فصلنامه پژوهش در مدیریت شماره۱- دوره۲- صفحات۸۴-۵۷۱
Journal of Research in Management
Issn: 3060-6241

بهینه‌سازی طراحی و اجرا در پروژه‌های زیرساختی شهری با استفاده از نرم‌افزارهای مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM)

حسین محسنی راد [۱]*
۱ -لیسانس مهندسی عمران گرایش ساختمان، دانشگاه علمی کاربردی شهرداری‌ها .
(رئیس اداره اجرائیات شهرداری مرکزی)

چکیده

رشد شتابان شهرنشینی، پیچیدگی فزاینده پروژه‌های زیرساختی شهری و محدودیت منابع مالی و زمانی، ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای نوین در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM) به‌عنوان یک فناوری یکپارچه، نقش کلیدی در ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری، هماهنگی بین ذی‌نفعان و بهینه‌سازی چرخه عمر پروژه‌های زیرساختی شهری ایفا می‌کند. مقدمه این پژوهش بر این فرض استوار است که چالش‌های رایج در پروژه‌های شهری نظیر دوباره‌کاری، افزایش هزینه‌ها، تأخیر در اجرا و ناهماهنگی بین بخش‌های مختلف، ریشه در ضعف سیستم‌های سنتی طراحی و مدیریت پروژه دارند. هدف اصلی این مقاله مروری، بررسی ظرفیت‌ها و کارکردهای BIM در بهینه‌سازی فرآیندهای طراحی و اجرا در پروژه‌های زیرساختی شهری و تبیین نقش آن در ارتقای بهره‌وری، پایداری و مدیریت یکپارچه پروژه‌ها است. روش تحقیق به‌صورت مروری و تحلیلی انجام شده و مبتنی بر بررسی و تحلیل مطالعات علمی و پژوهش‌های انجام‌شده در حوزهBIM ، مدیریت پروژه‌های عمرانی و زیرساخت‌های شهری می‌باشد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از BIM موجب بهبود هماهنگی بین رشته‌های مختلف مهندسی، افزایش دقت در متره و برآورد، کاهش خطاهای اجرایی، بهینه‌سازی زمان‌بندی و ارتقای کنترل هزینه در پروژه‌های شهری می‌شود. همچنین نتایج بیانگر آن است که BIM با فراهم‌سازی بستر مناسب برای تحلیل‌های چندبعدی، امکان ارزیابی سناریوهای مختلف طراحی و اجرا را پیش از مرحله ساخت فراهم می‌سازد. در نهایت، نتیجه‌گیری مقاله حاکی از آن است که پیاده‌سازی نظام‌مند BIM در پروژه‌های زیرساختی شهری، نه‌تنها یک ابزار فناورانه، بلکه یک تحول مدیریتی محسوب می‌شود که می‌تواند زمینه‌ساز افزایش کارایی، شفافیت و پایداری در مدیریت شهری و اجرای پروژه‌های عمرانی باشد.

واژگان کلیدی: مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM)، پروژه‌های زیرساختی شهری، بهینه‌سازی طراحی و اجرا، مدیریت یکپارچه پروژه، توسعه پایدار شهری

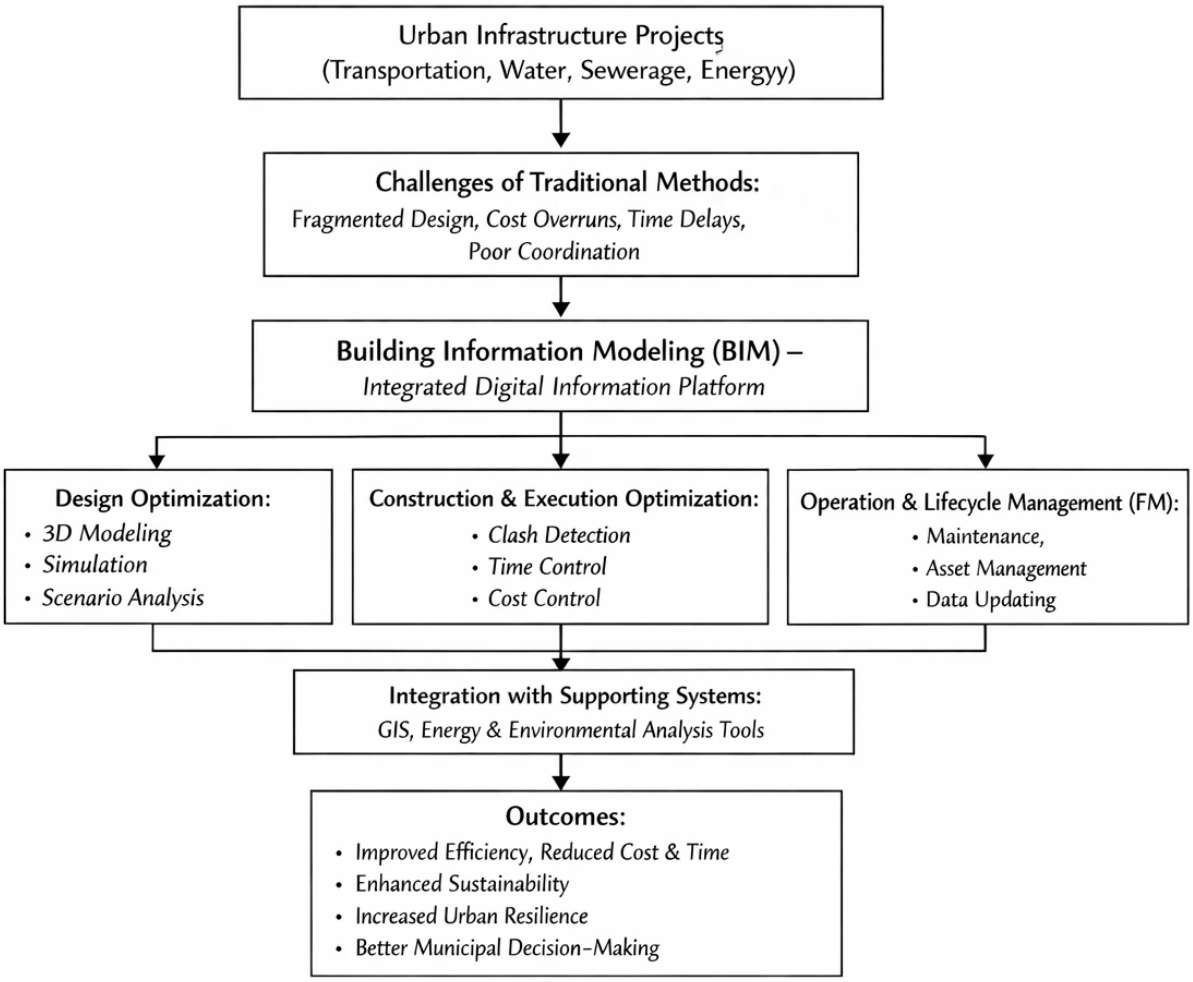
پروژه‌های زیرساختی شهری، شامل شبکه‌های حمل و نقل، آب، فاضلاب، و انرژی، شریان‌های حیاتی جوامع مدرن را تشکیل می‌دهند و موفقیت در مدیریت، طراحی و اجرای آن‌ها مستقیماً بر کیفیت زندگی شهروندان تأثیر می‌گذارد. در دهه‌های اخیر، با افزایش مقیاس و پیچیدگی این پروژه‌ها، روش‌های سنتی طراحی و نقشه‌کشی دو بعدی دیگر قادر به پاسخگویی مؤثر به الزامات فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نبوده‌اند (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). این نارسایی‌ها معمولاً منجر به افزایش هزینه‌های پیش‌بینی نشده، تأخیر در برنامه‌ها و وقوع تداخلات متعدد در محل پروژه می‌شود که نیازمند بازنگری اساسی در پارادایم‌های مهندسی و مدیریتی است. ظهور و بلوغ فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به عنوان یک رویکرد مبتنی بر داده و فرآیند، افق‌های جدیدی را برای غلبه بر این چالش‌ها گشوده است؛ به ویژه در حوزه زیرساخت‌های پیچیده شهری که نیازمند هماهنگی بین رشته‌های مهندسی سازه، مکانیک، برق، ترافیک و شهرسازی هستند. BIM فراتر از یک ابزار نقشه‌کشی سه‌بعدی است؛ بلکه یک بستر تبادل اطلاعات متمرکز برای مدیریت جامع چرخه عمر دارایی‌های فیزیکی، از مفهوم‌سازی اولیه تا تخریب (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱).

