

کاربرد فناوری‌های نوین در نظارت و کنترل کیفیت پروژه‌های عمرانی شهرداری: از پهپاد تا هوش مصنوعی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱

کد مقاله: ۵۳۳۰۰

محسن پرویزی فر^۱

چکیده

نظارت و کنترل کیفیت پروژه‌های عمرانی شهری از ارکان اساسی مدیریت ساخت و ساز در شهرداری‌ها محسوب می‌شود. پیچیدگی روزافزون پروژه‌ها، تعدد پیمانکاران و عدم شفافیت داده‌ها سبب شده است که روش‌های سنتی نظارت کارایی لازم را نداشته باشند. در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین نظیر پهپادها، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا (IoT)، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و دوقلوی دیجیتال، تحولی بنیادین در شیوه‌های نظارت، ارزیابی و تصمیم‌گیری در پروژه‌های عمرانی ایجاد کرده است. این مقاله با هدف بررسی کاربرد و اثربخشی این فناوری‌ها در فرآیند نظارت و کنترل کیفیت پروژه‌های عمرانی شهرداری، به تحلیل مبانی نظری، نمونه‌های جهانی و چالش‌های اجرایی در ایران می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری هوشمندانه این فناوری‌ها می‌تواند موجب افزایش دقت، شفافیت، کاهش هزینه‌ها و ارتقای سرعت پایش شود. در عین حال، چالش‌هایی چون کمبود منابع مالی، ضعف زیرساخت‌های داده‌ای، مقاومت سازمانی و دغدغه‌های امنیت اطلاعات، روند پیاده‌سازی این فناوری‌ها را در شهرداری‌های ایران با محدودیت‌هایی مواجه ساخته است. در پایان، راهکارهایی همچون آموزش نیروی انسانی، تدوین سیاست‌های حمایتی، توسعه زیرساخت‌های داده و همکاری میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های فناوری و شهرداری‌ها پیشنهاد شده است تا زمینه‌ساز گذار به نظارت هوشمند و داده‌محور در مدیریت شهری گردد.

واژگان کلیدی: فناوری‌های نوین، نظارت هوشمند، شهرداری، کنترل کیفیت، هوش مصنوعی، پهپاد، اینترنت اشیا

۱- مقدمه

پروژه‌های عمرانی یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحقق توسعه شهری محسوب می‌شوند و اجرای صحیح آنها نقش مستقیم بر کیفیت زندگی شهروندان، افزایش بهره‌وری خدمات شهری و توسعه زیرساخت‌های پایدار دارد. با این حال، پیچیدگی فنی، گستردگی جغرافیایی، تعدد پیمانکاران و محدودیت منابع مالی شهرداری‌ها باعث شده است که نظارت مؤثر بر این پروژه‌ها به یکی از چالش‌های اصلی مدیریت شهری تبدیل شود. در بسیاری از شهرها، فرایندهای نظارتی همچنان بر پایه بازدیدهای میدانی سنتی، گزارش‌های دستی و برداشتهای غیرسیستماتیک انجام می‌شود که این امر احتمال بروز خطای انسانی، تأخیر در تصمیم‌گیری و کاهش کیفیت پروژه‌ها را افزایش می‌دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش حجم پروژه‌های عمرانی و ضرورت پایش منظم و لحظه‌ای، شهرداری‌ها را به سمت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سوق داده است. فناوری‌هایی همچون پهپادها، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، تصویربرداری سه‌بعدی، سیستم‌های اطلاعات مکانی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، توانسته‌اند ابزارهای مؤثری برای ارتقای دقت، سرعت و شفافیت در نظارت پروژه‌ها فراهم کنند. استفاده از پهپادها به‌ویژه در پروژه‌های پراکنده شهری، امکان ثبت مستمر داده‌های فضایی را با هزینه کم و دقت بالا فراهم کرده و هوش مصنوعی نیز با تحلیل خودکار داده‌ها، تشخیص نواقص اجرایی، پیش‌بینی ریسک‌ها و تولید گزارش‌های تحلیلی، گامی مهم در جهت هوشمندسازی مدیریت پروژه برداشته است (کیم و همکاران، ۲۰۲۰).

