فصلنامه علمی تخصصی مطالعات طراحی شهری و پژوهش‌های شهری
سال نهم، شماره ۲ (پیاپی: ۳۷)، بهار ۱۴۰۵ (ویژه‌نامه)
ISSN: 2645-4424

کاربرد فناوری‌های دیجیتال در نظارت و کنترل پروژه‌های ساختمانی شهرداری‌ها: مرور سیستماتیک مطالعات نوین

مهدی خسروی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰
کد مقاله: ۶۷۲۱۹

چکـیده

مدیریت پروژه‌های ساختمانی در شهرداری‌ها به دلیل گستردگی، پیچیدگی و تأثیر مستقیم بر کیفیت زندگی شهری، همواره با چالش‌های قابل توجهی روبرو بوده است. در سال‌های اخیر، ظهور و بلوغ فناوری‌های دیجیتال، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای ارتقاء سطح نظارت و کنترل این پروژه‌ها فراهم آورده است. این مقاله با هدف ارائه یک مرور سیستماتیک جامع از مطالعات نوین ، کاربرد، مزایا، چالش‌ها و پیامدهای پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال کلیدی در مدیریت پروژه‌های ساختمانی شهرداری‌ها را بررسی می‌کند. فناوری‌هایی نظیر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI)، کلان‌داده (Big Data)، پهپادها، بلاکچین، واقعیت افزوده/مجازی (AR/VR) و دیجیتال‌توئین (Digital Twin) مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که این فناوری‌ها قادرند به میزان قابل توجهی دقت مستندسازی، شفافیت فرآیندها، سرعت تصمیم‌گیری، کیفیت اجرا و ایمنی محیط کار را افزایش دهند، در حالی که هزینه‌ها و زمان‌بندی پروژه‌ها را بهینه‌سازی می‌کنند. با این حال، موانعی چون کمبود نیروی متخصص، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه، مقاومت فرهنگی و چالش‌های یکپارچه‌سازی سیستم‌ها، پیاده‌سازی کامل این فناوری‌ها را با تأخیر مواجه ساخته است. مقاله حاضر ضمن ارائه راهکارهایی عملی برای غلبه بر این موانع، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی در این حوزه ارائه می‌دهد.

واژگـان کلـیدی: مدیریت پروژه ساختمانی، شهرداری، فناوری‌های دیجیتال، نظارت و کنترل، مرور سیستماتیک، BIM، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا.

۱- کارشناسی ارشد جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه پیام نور واحد پاکدشت

۱- مقدمه

پروژه‌های ساختمانی شهرداری‌ها به دلیل گستردگی، تنوع اهداف و نقش مستقیم آن‌ها در توسعه شهری، همواره جزو پیچیده‌ترین پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. تأخیرهای تکرارشونده، ناهماهنگی میان واحدهای اجرایی، تغییرات گسترده در طراحی و چالش‌های مالی، از جمله موضوعاتی هستند که کیفیت نظارت و کنترل این پروژه‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. در دهه‌های اخیر، فشار فزاینده برای افزایش بهره‌وری، شفافیت و کاهش اتلاف منابع سبب شده است که شهرداری‌ها به سمت روش‌های نوین مدیریت و نظارت حرکت کنند. (Wang, & Li 2021:)

ظهور فناوری‌های دیجیتال، نقطه عطفی در تحول مدیریت پروژه‌های عمرانی ایجاد کرده است. فناوری‌هایی مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده، بلاکچین، پهپادها، واقعیت افزوده و دیجیتال‌توئین توانسته‌اند بسیاری از ضعف‌های ذاتی روش‌های سنتی را برطرف کنند. این فناوری‌ها امکان ثبت دقیق داده‌ها، پایش لحظه‌ای پیشرفت فیزیکی، کنترل کیفیت مبتنی بر شواهد و مدیریت یکپارچه اطلاعات را فراهم کرده‌اند؛ موضوعاتی که برای پروژه‌های شهرداری حیاتی هستند. (Ahmed et al., 2022)

یکی از ارزشمندترین مزایای فناوری‌های دیجیتال برای شهرداری‌ها، افزایش دقت و سرعت در فرآیند نظارت است. در روش‌های سنتی، مدیران معمولاً با گزارش‌های کاغذی، مستندسازی پراکنده و برداشت‌های میدانی زمان‌بر مواجه بودند؛ در حالی که فناوری‌های جدید این امکان را می‌دهند که وضعیت پروژه به‌صورت لحظه‌ای قابل مشاهده و تحلیل باشد. این تحول موجب افزایش شفافیت، کاهش خطاهای انسانی و اتخاذ تصمیمات دقیق‌تر می‌شود. (: Hosseini, 2023 & Alizadeh)

اگرچه استفاده از فناوری‌های دیجیتال در جهان در حال گسترش است، اما در شهرداری‌ها این موضوع همچنان با چالش‌هایی چون کمبود زیرساخت، محدودیت نیروی متخصص، مقاومت در برابر تغییر و موانع مالی همراه است. بنابراین، بررسی جامع مطالعات علمی می‌تواند برای مدیران شهری، مهندسان و تصمیم‌گیران راهگشا باشد تا بدانند کدام فناوری‌ها بیشترین اثر را در بهبود نظارت و کنترل دارند و چگونه باید آن‌ها را به‌صورت عملیاتی پیاده‌سازی کرد. (: Chen, 2020 & Zhang)

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در نظارت و کنترل پروژه‌ها

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) یک فرآیند هوشمند مبتنی بر مدل سه‌بعدی است که دید و ابزارهای لازم برای برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و مدیریت ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها را برای تیم‌های حرفه‌ای معماری، مهندسی و ساخت (AEC) فراهم می‌کند. در زمینه نظارت و کنترل پروژه‌های شهرداری، BIM نقش محوری ایفا می‌کند. BIM امکان ایجاد یک مدل دیجیتال دقیق از پروژه را فراهم می‌آورد که شامل تمام اجزا، مشخصات فنی، روابط فضایی و اطلاعات مربوط به زمان‌بندی (D۴) و هزینه‌ها (D۵) است. این مدل یک واحد و معتبر برای تمام ذینفعان پروژه ایجاد می‌کند و از بروز ناهماهنگی‌ها و تضادها جلوگیری می‌نماید (Eastman et al., 2019).

