



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Development of a conceptual model for digital twin in urban infrastructure management and maintenance

Mihan Hosseinnjad^{1*}, zeinab Asghari²

*1- Assitant Prof. Department of Computer Engineering, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran.

2- Assitant Prof. Department of Computer Engineering, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran.

Received: 16 November 2025; Revised: 18 December 2025; Accepted: 20 December 2025; Published: 20 February 2026

Abstract

In recent years, the management and maintenance of urban infrastructure have faced major challenges due to increasing system complexity, asset aging, and limited financial and human resources. Traditional maintenance approaches, which are largely reactive and performed after failures occur, are no longer sufficient to effectively address these challenges. In this context, Digital Twin technology has emerged as a promising solution with significant potential to enhance monitoring, analysis, and decision-making processes in urban infrastructure management. However, a review of existing studies reveals that most prior research has focused on partial applications or limited simulations, while comprehensive and integrated conceptual frameworks for urban infrastructure maintenance have received comparatively little attention. The objective of this study is to develop a layered conceptual model for Digital Twins with a focus on urban infrastructure management and maintenance. The research methodology is based on a systematic literature review, analysis of existing frameworks, and the design of an integrated conceptual architecture. The proposed model consists of key layers, including the physical layer, sensing and Internet of Things (IoT) layer, data and processing layer, Digital Twin modeling layer, artificial intelligence and machine learning layer, and the decision-making and urban governance layer. This architecture enables real-time monitoring, predictive analysis of infrastructure conditions, and effective support for urban managers' decision-making. The results of the conceptual analysis indicate that the proposed model, by linking real-time data with intelligent analytics, can enhance predictive maintenance, optimize resource allocation, and improve the resilience of urban infrastructure systems. By presenting a comprehensive conceptual framework, this study provides a foundation for the development of intelligent infrastructure management systems and supports future applied and empirical research.

Keywords: Digital Twin, Urban Management, Smart City, Conceptual Framework, System Architecture, Internet of Things (IoT).

Cite this article as Shirzad,F and Mohammadizadeh,M . (2026). Developing Key Performance Indicators (KPIs) to evaluate the effectiveness of value engineering in industrial projects. (e237019). Civil and Project, 7(12), e237019
doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.566696.1421>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

توسعه یک مدل مفهومی برای همزاد دیجیتال در مدیریت و نگهداری زیرساخت شهری

میهن حسین نژاد^{۱*}، زینب اصغری^۲

*۱- استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، مهندسی نرم افزار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس، جلفا، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، مهندسی نرم افزار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس، جلفا، ایران.

تاریخ دریافت: ۲۵ آبان ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۲۷ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۲۹ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ اسفند ۱۴۰۴

چکیده

در سال‌های اخیر، مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های شهری با چالش‌هایی نظیر افزایش پیچیدگی سیستم‌ها، فرسودگی دارایی‌ها و محدودیت منابع مالی و انسانی مواجه شده است. رویکردهای سنتی نگهداری، که عمدتاً مبتنی بر واکنش پس از بروز خرابی هستند، توان پاسخ‌گویی مؤثر به این چالش‌ها را ندارند. در این راستا، همزاد دیجیتال به عنوان یک فناوری نوظهور، ظرفیت قابل توجهی برای بهبود فرآیندهای پایش، تحلیل و تصمیم‌سازی در مدیریت زیرساخت‌های شهری فراهم می‌آورد. با این حال، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها بر کاربردهای جزئی یا شبیه‌سازی‌های محدود تمرکز داشته و یک چارچوب مفهومی جامع و یکپارچه برای نگهداری زیرساخت‌های شهری کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هدف این پژوهش، توسعه یک مدل مفهومی لایه‌ای برای همزاد دیجیتال با تمرکز بر مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های شهری است. روش تحقیق مبتنی بر مرور نظام‌مند ادبیات پژوهش، تحلیل چارچوب‌های موجود و طراحی یک معماری مفهومی یکپارچه است. مدل پیشنهادی از لایه‌های اصلی شامل لایه فیزیکی، حسگری و اینترنت اشیاء، داده و پردازش، مدل‌سازی همزاد دیجیتال، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، و تصمیم‌سازی و حکمرانی شهری تشکیل شده است. این ساختار امکان پایش بلادرنگ، تحلیل پیش‌نگر وضعیت زیرساخت‌ها و پشتیبانی مؤثر از تصمیم‌گیری مدیران شهری را فراهم می‌کند.

نتایج حاصل از تحلیل مفهومی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی با ایجاد پیوند میان داده‌های بلادرنگ و تحلیل‌های هوشمند، قابلیت ارتقای نگهداری پیش‌نگر، بهینه‌سازی تخصیص منابع و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری را دارد. این پژوهش با ارائه یک چارچوب مفهومی جامع، می‌تواند به عنوان مبنایی برای توسعه سامانه‌های هوشمند مدیریت زیرساخت و انجام مطالعات کاربردی و تجربی در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: همزاد دیجیتال، مدیریت شهری، شهر هوشمند، چارچوب مفهومی، معماری سیستم، اینترنت اشیاء.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mihan.hossennejad@iaui.ac.ir

۱- مقدمه

رشد روزافزون جمعیت شهرها و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی در آنها، فشار فزاینده‌ای را بر زیرساخت‌های حیاتی شهری، از جمله شبکه‌های حمل‌ونقل، آب و انرژی، وارد کرده است. روش‌های مدیریتی سنتی که اغلب پس از وقوع مشکل (واکنشی) وارد عمل می‌شوند، دیگر برای دنیای پیچیده و پویای امروز کافی به نظر نمی‌رسند و مدیریت شهری را با چالش‌های جدی مواجه کرده‌اند [1]. در چنین شرایطی، فناوری‌های برخاسته از انقلاب صنعتی چهارم، مسیری تازه پیش روی ما قرار داده‌اند و در این میان، پارادایم همزاد دیجیتال به عنوان یک راهکار امیدبخش برای هوشمندسازی مدیریت شهری ظهور کرده است. به زبان ساده، همزاد دیجیتال یک کپی مجازی و زنده از یک سیستم واقعی (مانند یک پل، یک شبکه آبرسانی یا حتی کل شهر) است که به لطف داده‌های لحظه‌ای دریافتی از حسگرهای اینترنت اشیا، همواره به‌روز باقی می‌ماند. این فناوری، یک پل ارتباطی دوطرفه میان دنیای فیزیکی و دیجیتال می‌سازد [2]. چنین ارتباطی به مدیران اجازه می‌دهد تا نه تنها وضعیت فعلی زیرساخت‌ها را به صورت زنده نظارت کنند، بلکه با استفاده از ابزارهایی مانند هوش مصنوعی، سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کرده، رفتار آینده سیستم را پیش‌بینی و فرآیندهای نگهداری و تعمیرات را از حالت واکنشی به «پیش‌بینانه» تبدیل کنند [2,3]

با این حال، پیاده‌سازی این فناوری در مقیاس یک شهر کامل، چالش‌های مفهومی و فنی فراوانی را به همراه دارد. شاید بزرگترین مانع، نبود یک نقشه راه یا چارچوب معماری یکپارچه باشد که بتواند پیچیدگی‌های عظیم داده‌ها، تنوع سیستم‌ها و نیاز به هماهنگی میان سازمان‌های مختلف را مدیریت کند. اغلب پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون، یا بر روی جنبه‌های بسیار خاصی از این فناوری تمرکز کرده‌اند یا به مطالعه موردی یک کاربرد محدود، مانند یک ساختمان یا یک منطقه خاص، پرداخته‌اند [4]؛ اما کمتر تحقیقی به ارائه یک الگوی جامع و کلان پرداخته است.