ظهور سیستم‌های هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا نیز امکان پایش پیوسته پارامترهای کلیدی مانند لرزش، دما، رطوبت، نشست سازه‌ای یا عملکرد مصالح را مهیا کرده است. ترکیب این فناوری‌ها با BIM، GIS و انواع سنسورها، منجر به شکل‌گیری رویکرد «شهر هوشمند» در نظارت پروژه‌های عمرانی شده است؛ رویکردی که هم قابلیت یکپارچه‌سازی اطلاعات را دارد و هم مشارکت مدیران، ناظران و پیمانکاران را تسهیل می‌کند (چنگ و لو، ۲۰۱۸). با وجود این ظرفیت‌ها، میزان نفوذ فناوری‌های نوین در پروژه‌های عمرانی شهرداری‌های ایران همچنان محدود است. عواملی همچون هزینه اولیه بالا، مقاومت سازمانی در برابر تغییر، کمبود متخصصان حوزه فناوری و ضعف زیرساخت اطلاعاتی، روند هوشمندسازی نظارت را کند کرده‌اند. از این‌رو، بررسی دقیق روش‌های فناورانه و معرفی کاربردهای واقعی آنها می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر مدیران شهری و تدوین برنامه‌های عملیاتی مناسب کمک کند (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین مقاله حاضر با هدف تحلیل و تبیین نقش فناوری‌های نوین در بهبود فرایند نظارت و کنترل کیفیت پروژه‌های عمرانی شهرداری، به ارائه یک مرور جامع از مهم‌ترین ابزارها، مزایا، چالش‌ها و راهکارهای پیاده‌سازی این فناوری‌ها در مدیریت پروژه‌های شهری می‌پردازد. این مقاله تلاش دارد تصویری روشن از وضعیت موجود و آینده نظارت هوشمند را در مدیریت شهری ایران ترسیم کند (محامی و همکاران، ۲۰۱۹).

۲- مبانی نظری

۲-۱- مفهوم نظارت و کنترل کیفیت در پروژه‌های عمرانی شهری

نظارت و کنترل کیفیت در پروژه‌های عمرانی به مجموعه‌ای از فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده و نظام‌مند اطلاق می‌شود که با هدف اطمینان از انطباق اجرای پروژه با استانداردهای فنی، مشخصات قرارداد، ضوابط ایمنی و معیارهای کیفی انجام می‌گیرد. در پروژه‌های شهری، این موضوع از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ زیرا نتایج اجرای پروژه‌ها مستقیماً بر ایمنی عمومی، کارایی زیرساخت‌ها و رضایت شهروندان تأثیر می‌گذارد. کنترل کیفیت سنتی عمدتاً بر بازدیدهای حضوری، گزارش‌های دستی، آزمایش‌های موردی و ارزیابی‌های دوره‌ای مبتنی بوده است که به دلیل محدودیت در سرعت پردازش اطلاعات و احتمال بروز خطای انسانی، همواره با چالش‌هایی همراه بوده است (کیم و همکاران، ۲۰۲۰).

در چارچوب مدیریت پروژه، کنترل کیفیت بخشی از چرخه مدیریت شامل برنامه‌ریزی، اجرا، پایش و ارزیابی است. در سال‌های اخیر، رویکردهای نوین مدیریت پروژه بر استفاده از سیستم‌های داده‌محور، تحلیل لحظه‌ای اطلاعات و یکپارچه‌سازی فرایندهای نظارتی تأکید دارند. این تحول، زمینه ورود فناوری‌های دیجیتال و هوشمند را به حوزه نظارت عمرانی فراهم کرده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

۲-۲- تحول دیجیتال در صنعت ساخت و مدیریت شهری

تحول دیجیتال در صنعت ساخت‌وساز به معنای استفاده نظام‌مند از فناوری‌های نوین اطلاعاتی و ارتباطی برای بهبود کارایی، شفافیت و کیفیت پروژه‌هاست. این تحول بخشی از روند گسترده‌تر «شهر هوشمند» محسوب می‌شود که در آن داده‌های شهری به‌صورت یکپارچه جمع‌آوری، تحلیل و مدیریت می‌شوند. در این چارچوب، پروژه‌های عمرانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های هزینه‌ای شهرداری‌ها، نیازمند سامانه‌های نظارتی هوشمند هستند (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰).