تأثیر BIM در پروژه‌های زیرساختی شهری، خصوصاً در مدیریت اطلاعات متراکم و ارتباط بین ذی‌نفعان متعدد، بسیار حائز اهمیت است. این فناوری امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط موجود و آینده را فراهم می‌آورد، از جمله تحلیل تداخلات (Clash Detection) که یکی از بزرگترین منابع اتلاف زمان و هزینه در کارگاه‌های زیرساختی محسوب می‌شود (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). اجرای موفقیت‌آمیز BIM نیازمند تغییر فرهنگ سازمانی و تعریف استانداردهای تبادل اطلاعات است که این خود یک چالش مدیریتی بزرگ در سازمان‌های دولتی و شهرداری‌ها به شمار می‌آید. یکی از مزایای کلیدی BIM در پروژه‌های زیرساختی، قابلیت آن در ادغام با سایر فناوری‌های پیشرفته مانند سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. این یکپارچه‌سازی امکان مدل‌سازی زیرساخت‌ها در مقیاس شهری و تحلیل اثرات آن‌ها بر محیط پیرامون، از جمله الگوهای ترافیکی و تأثیر بر زیرساخت‌های مجاور را فراهم می‌آورد (صفری، علیان و زرعی‌چیان، ۲۰۲۵). این قابلیت، به مدیران شهری این امکان را می‌دهد که تصمیمات خود را نه صرفاً بر اساس مدل‌های مجزا، بلکه بر اساس یکپارچگی سیستمی زیرساخت‌های شهری اتخاذ کنند.

علاوه بر بهبود فرآیندهای مرسوم، BIM به طور فزاینده‌ای در زمینه‌های پایداری و تاب‌آوری شهری نقش محوری ایفا می‌کند. مدل‌های هوشمند می‌توانند اثرات مصرف انرژی تأسیسات زیرزمینی یا تأثیر تغییرات اقلیمی بر مقاومت سازه‌های شهری را شبیه‌سازی کنند (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). این امر، مهندسان را قادر می‌سازد تا راه‌حل‌های سازگار با محیط زیست و مقاوم در برابر بحران‌ها را از مراحل ابتدایی طراحی وارد مدل کنند، که این امر در بلندمدت منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش طول عمر مفید زیرساخت‌ها خواهد شد. با این حال، به‌کارگیری موفق BIM در مقیاس پروژه‌های شهری نیازمند یک استراتژی پیاده‌سازی مدون است که شامل تعریف سطح بلوغ (LOD) مناسب برای هر فاز پروژه، آموزش کارکنان فنی و مدیریتی، و توسعه مدل‌های اطلاعاتی مبتنی بر استانداردهای ملی و بین‌المللی است (حامد شکری و نجفی، ۲۰۲۴). عدم توجه به جنبه‌های مدیریتی و سازمانی، می‌تواند منجر به عدم موفقیت در پیاده‌سازی فناوری شود، حتی اگر از نرم‌افزارهای پیشرفته استفاده شود.

این مقاله با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در روش‌های سنتی، قصد دارد تا به صورت تحلیلی نشان دهد که چگونه می‌توان با استفاده سیستماتیک از BIM، نقاط ضعف رایج در طراحی و اجرای پروژه‌های زیرساختی شهری را برطرف نمود. تمرکز بر جنبه‌های مدیریتی و فنی، به مخاطبان این پژوهش، یعنی مهندسان عمران و مدیران شهرداری، ابزارهای مفهومی لازم برای برنامه‌ریزی یک گذار موفق به سمت محیط‌های کاری دیجیتال را ارائه خواهد داد. در نهایت، بخش‌های بعدی مقاله

به تشریح دقیق‌تر مبانی نظری BIM، کاربرد آن در طراحی و برنامه‌ریزی، مدیریت ریسک و زمان در اجرا، نقش آن در نگهداری و مدیریت دارایی‌های شهری (FM)، و همچنین تأثیر آن بر جنبه‌های محیط زیستی و تاب‌آوری زیرساخت‌ها خواهد پرداخت تا تصویری جامع از پتانسیل بهینه‌سازی توسط این فناوری ارائه دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی بهینه‌سازی طراحی و اجرای پروژه‌های زیرساختی شهری مبتنی بر مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM)

شکل ۱ یک مدل مفهومی جامع از نحوه به‌کارگیری مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM) در بهینه‌سازی طراحی، اجرا و مدیریت چرخه عمر پروژه‌های زیرساختی شهری را نمایش می‌دهد. در این مدل، پروژه‌های زیرساختی شهری شامل شبکه‌های حمل‌ونقل، آب، فاضلاب و انرژی به‌عنوان بستر اصلی مطالعه در نظر گرفته شده‌اند که به‌طور سنتی با چالش‌هایی نظیر طراحی جزیره‌ای، افزایش هزینه‌ها، تأخیرهای زمانی و ضعف هماهنگی میان ذی‌نفعان مواجه هستند. این چالش‌ها ضرورت

استفاده از رویکردهای نوین مدیریتی و فناورانه را برجسته می‌سازد. در ادامه، BIM به‌عنوان یک پلتفرم دیجیتال یکپارچه معرفی می‌شود که امکان تجمیع، مدیریت و تبادل اطلاعات پروژه را در تمامی مراحل فراهم می‌سازد. این پلتفرم نقش محوری در اتصال فازهای مختلف پروژه ایفا کرده و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری آگاهانه و کاهش عدم قطعیت‌ها می‌شود. همان‌گونه که در مدل نشان داده شده است، کاربرد BIM به سه حوزه اصلی بهینه‌سازی در فاز طراحی، فاز اجرا و فاز بهره‌برداری و مدیریت چرخه عمر تقسیم می‌شود.

در فاز طراحی، BIM با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، شبیه‌سازی و تحلیل سناریوهای مختلف، امکان بررسی گزینه‌های فنی و اقتصادی متنوع را فراهم کرده و منجر به ارتقای کیفیت طراحی و کاهش خطاهای پیش از اجرا می‌شود. در فاز اجرا، قابلیت‌هایی نظیر تشخیص تداخلات، کنترل زمان و هزینه و هماهنگی بین عوامل اجرایی موجب افزایش بهره‌وری و کاهش دوباره‌کاری‌ها می‌گردد. همچنین در فاز بهره‌برداری، BIM به‌عنوان ابزاری کارآمد برای نگهداری، مدیریت دارایی‌ها و به‌روزرسانی اطلاعات عمل می‌کند. در نهایت، ادغام BIM با سیستم‌های پشتیبان نظیر GIS و ابزارهای تحلیل انرژی و محیط‌زیست، دستیابی به نتایجی همچون افزایش کارایی پروژه، کاهش هزینه و زمان، ارتقای پایداری، افزایش تاب‌آوری شهری و بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی در سطح شهرداری‌ها را ممکن می‌سازد. این مدل مفهومی چارچوبی روشن برای تبیین نقش BIM در توسعه زیرساخت‌های شهری هوشمند و پایدار ارائه می‌دهد.

