DOI: 10.22034/ats.2025.2074645.1014

فصلنامه
پژوهش‌های معماری نوین
دوره ۵، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۷
پاییز ۱۴۰۴
صفحات ۲۲-۷

Architectural Technologies
Studies Journal
Vol. 5, Issue. 3, No. 17
Autumn 2025
Pages 7-22

مقاله پژوهشی

هوشمندسازی مدیریت ساخت با تلفیق BIM و IoT برای کاهش هدررفت مصالح و بهینه‌سازی هزینه پروژه‌های عمرانی

امیر اسگندری[۱]، مهدی صادقزاده تبریزی*[۲]، بهنام حیدری پارام[۳]

۱-کارشناس ارشد مدیریت MBA، معاونت فنی و عمرانی شهرداری کلان‌شهر تبریز، تبریز، ایران.
Eskandari.amir1@yahoo.com
۲-دکتری مکاترونیک، معاونت فنی و عمرانی شهرداری کلان‌شهر تبریز، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول)
mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com
۳-استادیار، گروه مهندسی مکانیک واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.
Bh.heidari@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۴۰۴/۳/۳] تاریخ پذیرش: [۱۴۰۴/۶/۲۸]

چکیده

در دهه‌های اخیر، فناوری‌های نوین دیجیتال، همچون مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و اینترنت اشیا (IoT)، به‌عنوان ابزارهای کلیدی در افزایش بهره‌وری و کاهش هدررفت منابع در پروژه‌های ساخت مطرح شده‌اند. این پژوهش با رویکردی میان‌رشته‌ای، به تحلیل اثرات هم‌زمان بهره‌گیری از BIM و حسگرهای IoT بر کارایی پروژه‌های ساختمانی می‌پردازد. هدف اصلی مطالعه، شناسایی نقاط قوت و محدودیت‌های پیاده‌سازی این فناوری‌ها در فرآیندهای طراحی، ساخت و نگهداری ساختمان‌های نوین و ارائه چارچوبی برای بهینه‌سازی منابع انسانی، مالی و مصالح است. روش تحقیق شامل مرور نظام‌مند ادبیات موضوعی، شبیه‌سازی پروژه‌های نمونه با ابزارهای BIM و تحلیل داده‌های لحظه‌ای جمع‌آوری‌شده از حسگرهای IoT است. یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها موجب افزایش دقت زمان‌بندی، کاهش خطاهای ساخت، مدیریت بهینه مصرف انرژی و ارتقای کیفیت نهایی پروژه می‌گردد. همچنین، تحلیل اقتصادی-عملیاتی نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری اولیه در زیرساخت‌های دیجیتال، با کاهش هزینه‌های اجرایی و نگهداری، بازدهی مناسبی برای مالکان و پیمانکاران فراهم می‌آورد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای طراحی و مدیریت پروژه‌های معماری نوین با تأکید بر بهره‌وری و پایداری ارائه شود.

کلیدواژه: بهره‌وری پروژه‌های ساخت، معماری نوین، مدیریت منابع، بهینه‌سازی هزینه و زمان.

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت ساخت‌وساز با چالش‌های متعددی ازجمله افزایش هزینه‌ها، تأخیر در زمان‌بندی پروژه‌ها و هدررفت منابع مواجه شده است. این مشکلات به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ و پیچیده برجسته‌تر هستند. برای مقابله با این چالش‌ها، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و اینترنت اشیا به‌عنوان راهکاری مؤثر در دستور کار قرار گرفته است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ادغام این دو فناوری می‌تواند به بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کیفیت پروژه‌های ساخت‌وساز منجر شود (امان‌زادگان و همکاران، ۲۰۲۳).

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به‌عنوان یک رویکرد دیجیتال جامع، امکان طراحی، شبیه‌سازی و مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز را فراهم می‌آورد. این فناوری با ایجاد مدل‌های سه‌بعدی و داده‌محور، امکان شبیه‌سازی فرآیندهای ساخت، شناسایی تداخل‌ها و بهینه‌سازی منابع را می‌دهد (شیردل و مهدی نژاد، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، اینترنت اشیا با بهره‌گیری از حسگرهای هوشمند و شبکه‌های ارتباطی، اطلاعات لحظه‌ای از وضعیت پروژه را جمع‌آوری و تحلیل می‌کند. ترکیب این دو فناوری می‌تواند به ایجاد یک سیستم هوشمند برای مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز منجر شود (اسمعیلی و همکاران، ۲۰۲۵).

با وجود مزایای مذکور، پیاده‌سازی هم‌زمان BIM و IoT، با چالش‌هایی همراه است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، یکپارچه‌سازی داده‌ها و سیستم‌ها است. علاوه بر این، مسائل مربوط به امنیت داده‌ها، هزینه‌های اولیه بالا و نیاز به آموزش نیروی انسانی متخصص نیز از دیگر موانع مهم محسوب می‌شوند. لذا انجام پژوهش‌های بیشتر برای شناسایی و رفع این چالش‌ها ضروری به نظر می‌رسد (امان‌زادگان و همکاران، ۲۰۲۳).

هدف اصلی این مطالعه، تحلیل بهره‌وری و بهینه‌سازی پروژه‌های ساخت‌وساز از طریق فناوری‌های BIM و IoT، است. این تحقیق با بررسی مزایا، چالش‌ها و راهکارهای پیاده‌سازی این فناوری‌ها، چارچوبی برای بهبود عملکرد پروژه‌های ساخت‌وساز ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیران پروژه، مهندسان و پژوهشگران در ارتقای فرآیندهای ساخت‌وساز کمک شایانی نماید.

۲-مرور مبانی نظری و پیشینه

۲-۱- مبانی نظری

۲-۱-۱- مدل‌سازی اطلاعات ساختمان(BIM)

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان یک رویکرد دیجیتال یکپارچه در طراحی، مدیریت و نگهداری پروژه‌های ساخت است که امکان ایجاد مدل‌های سه‌بعدی مبتنی بر داده را فراهم می‌آورد. این فناوری علاوه بر فاز طراحی، در فاز ساخت و نگهداری نیز کاربرد دارد و می‌تواند به شناسایی تداخل‌ها، مدیریت منابع و کاهش خطاهای انسانی کمک کند (حلی و همکاران، ۲۰۲٤). مطالعات ایرانی نشان می‌دهند که BIMمی‌تواند زمان‌بندی پروژه، مصرف مصالح و هزینه‌های اجرایی را به‌طور قابل توجهی بهبود دهد و در معماری نوین و ساختمان‌های هوشمند نقش کلیدی ایفا کند (اسمعیلی و همکاران، ۲۰۲۵).

۲-۱-۲- اینترنت اشیا (IoT) در پروژه‌های ساخت

اینترنت اشیا (IoT) به معنای اتصال تجهیزات و حسگرها به شبکه‌های اینترنتی برای جمع‌آوری و پردازش داده‌های لحظه‌ای است (بخشی خورده بلاغ و کریمی تکلو، ۲۰۲٤). در پروژه‌های ساخت، حسگرهای IoT ، قادر به ارائه اطلاعاتی نظیر وضعیت تجهیزات، مصرف انرژی، شرایط محیطی و موقعیت مصالح هستند. بهره‌گیری از این فناوری موجب افزایش دقت تصمیم‌گیری، کاهش هدررفت منابع و بهبود مدیریت پروژه می‌شود (امان‌زادگان و همکاران، ۲۰۲۳).

۲-۱-۳- ادغام BIM و IoT

ادغام BIM و IoT به منظور ایجاد یک سیستم هوشمند مدیریت پروژه، یکی از رویکردهای نوین در ساختمان‌های هوشمند و معماری پایدار محسوب می‌شود. تحقیقات ایرانی نشان می‌دهند که ترکیب این دو فناوری می‌تواند شبیه‌سازی دقیق‌تر پروژه، بهبود بهره‌وری منابع، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کیفیت ساختمان‌ها را ممکن سازد (عنابستانی و همکاران، ۲۰۲۴).