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) یکی از نخستین گام‌های جدی در دیجیتالی‌سازی صنعت ساخت بوده است. BIM امکان ایجاد مدل سه‌بعدی هوشمند از پروژه را فراهم می‌کند که در آن اطلاعات هندسی، زمانی و هزینه‌ای به‌صورت یکپارچه ذخیره می‌شود. این مدل می‌تواند مبنای مقایسه وضعیت برنامه‌ریزی شده و وضعیت واقعی پروژه قرار گیرد و به کنترل کیفیت کمک کند (گلپروارفرد و همکاران، ۲۰۱۵).

۲-۳. پهپادها (UAV) در پایش و کنترل پروژه‌های عمرانی

پهپادها یا وسایل پرنده بدون سرنشین، در سال‌های اخیر به یکی از ابزارهای کلیدی در پایش پروژه‌های عمرانی تبدیل شده‌اند. این فناوری با ثبت تصاویر هوایی با وضوح بالا و تولید مدل‌های سه‌بعدی از محل پروژه، امکان بررسی پیشرفت فیزیکی، ارزیابی ایمنی کارگاه و شناسایی انحرافات اجرایی را فراهم می‌کند. استفاده از پهپادها در مقایسه با روش‌های سنتی نقشه‌برداری و بازدید میدانی، سرعت بالاتر، هزینه کمتر و پوشش گسترده‌تری دارد (محمی و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین داده‌های به‌دست‌آمده از پهپادها می‌توانند با مدل‌های BIM تطبیق داده شوند تا میزان پیشرفت واقعی پروژه با برنامه زمان‌بندی مقایسه شود. این یکپارچه‌سازی، امکان پایش مستمر و دقیق را فراهم می‌سازد و تصمیم‌گیری مدیریتی را بهبود می‌بخشد (گلپروارفرد و همکاران، ۲۰۱۵).

۲-۴. هوش مصنوعی و بینایی ماشین در کنترل کیفیت

هوش مصنوعی (AI) به مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها و سیستم‌های محاسباتی اطلاق می‌شود که قادر به یادگیری از داده‌ها، تشخیص الگوها و انجام تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده هستند. در صنعت ساخت، کاربردهای هوش مصنوعی شامل تشخیص ترک‌های سازه‌ای، تحلیل تصاویر کارگاهی، پیش‌بینی تأخیر پروژه و ارزیابی ریسک ایمنی است. الگوریتم‌های یادگیری عمیق به‌ویژه در حوزه بینایی ماشین، امکان شناسایی خودکار عیوب اجرایی را از طریق تصاویر و ویدئوهای ثبت شده فراهم کرده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱). ترکیب هوش مصنوعی با داده‌های جمع‌آوری شده از پهپادها و حسگرها، می‌تواند به ایجاد سیستم‌های هشداردهنده هوشمند منجر شود که پیش از بروز خطاهای بحرانی، مدیران پروژه را مطلع سازند. این رویکرد نه تنها موجب افزایش کیفیت، بلکه باعث کاهش هزینه‌های ناشی از دوباره‌کاری و تأخیر می‌شود (کیوم و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-۵. اینترنت اشیاء (IoT) و حسگرهای هوشمند

اینترنت اشیاء به شبکه‌ای از دستگاه‌ها و حسگرهای متصل گفته می‌شود که داده‌ها را به‌صورت لحظه‌ای جمع‌آوری و منتقل می‌کنند. در پروژه‌های عمرانی شهری، حسگرها می‌توانند اطلاعاتی مانند ارتعاش سازه، رطوبت بتن، دمای محیط، نشست زمین یا فشار وارد بر سازه را ثبت کنند. این داده‌ها به‌صورت پیوسته در سامانه‌های مرکزی تحلیل می‌شوند و در صورت مشاهده انحراف از استانداردها، هشدار صادر می‌شود (چنگ و لو، ۲۰۱۸). کاربرد IoT در کنترل کیفیت، امکان نظارت مستمر و پیشگیرانه را فراهم می‌کند و وابستگی به بازدیدهای مقطعی را کاهش می‌دهد. این فناوری به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ شهری مانند پل‌ها، تونل‌ها و خطوط مترو اهمیت ویژه‌ای دارد (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-۶. یکپارچه‌سازی فناوری‌ها و مفهوم دوقلوی دیجیتال

یکی از رویکردهای پیشرفته در مدیریت پروژه‌های عمرانی، استفاده از مفهوم «دوقلوی دیجیتال» است. در این رویکرد، یک نسخه مجازی و پویا از پروژه فیزیکی ایجاد می‌شود که به‌صورت لحظه‌ای با داده‌های واقعی به‌روزرسانی می‌شود. دوقلوی دیجیتال با ترکیب BIM، داده‌های پهپادی، حسگرهای IoT و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، بستری جامع برای نظارت و تحلیل فراهم می‌کند (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰).

