانگژو پیاده کرد. این سامانه با تحلیل داده‌های دوربین‌های ترافیکی، زمان چراغ‌های راهنمایی را خودکار تنظیم می‌کند و با سیستم‌های اورژانس ترکیب شده بود. نتایج نشان داد که متوسط زمان سفر ۱۵٫۳٪ کاهش و دقت هشدارهای اورژانسی ۹۲ درصد شده و رتبه هانگژو در تراکم ترافیک جهانی از ۱۶ به ۱۵۴ بهبود یافت. به دلیل نتایج مثبت اجرای آزمایشی مغز شهری در حمل‌ونقل، دولت هانگژو استفاده از این راهکار را در برنامه‌ریزی رسمی شهری تصویب کرد. این سند برنامه‌ریزی همچنین هدف‌گذاری کرد که مدیریت ترافیک مبتنی بر مغز شهری تا سال ۲۰۲۲ کل شهر را پوشش دهد و از یک حوزه‌ی واحد حمل‌ونقل به چندین حوزه (مانند مدیریت شهری، بهداشت و درمان، گردشگری، حفاظت محیط زیست، پلیس و...) گسترش یابد تا یکپارچگی سامانه‌های داده‌ای و همکاری بین‌بخشی ارتقا یابد. City Brain خدماتی مثل «ابتدا درمان، بعد پرداخت» و «ابتدا خروج، بعد پرداخت» در پارکینگ‌ها را فراهم کرده و کارایی عملیاتی این کلان‌شهر ۱۲ میلیونی را بهبود بخشیده است (Han et al., 2023). ادغام فناوری‌های دوقلوی دیجیتال، کلان‌داده، هوش مصنوعی، محاسبات ابری و دیگر فناوری‌ها در پلتفرم شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال هانگژو امکان جمع‌آوری، پردازش و تحلیل بلادرنگ داده‌های متنوع شهری را فراهم کرده است. این یکپارچگی مدیریت شهری را تقویت و خدمات عمومی را با پشتیبانی هوشمند ارتقا می‌دهد. فراتر از مدیریت شهری و خدمات عمومی، مغز شهری در حوزه‌های نوآورانه مانند پزشکی هوشمند و گردشگری هوشمند نیز کاربرد دارد. در پزشکی هوشمند، سامانه تخصیص بهینه منابع، پیش‌بینی و پیشگیری از بیماری‌ها و بهبود کیفیت خدمات درمانی را ممکن می‌سازد. در گردشگری هوشمند، مغز شهری با ارائه توصیه‌های هوشمند بر اساس داده‌های بلادرنگ و تاریخی، پایش رفتار گردشگران، کنترل جمعیت و ارتقای ایمنی، تجربه بازدیدکنندگان و کیفیت خدمات را بهبود می‌بخشد. به‌طور کلی، این فناوری، نمونه‌ای بارز از ساخت شهر هوشمند در چین است که با استفاده از دوقلوی دیجیتال و فناوری‌های مرتبط، مدیریت و پایش بلادرنگ داده‌های شهری را ممکن ساخته و پشتیبانی هوشمند از مدیریت شهری و خدمات عمومی ارائه می‌دهد (Hu, 2023).

فعالان حوزه شهر هوشمند اجزای کلیدی سیستم‌های مغز شهری را شامل ادغام و تحلیل داده‌ها، الگوریتم‌های هوش مصنوعی، تصمیم‌گیری خودکار و مشارکت شهروندان می‌دانند. مطالعات تجربی، به ویژه اجرای مغز شهری در چین، نشان می‌دهند که رابطه فناوری و محیط شهری پیچیده است و تمرکز صرف بر کاربردهای فناوری ممکن است زمینه‌های اجتماعی، سیاسی و اقتصادی گسترده‌تر که برای درک فرآیندهای نوآوری و تاثیر آن بر پایداری، عدالت و مشارکت شهروندان ضروری‌اند را نادیده بگیرد. هانگژو پیشگام در اجرای ابتکار شهر هوشمند مبتنی بر دوقلوی دیجیتال هانگژو^{۲۹} است که در آوریل ۲۰۱۶ آغاز شد و دوره‌ای نوین از حکمرانی دیجیتال شهری را رقم زد. این دوقلوی دیجیتال یک اکوسیستم نوآوری شهری پویا است که بر فناوری‌های دیجیتال پیشرفته مبتنی است و شامل ۱۱ سامانه دیجیتال (در حوزه پلیس، حمل‌ونقل، گردشگری و سلامت) و ۴۸ اپلیکیشن مرتبط است که روزانه بیش از ۸۰ میلیون داده را پردازش می‌کند. این سامانه به مدیران شهری امکان تخصیص بهینه منابع، سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد و ارتقای اثربخشی حکمرانی را می‌دهد و همزمان شهروندان از خدمات عمومی با کیفیت و مشارکت گسترده‌تر بهره‌مند می‌شوند. مرکز نوآوری شهر هانگژو^{۳۰}، در سال ۲۰۱۶ تاسیس شد و شامل کنشگران کلیدی از بخش‌های مختلف مانند نهادهای دولتی، مؤسسات آموزشی، شرکت‌های پیشرو و جوامع محلی بود. این مرکز بستری برای تصمیم‌گیری مشترک و تبادل دانش فراهم می‌کند و با طراحی معماری سیستم، هماهنگی روابط پیچیده میان کنشگران و ترویج مشارکت شهروندان، هم‌افزایی اجتماعی-فنی را تقویت می‌کند (Bai et al., 2025).





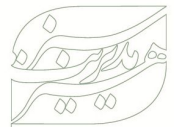
تصویر ۱۱- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد

