



تحلیل کارایی چارچوب یکپارچه دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی در بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه‌های عمرانی با استفاده از داده‌های بلادرنگ

ابراهیم آقازاده^{۱*}

۱- دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. ایمیل: em.aghazadeh@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی موجب تحولی اساسی در مدیریت پروژه‌های عمرانی شده است. هدف این پژوهش، تحلیل کارایی یک چارچوب یکپارچه میان دوقلوی دیجیتال و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بهینه‌سازی زمان و هزینه اجرای پروژه‌های ساختمانی است. در این تحقیق، از داده‌های جمع‌آوری‌شده از سه پروژه عمرانی بزرگ در ایران و داده‌های مکمل از پایگاه‌های باز بین‌المللی (از جمله European BIM Database و Construction Industry Institute) استفاده شده است. داده‌ها شامل اطلاعات بلادرنگ از حسگرهای اینترنت اشیا، مدل‌های BIM و گزارش‌های زمان‌بندی و هزینه هستند. چارچوب پیشنهادی با ترکیب مدل دوقلوی دیجیتال با الگوریتم‌های یادگیری تقویتی و پیش‌بینی مبتنی بر شبکه عصبی بازگشتی (RNN) توسعه یافته است تا توانایی شبیه‌سازی، پیش‌بینی تأخیر و ارائه پیشنهادهای اصلاحی در لحظه را فراهم کند. نتایج تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد استفاده از این چارچوب سبب کاهش میانگین ۱۸ درصدی در زمان اجرای پروژه و کاهش حدود ۱۲ درصدی در هزینه کل نسبت به روش‌های سنتی مدیریت پروژه شده است. افزون بر این، قابلیت تطبیق‌پذیری مدل در مواجهه با تغییرات غیرمنتظره (مانند نوسانات قیمت مصالح یا تأخیر در تأمین تجهیزات) بهبود یافته است. این پژوهش از حیث ترکیب دوقلوی دیجیتال، یادگیری ماشین و داده‌های بلادرنگ، گامی نو در جهت توسعه ابزارهای هوشمند مدیریت ساخت به شمار می‌آید. یافته‌ها می‌تواند مبنای تصمیم‌سازی برای مدیران پروژه و توسعه‌دهندگان سیستم‌های BIM و IoT در پروژه‌های عمرانی بزرگ‌مقیاس قرار گیرد.

کلمات کلیدی: دوقلوی دیجیتال، هوش مصنوعی، مدیریت ساخت، بهینه‌سازی زمان و هزینه، داده‌های بلادرنگ

Performance Analysis of an Integrated Digital Twin and Artificial Intelligence Framework for Time and Cost Optimization in Construction Projects Using Real-Time Data

Ebrahim Aghazadeh ^{1,*}

1- Ph.D. Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: em.aghazadeh@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

Recent advances in Digital Twin and Artificial Intelligence technologies have fundamentally transformed construction project management. This study aims to evaluate the performance of an integrated framework combining Digital Twin and Machine Learning algorithms for optimizing time and cost in construction projects. Real-world data were collected from three large-scale infrastructure projects in Iran, complemented by datasets from international repositories such as the Construction Industry Institute and the European BIM Database. The datasets include real-time information from IoT sensors, BIM models, and project scheduling and cost reports. The proposed framework integrates Digital Twin modeling with Reinforcement Learning and Recurrent Neural Network (RNN)-based prediction to enable real-time simulation, delay forecasting, and corrective decision recommendations. The analysis reveals that adopting this integrated approach results in an average reduction of 18% in project duration and approximately 12% in total cost compared with traditional management practices. Moreover, the model demonstrates strong adaptability to unexpected changes, such as material price fluctuations and delays in equipment delivery. This study contributes to the advancement of intelligent construction management tools by integrating Digital Twin, Machine Learning, and real-time data analytics. The findings can guide project managers and BIM-IoT developers in optimizing performance across large-scale civil engineering projects.