استفاده از BIM در مرحله نظارت، به تیم‌های شهرداری اجازه می‌دهد تا پیشرفت فیزیکی پروژه را به‌صورت بصری با مدل سه‌بعدی مقایسه کنند. هرگونه انحراف از طرح مصوب، چه در ابعاد، چه در جانمایی و چه در جزئیات اجرایی، به‌سرعت شناسایی و مستند می‌شود. این امر به‌ویژه در پروژه‌های پیچیده شهرداری مانند احداث مترو، پل‌ها یا مجتمع‌های بزرگ شهری که هماهنگی بین رشته‌های مختلف مهندسی ضروری است، اهمیت فراوانی دارد. همچنین، BIM امکان شبیه‌سازی فرآیندهای ساخت را قبل از اجرا فراهم می‌کند که این خود به شناسایی ریسک‌های احتمالی و بهینه‌سازی روش‌های اجرایی کمک شایانی می‌نماید. (:2020 Kassem, & Succar)

در بحث کنترل کیفیت، BIM با ادغام اطلاعات مربوط به استانداردها، مشخصات فنی و مراحل بازرسی، فرآیند تأیید کیفیت را تسهیل می‌کند. پیمانکاران می‌توانند مستندات مربوط به هر بخش از کار را مستقیماً به مدل BIM مرتبط کنند و بازرسان شهرداری به‌راحتی به این اطلاعات دسترسی داشته باشند. این امر منجر به افزایش شفافیت، کاهش سوءتفاهم‌ها و تسریع در فرآیندهای تأیید و پرداخت می‌شود. علاوه بر این، BIM با فراهم کردن مبنای دقیق برای مستندسازی نهایی پروژه (As-Built Model)، انتقال دانش و نگهداری بلندمدت تأسیسات شهری را نیز بهبود می‌بخشد. (: Yang, 2021 & Goh)

با این وجود، پیاده‌سازی BIM در شهرداری‌ها با چالش‌هایی همراه است. نیاز به نرم‌افزارهای تخصصی، آموزش نیروی انسانی، تعریف استانداردها و پروتکل‌های همکاری، و همچنین هزینه‌های اولیه قابل توجه، از جمله موانع اصلی هستند. برای غلبه بر این چالش‌ها، شهرداری‌ها نیازمند تدوین استراتژی‌های بلندمدت، ارائه آموزش‌های مستمر و ایجاد مشوق‌هایی برای پیمانکاران جهت استفاده از BIM هستند. (Azhar, 2022)

۲- اینترنت اشیا (IoT) در پایش هوشمند پروژه‌ها

اینترنت اشیا (IoT) شبکه‌ای از دستگاه‌های فیزیکی، وسایل نقلیه، لوازم خانگی و سایر اقلامی است که با نرم‌افزار، سنسورها و فناوری‌های دیگر تعبیه شده‌اند و قابلیت اتصال و تبادل داده با یکدیگر و با سیستم‌های مرکزی را دارند. در پروژه‌های ساختمانی شهرداری، IoT پتانسیل عظیمی برای نظارت و کنترل هوشمند و بلادرنگ (Real-time) دارد. سنسورهای نصب‌شده در محل پروژه می‌توانند داده‌های ارزشمندی در مورد پارامترهای مختلف جمع‌آوری کنند. (Gubbi et al., 2013) این سنسورها می‌توانند شامل سنسورهای محیطی برای سنجش دما، رطوبت، کیفیت هوا و سطح صدا باشند. همچنین، سنسورهای ارتعاش‌سنج می‌توانند برای پایش پایداری سازه‌ها و تشخیص هرگونه لرزش غیرعادی ناشی از عملیات ساختمانی یا عوامل خارجی استفاده شوند. در بخش ماشین‌آلات و تجهیزات، سنسورهای IoT می‌توانند وضعیت عملکرد، میزان مصرف سوخت، موقعیت مکانی (GPS) و زمان کارکرد تجهیزات را پایش کنند. این اطلاعات به مدیران پروژه اجازه می‌دهد تا از عملکرد بهینه ماشین‌آلات اطمینان حاصل کرده، هزینه‌های نگهداری را پیش‌بینی و از سوءاستفاده یا سرقت تجهیزات جلوگیری کنند. (Gholami et al., 2022)

یکی از کاربردهای کلیدی IoT در پروژه‌های شهرداری، پایش ایمنی کارگران است. با استفاده از دستگاه‌های پوشیدنی هوشمند (Wearable Devices) مجهز به سنسور، می‌توان وضعیت حیاتی کارگران (مانند ضربان قلب، دما) را پایش کرد و در صورت بروز خطر (مانند سقوط یا قرار گرفتن در معرض گازهای سمی)، هشدارهای لازم را به‌سرعت ارسال نمود. علاوه بر این، سنسورهای نصب‌شده در نقاط مختلف کارگاه می‌توانند تردد افراد و تجهیزات را ثبت کرده و به مدیریت بهتر دسترسی‌ها و جلوگیری از ورود افراد غیرمجاز کمک کنند. (Khosravi et al., 2021)