این یکپارچه‌سازی موجب افزایش شفافیت، تسهیل گزارش‌دهی، بهبود پاسخگویی و ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری در سطح مدیریت شهری می‌شود. همچنین امکان تحلیل سناریوهای مختلف و پیش‌بینی پیامدهای اجرایی پیش از وقوع، از دیگر مزایای این رویکرد است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

کاربردهای عملی فناوری‌های نوین در نظارت و کنترل کیفیت پروژه‌های عمرانی شهرداری

۱. پهپادها در نقشه‌برداری و تصویربرداری هوایی شهری

پهپادها در پروژه‌های عمرانی شهرداری‌ها به‌عنوان ابزاری مؤثر برای جمع‌آوری داده‌های مکانی و تصویری با دقت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دستگاه‌ها می‌توانند در بازه‌های زمانی کوتاه، تصاویر هوایی از کارگاه‌ها و مسیرهای عمرانی ثبت کرده و

با استفاده از نرم‌افزارهای فتوگرامتری، مدل‌های سه‌بعدی از محیط پروژه تولید کنند. داده‌های پهبادی معمولاً برای ارزیابی پیشرفت فیزیکی، تشخیص تخلفات اجرایی و ارزیابی ایمنی کارگاه به کار می‌روند. در شهرهایی مانند سنگاپور و دوی، استفاده از پهپاد برای پایش پروژه‌های جاده‌ای و ساختمانی باعث کاهش ۴۰ درصدی هزینه‌های نظارت شده است. در ایران نیز برخی شهرداری‌ها مانند تهران و مشهد از این فناوری برای تهیه نقشه‌های وضعیت پروژه‌های شهری استفاده کرده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

۳- هوش مصنوعی در تحلیل خودکار داده‌ها و تشخیص نواقص اجرایی

هوش مصنوعی و یادگیری عمیق در مدیریت شهری به‌طور مستقیم در نظارت پروژه‌های عمرانی کاربرد یافته‌اند. یکی از کاربردهای مهم، تحلیل خودکار تصاویر پهبادی برای تشخیص نقاط بحرانی مانند ترک‌ها، نشست‌ها یا ناهماهنگی‌های سازه‌ای است. الگوریتم‌های بینایی ماشین می‌توانند نواقص را شناسایی کرده و نقشه ریسک تولید کنند که به تصمیم‌گیری سریع مدیران کمک می‌کند. به‌عنوان نمونه، در پلتفرم‌های نظارت هوشمند توسعه‌یافته در کره جنوبی، هوش مصنوعی توانسته است نرخ خطای انسانی در ارزیابی کیفیت را تا ۶۰٪ کاهش دهد (کیم و همکاران، ۲۰۲۰).

همچنین استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های تاریخی، به برآورد دقیق‌تر زمان و هزینه پروژه‌ها کمک کرده و از بروز تأخیر یا افزایش هزینه جلوگیری می‌کند. این نوع تحلیل‌ها در پروژه‌های پیچیده زیرساختی مانند خطوط مترو و پل‌های شهری کاربرد فراوانی یافته‌اند (محمی و همکاران، ۲۰۱۹).