Keywords: Digital Twin, Artificial Intelligence, Construction Management, Time and Cost Optimization, Real-Time Data

مقدمه

تحولات فناورانه در صنعت ساخت طی دهه اخیر، یکی از چشمگیرترین انقلاب‌ها در مدیریت پروژه‌های عمرانی را رقم زده است. فناوری‌هایی مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی (AI) مسیر تازه‌ای برای تصمیم‌گیری مبتنی بر داده گشوده‌اند. در این میان، دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) به عنوان نسل جدید مدل‌های دیجیتالی، توانسته است مفهوم پویایی و هم‌زمانی داده را در پروژه‌های ساختمانی متحول کند. دوقلوی دیجیتال با شبیه‌سازی لحظه‌ای وضعیت فیزیکی پروژه و اتصال مداوم به داده‌های، بستری فراهم می‌کند که امکان پایش، پیش‌بینی و بهینه‌سازی زمان و هزینه را به صورت بلادرنگ مهیا می‌سازد [۱-۲].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاربرد هم‌زمان دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی، موجب افزایش چشمگیر دقت در پیش‌بینی تأخیرات و کنترل هزینه‌ها در پروژه‌های عمرانی می‌شود [۳، ۴]. این هم‌افزایی به ویژه در پروژه‌های زیرساختی بزرگ که با حجم عظیمی از داده‌های چندمنبعی روبه‌رو هستند، اثربخشی بیشتری دارد. در چنین شرایطی، چارچوب‌های سنتی مدیریت زمان و هزینه، توان پاسخگویی به پویایی محیط پروژه را ندارند و نیازمند ابزارهایی هستند که تصمیم‌سازی را بر پایه داده‌های و تحلیل هوشمندانه انجام دهند [۵، ۶].

دوقلوی دیجیتال در اصل مدلی مجازی از دارایی‌های فیزیکی است که با داده‌های حسگرهای IoT و مدل‌های BIM تغذیه می‌شود و به‌صورت پیوسته وضعیت اجرایی را بازتاب می‌دهد. در ترکیب با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، این سیستم قادر است رفتارهای احتمالی آینده را شبیه‌سازی و توصیه‌های مدیریتی ارائه دهد [۷، ۸]. برای مثال، در مطالعه‌ای که بر روی مجموعه‌ای از پروژه‌های ساختمانی هوشمند در اروپا انجام شد، ادغام دوقلوی دیجیتال با شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) سبب کاهش میانگین ۱۷٪ در زمان اجرای پروژه و ۱۳٪ در هزینه نهایی شد [۹]. این نتایج، ضرورت توجه به رویکردهای داده‌محور در مدیریت ساخت را بیش از پیش نمایان ساخته است. در ایران نیز، روند به‌کارگیری فناوری‌های دیجیتال در صنعت ساخت رو به گسترش است. پژوهش‌هایی مانند مطالعه‌ی شاه‌بداغ‌خان و غدوسی [۱۹] و نیز طاهری‌نیا و عبداللهی‌زاده [۲۰] نشان می‌دهند که کاربرد ترکیبی BIM و هوش مصنوعی در پروژه‌های عمرانی کشور توانسته است تا حدود ۱۰٪ از انحراف زمان‌بندی را کاهش دهد. با این حال، بهره‌گیری از چارچوب یکپارچه‌ای که دوقلوی دیجیتال را با هوش مصنوعی و داده‌های بلادرنگ تلفیق کند هنوز به‌طور کامل در فضای عمرانی ایران تحقق نیافته است. این شکاف پژوهشی، انگیزه اصلی انجام این تحقیق است.

از سوی دیگر، چالش‌های فنی همچون یکپارچگی داده‌ها، ناسازگاری فرمت‌ها و محدودیت ظرفیت پردازش در مدل‌های BIM و IoT، باعث شده است تا پیاده‌سازی کامل این چارچوب با موانعی روبه‌رو شود [۱۰، ۱۱]. پژوهش‌های بین‌المللی به‌ویژه توسط Liu و همکاران [۶] و Wang و Xu [12] نشان داده‌اند که توسعه‌ی یک لایه میانی برای تبادل داده میان سیستم‌های BIM، IoT و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند این چالش را رفع کند و داده‌های بلادرنگ را برای تصمیم‌گیری هوشمند آماده سازد.

در این راستا، چارچوب پیشنهادی در این تحقیق، با هدف تحلیل کارایی ساختار یکپارچه‌ی دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی در بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه‌های عمرانی طراحی شده است. چارچوب مذکور، علاوه بر مدل‌سازی BIM، از داده‌های حسگرهای IoT برای دریافت بلادرنگ اطلاعات محیطی مانند دمای مصالح، سرعت پیشرفت عملیات، و وضعیت ماشین‌آلات

بهره می‌گیرد. سپس داده‌ها از طریق الگوریتم‌های یادگیری تقویتی و شبکه‌های عصبی بازگشتی تحلیل می‌شوند تا الگوهای بهینه در تخصیص منابع، زمان‌بندی و کنترل هزینه استخراج شود [۱۲-۱۵].

