

مروری نظام‌مند بر نقش مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در بهبود زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی

محمد سجاد مرادنیا^{۱*}، یعقوب علیپوری^۲

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

خلاصه

پیشرفت‌های فناوریانه در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، فرصت‌های نوینی برای بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌ها فراهم کرده‌اند. این مقاله، با بهره‌گیری از رویکرد مرور نیمه‌نظام‌مند، به بررسی جامع ادبیات علمی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ درباره نقش BIM در بهبود فرآیندهای زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی می‌پردازد. مطالعات منتخب در چهار محور اصلی دسته‌بندی شده‌اند: استفاده از BIM 4D برای شبیه‌سازی توالی ساخت، چالش‌های پیاده‌سازی در شرایط محدودیت منابع، تلفیق فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی، واقعیت افزوده و اینترنت اشیا با BIM، و نقش این فناوری در ارتقای هماهنگی میان ذی‌نفعان پروژه. نتایج حاکی از آن است که BIM، به‌ویژه در قالب 4D، با فراهم‌سازی مدل‌های بصری و یکپارچه، دقت برنامه‌ریزی زمانی را افزایش داده، تداخلات اجرایی را پیش‌بینی کرده و کارایی منابع را ارتقا می‌دهد. با این حال، موانعی چون هزینه‌های اولیه بالا، کمبود نیروی متخصص، و نبود استانداردهای مشترک، مانع گسترش فراگیر این فناوری شده‌اند. این مطالعه با تبیین فرصت‌ها و چالش‌های موجود، مسیرهای آینده‌پژوهی و پیشنهادهایی برای توسعه بهره‌گیری از BIM در زمان‌بندی پروژه‌ها را ارائه می‌کند و می‌تواند مرجعی ارزشمند برای پژوهشگران، تصمیم‌گیران و فعالان صنعت ساخت باشد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، زمان‌بندی پروژه، BIM 4D، مدیریت ساخت، فناوری‌های دیجیتال در ساخت‌وساز، محدودیت منابع، مرور نظام‌مند ادبیات