روش‌های فرآیندکاری از اطلاعات به‌دست‌آمده از نقاط قبلی به‌عنوان راهنما برای انتخاب نقطه یا نقاط بعدی استفاده می‌کنند. این روش‌ها که با عنوان الگوریتم‌های بهینه‌سازی شناخته می‌شوند، در پی برقراری تعادل میان تنوع‌بخشی در فضای جست‌وجو و تشدید (تمرکز) نتایج هستند. الگوریتم‌های فرآیندکاری قادرند مسائل متنوعی را حل کنند، بدون آنکه رفتار مناسب تابع هدف شرط لازم باشد و یا محدودیتی از نظر گسسته یا پیوسته بودن فضای جست‌وجو وجود داشته باشد [5].

در پاسخ به همین خلاء، پژوهش حاضر "توسعه یک مدل مفهومی و چارچوب معماری برای پیاده‌سازی همزاد دیجیتال در مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های شهری" را هدف قرار داده است. ما در این مقاله قصد داریم یک ساختار لایه‌بندی‌شده و نظام‌مند ارائه دهیم که اجزای کلیدی، جریان داده‌ها، فناوری‌های لازم و اصول حاکمیتی برای ساخت یک همزاد دیجیتال شهری را به وضوح تعریف کند. امید است این چارچوب مفهومی بتواند به عنوان یک راهنمای عملی برای مدیران شهری عمل کرده و آن‌ها را در مسیر حرکت به سوی مدیریت هوشمند و داده‌محور زیرساخت‌ها یاری رساند. در ادامه، پس از مرور کارهای پیشین، چارچوب پیشنهادی خود را معرفی کرده و الزامات و مزایای آن را به بحث خواهیم گذاشت.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

این بخش به بررسی و تحلیل عمیق پیشینه تحقیق موضوع در سه حوزه اصلی می‌پردازد: ابتدا، به چالش‌های نوین در مدیریت زیرساخت‌های شهری پرداخته می‌شود؛ سپس، مفاهیم همزاد دیجیتال به عنوان یک پارادایم تحول‌آفرین معرفی و ابعاد فنی آن اشریح می‌گردد؛ و در نهایت، با مرور مطالعات موردی و کاربردهای موجود، خلاء تحقیقاتی که این پژوهش به دنبال پر کردن آن است، به وضوح تبیین می‌شود.

۱-۲ چالش‌های نوین در مدیریت زیرساخت‌های شهری

مدیریت زیرساخت‌های شهری به طور سنتی در پارادایم «کنترل و فرماندهی» محصور بوده است؛ یک رویکرد عمدتاً واکنشی که در آن داده‌ها در دژهای سازمانی محبوس‌اند. این رویکرد در مواجهه با سیستم‌های شهری که به طور فزاینده‌ای پیچیده، به هم‌پیوسته و تحت فشار هستند، کارایی خود را از دست داده است. چالش‌های اصلی در این حوزه شامل داده‌های جزیره‌ای، که در آن هر سازمان (مانند آب، برق، حمل‌ونقل) داده‌های خود را به صورت مجزا نگهداری می‌کند، عدم وجود دیدگاه کل‌نگر نسبت به عملکرد شهر، و هزینه‌های بالای نگهداری واکنشی است [1]. این ناکارآمدی ساختاری، توانایی شهرها را برای بهینه‌سازی عملکرد و مدیریت تاب‌آورانه بحران‌ها، به شدت تضعیف و اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

۲-۲. همزاد دیجیتال: تعریف، ویژگی‌ها و تمایز از مفاهیم مشابه

همزاد دیجیتال پاسخی به این چالش‌هاست. در بنیادی‌ترین تعریف، یک همزاد دیجیتال شامل سه بخش است: یک محصول فیزیکی، یک همتای مجازی، و یک اتصال داده پویا و دوسویه میان آن دو [2]. برخلاف مدل‌های سه‌بعدی ایستا، یک همزاد دیجیتال، یک موجودیت «زنده» است که با استفاده از داده‌های لحظه‌ای، وضعیت، موقعیت و شرایط همتای فیزیکی خود را بازتاب می‌دهد [3]. این تعریف، تمایز آن را با مفاهیم نزدیک اما متفاوت، حیاتی می‌سازد:

- مدل‌سازی اطلاعات ساختمان: مدل‌سازی اطلاعات ساختمان یک منبع داده غنی در مورد «مشخصات طراحی و ساخت» یک دارایی است. در حالی که مدل‌سازی اطلاعات ساختمان یک ورودی حیاتی برای ساخت همزاد دیجیتال محسوب می‌شود، اما به خودی خود یک همزاد دیجیتال نیست، زیرا فاقد داده‌های عملیاتی و به‌روزرسانی لحظه‌ای است. همزاد دیجیتال، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را با داده‌های زنده اینترنت اشیا ترکیب کرده و آن را از یک مدل "آن‌طور که ساخته شد" به یک مدل "آن‌طور که هست" تبدیل می‌کند. [7]
- سیستم اطلاعات جغرافیایی: سیستم اطلاعات جغرافیایی بستر مکانی و زمینه شهری را فراهم می‌کند، اما مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، عمدتاً با داده‌های ایستا یا با نرخ به‌روزرسانی پایین کار می‌کند. در یک اکوسیستم یکپارچه، سیستم اطلاعات جغرافیایی لایه زمینه را برای همزاد دیجیتال فراهم می‌آورد. قدرت واقعی همزاد دیجیتال، در ترکیب هنرمندانه این دو سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و دمیدن روح داده‌های زنده در کالبد آن‌هاست. در پژوهشی که نگارستانی و همکاران در سال ۲۰۲۴ انجام دادند، از الگوریتم گرگ خاکستری برای معرفی یک ساختار سبز در یک ناحیه شهری با حداقل میزان انتشار دی‌اکسید کربن به محیط‌زیست استفاده شد. در این مطالعه، میزان مطلوبیت توابع هدف برای هر یک از سیستم‌های سازه‌ای مورد بررسی محاسبه گردید و سه راه‌حل برتر به‌عنوان گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا تا پایان اجرای الگوریتم انتخاب شدند. در هر تکرار، پس از تعیین موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا، موقعیت سایر راه‌حل‌ها بر اساس آن‌ها به‌روزرسانی شد. [6]

۲-۳ فناوری‌های توانمندساز همزاد دیجیتال شهری

ساخت یک همزاد دیجیتال شهری، نیازمند یک اکوسیستم پیچیده از فناوری‌های مختلف است:

- اینترنت اشیا: اینترنت اشیا داده‌های واقعی را از طریق حسگرها جمع‌آوری کرده و به همزاد دیجیتال می‌فرستد، که مدل مجازی آن شیء است؛ اینترنت اشیا داده‌های حیاتی مثل ترافیک، کیفیت هوا، لرزش سازه‌ها و مصرف انرژی را جمع‌آوری می‌کند تا همزاد دیجیتال بتواند عملکرد، مشکلات و رفتار آن شیء را در دنیای واقعی شبیه‌سازی و پیش‌بینی کند و امکان بهینه‌سازی، آزمایش و نگهداری از راه دور را فراهم آورد، که این ارتباط برای ساخت سیستم‌های هوشمند و متاورس حیاتی است.
- رایانش ابری و لبه‌ای: رایانش ابری، قدرت پردازش و ذخیره‌سازی لازم برای حجم عظیم داده‌ها را فراهم می‌کنند، در حالی که رایانش لبه‌ای، تحلیل‌های سریع و واکنش‌های فوری را در نزدیکی منبع داده ممکن می‌سازد [2,7].