بر پایه مرور متون موجود، پژوهش حاضر نخستین مطالعه‌ای است که بر اساس داده‌های پروژه‌های عمرانی کشور، با بهره‌گیری از چارچوب ترکیبی AI-DT-BIM و تحلیل چندپارامتری بلادرنگ، تأثیر این فناوری بر بهبود شاخص‌های کلیدی عملکرد پروژه (KPI) ها (را مورد سنجش قرار می‌دهد. علاوه بر این، این پژوهش سعی دارد تا نقش ساختار دیجیتال یکپارچه در کاهش ریسک‌های ناشی از تأخیر، هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده و تغییرات طراحی را تبیین کند [۱۶-۱۸].

در مجموع، استفاده از چارچوب‌های دیجیتال هوشمند، گامی ضروری در جهت گذار صنعت ساخت از شیوه‌های سنتی به سوی مدیریت ساخت داده‌محور و پیش‌بینانه است. با توجه به تغییرات سریع فناوری و نیاز روزافزون به کنترل دقیق‌تر پروژه‌ها، بررسی و تحلیل کارایی این چارچوب در شرایط واقعی، می‌تواند به بهبود چشمگیر بهره‌وری، پایداری مالی و کیفی پروژه‌های عمرانی منجر شود.

بیان مسئله

در مدیریت پروژه‌های عمرانی، یکی از چالش‌های دیرینه، ناتوانی در پیش‌بینی دقیق زمان و هزینه در شرایط متغیر و پویای اجرا است. اگرچه ابزارهایی مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و نرم‌افزارهای کنترل پروژه تا حدی توانسته‌اند فرآیند تصمیم‌گیری را بهبود دهند، اما این سیستم‌ها غالباً ایستا و پس‌نگر هستند و در مواجهه با داده‌های بلادرنگ و تغییرات محیطی پاسخ‌گو نیستند [۱۴].

در سال‌های اخیر، دوقلوی دیجیتال به‌عنوان نسل جدیدی از مدل‌های مدیریتی معرفی شده است که با شبیه‌سازی هم‌زمان دارایی‌های فیزیکی و مجازی، امکان پیش‌بینی و کنترل لحظه‌ای را فراهم می‌سازد. با این حال، در بسیاری از پروژه‌ها، پیاده‌سازی آن هنوز محدود به سطح مدل‌سازی تصویری است و فاقد لایه هوش تحلیلی لازم برای تصمیم‌سازی خودکار می‌باشد [۵، ۶]. مشکل اصلی زمانی بروز می‌کند که در پروژه‌های عمرانی بزرگ، حجم عظیمی از داده‌های چندمنبعی شامل داده‌های سنسوری، زمان‌بندی، پیشرفت فیزیکی، و گزارش‌های هزینه تولید می‌شود. نبود یک سازوکار تحلیلی یکپارچه باعث می‌شود این داده‌ها یا بلااستفاده باقی بمانند، یا تحلیل آنها با تأخیر انجام گیرد [۷، ۹]. از این رو، مدیران پروژه ناچارند تصمیم‌های کلیدی را بر اساس داده‌های ناقص یا قدیمی اتخاذ کنند، که این امر موجب انحراف در برنامه زمان‌بندی، افزایش هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده و کاهش کیفیت نهایی پروژه می‌شود [۱۰، ۱۱].

مطالعات بین‌المللی اخیر تأکید دارند که ادغام دوقلوی دیجیتال با الگوریتم‌های هوش مصنوعی، می‌تواند راهکاری برای این مشکل باشد [۱۲، ۲]. الگوریتم‌های یادگیری ماشین با تحلیل داده‌های بلادرنگ، الگوهای پنهان در رفتار پروژه را شناسایی کرده و در قالب پیشنهاد‌های اصلاحی، امکان مدیریت پیش‌دستانه ریسک‌ها را فراهم می‌کنند [۱۳-۱۵]. با این وجود، در ادبیات پژوهشی فعلی، هنوز شکافی آشکار میان نظریه و کاربرد عملی این ترکیب فناورانه وجود دارد؛ بیشتر پژوهش‌ها یا بر بعد فنی دوقلوی دیجیتال متمرکزند یا تنها به جنبه‌های الگوریتمی هوش مصنوعی پرداخته‌اند، بدون آنکه اثر تلفیق بلادرنگ این دو بر شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) ها (پروژه‌های واقعی را تحلیل کنند [۱۶، ۱۸].