- زوربخ، سوئیس

زوربخ بیش از یک دهه است که دوقلوی دیجیتال خود را توسعه می‌دهد و تمرکز اصلی آن بر حوزه‌های محیط‌زیستی از جمله مدل‌سازی آلودگی صوتی، پایش و پیش‌بینی آلودگی هوا و تحلیل پرتوهای تلفن همراه بوده است. در کنار این موارد، دوقلوی دیجیتال در بخش انرژی نیز به کار گرفته شده و امکان تحلیل دقیق پتانسیل بهره‌برداری از انرژی خورشیدی را فراهم آورده است. همچنین، در برنامه‌ریزی شهری از این ابزار برای تجسم سه‌بعدی پروژه‌های ساختمانی، تحلیل تأثیر سایه‌اندازی ساختمان‌ها و بررسی دید و منظر شهری استفاده می‌شود (Schrotter & Hürzeler, 2020). در دهه ۱۹۹۰، موسسه فدرال فناوری زوربخ، آزمایش‌هایی بر روی داده‌های مکانی آغاز کرد که در نهایت در سال ۲۰۱۱ به ایجاد مدل سه‌بعدی جامع شهر زوربخ منجر شد. برای زوربخ، دوقلوی دیجیتال به معنای ارتقای قابل توجه مجموعه داده‌های مکانی سه‌بعدی است. این پروژه نه تنها مدل‌سازی و جزئی‌سازی داده‌ها را در بر می‌گیرد، بلکه مدیریت چرخه حیات عناصر منفرد و کل مجموعه داده را نیز شامل می‌شود. این داده‌های سه‌بعدی پایه‌ای برای ادغام داده‌های مکانی یا داده‌های متنوع دیگر ایجاد می‌کنند. در مواردی که امکان‌پذیر باشد، عناصر واقعی به صورت برخط^{۳۱} به دنیای دیجیتال متصل می‌شوند و فرآیندهای دیجیتالی‌سازی اکنون بعد سوم را نیز در بر می‌گیرند. مدیریت این طرح بر عهده دپارتمان سامانه اطلاعات جغرافیایی شهری زوربخ است که با همکاری بیش از ۲۵ بخش خدمات شهری دیگر فعالیت می‌کند. با وجود این کارکردها، دوقلوی دیجیتال زوربخ همچنان در دسته‌ی «دوقلوهایی دیجیتال منفعل» قرار می‌گیرد. علت این امر آن است که تمرکز اصلی این سامانه بر نمایش و تجسم مدل سه‌بعدی شهر است و هنوز فاقد قابلیت‌های پیشرفته‌ای مانند پیش‌بینی تغییرات، واکنش خودکار به داده‌های جدید یا اجرای شبیه‌سازی‌های سناریومحور برای آینده‌نگری شهری می‌باشد. بنابراین، هرچند این مدل ابزاری ارزشمند برای نمایش داده‌های مکانی و پشتیبانی از برخی تصمیمات محسوب می‌شود، اما در حال حاضر نمی‌تواند نقش یک سامانه هوشمند پویا برای مدیریت و برنامه‌ریزی شهری در شرایط پیچیده و آینده‌نگر ایفا کند (Alvi et al., 2025).



تصویر ۱۲- شبکه شاخص‌های کلیدی عملکرد



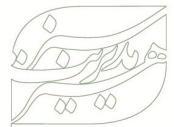
به‌منظور افزایش قابلیت مقایسه میان تجارب جهانی و پرهیز از قضاوت صرفاً توصیفی، نمونه‌های بررسی‌شده بر اساس شش شاخص کلیدی عملکرد شامل زمان اجرای پروژه، هزینه، کیفیت اجرا، پایداری محیطی، مشارکت کنشگران و تصمیم‌گیری و مدیریت ارزیابی شدند. برای هر شاخص، با استناد به اطلاعات منتشرشده در منابع هر پروژه، امتیازی بین ۱ تا ۱۰ اختصاص یافت و مجموع این امتیازها مبنای مقایسه عملکرد نمونه‌ها قرار گرفت. معیارهای امتیازدهی هر شاخص در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۴- جدول امتیازدهی شاخص کلیدی عملکرد

نمونه موردی	شاخص	توضیح و استدلال	امتیاز
سنگاپور	زمان	پروژه از ۲۰۱۴ آغاز و نسخه «Virtual Singapore» در ۲۰۲۲ تکمیل شد. حدود ۸ سال برای پروژه‌ای در این مقیاس منطقی است.	۸
	هزینه	سرمایه‌گذاری ۷۳ میلیون دلاری برای کل کشور، باتوجه به مقیاس و فناوری پیشرفته، هزینه‌ها قابل کنترل بوده و بازده خوبی داشته است.	۷
	کیفیت اجرا	استفاده از هوش مصنوعی، زیرساخت‌های پایدار و اپلیکیشن‌های مشارکتی، کیفیت اجرای بالایی را نشان می‌دهد؛ با این حال، برخی پردازش‌ها هنوز نیازمند مداخله انسانی هستند.	۸
	پایداری محیطی	زیرساخت‌های دیجیتال امن و پایدار و یکپارچگی فناوری با زندگی روزمره نشان‌دهنده پایداری مناسب و توجه به محیط عملیاتی است.	۸
	مشارکت کنشگران	دسترسی رایگان به ابزارهای AI، اپلیکیشن‌های مشارکتی و خدمات آنلاین، تعامل شهروندان و نهادها را افزایش داده است.	۸
	تصمیم‌گیری و مدیریت	دوقلوی دیجیتال به تصمیم‌گیری کمک می‌کند اما همچنان نیازمند مداخله انسانی است؛ مدیریت پروژه به‌صورت هوشمند و کارآمد عمل کرده است.	۷
دوبلین	زمان	پروژه دو ساله بوده و باتوجه به مقیاس و نوپا بودن اکوسیستم دوقلوی دیجیتال، زمان مناسبی صرف شده است.	۷
	هزینه	به اعداد مالی اشاره‌ای نشده است، اما باتوجه به مقیاس محدود و پروژه تحقیقاتی، هزینه‌ها منطقی و قابل کنترل به نظر می‌رسد.	۶
	کیفیت اجرا	استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها نشان‌دهنده کیفیت اجرایی مناسب و علمی است.	۷
	پایداری محیطی	پروژه بیشتر بر برنامه‌ریزی، مدیریت داده و مشارکت تمرکز دارد؛ اشاره مستقیمی به پایداری محیطی نشده است، بنابراین امتیاز متوسط داده می‌شود.	۶
	مشارکت کنشگران	سیستم به شهروندان و مقامات امکان مشارکت در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی را می‌دهد و رویکرد مشارکت‌محور برجسته است.	۸
	تصمیم‌گیری و مدیریت	فرآیندها مبتنی بر داده و تحلیل دقیق طراحی شده‌اند و تصمیم‌گیری را بهبود می‌بخشند، اما استقلال کامل سیستم محدود است.	۷
روتردام	زمان	پروژه در محیط پیچیده بندری و صنعتی اجرا شده و باتوجه به مقیاس و هدف بلندمدت تا ۲۰۳۰، زمان اجرای فعلی منطقی است.	۷
	هزینه	باوجود فناوری پیشرفته و شبیه‌سازی جامع، پروژه نشان‌دهنده بهینه‌سازی هزینه‌ها و استفاده کارآمد از منابع است، بنابراین امتیاز مناسب داده شد.	۷
	کیفیت اجرا	دوقلوی دیجیتال دقیق و جامع، شبیه‌سازی هوشمند و تحلیل داده‌های واقعی، کیفیت اجرای بسیار بالایی را نشان می‌دهد.	۸
	پایداری محیطی	پروژه به بهبود ایمنی و پایداری محیطی کمک می‌کند و توجه ویژه‌ای به اثرات محیطی دارد.	۸
	مشارکت کنشگران	اشاره‌ای به مشارکت شهروندان یا کنشگران اجتماعی نشده؛ تمرکز بیشتر بر مدیران و اپراتورهای بندر است.	۶
	تصمیم‌گیری و مدیریت	شبیه‌سازی هوشمند و تحلیل داده‌ها تصمیم‌گیری را سریع‌تر و دقیق‌تر می‌کند و مدیریت عملیاتی بهینه را فراهم می‌سازد.	۸
هلسینکی	زمان	پروژه‌ها از دهه ۱۹۸۰ آغاز شده و تکامل دوقلوی دیجیتال شهری تا امروز ادامه دارد؛ باتوجه به پیشرفت طولانی‌مدت و مداوم، زمان اجرای فعلی مناسب ارزیابی می‌شود.	۸
	هزینه	باوجود نیاز به زیرساخت داده‌ای قوی و توان محاسباتی بالا، سرمایه‌گذاری در فناوری و آموزش نیروی انسانی موجب کاهش هزینه‌ها و استفاده مؤثر منابع شده است.	۷
	کیفیت اجرا	بهره‌گیری از مدل‌سازی سه‌بعدی، استاندارد CityGML، داده‌های باز و شبیه‌سازی سناریوها، کیفیت اجرای بالا و قابلیت عملیاتی مناسب را نشان می‌دهد.	۸
	پایداری محیطی	پروژه با تمرکز بر بهره‌وری انرژی، مصرف منابع تجدیدپذیر و مدیریت متابولیسم شهری، پایداری محیطی قوی دارد.	۸