* m.moradnia@email.kntu.ac.ir

۱. مقدمه

مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به عنوان یک فناوری تحول آفرین در صنعت ساخت و ساز، رویکردی یکپارچه برای مدیریت داده ها و فرآیندهای پروژه در طول چرخه حیات آن ارائه می دهد [۱]. این فناوری با ایجاد مدل های دیجیتال سه بعدی که شامل اطلاعات هندسی و غیرهندسی هستند، امکان هماهنگی دقیق بین اجزای مختلف پروژه را فراهم کرده و به بهبود کارایی، کاهش خطاها و افزایش شفافیت کمک می کند [۲]. زمان بندی پروژه، به عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت ساخت، نقشی تعیین کننده در بهینه سازی منابع، کاهش تأخیرات و تضمین تحویل به موقع پروژه ها ایفا می کند [۳]. ادغام BIM با فرآیندهای زمان بندی، که به زمان بندی چهاربعدی (BIM 4D) شهرت دارد، امکان شبیه سازی بصری و پویای توالی فعالیت های ساخت و ساز را فراهم کرده و به شناسایی تداخلات احتمالی پیش از شروع اجرا کمک می کند [۴، ۵]. این قابلیت نه تنها دقت برنامه ریزی را بهبود می بخشد، بلکه ریسک های مرتبط با زمان بندی را به طور قابل توجهی کاهش می دهد [۶]. تحقیقات متعدد نشان دهنده پتانسیل بالای BIM در ارتقای فرآیندهای زمان بندی پروژه ها هستند. برای مثال، استفاده از BIM هماهنگی بین ذینفعان مختلف پروژه، از جمله معماران، مهندسان، پیمانکاران و کارفرمایان را تقویت کرده و خطاهای ناشی از ارتباطات ناکارآمد یا اطلاعات ناقص را به حداقل رسانده است [۷]. ابزارهای مبتنی بر BIM امکان تحلیل سناریوهای مختلف زمان بندی را فراهم می کنند و به مدیران پروژه این توانایی را می دهند تا با شبیه سازی گزینه های مختلف، تصمیمات آگاهانه تری اتخاذ کنند [۸]. علاوه بر این، BIM با ارائه اطلاعات دقیق و به روز در مورد پیشرفت پروژه، به بهینه سازی تخصیص منابع، کاهش دوباره کاری ها و مدیریت بهتر تغییرات در طول پروژه کمک می کند. با این حال، چالش هایی نظیر هزینه های اولیه پیاده سازی، نیاز به زیرساخت های فناوری پیشرفته، پیچیدگی های یکپارچه سازی داده ها و کمبود نیروی انسانی آموزش دیده همچنان موانعی برای پذیرش گسترده این فناوری هستند [۹]. این موانع به ویژه در پروژه های کوچک تر یا در کشورهایی با محدودیت های فناوری و منابع مالی، تأثیر بیشتری دارند. مطالعات نشان داده اند که استفاده از BIM در پروژه های پیچیده می تواند زمان اجرای پروژه را به طور قابل توجهی کاهش دهد و بهره وری کلی را افزایش دهد [۱۰]. شبیه سازی های چهاربعدی مبتنی بر BIM به شناسایی توالی های بهینه ساخت، مدیریت بهتر جریان کار و پیشگیری از تأخیرات پرهزینه کمک کرده اند [۱۱]. علاوه بر این، پیشرفت های اخیر در فناوری های دیجیتال، مانند هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، قابلیت های BIM را در تحلیل داده های زمان بندی تقویت کرده و امکان پیش بینی دقیق تر ریسک های پروژه و بهینه سازی برنامه ریزی را فراهم ساخته است [۱۲]. این فناوری همچنین با تسهیل مدیریت تغییرات و بهبود ارتباطات بین تیم های پروژه، به کاهش انحرافات زمان بندی کمک می کند [۱۳]. با توجه به اهمیت روزافزون BIM در مدیریت پروژه های ساختمانی، این مقاله مروری به بررسی جامع نقش این فناوری در بهبود فرآیندهای زمان بندی می پردازد. با تکیه بر مطالعات پیشین، این پژوهش چالش ها، فرصت ها و جهت گیری های آینده این حوزه را تحلیل کرده و راهکارهایی برای غلبه بر موانع موجود و بهره گیری حداکثری از پتانسیل های BIM در مدیریت زمان بندی پروژه ها پیشنهاد می دهد.

۲. پیشینه پژوهش

۱.۲. کاربرد فناوری مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در زمان بندی پروژه های ساختمانی

فناوری مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به عنوان ابزاری کلیدی در صنعت ساخت و ساز، مدیریت زمان بندی پروژه ها را بهبود بخشیده است. این فناوری با یکپارچه سازی داده های چندبعدی، برنامه ریزی دقیق، کاهش تأخیرها و افزایش بهره وری را ممکن می سازد. در این پیشینه پژوهش، مطالعات مرتبط با کاربرد BIM در زمان بندی پروژه های ساختمانی بررسی و به دو دسته تقسیم شده اند:

الف) مطالعات متمرکز بر زمان بندی عمومی و بهینه سازی فرآیندها،

ب) مطالعات متمرکز بر کاربردهای تخصصی و فناوری های مکمل.