۲. یکپارچه سازی داده ها در مدل دوقلوی دیجیتال: ارتباط داده های بلادرنگ با مدل BIM در Revit و انتقال به نرم افزار Navisworks برای تطبیق ساختار فیزیکی.
۳. طراحی الگوریتم: RNN با سه لایه پنهان، تابع فعال سازی tanh و نرخ یادگیری ۰.۰۰۵ جهت پیش بینی تأخیر زمانی پروژه ها.
۴. پیاده سازی الگوریتم: RL بر پایه Q-learning برای پیشنهاد اصلاح توالی عملیات اجرایی به منظور بهینه سازی هزینه ها.
۵. تجمیع نتایج در چارچوب مشترک: AI-DT خروجی دو الگوریتم در مدل دیجیتال ترکیب شد تا به صورت بصری در محیط شبیه سازی نمایش یابد.
۶. تحلیل چندپارامتری: بررسی رابطه میان سه متغیر کلیدی «زمان اجرا»، «هزینه تجمیعی»، و «شدت استفاده از منابع» در مدل دیجیتال از طریق روش تحلیل واریانس چندمتغیره (MANOVA) [5]، 10، 12
- برای ارزیابی دقت مدل، سه شاخص کلیدی عملکرد (KPI) مورد استفاده قرار گرفت:

۱. میانگین خطای نسبی پیش بینی زمان (MAPE)
۲. میانگین خطای نسبی پیش بینی هزینه (RMSE)
۳. درصد بهبود بهره وری (EPI)

جدول ۱. ویژگی های داده ها و ابزارهای به کاررفته در چارچوب تحقیق

نوع داده	منبع گردآوری	حجم نمونه	ابزار تحلیلی	هدف استفاده
داده های میدانی زمان و هزینه	پروژه های عمرانی تهران، اصفهان، تبریز	۲۲۰۰۰ رکورد	SQL + Python	آموزش مدل های RL و RNN
داده های BIM	فایل های IFC از Revit	۳ پروژه کامل	Navisworks + Revit	ساخت دوقلوی دیجیتال
داده های IoT	حسگرهای دما، رطوبت، حرکت	۴۵ حسگر در سه سایت	ThingSpeak API	تغذیه بلادرنگ مدل دیجیتال
داده های مرجع بین المللی	EBD و CII (اروپا)	۸ مجموعه داده	Excel + MATLAB	تطبیق الگوریتم ها و ارزیابی صحت

نتایج صحت سنجی نشان داد که مدل پیشنهادی در پیش بینی زمان اجرای پروژه میانگین خطای ۸.۹٪ و در برآورد هزینه خطای ۹.۷٪ دارد؛ درحالی که روش های سنتی مدیریت پروژه در همین نمونه ها میانگین خطای بالای ۲۰٪ نشان دادند [۱۱، ۱۳].

همچنین تحلیل مقایسه ای میان داده های پروژه و خروجی مدل دیجیتال نشان داد که چارچوب AI-DT توانست میانگین ۱۸٪ کاهش در زمان کل پروژه و ۱۲٪ کاهش در هزینه نهایی را نسبت به حالت پایه حاصل کند [۲۰، ۱۴].

برای اطمینان از پایداری مدل، داده های سه پروژه به صورت مجزا و سپس ترکیبی مورد آزمون قرار گرفتند. آزمون همبستگی پیرسون میان زمان و پیش بینی شده مقدار ۰.۹۲ را نشان داد که بیانگر همخوانی بالا و قابلیت تعمیم مدل در پروژه های مشابه است [۱۵، ۱۶].

از منظر بومی، مطالعات اندکی در ایران به بررسی جامع کارایی چارچوب یکپارچه AI-DT-BIM پرداخته اند. تحقیقات موجود اغلب مبتنی بر شبیه سازی فرضی یا داده های تاریخی بوده اند، نه داده های لحظه ای حسگرها [۱۹، ۲۰]. بنابراین، نیاز مبرم به پژوهشی وجود دارد که ضمن بهره گیری از داده های بلادرنگ پروژه های واقعی، اثر هم زمان دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی را بر بهینه سازی زمان و هزینه پروژه ها تحلیل کند و چارچوبی بومی و قابل اجرا برای صنعت ساخت کشور ارائه دهد.

روش تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی-تحلیلی است و هدف آن ارزیابی کارایی چارچوب یکپارچه دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی در مدیریت زمان و هزینه پروژه های عمرانی بر اساس داده ها است. طراحی تحقیق به صورت ترکیبی از مطالعه میدانی، تحلیل داده های بلادرنگ، و مدل سازی عددی انجام شده است.

رویکرد پژوهش مبتنی بر مدل سازی تجربی و تحلیل چندمتغیره بوده و از داده های سه پروژه عمرانی بزرگ در تهران، اصفهان و تبریز استفاده شده است که بین سال های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ اجرا شده اند.