• **هوش مصنوعی و یادگیری ماشین:** این الگوریتم‌ها قدرت تحلیلی همزاد دیجیتال هستند که با تحلیل الگوها و پیش بینی ناهنجاری‌ها و تشخیص و یادگیری از داده‌های تاریخی، قابلیت‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی را فراهم می‌آورند.

• **فناوری ارتباطی پیشرفته:** فناوری‌های ارتباطی پیشرفته با تأخیر کم و پهنای باند بالا، جریان داده‌های لحظه‌ای را تضمین می‌کند، در حالی که شبکه‌های کم‌مصرف برای حسگرهای پراکنده در سطح شهر ایده‌آل هستند.

۲-۴ مرور کاربردها و مطالعات موردی

در سال‌های اخیر، چندین شهر در سراسر جهان پروژه‌های همزاد دیجیتال را با موفقیت‌های متفاوتی آغاز کرده‌اند. "سنگاپور مجازی"، یک نمونه از پیشگامان این حوزه در ساخت یک مدل غنی دیجیتال از کل کشور برای شبیه‌سازی‌های شهری، از برنامه ریزی حمل و نقل گرفته تا تأثیر زیست‌محیطی، ایجاد کرده است. شهرهای اروپایی مانند هلسینکی و هرنبرگ آلمان نیز از فناوری همزاد دیجیتال برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها و مشارکت شهروندان در برنامه‌ریزی شهری بهره‌برده‌اند. [4, 8] اما با نگاهی دقیق‌تر، یک الگوی تکرارشونده را در اغلب این تلاش‌ها می‌بینیم: آن‌ها معمولاً یا روی یک حوزه بسیار خاص (مثلاً فقط ترافیک) متمرکز شده‌اند یا بیشتر یک پروژه نمایشی و زیبا بوده‌اند تا یک سیستم مدیریتی یکپارچه. آن‌ها مانند ساختن یک نقشه بسیار دقیق از یک محله، بدون اتصال آن به بقیه شهر، عمل کرده‌اند.

۲-۵ خلأهای پژوهشی و جایگاه تحقیق حاضر

بررسی جامع ادبیات به یک نتیجه جامع و قاطع منجر می‌شود که در حوزه همزاد دیجیتال شهری با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در کاربردهای موردی، یک خلأ مشخص در زمینه ارائه یک چارچوب معماری جامع، استاندارد و مقیاس‌پذیر وجود دارد. پژوهشگران و متخصصان، به جای پیروی از یک مدل مرجع، اغلب مجبور به ابداع راه‌حل‌های سفارشی و جزیره‌ای هستند. این امر منجر به ایجاد سیستم‌های غیرقابل تعامل، افزایش هزینه‌ها و دشواری در توسعه و یکپارچه‌سازی همزادهای دیجیتال در مقیاس کلان‌شهر می‌شود. در این مقاله دقیقاً برای پر کردن همین خلأ نوشته شده است. ما به دنبال ارائه یک مدل مفهومی هستیم که به عنوان یک زبان مشترک و نقشه راه برای همه کسانی که می‌خواهند شهری هوشمندتر بسازند، عمل کند و مسیر حرکت از پروژه‌های پراکنده به سوی یک سیستم شهری یکپارچه را هموار سازد.

۳. روش‌شناسی پژوهش: فرآیند طراحی یک نقشه معماری

این پژوهش، یک تحقیق توسعه‌ای-کیفی است که هدف آن، نه آزمون فرضیه، بلکه ساخت یک چارچوب مفهومی است. برای اطمینان از دقت، جامعیت و اعتبار علمی، از یک روش‌شناسی نظام‌مند و چند مرحله‌ای تحت عنوان "سننژ چارچوب مبتنی بر مرور نظام‌مند ادبیات" استفاده شد. این فرآیند، این روش، ابزاری قدرتمند برای تولید تئوری‌ها و مدل‌های جدید از طریق تحلیل و یکپارچه‌سازی انتقادی دانش موجود است. هدف ما برای ساخت این نقشه در پنج مرحله انجام شد:

گام اول: تدوین پرسش تحقیق و تعیین محدوده.

پژوهش با تدوین یک پرسش کانونی آغاز شد: "لایه‌ها، اجزا و ابعاد کلیدی یک چارچوب معماری جامع برای پیاده‌سازی همزاد دیجیتال در مدیریت زیرساخت‌های شهری کدامند؟" برای تعیین محدوده مرور ادبیات، از چارچوب SPICE¹ استفاده شد تا از پوشش کامل و جامع موضوع اطمینان حاصل شود.

گام دوم: جستجو و انتخاب نظام‌مند منابع

با استفاده از یک پروتکل جستجوی دقیق در پایگاه‌های داده علمی معتبر مانند Scopus ACM، Web of Science و Digital Library و IEEE Xplore، ما به دنبال مقالات، گزارش‌های فنی و استانداردهایی که بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ منتشر شده بودند، تنها منابعی را انتخاب کردیم که مستقیماً به معماری و چارچوب‌های همزاد دیجیتال شهری پرداخته بودند.

¹ Setting, Perspective, Intervention, Comparison, Evaluation

گام سوم: استخراج و کدگذاری داده‌ها

یک فرم استاندارد برای استخراج داده‌های کلیدی از هر مقاله طراحی شد. این داده‌ها شامل: تعاریف پیشنهادی، لایه‌های معماری، اجزای هر لایه، فناوری‌های کلیدی، چالش‌های مطرح‌شده، و اصول حاکمیتی (مانند امنیت و تعامل‌پذیری) بودند. سپس، با استفاده از رویکرد تحلیل شماییک، فرآیند کدگذاری باز، محوری و انتخابی بر روی داده‌های استخراج‌شده انجام گرفت تا مفاهیم و الگوهای تکرارشونده در سراسر ادبیات شناسایی شوند.

گام چهارم: چارچوب و مدل‌سازی مفهومی

این مرحله، قلب فرآیند پژوهش است. کدها و تم‌های استخراج‌شده از مرحله قبل، مورد تحلیل و دسته‌بندی قرار گرفتند. مفاهیم مرتبط در گروه‌های منطقی (مانند «گردآوری داده» یا «تحلیل») سازماندهی شدند. سپس، با الهام از معماری‌های مرجع در مهندسی سیستم و رایانش ابری، این گروه‌ها به ساختارهای لایه‌ای با جریان داده منطقی (از پایین به بالا) مرتب شدند. روابط و وابستگی‌های بین لایه‌ها تعریف گردید. در این مرحله، ابعاد فراگیری^۲ که در تمام لایه‌ها مانند امنیت، موضوعیت داشتند شناسایی و به مدل اضافه شدند. خروجی این مرحله، پیش‌نویس اولیه چارچوب مفهومی بود.