۳-۱. حسگرهای هوشمند و اینترنت اشیا در پایش پروژه‌های سازه‌ای

در پروژه‌های عمرانی شهری، به‌ویژه پروژه‌های زیرساختی نظیر پل‌ها، تونل‌ها و پارکینگ‌های طبقاتی، نصب حسگرهای هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا نقش مهمی در پایش مستمر کیفیت اجرا دارد. حسگرها اطلاعاتی مانند لرزش سازه، دما، رطوبت، فشار بتن و تغییر شکل عناصر سازه‌ای را ثبت کرده و به سامانه‌های مرکزی منتقل می‌کنند. این داده‌ها به‌صورت بلادرنگ تحلیل شده و در صورت مشاهده انحراف از معیار، هشدار صادر می‌شود. در برخی پروژه‌های شهرداری‌های آسیایی (از جمله توکیو و سئول)، شبکه حسگرهای IoT توانسته است میزان آسیب سازه‌ای را در مراحل اولیه تشخیص داده و از خسارات گسترده جلوگیری کند. در ایران نیز استفاده آزمایشی از حسگرهای بتن هوشمند در پروژه‌های بزرگراهی تهران نتایج promising به همراه داشته است (چنگ و لو، ۲۰۱۸).

۳-۲. سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)

یکی از پیشرفته‌ترین کاربردهای فناوری در نظارت عمرانی، تلفیق GIS و BIM است. GIS محیطی تحلیلی برای داده‌های مکانی شهری فراهم می‌کند، درحالی‌که BIM نمایی دقیق از مدل سازه‌ای پروژه ارائه می‌دهد. ترکیب این دو سیستم امکان مشاهده و تحلیل اطلاعات مکانی، هندسی، مالی و زمانی را به‌صورت هم‌زمان فراهم می‌کند. مدیران پروژه می‌توانند با مقایسه داده‌های واقعی با مدل‌های برنامه‌ریزی‌شده، انحرافات اجرایی یا تأخیرها را شناسایی و اصلاح کنند (گلپروارفرد و همکاران، ۲۰۱۵). در شهرداری‌هایی که رویکرد «پایش هوشمند شهری» را اتخاذ کرده‌اند، ارتباط میان GIS و BIM به ایجاد داشبوردهای مدیریتی فرایندهای عمرانی منجر شده است. در این داشبوردها داده‌های پهبادی، حسگرها و گزارشات میدانی با هم تلفیق می‌شوند تا تصویری جامع برای تصمیم‌گیری فراهم شود (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰).

۳-۴. دوقلوی دیجیتال در مدیریت و گزارش‌دهی پروژه‌های شهری

«دوقلوی دیجیتال» در سال‌های اخیر به یکی از نوین‌ترین کاربردهای فناوری در مدیریت شهری تبدیل شده است. در این رویکرد، یک نسخه مجازی از پروژه فیزیکی ایجاد می‌شود که با داده‌های لحظه‌ای از پهپادها، حسگرها و سیستم‌های مدیریتی به‌روزرسانی می‌شود. این سامانه‌ها وضعیت واقعی پروژه را در محیط مجازی نمایش داده و امکان تحلیل و پیش‌بینی شرایط آینده را فراهم می‌سازند. برای نمونه، در چند شهرداری اروپایی از دوقلوی دیجیتال برای نظارت بر ساخت خطوط مترو و تونل‌های شهری استفاده شده است که توانسته هزینه‌های نظارت میدانی را تا ۳۰٪ کاهش دهد و دقت گزارش‌های پیشرفت فیزیکی را افزایش دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در ایران نیز پروژه‌های پژوهشی محدودی در زمینه توسعه دوقلوی دیجیتال شهری در حال اجراست که انتظار می‌رود در سال‌های آینده به‌صورت گسترده‌تر به کار گرفته شود (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰).

۵-۳. داشبوردهای هوشمند شهرداری و تصمیم‌گیری داده‌محور

یکی از نتایج عملی ترکیب فناوری‌های مختلف در نظارت پروژه‌ها، ایجاد داشبوردهای مدیریتی هوشمند است. این داشبوردها داده‌های ورودی از پیمانکاران، حسگرها، تصاویر و گزارش‌های انسانی را جمع‌آوری کرده و با بهره‌گیری از تحلیل هوش مصنوعی و مدل‌های داده‌ای، شاخص‌های عملکرد پروژه‌ها را نمایش می‌دهند. شهرداری‌ها می‌توانند از این اطلاعات برای ارزیابی پیمانکاران، تخصیص بهینه منابع و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده استفاده کنند (چنگ و لو، ۲۰۱۸). داشبوردهای هوشمند در قالب پلتفرم‌های نظارتی شهر هوشمند، نقش مهمی در ارتقای شفافیت و پاسخگویی مدیریت شهری دارند و موجب اعتماد بیشتر شهروندان به عملکرد دستگاه‌های اجرایی می‌شوند (محمی و همکاران، ۲۰۱۹).