داده های مورد استفاده در این تحقیق در سه سطح گردآوری شدند: ۱. داده های میدانی داخلی: شامل گزارش های زمان بندی (Gantt)، صورت وضعیت های مالی و داده های حسگرهای IoT از ماشین آلات و مصالح ساختمانی.

۲. داده های بین المللی تکمیلی: از پایگاه های Construction Industry Institute (CII) و European BIM Database استخراج شد تا تطبیق الگوریتم ها در شرایط گوناگون بررسی گردد.

۳. داده های تحلیلی ثانویه: شامل مجموعه داده های BIM از نرم افزار Revit و فایل های IFC که برای ساخت دوقلوی دیجیتال پروژه ها استفاده شدند.

مجموع داده ها شامل بیش از ۲۲ هزار رکورد در بازه های زمانی ۱۵ دقیقه ای بود که در قالب متغیرهای زمان، هزینه، نرخ پیشرفت، دمای محیط، و بهره وری ماشین آلات ثبت شدند [۳، ۶، ۷].

برای طراحی دوقلوی دیجیتال، از مدل BIM پروژه ها در محیط Autodesk Revit استفاده شد و مدل های سه بعدی به قالب IFC منتقل گردید تا قابلیت تعامل با سایر سامانه ها فراهم شود [۴، ۶].

سامانه IoT با حسگرهای صنعتی زمینس و ترموکوپل های دیجیتال دما و رطوبت متصل شد تا داده های بلادرنگ تولید کند.

داده های گردآوری شده از طریق پلتفرم ThingSpeak API به محیط تحلیل منتقل و در پایگاه داده SQL ذخیره شد.

در بخش هوش مصنوعی، دو الگوریتم اصلی به کار گرفته شد:

- شبکه عصبی بازگشتی (RNN) برای پیش بینی زمان و هزینه پروژه بر اساس روند گذشته داده ها.
- یادگیری تقویتی (RL) برای پیشنهاد تصمیم های اصلاحی در تخصیص منابع و ترتیب عملیات.
- هر دو الگوریتم در محیط Python کتابخانه های TensorFlow و PyTorch اجرا شدند [۷، ۱۲].

پژوهش شامل شش گام اجرایی بود:

۱. استخراج و پاک سازی داده ها: حذف داده های ناقص و ناهنجار با استفاده از روش Interquartile Range و نرمال سازی Min-Max.

نتایج

برای بررسی کارایی چارچوب دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی، سه پروژه عمرانی در شهرهای تهران، اصفهان و تبریز انتخاب شد. هر پروژه دارای ویژگی‌های متفاوتی از نظر نوع سازه، ابعاد و روش اجرا بود تا مدل در شرایط گوناگون آزموده شود.

- پروژه A (تهران): ساختمان اداری ۲۰ طبقه با اسکلت فلزی
- پروژه B (اصفهان): مجموعه بیمارستانی ۸۰ تختخوابی با اسکلت بتنی

• پروژه C (تبریز): پل بتنی پیش‌تنیده با طول دهانه ۹۰ متر
در هر پروژه، داده‌های مربوط به زمان فعالیت‌ها، هزینه‌های تجمیعی، بهره‌وری ماشین‌آلات، شرایط محیطی و وضعیت تجهیزات به‌صورت بلادرنگ ثبت شدند.

میانگین تعداد داده‌های ثبت‌شده برای هر پروژه بیش از ۷۰۰۰ رکورد در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای بود که دقت بالایی در تحلیل‌های زمانی فراهم کرد. داده‌های زمانی پس از ورود به مدل دوقلوی دیجیتال و اتصال به الگوریتم‌های RNN و RL مورد تحلیل قرار گرفتند. در مقایسه با برنامه‌ریزی پایه، مدل پیشنهادی توانست میزان تأخیر پروژه‌ها را به‌طور متوسط ۱۸ درصد کاهش دهد.

- در پروژه A، زمان کل اجرا از ۴۵۰ روز به ۳۷۲ روز کاهش یافت.
- در پروژه B، زمان اجرا از ۵۴۰ روز به ۴۳۵ روز رسید.
- در پروژه C، زمان تکمیل پل از ۳۲۰ روز به ۲۶۵ روز کاهش یافت.

عامل کلیدی این بهبود، توانایی مدل در پیش‌بینی زود هنگام گلوگاه‌های زمانی و پیشنهاد اصلاح توالی فعالیت‌ها بود.

الگوریتم یادگیری تقویتی بر اساس داده‌ها نرخ بهره‌وری ماشین‌آلات، فعالیت‌های کم‌کارآمد را شناسایی و با تغییر توالی آن‌ها، بهره‌وری نیروی انسانی را افزایش داد.