۸	دسترسی شهروندان به داده‌ها، ارتقای شفافیت و اعتماد، و امکان مشارکت در برنامه‌ریزی، نشان‌دهنده مشارکت کنشگران	۸
۸	دوقلوی دیجیتال و ابزارهای داده‌محور امکان تصمیم‌گیری هوشمندانه، پیش‌بینی سناریوها و بهبود مدیریت شهری را فراهم کرده‌اند.	تصمیم‌گیری و مدیریت
۷	پروژه از ۲۰۱۷ آغاز شده و باتوجه به مقیاس و نوآوری‌های متعدد، زمان اجرای فعلی منطقی ارزیابی می‌شود (هنوز پروژه در حال توسعه است).	زمان
۷	پروژه شامل زیرساخت‌های پیشرفته، محاسبات ابری، اینترنت اشیا و مدل‌سازی سه‌بعدی است؛ با توجه به نوپا بودن و مقیاس، هزینه‌ها بالاست اما با برنامه‌ریزی کنترل شده‌اند.	هزینه
۷	بهره‌گیری از BIM/CIM، مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی فرآیندها نشان‌دهنده کیفیت اجرایی بالا است، با این حال پروژه هنوز در حال توسعه است.	کیفیت اجرا
۷	استفاده از فناوری‌های هوشمند برای حمل‌ونقل، مدیریت پسماند و زیرساخت‌ها نشان‌دهنده توجه به پایداری محیطی است.	پایداری محیطی
۶	متن به مشارکت فعال شهروندان یا کنشگران اجتماعی اشاره مستقیمی ندارد و تمرکز بیشتر بر فناوری و زیرساخت‌هاست.	مشارکت کنشگران
۷	ایجاد پلتفرم مدیریتی و استاندارد داده‌های شهری، تصمیم‌گیری و مدیریت شهری را بهبود می‌بخشد، اما چالش‌های انسانی و فرهنگی نشان‌دهنده محدودیت در مدیریت کامل است.	تصمیم‌گیری و مدیریت
۷	پروژه دوقلوی دیجیتال بوستون در حال توسعه مستمر است و باتوجه به پیچیدگی فناوری‌ها و کاربردهای پیشرفته، زمان اجرای فعلی منطقی است.	زمان
۷	باتوجه به فناوری پیشرفته، ابزارهای شبیه‌سازی، داده‌های باز و منابع وب‌محور، هزینه قابل توجهی صرف شده، اما با توجه به مقیاس و دستاوردها منطقی است.	هزینه
۸	مدل سه‌بعدی دقیق، سازگاری با ابزارهای پیشرفته و قابلیت شبیه‌سازی دقیق سناریوها نشان‌دهنده کیفیت بالای اجرا است.	کیفیت اجرا
۷	پروژه توجه ویژه‌ای به تحلیل محیطی و پیش‌بینی اثرات توسعه‌ها دارد، از جمله پیش‌بینی سطح آب دریا و تأثیرات آن بر مناطق ساحلی.	پایداری محیطی
۶	داده‌ها و مدل به‌صورت منبع باز در دسترس است، اما متن اشاره مستقیمی به مشارکت فعال شهروندان ندارد و تمرکز بیشتر بر پژوهشگران و مهندسان است.	مشارکت کنشگران
۷	دوقلوی دیجیتال ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری و بازنگری شهری فراهم کرده، اما همپوشانی پروژه‌های مستقل و چالش‌های مدیریتی محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند.	تصمیم‌گیری و مدیریت
۹	پروژه City Brain از سال ۲۰۱۶ آغاز شده و پس از اجرای آزمایشی سریع، تا امروز به پوشش گسترده در کل شهر رسیده است؛ سرعت توسعه و تکامل بسیار بالاست.	زمان
۹	باوجود سرمایه‌گذاری گسترده در فناوری‌های پیشرفته، کلان‌داده، هوش مصنوعی و زیرساخت‌های محاسبات ابری، هزینه‌ها مدیریت شده و با نتایج قابل توجه، ارزش بالایی دارند.	هزینه
۹	ادغام سامانه‌های متعدد، ۴۸ اپلیکیشن مرتبط و پردازش روزانه بیش از ۸۰ میلیون داده، کیفیت بالای اجرا و اثربخشی عملیاتی را نشان می‌دهد.	کیفیت اجرا
۸	سامانه‌های City Brain شامل مدیریت ترافیک، بهبود حمل‌ونقل، کاهش تراکم و کنترل منابع شهری هستند و با بهینه‌سازی عملکرد شهر، پایداری محیطی بالایی دارند.	پایداری محیطی
۹	ساختار اکوسیستم HCBI و مرکز نوآوری شامل نهادهای دولتی، شرکت‌ها، دانشگاه‌ها و شهروندان، مشارکت گسترده و فعال همه کنشگران را تسهیل می‌کند.	مشارکت کنشگران
۹	پردازش بلادرنگ داده‌ها، تصمیم‌گیری هوشمند، تخصیص بهینه منابع و هماهنگی بین‌بخشی، نشان‌دهنده سطح بسیار بالا در مدیریت و حکمرانی شهری است.	تصمیم‌گیری و مدیریت
۷	توسعه دوقلوی دیجیتال زوریخ بیش از یک دهه طول کشیده و با توجه به بلوغ فناوری و داده‌ها، زمان‌بندی مناسب است.	زمان
۷	پروژه با توجه به مقیاس و سرمایه‌گذاری در داده‌های سه‌بعدی و GIS، هزینه قابل توجهی داشته اما نسبت به دستاوردها منطقی است.	هزینه
۷	مدل سه‌بعدی دقیق و جامع است، اما به دلیل ماهیت «متنقل» سیستم، امکان شبیه‌سازی پیشرفته و واکنش خودکار محدود است.	کیفیت اجرا
۸	تمرکز اصلی بر پایش محیط زیست، آلودگی صوتی و هوا و تحلیل انرژی خورشیدی بوده و بنابراین پایداری محیطی نسبتاً بالاست.	پایداری محیطی
۶	همکاری دپارتمان GIS با بیش از ۲۵ بخش شهری انجام شده اما مشارکت فعال شهروندان یا کنشگران فراتر از مدیریت داده‌ها محدود است.	مشارکت کنشگران
۶	سامانه در حال حاضر بیشتر ابزاری تجسمی و منفعل است و تصمیم‌گیری و مدیریت پویا محدود است.	تصمیم‌گیری و مدیریت