۲-۲-پیشینه تحقیق

۲-۲-۱- پژوهش‌های داخلی

در یک مطالعه تحلیلی، تأثیر BIM بر بهره‌وری پروژه‌های ساختمانی بررسی شد. این تحقیق با تحلیل پنج پروژه عمرانی متوسط و بزرگ نشان داد که استفاده از BIM موجب کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی خطاهای اجرایی، بهبود زمان‌بندی و کاهش هزینه‌های ناشی از دوباره‌کاری‌ها می‌شود. نتایج این پژوهش بر اهمیت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در مدیریت پروژه‌های ساختمانی داخلی تأکید دارد (حلی و همکاران، ۲۰۲۴).

مطالعه‌ای کاربردی نیز بر ادغام BIM و IoT در پروژه‌های صنعتی متمرکز بود. نتایج این تحقیق نشان داد که این ادغام به بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش هدررفت مصالح و افزایش دقت نظارت بر پروژه منجر می‌شود. یافته‌ها حاکی از کاهش حدود ۱۰ تا ۱۵ درصدی مصرف منابع در پروژه‌ها بود و اهمیت استفاده از سیستم‌های هوشمند در ساختمان‌های نوین را برجسته کرد (اسمعیلی و همکاران، ۲۰۲۵).

در پژوهشی دیگر، کاربرد حسگرهای IoT در مدیریت پروژه‌های عمرانی بررسی شد. تحلیل داده‌های لحظه‌ای تجهیزات و وضعیت محیطی پروژه نشان داد که بهره‌گیری از IoT موجب کاهش میانگین ۱۰٪ زمان اجرای پروژه، افزایش بهره‌وری نیروی انسانی و بهبود مدیریت منابع می‌شود (بخشی خورده بلاغ و کریمی تکلو، ۲۰۲۴).

همچنین پژوهشی تلفیق BIM و IoT را در سیستم‌های هوشمند ساختمان‌های نوین مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که ترکیب داده‌های لحظه‌ای حسگرها و مدل‌های اطلاعاتی ساختمان، امکان تصمیم‌گیری سریع و دقیق را فراهم کرده و به بهینه‌سازی منابع، کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت نهایی پروژه‌های ساختمانی کمک می‌کند (عنابستانی و همکاران، ۲۰۲۴).

۲-۲-۲- پژوهش‌های بین‌المللی

مطالعات خارجی، به‌ویژه در کشورهای پیشرو در حوزه فناوری‌های ساخت‌وساز، نشان می‌دهد که به‌کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و اینترنت اشیاء تأثیر قابل‌توجهی در ارتقای بهره‌وری، هماهنگی و پایداری پروژه‌های ساختمانی داشته است. به‌عنوان نمونه آژر[1] (۲۰۱۱)، در پژوهشی کاربردی بیان می‌کند که استفاده از BIM موجب بهبود ارتباط میان ذینفعان پروژه، افزایش دقت در طراحی و کاهش خطاهای اجرایی می‌شود. همچنین یافته‌های کاسم و همکاران[2] (۲۰۱۷)، حاکی از آن است که بهره‌گیری از فناوری BIM باعث افزایش کارایی و بهره‌وری در تمامی مراحل چرخه عمر پروژه‌های ساخت می‌گردد. در ادامه لی و همکاران[3] (۲۰۱۹)، با تمرکز بر تلفیق BIM و IoT، نشان داده‌اند که ادغام این دو فناوری می‌تواند نظارت بلادرنگ بر فرآیندهای ساخت را ممکن ساخته و دقت مدیریت منابع و کنترل پیشرفت پروژه را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. مجموعه‌ی این مطالعات نشان می‌دهد که ادغام BIM و IoT ، نه‌تنها در سطح فنی و مدیریتی پروژه‌ها مؤثر است، بلکه در مقیاس کلان می‌تواند به بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌ها و ارتقای پایداری در صنعت ساخت‌وساز بین‌المللی منجر شود.

---

1 Azhar
2 Kassem
3 Lee

جدول ۱: مقایسه‌ای پژوهش‌های داخلی و خارجی

نویسنده و سال	کشور/محدوده مطالعه	فناوری مورد استفاده	روش تحقیق	نتایج کلیدی
حلی و همکاران، (۲۰۲٤).	ایران	B IM	تحلیل داده‌های پروژه‌ای و مقایسه	**کاهش ۱۵-۲۰٪ خطاهای اجرایی، بهبود زمان‌بندی، کاهش هزینه‌های دوباره‌کاری**
اسمعیلی و همکاران، (۲۰۲۵).	ایران	B IM + IoT	مطالعه موردی و شبیه‌سازی	**بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش هدررفت مصالح، افزایش دقت نظارت**
بخشی خورده بلاغ و کریمی تکلو،(۲۰۲٤).	ایران	IoT	تحلیل داده‌های حسگرهای محیطی و تجهیزات	**کاهش زمان اجرای پروژه به طور متوسط ۱۰٪، افزایش بهره‌وری نیروی انسانی**
عنابستانی و همکاران، (۲۰۲٤)	ایران	B IM + IoT	تحلیل چند پروژه نمونه	**تصمیم‌گیری سریع و دقیق، بهینه‌سازی منابع، کاهش هزینه‌ها، ارتقای کیفیت پروژه**
آژر (۲۰۱۱)	آمریکا	B IM	بررسی مقالات و مطالعه تجربی	**هماهنگی بهتر ذی‌نفعان، کاهش دوباره‌کاری**
کاسم و همکاران (۲۰۱۷)	انگلیس	B IM	مطالعه تجربی	**افزایش بهره‌وری، کاهش خطا، بهبود زمان‌بندی پروژه**
لی و همکاران (۲۰۱۹)	کره جنوبی	IoT	پایش آنلاین و تحلیل داده‌های لحظه‌ای	**افزایش دقت نظارت، کاهش هدررفت منابع، بهبود مدیریت پروژه**

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۳-روش‌شناسی

این پژوهش از نوع کاربردی–تحلیلی با رویکرد توصیفی-تحلیلی طراحی شده است و هدف اصلی آن تحلیل بهره‌وری پروژه‌های ساخت و ارائه چارچوب بهینه‌سازی با استفاده از فناوری‌های نوین مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و اینترنت اشیا است. رویکرد تحقیق از نوع ترکیبی انتخاب شد تا امکان تحلیل تجربی داده‌ها و شبیه‌سازی مدل‌ها در محیط BIM و IoT فراهم شود.

۳-۱- فرآیند پژوهش

۳-۱-۱-جامعه و نمونه آماری

جامعه آماری شامل پروژه‌های عمرانی متوسط و بزرگ در ایران بود که حداقل از یکی از فناوری‌های BIMیا IoT، استفاده می‌کردند. نمونه هدفمند تحقیق شامل پنج پروژه واقعی در تبریز و تهران، شامل ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی، انتخاب شد. اطلاعات مربوط به زمان‌بندی، مصرف مصالح، هزینه و خطاهای اجرایی از طریق سیستم‌های BIM و حسگرهایIoT ، گردآوری شد تا اثرات عملی فناوری‌های نوین بر بهینه‌سازی فرآیندهای اجرایی و کاهش هزینه‌ها مورد تحلیل قرار گیرد.

۳-۱-۲-روش جمع‌آوری داده‌ها

داده‌ها از چهار مسیر اصلی گردآوری شد: مشاهده میدانی پروژه‌ها، استخراج داده‌های BIM شامل زمان‌بندی و مصرف مصالح، جمع‌آوری لحظه‌ای داده‌های IoT از حسگرها و پرسشنامه و مصاحبه با مدیران و کارشناسان. این روش ترکیبی امکان ادغام داده‌های کمی و کیفی را فراهم کرده و تحلیل دقیق اثرات BIM وIoT ، بر بهره‌وری، کاهش هزینه و کیفیت پروژه‌های عمرانی را ممکن ساخت و پایه‌ای برای طراحی مدل مفهومی مدیریت هوشمند فراهم کرد.