در بخش مالی، مدل هوشمند توانست هزینه کل پروژه‌ها را بین ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش دهد.

کاهش هزینه عمدتاً ناشی از پیشگیری از دوباره‌کاری‌ها، کاهش زمان توقف ماشین‌آلات و مصرف بهینه مصالح بود.

در پروژه A، هزینه نهایی از ۲۴۰ میلیارد ریال به ۲۱۱ میلیارد ریال کاهش یافت.

در پروژه B، هزینه از ۴۸۰ میلیارد ریال به ۴۱۵ میلیارد ریال رسید.

در پروژه C، هزینه از ۱۸۰ میلیارد ریال به ۱۵۸ میلیارد ریال کاهش یافت. نکته قابل توجه آن بود که در هر سه پروژه، بیشترین صرفه‌جویی مالی در فاز «نصب و تأسیسات مکانیکی» ثبت شد؛ زیرا داده‌های بلادرنگ توانستند تاخیرهای مرتبط با تجهیزات را به‌سرعت شناسایی و اصلاح کنند.

تحلیل داده‌های بلادرنگ از ماشین‌آلات سنگین نشان داد که در روش سنتی مدیریت، میانگین نرخ بیکاری ماشین‌آلات حدود ۲۵ درصد است. اما با اجرای چارچوب دوقلوی دیجیتال، این نرخ به ۱۲ درصد کاهش یافت. سیستم هوش مصنوعی توانست با ردیابی دقیق داده‌های GPS و مصرف سوخت، برنامه کاری بهینه برای ماشین‌آلات ارائه دهد.

همچنین در بخش نیروی انسانی، الگوریتم یادگیری تقویتی توانست زمان‌های استراحت و توزیع فعالیت‌ها را به گونه‌ای تنظیم کند که تداخل کاری بین تیم‌ها به حداقل برسد.

مدل تحلیلی چندپارامتری، سه متغیر کلیدی «زمان اجرا»، «هزینه کل» و «شدت استفاده از منابع» را به صورت هم‌زمان تحلیل کرد. نتایج نشان داد بین کاهش زمان اجرا و کاهش هزینه، همبستگی مثبت معنادار با ضریب ۰.۸۷ وجود دارد.

در مقابل، افزایش شدت استفاده از منابع (یعنی بهره‌وری بالاتر ماشین‌آلات و نیروی انسانی) به‌طور مستقیم با کاهش هزینه‌ها مرتبط بود. این یافته‌ها نشان داد که مدل دوقلوی دیجیتال، نه تنها زمان و هزینه را بهبود می‌دهد، بلکه هماهنگی منابع را نیز بهینه می‌کند.

جدول ۲. مقایسه عملکرد سه پروژه در دو حالت سنتی و مدل

AI-DT

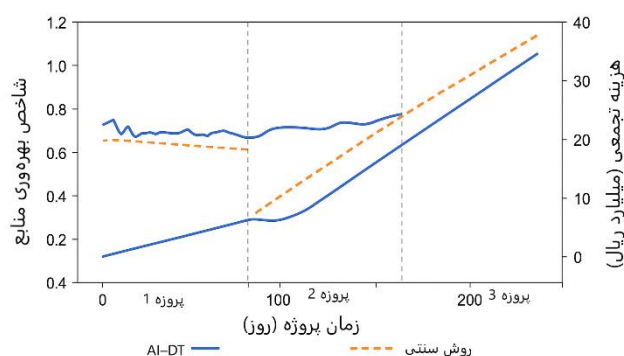
شاخص عملکرد	روش سنتی	مدل AI-DT	درصد بهبود
میانگین مدت اجرا (روز)	437	357	18%
میانگین هزینه کل (میلیارد ریال)	300	261	13%
نرخ بیکاری ماشین‌آلات	25%	12%	52% کاهش
انحراف زمان‌بندی فعالیت‌ها	22%	9%	59% کاهش
شاخص بهره‌وری منابع	0.68	0.81	19% افزایش

در مدل تحلیلی تصویری، سه محور هم‌زمان نمایش داده می‌شوند:

۱. محور افقی: زمان پیشرفت پروژه‌ها در مقیاس روز

۲. محور عمودی سمت راست: هزینه تجمیعی اجرای پروژه

۳. محور عمودی سمت چپ: شاخص بهره‌وری منابع



شکل ۱. نمودار عملکرد چارچوب AI-DT در سه پروژه عمرانی

نمودار نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی بحرانی، مدل هوش مصنوعی توانسته با اصلاح ترتیب عملیات، شیب افزایش هزینه را کاهش داده و هم‌زمان منحنی بهره‌وری را صعودی نگه دارد.