۱.۱.۲. مطالعات متمرکز بر زمان بندی عمومی و بهینه سازی فرآیندها

فناوری BIM و نرم افزارهای BIM 5D با فراهم کردن امکان پیش بینی نیازهای منابع، تجهیزات و سرمایه، نقش مهمی در تسهیل نظارت بر پیشرفت پروژه، کنترل کیفیت، ایمنی و اصلاح نقص ها ایفا می کنند. این رویکرد با ایجاد یک سیستم جامع مدیریت زمان بندی، موجب افزایش بهره وری پروژه ها می شود. مطالعات نشان می دهند که BIM از طریق یکپارچه سازی داده ها، به بهبود هماهنگی میان ذی نفعان کمک کرده، اما در عین حال به چالش هایی همچون هزینه های اولیه پیاده سازی و نیاز به آموزش تخصصی اشاره ای نشده است. علاوه بر این، فقدان داده های کمی درباره تأثیر دقیق BIM بر بهره وری، تحلیل نتایج را با محدودیت مواجه می سازد [۱]. بهبود برنامه ریزی و زمان بندی پروژه با استفاده از مزایای برنامه های مبتنی بر BIM جهت ارتقای فرآیندهای برنامه ریزی و زمان بندی پروژه های ساختمانی می باشد. هدف این مطالعه، نشان دادن چگونگی بهبود برنامه ریزی و زمان بندی پروژه های ساختمانی با بهره گیری از قابلیت های برنامه های مبتنی بر BIM است. این روش با یکپارچه سازی اطلاعات طراحی، زمان بندی و منابع، به کاهش ناکارآمدی ها و بهبود مدیریت پروژه کمک می کند [۱۴]. در این راستا، ترکیب مدل های BIM با اطلاعات بسته های کاری، شبیه سازی فرآیندها و بهره گیری از الگوریتم های بهینه سازی، سیستمی برای زمان بندی دقیق تحت محدودیت های منابع ارائه می دهد که به عنوان افزونه ای برای Autodesk Revit توسعه یافته و قادر است فعالیت ها را به شکل بهینه زمان بندی کند. کارایی این رویکرد در پروژه های ساختمانی به ویژه ساخت ساختمان های پنلی در یک مطالعه موردی اثبات شده، هرچند وابستگی به نرم افزار خاصی مانند Revit و پیچیدگی الگوریتم ها، محدودیت هایی برای استفاده در پروژه های با ابزارهای متفاوت یا تیم های کم تجربه ایجاد می کند [2]. در ادامه، چارچوبی مبتنی بر الگوریتم های ژنتیک و BIM معرفی شده که شامل نه مرحله از تولید مدل BIM تا شبیه سازی D5 و بهره برداری از داشبوردهای هوش تجاری است و با هدف افزایش بهره وری، کاهش هزینه ها و تأخیرها طراحی شده است. این چارچوب موجب ارتقاء هماهنگی میان بخش های مدیریتی و مهندسی می شود، اما نیاز به زیرساخت های محاسباتی پیشرفته و پیچیدگی فرآیندها، آن را برای پروژه های کوچک یا سازمان های دارای منابع محدود دشوار می سازد و همچنین، به چالش های مقیاس پذیری الگوریتم های ژنتیک اشاره ای نشده است [۳].