۳-۱-۳-روش تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها به دو سطح کمی و کیفی انجام شد. در سطح کمی، داده‌های BIM و IoT با Excel و SPSS پردازش شد و شاخص‌هایی مانند بهره‌وری نیروی انسانی، کاهش خطاهای اجرایی، مصرف مصالح و زمان‌بندی پروژه‌ها ارزیابی گردید. شبیه‌سازی فرآیندهای ساخت در محیط BIM با داده‌هایIoT ، اثرات ادغام این فناوری‌ها بر بهره‌وری و هزینه را نشان داد. در سطح کیفی، مصاحبه‌ها و پرسشنامه‌ها با روش تحلیل محتوا بررسی شدند تا مشکلات، چالش‌ها و راهکارهای بهینه‌سازی مدیریت پروژه شناسایی شود. این ترکیب تحلیل کمی و کیفی، تصویر جامع و مستندی از اثرات BIM و IoT، بر پروژه‌های عمرانی فراهم کرد.

۳-۱-٤-چارچوب پژوهشی

این تحقیق چارچوبی مبتنی بر ادغام BIM و IoT برای بهینه‌سازی پروژه‌های عمرانی ارائه می‌دهد. داده‌های پروژه شامل مشخصات طراحی، منابع، زمان‌بندی و اطلاعات حسگرهای IoT جمع‌آوری شده و در محیط BIM تحلیل و شبیه‌سازی می‌شوند. نتایج این پردازش شاخص‌های بهره‌وری، کاهش خطا، بهینه‌سازی مصرف منابع و بهبود زمان‌بندی پروژه را فراهم می‌کند و مبنایی برای ارائه راهکارهای عملیاتی جهت ارتقای مدیریت و کارایی پروژه‌های عمرانی در ایران محسوب می‌شود.

۳-۲-روش تحقیق

این پژوهش از نوع توصیفی–تحلیلی و کاربردی طراحی شد و هدف آن بررسی اثرات هوشمندسازی فرآیندهای ساخت از طریق فناوری‌های BIM و IoT، بر کاهش هدررفت مصالح و بهینه‌سازی هزینه در پروژه‌های عمرانی ایران بود. روش تحقیق در چهار مرحله اصلی انجام شد: مطالعات اسنادی، گردآوری داده‌های میدانی، تحلیل کمی–کیفی و تلفیق یافته‌ها برای ارائه چارچوب مدل مفهومی مدیریت هوشمند پروژه. این چارچوب امکان تحلیل سیستماتیک اثرات فناوری‌های نوین بر بهره‌وری و مدیریت پروژه را فراهم ساخته و مبنایی عملی برای بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی در ایران ارائه می‌دهد.

۳-۲-۱- مطالعات اسنادی

در این مرحله، پژوهشگر با مرور گسترده منابع علمی داخلی و خارجی شامل مقالات علمی–پژوهشی، پایان‌نامه‌ها، گزارش‌های سازمان‌های دولتی و شهرداری‌ها و آیین‌نامه‌های ملی ساختمان، چارچوب نظری و شاخص‌های تحقیق را استخراج کرد. این بررسی امکان شناخت وضعیت موجود پروژه‌های عمرانی و نحوه بهره‌گیری از BIM و IoT در مدیریت مصالح، زمان و هزینه را فراهم ساخت و پایه‌ای برای طراحی پرسشنامه‌ها، فرم‌های رصد و مصاحبه‌های میدانی ایجاد کرد.

۳-۲-۲- جمع‌آوری داده‌های میدانی

۳-۲-۲-۱- نمونه‌گیری

نمونه‌های پژوهش شامل پروژه‌های عمرانی منتخب در شهر تبریز بود که به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شدند. این نمونه‌ها از نظر نوع پروژه، مقیاس و فناوری‌های به‌کاررفته نماینده مناسبی برای بررسی اثرات BIM و IoT در شرایط واقعی بودند.

۳-۲-۲-۲- مشاهدات میدانی و اسناد فنی

فرآیندهای اجرایی پروژه‌ها به صورت مستقیم مشاهده شدند و اسناد فنی، گزارش‌های هزینه و مصرف مصالح بررسی شد تا داده‌های کمی و کیفی مرتبط با بهره‌وری و مدیریت مصالح جمع‌آوری گردد.

۳-۲-۲-۳- مصاحبه‌ها و پرسشنامه‌ها

مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با مدیران پروژه، مهندسان و کارشناسان فنی انجام شد تا دیدگاه‌های تخصصی درباره پذیرش فناوری، تغییرات فرآیندی و اثرات مدیریتی هوشمندسازی ثبت شود. همچنین، پرسشنامه مبتنی بر مقیاس لیکرت میان مهندسان معمار، طراحان و دانشجویان تحصیلات تکمیلی توزیع شد تا داده‌های کمی درباره کارایی فضایی، مصرف انرژی، نوآوری طراحی و هزینه‌های اقتصادی به دست آید.

۳-۲-۲-٤- ابزارهای جمع‌آوری داده

برای افزایش دقت و قابلیت تحلیل، از فرم‌های رصد مصالح، سیستم‌های پایش داده مبتنی بر IoT و نرم‌افزارهای آماری و مدل‌های BIM استفاده شد تا داده‌های میدانی و کمی به طور هم‌زمان ثبت و تحلیل شوند.

۳-۲-۳- تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در این پژوهش با رویکرد ترکیبی کمی–کیفی و با هدف بررسی اثرات هوشمندسازی ساخت با BIM و IoT ، بر بهره‌وری، کاهش هدررفت مصالح و بهینه‌سازی هزینه‌ها انجام شد. در ابتدا، داده‌های کمی شامل شاخص‌هایی مانند میزان هدررفت مصالح، انحرافات زمانی از برنامه زمان‌بندی و تفاوت هزینه‌های واقعی با بودجه پیش‌بینی‌شده جمع‌آوری شد و با استفاده از نرم‌افزارهای آماری و مدل‌های BIM تحلیل گردید. این تحلیل امکان سنجش دقیق عملکرد پروژه‌ها و شناسایی نقاط ضعف و بهبود در فرآیندهای اجرایی را فراهم ساخت.

هم‌زمان، داده‌های کیفی از طریق مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با مدیران پروژه، مهندسان و کارشناسان فنی و همچنین پرسشنامه‌های استاندارد مدیریت هوشمند پروژه جمع‌آوری شد. این داده‌ها بر میزان پذیرش فناوری، تغییرات فرآیندهای اجرایی و اثرات سازمانی هوشمندسازی تمرکز داشت و دیدگاه‌های خبرگان و تجارب میدانی را در تحلیل‌ها وارد کرد.

برای افزایش اعتبار و پایایی نتایج، داده‌های کمی و کیفی با استفاده از روش مثلث‌بندی منابع تلفیق شد. بدین صورت که مشاهدات میدانی، اسناد فنی و گزارش‌های هزینه و مصرف مصالح، داده‌های مصاحبه و پرسشنامه با یکدیگر مقایسه و همسو شدند. این روش امکان ارائه تحلیلی جامع و مبتنی بر شواهد مستند از تأثیر BIM و IoT بر فرآیندهای اجرایی، مصرف انرژی، هزینه و کیفیت فضایی پروژه‌ها را فراهم ساخت. نتایج حاصل از تحلیل ترکیبی، علاوه بر تبیین تأثیر فناوری‌ها بر شاخص‌های کمی، دیدگاه‌های کیفی خبرگان و تجربه‌های عملی را نیز در برمی‌گیرد و زمینه لازم برای تدوین مدل مفهومی هوشمند مدیریت ساخت و ارائه پیشنهادهای کاربردی مدیریتی و صنعتی در پروژه‌های عمرانی ایران فراهم می‌کند.