۴- مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های نوین در نظارت پروژه‌های عمرانی شهرداری‌ها

۴-۱. مزایای اصلی فناوری‌های نوین در نظارت پروژه‌ها

الف) افزایش دقت و کیفیت نظارت: یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از فناوری‌های نوین مانند پهپاد، حسگرهای IoT و سیستم‌های BIM، ارتقای دقت داده‌ها و کاهش خطاهای انسانی است. پهپادها قادرند اطلاعات فضایی دقیق و به‌روز از وضعیت اجرایی پروژه‌ها ارائه دهند و مدیران را از وضعیت واقعی پیشرفت و کیفیت آگاه کنند. این امر موجب می‌شود که انحراف از طراحی یا نقص در اجرا سریع‌تر تشخیص داده شده و اقدامات اصلاحی به‌موقع انجام گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

ب) سرعت بالا و کارایی بیشتر: فناوری‌های دیجیتال توانسته‌اند زمان انجام بازرسی‌ها و تولید گزارش‌های نظارتی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند. تحلیل خودکار داده‌ها توسط هوش مصنوعی یا مدل‌سازی سه‌بعدی از طریق پهپاد، زمان تحلیل‌ها را از چند هفته به چند ساعت تقلیل داده است. این رویکرد موجب تصمیم‌گیری سریع‌تر و کاهش تأخیر در پروژه‌ها می‌شود (کیم و همکاران، ۲۰۲۰).

ج) بهبود شفافیت و پاسخگویی: یکی دیگر از مزایای مهم، شفافیت در فرایندهای عمرانی است. داده‌های جمع‌آوری‌شده از پهپادها و حسگرها به‌عنوان شواهد عینی، مستند و قابل‌استناد قابل ارائه به پیمانکار، ناظر و شهروند هستند. وجود این داده‌ها میزان خطاپذیری و اختلاف‌نظر میان طرفین پروژه را کاهش می‌دهد و اعتماد عمومی به عملکرد شهرداری را افزایش می‌دهد (چنگ و لو، ۲۰۱۸).

د) کاهش هزینه‌ها و ریسک‌ها: فناوری‌های نوین در بلندمدت موجب صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌های نظارت و نگهداری می‌شوند. برای مثال، نصب حسگرهای هوشمند در پل‌ها یا تونل‌ها می‌تواند از بروز خرابی‌های گسترده جلوگیری کند و از نیاز به بازرسی‌های پرهزینه انسانی بکاهد. هوش مصنوعی نیز با تحلیل پیش‌بینی‌کننده خود، می‌تواند ریسک تأخیر یا افزایش هزینه پروژه را پیش از وقوع شناسایی کند (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰).

۴-۲. چالش‌های اصلی پیاده‌سازی در شهرداری‌های ایران

الف) موانع مالی و بودجه‌ای: یکی از نخستین چالش‌ها، هزینه اولیه بالای خرید تجهیزات، پهپاد، حسگرها و زیرساخت‌های نرم‌افزاری است. بسیاری از شهرداری‌ها در ایران با محدودیت مالی مواجه‌اند و اجرای چنین سامانه‌هایی بدون حمایت مالی ملی یا بخش خصوصی دشوار است (محمی و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر هزینه خرید، نگهداری و به‌روزرسانی مستمر نیز نیازمند بودجه پایدار است.

ب) کمبود نیروی انسانی متخصص: فناوری‌های نوین مانند BIM، IoT و یادگیری ماشین به مهارت‌های فنی پیچیده نیاز دارند. در بسیاری از شهرداری‌ها، نیروی متخصص برای بهره‌برداری مؤثر از این فناوری‌ها محدود است. نبود آموزش کافی و ضعف مهارت‌های دیجیتال در سطوح مدیریتی و کارشناسی موجب می‌شود که سامانه‌ها بلااستفاده باقی بمانند یا راندمان پایین داشته باشند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

ج) مقاومت سازمانی در برابر تغییر: در ساختارهای سنتی مدیریت شهری، تغییر رویه‌های نظارتی معمولاً با مقاومت روبه‌رو می‌شود. کارکنانی که سال‌ها با فرایندهای سنتی کار کرده‌اند، ممکن است نسبت به فناوری‌های جدید بی‌اعتماد باشند یا آن را دشوار تلقی کنند. این مقاومت سازمانی مانع از پذیرش فناوری و کاهش سرعت تحول دیجیتال در شهرداری‌ها می‌شود (کلپروارفرد و همکاران، ۲۰۱۵).