گام پنجم: پالایش و اعتبارسنجی مفهومی

چارچوب اولیه از منظر شاخص‌هایی چون جامعیت، انسجام منطقی و قابلیت تعمیم مورد بازبینی و پالایش قرار گرفت. این اعتبارسنجی مفهومی از طریق مقایسه چارچوب با اصول شناخته‌شده مهندسی سیستم و اطمینان از اینکه مدل پیشنهادی به چالش‌های کلیدی شناسایی‌شده در بخش ادبیات پاسخ می‌دهد، انجام شد. نتیجه نهایی این فرآیند، چارچوب مفهومی است که در بخش بعد به صورت کامل و جامع ارائه می‌گردد.

۴- چارچوب مفهومی پیشنهادی: معماری یکپارچه همزاد دیجیتال شهری

با توجه به پیچیدگی فزاینده زیرساخت‌های شهری و نیاز به تصمیم‌گیری‌های هوشمند، یک مدل مفهومی جامع برای همزاد دیجیتال می‌تواند به عنوان چارچوبی یکپارچه جهت جمع‌آوری، تحلیل و بهره‌برداری از داده‌ها در فرآیند مدیریت و نگهداری زیرساخت‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مدل مفهومی پیشنهادی این پژوهش، با تمرکز بر تعامل پویا میان سیستم فیزیکی و دیجیتال، بستری برای پایش بلادرنگ، پیش‌بینی خرابی‌ها و بهینه‌سازی تصمیم‌های مدیریتی فراهم می‌کند. چارچوب پیشنهادی، یک معماری مرجع چندلایه‌ای است که به عنوان یک نقشه ساخت برای طراحی و پیاده‌سازی همزادهای دیجیتال شهری عمل می‌کند [9,7]. معماری پیشنهادی شکل (۱) شامل پنج لایه عملیاتی اصلی است که توسط دو بعد فراگیر و حیاتی پشتیبانی می‌شوند.

۴-۱. لایه‌های عملیاتی

لایه ۱: لایه فیزیکی و گردآوری داده

این لایه، نقطه اتصال دنیای فیزیکی و دیجیتال و بنیان کل معماری است. عملکرد این لایه، گردآوری داده‌های خام و متنوع از محیط شهری است. که شامل اجزای ذیل می‌باشد:

- دارایی‌های فیزیکی: زیرساخت‌های شهری (پل‌ها، ساختمان‌ها، شبکه‌ها).
- شبکه‌های حسگری: سنسورهای اینترنت اشیا برای ترافیک، کیفیت هوا، مصرف انرژی، دوربین‌های نظارتی.
- ابزارهای پایش میدانی: پهپادها، اسکنرهای لیزری برای ساخت مدل‌های سه‌بعدی.
- منابع داده ایستا: مدل‌های BIM، داده‌های GIS، داده‌های تاریخی و آماری.

لایه ۲: لایه ارتباطات و یکپارچه‌سازی

این لایه، نقش سیستم گردش اصلی را ایفا کرده و جریان امن و پایدار داده را تضمین می‌کند. عملکرد این لایه انتقال داده‌ها از منابع پراکنده به لایه پردازش و فراهم‌سازی بستر یکپارچگی است و شامل اجزای شبکه‌های ارتباطی، پروتکل‌های

² Cross-Cutting Concerns

پیام رسانی برای تبادل داده‌های اینترنت اشیا، دروازه‌های ارتباطی جهت تجمیع داده‌ها از حسگرها و ترجمه پروتکل‌ها و واسطه‌های برنامه‌نویسی کاربردی برای یکپارچه‌سازی با سیستم‌های نرم افزاری موجود می‌باشد.



شکل ۱: معماری لایه‌ای مدل پیشنهادی

لایه ۳: لایه مدیریت و پردازش داده

این لایه، انبار و کارخانه پردازش داده‌های خام است. که ذخیره‌سازی، پاک‌سازی، پیش‌پردازش و مدیریت حجم عظیم داده‌ها را برعهده دارد. می‌توان گفت شامل اجزای زیرساخت ابری/ لبه‌ای برای ذخیره‌سازی و پردازش مقیاس‌پذیر و ذخیره داده‌های خام و بدون ساختار.

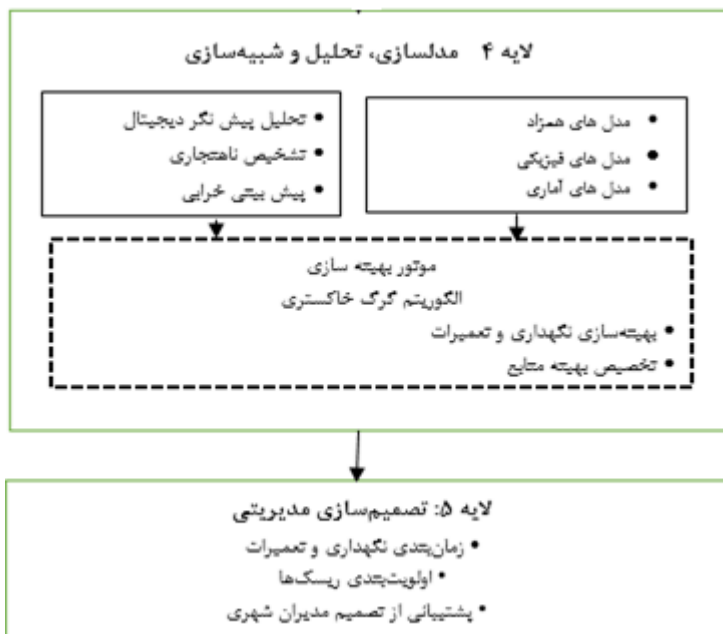
لایه ۴: لایه مدل‌سازی، تحلیل و شبیه‌سازی

این لایه، مغز متفکر و قلب تپنده همزاد دیجیتال است. کارکرد اصلی این لایه تبدیل داده‌های پردازش‌شده به دانش، بصیرت و قابلیت پیش‌بینی برای مدیریت زیرساخت‌ها است. شامل موتور مدل‌سازی برای ایجاد و به‌روزرسانی مدل‌های مجازی (فیزیکی، آماری) و موتور تحلیلی جهت الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، تحلیل تشخیصی برای کشف ناهنجاری و تشخیص علت ریشه‌ای خطا و همچنین تحلیل پیش‌بینانه به جهت پیش‌بینی خرابی، پیش‌بینی تقاضا می‌باشد.