نتایج ارزیابی شاخص‌های کلیدی عملکرد نشان می‌دهد که هانگژو با کسب بالاترین امتیاز، موفق‌ترین نمونه در میان تجارب بررسی شده است. این موفقیت ناشی از بهره‌گیری از دوقلوی دیجیتال در سطح خودکار، پردازش بلادرنگ داده‌ها، یکپارچگی



سامانه‌های شهری و مشارکت گسترده کنشگران است که عملکرد مطلوبی را در شاخص‌های زمان، هزینه، کیفیت اجرا، مشارکت و تصمیم‌گیری ایجاد کرده است. در مقابل، نمونه‌هایی مانند سنگاپور، هلسنکی و روتردام نیز به دلیل برخورداری از زیرساخت‌های داده‌محور، کیفیت بالای اجرا و بهبود فرآیندهای مدیریتی، امتیازات بالایی کسب کرده‌اند، هرچند در برخی شاخص‌ها مانند مشارکت کنشگران یا میزان خودکارسازی هنوز محدودیت‌هایی دارند. از سوی دیگر، نمونه‌هایی نظیر دوبلین، بوستون، شیونگ‌آن و زوریخ عمدتاً به دلیل قرار داشتن در مراحل اولیه توسعه، ماهیت پژوهشی پروژه یا محدود بودن قابلیت‌های خودکار و مشارکتی، امتیاز پایین‌تری دریافت کرده‌اند.

مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح بلوغ دوقلوی دیجیتال، به‌تنهایی تضمین‌کننده موفقیت نیست، بلکه دستیابی به عملکرد مطلوب مستلزم تلفیق زیرساخت‌های فناورانه، داده‌های باکیفیت، حکمرانی یکپارچه، مشارکت ذی‌نفعان و سازوکارهای تصمیم‌گیری هوشمند است. با این حال، روند کلی نمونه‌های بررسی‌شده بیانگر آن است که حرکت از سطوح غیرفعال و پیش‌بینی‌کننده به سطوح برنامه‌پذیر و به‌ویژه خودکار، به‌طور معمول با بهبود شاخص‌های کلیدی عملکرد، کاهش هزینه و زمان اجرا، ارتقای کیفیت، افزایش پایداری محیطی و کارآمدتر شدن مدیریت پروژه‌های شهری همراه است.

۴- یافته‌ها: بررسی و تحلیل مقایسه‌ای تجارب

تجارب جهانی نشان می‌دهد دوقلوهای دیجیتال شهری در برنامه‌ریزی، مدیریت زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل، انرژی و محیط‌زیست کاربرد دارند. این فناوری با شبیه‌سازی، پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیندها، شفافیت تصمیم‌گیری را افزایش و هزینه‌ها و ریسک‌های اجرایی را کاهش می‌دهد. هر شهر باتوجه به نیازهای خود، دوقلوهای دیجیتال را برای مدیریت هوشمند منابع، ارتقای مشارکت شهروندان و بهبود بهره‌وری زیرساخت‌ها به کار گرفته است. رتبه موفقیت اجرای هر تجربه بر اساس مساحت نمودار شبکه آن تعیین شده است؛ هرچه مساحت بزرگ‌تر باشد، عملکرد کلی تجربه در شاخص‌های کلیدی بالاتر است. در این مقاله، تمامی تجارب معرفی‌شده به‌طور مقایسه‌ای بررسی شده‌اند.

جدول ۵- نمونه‌های استفاده از شهر هوشمند دوقلوی دیجیتال (برگرفته از مقاله (Alvi et al., 2025))

نمونه	کاربرد اجرایی	رتبه موفقیت در اجرا	وضعیت اجرا	سطح دوقلوی دیجیتال	منبع
دوقلوهای دیجیتال شهری اروپا	- برنامه‌ریزی شهری - سیاست‌گذاری به صورت خدماتی - بهبود مدیریت منابع	-	پروژه تحقیقاتی	برنامه‌پذیر	(Horizon, 2023) (Abdelrahman et al., 2025)
سنگاپور مجازی	- توسعه شهری - نظارت بر اکوسیستم - حمل‌ونقل	۲	اجرا شده در مقیاس بزرگ	برنامه‌پذیر	(SmartNation, 2024) (Diaz-Sarachaga, 2025) (Singapore National AI Strategy, 2023) (SmartNation, 2024)
دوبلین، ایرلند	- برنامه‌ریزی شهری - مصرف انرژی - اقلیم و مدیریت زیرساخت‌های شهری - مدیریت زیرساخت‌ها - تعامل مردم با خدمات شهری	۴	نمونه اولیه دوقلوی دیجیتال	برنامه‌پذیر	(Maynooth University, 2025) (Data.europa.eu, 2025)
روتردام، هلند	- شبکه هوشمند - پارکینگ هوشمند - مدیریت بنادر هوشمند - پیش‌بینی سناریوهای مختلف اجرایی - کاهش هزینه‌ها	۳	نمونه اولیه دوقلوی دیجیتال	برنامه‌پذیر	(Smits, 2019) (Neugebauer et al., 2024)
هلسنکی، فنلاند	- مدل سه‌بعدی دقیق برای برنامه‌ریزی شهری - مشارکت شهروندان - ارزیابی سناریوهای مختلف پیش از اجرا - ارتقای شفافیت و اعتماد	۵	اجرا شده	پیش‌بینی‌کننده	(Ruohomäki et al., 2018) (Hämäläinen, 2021)
شیونگ‌آن،	- برنامه‌ریزی و مدیریت شهری	۶	اجرا شده	برنامه‌پذیر	(Liu & Tian, 2023)

چین	- مدیریت حمل و نقل، ترافیک، پسماند و زیرساخت‌ها - بهینه‌سازی طرح‌ها پیش از اجرا			(Hongyan & Zhen, 2022) (Liu & Tian, 2023)
بوستون، ماساچوست	- توسعه شهری - بهینه‌سازی شبکه‌های بی‌سیم نسل ششم (G6) - کاربردهای واقعیت افزوده (XR) - بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی	نمونه اولیه دوقلوی دیجیتال	۷	(Testolina et al., 2024) (Patrick, 2018) (Wan et al., 2023)
هانگژو، چین	- مدیریت ترافیک - یکپارچگی سامانه‌های داده‌ای - پزشکی و گردشگری هوشمند	اجرا شده	۱	(Han et al., 2023) (Hu, 2023) (Bai et al., 2025)
زوریخ، سوئیس	- تحلیل تأثیر سایه‌اندازی ساختمان‌ها - بررسی دید و منظر - مدل‌سازی آلودگی صوتی - پایش و پیش‌بینی سطح آلودگی هوا - تحلیل پرتوهای ناشی از تلفن همراه - بهره‌برداری از انرژی طبیعی	اجرا شده	۸	Schrotter &) (Hürzeler, 2020)