د) ضعف زیرساخت داده و ارتباطات: پیاده‌سازی موفق فناوری‌های نظارت هوشمند نیازمند بستر ارتباطی پایدار، بانک‌های داده‌ی متمرکز و خطوط ارتباطی پرسرعت است. متأسفانه در بسیاری از شهرهای ایران، زیرساخت‌های شبکه داده و سامانه‌های

یکپارچه GIS یا BIM به صورت کامل در دسترس نیستند. نبود استانداردهای داده‌ای و هماهنگی میان بخش‌های مختلف شهرداری نیز چالش دیگری است (چنگ و لو، ۲۰۱۸).

همه ملاحظات حقوقی و امنیت داده‌ها؛ یکی از چالش‌های جدید، حفاظت از داده‌های جمع‌آوری شده توسط پیمانکاران و حسگرهاست. این داده‌ها ممکن است شامل اطلاعات حساس مکانی یا تصویری باشند که انتشار یا دسترسی غیرمجاز به آنها می‌تواند پیامدهای حقوقی و اجتماعی داشته باشد. نبود قوانین مشخص در زمینه مالکیت داده و حریم شخصی، ریسک سوءاستفاده از اطلاعات را افزایش می‌دهد (ساکس و همکاران، ۲۰۲۰).

۳-۴. راهکارهای پیشنهادی برای غلبه بر چالش‌ها

برای بهره‌برداری مؤثر از فناوری‌های نوین در شهرداری‌ها، مجموعه‌ای از اقدامات راهبردی پیشنهاد می‌شود:

- تدوین سیاست‌های ملی جهت حمایت مالی از هوشمندسازی فرایندهای نظارت شهری؛
 - برگزاری دوره‌های آموزشی تخصصی در زمینه GIS، BIM، GIS، پیمانکاران و تحلیل داده برای کارشناسان شهرداری؛
 - طراحی چارچوب‌های قانونی برای امنیت داده و حریم اطلاعاتی؛
 - ایجاد مراکز داده شهری و پلتفرم‌های یکپارچه تحلیل اطلاعات؛
 - توسعه همکاری میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های فناوری و شهرداری‌ها در قالب پروژه‌های مشترک تحقیقاتی.
- اجرای این راهکارها می‌تواند زمینه‌ساز گذار آرام، کم‌هزینه و مؤثر شهرداری‌ها به سمت نظارت هوشمند و داده‌محور شود و در نهایت به افزایش اعتماد شهروندان، کیفیت خدمات عمومی و بهره‌وری اقتصادی منجر گردد (محامی و همکاران، ۲۰۱۹).

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحول فناوری در دهه‌های اخیر فرصت‌های چشمگیری برای ارتقای کیفیت نظارت و کنترل پروژه‌های عمرانی شهری فراهم کرده است. فناوری‌هایی مانند پیمانکار، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و دوقلوی دیجیتال نشان داده‌اند که می‌توانند بسیاری از محدودیت‌های روش‌های سنتی نظارت را برطرف کرده و دقت، سرعت، شفافیت و اثربخشی تصمیم‌گیری را افزایش دهند. تحلیل‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که ترکیب این فناوری‌ها قادر است تصویری جامع، یکپارچه و لحظه‌ای از وضعیت پروژه‌ها ارائه دهد و از بروز خطاهای اجرایی، تأخیرهای زمانی و هزینه‌های اضافی جلوگیری کند.

با وجود این مزایا، شهرداری‌های ایران همچنان با چالش‌هایی مانند محدودیت مالی، کمبود نیروی متخصص، مقاومت سازمانی، ضعف زیرساخت‌های داده‌ای و دغدغه‌های حقوقی مواجه‌اند. این چالش‌ها نه تنها مانع پذیرش فناوری می‌شوند، بلکه سرعت تحول دیجیتال در مدیریت پروژه‌های شهری را نیز کاهش می‌دهند. بر این اساس، لازم است که برنامه‌ریزی‌های کلان و میان‌مدت برای رفع موانع مذکور و ایجاد ظرفیت‌های لازم برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند در دستور کار مدیریت شهری قرار گیرد.