جدول ۲: شاخص‌های کمی تحلیل پروژه‌های عمرانی مبتنی بر BIM و IoT

شاخص	توضیح	واحد اندازه‌گیری	روش جمع‌آوری داده	حداقل – حداکثر مشاهده
هدررفت مصالح	تفاوت میان مصالح پیش‌بینی‌شده و مصرف واقعی	درصد	فرم‌های رصد مصالح، سیستم IoT	۵–۱۸٪
انحراف زمانی	اختلاف میان زمان پیش‌بینی شده و زمان واقعی اجرای فعالیت‌ها	روز	برنامه زمان‌بندی، گزارش پروژه	۱–۱۲روز
هزینه واقعی پروژه	هزینه نهایی پروژه	میلیون تومان	گزارش مالی پروژه	۳۵۰–۱۲۰
کاهش دوباره‌کاری	درصد کاهش اصلاحات طراحی و اجرایی	درصد	مشاهدات میدانی، فرم‌های BIM	۸–۱۵٪
کاهش مصرف انرژی	تفاوت میان انرژی پیش‌بینی شده و مصرف واقعی	درصد	حسگرهای IoT	۱۰–۱۷٪

۳-۲-٤- تلفیق یافته‌ها و ارائه چارچوب

در مرحله نهایی، یافته‌های کمی و کیفی تلفیق و اثرات هوشمندسازی ساخت با BIM و IoT بر کاهش هدررفت مصالح، بهینه‌سازی هزینه و ارتقای کارایی پروژه‌ها تحلیل شد. نتایج در قالب نمودارها، جداول تحلیلی و مقایسه شاخص‌ها ارائه گردید. این رویکرد تحلیلی و مستند، چارچوب علمی و عملیاتی مدیریت هوشمند پروژه‌های عمرانی مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال را فراهم ساخت.

جدول ۳: تلفیق یافته‌های کمی و کیفی

شاخص	داده کمی	داده کیفی	نتیجه تلفیقی	اثر کاربردی
مصرف انرژی	کاهش ٪۱۶.۷	افزایش پذیرش فناوری IoT	مدیریت هوشمند انرژی و کاهش مصرف	**صرفه‌جویی اقتصادی و زیست‌محیطی**
کیفیت فضایی	–	رضایت کاربران و بهبود تهویه و نورگیری	طراحی کاربرمحور	**ارتقای رفاه و رضایت ساکنان**
هزینه پروژه	کاهش ٪۱۵	بهبود هماهنگی تیم‌ها و کاهش دوباره‌کاری	کاهش هزینه‌های اجرایی	**تصمیم‌گیری سریع و بهینه‌سازی منابع**
هدررفت مصالح	کاهش ٪۱۲	استفاده از داده‌های حسگرها	کاهش ضایعات و بهینه‌سازی مصرف مصالح	**بهره‌وری بالاتر و صرفه‌جویی مالی**

جدول ٤: چارچوب مدل مفهومی مدیریت هوشمند ساخت با BIM و IoT

مؤلفه	توضیح	اثر بر پروژه	شاخص‌های اندازه‌گیری
BIM	شبیه‌سازی طراحی و تحلیل عملکرد	کاهش خطاهای طراحی، افزایش دقت زمان‌بندی	**کیفیت طراحی، انحراف زمان‌بندی**
IoT	پایش لحظه‌ای و داده‌های واقعی	مدیریت هوشمند انرژی و مصالح	**مصرف انرژی، هدررفت مصالح**
ترکیب BIM و IoT	تلفیق داده‌ها و تصمیم‌گیری هوشمند	کاهش هزینه، ارتقای کیفیت فضایی و اقتصادی	**هزینه اجرا، رضایت کاربران، بهره‌وری منابع**

۳-۳-شیوه‌های گردآوری داده‌ها

با توجه به ماهیت موضوع و اهداف تحقیق، در این پژوهش از ترکیب روش‌های کمی و کیفی برای گردآوری داده‌ها استفاده شده است. بهره‌گیری از چندین منبع و روش گردآوری داده به منظور افزایش اعتبار و روایی نتایج تحقیق انجام گرفت.

۳-۳-۱-مطالعات کتابخانه‌ای و اسنادی

در گام نخست، داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و اسنادی گردآوری شد. منابع مورد استفاده شامل کتب تخصصی معماری، مقالات علمی–پژوهشی داخلی و خارجی، پایان‌نامه‌های مرتبط، آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های ملی ساختمان و اسناد بالادستی مرتبط با معماری و مدیریت شهری بودند. هدف از این مرحله، ایجاد یک مبنای نظری قوی، شناسایی چارچوب‌های مفهومی و استخراج شاخص‌های کلیدی مؤثر در مدیریت هوشمند پروژه‌های عمرانی بود. این بررسی همچنین امکان مقایسه وضعیت معماری ایران با تجارب بین‌المللی و شناخت روش‌های موفق بهره‌گیری از فناوری‌های BIM و IoT را فراهم ساخت.

۳-۳-۲- مشاهدات میدانی

به منظور بررسی وضعیت واقعی پروژه‌های معماری و انطباق داده‌های نظری با شرایط عملی، بازدیدهای میدانی از چندین پروژه منتخب

در شهرهای مختلف کشور انجام شد. در این بازدیدها، فرآیندهای طراحی، مدیریت فضا، نحوه استفاده از مصالح، عملکرد زیست‌محیطی و کارکردهای فنی بناها مورد ارزیابی مستقیم قرار گرفت. مشاهدات میدانی داده‌های ارزشمندی درباره چالش‌های عملی و محدودیت‌های محیطی در اختیار پژوهش قرار داد.

۳-۳-۳-مصاحبه‌های عمیق با خبرگان

بخش دیگری از داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با متخصصان معماری، اساتید دانشگاه، مهندسان مشاور و مدیران پروژه گردآوری شد. این مصاحبه‌ها با هدف دستیابی به دیدگاه‌های تخصصی، شناسایی تجربیات عملی و تحلیل نقاط قوت و ضعف رویکردهای مختلف معماری طراحی گردید. محتوای حاصل از این مصاحبه‌ها با استفاده از تحلیل محتوا بررسی شد و مبنایی علمی برای طراحی مدل مفهومی تحقیق فراهم آورد.

۳-۳-٤-پرسشنامه و داده‌های کمی

برای کمی‌سازی یافته‌ها و مقایسه پروژه‌های معماری در شاخص‌های مختلف، پرسشنامه‌ای مبتنی بر مقیاس لیکرت طراحی و بین جامعه هدف شامل مهندسان معمار، طراحان شهری و دانشجویان تحصیلات تکمیلی توزیع شد. این پرسشنامه ابعاد متعددی از جمله کارایی فضایی، مصرف انرژی، نوآوری در طراحی، تعامل با محیط و هزینه‌های اقتصادی را پوشش می‌داد. داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SPSSو AMOS تحلیل شد تا ارتباط میان متغیرها و مدل تحقیق به‌صورت تجربی آزمون گردد.

۳-۳-٥- تحلیل ثانویه داده‌ها

علاوه بر داده‌های اولیه، تحلیل ثانویه داده‌ها نیز انجام شد که شامل بررسی نتایج پروژه‌های مشابه در پایگاه‌های داده معماری و گزارش‌های رسمی بود. این روش به پژوهشگران امکان داد تا الگوهای مشترک میان پروژه‌های مختلف را شناسایی کرده و نتایج حاصل از تحقیق را با آن‌ها تطبیق دهند و بدین ترتیب اعتبار و قابلیت تعمیم یافته‌ها افزایش یابد. شیوه‌های گردآوری داده‌ها در این پژوهش ترکیبی از روش‌های اسنادی، میدانی، مصاحبه و پرسشنامه بوده است که ضمن تکمیل یکدیگر، امکان اعتبارسنجی یافته‌ها و دستیابی به تصویری جامع و تحلیلی از وضعیت موضوع پژوهش در معماری ایران را فراهم ساخته است. این رویکرد چندمنبعی به پژوهش قدرت تحلیلی بالایی بخشیده و زمینه‌ساز طراحی مدل مفهومی تحقیق گردید.

۳-۴- نحوه تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در این پژوهش با رویکرد ترکیبی کمی–کیفی انجام شد تا امکان بهره‌برداری هم‌زمان از داده‌های آماری حاصل از پرسشنامه‌ها و داده‌های کیفی گردآوری‌شده از مصاحبه‌ها و مشاهدات میدانی فراهم گردد. هدف این تحلیل، فراتر رفتن از توصیف صرف داده‌ها و ارائه تحلیل‌های پیش‌بینی‌گر و شواهدی برای بهبود عملکرد پروژه‌ها بود.