۲. مبانی نظری و تحول پارادایم طراحی زیرساخت

انتقال از مدل‌سازی سه‌بعدی مبتنی بر CAD به مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در حوزه زیرساخت‌ها (که اغلب به آن IC-BIM یا Infrastructure BIM اطلاق می‌شود) یک تحول پارادایمی بنیادی است که ماهیت تعامل مهندسان با داده‌های فضایی و فیزیکی پروژه را تغییر می‌دهد (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). در رویکرد سنتی، داده‌ها اغلب در فرمت‌های جداگانه و غیرمتمرکز ذخیره می‌شدند، که این امر منجر به ناهماهنگی مداوم بین نقشه‌های طراحی، مشخصات فنی و صورت وضعیت‌های اجرایی می‌شد. BIM با ایجاد یک مدل واحد و مرکزی مبتنی بر اشیاء هوشمند، این ناهماهنگی ذاتی را از بین می‌برد. مدل BIM زیرساخت شهری صرفاً یک نمایش هندسی نیست؛ بلکه یک مخزن غنی از داده‌های شیءگرا است که ویژگی‌های فیزیکی، عملکردی، و مدیریتی اجزای زیرساخت (مانند لوله‌های آب، کابل‌های برق، یا مسیرهای ریلی) را در خود جای داده است (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). این غنای اطلاعاتی امکان اجرای تحلیل‌های پیچیده‌ای را فراهم می‌آورد که پیش از این یا غیرممکن بود یا نیازمند صرف زمان و منابع بسیار زیادی بود. برای مثال، استخراج خودکار فهرست مصالح و برآورد دقیق هزینه‌ها به سادگی با کوئری گرفتن از مدل امکان‌پذیر است. یکی از مفاهیم کلیدی در BIM، تعریف سطح توسعه یا LOD (Level of Development) است که نشان‌دهنده میزان جزئیات اطلاعاتی مدل در مراحل مختلف چرخه عمر پروژه است (حامد شکری و نجفی، ۲۰۲۴). در پروژه‌های زیرساختی، تعیین LOD مناسب برای هر جزء حیاتی است؛ به طور مثال، در فاز طراحی مفهومی، LOD پایین برای نمایش کلیات شبکه کافی است، اما در فاز اجرا، برای المان‌های حیاتی مانند سازه‌های نگهبان یا اتصالات پیچیده، نیاز به LOD بسیار بالاتری وجود دارد. این انعطاف‌پذیری در سطح‌بندی داده‌ها، مدیریت کارآمد اطلاعات را تضمین می‌کند.

ادغام BIM با مفاهیم مدیریت شهری نوین، نظیر مفهوم شهر هوشمند (Smart City)، اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند. زیرساخت‌های شهری مدل‌سازی شده با BIM، هنگامی که با حسگرها، اینترنت اشیاء (IoT)، و پلتفرم‌های مدیریت شهری پیوند داده می‌شوند، به اجزای فعال و پاسخگو تبدیل می‌شوند (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این هم‌افزایی امکان پایش

لحظه‌ای عملکرد زیرساخت، پیش‌بینی خرابی‌ها و پاسخگویی سریع به شرایط اضطراری را فراهم می‌سازد. چالش اصلی در پیاده‌سازی IC-BIM، تفاوت‌های ساختاری آن با BIM سنتی ساختمانی است. مدل‌سازی زیرساخت‌ها اغلب ماهیتی خطی (مانند جاده‌ها و لوله‌ها) یا شبکه‌ای دارد که نیازمند هندسه‌های پیچیده سه‌بعدی و زیرسطحی است؛ برخلاف سازه‌های ساختمانی که عمدتاً حجمی و عمودی هستند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). نرم‌افزارهای تخصصی BIM زیرساختی باید بتوانند مدل‌سازی مسیرهای خمیده، شیب‌دار، و تداخلات لایه‌های مختلف زیرزمینی را با دقت میلی‌متری مدیریت کنند.

اهمیت استانداردسازی در این حوزه غیرقابل اغماض است. برای اطمینان از قابلیت تبادل‌پذیری اطلاعات (Interoperability) بین نرم‌افزارهای مختلف طراحی، نقشه‌برداری، و تحلیل، پیروی از فرمت‌های باز مانند IFC (Industry Foundation Classes) ضروری است (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). بدون استانداردهای مشخص برای تعریف عوارض زیرساختی، مدل‌های تولید شده ارزش تبادل اطلاعات خود را از دست می‌دهند و پروژه‌ها مجدداً به جزایر اطلاعاتی تفکیک می‌شوند. تحلیل ریسک در پروژه‌های زیرساختی شهری با استفاده از BIM از بُعد دیگری قابل بررسی است. در گذشته، ارزیابی ریسک‌های متقابل (مانند تداخل لوله‌های آب با کابل‌های برق در هنگام حفاری) بر اساس نقشه‌های دوبعدی، حدس و گمان و تجربه مهندسان بود. BIM این فرایند را به یک تحلیل کمی مبتنی بر شبیه‌سازی و تشخیص خودکار تداخلات تبدیل می‌کند که این امر به طور مستقیم از وقوع حوادث پرهزینه در حین اجرا جلوگیری می‌کند (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). به طور خلاصه، گذار به IC-BIM نه تنها یک ارتقاء تکنولوژیک است، بلکه یک تغییر اساسی در نحوه تعریف، ذخیره، و استفاده از اطلاعات زیرساخت در طول زمان است.

۳. نقش BIM در بهینه‌سازی طراحی مفهومی و پیش‌طراحی زیرساخت

مرحله طراحی مفهومی و پیش‌طراحی در پروژه‌های زیرساختی شهری، جایی است که تصمیمات اساسی با بیشترین تأثیر بلندمدت بر هزینه، عملکرد و پایداری گرفته می‌شوند. در این مرحله، BIM به عنوان یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی سریع سناریوهای متعدد طراحی (Design Alternatives) عمل می‌کند، امکانی که در روش‌های سنتی به دلیل صرف زمان زیاد برای ترسیم و تحلیل، عملاً غیرقابل اجرا بود (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). امکان مدل‌سازی سه‌بعدی و پارامتریک به مهندسان این اجازه را می‌دهد که با تغییر یک پارامتر در مدل (مانند تغییر مسیر یک بزرگراه یا افزایش قطر یک خط لوله)، تأثیرات مستقیم آن را بر سایر اجزای پروژه، از جمله حجم خاک‌برداری، نیاز به خرید زمین، و موقعیت‌یابی سازه‌های جانبی، بلافاصله مشاهده کنند. این قابلیت، فرآیند تصمیم‌گیری را از یک فرایند متوالی به یک فرایند همزمان و تعاملی تبدیل می‌کند (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴).

یکی از دستاوردهای مهم BIM در طراحی مفهومی، ادغام داده‌های محیطی مانند توپوگرافی دقیق (بر اساس مدل ارتفاعی زمین یا DEM) و شرایط هیدرولوژیکی است. این ادغام به مهندسان امکان می‌دهد تا تحلیل‌های پیچیده‌ای نظیر شبیه‌سازی جریان آب سطحی، میزان رواناب و طراحی سیستم‌های زهکشی را با دقت بالاتری نسبت به گذشته انجام دهند (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). این تحلیل‌ها مستقیماً بر ایمنی زیرساخت در برابر سیلاب‌ها و فرسایش تأثیر می‌گذارد. در طراحی زیرساخت‌های زیرزمینی، مسئله تداخلات فضایی و مدیریت فضای محدود شهری (Right-of-Way) حیاتی است. BIM این امکان را می‌دهد که لایه‌های مختلف زیرساخت‌های موجود (آب، فاضلاب، گاز، برق، فیبر نوری) از پایگاه داده‌های شهری وارد مدل شده و با طرح جدید تداخل‌یابی شوند (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). تشخیص تداخلات در این مرحله، پیش از آنکه هزینه‌های حفاری و اصلاح در محل پروژه ایجاد شود، به سادگی از طریق ابزارهای خودکار مدل صورت می‌پذیرد.

فراتر از مدیریت تداخلات فیزیکی، BIM نقش مهمی در ارزیابی عملکردی اولیه زیرساخت ایفا می‌کند. برای مثال، در طراحی شبکه‌های توزیع آب، می‌توان افت فشار شبکه را در سناریوهای مختلف چیدمان لوله‌ها مدل‌سازی کرد و بهترین توپولوژی را بر اساس معیارهای هیدرولیکی انتخاب نمود (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این ارزیابی عملکردی، سنگ بنای بهینه‌سازی طولانی‌مدت زیرساخت است. در زمینه پایداری، مدل‌های BIM می‌توانند داده‌های مربوط به مصالح مورد استفاده و میزان انرژی مصرفی در طول ساخت و بهره‌برداری را ثبت کنند. این امر به مهندسان امکان می‌دهد تا با استفاده از تحلیل چرخه عمر (LCA)، تأثیرات زیست‌محیطی طرح‌های مختلف را مقایسه کرده و مصالح با کربن پایین‌تر یا روش‌های ساخت پایدارتر را انتخاب نمایند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳). برای مدیران شهری، مدل‌های BIM اولیه می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر برای ارتباط با ذی‌نفعان غیرفنی و عموم مردم عمل کنند. تجسم سه‌بعدی واقع‌گرایانه از تأثیر پروژه بر منظر شهری، میزان تخریب موقت، و چگونگی مدیریت ترافیک در طول ساخت، شفافیت را افزایش داده و مخالفت‌های اجتماعی را کاهش می‌دهد (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵). این ارتباط مؤثر از بروز تأخیرات ناشی از اعتراضات مردمی جلوگیری می‌کند. در نهایت، گذار موفق به استفاده از BIM در مرحله طراحی، منوط به تعریف دقیق پارامترهای اطلاعاتی مورد نیاز در هر سطح از جزئیات است. این امر نیازمند تدوین دفترچه راهنمای الزامات اطلاعاتی (EIR) پروژه است که تضمین می‌کند مدل تولید شده نه تنها یک مدل هندسی، بلکه یک منبع غنی از داده‌های مورد نیاز برای مراحل بعدی، از جمله برآورد هزینه و زمان‌بندی، باشد (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵).