تلفیق داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط سنسورهای IoT با پلتفرم‌های تحلیل داده، امکان پایش وضعیت کلی پروژه را به‌صورت بلادرنگ فراهم می‌کند. مدیران شهرداری می‌توانند داشبوردهای مدیریتی داشته باشند که نمایانگر وضعیت پیشرفت، کیفیت، ایمنی و مصرف منابع پروژه است. این دید جامع به آن‌ها کمک می‌کند تا با شناسایی زودهنگام مشکلات و انحرافات، اقدامات اصلاحی لازم را به‌سرعت به عمل آورند و از بروز هزینه‌ها و تأخیرهای ناشی از تأخیر در تصمیم‌گیری جلوگیری کنند. (Luo2023 & Wang,) پیاده‌سازی موفق IoT نیازمند زیرساخت‌های ارتباطی قوی (مانند پوشش شبکه بی‌سیم)، مدیریت امن داده‌ها و انتخاب سنسورهای مناسب برای شرایط مختلف پروژه است. همچنین، ادغام داده‌های IoT با سایر سیستم‌های مدیریتی پروژه، مانند BIM، می‌تواند ارزش افزوده قابل توجهی ایجاد کند. (Aslam et al., 2023)

۳- هوش مصنوعی در تحلیل پیش‌گویانه و بهینه‌سازی

هوش مصنوعی (AI) به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که قادرند وظایفی را انجام دهند که معمولاً به هوش انسانی نیاز دارند، مانند یادگیری، حل مسئله، تصمیم‌گیری و درک زبان. در حوزه مدیریت پروژه‌های ساختمانی شهرداری، AI با توانایی تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها و شناسایی الگوهای پیچیده، ابزاری قدرتمند برای بهبود نظارت و کنترل است. کاربردهای AI در این زمینه شامل پیش‌بینی ریسک‌ها، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی، خودکارسازی وظایف تکراری و ارائه راهکارهای هوشمند است. (Burton et al., 2021) یکی از مهم‌ترین کاربردهای AI، تحلیل پیش‌گویانه (Predictive Analytics) است. با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان داده‌های تاریخی پروژه‌های مشابه (مانند زمان‌بندی، هزینه‌ها، میزان انحرافات، شرایط آب و هوایی، نوع مصالح و...) را تحلیل کرد تا احتمال بروز تأخیر، افزایش هزینه، مشکلات کیفی یا حوادث ایمنی در پروژه‌های فعلی پیش‌بینی شود. این پیش‌بینی‌ها به مدیران شهرداری اجازه می‌دهد تا اقدامات پیشگیرانه لازم را قبل از وقوع مشکل انجام دهند. (Son et al., 2022)

AI همچنین می‌تواند در بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و تخصیص منابع مؤثر باشد. با تحلیل وابستگی‌های فعالیت‌ها، محدودیت‌های منابع (نیروی انسانی، ماشین‌آلات، مصالح) و شرایط پروژه، الگوریتم‌های AI می‌توانند بهینه‌ترین برنامه زمانی و تخصیص منابع را پیشنهاد دهند. این بهینه‌سازی می‌تواند منجر به کاهش زمان تکمیل پروژه و صرفه‌جویی در هزینه‌ها شود. (Li, & Zhang2023) در زمینه کنترل کیفیت، AI می‌تواند با تحلیل تصاویر گرفته‌شده توسط پهپادها یا دوربین‌های نصب‌شده در محل، عیوب و نواقص احتمالی در اجرا را به‌صورت خودکار شناسایی کند. برای مثال، الگوریتم‌های پردازش تصویر می‌توانند ترک‌های سطحی، ناهمواری‌ها، یا عدم تطابق با نقشه‌های BIM را تشخیص دهند. این امر دقت و سرعت فرآیند بازرسی کیفی را به شدت افزایش می‌دهد. (: Fan et al., 2021)

علاوه بر این، رباتیک و اتوماسیون مبتنی بر AI می‌توانند برای انجام وظایف تکراری یا خطرناک در محل پروژه استفاده شوند، مانند آجرچینی، جوشکاری، یا حمل مصالح. این امر نه تنها بهره‌وری را افزایش می‌دهد، بلکه ایمنی کارگران را نیز بهبود می‌بخشد. chatbots و دستیارهای مجازی مبتنی بر AI نیز می‌توانند برای پاسخگویی به سؤالات رایج کارگران یا ارائه اطلاعات پروژه مورد استفاده قرار گیرند. (: Paul, 2022) با وجود پتانسیل بالای AI، پیاده‌سازی آن نیازمند دسترسی به داده‌های با

کیفیت، متخصصان AI و مهندسان آشنا به حوزه ساخت‌وساز، و همچنین تدوین چارچوب‌های اخلاقی و قانونی برای استفاده از این فناوری است. (Kwofie et al., 2023 :)

۴- کلان‌داده (Big Data) در تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد

کلان‌داده (Big Data) به مجموعه داده‌های بسیار بزرگ، متنوع و با سرعت بالا گفته می‌شود که تحلیل آن‌ها با ابزارهای سنتی پردازش داده دشوار است. در مدیریت پروژه‌های ساختمانی شهرداری، حجم عظیمی از داده‌ها از منابع مختلف تولید می‌شود، از جمله BIM، سنسورهای IoT، تجهیزات GPS، گزارش‌های میدانی، اطلاعات مالی، و داده‌های محیطی. کلان‌داده امکان تحلیل این مجموعه داده‌های گسترده را برای استخراج بینش‌های ارزشمند و پشتیبانی از تصمیم‌گیری فراهم می‌کند. (Chen et al., 2018) یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از کلان‌داده در پروژه‌های شهرداری، ایجاد یک دید جامع و یکپارچه از وضعیت پروژه است. با تجمیع و تحلیل داده‌های حاصل از بخش‌های مختلف (مانند پیشرفت فیزیکی، مصرف مصالح، هزینه‌ها، کیفیت اجرا، وضعیت ایمنی، شرایط محیطی و ...)، مدیران می‌توانند تصویری کامل و به‌روز از عملکرد کلی پروژه به دست آورند. این دید یکپارچه، شناسایی نقاط قوت و ضعف، و اتخاذ تصمیمات هماهنگ را تسهیل می‌کند. (Liu, 2022 & Wang :)