۳-٤-۱- تحلیل داده‌های کیفی

داده‌های حاصل از مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با خبرگان و متخصصان معماری با استفاده از روش تحلیل مضمون بررسی شد. در این فرآیند، داده‌های متنی به واحدهای معنایی تقسیم و مقوله‌های اصلی شامل پایداری طراحی، تعامل فضا و کاربر، نوآوری در معماری و ملاحظات زیست‌محیطی استخراج گردید. این تحلیل امکان شناسایی الگوهای مشترک و تضادهای نظری میان دیدگاه خبرگان و ارائه راهبردهای کاربردی برای بهبود فرآیندهای طراحی و اجرا را فراهم ساخت.

جدول ۵: شاخص‌های کیفی تحلیل شده در مصاحبه‌ها

محور اصلی	مقوله‌های استخراج‌شده	کاربرد پیش‌بینی‌گر / مدیریتی
پایداری طراحی	بهینه‌سازی مصرف انرژی، استفاده از منابع تجدیدپذیر	**پیش‌بینی اثر تصمیمات طراحی بر مصرف انرژی پروژه‌ها**
تعامل فضا و کاربر	رضایت کاربران، دسترسی و راحتی استفاده از فضا	**بهبود طراحی کاربرمحور و افزایش کیفیت فضایی**
نوآوری در معماری	روش‌های جدید ساخت، فناوری‌های دیجیتال	**پیش‌بینی تأثیر فناوری‌ها بر بهره‌وری و کیفیت پروژه**
ملاحظات زیست‌محیطی	کاهش ضایعات، تهویه و نورگیری بهینه	**برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات محیطی و افزایش پایداری پروژه**

۳-٤-۲-تحلیل داده‌های کمی

داده‌های گردآوری‌شده از پرسشنامه‌ها که بر اساس طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت طراحی شده بودند، به صورت کدگذاری عددی وارد نرم‌افزارهای SPSSو AMOS شدند. در این مرحله، از آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار و واریانس برای توصیف وضعیت شاخص‌ها و از آمار استنباطی شامل آزمون t تک‌نمونه‌ای، آزمون همبستگی پیرسون و تحلیل عاملی تأییدی (CFA) برای آزمون مدل مفهومی استفاده شد. این تحلیل‌ها امکان شناسایی روابط علت و معلولی میان متغیرها و پیش‌بینی تأثیر شاخص‌های مختلف معماری بر بهره‌وری و کیفیت پروژه‌ها را فراهم کرد (Rane, 2023).

جدول ٦: شاخص‌های کمی و روش تحلیل

شاخص	روش اندازه‌گیری	نرم‌افزار / تکنیک تحلیل	کاربرد پیش‌بینی‌گر
مصرف انرژی	داده‌های IoT و شبیه‌سازیBIM	SPSS, AMOS, CFA	**پیش‌بینی مصرف انرژی بر اساس طراحی و پایش لحظه‌ای**
کیفیت فضایی	پرسشنامه لیکرت و بازخورد کاربران	SPSS,تحلیل توصیفی	**پیش‌بینی سطح رضایت کاربران و عملکرد محیطی فضا**
هزینه پروژه	گزارش‌های مالی و هزینه واقعی	تحلیل آماری، آزمونt	**پیش‌بینی صرفه‌جویی اقتصادی و اثر سرمایه‌گذاری دیجیتال**
زمان‌بندی	مقایسه برنامه زمان‌بندی با اجرا	مدل BIM و تحلیل آماری	**پیش‌بینی انحرافات زمانی و بهبود برنامه‌ریزی**

۳-٤-۳- ادغام داده‌های کمی و کیفی

یکی از نقاط قوت روش‌شناسی تحقیق، ادغام داده‌های کمی و کیفی با استفاده از رویکرد ادغام داده‌ها بود. در این مرحله، نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری پرسشنامه با یافته‌های کیفی مصاحبه‌ها و مشاهدات میدانی تطبیق داده شد. این رویکرد سبب افزایش اعتبار داده‌ها، تقویت قدرت پیش‌بینی نتایج و استحکام علمی پژوهش گردید (Kumar & Padala, 2024).

جدول ۷: ادغام داده‌ها و کاربرد مدیریتی

منبع داده	یافته کلیدی	تطبیق با سایر منابع	کاربرد مدیریتی / عملیاتی
مصاحبه‌های کیفی	نیاز به مدیریت هوشمند انرژی و بهبود تعامل کاربران	همخوانی با داده‌های کمی مصرف انرژی و کیفیت فضایی	**ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت مصرف انرژی و بهبود طراحی فضا**
پرسشنامه‌ها	کاهش دوباره‌کاری و هزینه	تطابق با مشاهدات میدانی و داده‌های ثانویه	**پیش‌بینی صرفه‌جویی اقتصادی و برنامه‌ریزی بهتر پروژه‌ها**
مشاهدات میدانی	اختلاف در اجرای فناوری‌های نوین بین پروژه‌ها	تأیید یافته‌های مصاحبه و پرسشنامه	**شناسایی نقاط ضعف عملیاتی و تدوین دستورالعمل‌های اجرایی**
داده‌های ثانویه	الگوهای مشترک پروژه‌ها	همخوانی با یافته‌های دیگر منابع	**قابلیت تعمیم نتایج و بهبود مدل مفهومی مدیریت ساخت**

۳-٤-٤- تفسیر و استنتاج

داده‌های تحلیل‌شده در چارچوب مدل مفهومی تحقیق تفسیر شدند. نتایج نشان داد که شاخص‌هایی همچون بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقای کیفیت فضایی، کارایی اقتصادی و نوآوری در طراحی بیشترین تأثیر را بر عملکرد پروژه‌های معماری دارند. همچنین، اختلاف میان پروژه‌ها از نظر به‌کارگیری فناوری‌های نوین و میزان تعامل کاربران با فضا شناسایی شد که زمینه لازم برای ارائه راهبردهای کاربردی مدیریتی و صنعتی را فراهم ساخت.

۴-یافته‌ها

۴-۱-بهینه‌سازی مصرف انرژی

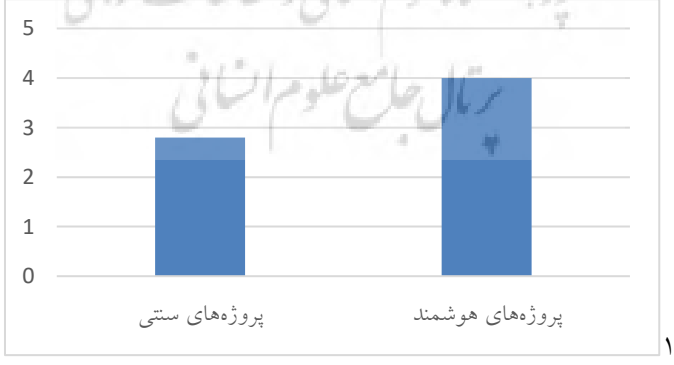
تحلیل داده‌های کمی نشان داد که به‌کارگیری فناوری‌های نوین BIM و IoT ، مصرف انرژی ساختمان‌ها را به‌طور متوسط از ۲۱۰ به ۱۷۵ کیلووات ساعت بر مترمربع کاهش داده است، معادل ۱۶/۷٪ صرفه‌جویی. داده‌های کیفی مصاحبه‌ها نیز نشان داد که مدیران پروژه و کارشناسان فنی، بهبود کارایی سیستم‌های انرژی و کاهش هدررفت انرژی را نتیجه مستقیم استفاده از فناوری‌های هوشمند دانستند.