۴. کاربرد BIM در برنامه‌ریزی و مدیریت زمان‌بندی پروژه (۴D BIM)

مدیریت زمان‌بندی در پروژه‌های زیرساختی شهری به دلیل گستردگی سایت، وابستگی‌های متوالی پیچیده، و محدودیت‌های عملیاتی (مانند محدودیت‌های ترافیکی شبانه یا نیاز به قطع موقت خدمات شهری)، همواره یکی از پرچالش‌ترین جنبه‌ها بوده است. فناوری BIM با ادغام اطلاعات زمان‌بندی (معمولاً از طریق نرم‌افزارهای مدیریت پروژه مانند P٦ یا MS Project) با مدل سه‌بعدی، مفهومی به نام مدل‌سازی چهاربعدی یا D BIM۴ را معرفی می‌کند که انقلابی در برنامه‌ریزی ساخت ایجاد کرده است (حامد شکری و نجفی، ۲۰۲۴). D BIM۴ به مدیران پروژه این امکان را می‌دهد که توالی فعالیت‌ها را به صورت بصری شبیه‌سازی کنند. این شبیه‌سازی، صرفاً یک نمایش جذاب نیست، بلکه یک ابزار تحلیلی قوی است که وابستگی‌های حیاتی (Critical Path) و تداخلات زمانی بین فعالیت‌های فیزیکی مختلف را به صورت واضح آشکار می‌سازد. برای مثال، در پروژه ساخت یک پل شهری، D BIM۴ می‌تواند نشان دهد که آیا عملیات نصب پیش‌تنیده تیرها با زمان‌بندی بسته شدن مسیرهای ترافیکی زیرین سازگار است یا خیر (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). یکی از مزایای بنیادین D BIM۴، توانایی آن در بهینه‌سازی توالی کار است. با اجرای تحلیل‌های مکرر شبیه‌سازی، تیم پروژه می‌تواند توالی‌هایی را شناسایی کند که نه تنها از نظر فنی امکان‌پذیر باشند، بلکه از نظر لجستیکی (مثلاً دسترسی به تجهیزات سنگین یا مدیریت محل انبار مصالح) نیز بهینه باشند. این امر به ویژه در فضاهای محدود شهری که فضای مانور ماشین‌آلات و نگهداری مصالح محدود است، حیاتی است (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵).

در پروژه‌های زیرساختی، یکی از دلایل اصلی تأخیرات، اکتشافات پیش‌بینی نشده در حین حفاری است، مانند برخورد با زیرساخت‌های موجود یا لایه‌های نامناسب خاک. با پیوند دادن مدل سه‌بعدی زیرساخت‌های موجود (که از داده‌های BIM فاز بهره‌برداری قدیمی‌تر یا نقشه‌های GIS استخراج شده‌اند) با برنامه زمان‌بندی، می‌توان زمان‌بندی ویژه‌ای را برای اکتشافات یا اقدامات احتیاطی در نواحی پرخطر پیش‌بینی کرد (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). D BIM۴ همچنین ابزاری مؤثر برای

مدیریت تغییرات برنامه در طول اجرا است. هنگامی که تأخیر یا تغییری در پروژه رخ می‌دهد، تیم می‌تواند مدل D۴ به‌روز شده را اجرا کرده و تأثیر دقیق آن تأخیر بر تاریخ اتمام پروژه و همچنین تأثیر آن بر فعالیت‌های وابسته (به ویژه فعالیت‌های برون‌سازمانی مانند نیاز به مجوزهای جدید یا هماهنگی با شرکت‌های خدمات‌رسان) را به صورت کمی و بصری ارزیابی کند (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴).

برای مدیران شهرداری که وظیفه نظارت بر پیمانکاران را بر عهده دارند، مدل D BIM۴ به عنوان یک معیار عملکردی شفاف عمل می‌کند. به جای بررسی گزارش‌های متنی طولانی در مورد پیشرفت کار، مدیر ناظر می‌تواند با مشاهده شبیه‌سازی به‌روز شده پروژه در برابر برنامه اصلی، میزان انحراف زمانی را به صورت عینی تشخیص داده و سریعاً اقدامات اصلاحی لازم را اعمال نماید (منافلویان و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، دستیابی به یک مدل D۴ دقیق مستلزم انضباط داده‌ای قوی در فاز طراحی است. اطلاعات مربوط به هر جزء مدل BIM باید دارای مشخصات زمانی (مدت زمان مورد نیاز برای ساخت یا نصب آن جزء) باشد. هرگونه کمبود در این اطلاعات یا عدم انطباق بین کدگذاری عناصر در مدل و ساختار شکست کار (WBS) در نرم‌افزار زمان‌بندی، کارایی D BIM۴ را به شدت کاهش می‌دهد (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). در نهایت، D BIM۴ نه تنها زمان‌بندی را بهبود می‌بخشد، بلکه ارتباطات پروژه را نیز ارتقا می‌دهد. ارائه یک برنامه اجرایی بصری و متحرک به کارگران سایت، پیمانکاران فرعی و تیم‌های هماهنگی شهری، درک مشترکی از "آنچه باید در هفته آینده انجام شود" ایجاد می‌کند که این امر سوءتفاهمات و خطاهای ناشی از تفسیر نادرست نقشه‌ها را به حداقل می‌رساند (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴).

۵. مدیریت هزینه و تأمین منابع در پروژه‌های زیرساختی با ۵D BIM

مدیریت هزینه (Cost Management) در پروژه‌های زیرساختی شهری، به دلیل ماهیت بلندمدت و پیچیدگی‌های متعدد در تأمین مصالح خاص و نیروی کار ماهر، همواره با ریسک‌های مالی قابل توجهی همراه است. مفهوم D BIM۵ با ادغام مدل BIM (هندسه و داده‌ها) با اطلاعات کمی (Quantity Take-off) و هزینه (Cost Estimation)، امکان کنترل بودجه را به صورت بلادرنگ فراهم می‌آورد و از فرآیند برآورد هزینه سنتی که اغلب به صورت دستی و پس از اتمام طراحی انجام می‌شد، فاصله می‌گیرد (صفری، علیان و زرعی‌چیان، ۲۰۲۵). مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق، اساس استخراج کمیت‌ها را فراهم می‌کند. برخلاف روش‌های سنتی که نیازمند اندازه‌گیری دستی طول، سطح و حجم از نقشه‌های دوبعدی بود، BIM به طور خودکار پارامترهای مورد نیاز (مانند طول دقیق مسیر لوله، حجم بتن فونداسیون، یا تعداد دریچه‌های مورد نیاز) را استخراج می‌کند (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این دقت بالا در کمّی‌سازی، خطای انسانی در برآورد را به حداقل می‌رساند.