• نقش الگوریتم‌های فراابتکاری در لایه مدل‌سازی و تحلیل

در لایه چهارم معماری پیشنهادی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی به‌عنوان هسته تحلیلی همزاد دیجیتال ایفای نقش می‌کنند. در این میان، الگوریتم گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimizer) به‌عنوان یک الگوریتم فراابتکاری، در زیرلایه «تحلیل پیش‌نگر و بهینه‌سازی» این لایه قرار می‌گیرد. در چارچوب پیشنهادی، داده‌های پردازش‌شده زیرساختی که از لایه سوم دریافت می‌شوند، به‌عنوان ورودی الگوریتم گرگ خاکستری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الگوریتم با مدل‌سازی رفتار جمعی گرگ‌ها، فرآیند جست‌وجو و بهینه‌سازی را برای تعیین بهترین سناریوهای نگهداری، تخصیص منابع یا طراحی ساختارهای بهینه انجام می‌دهد. خروجی این فرآیند، شامل مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه یا شبه‌بهینه است که مستقیماً به لایه پنجم (کاربرد و تصمیم‌سازی) منتقل می‌شود.

بدین ترتیب، الگوریتم گرگ خاکستری به عنوان یکی از ابزارهای تحلیلی لایه ۴، نقش پل میان داده‌های زیرساختی و تصمیم‌سازی مدیریتی را ایفا می‌کند و در قالب یک جزء قابل جایگزینی با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در معماری پیشنهادی تعریف می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، الگوریتم گرگ خاکستری به عنوان بخشی از موتور بهینه‌سازی در لایه چهارم معماری پیشنهادی قرار گرفته و نقش واسط میان داده‌های پردازش‌شده و تصمیم‌سازی مدیریتی را ایفا می‌کند.



شکل ۲- جایگاه الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) در لایه مدلسازی، تحلیل و شبیه‌سازی معماری پیشنهادی همزاد دیجیتال

لایه ۵: لایه کاربرد و خدمات

این لایه، رابط کاربری همزاد دیجیتال با دنیای انسان‌ها و سایر ماشین‌ها است که نتایج تحلیل‌ها را به اقدامات اجرایی تبدیل می‌کند. از جمله می‌توان به پیشنهاد زمان و نوع تعمیرات، اولویت‌بندی پروژه‌های نگهداری، ارزیابی ریسک و هزینه- سود و پشتیبانی از سیاست‌گذاری شهری اشاره کرد و می‌توان گفت که این لایه امکان تعامل مدیران شهری با همزاد دیجیتال از طریق داشبوردهای مدیریتی را فراهم می‌سازد.

مدل مفهومی پیشنهادی همزاد دیجیتال، با ایجاد پیوندی منسجم میان داده، مدل‌سازی و تصمیم‌گیری، چارچوبی نوین برای مدیریت و نگهداری هوشمند زیرساخت‌های شهری ارائه می‌دهد. این مدل زمینه‌ساز گذار از نگهداری واکنشی به نگهداری پیش‌بینانه و مبتنی بر داده خواهد بود. به منظور ارزیابی میزان نوآوری و کارایی مدل مفهومی پیشنهادی همزاد دیجیتال در مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های شهری، مجموعه‌ای از شاخص‌های کیفی و نیمه کمی تعریف شده است که ابعاد مختلف فنی، مدیریتی و تصمیم‌سازی مدل را پوشش می‌دهد.

۲-۴ سهم نوآوری و ارزش افزوده پژوهش

با توجه به چارچوب مفهومی ارائه شده و سیر تاریخی تبیین شده برای همزاد دیجیتال، در ادامه سهم نوآوری و تمایز پژوهش حاضر به صورت صریح تشریح می‌شود. با وجود گسترش مطالعات مرتبط با مفهوم همزاد دیجیتال در سال‌های اخیر، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین عمدتاً به توصیف تاریخی، تعاریف مفهومی یا کاربردهای موردی این فناوری پرداخته‌اند و کمتر به ارائه یک چارچوب مفهومی منسجم که بتواند سیر تکاملی همزاد دیجیتال را به صورت نظام‌مند تبیین کند، توجه داشته‌اند. نوآوری‌های اصلی این مقاله در این راستا به شرح زیر قابل تبیین است:

• بازخوانی تحلیلی تاریخچه همزاد دیجیتال در قالب یک چارچوب مفهومی پویا

برخلاف مطالعاتی که تاریخچه همزاد دیجیتال را به صورت توصیفی و خطی ارائه می کنند، این پژوهش سیر تکاملی همزاد دیجیتال را از نسل های اولیه مدل های دیجیتال تا همزادهای هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی در قالب یک ساختار مفهومی پویا و مرحله محور بازنمایی می کند

• یکپارچه سازی لایه های فناورانه، داده ای و تحلیلی در مدل همزاد دیجیتال

نوآوری محوری مقاله در ارائه چارچوبی است که همزاد دیجیتال را نه صرفاً به عنوان یک مدل شبیه سازی، بلکه به عنوان یک سیستم چندلایه شامل لایه فیزیکی، لایه داده، لایه مدل سازی و لایه تحلیل هوشمند در نظر می گیرد؛ موضوعی که در مرور تاریخچه این مفهوم به صورت پراکنده مطرح شده اما تاکنون به طور ساختاریافته تجمیع نشده است

• تبیین نقش تحول داده و هوش مصنوعی در گذار تاریخی همزاد دیجیتال

این پژوهش به صورت صریح نشان می دهد که چگونه پیشرفت در فناوری های داده محور، اینترنت اشیاء و الگوریتم های یادگیری ماشین، عامل اصلی گذار همزاد دیجیتال از مدل های ایستا به سامانه های خودیادگیر و تطبیقی بوده است؛ امری که در اغلب مطالعات تاریخی، به طور ضمنی و غیرسیستماتیک به آن اشاره شده است.

• ایجاد پیوند مفهومی بین تاریخچه همزاد دیجیتال و کاربردهای آینده محور

چارچوب مفهومی پیشنهادی با اتصال سیر تاریخی همزاد دیجیتال به قابلیت های تصمیم یار، پیش بینی محور و سیاست گذاری هوشمند، بستری مفهومی برای توسعه پژوهش های تجربی و کاربردی آینده فراهم می کند و صرفاً به مرور گذشته بسنده نمی کند. در مجموع، نوآوری این مقاله در فراتر رفتن از روایت تاریخی صرف و ارائه یک چارچوب مفهومی تحلیلی، تکاملی و قابل توسعه نهفته است که می تواند به عنوان مبنای نظری برای پژوهش های آتی در حوزه همزاد دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد.

۵- کاربردهای مدل پیشنهادی در مدیریت و نگهداری زیرساخت های شهری

مدل مفهومی همزاد دیجیتال ارائه شده در این پژوهش، به عنوان یک چارچوب هوشمند و داده محور، قابلیت به کارگیری عملی در مدیریت و نگهداری زیرساخت های شهری را داراست [10,2]. این مدل با ایجاد پیوندی پویا میان داده های بلادرنگ، تحلیل های پیش نگر و فرآیندهای تصمیم سازی، زمینه ساز تحول در رویکردهای سنتی نگهداری زیرساخت ها شده و امکان حرکت به سوی مدیریت پیش بینانه و نظام مند را فراهم می کند. در ادامه، مهم ترین حوزه های کاربردی این مدل تشریح می شود.