کلان‌داده نقش مهمی در مدیریت ریسک ایفا می‌کند. با تحلیل الگوهای موجود در داده‌های تاریخی و فعلی، می‌توان ریسک‌های احتمالی مانند تأخیر در تحویل مصالح، افزایش ناگهانی قیمت‌ها، یا شرایط نامساعد جوی را پیش‌بینی کرد. این اطلاعات به مدیران اجازه می‌دهد تا برنامه‌های اضطراری مؤثرتری تدوین کرده و آمادگی خود را برای مواجهه با چالش‌ها افزایش دهند. (Min, & Mohamed2020)

در حوزه کنترل کیفیت، تحلیل کلان‌داده‌ها می‌تواند به شناسایی علل ریشه‌ای مشکلات کیفی کمک کند. برای مثال، با تحلیل داده‌های مربوط به دما، رطوبت، و ترکیب بتن در زمان اجرای یک بخش خاص، می‌توان ارتباط بین شرایط محیطی و بروز ترک در بتن را مشخص کرد. این دانش به مهندسان کمک می‌کند تا در پروژه‌های آتی، اقدامات کنترلی مناسب‌تری را به کار گیرند. (Guo, & 2023Gu) همچنین، تحلیل کلان‌داده‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف منابع (مانند انرژی، آب، مصالح) در پروژه‌های شهرداری کمک کند. با پایش دقیق مصرف در بخش‌های مختلف و شناسایی الگوهای مصرف، می‌توان راهکارهای صرفه‌جویی را شناسایی و اجرا کرد. این امر نه تنها به کاهش هزینه‌ها منجر می‌شود، بلکه به اهداف پایداری زیست‌محیطی شهرداری نیز کمک می‌کند. (Ding et al., 2021 :) پیاده‌سازی موفق تحلیل کلان‌داده نیازمند ابزارهای پردازشی قدرتمند، نرم‌افزارهای تحلیلی پیشرفته، و تخصص لازم در زمینه علم داده است. همچنین، مسائل مربوط به حریم خصوصی و امنیت داده‌ها باید به‌دقت مورد توجه قرار گیرند. (Fawcett, & Waller2013)

۵- پهپادها (Drones) در پایش میدانی و بازرسی

پهپادها یا وسایل پرنده بدون سرنشین (UAVs)، با قابلیت پرواز در ارتفاعات مختلف و مجهز بودن به دوربین‌های با وضوح بالا، سنسورهای حرارتی و GPS، انقلابی در نحوه جمع‌آوری داده‌های میدانی در پروژه‌های ساختمانی ایجاد کرده‌اند. برای شهرداری‌ها، پهپادها ابزاری کارآمد برای نظارت و کنترل پروژه‌های عمرانی در مقیاس‌های مختلف، از ساخت جاده‌ها و پل‌ها تا توسعه پارک‌ها و فضاهای سبز، محسوب می‌شوند. (Zhang et al., 2018 :)

یکی از اصلی‌ترین کاربردهای پهپادها، نقشه‌برداری و مستندسازی پیشرفت پروژه است. پهپادها می‌توانند در مدت زمان کوتاهی، تصاویر هوایی و سه‌بعدی دقیقی از کل سایت پروژه تهیه کنند. این تصاویر برای مقایسه وضعیت فعلی با نقشه‌ها و مدل‌های طراحی (مانند BIM)، ارزیابی حجم خاک‌برداری یا خاک‌ریزی، و مستندسازی پیشرفت کار در بازه‌های زمانی مشخص استفاده می‌شوند. این داده‌ها مبنای قابل اعتمادی برای گزارش‌دهی به مدیران شهرداری و ذینفعان فراهم می‌کنند. (Fan et al., 2020)

در زمینه بازرسی و کنترل کیفیت، پهپادها امکان دسترسی به نقاط دور از دسترس یا خطرناک در سازه‌های مرتفع (مانند پل‌ها، برج‌ها، سدها) را فراهم می‌کنند. با استفاده از دوربین‌های با زوم بالا یا سنسورهای حرارتی، می‌توان ترک‌ها، خوردگی‌ها، یا نقاط ضعف احتمالی در سازه را به‌سرعت و با دقت بالا شناسایی کرد. این بازرسی‌های منظم و دقیق به پیشگیری از بروز حوادث جدی و انجام تعمیرات به‌موقع کمک می‌کند. (Yang et al., 2022)

پهپادها همچنین در پایش ایمنی کارگاه نقش مؤثری دارند. با پرواز منظم بر فراز سایت، می‌توانند حضور کارگران در مناطق پرخطر، وضعیت حفاظ‌های ایمنی، و رعایت پروتکل‌های ایمنی را بررسی کنند. علاوه بر این، در صورت بروز حوادث، پهپادها می‌توانند برای ارزیابی اولیه وضعیت، جستجوی مصدومان، یا انتقال تجهیزات اضطراری مورد استفاده قرار گیرند. (Xu2021 & Li,

کاربرد دیگر پهپادها، نظارت بر حمل‌ونقل مصالح و مدیریت ترافیک در محل پروژه است. با تحلیل تصاویر پهپاد، می‌توان الگوهای ترافیکی داخل کارگاه را شناسایی کرده و برای بهبود جریان تردد و کاهش زمان انتظار بهینه‌سازی کرد. همچنین، پهپادها می‌توانند برای توزیع دقیق مصالح در نقاط مختلف سایت، به‌ویژه در پروژه‌های گسترده، به کار روند. (Liu, & Chen2023 :)