هنگامی که کمیت‌ها با پایگاه داده‌های قیمت‌های به‌روز شده (شامل قیمت مصالح، نرخ نیروی کار و هزینه‌های ماشین‌آلات) ترکیب می‌شوند، مدل D۵ قادر است هزینه‌های پروژه را در مراحل مختلف طراحی به صورت پویا به‌روزرسانی کند. این قابلیت، به ویژه در فاز طراحی مفهومی، برای تحلیل اقتصادی سناریوهای مختلف سرمایه‌گذاری حیاتی است (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). تحلیل حساسیت هزینه نسبت به تغییر در پارامترهای طراحی به سادگی قابل انجام است. در پروژه‌های شهری، یکی از مهم‌ترین مولفه‌های هزینه، هزینه‌های ناشی از تداخلات و تغییرات در محل است. همانطور که در بخش قبل ذکر شد، D BIM۴ تداخلات زمانی را شناسایی می‌کند؛ D BIM۵ با شناسایی تداخلات فضایی در مدل، امکان پیش‌بینی هزینه‌های ناشی از اصلاحات ساختگاهی، تأخیرات مربوط به جابجایی تأسیسات موجود یا سفارش مجدد مصالح را فراهم می‌آورد (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰). این پیش‌بینی هزینه‌های غیرمستقیم، دقت بودجه‌ریزی نهایی را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد.

مدیریت تأمین منابع (Procurement) نیز از طریق D BIM۵ متحول می‌شود. مدل BIM حاوی تمام اطلاعات لازم برای ایجاد خودکار سفارش‌های خرید (Purchase Orders) و بسته‌های کاری (Work Packages) است. این امر به ویژه برای خرید مصالح خاص و سفارشی در پروژه‌های زیرساختی (مانند قطعات پیش‌ساخته پل یا تجهیزات تصفیه‌خانه‌ها) ضروری است، چرا که کمترین انحراف در مشخصات فنی می‌تواند منجر به تأخیرهای پرهزینه شود (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). برای مدیران اجرایی شهرداری، D BIM۵ به عنوان یک ابزار کنترل مالی قدرتمند عمل می‌کند. با پیوند دادن مدل به سیستم‌های حسابداری و مالی سازمان، می‌توان پیشرفت فیزیکی هر جزء از پروژه (که توسط D BIM۴ دنبال می‌شود) را مستقیماً با میزان هزینه‌کرد مطابقت داد (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این همسویی، گزارش‌دهی دقیق در خصوص میزان انحرافات بودجه (Cost Variance) و نیاز به درخواست‌های پرداخت (Payment Applications) را تسهیل می‌بخشد.

یکی دیگر از کاربردهای مهم D BIM۵ در مدیریت دارایی‌های شهری، امکان محاسبه دقیق هزینه‌های نگهداری و تعمیرات آتی است. داده‌های مربوط به نوع مصالح، مشخصات فنی اتصالات، و الزامات نگهداری (که در مدل BIM ذخیره شده‌اند)، مستقیماً برای تخمین بودجه‌های عملیاتی سال‌های آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند، که این امر به تخصیص منابع مالی پایدار در حوزه مدیریت شهری کمک می‌کند (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴). در نهایت، موفقیت در پیاده‌سازی D BIM۵ نیازمند یکپارچه‌سازی قوی بین تیم‌های طراحی، برآورد هزینه، و تدارکات است. تمامی این تیم‌ها باید بر اساس یک مدل واحد و مجموعه قیمت‌های مرجع مشترک کار کنند. توسعه پایگاه‌های داده قیمت منطقه‌ای و استانداردسازی نحوه کدگذاری اجزا (مثلاً با استفاده از MasterFormat یا Uniclass) برای این امر حیاتی است (صفری، علیان و زرعی‌چیان، ۲۰۲۵).

۶. یکپارچه‌سازی BIM با GIS و تحلیل‌های محیطی و انرژی

پروژه‌های زیرساختی شهری ذاتاً چندمقیاسی هستند؛ آن‌ها در محیط شهری (مقیاس بزرگ) قرار دارند اما عملکرد آن‌ها به جزئیات فنی (مقیاس کوچک) بستگی دارد. در این زمینه، ترکیب BIM (متمرکز بر جزئیات فنی و ساخت) با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (متمرکز بر داده‌های مکانی و محیطی شهری) یک رویکرد ضروری برای مدیریت زیرساخت‌های یکپارچه ایجاد می‌کند (صفری، علیان و زرعی‌چیان، ۲۰۲۵). این ترکیب اغلب به عنوان GeoBIM شناخته می‌شود.GIS اطلاعات زمین‌مرجع شامل توپوگرافی، کاربری اراضی، شبکه معابر، و داده‌های زیست‌محیطی شهری را فراهم می‌کند، در حالی که BIM مدل دقیق هندسی و اطلاعاتی سازه‌های زیرزمینی و روگذر را ارائه می‌دهد (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). ادغام این دو پلتفرم، امکان مدل‌سازی محیط ساخت و ساز را در زمینه واقعی شهر فراهم می‌سازد و تحلیل‌هایی نظیر تأثیر سایه‌اندازی یک پل جدید بر پارک‌های مجاور، یا تأثیر احداث خط جدید مترو بر پایداری سازه‌های موجود، ممکن می‌گردد.

کاربرد حیاتی GeoBIM در مرحله برنامه‌ریزی، تحلیل اثرات جانبی (Externalities) است. به عنوان مثال، در طراحی یک بزرگراه شهری، مدل BIM مسیر را می‌توان در بستر GIS قرار داد تا اثرات آن بر جریان ترافیک شهری، دسترسی محلات، و میزان آلودگی صوتی و هوای مناطق مسکونی مجاور به طور دقیق شبیه‌سازی شود (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). این تحلیل‌ها مبنای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر ملاحظات اجتماعی-محیطی را فراهم می‌کنند. علاوه بر این، BIM در حوزه زیرساخت‌های سیالاتی (آب و فاضلاب) با GIS ترکیب می‌شود تا شبیه‌سازی‌های پیشرفته هیدرولیکی امکان‌پذیر گردد. مدل BIM جزئیات اجزای شبکه (نوع پمپ‌ها، شیرها، مواد لوله‌ها) را ارائه می‌دهد، در حالی که GIS منظر شهری و ارتفاعات منطقه را فراهم می‌آورد. این ترکیب به مهندسان اجازه می‌دهد تا مدل‌های دینامیکی از نحوه رفتار شبکه تحت سناریوهای مختلف (مانند قطعی آب یا افزایش شدید بار فاضلاب ناشی از باران شدید) اجرا کنند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳).

نقش BIM در بهینه‌سازی مصرف انرژی زیرساخت‌ها نیز از طریق این یکپارچه‌سازی پررنگ‌تر می‌شود. سیستم‌های زیرساختی بزرگ مانند تونل‌ها یا ایستگاه‌های مترو دارای سیستم‌های تهویه و روشنایی گسترده هستند. مدل BIM اطلاعات دقیق مصرف‌کنندگان انرژی را فراهم می‌کند، و GIS مرزهای محیطی و شرایط آب و هوایی منطقه را مشخص می‌سازد. این ادغام امکان اجرای تحلیل‌های انرژی (Energy Analysis) دقیق برای بهینه‌سازی مصرف برق و کاهش هزینه‌های عملیاتی را میسر می‌سازد (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). در مدیریت بحران، GeoBIM یک ابزار ضروری محسوب می‌شود. پس از وقوع زلزله یا سیل، نقشه‌های GIS آسیب‌های سطحی را نشان می‌دهند، در حالی که مدل BIM زیرساخت‌های حیاتی زیرزمینی (مانند خطوط گاز یا خطوط اصلی آب) را مشخص می‌کند. این ترکیب به تیم‌های واکنش سریع این امکان را می‌دهد که مسیرهای دسترسی امن را برنامه‌ریزی کرده و اولویت‌بندی تعمیرات را بر اساس اهمیت حیاتی تأسیسات آسیب‌دیده تعیین کنند (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). برای مدیران شهری، وجود یک پایگاه داده GeoBIM جامع، به معنای داشتن یک "دوقلوی دیجیتال" (Digital Twin) از زیرساخت‌های شهر است که دائماً با داده‌های واقعی به‌روزرسانی می‌شود (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵). این دوقلوی دیجیتال، بستر لازم برای تصمیم‌گیری‌های آینده‌نگر و پیشگیرانه در زمینه توسعه شهری و برنامه‌ریزی بلندمدت را فراهم می‌آورد. در نهایت، چالش اصلی در این حوزه، همگام‌سازی سیستم‌های مختصات و تعاریف اطلاعاتی بین محیط BIM (که اغلب دقیق و محلی است) و GIS (که اغلب مختصات جغرافیایی جهانی دارد) است. تدوین پروتکل‌های تبادل داده سازگار و استفاده از استانداردهای لایه‌بندی مشترک، کلید موفقیت در ایجاد یک سیستم GeoBIM کارآمد برای مدیریت زیرساخت‌های شهری است (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵).