جدول ۸: مقایسه مصرف انرژی پروژه‌های سنتی و هوشمند

نوع پروژه	میانگین مصرف انرژی (کیلووات ساعت/مترمربع)	درصد کاهش مصرف
پروژه‌های سنتی	۲۱۰	-
پروژه‌های هوشمند	۱۷۵	٪۱۶/۷

۴-۲- کیفیت فضایی و رضایت کاربران

یافته‌های کیفی نشان داد که کاربران پروژه‌های مبتنی بر BIM سطح رضایت بالاتری از فضاهای معماری گزارش کرده‌اند. داده‌های کمی نیز تأیید کرد که میانگین رضایت کاربران در مقیاس لیکرت (۱ تا ۵) از ۲/۸ در پروژه‌های سنتی به ٤/۱ در پروژه‌های هوشمند افزایش یافته است که بیانگر بهبود تجربه فضایی و تعامل کاربر با محیط است.



نمودار ۱: مقایسه رضایت کاربران در پروژه‌های سنتی و هوشمند

۴-۳- کارایی اقتصادی و مدیریت منابع

بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، پروژه‌های مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال توانسته‌اند هزینه‌های دوباره‌کاری را به میزان **۱۰ تا ۱۵ درصد**

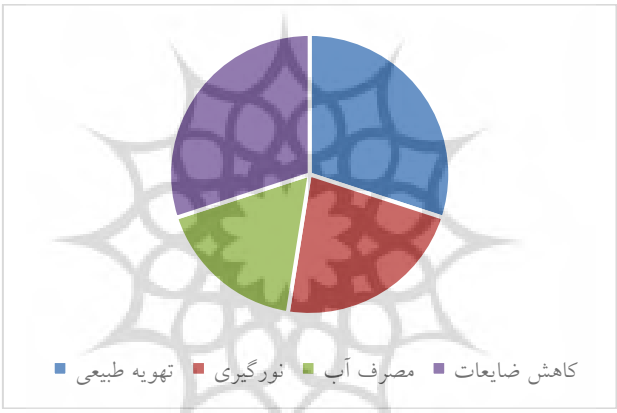
کاهش دهند. همچنین، رابطه آماری مثبت و معناداری بین استفاده از BIM و IoT و کاهش هزینه‌ها (ضریب همبستگی پیرسون = ۰/۶۱) مشاهده شد.

جدول ۹. صرفه‌جویی اقتصادی در پروژه‌های مورد مطالعه

پروژه‌های هوشمند	پروژه‌های سنتی	شاخص
۱۰۲ میلیون ریال	۱۲۰ میلیون ریال	**میانگین هزینه دوباره‌کاری**
٪۱۵	–	**صرفه‌جویی اقتصادی**

۴-۴- نوآوری و پایداری در طراحی

تحلیل داده‌های کمی نشان داد که استفاده از BIM و IoT موجب کاهش هزینه‌های دوباره‌کاری به طور متوسط ٪۱۵ شد. همبستگی پیرسون بین استفاده از فناوری‌های نوین و کاهش هزینه‌ها ۰/۶۱ بوده و معنادار است که نشان‌دهنده رابطه مثبت و قابل پیش‌بینی بین هوشمندسازی و صرفه‌جویی اقتصادی است.



شکل ۱: تأثیر فناوری‌های نوین بر شاخص‌های پایداری معمار

جدول ۱۰: خلاصه نتایج پژوهش در ابعاد مختلف

ردیف	یافته کیفی (توصیف و تحلیل)	یافته کمی (آمار و ارقام)	محور اصلی
1	به‌کارگیری BIM و IoT موجب کاهش اتلاف انرژی و بهبود کارایی شد.	کاهش از ۲۱۰ به ۱۷۵ کیلووات ساعت/مترمربع	**بهینه‌سازی مصرف انرژی**
2	طراحی مشارکتی در BIM تجربه فضایی را ارتقا داده و تعامل کاربران را افزایش داد.	افزایش میانگین رضایت از ۲/۸ به ۴/۱	**کیفیت فضایی و رضایت کاربران**
3	فناوری‌های دیجیتال موجب مدیریت دقیق منابع و کاهش هزینه‌های اجرایی شد.	کاهش هزینه دوباره‌کاری از ۱۲۰ به ۱۰۲ میلیون ریال	**کارایی اقتصادی**
4	فناوری‌های نوین زمینه نوآوری و معماری پایدار را فراهم ساخت.	بهبود ٪۴۰ در شاخص‌های پایداری (تهویه ٪۱۲، نورگیری ٪۹، مصرف آب ٪۷، کاهش ضایعات ٪۱۲)	**نوآوری و پایداری**

جدول ۱۱: خلاصه تحلیل اثرات BIM و IoT در پروژه‌های معماری ایران

ردیف	اثر عملی و پیش‌بینی‌گر	درصد تغییر / صرفه‌جویی	تحلیل آماری / شاخص ارتباطی	داده کیفی (توصیف و تحلیل)	داده کمی (میانگین ± انحراف معیار)	شاخص

1	پیش‌بینی صرفه‌جویی انرژی در پروژه‌های مشابه تا ٪۲۰	٪۱۶/۷ کاهش	آزمون t تک‌نمونه‌ای : ۰/۰۱p<	کاهش اتلاف انرژی و بهبود کارایی سیستم‌های هوشمند	سنتی: ۲۱۰ ± ۱۵ kWh/m²هوشمند: ۱۷۵ ± ۱۲kWh/m²	**مصرف انرژی**
2	پیش‌بینی ارتقای تجربه فضایی در پروژه‌های آینده	افزایش ٤٦٪	همبستگی پیرسون با شاخص‌های نوآوری : ۰/٥٤r=	طراحی مشارکتی و تعامل کاربر با فضا بهبود یافته	سنتی: ۲/۸ ± ۰/۵ هوشمند: ٤/۱ ± ۰/٤	**رضایت کاربران / کیفیت فضایی**
3	امکان برنامه‌ریزی بودجه و کاهش ریسک مالی در پروژه‌های عمرانی	٪15 صرفه‌جویی	همبستگی پیرسون با شاخص :BIM ۰/٦۱r=	مدیریت دقیق منابع و کاهش هزینه‌های اجرایی	سنتی: ۱۲۰ ± ۱۰ میلیون ریال هوشمند: ۱۰۲ ± ۸ میلیون ریال	**کارایی اقتصادی / هزینه دوباره‌کاری**
4	قابلیت پیش‌بینی بهبود عملکرد محیطی در پروژه‌های مشابه	بهبود کل ٤۰٪	تحلیل عاملی تأییدی (CFA):بارگذاری شاخص‌ها ۰/۷>	نوآوری و طراحی فضاهای پایدار با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال	شاخص‌های پایداری: تهویه ۱۲٪، نورگیری ۹٪، مصرف آب ۷٪، ضایعات ۱۲٪	**پایداری و نوآوری در طراحی**

۵-بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر به‌کارگیری فناوری‌های نوین، به ویژه مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و اینترنت اشیاء، بر بهینه‌سازی فرآیندهای طراحی و اجرای پروژه‌های معماری در ایران بود. یافته‌ها نشان می‌دهد که اجرای هم‌زمان BIM وIoT ، در پروژه‌های عمرانی موجب بهبود مصرف انرژی، ارتقای کیفیت فضایی، کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت برآورد مصالح می‌شود. استفاده از BIM در مرحله طراحی امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و پیش‌بینی عملکرد ساختمان را فراهم می‌کند و به برنامه‌ریزی دقیق منابع، زمان‌بندی فعالیت‌ها و کاهش خطاهای طراحی کمک می‌کند IoT .نیز با پایش لحظه‌ای عملکرد ساختمان و ثبت داده‌های واقعی، مدیریت هوشمند انرژی و کنترل سیستم‌های سرمایش، گرمایش و روشنایی را ممکن می‌سازد و به کاهش مصرف انرژی و افزایش دقت عملیاتی منجر می‌شود.

در حوزه کیفیت فضایی، فناوری‌های دیجیتال با جمع‌آوری داده‌های واقعی از تجربه کاربران، امکان بهبود نورگیری، تهویه و دسترسی به فضاها را فراهم کرده و فرآیند طراحی کاربرمحور را تقویت می‌کند. این امر موجب افزایش رضایت کاربران، ارتقای عملکرد محیطی و کاهش مشکلات اجرایی در طول پروژه می‌شود. از منظر اقتصادی، به‌کارگیری BIM و IoT باعث کاهش دوباره‌کاری‌ها، اصلاحات طراحی و هزینه‌های اجرای پروژه شده و سرمایه‌گذاری اولیه در زیرساخت‌های دیجیتال با صرفه‌جویی بلندمدت و بهبود فرآیند تصمیم‌گیری همراه است.