جدول ۱: شاخص های کیفی و ارزیابی آنها

هدف	نوع	بعد ارزیابی	شاخص
پوشش کامل سیستم	کیفی	ساختاری	جامعیت معماری
تحلیل پیشرفته	کیفی	فنی	هوشمندی تحلیلی
کاهش خرابی	نیمه کمی	عملیاتی	پیش نگر نگهداری
تطبیق پذیری	کیفی	فنی	پویایی بلادرنگ
حکمرانی بهتر	کیفی	مدیریتی	پشتیبانی تصمیم
انسجام داده	کیفی	داده ای	یکپارچگی داده
تعمیم پذیری	کیفی	ساختاری	مقیاس پذیری
بهبود عملکرد	نیمه کمی	مدیریتی	ارزش افزوده مدیریتی

۱-۵ اعتبارسنجی مفهومی مدل پیشنهادی با استفاده از سناریوی عددی

به منظور شفاف سازی کارکرد چارچوب پیشنهادی همزاد دیجیتال در مدیریت و نگهداری زیر ساخت های شهری، در این بخش از یک سناریوی عددی بر شرایط متعارف سامانه های زیرساختی در نظر گرفته شده است. واقعی نما به عنوان ابزار اعتبارسنجی مفهومی مدل استفاده شده است. هدف از ارایه این سناریو، انجام اعتبارسنجی تجربی یا تعمیم آماری نتایج نیست، بلکه بررسی این موضوع است که آیا مدل مفهومی پیشنهادی قادر است روابط میان مولفه ها، جریان داده ها و پیامدهای تصمیم سازی مدیریتی را به صورت منطقی، منسجم و قابل تفسیر بازنمایی کند یا خیر.

یکی از کاربردهای محوری مدل پیشنهادی، پشتیبانی از نگهداری پیش نگر زیرساخت های شهری است. در این چارچوب، داده های حاصل از سامانه های پایش و حسگرهای شهری به صورت پیوسته در همزاد دیجیتال تجمیع و به روزرسانی می شوند. سپس، این داده ها با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین مورد تحلیل قرار گرفته و الگوهای فرسودگی، کاهش عملکرد و احتمال بروز خرابی شناسایی می گردند.

منظور تبیین قابلیت های کمی مدل مفهومی پیشنهادی، یک سناریوی عددی فرضی اما واقع گرایانه در نظر گرفته می شود. فرض می شود یک سامانه زیرساخت شهری شامل ۱۰۰ دارایی فیزیکی (نظیر پل ها یا قطعات شبکه آب رسانی) تحت مدیریت قرار دارد. بر اساس گزارش های نگهداری سنتی، نرخ خرابی سالانه هر دارایی به طور متوسط ۳ درصد برآورد می شود و هزینه متوسط هر خرابی ناگهانی شامل تعمیرات اضطراری، اختلال خدمات و هزینه های جانبی، معادل ۵۰۰ میلیون ریال است. در چنین شرایطی، هزینه سالانه ناشی از خرابی های پیش بینی نشده حدود ۱۵ میلیارد ریال برآورد می شود.

در چارچوب مدل پیشنهادی، داده های بلادرنگ حاصل از حسگرها و سامانه های پایش وضعیت، در لایه همزاد دیجیتال پردازش شده و از طریق داده های بلادرنگ و الگوریتم های یادگیری ماشین، وضعیت آتی دارایی ها برآورد شود. مطالعات پیشین، به طور مشخص پژوهش های نظیر Grieves و Vickers Tao و همکاران و همچنین مطالعات مروری اخیر در حوزه همزاد دیجیتال گزارش کرده اند که به کارگیری رویکردهای مبتنی بر همزاد دیجیتال و نگهداری پیش نگر می تواند منجر به کاهش نرخ خرابی ناگهانی بین ۲۵ تا ۴۰ درصد وجود دارد. در این پژوهش، به منظور پرهیز از اغراق و حفظ رویکرد محافظه کارانه، مقدار ۳۰ درصد به عنوان مبنای تحلیل در نظر گرفته شده است [14].

بر اساس این فرض، تعداد خرابی های سالانه از ۳ مورد در هر ۱۰۰ دارایی به حدود ۲/۱ مورد کاهش یافته و هزینه سالانه خرابی ها از ۱۵ میلیارد ریال به حدود ۱۰,۵ میلیارد ریال می رسد. این کاهش بیانگر صرفه جویی مستقیم سالانه معادل ۴,۵ میلیارد ریال در هزینه های نگهداری است. افزون بر این، کاهش زمان تشخیص خرابی و امکان برنامه ریزی بهینه فعالیت های تعمیر و نگهداری، از دیگر پیامدهای تحلیلی این چارچوب محسوب می شود.

۲-۵ تحلیل مدیریتی و بهینه سازی منابع

علاوه بر کاهش هزینه های مستقیم، مدل پیشنهادی با بهبود زمان تشخیص خرابی و برنامه ریزی بهینه نگهداری، موجب افزایش بهره وری منابع انسانی و فنی می شود. به طور معمول، زمان شناسایی خرابی در رویکردهای سنتی بین ۳۰ تا ۴۵ روز برآورد می شود، در حالی که در چارچوب همزاد دیجیتال این زمان می تواند به کمتر از ۷ روز کاهش یابد [13]. این کاهش زمانی، امکان اولویت بندی دقیق تر پروژه های نگهداری، توزیع هدفمند بودجه و افزایش عمر مفید دارایی ها را فراهم می کند. در نتیجه، مدل مفهومی پیشنهادی نه تنها از منظر فنی، بلکه از دیدگاه اقتصادی و مدیریتی نیز ارزش افزوده قابل توجهی برای مدیریت زیرساخت های شهری ایجاد می کند.

نتایج حاصل از این سناریوی عدد نشان می دهد که چارچوب مفهومی پیشنهادی قادر است تغییرات در داده های ورودی (نظیر نرخ خرابی و هزینه نگهداری) را به صورت منسجم در لایه های مختلف خود پردازش کرده و آن ها را به خروجی های تصمیم یار معنادار تبدیل نماید. این فرایند بیانگر کارایی مفهومی مدل در پشتیبانی از نگهداری پیش نگر، بهینه سازی تخصیص منابع و کاهش هزینه های عملیاتی است. از این منظر، سناریوی عددی ارائه شده نقش یک ابزار اعتبارسنجی مفهومی را ایفا می کند و نشان می دهد که مدل پیشنهادی از نظر تحلیلی و منطقی توان پشتیبانی از تصمیم سازی مدیریتی را داراست.

لازم به تاکید است که اعتبارسنجی کامل عملکرد مدل در سطح عملیاتی، مستلزم پیاده سازی واقعی و تحلیل داده های میدانی در مقیاس شهری است که به عنوان مسیر پژوهشی آینده پیشنهاد می شود.

۴-۵ پایش مستمر و ارزیابی پویای عملکرد زیرساخت ها

یکی دیگر از کاربردهای مهم مدل همزاد دیجیتال، پایش مستمر عملکرد زیرساخت های شهری است. این مدل با دریافت داده های لحظه ای، شاخص های کلیدی عملکرد زیرساخت ها را به صورت پویا ارزیابی می کند و امکان شناسایی انحراف از شرایط مطلوب را در مراحل اولیه فراهم می سازد. این ویژگی موجب می شود فرآیند ارزیابی عملکرد از گزارش های ایستا و تأخیری به نظامی پویا و مبتنی بر داده های زنده ارتقا یابد و اقدامات اصلاحی در زمان مناسب اتخاذ شوند.