چالش‌های اصلی استفاده از پهپادها شامل مقررات پروازی، نیاز به خلبانان ماهر، مدیریت حجم بالای داده‌های تصویری، و مسائل امنیتی مربوط به حریم خصوصی است. شهرداری‌ها باید با همکاری سازمان‌های هوایی، دستورالعمل‌های لازم برای استفاده ایمن و قانونی از پهپادها را تدوین کنند. (Risteska et al., 2022 :)

۶- بلاکچین (Blockchain) در افزایش شفافیت و امنیت قراردادها

بلاکچین یک فناوری دفتر کل توزیع‌شده (Distributed Ledger Technology - DLT) است که تراکنش‌ها را به‌صورت امن، شفاف و غیرقابل تغییر ثبت می‌کند. در مدیریت پروژه‌های ساختمانی شهرداری، بلاکچین پتانسیل بالایی برای افزایش شفافیت، امنیت و کارایی در فرآیندهای مختلف، به‌ویژه در زمینه قراردادها، پرداخت‌ها و مدیریت اسناد دارد. (Nakamoto, 2008)

یکی از مهم‌ترین کاربردهای بلاکچین، مدیریت هوشمند قراردادها (Smart Contracts) است. قراردادهای هوشمند، برنامه‌هایی هستند که بر روی بلاکچین اجرا می‌شوند و به‌طور خودکار شرایط توافق‌شده بین طرفین (شهرداری، پیمانکار، تأمین‌کننده) را اجرا می‌کنند. برای مثال، می‌توان یک قرارداد هوشمند تعریف کرد که پس از تأیید تکمیل یک مرحله از پروژه توسط ناظر (تأیید ثبت‌شده بر روی بلاکچین)، پرداخت خودکار بخشی از مبلغ قرارداد به پیمانکار را انجام دهد. این امر از بروز تأخیر در پرداخت‌ها، کاهش اختلافات قراردادی و افزایش اعتماد بین طرفین جلوگیری می‌کند. (Kshetri, 2017)

بلاکچین همچنین می‌تواند برای ثبت و مدیریت امن اسناد پروژه استفاده شود. تمام مستندات مهم مانند نقشه‌ها، مجوزها، گواهی‌نامه‌ها، و گزارش‌های بازرسی می‌توانند بر روی بلاکچین ثبت شوند. از آنجا که بلاکچین ماهیت غیرقابل تغییر دارد، از دستکاری یا جعل این اسناد جلوگیری می‌شود. این امر شفافیت فرآیندها را افزایش داده و در صورت بروز اختلاف، مبنای قابل اعتمادی برای داوری فراهم می‌کند. (Saberi et al., 2019) در زمینه مدیریت زنجیره تأمین مصالح، بلاکچین می‌تواند برای ردیابی اصالت و مسیر حرکت مصالح از مبدأ تا محل پروژه استفاده شود. با ثبت هر مرحله از انتقال مصالح بر روی بلاکچین، می‌توان از کیفیت و اصالت آن‌ها اطمینان حاصل کرد و از ورود مصالح تقلبی یا غیراستاندارد به پروژه جلوگیری نمود. این امر به‌ویژه برای پروژه‌های عمرانی حساس و مهم شهرداری اهمیت دارد. (Min, 2019)

کاربرد دیگر بلاکچین، مدیریت هویت و دسترسی ذینفعان پروژه است. با استفاده از بلاکچین، می‌توان هویت دیجیتال امنی برای افراد درگیر در پروژه ایجاد کرد و دسترسی آن‌ها به اطلاعات و بخش‌های مختلف پروژه را بر اساس نقش و مجوزهایشان مدیریت نمود. این امر امنیت اطلاعات را افزایش داده و از دسترسی غیرمجاز جلوگیری می‌کند. (Dorri et al., 2019) موانع اصلی پیاده‌سازی بلاکچین در پروژه‌های شهرداری شامل پیچیدگی فنی، نیاز به استانداردهای مشترک، مقیاس‌پذیری (Scalability) شبکه‌های بلاکچین، و هزینه‌های اولیه توسعه و نگهداری است. با این حال، با توجه به مزایای بلندمدت آن در افزایش شفافیت و امنیت، انتظار می‌رود استفاده از بلاکچین در آینده افزایش یابد. (Greshake et al., 2020)

۷- واقعیت افزوده/مجازی (AR/VR) در تجسم و آموزش

واقعیت افزوده (AR) و واقعیت مجازی (VR) فناوری‌هایی هستند که لایه‌هایی از اطلاعات دیجیتال را بر روی دنیای واقعی اضافه می‌کنند (AR) یا تجربه‌ای کاملاً غوطه‌ورکننده در یک محیط دیجیتال ایجاد می‌کنند (VR). این فناوری‌ها پتانسیل قابل توجهی برای بهبود فرآیندهای نظارت، کنترل، آموزش و ارتباطات در پروژه‌های ساختمانی شهرداری دارند. (Azhar, 2011)

واقعیت افزوده (AR) می‌تواند در محل پروژه برای نمایش بصری اطلاعات مرتبط به کار رود. برای مثال، یک بازرس شهرداری می‌تواند با استفاده از یک تبلت یا عینک AR، مدل سه‌بعدی BIM را بر روی سازه واقعی مشاهده کند و انطباق اجرا با طرح را بررسی نماید. AR همچنین می‌تواند برای نمایش اطلاعات مربوط به تأسیسات زیرزمینی (مانند لوله‌های آب، برق، گاز) قبل از حفاری استفاده شود تا از آسیب رسیدن به آن‌ها جلوگیری شود. این امر به تصمیم‌گیری سریع‌تر و دقیق‌تر در محل پروژه کمک می‌کند. (Huang et al., 2020 :)