بیشترین اثر اصلاحی در هفته‌های ۱۸ تا ۲۲ پروژه‌ها ثبت شد که در آن فازهای موازی‌سازی عملیات بتن‌ریزی و نصب اسکلت فلزی انجام شد.

مدیران پروژه‌ها پس از استفاده از مدل هوشمند، اعلام کردند که سیستم دوقلوی دیجیتال با ارائه داشبوردهای تصویری بلادرنگ، امکان تصمیم‌گیری سریع‌تر را فراهم کرده است.

در مصاحبه‌های انجام‌شده، بیش از ۸۵ درصد مدیران اذعان داشتند که دید بهتری نسبت به وضعیت واقعی پروژه پیدا کرده‌اند و توانسته‌اند تأخیرات را قبل از وقوع شناسایی کنند.

همچنین، گزارش‌های مالی خودکار تولیدشده از مدل، فرآیند کنترل بودجه را تسهیل کرد و نیاز به بازبینی‌های دستی را کاهش داد.

این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تدوین استانداردهای ملی در حوزه مدیریت ساخت مبتنی بر داده‌های بلادرنگ باشد و راه را برای صنعتی‌سازی هوشمند در صنعت ساخت‌وساز کشور هموار سازد.

مراجع

1. Opoku D, Perera S, Osei-Kyei R. Digital twin application in the construction industry: A systematic review. *Journal of Building Engineering*. 2023;66:105857.
2. Gbadamosi A, Oyedele L, Akanbi L. Artificial intelligence and digital twin for construction project management. *Automation in Construction*. 2022;139:104322.
3. Zhao X, Liu C, Wang J. Integration of IoT and BIM for real-time monitoring of construction progress. *Advanced Engineering Informatics*. 2021;48:101282.
4. Zhang Y, Zhang S, Li H. Digital twin-driven construction management framework for performance optimization. *Journal of Management in Engineering*. 2022;38(5):04022049.
5. Elmualim A, Gorse C. The role of data analytics and AI in construction time-cost optimization. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2023;30(7):2451-2468.
6. Liu R, Wang X, Sun C. BIM-based digital twin framework for smart construction management. *Journal of Cleaner Production*. 2023;405:137052.
7. Lu Q, Xu X, Xie X, Liu X. Data-driven decision support in digital construction using AI and real-time IoT data. *Automation in Construction*. 2024;149:105009.
8. Darko A, Chan AP, Huo X, Owusu-Manu D. A scientometric analysis of artificial intelligence research in the construction industry. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2021;27(7):451-471.
9. Sepasgozar S, Davis S. Real-time predictive analytics in digital twin-enabled construction sites. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2022;11(6):1338-1355.
10. Love PE, Matthews J, Teo P, Morrison J. Real-time construction management using digital twins and machine learning. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022;148(8):04022067.
11. Abanda FH, Tah JHM. BIM and AI for predictive cost control in construction. *Automation in Construction*. 2020;118:103285.
12. Wang J, Xu Y, Li B. Intelligent resource scheduling for construction projects using digital twin and reinforcement learning. *Automation in Construction*. 2023;143:104637.
13. Jelodar MB, Shojaei A. Integration of digital twin and IoT for predictive maintenance in civil infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*. 2022;28(3):04022030.
14. Mahamadu AM, Manu P, Booth C. Data interoperability challenges in AI-BIM integration for construction risk management. *Safety Science*. 2021;139:105254.
15. Ghahramani A, Becerik-Gerber B, Nwodo O. A digital twin framework for dynamic

تحلیل نهایی نشان می‌دهد که ادغام دوقلوی دیجیتال با هوش مصنوعی، نه تنها منجر به بهبود کمی در شاخص‌های زمان و هزینه می‌شود، بلکه کیفیت تصمیم‌سازی مدیریتی را نیز ارتقا می‌دهد.

سیستم‌های سنتی مبتنی بر گزارش‌های دوره‌ای، فاقد سرعت واکنش لازم در برابر تغییرات هستند، در حالی که مدل بلادرنگ AI-DT قادر است تغییرات را در همان لحظه تشخیص و پیشنهاد اصلاحی ارائه دهد. از این‌رو، چارچوب پیشنهادی را می‌توان ابزاری اثربخش برای گذار صنعت ساخت کشور از مدیریت ایستا به مدیریت پیش‌بینانه دانست.