۵-۵ پشتیبانی از تصمیم سازی مدیران و سیاست گذاران شهری

مدل مفهومی پیشنهادی، با تبدیل داده های پیچیده و نتایج تحلیلی به خروجی های قابل تفسیر، نقش مؤثری در پشتیبانی تصمیم سازی مدیران شهری ایفا می کند. ارائه سناریوهای مقایسه ای، پیش بینی پیامدهای تصمیمات مختلف و نمایش نتایج در قالب داشبوردهای مدیریتی، از جمله قابلیت هایی است که شکاف میان تحلیل فنی و تصمیم گیری اجرایی را کاهش می دهد. این امر موجب افزایش شفافیت، دقت و اثربخشی تصمیمات مرتبط با مدیریت و نگهداری زیرساخت های شهری می شود.

۶-۵ قابلیت به کارگیری مدل در انواع زیرساخت های شهری

مدل همزاد دیجیتال پیشنهادی به گونه ای طراحی شده است که قابلیت انطباق با انواع مختلف زیرساخت های شهری را داشته باشد. این زیرساخت ها شامل شبکه های حمل و نقل، سیستم های آب و فاضلاب، شبکه های انرژی و ساختمان های عمومی می شوند. چنین انعطاف پذیری، امکان استفاده از مدل را در شرایط مختلف و در مقیاس های گوناگون شهری فراهم می سازد. به طور کلی، مدل مفهومی همزاد دیجیتال ارائه شده در این پژوهش، چارچوبی کارآمد برای بهبود فرآیندهای مدیریت و نگهداری زیرساخت های شهری فراهم می آورد. این مدل با تلفیق پایش بلادرنگ، تحلیل پیش نگر و پشتیبانی تصمیم سازی، زمینه ساز گذار از مدیریت سنتی به مدیریت هوشمند و داده محور بوده و می تواند نقش مؤثری در افزایش پایداری و تاب آوری شهرها ایفا کند.

۶- بحث و تحلیل

مدل مفهومی همزاد دیجیتال ارائه شده در این پژوهش، با هدف بهبود مدیریت و نگهداری زیرساخت های شهری، از نظر مقایسه با چارچوب های پیشین، مزایا، محدودیت ها و قابلیت توسعه بررسی می شود. این تحلیل به روشن شدن جایگاه علمی مدل و قابلیت های عملی آن کمک می کند.

۱-۶ مقایسه با مطالعات پیشین

مطالعات پیشین در حوزه همزاد دیجیتال غالباً بر کاربردهای محدود و جزئی متمرکز بوده اند، از جمله پایش تجهیزات منفرد یا شبیه سازی بخش خاصی از زیرساخت های شهری. در بسیاری از این پژوهش ها، همزاد دیجیتال به عنوان یک ابزار شبیه سازی یا پایش ایستا مطرح شده و نقش آن در پشتیبانی تصمیم گیری مدیران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مدل حاضر با اتخاذ رویکرد لایه ای و جامع، همزاد دیجیتال را به عنوان یک چارچوب یکپارچه معرفی می کند که از سطح زیرساخت های فیزیکی تا سطح تصمیم سازی و حکمرانی شهری را پوشش می دهد. همچنین، ترکیب داده های بلادرنگ با مدل های هوش مصنوعی مکانی-زمانی، امکان تحلیل پیش نگر و ارائه توصیه های عملی برای نگهداری و مدیریت زیرساخت ها را فراهم می کند. این رویکرد، نقطه تمایز مدل پیشنهادی نسبت به پژوهش های پیشین محسوب می شود. در جدول شماره ۲ بصورت کامل تشریح می گردد. [7,11]

جدول ۲: مقایسه مدل پیشنهادی با مدل های ارائه شده قبلی

مطالعه	کاربرد همزاد دیجیتال	محور نوآوری	محدودیت	تفاوت با مدل پیشنهادی
Zhang et al. (2020)	پایش تجهیزات منفرد	شبیه سازی ایستا	عدم پوشش سطح تصمیم گیری	مدل پیشنهادی یکپارچه و لایه ای
Li & Wang (2021)	شبیه سازی ساختمان	تحلیل محدود	تمرکز صرف بر بخش خاص	مدل پیشنهادی پوشش کل چرخه زیرساخت
Kumar et al. (2022)	نگهداری پیشگیرانه در پل ها	پیش بینی خرابی	داده های محدود و مقیاس کوچک	مدل پیشنهادی قابل استفاده در زیرساخت ها و داده های بلادرنگ
Silva & Rodrigues (2021)	مدیریت انرژی	الگوریتم پایه AI	محدود به یک حوزه	مدل پیشنهادی چندمنظوره،
این پژوهش	نگهداری و مدیریت جامع زیرساخت ها	یکپارچگی، پیش نگر، تصمیم سازی	نیاز به ارزیابی عملی	یک چارچوب لایه ای جامع

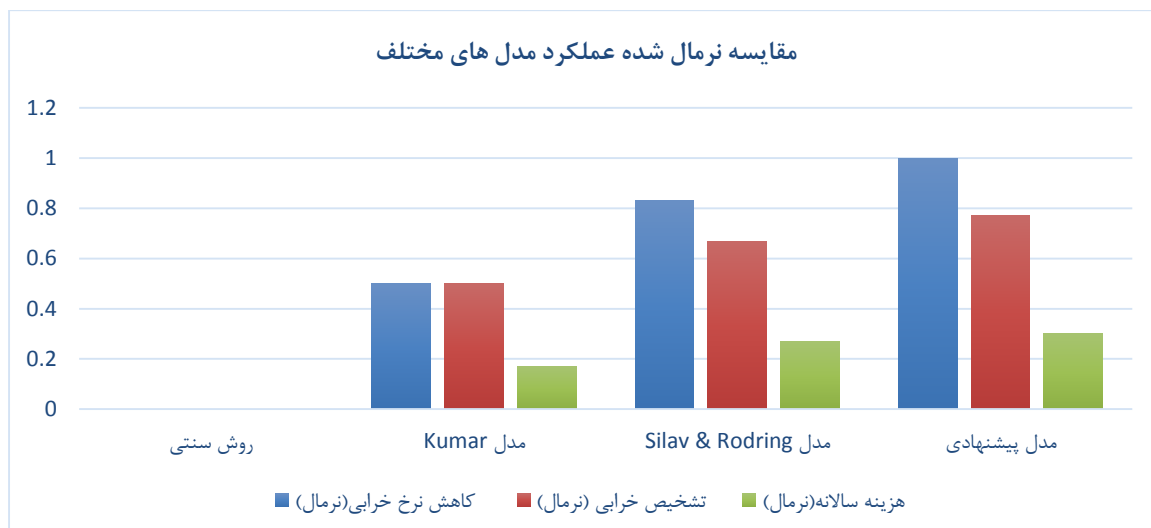
۷ - نتیجه گیری و پیشنهادهای پژوهشی آینده