در بررسی تجارب دوقلوی دیجیتال، مشاهده می‌شود که هرچه سطح دوقلوی دیجیتال پیچیده‌تر باشد و به مدل خودکار نزدیک‌تر شود، میزان موفقیت در اجرای پروژه‌ها نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با به‌کارگیری دوقلوهایی دیجیتال پیشرفته، تصمیم‌گیری و مدیریت شهری هوشمندتر و سریع‌تر انجام شده و اقدامات اجرایی بهینه‌تر می‌شوند. این بهینه‌سازی در شاخص‌هایی مانند زمان، هزینه، کیفیت اجرا، پایداری محیطی، مشارکت کنشگران و مدیریت منعکس می‌شود و موجب ارتقای عملکرد کلی پروژه‌های شهری می‌شود.

۵- بحث

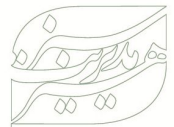
فناوری دوقلوی دیجیتال در زمره یکی از ابزارهای پیشرفته مدیریت شهری، امکان بازنمایی دقیق و لحظه‌ای از محیط فیزیکی و فرآیندهای شهری را فراهم می‌کند. این فناوری با تلفیق داده‌های سنسوری، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های تحلیلی، نه تنها قابلیت نظارت و پایش را افزایش می‌دهد، بلکه امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های شهری را نیز فراهم می‌آورد. در چارچوب شهر هوشمند، دوقلوی دیجیتال می‌تواند به‌مثابه یک ابزار کلیدی برای تصمیم‌گیری بهینه و کاهش ریسک‌های اجرایی عمل کند.

بحث پیرامون کاربرد دوقلوی دیجیتال در پروژه‌های شهری نشان می‌دهد که سطح پیچیدگی و میزان تعامل آن با فضای واقعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در توانمندی این فناوری دارد. در سطح غیرفعال، دوقلو تنها وضعیت لحظه‌ای پروژه‌ها را بازنمایی می‌کند و به مدیران امکان رصد پیشرفت و شناسایی انحراف‌ها را می‌دهد. اگرچه این سطح محدودیت‌هایی در بهینه‌سازی فرآیندها دارد، اما می‌تواند شفافیت اطلاعات را افزایش دهد و هماهنگی میان ذی‌نفعان را بهبود بخشد. به بیان دیگر، دوقلوهایی غیرفعال، پایه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه فراهم می‌آورند اما تأثیر مستقیم آنها بر بهبود عملکرد اجرایی محدود است.

سطح بعدی، دوقلوهایی پیش‌بینی‌کننده، با استفاده از الگوریتم‌های تحلیلی و مدل‌سازی پیش‌بینی، توانایی شبیه‌سازی رفتار آینده سیستم‌ها را دارند. این ویژگی به شناسایی ریسک‌ها و موانع احتمالی پیش از وقوع کمک می‌کند و در نتیجه، کاهش تاخیرات و بهینه‌سازی تخصیص منابع ممکن می‌شود. تجربه پروژه‌های شهری نشان می‌دهد که استفاده از دوقلوهایی پیش‌بینی‌کننده می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر کاهش هزینه‌ها و ارتقای بهره‌وری فرآیندهای اجرایی داشته باشد.

در سطح برنامه‌پذیر، دوقلوهایی دیجیتال فراتر از پیش‌بینی عمل می‌کنند و با ارائه سناریوهای بهینه و توصیه‌های عملیاتی، امکان مداخله مدیریتی و اصلاح فرآیندها را فراهم می‌آورند. این سطح، فرآیند تصمیم‌گیری را از حالت واکنشی به حالت پیشگیرانه و هدایت‌شده تبدیل می‌کند و باعث کاهش دوباره‌کاری، افزایش انعطاف‌پذیری مدیریت شهری و هماهنگی بهتر میان تیم‌های اجرایی می‌شود. بدین ترتیب، دوقلوهایی برنامه‌پذیر نقش کلیدی در بهینه‌سازی اجرای پروژه‌ها و مدیریت ریسک‌ها ایفا می‌کنند.

پیچیده‌ترین سطح، دوقلوهایی خودکار یا خودتنظیم، توانایی اتوماسیون تصمیم‌گیری و مدیریت مستقل بخش‌هایی از فرآیند اجرایی را دارند. این دوقلوه‌ها با کاهش مداخله انسانی و واکنش سریع به تغییرات محیطی، بیشترین بهره‌وری را در مدیریت



منابع، زمان و هزینه‌ها ایجاد می‌کنند. البته تحقق این سطح نیازمند زیرساخت‌های داده‌ای پیشرفته، امنیت سایبری قوی و الگوریتم‌های هوشمند دقیق است. از این رو، استفاده از دوقلوهای خودکار بیشتر در پروژه‌های بزرگ و پیچیده شهری که امکان سرمایه‌گذاری در فناوری و زیرساخت‌های دیجیتال فراهم است، منطقی به نظر می‌رسد.

جمع‌بندی تحلیل چهار سطح دوقلوی دیجیتال نشان می‌دهد که هرچه سطح دوقلو پیشرفته‌تر باشد، ظرفیت آن برای بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی افزایش می‌یابد. با این حال، پیچیدگی پیاده‌سازی، نیازمندی‌های فنی و مالی و ضرورت هماهنگی میان ذی‌نفعان، عوامل محدودکننده‌ای هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. بنابراین، انتخاب سطح مناسب دوقلوی دیجیتال برای هر پروژه شهری باید باتوجه به اهداف پروژه، پیچیدگی سیستم شهری و منابع موجود صورت گیرد. علاوه بر این، شواهد تجربی نشان می‌دهد که تلفیق دوقلوی دیجیتال با سایر ابزارهای شهر هوشمند می‌تواند اثرگذاری آن را چند برابر کند. برای نمونه، یکپارچه‌سازی داده‌های حمل‌ونقل، انرژی و زیرساخت‌های شهری با دوقلوی دیجیتال، امکان پیش‌بینی مشکلات ترافیکی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت بحران را فراهم می‌آورد. این روند نه تنها موجب بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها می‌شود، بلکه تجربه شهروندان را از منظر ایمنی، راحتی و دسترسی به خدمات شهری ارتقا می‌دهد. در نتیجه، دوقلوی دیجیتال نه تنها یک ابزار نظارتی یا تحلیلی است، بلکه یک چارچوب مدیریتی قدرتمند برای تحقق شهرهای هوشمند، پایدار و انعطاف‌پذیر محسوب می‌شود که می‌تواند نقش محوری در بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی و ارتقای کیفیت زندگی شهری ایفا کند.