۷. نقش BIM در افزایش تاب‌آوری شهری و مدیریت تغییرات اقلیمی

تغییرات اقلیمی و افزایش دفعات رخداد بلایای طبیعی، ضرورت بازتعریف مفهوم «پایداری» در پروژه‌های زیرساختی را اجتناب‌ناپذیر ساخته است؛ تمرکز دیگر تنها بر کاهش مصرف منابع نیست، بلکه بر افزایش «تاب‌آوری» (Resilience) سیستم‌ها در برابر شوک‌های محیطی است (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). BIM با فراهم آوردن ابزارهای پیشرفته شبیه‌سازی، نقشی محوری در ارتقاء تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای BIM، تحلیل آسیب‌پذیری (Vulnerability Assessment) در برابر سناریوهای خاص اقلیمی مانند افزایش سطح آب‌های زیرزمینی، سیل‌های ناگهانی، یا امواج گرمایی شدید است. مدل‌های BIM زیرساختی می‌توانند به صورت پارامتریک با نتایج مدل‌سازی اقلیمی ترکیب شوند تا مشخص شود که افزایش حجم آب ورودی به شبکه فاضلاب شهری، کدام مجاری یا تأسیسات (مانند ایستگاه‌های پمپاژ) در معرض خطر سرریز شدن یا تخریب قرار دارند (زندی و همکاران، ۲۰۲۳).

در طراحی سازه‌های زیربنایی جدید، BIM به مهندسان اجازه می‌دهد تا با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده اقلیمی، مشخصات طراحی را افزایش دهند. برای مثال، طراحی فونداسیون پل‌ها باید با در نظر گرفتن فرسایش بیشتر بستر رودخانه ناشی از سیلاب‌های با دوره بازگشت کوتاه‌تر، تقویت شود. BIM با مدیریت دقیق هندسه و بارگذاری سازه، امکان اعمال این تغییرات طراحی را به شکلی نظام‌مند و قابل مستندسازی فراهم می‌آورد (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). علاوه بر جنبه‌های فیزیکی، تاب‌آوری یک زیرساخت به سرعت بازیابی آن پس از وقوع حادثه نیز وابسته است. مدل BIM جامع پروژه شامل اطلاعات دقیقی از محل دقیق اتصالات، نوع مصالح به کار رفته، و مکانیسم‌های تعمیر است. در صورت وقوع خرابی، تیم‌های تعمیر و نگهداری می‌توانند بلافاصله با دسترسی به مدل، ابزارها و تجهیزات لازم را به محل اعزام کنند، که این امر زمان توقف خدمات حیاتی (Downtime) را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهد (صدیری و همکاران، ۲۰۲۴).

در حوزه مدیریت انرژی زیرساخت‌ها، BIM به پایداری بلندمدت کمک می‌کند. با استفاده از مدل‌های انرژی، می‌توان طراحی سیستم‌های سرمایش و گرمایش تونل‌ها یا ساختمان‌های اداری شهرداری را به گونه‌ای بهینه کرد که مصرف انرژی را در طول دوره‌های گرم‌تر تابستان کاهش دهد (ایلدرآبادی و همکاران، ۲۰۱۹). این رویکرد پیشگیرانه، زیرساخت‌ها را در برابر افزایش تقاضای انرژی ناشی از تغییرات دما مقاوم‌تر می‌سازد. برای مدیران شهری، قابلیت مشاهده توزیع جغرافیایی زیرساخت‌های حیاتی در مدل GeoBIM، امکان برنامه‌ریزی استراتژیک برای افزایش تاب‌آوری شبکه را فراهم می‌آورد. به عنوان مثال، اگر یک شبکه برق دچار قطعی شود، تیم مدیریت می‌تواند از طریق مدل، مسیرهای جایگزین تغذیه یا محل مناسب برای نصب ژنراتورهای موقت را شناسایی کند، زیرا مدل دقیق مکان تمام کابین‌های توزیع و مسیرهای کابل‌کشی را در اختیار دارد (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴).

انتقال به BIM همچنین مستلزم توجه به مصالح نوین و پایدار است. BIM امکان ارزیابی و استفاده از مصالحی با مقاومت بالاتر در برابر عوامل محیطی (مانند بتن‌های مقاوم در برابر سولفات یا پوشش‌های ضد خوردگی پیشرفته) را فراهم می‌سازد (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این امر مستقیماً بر طول عمر زیرساخت و کاهش نیاز به تعمیرات پرهزینه و اختلالات مکرر در خدمات شهری تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، BIM دیگر صرفاً یک ابزار طراحی نیست، بلکه به ستون فقرات استراتژی مدیریت ریسک و تاب‌آوری شهری تبدیل شده است. ادغام داده‌های اقلیمی، تحلیل دینامیکی، و مدیریت اطلاعات ساختاری، زیرساخت‌های آینده را از سیستم‌های منفعل به دارایی‌های هوشمند و مقاوم در برابر شوک‌های محیطی تبدیل خواهد کرد (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳).

۸. نگهداری و مدیریت دارایی‌های شهری با BIM (۶D و ۷D)

مرحله بهره‌برداری و نگهداری (O&M) بزرگترین بخش از هزینه چرخه عمر یک پروژه زیرساختی را تشکیل می‌دهد، که اغلب تا ۷۰ تا ۸۰ درصد کل هزینه‌ها را شامل می‌شود (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). ورود BIM به این مرحله، با معرفی ابعاد ششم (۶D: پایداری و مدیریت انرژی) و هفتم (۷D: مدیریت تسهیلات و نگهداری)، تحولی بنیادین در نحوه مدیریت دارایی‌های شهری ایجاد کرده است (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵).

۶D BIM بر تحلیل طول عمر و پایداری تمرکز دارد. داده‌های دقیقی که در طول طراحی و اجرا (فازهای ۳D تا ۵D) جمع‌آوری شده‌اند، به طور خودکار به مدل بهره‌برداری منتقل می‌شوند. این داده‌ها شامل تاریخ نصب، مشخصات فنی دقیق، سازنده تجهیزات، دوره‌های گارانتی، و دستورالعمل‌های نگهداری پیشگیرانه (Preventive Maintenance) هستند (بهنوا و پورزرگر، ۲۰۲۱). این اطلاعات، نیاز به جستجوی دستی در میان اسناد کاغذی قدیمی را از بین می‌برد. انتقال اطلاعات از فاز اجرا به فاز بهره‌برداری، که اغلب با چالش بزرگ "عدم تطابق بین مدل طراحی و ساخت نهایی" مواجه است، در محیط BIM با ثبت مدل "همان‌گونه که ساخته شد" (As-Built Model) حل می‌شود. تیم ساخت باید در حین پیشرفت کار، تغییرات واقعی محل را در مدل منعکس کند. این مدل نهایی و دقیق، پایه و اساس ۷D BIM برای مدیریت تسهیلات (FM) خواهد بود (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰).

در ۷D BIM، مدل به سیستم مدیریت تسهیلات (FMIS) متصل می‌شود. این اتصال امکان پایش عملکردی تجهیزات نصب شده در زیرساخت (مانند عملکرد پمپ‌های فاضلاب یا وضعیت روشنایی تونل‌ها) را به صورت لحظه‌ای فراهم می‌کند. سیستم می‌تواند به طور خودکار، با مقایسه عملکرد واقعی با عملکرد استاندارد تعریف شده در مدل، نیاز به تعمیرات را پیش‌بینی و

برنامه‌ریزی کند (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰). این رویکرد نگهداری پیشگیرانه، هزینه‌های تعمیرات اضطراری را که معمولاً چند برابر گران‌تر هستند، کاهش می‌دهد. برای مدیران شهری، مدیریت ناوگان تأسیسات زیرزمینی (شبکه آب، گاز و برق) از طریق BIM یک مزیت استراتژیک محسوب می‌شود. در صورت وقوع نشت یا خرابی، تیم نگهداری می‌تواند از طریق یک نمایش سه‌بعدی و لایه‌بندی شده، دقیقاً محل خرابی را شناسایی کند بدون اینکه نیازی به حفاری‌های آزمایشی گسترده باشد؛ این امر به ویژه در مناطق پرتراکم شهری که هرگونه عملیات حفاری منجر به اختلال ترافیکی شدید می‌شود، حیاتی است (زندی و همکاران، ۲۰۲۳).