واقعیت مجازی (VR) برای شبیه‌سازی و آموزش بسیار مفید است. کارگران و ناظران شهرداری می‌توانند در محیط‌های مجازی ایمن، سناریوهای مختلف ساخت‌وساز، عملیات خطرناک، یا شرایط اضطراری را تمرین کنند. این آموزش‌ها بدون نیاز به حضور فیزیکی در محیط کارگاه و بدون ریسک آسیب‌دیدگی انجام می‌شوند و اثربخشی یادگیری را افزایش می‌دهند. همچنین، VR

می‌تواند برای نمایش طرح‌های نهایی پروژه به ذینفعان و شهروندان، و دریافت بازخورد آن‌ها قبل از شروع اجرا، مورد استفاده قرار گیرد. (Wu et al., 2019)

ترکیب AR و VR با سایر فناوری‌ها مانند BIM و IoT، می‌تواند به ایجاد تجربیات غنی‌تر و کاربردی‌تر منجر شود. برای مثال، داده‌های لحظه‌ای از سنسورهای IoT می‌توانند در یک محیط VR نمایش داده شوند تا مدیران بتوانند وضعیت پروژه را به‌صورت سه‌بعدی و تعاملی بررسی کنند. AR همچنین می‌تواند برای ناظران میدانی، هشدارهای مربوط به شرایط ناایمن یا انحراف از برنامه را به‌صورت بصری نمایش دهد. (Li et al., 2023)

کاربرد AR/VR در شهرداری‌ها می‌تواند به بهبود ارتباطات و همکاری بین تیم‌های مختلف پروژه کمک کند. جلسات مجازی با استفاده از VR می‌تواند امکان گرد هم آوردن ذینفعان از مکان‌های مختلف را فراهم کند و بحث در مورد مسائل پروژه را تسهیل نماید. همچنین، تجسم سه‌بعدی طرح‌ها و مدل‌ها، درک متقابل و هماهنگی بین معماران، مهندسان، پیمانکاران و کارفرمایان را بهبود می‌بخشد. (Kolbe et al., 2019) چالش‌های اصلی استفاده از AR/VR شامل هزینه بالای تجهیزات (مانند هدست‌های VR و عینک‌های AR)، نیاز به محتوای دیجیتال با کیفیت بالا، و گاهی اوقات ایجاد حس ناراحتی یا سرگیجه (Motion Sickness) در کاربران است. با پیشرفت فناوری و کاهش هزینه‌ها، انتظار می‌رود استفاده از AR/VR در پروژه‌های شهرداری افزایش یابد. (Radianti et al., 2020)

۸- دیجیتال‌توئین (Digital Twin) برای مدیریت چرخه عمر پروژه

دیجیتال‌توئین (Digital Twin) یک نمایش دیجیتال پویا از یک دارایی فیزیکی، فرآیند یا سیستم است که از داده‌های بلادرنگ جمع‌آوری‌شده توسط سنسورها تغذیه می‌شود. این مدل دیجیتال، امکان شبیه‌سازی، تحلیل و پیش‌بینی رفتار دارایی فیزیکی را در طول چرخه عمر آن فراهم می‌کند. در پروژه‌های ساختمانی شهرداری، دیجیتال‌توئین می‌تواند از مرحله طراحی تا بهره‌برداری و نگهداری مورد استفاده قرار گیرد. (Vickers, & 2017Grieves)

در مراحل اولیه پروژه، دیجیتال‌توئین می‌تواند با ترکیب مدل BIM و داده‌های شبیه‌سازی، عملکرد طرح را تحت شرایط مختلف محیطی و بارگذاری پیش‌بینی کند. این امر به بهینه‌سازی طراحی و اطمینان از انطباق آن با استانداردهای شهرداری کمک می‌کند. پس از شروع ساخت، داده‌های جمع‌آوری‌شده از سنسورهای IoT در محل پروژه (مانند سنسورهای دما، رطوبت، تنش، ارتعاش) به‌طور مداوم به دیجیتال‌توئین ارسال می‌شوند و وضعیت اجرای پروژه را به‌صورت لحظه‌ای منعکس می‌کنند. (: Tao et al., 2018)

این نمایش دیجیتال پویا، نظارت و کنترل پیشرفت فیزیکی، کیفیت اجرا و وضعیت ایمنی را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. مدیران شهرداری می‌توانند با مشاهده دیجیتال‌توئین، انحرافات از برنامه را شناسایی کرده و اقدامات اصلاحی لازم را به عمل آورند. همچنین، دیجیتال‌توئین امکان شبیه‌سازی تأثیر تغییرات احتمالی در طراحی یا روش‌های اجرایی را قبل از اعمال آن‌ها در دنیای واقعی فراهم می‌کند. (Lu et al., 2020)

پس از تکمیل پروژه و تحویل به بهره‌بردار، دیجیتال‌توئین به ابزاری حیاتی برای مدیریت تأسیسات و نگهداری پیش‌گویانه (Predictive Maintenance) تبدیل می‌شود. با پایش مستمر داده‌های عملکردی دارایی فیزیکی (مانند ساختمان‌ها، پل‌ها، سیستم‌های تأسیساتی)، می‌توان هرگونه نشانه‌ای از خرابی یا کاهش عملکرد را زودتر از موعد شناسایی کرد. این امر امکان برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری را قبل از وقوع خرابی جدی فراهم کرده و از هزینه‌های بالای تعمیرات اضطراری و اختلال در خدمات شهری جلوگیری می‌کند. (Dai, 2022 & Hou)

دیجیتال‌توئین همچنین می‌تواند برای مدیریت بحران و سناریوهای اضطراری (مانند زلزله، آتش‌سوزی) مورد استفاده قرار گیرد. با شبیه‌سازی واکنش دارایی فیزیکی تحت شرایط بحرانی، می‌توان برنامه‌های واکنش اضطراری مؤثرتری را تدوین کرد و اثربخشی آن‌ها را ارزیابی نمود. (Shi et al., 2021)