جدول ۶- سطوح دوقلوی دیجیتال و نقش آن‌ها در بهینه‌سازی اجرای پروژه‌های شهری

سطح دوقلوی دیجیتال	تأثیر در بهینه‌سازی اجرا	میزان پیچیدگی بکارگیری
دوقلوهای غیرفعال ^{۳۲}	کم: تنها نظارت و شفاف‌سازی	کم: ساده‌ترین سطح، فقط نمایش داده‌ها
دوقلوهای پیش‌بینی‌کننده ^{۳۳}	متوسط: شناسایی ریسک‌ها و کاهش تأخیر	متوسط: نیاز به الگوریتم‌های تحلیلی و مدل‌سازی
دوقلوهای برنامه‌پذیر ^{۳۴}	زیاد: ارائه سناریو و توصیه‌های عملیاتی، بهبود هماهنگی و انعطاف‌پذیری	زیاد: نیاز به داده‌های دقیق و مدل‌های تصمیم‌گیری
دوقلوهای خودکار یا خودتنظیم ^{۳۵}	خیلی زیاد: مدیریت مستقل و اتوماسیون فرآیندها	خیلی زیاد: نیازمند زیرساخت پیشرفته و امنیت سایبری قوی

۶- نتیجه‌گیری

دوقلوی دیجیتال شهری در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین تحول دیجیتال، جایگاه ویژه‌ای در حوزه برنامه‌ریزی، مدیریت و اجرای پروژه‌های شهری پیدا کرده است. این فناوری با ایجاد ارتباط میان محیط فیزیکی و فضای مجازی، امکان ایجاد بازنمایی پویا از عناصر شهری، دریافت و تحلیل داده‌های لحظه‌ای، شبیه‌سازی شرایط مختلف و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم می‌سازد. پژوهش حاضر با مرور ادبیات علمی و بررسی تجارب جهانی نشان داد که دوقلوی دیجیتال فراتر از یک مدل سه‌بعدی یا ابزار شبیه‌سازی، به‌عنوان یک زیرساخت مدیریتی و تصمیم‌یار می‌تواند نقش موثری در ارتقای کارآمدی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری ایفا کند.

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که دوقلوی دیجیتال شهری را می‌توان در دو بعد اصلی مورد بررسی قرار داد: سطوح فضایی شامل ساختمان، خیابان، محله و شهر و سطوح عملکردی شامل فعال، پیش‌بینی‌کننده، برنامه‌پذیر و خودکار. این تقسیم‌بندی بیانگر آن است که کاربرد دوقلوی دیجیتال تنها محدود به مقیاس کلان شهر نیست، بلکه می‌تواند در مقیاس‌های مختلف فضایی و متناسب با نیازهای مدیریتی هر پروژه مورد استفاده قرار گیرد. در سطوح ابتدایی، این فناوری عمدتاً نقش بستری برای گردآوری، نمایش و پایش اطلاعات را دارد، اما با حرکت به سمت سطوح پیشرفته‌تر، قابلیت‌های تحلیلی، پیش‌بینی سناریوها، پیشنهاد راهکار و حتی انجام اقدامات خودکار در فرآیندهای مدیریتی افزایش می‌یابد.

بررسی سطوح مختلف عملکردی نشان داد که افزایش پیچیدگی دوقلوی دیجیتال، اگرچه نیازمند زیرساخت‌های فناورانه، داده‌های گسترده، ظرفیت‌های پردازشی و توانمندی‌های سازمانی بیشتری است، اما هم‌زمان موجب افزایش قابلیت آن در بهینه‌سازی فرآیند اجرای پروژه‌های شهری می‌شود. در سطوح فعال، مهم‌ترین دستاورد، افزایش آگاهی از وضعیت موجود و امکان پایش مستمر پروژه است. در سطوح پیش‌بینی‌کننده، امکان ارزیابی پیامدهای تصمیمات و پیش‌بینی مشکلات احتمالی فراهم می‌شود. در سطوح برنامه‌پذیر، فرآیندهای مدیریتی و اجرایی قابلیت تنظیم و بهینه‌سازی پیدا می‌کنند. در سطوح خودکار،

بخشی از فرآیندهای تصمیم‌گیری و کنترل می‌تواند بدون مداخله مستقیم انسانی انجام شود. بنابراین، حرکت از مدل‌های ساده اطلاعاتی به سمت مدل‌های هوشمند و خودکار، ظرفیت بیشتری برای کاهش عدم قطعیت و افزایش بهره‌وری پروژه‌های شهری ایجاد می‌کند.

نتایج بررسی مطالعات موردی نیز نشان داد که بهره‌گیری از دوقلوی دیجیتال می‌تواند از طریق یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی، زمانی، اقتصادی و محیطی، به بهبود شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه‌های شهری کمک کند. این فناوری با فراهم کردن امکان پایش پیشرفت پروژه، شناسایی انحرافات زمانی و مالی، آزمون سناریوهای مختلف پیش از اجرا، هماهنگی میان ذی‌نفعان و افزایش شفافیت اطلاعات، زمینه کاهش هزینه‌ها، کوتاه‌شدن زمان اجرا، ارتقای کیفیت، افزایش پایداری محیطی و بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری را فراهم می‌آورد. از این منظر، دوقلوی دیجیتال می‌تواند به‌عنوان ابزاری راهبردی برای افزایش تحقق‌پذیری پروژه‌های شهری و کاهش فاصله میان برنامه‌ریزی و اجرا مورد توجه قرار گیرد.

از منظر برنامه‌ریزی شهری، اهمیت این فناوری در تغییر رویکرد از برنامه‌ریزی ایستا و مبتنی بر داده‌های گذشته به سمت برنامه‌ریزی پویا، پیش‌بین و مبتنی بر شواهد است. دوقلوی دیجیتال می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری در ارزیابی عملکرد طرح‌ها، سنجش پیامدهای گزینه‌های مختلف توسعه، مدیریت هماهنگی میان سازمان‌ها، پایش تحقق اهداف طرح‌های شهری و تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر کمک کند. در نتیجه، این فناوری می‌تواند به‌عنوان یکی از ابزارهای پشتیبان در فرآیند تهیه، اجرا و ارزیابی طرح‌های شهری، به‌ویژه در شرایط پیچیده و چندذی‌نفعی شهرهای معاصر، مورد استفاده قرار گیرد.

با وجود ظرفیت‌های گسترده، پیاده‌سازی دوقلوی دیجیتال شهری با محدودیت‌هایی نیز مواجه است. وابستگی به زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته، دشواری دسترسی به داده‌های دقیق و به‌روز، نبود استانداردهای یکپارچه برای تبادل داده‌ها، هزینه‌های اولیه توسعه و نگهداری، کمبود نیروی انسانی متخصص و چالش‌های مرتبط با امنیت، مالکیت و حریم خصوصی داده‌ها از مهم‌ترین موانع اجرایی این فناوری محسوب می‌شوند. همچنین، بخش قابل‌توجهی از مطالعات موجود بر تجربه شهرهای توسعه‌یافته متمرکز بوده و تعمیم نتایج آن‌ها به شهرهای در حال توسعه نیازمند توجه به تفاوت‌های نهادی، اقتصادی و فناورانه است.