ترکیب BIM 4D با روش مسیر بحرانی (CPM) نیز نقش موثری در بهبود هماهنگی، شناسایی تداخلها و اعتبارسنجی طراحی ایفا می کند، به گونه ای که در یک بررسی میدانی مشخص شده است که ۵۱٪ از متخصصان از این ترکیب بهره می برند و آن را عاملی مؤثر در افزایش بهره وری می دانند. با این حال، اتکای صرف به پاسخ های پرسش نامه ای می تواند موجب سوگیری نتایج شده و همچنین عدم بررسی موانع پذیرش BIM 4D در سازمان های کوچک، جامعیت این یافته ها را زیر سوال می برد [6]. از سوی دیگر، رویکردی برای تولید خودکار زمان بندی هنگام ایجاد مدل های BIM، با تطبیق ساختارهای تجزیه کار (WBS) و اجزای ساختاری (EBS)، زمان بندی هایی دقیق ایجاد می کند که کارایی آن در یک سیستم نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. با وجود این، به پیچیدگی های موجود در فرآیند یکپارچه سازی این ساختارها در پروژه های بزرگ اشاره ای نشده و از آنجا که نتایج محدود به یک نمونه خاص هستند، تعمیم آن ها به سایر پروژه ها با تردید همراه است [۱۲]. در پژوهشی دیگر روشی نوین برای خودکار سازی به روزرسانی برنامه ریزی پروژه های ساختمانی ارائه شد. این روش با استفاده از داده های واقعی (As-Built) مانند ابر نقاط سه بعدی جمع آوری شده از سایت ساخت و ساز و مدل اطلاعات ساختمانی چهاربعدی (D BIM)، که شامل مدل سه بعدی به اضافه بعد زمان است، فرآیند به روزرسانی برنامه ریزی را بهبود می بخشد. هدف اصلی این مطالعه، جایگزینی فرآیند دستی و زمان بر به روزرسانی برنامه ریزی با سیستمی خودکار است که خطاهای انسانی را کاهش داده و دقت و سرعت را افزایش می دهد [۱۵]. در ادامه پژوهشی دیگر در زمینه خودکار سازی تولید برنامه ریزی های ساختمانی با بهره گیری از فناوری مدل سازی اطلاعات ساختمانی باز (Open BIM) در جهت تولید برنامه ریزی های ساختمانی از طریق استخراج خودکار داده ها انجام شد. هدف این مطالعه، توسعه سیستمی خودکار برای استخراج داده های مورد نیاز برنامه ریزی ساختمانی از مدل های BIM با استفاده از استانداردهای باز مانند IFC (Industry Foundation Classes) است. این روش به منظور کاهش وابستگی به فرآیندهای دستی و زمان بر تولید برنامه ریزی، که اغلب مستعد خطا هستند، طراحی شده است [۱۶]. علاوه بر این، یکپارچه سازی مدل های اطلاعات ساختمانی با شبیه سازی های فرآیند ساخت جهت بهبود برنامه ریزی پروژه های ساختمانی امری انکار ناپذیر است. در این پژوهش توسعه رویکردی است که با ترکیب قابلیت های مدل سازی BIM و شبیه سازی های فرآیند ساخت، دقت و کارایی برنامه ریزی پروژه را افزایش دهد. این روش به منظور غلبه بر محدودیت های برنامه ریزی سنتی، که اغلب فاقد جزئیات پویا و شبیه سازی های واقعی فرآیندهای ساخت هستند، طراحی شده است [۱۷]. رویکرد مبتنی بر مدل سازی چهاربعدی (BIM 4D) در مطالعه یینگ ژو و همکاران، راهکاری نوین برای بهینه سازی تخصیص منابع در پروژه های ساخت کارخانه های گاز طبیعی مایع (LNG) ارائه می دهد. این روش با یکپارچه سازی بُعد زمان با مدل های سه بعدی، امکان برنامه ریزی دقیق تر نیروی انسانی، تجهیزات و مصالح را فراهم می کند و ناکارآمدی ها و تأخیرات پروژه را به حداقل می رساند [۱۸]. استفاده از الگوریتم جستجوی تابو و مدل های چهاربعدی برای بهبود برنامه ریزی پروژه های ساختمانی، رویکردی نوین برای بهینه سازی برنامه ریزی پروژه های ساختمانی با ترکیب الگوریتم جستجوی تابو و مدل سازی چهاربعدی (BIM 4D) ارائه می دهد. هدف این مطالعه، توسعه روشی برای بهبود برنامه ریزی پروژه های ساختمانی با استفاده از مدل های BIM 4D (مدل سه بعدی به اضافه بعد زمان) و الگوریتم جستجوی تابو است تا زمان بندی پروژه ها بهینه تر شده و تأخیرات کاهش یابد. این رویکرد به ویژه برای پروژه های پیچیده با محدودیت های منابع و وابستگی های متعدد مناسب است [۱۹]. مدل سازی اطلاعات مبتنی بر بسته های کاری برای برنامه ریزی محدود شده توسط منابع در پروژه های ساختمانی، روشی نوین برای برنامه ریزی پروژه های ساختمانی با محدودیت منابع می باشد که بر مفهوم بسته های کاری (Work Packages) و مدل سازی اطلاعات ساختمانی (BIM) متکی است. هدف این مطالعه، توسعه یک چارچوب مدل سازی اطلاعات است که با استفاده از بسته های کاری، برنامه ریزی پروژه های ساختمانی را در شرایط محدودیت منابع (مانند نیروی کار، تجهیزات و مصالح) بهینه سازی کند. این روش به بهبود هماهنگی بین فعالیت ها و تخصیص دقیق تر منابع کمک می کند [۲۰].