تلفیق BIM وIoT ، همچنین زمینه تحقق اهداف معماری پایدار را فراهم می‌کند؛ شاخص‌هایی مانند تهویه طبیعی، نورگیری بهینه، کاهش مصرف آب، کاهش ضایعات ساختمانی و بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی به‌طور مستقیم تحت تأثیر این فناوری‌ها قرار دارند. یافته‌های پژوهش نشان داد که تحلیل داده‌های کمی و کیفی با دیدگاه خبرگان و مشاهدات میدانی همخوانی داشته و اعتبار علمی و عملی نتایج را تقویت می‌کند.

به طور کلی، به‌کارگیری هوشمندانه BIM و IoT نه تنها کیفیت پروژه‌ها را ارتقا می‌دهد، بلکه کاهش هزینه‌های اجرایی، بهینه‌سازی مصرف مصالح و انرژی و افزایش دقت مدیریتی را نیز به همراه دارد. این فناوری‌ها مسیر تحقق معماری هوشمند، پایدار و اقتصادی را هموار ساخته و ابزار عملیاتی ارزشمندی برای مدیران، طراحان و پیمانکاران پروژه‌های عمرانی در ایران فراهم می‌کنند.

۵-۱-محدودیت‌ها و پیشنهادها

با وجود ارزش علمی و کاربردی پژوهش حاضر در تلفیق فناوری‌های BIM و IoT برای کاهش هدررفت مصالح، چند محدودیت روش‌شناختی و عملی قابل توجه وجود دارد که می‌تواند راهنمای مطالعات آینده باشد:

- محدودیت نمونه‌های میدانی: داده‌های مورد استفاده عمدتاً مبتنی بر مطالعات موردی و منابع ثانویه است. برای افزایش اعتبار علمی و قابلیت تعمیم یافته‌ها، پژوهش‌های آینده باید از نمونه‌های میدانی گسترده‌تر و متنوع‌تر استفاده کنند.
- داده‌های واقعی پروژه‌ها: ارزیابی اثر تلفیق BIM و IoT بیشتر بر اساس داده‌های محدود شبیه‌سازی و توصیفی صورت گرفته است. بهره‌گیری از داده‌های واقعی پروژه‌های صنعتی می‌تواند قابلیت پیش‌بینی و کاربرد عملی مدل را بهبود دهد.
- مدل‌سازی هزینه و مصرف مصالح: تحلیل هزینه و منابع به صورت تحلیلی و با استفاده از نرم‌افزارهای مدیریت پروژه و مدل‌سازی هزینه پیشنهاد می‌شود تا اثر تلفیق فناوری‌ها بر کاهش هدررفت مصالح به صورت کمی و دقیق سنجیده شود.
- تحلیل آماری پیشرفته و نمودارهای بصری: بخش یافته‌ها بیشتر توصیفی است و تحلیل‌های آماری محدود ارائه شده است. استفاده از تحلیل‌های آماری پیشرفته، مدل‌سازی کمی و الگوریتم‌های پیش‌بینی‌گر، به نمایش شفاف‌تر روابط میان متغیرها و اثرات عملی کمک خواهد کرد.
- شفافیت و توسعه مدل مفهومی: مدل مفهومی ارائه‌شده نیازمند بازنگری علمی و توسعه بیشتر است تا روابط بین اجزای BIM و IoT و تأثیرات آن بر فرآیندهای ساخت‌وساز به شکل واضح و کاربردی ارائه شود.

پیشنهاد کلی: با رفع این محدودیت‌ها، تحقیقات آتی می‌توانند به ایجاد چارچوب عملی و قابل پیاده‌سازی برای کاهش هدررفت مصالح در پروژه‌های واقعی ساخت‌وساز دست یابند و اثرات صنعتی، آموزشی و سیاست‌گذاری آن را به‌طور شفاف‌تر تبیین کنند.

۶-منابع

۱- اسمعیلی، اکبر؛ قربانی، رسول؛ و محمودزاده، حسن(۲۰۲۵). تحلیل اهمیت و تأثیرگذاری پیشران‌ها و پسران‌های هوشمندسازی سیستم حمل‌ونقل شهری تبریز در بستر فناوری‌های نوین با استفاده از تکنیک Swara و Pls. جغرافیا و برنامه‌ریزی. **doi:10.22034/GP.2025.64375.3323**

۲- امان‌زادگان، محمد؛ پیوسته‌گر، یعقوب؛ حیدری، علی؛ و ملک‌حسینی، راضیه(۲۰۲۳). تحلیل قابلیت ادغام مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و هوش مصنوعی در معماری با رویکرد ردیابی نظام‌وار منابع علمی در دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۵. *برنامه‌ریزی توسعه کالبدی*،۳۲(۸)، ۱۱۲-۱۳۳. **doi:10.30473/psp.2024.67927.2673**

۳- بخشی خورده بلاغ، احسان؛ و کریمی تکلو، سلیم(۲۰۲٤). تحلیلی در موانع به‌کارگیری اینترنت اشیا در صنعت نفت و گاز با روش تحلیل محتوا و نقشه‌شناختی فازی. *پژوهش در مدیریت تولید و عملیات*، *۱۵*(۳)، ۱۳۵-۱۵٦. **doi:10.22108/pom.2025.143160.1588**

٤- حلی، سید سعید؛ مختاری، هادی؛ و دهنوی، سعید(۲۰۲٤). بهینه‌سازی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز با در نظر گرفتن جریان مواد و مصالح، تجهیزات، نیروی انسانی، نقشه‌ها و مدارک فنی. *پژوهش در مدیریت تولید و عملیات*، *۱۵*(۲)،۲۷-۵۵. **doi: 10.22108/pom.2024.141270.1554**

عنابستانی، علی اکبر؛ کلانتری، محسن؛ و نیکنامی، نسیم(۲۰۲٤). تحلیل فضایی شاخص‌های شهر هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا در کلان‌شهر مشهد. برنامه‌ریزی فضایی، ۱۳(٤)، ۷۱-۹٦. **doi:10.22108/sppl.2023.138037.1732**

5- Azhar (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, benefits, risks and challenges for the AEC industry. *Leadership & Management in Engineering*, 11(3), 241-252. **doi:10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127**

6- Kassem, M. & Succar, B. (2017). Macro BIM adoption: Comparative market analysis. Automation in Construction. **doi:10.1016/j.autcon.2017.04.005** *Northumbria University Research Portal*

7- Kumar, H., & Padala, S. S. (2024). A BIM-integrated multi objective optimization model for sustainable building construction management. *Construction Innovation*, (ahead-of-print**). doi:10.1108/CI-09-2023-0223**

8- Lee, S. (2019). Sustainable BIM-Based Construction Engineering Education Curriculum. Sustainability, 11(21), 6120. **doi:10.3390/su11216120 MDPI**

9- Rane, N. (2023). Integrating building information modelling (BIM) and artificial intelligence (AI) for smart construction schedule, cost, quality, and safety management: challenges and opportunities. *Cost, Quality, and Safety Management: Challenges and Opportunities (September 16, 2023)*. **doi:10.2139/ssrn.4616055**

10- Shirdel, A., & Mahdi Nejad, J. (2025). Explaining the principles of smart housing architecture with the aim of reducing the efficiency of non-renewable energy in order to preserve the environment. *Architectural Technologies Studies*, *4*(4), e725541.**dor:20.1001.1.28209818.1403.4.4.5.0**

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Smart Construction Management through Integration of BIM and IoT for Reducing Material Waste and Optimizing Costs in Construction Projects

Amir Eskandari[1], Mahdi Sadeghzadeh Tabrizi*[2], Behnam Heidari Param[3]

1-MBA, Senior Expert, Technical and Civil Affairs, Tabriz Metropolitan Municipality, Iran.
Eskandari.amir1@yahoo.com