از محدودیت‌های پژوهش حاضر نیز می‌توان به ماهیت مروری و کیفی مطالعه اشاره کرد. به‌گونه‌ای که یافته‌ها بر اساس تحلیل ادبیات علمی و تجارب موجود استخراج شده‌اند و نیازمند آزمون و اعتبارسنجی در پروژه‌های واقعی شهری هستند. علاوه بر این، به دلیل نوظهور بودن مفهوم دوقلوی دیجیتال شهری، چارچوب‌های استاندارد برای ارزیابی میزان موفقیت، هزینه-فایده و سطح آمادگی شهرها برای پذیرش این فناوری همچنان در حال توسعه است.

در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که دوقلوی دیجیتال شهری، با وجود تفاوت در سطوح پیچیدگی و الزامات اجرایی، می‌تواند به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در مسیر هوشمندسازی مدیریت شهری و بهبود فرآیند اجرای پروژه‌ها عمل کند. با این حال، بهره‌گیری موثر از این فناوری نیازمند رویکردی جامع است که علاوه بر توسعه زیرساخت‌های فنی به ابعاد نهادی، مدیریتی و اجتماعی نیز توجه داشته باشد. از این‌رو، مطالعات آینده می‌توانند بر طراحی مدل‌های اجرایی متناسب با شرایط شهرهای مختلف، ارزیابی امکان‌سنجی اقتصادی، توسعه چارچوب‌های حکمرانی داده و بررسی سازوکارهای پذیرش این فناوری در میان مدیران، متخصصان و شهروندان متمرکز کنند.

پی‌نوشت

- 1- Digital Twin Smart City (DTSC)
- 2- Digital Twin (DT)
- 3- Chicago Area Transportation Study (CATS)
- 4- Key Performance Indicator (KPI)
- 5- Information and Communication Technologies (ICT)
- 6- CIRP Encyclopedia of Production Engineering
- 7- International Organization for Standardization (ISO)
- 8- International Electrotechnical Commission (IEC)
- 9- ISO/IEC 30173:2023
- 10- System of Systems
- 11- Passive
- 12- Predictive

- 13- Programmable
- 14- Autonomic
- 15- Digital Urban European Twins (DUET)
- 16- Data-as-a-Service
- 17- AI Trailblazers
- 18- ADAPT
- 19- IBM
- 20- ESRI
- 21- CityGML
- 22- Realimation
- 23- Building Information Modeling (BIM)
- 24- City Information Modeling (CIM)
- 25- G6
- 26- Extended Reality (XR)
- 27- Geographic Information System (GIS)
- 28- City Brain
- 29- Hangzhou Digital Twin Smart City (HCBI)
- 30- Hangzhou City Brain Innovation Hub (HCBIH)
- 31- Real-time
- 32- Passive Digital Twins
- 33- Predictive Digital Twins
- 34- Programmable Digital Twins
- 35- Autonomic Digital Twins

حامیان مالی: مقاله حامی مالی و معنوی نداشته است.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارد که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کند که از ابزار هوش مصنوعی ChatGPT به صورت محدود برای اصلاح و بهبود نگارش متن و شناسایی منابع اولیه مرتبط با تجارب بین‌المللی بررسی شده استفاده شده است. استفاده از هوش مصنوعی صرفاً به این موارد محدود بوده و محتوای علمی اصلی مقاله بر اساس منابع و مطالعات علمی ذکر شده تدوین شده است. نویسندگان تمامی پیشنهادهای تولید شده توسط ابزار هوش مصنوعی را بررسی و صحت‌سنجی کرده و مسئولیت کامل محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و نسخه نهایی مقاله را بر عهده دارد.

منابع

- Abdelrahman, M., Macatulad, E., Lei, B., Quintana, M., Miller, C., & Biljecki, F. (2025). What is a Digital Twin anyway? Deriving the definition for the built environment from over 15,000 scientific publications. *Building and Environment*, 274, 112748. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112748>.
- Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. *Journal of Urban Technology*, 22(1), 3–21. <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>.
- Alvi, M., Dutta, H., Minerva, R., Crespi, N., Raza, S. M., & Herath, M. (2025). Global perspectives on digital twin smart cities: Innovations, challenges, and pathways to a sustainable urban future. *Sustainable Cities and Society*, 126, 106356. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106356>.
- Ammouriova, M., Tsertsvadze, V., Juan, A. A., Fernandez, T., & Kapetas, L. (2024). On the Use of Machine Learning and Key Performance Indicators for Urban Planning and Design. *Applied Sciences*, 14(20), 9501. <https://doi.org/10.3390/app14209501>.
- Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>.



- Azadi, S., Kasraian, D., Nourian, P., & Wesemael, P. (2025). What Have Urban Digital Twins Contributed to Urban Planning and Decision Making? From a Systematic Literature Review Toward a Socio-Technical Research and Development Agenda. *Smart Cities*. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010032>.
- Bai, O., Shi, Y., & Wu, F. (2025). Pioneering the Post-Smart Cities Paradigm in Urban Innovation Ecosystems Governance: A Case Study of Hangzhou City-Brain Initiative. *Urban Policy and Research*. <https://doi.org/10.1080/08111146.2025.2456258>.
- Batty, M. (2018). *Inventing Future Cities*. MIT Press.
- Berntzen, L., Johannessen, M., & Florea, A. (2016). Sensors and the Smart City. *The Fifth International Conference on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies*.
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.
- Bolton, R., McColl-Kennedy, J. R., Cheung, L., Gallan, A., Orsingher, C., Witell, L., & Zaki, M. (2018). Customer experience challenges: Bringing together digital, physical and social realms. *Journal of Service Management*, 29(5), 776–808. <https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0113>.
- Bosch-Sijtsema, P., Claeson-Jonsson, C., Johansson, M., & Roupe, M. (2021). The hype factor of digital technologies in AEC. *Construction Innovation*, 21(3), 899–916. <https://doi.org/10.1108/CI-01-2021-0012>.
- Bringas, E. (2024). Leveraging Digital Twins towards an Occupancy-centric built environment: A review. *European Conference on Computing in Construction*.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>.
- Castelli, G., Cesta, A., Diez, M., Padula, M., Ravazzani, P., Rinaldi, G., ... Campana, E. F. (2019). Urban Intelligence: A modular, fully integrated, and evolving model for cities digital twinning. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/HONET.2019.8907962>.
- Christmann, G., & Schinagl, M. (2023). Digitalisation in everyday urban planning activities: Consequences for embodied practices, spatial knowledge, planning processes, and workplaces. *Journal of Urban Management*, 12(2), 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2023.02.003>.
- Dang, X., Liu, W., Hong, Q., Wang, Y., & Chen, X. (2023). Digital twin applications on cultural world heritage sites in China: A state-of-the-art overview. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 228–243. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.06.003>.
- data.europa.eu. (2025). *Smart cities and digital twin technology: The case of Dublin*. <https://data.europa.eu/sites/default/files/course/Webinar%20smart%20city%20Dublin%20-%20Slides.pdf>.
- Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z. (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>.
- Diaz-Sarachaga, J. M. (2025). Developing an assessment governance framework for urban digital twins: Insights from smart cities. *Cities*. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105558>.
- European Commission. (2023). *Digital Urban European Twins for smarter decision making*.
- Ferré-Bigorra, J., Casals, M., & Gangolells, M. (2022). The adoption of urban digital twins. *Cities*, 131, 103905. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905>.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
- Garg, S., & Sharma, R. (2023). Smart infrastructure: Role of information technology in Smart Cities. *Sustainable Technology for Society 5.0*.
- Grieves, M. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- Grieves, M., & Vickers, J. (2016). *Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems*. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- Hämäläinen, M. (2021). Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities*, 3(4), 201–210. <https://doi.org/10.1049/smc2.12021>.