همچنین، با استفاده از داده‌های تاریخی جمع‌آوری شده توسط BIM در طول سال‌ها بهره‌برداری، می‌توان عمر مفید باقی‌مانده (RUL) اجزای زیرساخت را با دقت بیشتری تخمین زد. این امر امکان برنامه‌ریزی بلندمدت بودجه‌ای شهرداری برای جایگزینی سرمایه‌ای (Capital Replacement) را فراهم می‌آورد و از وقوع ناگهانی بحران‌های ناشی از فرسودگی زیرساخت‌های قدیمی جلوگیری می‌کند (تقوایی و همکاران، ۲۰۲۱). چالش اصلی در این زمینه، حفظ و به‌روزرسانی مستمر داده‌های مدل در طول دهه‌ها است. زیرساخت‌های شهری عمر طولانی دارند، در حالی که فناوری‌ها دائماً تغییر می‌کنند. شهرداری‌ها باید پروتکل‌های مشخصی برای تبدیل و نگهداری مدل‌های BIM در فرمت‌های استاندارد (IFC) در طول زمان، و همچنین مدیریت مالکیت داده‌ها در طول تغییر پیمانکاران نگهداری تدوین کنند (محمدی‌زاده و میرزاده، ۲۰۲۵). در مجموع، گذار به مدیریت دارایی مبتنی بر BIM، پروژه‌های زیرساختی را از دارایی‌های منفعل به دارایی‌های هوشمند و خودمدیریتی تبدیل می‌کند که نگهداری آن‌ها از یک فرآیند واکنشی به یک فرآیند استراتژیک و پیش‌بینی‌پذیر تبدیل می‌شود (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵).

۹. چالش‌ها، الزامات پیاده‌سازی و چشم‌انداز آینده

پیاده‌سازی موفق BIM در پروژه‌های زیرساختی شهری، به ویژه در مقیاس کلان‌شهری، با مجموعه‌ای از چالش‌های فنی، سازمانی و قانونی روبروست که غلبه بر آن‌ها نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و سرمایه‌گذاری مستمر است. یکی از اساسی‌ترین موانع، فقدان استانداردسازی ملی در تعریف محتوای اطلاعاتی مدل‌ها (Information Requirements) برای انواع مختلف زیرساخت‌ها است (حامد شکری و نجفی، ۲۰۲۴). چالش فنی اصلی، مسئله قابلیت همکاری (Interoperability) میان نرم‌افزارهای تخصصی است. در حالی که BIM ساختمانی نسبتاً به استانداردهای IFC نزدیک شده است، مدل‌سازی زیرساخت‌های پیچیده (مانند سازه‌های بزرگ زیرزمینی و شبکه‌های چندگانه) نیازمند تبادل دقیق داده‌های هندسی و پارامتری بین ابزارهای GIS، نرم‌افزارهای تحلیل سازه، و پلتفرم‌های BIM است که اغلب به دلیل پیاده‌سازی متفاوت IFC توسط هر شرکت سازنده نرم‌افزار، دچار افت کیفیت می‌شود (طهماسیان و سواک، ۲۰۲۰).

از منظر سازمانی، مقاومت در برابر تغییر و شکاف مهارتی یکی از موانع عمده است. بسیاری از سازمان‌های شهرداری و پیمانکاران سنتی فاقد نیروی انسانی آموزش‌دیده برای کار در محیط مدل‌سازی سه‌بعدی و مدیریت داده‌های شیءگرا هستند (هرندی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). این امر نیازمند تدوین برنامه‌های آموزشی جامع و بلندمدت برای ارتقاء دانش فنی مدیران و مهندسان در سطوح مختلف است. الزام قانونی و قراردادی یکی دیگر از عوامل حیاتی است. بدون وجود الزامات قراردادی مشخص و الزام‌آور از سوی کارفرمایان دولتی (مانند شهرداری‌ها) که سطح دقیق اطلاعات مورد نیاز (LOD و LOI) در هر فاز پروژه را تعریف کند، پیمانکاران انگیزه کافی برای سرمایه‌گذاری در فناوری و تولید داده‌های با کیفیت بالا را نخواهند داشت (بهزادپور و خاک‌زند، ۲۰۲۱). تدوین دستورالعمل‌های دولتی اجباری برای BIM زیرساختی امری ضروری است.

چشم‌انداز آینده BIM در زیرساخت‌های شهری به سمت اتوماسیون کامل فرآیندها حرکت می‌کند. این امر شامل استفاده از رباتیک و پهپادها برای جمع‌آوری داده‌های "As-Built" و به روز رسانی خودکار مدل BIM در طول عمر دارایی است (صفری، علیان و زرعی‌چیان، ۲۰۲۵). هدف نهایی، ایجاد یک "دوقلوی دیجیتال" فعال است که به طور مداوم با واقعیت فیزیکی هماهنگ است و به عنوان یک پلتفرم اصلی برای مدیریت کلان‌شهری عمل می‌کند. ادغام BIM با هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) پتانسیل عظیمی برای پیش‌بینی خرابی‌ها و بهینه‌سازی عملکرد دارد. به عنوان مثال، الگوریتم‌های AI می‌توانند الگوهای عملکردی تجهیزات را بر اساس داده‌های تاریخی BIM تحلیل کرده و بهترین زمان‌بندی تعمیرات پیشگیرانه را بدون نیاز به مداخله انسانی پیشنهاد دهند (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). در زمینه مصالح و روش‌های نوین، BIM بستری برای ارزیابی سریع مصالح سبز و فناوری‌های ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) در مقیاس زیرساختی فراهم می‌آورد. این فناوری‌ها می‌توانند به کاهش ضایعات ساختمانی و تسریع فرآیندهای تعمیر و بازسازی پس از بحران کمک کنند (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). در نهایت، برای دستیابی به این چشم‌انداز، سرمایه‌گذاری اولیه در زیرساخت‌های IT، تعریف شفاف نقش‌های اطلاعاتی (Information Manager)، و ایجاد یک فرهنگ همکاری مبتنی بر اعتماد و اشتراک‌گذاری داده‌ها در میان تمامی ذی‌نفعان (از مهندسان مشاور تا پیمانکاران و بهره‌برداران) ضروری است. این گذار یک سفر تکاملی است که زیربنای توسعه پایدار شهری را تقویت خواهد کرد (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، به ویژه در قالب‌های تخصصی خود (IC-BIM، GeoBIM، D۴، D۵ و D۷)، یک راهکار نه چندان اختیاری، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای ارتقاء کارایی، شفافیت و پایداری در پروژه‌های زیرساختی شهری است. مزایای اصلی BIM در این حوزه، فراتر از بهبودهای جزئی در طراحی، شامل توانایی آن در کاهش چشمگیر تداخلات فضایی و زمانی، مدیریت دقیق هزینه‌ها در طول چرخه عمر پروژه، و ایجاد یک مخزن داده منسجم برای عملیات بهره‌برداری و نگهداری است.

همانطور که یافته‌ها نشان دادند، کاربرد BIM در مرحله طراحی مفهومی با امکان ارزیابی سریع سناریوهای مختلف، منجر به انتخاب بهینه‌ترین مسیر فنی و زیست‌محیطی می‌شود (رسول‌زاده و مشاری، ۲۰۲۵). در فاز اجرا، ادغام با زمان‌بندی (۴ D BIM) دقت برنامه‌ریزی را افزایش داده و از تأخیرات ناشی از ابهامات سایت جلوگیری می‌کند، در حالی که ۵ D BIM کنترل بودجه را از طریق برآورد خودکار و دقیق کمیت‌ها تسهیل می‌بخشد (صفری، علیان و زرعی‌چیان، ۲۰۲۵). نقش BIM در بهینه‌سازی شهری با قابلیت ادغام با GIS برجسته می‌شود. این هم‌افزایی، زیرساخت‌های شهری را در بستر واقعی شهر مدل‌سازی کرده و تحلیل‌های محیطی، ترافیکی و ریسک بلایای طبیعی را با دقت بالاتری ممکن می‌سازد، که این امر مستقیماً به افزایش تاب‌آوری شهری در برابر تغییرات اقلیمی کمک می‌کند (گیاه‌چی و همکاران، ۲۰۲۳). در نهایت، ورود BIM به فاز بهره‌برداری (D۷) با فراهم آوردن نگهداری مبتنی بر دارایی، هزینه‌های بلندمدت عملیاتی سازمان‌های شهری را به شدت کاهش داده و عمر مفید دارایی‌ها را تضمین می‌نماید (لطفی و همکاران، ۲۰۲۰).