۷-۱ نتیجه گیری

در این پژوهش، یک مدل مفهومی لایه ای برای همزاد دیجیتال در مدیریت و نگهداری زیرساخت های شهری ارائه شد. این مدل با ترکیب داده های بلادرنگ، الگوریتم های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، و ساختار تصمیم سازی لایه ای، زمینه ای جامع برای پیش نگر و بهینه منابع فراهم می آورد. تحلیل مقایسه ای با مطالعات پیشین نشان داد که مدل پیشنهادی از نظر یکپارچگی معماری، قابلیت نگهداری پیش نگر، پویایی و تطبیق پذیری و پشتیبانی از تصمیم گیری شهری تمایز قابل توجهی دارد. همچنین، انعطاف پذیری مدل امکان اعمال آن در انواع زیرساخت های شهری از جمله شبکه های حمل و نقل، انرژی، آب و ساختمان ها را فراهم می کند. در مجموع، مدل پیشنهادی، چارچوبی عملی و نظری برای بهبود پایداری، تاب آوری و کارایی مدیریت زیرساخت های شهری ارائه می دهد و می تواند به عنوان پایه ای برای توسعه سامانه های هوشمند شهری و شهرهای پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

به منظور تبیین جایگاه کمی و عددی مدل پیشنهادی نسبت به مطالعات پیشین در شکل (۳) مقایسه عددی بین نتایج حاصل از این پژوهش و یافته های تحقیقات شاخص گذشته ارائه شده است. این مقایسه بر شاخص های کاهش نرخ خرابی، صرفه جویی هزینه های نگهداری و زمان تشخیص خرابی است.

همان گونه که در نمودار مشاهده می شود، مدل پیشنهادی این پژوهش در مقایسه با رویکردهای سنتی عملکرد بهتری در کاهش نرخ خرابی و هزینه های نگهداری نشان می دهد. همچنین زمان تشخیص خرابی در چارچوب همزاد دیجیتال پیشنهادی به طور معناداری کاهش یافته که بیانگر کارایی بالاتر مدل در پشتیبانی از نگهداری پیش نگر و تصمیم ساز مدیریتی است.



شکل ۳- مقایسه نرمال شده مدل های نگهداری از نظر کاهش خرابی، زمان تشخیص خرابی و هزینه سالانه

۷-۲ پیشنهاد های پژوهشی آینده

با وجود مزایا و نوآوری های مدل، مسیرهایی برای توسعه و تکمیل آن وجود دارد که می تواند در پژوهش های آینده مورد توجه قرار گیرد:

۱. پیاده سازی عملی و ارزیابی کمی: اجرای مدل در یک یا چند شهر نمونه و ارزیابی دقیق عملکرد آن با داده های واقعی، به منظور سنجش دقت پیش بینی و اثربخشی تصمیم سازی.
۲. گسترش الگوریتم های هوش مصنوعی: استفاده از مدل های یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی و الگوریتم های ترکیبی برای بهبود پیش بینی خرابی و تحلیل داده های پیچیده.
۳. تخصصی سازی برای زیرساخت های مختلف: توسعه مدل برای بخش های خاص مانند پل ها، شبکه های توزیع انرژی، سیستم های آب و فاضلاب، و ساختمان های عمومی.
۴. ادغام مؤلفه های امنیت و حریم خصوصی: طراحی مکانیزم های محافظت از داده های حساس و رعایت حریم خصوصی شهروندان در فرآیند جمع آوری و تحلیل داده ها.
۵. توسعه داشبوردهای مدیریتی و ابزارهای پشتیبانی تصمیم: ارائه گزارش ها و سناریوهای قابل فهم برای مدیران شهری به منظور افزایش شفافیت و اثرگذاری تصمیمات.
۶. مطالعات تطبیقی بین شهری: بررسی کاربرد و اثربخشی مدل در شهرهای مختلف با ساختارهای متفاوت و زیرساخت های متنوع.

- 1-Qiu, S., Zaheer, Q., Ali, F., Wajid, S., Chen, H., Ai, C., & Wang, J. (2025). *Exploring the impact of digital twin technology in infrastructure management: a comprehensive review*. Journal of Civil Engineering and Management, 31(4), 395–417. <https://doi.org/10.3846/jcem.2025.23718> .
- 2- Popescu, G. H., Poliak, M., Ciurlău, C. F., Ćurčić, N., & Bogdan, A. (2023). *Harnessing the Power of Digital Twin Technologies for Smart Cities: Pioneering Real-Time Urban Management, Predictive Maintenance, and Sustainable Development Strategies*. Journal of Self-Governance and Management Economics, 11(3), 42–69.
- 3- Aghazadeh Ardebili, A., Zappatore, M., Ramadan, A. I. H. A., et al. (2024). *Digital Twins of smart energy systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges*. Energy Informatics, 7, 94. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00385>
- 4-Azadi, S., Kasraian, D., Nourian, P., & van 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 agenda*. Smart Cities, 8(1), 32. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010032>.
- 5-Fatehi-Nobarian, B., Nourani, V., & Ng, A. (2023). Application of meta-heuristic methods in the optimization of geometrical sections in trapezoidal channels in jump energy loss. AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 72(8), 1539-1552.
- 6-Negarestani, M. N., Hajikandi, H., Fatehi-Nobarian, B., & Sardroud, J. M. (2025, May). Introducing green structure based on the pattern of TOPSIS method by grey wolf algorithm. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability (Vol. 178, No. 3, pp. 202-217). Emerald Publishing Limited.
- 7- *Digital twins for sustainable design and management of smart city buildings and municipal infrastructure*. (2024). Sustainable Energy Technologies and Assessments, 64, 103682. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103682>.
- 8- Fatorachian, H., Kazemi, H., & Pawar, K. (2025). *Enhancing Smart City Logistics Through IoT-Enabled Predictive Analytics: A Digital Twin and Cybernetic Feedback Approach*. Smart Cities, 8(2), 56. <https://doi.org/10.3390/smartcities8020056>.
- 9-Omrany, H., Mehdipour, A., Oteng, D., et al. (2025). *The uptake of urban digital twins in the built environment: a pathway to resilient and sustainable cities*. Computational Urban Science, 5, 20. <https://doi.org/10.1007/s43762-025-00177-x> .
- 10-Sohail, A., Shen, B., Cheema, M. A., et al. (2024). *Beyond Data, Towards Sustainability: A Sydney Case Study on Urban Digital Twins*. arXiv:2406.04902.
- 11- Zhu, M., & Jin, J. (2025). *Data- Driven Urban Digital Twins and Critical Infrastructure Under Climate Change: A Review of Frameworks and Applications*. Urban Planning. <https://doi.org/10.17645/up.10109>.
- 12-Temple, L., Viale Pereira, G., & Klausner, L. D. (2024). *Unravelling the Use of Digital Twins to Assist Decision- and Policy-Making in Smart Cities*. arXiv:2405.20916.
- 13-Loso Judijanto. (2025) Digital Twin Technology for Predictive Maintenance in Industry 4.0:A Systematic Riview. Science and Applied Journal (SIAP), 2(1).
- 14-Gheorghe H. Popescu. (2024). Digital Twin Technology Optimizing Industrial Operations with Real-Time Virtual Models for Enhanced Performance and Predictive Maintenance Globally.