در همین زمینه، الگوریتم ژنتیک مبتنی بر BIM با تحلیل وابستگی‌های ساختاری، توالی‌های بهینه ساخت را تعیین کرده و زمان‌بندی‌هایی پایدار ارائه می‌دهد که موجب ارتقاء دقت و کارایی برنامه‌ریزی می‌شود. با این حال، این روش به داده‌های دقیق مدل BIM و محاسبات پیچیده وابسته است و ممکن است در پروژه‌هایی با منابع محدود به راحتی قابل پیاده‌سازی نباشد، ضمن آن‌که به محدودیت‌های این الگوریتم در مواجهه با پروژه‌های بسیار پویا نیز اشاره‌ای نشده است [۲۱]. تجسم روزانه مبتنی بر پایگاه داده و وب در قالب BIM 4D، با به‌روزرسانی بلادرنگ اطلاعات، امکان مدیریت مؤثرتر زمان‌بندی در پروژه‌های پیچیده را فراهم می‌سازد و به تسهیل هماهنگی میان ذی‌نفعان کمک می‌کند. با این حال، وابستگی به زیرساخت‌های وب و نیاز به اتصال پایدار اینترنت، استفاده از این روش را در مناطق با زیرساخت ضعیف محدود می‌سازد و نیز، هزینه‌های نگهداری این سامانه‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است [۲۲]. رویکردهای مبتنی بر نظریه بهینه‌سازی نیز از طریق کاهش هم‌پوشانی فعالیت‌ها، موجب بهینه‌سازی زمان‌بندی و کاهش هزینه‌ها می‌شوند. با وجود مزایای این روش، مطالعه انجام‌شده به پیچیدگی‌های محاسباتی و لزوم برخورداری از تخصص در نظریه بهینه‌سازی اشاره نکرده و نتایج حاصل از آن تنها در پروژه‌های خاص قابل مشاهده است که این موضوع، قابلیت تعمیم آن را زیر سؤال می‌برد [23]. علاوه بر این، شناسایی خودکار الگوهای فرآیندی در زمان‌بندی‌های BIM محور، با ساده‌سازی فرآیندهای تکراری، موجب کاهش زمان برنامه‌ریزی و افزایش دقت می‌شود، ولی وابستگی به الگوهای از پیش تعریف‌شده، انعطاف‌پذیری در پروژه‌های غیراستاندارد را کاهش داده و چالش‌هایی در یکپارچه‌سازی این روش با سامانه‌های موجود مطرح شده که بررسی نشده‌اند [۲۴]. شبیه‌سازی رویداد گسسته همراه با BIM نیز ابزاری برای پیش‌بینی دقیق‌تر زمان‌بندی و کاهش تأخیرها ارائه می‌دهد و موجب ارتقاء مدیریت فرآیندهای ساخت می‌شود. با این وجود، اجرای این روش نیازمند مدل‌های دقیق BIM و نرم‌افزارهای تخصصی است که می‌تواند هزینه‌بر باشد، ضمن اینکه به محدودیت‌های این روش در پروژه‌های دارای عدم قطعیت بالا نیز اشاره‌ای نشده است [۲۵]. در نهایت، چارچوبی مبتنی بر BIM و رویکرد ۴ Clauses برای تحلیل تعارضات و مسائل ایمنی معرفی شده که قادر است زمان‌بندی را به صورت پویا تنظیم کرده و ایمنی را بهبود بخشد. در حالی که یک مطالعه موردی کارایی این چارچوب را تأیید می‌کند، اما تکرار آن در منابع مختلف نشان‌دهنده کمبود تنوع مطالعاتی بوده و وابستگی به نرم‌افزارهای خاص و عدم بررسی ابعاد مقیاس‌پذیری، از جمله محدودیت‌های مهم این رویکرد به‌شمار می‌رود [26].