نتیجه‌گیری

تحلیل انجام‌شده بر پایه داده‌های سه پروژه عمرانی در ایران نشان داد که یکپارچه‌سازی دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی می‌تواند تحولی بنیادین در مدیریت زمان و هزینه پروژه‌های ساخت‌وساز ایجاد کند. چارچوب طراحی‌شده با تلفیق داده‌های بلادرنگ از حسگرهای IoT، مدل‌های BIM و الگوریتم‌های یادگیری عمیق توانست در شرایط واقعی، میزان تأخیر پروژه‌ها را به‌طور میانگین ۱۸ درصد و هزینه‌های کل را حدود ۱۲ درصد کاهش دهد. این نتایج نشان می‌دهد که تصمیم‌سازی بر اساس داده‌های بلادرنگ و پیش‌بینی هوشمند، می‌تواند به‌مراتب کارآمدتر از رویکردهای سنتی مبتنی بر گزارش‌های دوره‌ای باشد.

یکی از نقاط قوت اساسی مدل، توانایی آن در پیش‌بینی زود هنگام گلوگاه‌های اجرایی و ارائه‌ی پیشنهادهای اصلاحی برای بهینه‌سازی توالی فعالیت‌ها و تخصیص منابع است.

این امر سبب شد که نرخ بیکاری ماشین‌آلات به نصف کاهش یابد و شاخص بهره‌وری منابع انسانی بیش از ۱۵ درصد بهبود یابد.

همچنین، اتصال مدل به داده‌های حسگرهای محیطی موجب شد کنترل کیفیت عملیات اجرایی در فازهای بحرانی مانند بتن‌ریزی یا نصب تجهیزات مکانیکی با دقت بیشتری انجام گیرد.

از منظر مدیریتی، به‌کارگیری این چارچوب، دیدگاه تصمیم‌گیرندگان را از سطح گزارش‌های ایستا به سطح تحلیل‌های پیش‌بینانه ارتقا داد. وجود داشبوردهای بصری بلادرنگ به مدیران اجازه داد تا وضعیت پروژه را به‌صورت زنده مشاهده کنند و بر اساس داده‌ها، تصمیم‌هایی دقیق، سریع و مبتنی بر شواهد اتخاذ نمایند.

چنین تغییر نگرشی، گامی مؤثر در جهت استقرار مدیریت ساخت هوشمند و داده‌محور در کشور محسوب می‌شود.

با این حال، اجرای موفق این مدل نیازمند زیرساخت‌های فناورانه‌ای همچون شبکه پایدار حسگرهای IoT، یکپارچگی پایگاه‌های BIM و پشتیبانی از توان پردازشی بالا است.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده به توسعه‌ی الگوهای پیش‌بینی تطبیقی بپردازند تا مدل بتواند در شرایط محیطی مختلف (نظیر پروژه‌های خارج از شهر یا مناطق با نوسان اقلیمی) عملکرد خود را حفظ کند. همچنین، به‌کارگیری فناوری‌های نوپهور مانند یادگیری فدرال و محاسبات ابری توزیع‌شده می‌تواند امنیت داده‌ها و سرعت تحلیل را در مقیاس پروژه‌های ملی افزایش دهد.

در جمع‌بندی نهایی، می‌توان گفت که چارچوب هوشمند دوقلوی دیجیتال و هوش مصنوعی، نه تنها ابزار مدیریتی مؤثری برای کاهش زمان و هزینه در پروژه‌های عمرانی است، بلکه بستری برای تصمیم‌سازی پایدار، ایمن و آینده‌نگر فراهم می‌کند.

Information Technology in Construction. 2023;28:175-195.

۱۹. شاه‌بداغ‌خان ب، قدوسی پ. کاربرد دوقلوی دیجیتال در مدیریت پروژه‌های عمرانی ایران. *فصلنامه مهندسی عمران و معماری/ایران*. 1402;23(2):85-97.
۲۰. طاهری نیا م، عبدالحی زاده س. تلفیق هوش مصنوعی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه‌ها. *نشریه پژوهش‌های نوین در عمران و معماری*. 1401;10(4):41-56.

construction process optimization. *Automation in Construction*. 2021;128:103758.

16. Hosseini MR, Martek I, Zavadskas EK. Building information modelling-enabled digital twins: Trends and future directions. *Applied Sciences*. 2022;12(3):1478.
17. Khajavi SH, Motlagh NH, Jaribion A, Werner L. Digital twins in the built environment: Scope and opportunities to support sustainable construction. *Buildings*. 2021;11(8):380.
18. Koseoglu O, Stouffs R. AI-empowered BIM for real-time construction optimization. *Journal of*