- Han, Y., Cai, J., Ma, E., Du, S., & Lin, J. (2023). Understanding Smart City Practice in Urban China: A Governance Perspective. *Sustainability*, 15(7), 5986. <https://doi.org/10.3390/su15075986>.
- Haque, A., Bhushan, B., & Dhiman, G. (2022). Conceptualizing smart city applications: Requirements, architecture, security issues, and emerging trends. *Expert Systems*, 39(7), e12953. <https://doi.org/10.1111/exsy.12953>.
- Hongyan, W., & Zhen, L. (2022, April 2). Xiong'an New Area a mirror of future China. *People's Daily Online*. <https://en.people.cn/n3/2022/0402/c90000-10079267.html>.
- Hu, L. (2023). Research on the application of digital twin in smart cities. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 14, 14–20. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/14/20230206>.
- Jeddoub, I., Nys, G.-A., Hajji, R., & Billen, R. (2023). Digital Twins for cities: Analyzing the gap between concepts and current implementations with a specific focus on data integration. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103394. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103394>.
- Julien, N., & Martin, E. (2021). How to characterize a Digital Twin: A usage-driven classification. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 894–899. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.104>.
- 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*. <https://www.jstor.org/stable/45299343>.
- Kitchin, R. (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8>.
- Kiviahio, A., & Einolander, J. (2023). Digital transformation, well-being and shrinking communities: Narrowing the divides between urban and rural. *Heliyon*, 9(11), e21700. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21700>.
- Kozlowski, W., & Suwar, K. (2021). Smart City: Definitions, Dimensions, and Initiatives. *European Research Studies Journal*, 24(Special Issue 3), 509–520. <https://doi.org/10.35808/ersj/2442>.
- Law, K., & Lynch, J. (2019). Smart City: Technologies and Challenges. *IEEE International Conference Proceedings*, 46–51. <https://doi.org/10.1109/MITP.2019.2935405>.
- Liu, C., & Tian, Y. (2023). Recognition of digital twin city from the perspective of complex system theory: Lessons from Chinese practice. *Journal of Urban Management*, 12(2), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2023.03.002>.
- Love, P. E. D., Matthews, J., Simpson, I., Hill, A., & Olatunji, O. A. (2014). A benefits realization management building information modelling framework for asset owners. *Automation in Construction*, 37, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.007>.
- Luo, J., Liu, P., Xu, W., Zhao, T., & Biljecki, F. (2025). A perception-powered urban digital twin to support human-centered urban planning and sustainable city development. *Cities*, 157, 105620. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105620>.
- Maynooth University. (2025, August 15). Maynooth University Social Sciences Institute: Smart Dublin Adapt Digital Twin. <https://www.maynoothuniversity.ie/social-sciences-institute/research/smart-dublinadapt-digital-twin>.
- Mohammadi, N., & Taylor, J. (2017). Smart City Digital Twins. *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. <https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285439>.
- NAIS. (2023). *AI for the Public Good For Singapore and the World*. Singapore: NAIS (Singapore National AI Strategy). https://www.edb.gov.sg/content/dam/edb-en/business-insights/market-and-industry-reports/singapores-national-ai-strategy-ai-for-the-public-good-for-singapore-and-the-world/nais2023.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- Neugebauer, J., Heilig, L., & Voß, S. (2024). Digital Twins in the Context of Seaports and Terminal Facilities. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 36, 821–917. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09515-9>.
- Patrick, B. (2018, April 23). Meet Boston's Digital Twin. *Esri*. <https://www.esri.com/about/newsroom/blog/3d-gis-boston-digital-twin>.
- Peldon, D., Banihashemi, S., LeNguyen, K., & Derrible, S. (2024). Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105558>.



- Ruohomäki, T., Airaksinen, E., Huuska, P., Kesäniemi, O., Martikka, M., & Suomisto, J. (2018). Smart City Platform Enabling Digital Twin. International Conference on Intelligent Systems. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710517>.
- Sacks, R., Girolami, M., & Brilakis, I. (2020). Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech. *Developments in the Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>.
- Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 99–112. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>.
- Schuurman, D., Baccarne, B., De Marez, L., & Mechant, P. (2012). Smart Ideas for Smart Cities: Investigating Crowdsourcing for Generating and Selecting Ideas for ICT Innovation in a City Context. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*. <https://doi.org/10.4067/S0718-18762012000300006>.
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., & Wang, L. (2010). Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap. *National Aeronautics and Space Administration*, NASA. https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap.
- Shahat, E., Hyun, C., & Yeom, C. (2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063381>.
- Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2020). Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions. *arXiv*.
- SmartNation. (2024). SmartNation: A Thriving Digital Future for All. *Ministry of Digital Development and Information*.
- Smits, P. (2019). Rotterdam and IBM Building the Port of the Future. *Rotterdam: Port of Rotterdam Authority*.
- Tan, S., & Taeihagh, A. (2020). Smart City Governance in Developing Countries: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/su12030899>.
- Testolina, P., Polese, M., Johari, P., & Melodia, T. (2024). BostonTwin: the Boston Digital Twin for Ray-Tracing in 6G Networks. *arXiv*.
- Towards Sustainable and Smart Cities: Replicable and KPI-Driven Evaluation Framework. (2022). *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings12070948>.
- Trencher, G. (2019). Towards the smart city 2.0: Empirical evidence of using smartness as a tool for tackling social challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.033>.
- Wan, L., Nochta, T., Tang, J., & Schooling, J. (2023). *Digital Twins for Smart Cities: Conceptualisation, challenges and practices*. ICE Publishing.
- Wang, H., Chen, X., Jia, F., & Cheng, X. (2023). Digital twin-supported smart city: Status, challenges and future research directions. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121962>.
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>.
- Yang, S., & Kim, H. (2021). Urban digital twin applications as a virtual platform of smart city. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 12(4), 363–379. <https://doi.org/10.22712/susb.20210031>.
- Yeo, S. (2023). Negotiating digital urban futures: The limits and possibilities of future-making in Singapore. *Transactions of the Institute of British Geographers*. <https://doi.org/10.1111/tran.12616>.