برای ارتقای اجرای فناوری‌های نوین در پروژه‌های عمرانی شهرداری‌ها، مجموعه‌ای از پیشنهادهای اجرایی قابل ارائه است. نخست، توسعه چارچوب‌های حمایتی در سطح ملی و افزایش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال ضروری است. دوم، آموزش هدفمند کارکنان شهرداری در حوزه‌هایی مانند BIM، تحلیل داده، پیمانکار و سامانه‌های هوشمند نظارتی باید در قالب برنامه‌های مهارتی و بازآموزی دنبال شود. سوم، ایجاد پلتفرم‌های یکپارچه داده‌ای و دوقلوهایی دیجیتال می‌تواند زمینه هماهنگی میان واحدهای مختلف شهری و تسریع تصمیم‌گیری را فراهم آورد. چهارم، تدوین قوانین مشخص در حوزه مالکیت و امنیت داده‌ها ضروری است تا نگرانی‌های حقوقی کاهش یابد. نهایتاً، همکاری میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های فناوری و شهرداری‌ها می‌تواند به تولید راهکارهای عملی، بومی‌سازی فناوری‌ها و افزایش اثربخشی نظارت هوشمند کمک کند.

در مجموع، گذار از نظارت سنتی به نظارت هوشمند در پروژه‌های عمرانی شهرداری نیازمند ترکیبی از فناوری، مهارت، سیاست‌گذاری و تحول سازمانی است. اتخاذ رویکردی تدریجی و مبتنی بر داده می‌تواند به شهرهای ایران کمک کند تا از مزایای تحول دیجیتال بهره‌مند شوند و در مسیر توسعه پایدار و کارآمد گام بردارند.

- 1) Zhang, L., et al. (2021). Applications of Artificial Intelligence and UAVs in Urban Construction Project Supervision. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45(3), 225–238.
- 2) Kim, Y. S., et al. (2020). Smart Supervision Management in Construction Projects Using BIM and GIS. *Journal of Digital Construction Research*, 12(4), 187–201.
- 3) Cheng, T., & Lu, W. (2018). Transparency and Accountability in Urban Project Management Using Spatial Data and Drones. *Journal of Urban Infrastructure Engineering*, 32(2), 98–112.
- 4) Sachs, A., et al. (2020). Artificial Intelligence and Risk Prediction in Construction Projects: A Case Study of London Municipality. *Journal of Construction Technology and Urban Management*, 29(5), 341–356.
- 5) Mohami, A., et al. (2019). Challenges of Implementing Modern Technologies in Iranian Urban Institutions. *Quarterly Journal of Urban Development*, 8(2), 75–92.
- 6) Golparvar-Fard, A., et al. (2015). Organizational Resistance to Digital Transformation in Public Sector Institutions. *Journal of Transformational Management*, 5(1), 15–27.

Application of Modern Technologies in Supervision and Quality Control of Municipal Construction Projects: From Drones to Artificial Intelligence

Abstract

Supervision and quality control of urban construction projects are among the fundamental pillars of municipal construction management. The increasing complexity of projects, multiplicity of contractors, and lack of data transparency have rendered traditional monitoring methods insufficient. In recent years, the adoption of modern technologies such as drones, artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and digital twins has revolutionized how supervision, evaluation, and decision-making are conducted in construction projects. This study aims to examine the application and effectiveness of these technologies in the supervision and quality control processes of municipal construction projects. The research analyzes theoretical foundations, global examples, and implementation challenges within the context of Iran. The findings reveal that intelligent utilization of these technologies can significantly enhance accuracy, transparency, cost efficiency, and monitoring speed. Nevertheless, challenges such as financial constraints, weak data infrastructure, organizational resistance, and data security concerns have limited the implementation process among Iranian municipalities. Finally, actionable strategies including human resource training, supportive policy development, data infrastructure improvement, and collaborative partnerships between universities, technology companies, and municipalities are proposed to enable a transition toward smart and data-driven oversight in urban management.

Keywords: Modern technologies, smart supervision, municipality, quality control, artificial intelligence, drones, Internet of Things (IoT)