ایجاد و نگهداری یک دیجیتال‌توئین کامل نیازمند همکاری نزدیک بین تیم‌های طراحی، ساخت، بهره‌برداری و فناوری اطلاعات، سرمایه‌گذاری قابل توجه در زیرساخت‌های سنسوری و ارتباطی، و همچنین توسعه پلتفرم‌های نرم‌افزاری پیشرفته است. (Mohamed, & El-Haram 2021)

۹- بحث و تحلیل نتایج

مرور سیستماتیک مطالعات نشان می‌دهد که فناوری‌های دیجیتال، از جمله BIM، IoT، AI، کلان‌داده، پهپادها، بلاکچین، AR/VR و دیجیتال‌توئین، هر کدام به‌تنهایی و به‌ویژه در ترکیب با یکدیگر، پتانسیل تحول‌آفرینی در نظارت و کنترل پروژه‌های ساختمانی شهرداری‌ها را دارند. این فناوری‌ها با فراهم آوردن امکاناتی چون مدل‌سازی دقیق، پایش بلادرنگ، تحلیل پیش‌گویانه،

مستندسازی خودکار، و افزایش شفافیت، به شهرداری‌ها کمک می‌کنند تا پروژه‌های خود را با کیفیت بالاتر، هزینه کمتر و در زمان مقرر به اتمام برسانند. (Cao et al., 2022) مزایای کلیدی مشترک بین این فناوری‌ها عبارتند از:

- افزایش شفافیت: ثبت و دسترسی آسان به اطلاعات پروژه برای تمام ذینفعان.
- بهبود دقت و کیفیت: کاهش خطاهای انسانی و افزایش انطباق با استانداردها.
- کاهش هزینه‌ها و زمان: بهینه‌سازی برنامه‌ریزی، تخصیص منابع و جلوگیری از اتلاف.
- افزایش ایمنی: شناسایی و پیشگیری از خطرات در محیط کارگاه و سازه‌های در حال بهره‌برداری.
- تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد: استفاده از داده‌های دقیق و تحلیل‌های پیشرفته برای اتخاذ تصمیمات بهتر. (Wang et al., 2020)

با این حال، چالش‌های قابل توجهی نیز در مسیر پیاده‌سازی این فناوری‌ها در شهرداری‌ها وجود دارد:

- مقاومت در برابر تغییر: تمایل سنتی به روش‌های قدیمی و مقاومت کارکنان در برابر پذیرش فناوری‌های جدید.
- نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه: هزینه‌های بالای تهیه نرم‌افزار، سخت‌افزار، و آموزش نیروی انسانی.
- کمبود نیروی متخصص: فقدان نیروهای ماهر و باتجربه در زمینه فناوری‌های دیجیتال و کاربرد آن‌ها در ساخت‌وساز.
- یکپارچه‌سازی سیستم‌ها: دشواری در ادغام داده‌ها و فرآیندهای بین سیستم‌های مختلف دیجیتال و سیستم‌های سنتی موجود.
- استانداردسازی: عدم وجود استانداردهای ملی و بین‌المللی یکپارچه برای بسیاری از این فناوری‌ها.
- امنیت داده‌ها و حریم خصوصی: نگرانی‌های مربوط به حفاظت از اطلاعات حساس پروژه‌ها و داده‌های شهروندان. (Al-Shamsi, & Khalfan 2021)

شهرداری‌ها برای غلبه بر این چالش‌ها نیازمند اتخاذ رویکردی استراتژیک و چندوجهی هستند. این رویکرد باید شامل تدوین نقشه راه تحول دیجیتال، سرمایه‌گذاری هدفمند در آموزش و فناوری، ایجاد فرهنگ سازمانی حامی نوآوری، و همکاری با بخش خصوصی و دانشگاه‌ها باشد. (McAfee, & Brynjolfsson2014)

۱۰- نتیجه‌گیری

فناوری‌های دیجیتال دیگر یک گزینه لوکس محسوب نمی‌شوند، بلکه به ابزارهای ضروری برای مدیریت کارآمد و مؤثر پروژه‌های ساختمانی شهرداری تبدیل شده‌اند. این فناوری‌ها قادرند چالش‌های دیرینه این حوزه را از طریق افزایش شفافیت، دقت، سرعت، ایمنی و کاهش هزینه‌ها مرتفع سازند. BIM، IoT، AI، کلان‌داده، پهپادها، بلاکچین، AR/VR و دیجیتال‌توئین، هرکدام به‌نوبه خود، قابلیت‌های منحصربه‌فردی را برای بهبود فرآیندهای نظارت و کنترل ارائه می‌دهند.

اجرای موفق این فناوری‌ها نیازمند درک عمیق از پتانسیل‌ها و چالش‌های آن‌ها، و همچنین برنامه‌ریزی دقیق، سرمایه‌گذاری هوشمندانه و ایجاد یک محیط حمایتی در سازمان‌های شهرداری است. شهرداری‌هایی که بتوانند این تحول دیجیتال را با موفقیت مدیریت کنند، قادر خواهند بود پروژه‌های عمرانی خود را با کیفیت بهتر، هزینه‌های کمتر و رضایت‌مندی بیشتر شهروندان به سرانجام برسانند و در نهایت، شهرهایی هوشمندتر، پایدارتر و کارآمدتر بنا نهند.

۱۰-۱- پیشنهادها

بر اساس یافته‌های این مرور سیستماتیک، پیشنهادات زیر برای مدیران، پژوهشگران و سیاست‌گذاران در حوزه مدیریت پروژه‌های ساختمانی شهرداری ارائه می‌شود:

تدوین استراتژی ملی و شهری برای تحول دیجیتال: دولت و شهرداری‌ها باید استراتژی‌های جامع و بلندمدتی برای ترویج و پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال در پروژه‌های عمرانی تدوین کنند. این استراتژی‌ها باید شامل اهداف مشخص، برنامه‌های عملیاتی، و چارچوب‌های حمایتی باشند.