با این حال، دستیابی به این پتانسیل مستلزم غلبه بر موانع ساختاری است. نبود استانداردهای ملی یکپارچه برای تبادل داده‌های زیرساختی، مقاومت سازمانی در برابر پذیرش فناوری‌های جدید، و شکاف عمیق در آموزش نیروی انسانی، بزرگترین موانعی هستند که پیش روی مدیران شهری قرار دارند (حامد شکری و نجفی، ۲۰۲۴). لذا، تدوین استراتژی ملی و سازمانی برای الزامات اطلاعاتی و سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های دیجیتال برای مدل‌سازی زیرسطحی، امری ضروری تلقی

می‌شود. در چشم‌انداز آینده، همگرایی BIM با هوش مصنوعی و دوقلوهای دیجیتال، نویدبخش مدیریت شهری کاملاً فعال و خودتنظیم‌گر است که در آن نگهداری‌ها به صورت خودکار برنامه‌ریزی شده و تصمیم‌گیری‌ها بر پایه داده‌های زنده و تاریخی اتخاذ می‌شوند (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۵). توصیه نهایی به مدیران اجرائیات شهرداری و مهندسان عمران، تسریع در پذیرش این فناوری به صورت پروژه‌محور و ایجاد تیم‌های تخصصی برای مدیریت اطلاعات پروژه است تا زیرساخت‌های شهری آینده، نه تنها کارآمدتر بلکه تاب‌آورتر و هوشمندتر باشند (پرویش و اسدی، ۲۰۲۴).

منابع

- بهزادپور, خاک‌زند. (۲۰۲۱). بررسی تاثیر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در طراحی و چیدمان مبلمان فضاهای داخلی مجتمع‌های آموزشی (موردپژوهی: دانشکده معماری شهرسازی، عمران و مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران). معماری و شهرسازی پایدار, ۱۸(۹), ۱۷۷-۱۹۸.
- زندی, لرک, امین نژاد. (۲۰۲۳). توسعه یک سیستم ارزیابی فازی جهت تعیین اثربخشی سیاست‌گذاری‌های تشویقی موثر بر ارتقاء ساختمان‌های سبز. مهندسی سازه و ساخت, ۱۰(۷), ۱۵۳-۱۸۱.
- محمدی زاده, میرزاده. (۲۰۲۵). کاربرد مهندسی ارزش در بهینه‌سازی زنجیره تامین پروژه‌های ساختمانی و صنعتی. | نشریه عمران و پروژه | ماهنامه | .ISC|, e۲۳۷٤٥٥
- رفسنجانی اصل, ایمان, قاسمی, نظری, شقایق. (۲۰۲۵). ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌های بلندمرتبه دیاگرید بهینه همراه با میراگر لزج با محاسبه چرخه عمر. مهندسی سازه و ساخت, ۱۲(۰۴), ۵-۲۸.
- طهماسیان, سواک. (۲۰۲۰). استفاده از مدل سازی اطلاعات ساختمان و نرم افزارهای رایانه ای در متره و برآورد پروژه‌های عمرانی. | نشریه عمران و پروژه |, ۱(۱۰), ۵۵-۶۲.
- حامد شکری, امیر نجفی. (۲۰۲۴). مروری بر مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM). نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری, ۸(۲۹), ۶۹۸-۷۱۴.
- صفری, علیان, زرعی چیان. (۲۰۲۵). بررسی پتانسیل پیاده سازی مدلسازی اطلاعات ساختمان در پروژه های انبوه سازی با در نظر گرفتن افزایش تقاضا مطالعه موردی مسکن مهر رشت. مهندسی سازه و ساخت, ۱۱(۱۲).
- رسول زاده, مشاری. (۲۰۲۵). اولویت شناسی در برنامه ریزی شهر سالم: تعامل شیمی نوین و رایانش مصالح سبز. نقش جهان- مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی, ۱۱(۱), ۹۴-۱۰۵.
- پرویش, اسدی. (۲۰۲۴). جایگاه عمران و نوسازی روستایی در برنامه پنجم (۱۳۵۲-۱۳۵۶) راهبردها و چالش ها. مجله تاریخ ایران, ۱۷(۲), ۸۹-۱۱۸.
- منافلویان, سعیده زرآبادی, بهزادفر. (۲۰۲۰). شناسایی و بررسی وضعیت موجود تغییرات اقلیمی و چالش‌های آن در تاب‌آوری بوم شناسانه. فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای, ۱۰(۳۹), ۴۴۷-۴۶۲.
- رحمتی, نوحه گر, نبی بیدهندی. (۲۰۲۳). تعدیل اثرات تغییرات آب و هوایی با ارتقاء الگوی کشاورزی شهری پایدار با استفاده از روش‌های BWM و ARAS (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ شهرداری تهران). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی, ۳(۱۲), ۹۱-۱۰۸.
- شفقت, عرفان, تقدس, شرافت, بهنام. (۲۰۱۹). بررسی دقت متره و برآورد در نرم‌افزارهای مدل سازی اطلاعات ساختمان. مجله ی مهندسی عمران شریف, ۳۴(۴.۱), ۱۴۵-۱۵۲.
- صدیری, حسناء, بهرویان, قاسمی. (۲۰۲۴). استفاده از مدل سازی اطلاعات ساختمان در مدیریت نگهداری مخازن ذخیره سازی بتنی نفتی. مهندسی سازه و ساخت, ۱۱(۸), ۱۰۸-۱۲۶.

- گیاه چی, حسینی, سید عظیم, اخباری, صفا, اکبرپور. (۲۰۲۳). ارزیابی بهینه سازی بهره وری انرژی بر اساس تحلیل انرژی چرخه عمر ساختمان (مطالعه موردی؛ یک ساختمان آموزشی در شهر تهران). مهندسی سازه و ساخت, ۹(۱۱), ۵۰-۷۶.
- تقوایی, حسینی خواه, محمدی دوست, سلیمان. (۲۰۲۱). ارزیابی راهبردی ساختار فضایی شهرها با تأکید بر الگوهای نوین آمایش شهری (پژوهش موردی: شهر یاسوج). برنامه ریزی فضایی, ۱۱(۳), ۱۱۷-۱۴۴.
- بهنوا, پورزرگر. (۲۰۲۱). نقش مصالح نوین ساختمانی بر پویایی نما در چهار دهه اخیر معماری ایران ۱۳۵۹-۱۳۹۹. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی, ۱۱(۳), ۴۹-۶۶.
- سلطانی نژاد, هادی, رباطی. (۲۰۲۵). بررسی امکان هوشمندسازی سبز در سازه با بکارگیری مصالح هوشمند نوین. | نشریه عمران و پروژه |, ۷(۳).
- ایلدرآبادی, پوریا, رحیمی, امیدوار, پیمان. (۲۰۱۹). بهینه سازی مصالح مصرفی ساخت با بکارگیری فناوری های نوین ساختمانی و پیامدهای آن در توسعه پایدار با دیدگاه کاهش انتشار آلاینده کربن دی اکسید. مطالعات علوم محیط زیست, ۴(۱), ۹۱۷-۹۲۸.
- لطفی, علیزاده الیزئی, احمدی. (۲۰۲۰). انتخاب مصالح نوین مناسب جهت اجرای دیوار غیرباربر در ساختمان ها به روش تحلیل سلسله مراتبی. مهندسی سازه و ساخت, ۷(شماره ویژه ۲), ۱۵۸-۱۷۱.
- هرندی زاده سعید, قاسمی الهام, کریمی شاهین. (۲۰۱۹). طراحی شبکه پیاده منسجم شهری با رویکرد ساختار سبز: راهی به سوی حل چالش تغییرات اقلیمی (مورد مطالعه: بافت تاریخی اصفهان).