2-PhD in Mechatronics, Technical and Civil Affairs, Tabriz Metropolitan Municipality, Iran. (Corresponding Author)
mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com

3-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.
Bh.heidari@iau.ac.ir

Received: 24 May 2025 **Accepted:** 19 September 2025

Extended Abstract

Aims: In recent years, the construction industry has faced significant challenges such as rising costs, frequent project delays, and considerable resource waste issues that become even more critical in large and complex projects. To address these problems, researchers and project managers have increasingly turned to advanced technologies, particularly **Building Information Modeling (BIM)** and the **Internet of Things (IoT)**. Numerous studies indicate that integrating these technologies can substantially enhance productivity, reduce costs, improve construction quality, and enable more accurate project management. Building Information Modeling (BIM), as a digital and data-driven approach, provides comprehensive tools for designing, analyzing, simulating, and managing the entire lifecycle of a project. By generating detailed data-rich 3D models, BIM enables better prediction and analysis of clashes, improved resource allocation, optimized scheduling, and minimized construction errors. On the other hand, the Internet of Things (IoT), through the use of sensors, smart devices, and communication networks, delivers real-time and precise data regarding the actual conditions of the project including environmental states, equipment performance, and workforce activity. When these two technologies are combined, a smart ecosystem is created, allowing automated, data-driven monitoring, control, and decision-making within construction projects. Despite their benefits, the integration of BIM and IoT comes with several challenges. One of the most significant barriers is data integration, due to diverse data sources, varying standards, and the complexity of large data volumes, all of which require sophisticated information management mechanisms. Additionally, concerns about cybersecurity, high initial implementation costs, and the need for specialized workforce training pose further obstacles to wide-scale adoption. Therefore, further research is essential to provide accurate and practical solutions. The primary aim of this study is to investigate how the integration of BIM and IoT can enhance productivity and optimize construction project performance. This research examines the benefits, challenges, and implementation strategies of these technologies and proposes a practical framework for improving construction management. The findings can serve as a valuable resource for project managers, engineers, consultants, and researchers, enabling more informed decision-making, more efficient project execution, and the development of innovative approaches in construction management.

Materials & Methods: This applied analytical research, designed with a descriptive–analytical approach, aims to examine the effects of integrating Building Information Modeling (BIM) and the Internet of Things (IoT) on cost optimization, reduction of material waste, and improvement of productivity in construction projects in Iran. The study employs a mixed-methods design, with data collected through documentary sources, field surveys, digital monitoring tools, and quantitative–qualitative analyses. The statistical population consisted of medium and large construction projects in Iran utilizing at least one of the technologies, BIM or IoT. Five real projects in Tabriz and Tehran were purposefully selected, from which data on scheduling, material consumption, execution errors, and IoT sensor information were gathered. Data collection followed four main procedures: field observations, extraction of BIM data, real-time IoT sensing, and conducting interviews and questionnaires with project managers and engineers. This combination enabled a precise assessment of the technologies' impact on project quality, efficiency, and cost. Quantitative data were analyzed using Excel and SPSS, focusing on indicators such as material waste, schedule deviations, actual project costs, rework rates, and energy consumption. Qualitative data obtained from semi-structured interviews were analyzed through thematic analysis, leading to categories such as design sustainability, user–space interaction, architectural innovation, and managerial impacts of digital technologies. To ensure validity, triangulation was applied by comparing quantitative data with field observations, technical documents, and expert insights. Findings revealed that BIM–IoT integration can reduce material waste by 12%, energy consumption by 16.7%, and execution costs by 15%. Improved team coordination, reduced rework, and enhanced spatial quality also emerged as major benefits.

Finally, a conceptual framework for smart project management was developed, incorporating three core components:

(1) BIM as a tool for simulation and design accuracy;

(2) IoT as a system for real-time monitoring of energy and material usage;

(3) The integrated BIM–IoT ecosystem as a basis for intelligent decision-making to enhance quality, optimize resources, and reduce costs in Iranian construction projects**.**

Findings: The findings of this study examine the impact of modern technologies such as BIM and IoT on the performance of architectural and construction projects in Iran. Both quantitative and qualitative results demonstrate that these technologies significantly influence four major dimensions: energy optimization, spatial quality, economic efficiency, and sustainable design. In terms of energy optimization, quantitative analysis revealed that the use of BIM and IoT reduced average energy consumption from 210 to 175 kWh/m², representing a 16.7% savings. Qualitative data further indicated that project managers attribute this improvement to enhanced performance of energy systems and reduced energy waste. These results highlight the strong predictive effect of smart technologies on energy management. Regarding spatial quality and user satisfaction, BIM-based projects reported a remarkable improvement, with satisfaction levels rising from 2.8 in traditional projects to 4.1 in smart projects on a five-point Likert scale. Interview insights show that collaborative design, 3D visualization, and interactive modeling through BIM played a critical role in enhancing users' spatial experiences and engagement. In the economic efficiency dimension, the adoption of digital technologies led to a reduction in rework costs from 120 million rials to 102 million rials, resulting in 15% savings. A significant positive correlation (r = 0.61) between BIM implementation and cost reduction suggests that resource management in smart projects is more precise and effective. These technologies therefore serve as predictive tools for budget planning and financial risk reduction. In terms of innovation and sustainability, the study found that modern technologies improved environmental sustainability indicators by 40%. These indicators include ventilation (12%), daylight performance (9%), water consumption reduction (7%), and construction waste reduction (12%). Qualitative findings further emphasize that BIM and IoT not only enhance sustainable design processes but also foster innovation in creating intelligent and environmentally adaptive spaces. Overall, the results indicate that integrating digital technologies into architectural projects in Iran can substantially reduce energy consumption, enhance spatial quality, lower operational costs, and improve sustainability performance. Statistical analyses such as t-tests, Pearson correlations, and confirmatory factor analysis validate these findings and confirm the predictive potential of these technologies in improving future project outcomes.

Conclusion: The main objective of this research is to examine the impact of modern technologies particularly Building Information Modeling (BIM) and the Internet of Things (IoT) on optimizing the design, execution, and management processes of architectural projects in Iran. The findings reveal that integrating these technologies significantly enhances project quality, reduces costs, improves managerial accuracy, and strengthens sustainability indicators. In the design phase, BIM enables the simulation of various scenarios, prediction of building performance, and precise resource planning. By providing detailed three-dimensional models and pre-construction analyses, BIM substantially reduces design errors. Meanwhile, IoT collects real-time data on building performance, energy consumption, ventilation, and heating/cooling systems, allowing intelligent automated management. The combination of both technologies leads to reduced energy consumption, controlled operation of mechanical systems, and minimized resource waste. Regarding spatial quality, the use of digital technologies improves user satisfaction with architectural spaces. Data gathered through IoT and analyzed within BIM enhances daylighting, natural ventilation, and spatial accessibility, reinforcing user-centered design. This results in improved spatial experience, fewer execution issues, and better alignment of design outcomes with real user needs. Economically, the integration of BIM and IoT reduces rework costs, design revisions, and on-site execution errors. Although initial implementation may be costly, long-term savings in energy, materials, and resource management ultimately compensate for the investment. More accurate estimation of materials and improved cost prediction also reduce financial risks during project delivery. From a sustainability perspective, the findings indicate that these technologies positively influence key environmental indicators such as natural ventilation, optimal daylighting, reduced construction waste, and lower water consumption. Field observations and expert reviews further validate the scientific and practical credibility of these results. In the limitations section, the study acknowledges methodological and practical challenges, including limited field samples, reliance on simulated data rather than real project data, insufficient advanced statistical analyses, lack of detailed modeling of costs and material usage, and the need for further refinement of the conceptual framework. Future studies are encouraged to utilize broader datasets, real project information, advanced analytical methods, and comprehensive cost modeling to develop an applicable framework for reducing material waste and improving construction management in real-world architectural projects in Iran.

Key words: construction project productivity, modern architecture, resource management, cost and time optimization.

This Journal is an open access Journal Licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License

(CC BY 4.0)