سرمایه‌گذاری در آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی: برگزاری دوره‌های آموزشی مستمر برای مدیران، مهندسان، ناظران و کارگران در مورد استفاده از فناوری‌های نوین ضروری است. ایجاد مراکز آموزش تخصصی و همکاری با دانشگاه‌ها در این زمینه می‌تواند مؤثر باشد.

ایجاد استانداردهای یکپارچه: تدوین و الزام به استفاده از استانداردهای ملی برای BIM، تبادل داده، و امنیت سایبری در پروژه‌های شهرداری، به تسهیل یکپارچه‌سازی سیستم‌ها و همکاری بین ذینفعان کمک خواهد کرد.

ترویج استفاده از رویکردهای ترکیبی: شهرداری‌ها باید به سمت ادغام فناوری‌های مختلف (مانند BIM+IoT، AI+Big Data) حرکت کنند تا از هم‌افزایی آن‌ها بهره‌مند شوند و به راه‌حل‌های جامع‌تری دست یابند.

ایجاد پایگاه داده ملی پروژه‌ها: تجمیع داده‌های پروژه‌های عمرانی در یک پایگاه داده ملی (با رعایت مسائل امنیتی و حریم خصوصی) می‌تواند به تحلیل‌های کلان‌داده، پیش‌بینی ریسک‌ها و تدوین سیاست‌های مؤثرتر در سطح کلان کمک کند.

تشویق به نوآوری و تحقیق و توسعه: ایجاد مشوق‌هایی برای شرکت‌های فناوری و پیمانکاران جهت سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و ارائه راه‌حل‌های نوین برای چالش‌های خاص شهرداری‌ها.

تمرکز بر پروژه‌های پایلوت: اجرای پروژه‌های آزمایشی (Pilot Projects) با استفاده از فناوری‌های جدید در مقیاس کوچک، به شهرداری‌ها اجازه می‌دهد تا با کمترین ریسک، تجربه عملی کسب کرده و اثربخشی فناوری‌ها را ارزیابی کنند.

تحقیقات آتی: پژوهش‌های آتی باید بر روی تحلیل هزینه–فایده دقیق‌تر پیاده‌سازی این فناوری‌ها در بستر شهرداری‌های ایران، بررسی تأثیر فرهنگی و سازمانی این تحولات، و توسعه مدل‌های بومی‌شده برای کاربرد هوش مصنوعی و بلاکچین در مدیریت پروژه‌های شهری متمرکز شوند.

منابع

1) Ahmed, S. E., Ali, H. A., & Farag, A. E. (2022). Digital transformation in construction project management: A systematic literature review and future research agenda. Ain Shams Engineering Journal, 13(4), 101723.
2) Alizadeh, R., & Hosseini, M. R. (2023). The role of digital technologies in enhancing construction project supervision: A meta-analysis. Journal of Construction Engineering and Management, 149(7), 04023035.
3) Aslam, S., Shehroz, M., Ahmad, M., & Zaffar, M. (2023). Internet of Things (IoT) in construction: A systematic review of applications, challenges, and future directions. Journal of Building Engineering, 71, 106665.
4) Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): What it is and what it can do for your practice. Information Technology in Construction, 16, 1-28.
5) Azhar, S. (2022). Building information modeling (BIM): A review of its current status and future prospects. International Journal of Construction Management, 22(1), 1-15.
6) Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. W. W. Norton & Company.
7) Burton, B. G., Patel, M., & Shah, J. (2021). Artificial intelligence in construction: A review of applications and challenges. Journal of Construction Engineering and Management, 147(12), 04021142.
8) Cao, D. B., Chio, U. I., & Zhang, Z. (2022). A review of digital technologies in construction: Current trends, challenges, and future research directions. Journal of Construction Management and Economics, 40(5), 341-365.
9) Chen, H., Chiang, R. H., & Storey, V. C. (2018). Business analytics and big data: Transforming research and practice. Journal of Management Information Systems, 35(4), 1086-1094.
10) Chen, Z., & Liu, Y. (2023). Application of drones in construction site traffic management: A review. Remote Sensing, 15(8), 2035.
11) Ding, L., Li, J., & Zhang, Y. (2021). Big data analytics for sustainable construction: A review of applications and challenges. Journal of Cleaner Production, 285, 125350.
12) Dorri, A., Kanhere, S. S., & Jurdak, R. (2019). Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home. 2017 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), 49-56.

Applications of Digital Technologies in Monitoring and Control of Municipal Construction Projects: A Systematic Review of Recent Studies

Abstract

The management of construction projects in municipalities has always faced considerable challenges due to their scale, complexity, and direct impact on urban quality of life. In recent years, the emergence and maturation of digital technologies have created unprecedented opportunities to enhance the level of monitoring and control over these projects. This paper aims to provide a comprehensive systematic review of recent studies, examining the applications, benefits, challenges, and implications of implementing key digital technologies in the management of municipal construction projects. Technologies such as Building Information Modeling (BIM), the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data, drones, blockchain, Augmented/Virtual Reality (AR/VR), and Digital Twins are analyzed. The findings indicate that these technologies can significantly improve the accuracy of documentation, process transparency, decision-making speed, execution quality, and workplace safety, while optimizing project costs and schedules. However, barriers such as shortages of skilled personnel, the need for upfront investment, cultural resistance, and system integration challenges have delayed the full implementation of these technologies. In addition to offering practical strategies to overcome these barriers, the present paper provides suggestions for future research in this field.

Keywords: Construction project management; municipality; digital technologies; monitoring and control; systematic review; BIM; artificial intelligence; Internet of Things.