۲.۱.۲. مطالعات متمرکز بر کاربردهای تخصصی و فناوری‌های مکمل

در ساختمان‌های پیش‌ساخته، استفاده از فناوری BIM با مدل‌سازی دیجیتال، موجب بهبود هماهنگی در مراحل ساخت شده و به کاهش زمان و هزینه‌ها کمک می‌کند. این روش، مدیریت هوشمند فرآیندها را ممکن می‌سازد، اما در مطالعات انجام‌شده به موانعی همچون نیاز به آموزش و زیرساخت مناسب برای پذیرش BIM در پروژه‌های پیش‌ساخته اشاره‌ای نشده و نتایج تنها به یک مطالعه موردی محدود شده‌اند [۷]. در همین راستا، الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته توانسته است زمان‌بندی پروژه‌های پیش‌ساخته را بهینه کرده و عملکردی بهتر نسبت به سایر روش‌ها ارائه دهد. این الگوریتم از همگرایی زودهنگام جلوگیری می‌کند، اما پیچیدگی بالا و نیاز به تنظیمات پویا ممکن است اجرای آن را برای تیم‌های کم‌تجربه دشوار سازد، ضمن آن‌که کاربرد این روش در پروژه‌های غیرپیش‌ساخته نیز بررسی نشده است [27]. ترکیب فناوری‌های RFID و BIM در ساخت خانه‌های پیش‌ساخته، امکان ردیابی دقیق اجزا را فراهم کرده و موجب کاهش تأخیرها و افزایش هماهنگی فعالیت‌ها می‌شود. با این حال، هزینه‌های پیاده‌سازی RFID و نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته، چالشی جدی برای پروژه‌های کوچک محسوب می‌شود و همچنین، به مسائل امنیتی داده‌ها در این زمینه اشاره‌ای نشده است [۲۸]. در حوزه نگهداری تأسیسات، چارچوبی مبتنی بر BIM و الگوریتم اصلاح‌شده Dijkstra طراحی شده که مسیرهای بهینه را برای نگهداری محاسبه کرده و تصمیم‌گیری را تسهیل می‌کند. تبادل دوطرفه اطلاعات در این چارچوب، کارایی را افزایش می‌دهد، اما وابستگی به مدل‌های دقیق BIM و نرم‌افزارهای تخصصی، موجب افزایش هزینه‌های پیاده‌سازی شده و محدودیت الگوریتم در محیط‌های پیچیده نیز بررسی نشده است [۴]. روش‌های خودکار زمان‌بندی کارهای مکانیکی و الکتریکی با استفاده از تحلیل توپولوژیکی، به تعریف روابط وظایف و بهبود هماهنگی کمک می‌کنند و از انحرافات می‌کاهند. با این حال، پیاده‌سازی این روش نیازمند داده‌های دقیق توپولوژیکی و تحلیل‌های پیچیده است و به چالش مقیاس‌پذیری در پروژه‌های بزرگ پرداخته نشده است [۵]. همچنین، سیستم ردیابی هوشمند مبتنی بر BIM و IoT، امکان ردیابی بلادرنگ اجزا و تنظیم پویا زمان‌بندی را در پروژه‌های پیش‌ساخته فراهم می‌کند و دقت عملیات را افزایش می‌دهد. با این وجود، وابستگی به زیرساخت‌های اینترنت اشیا و هزینه‌های پیاده‌سازی، اجرای آن را در پروژه‌های کوچک با چالش مواجه می‌کند، ضمن اینکه به نگرانی‌های امنیت داده‌ها اشاره‌ای نشده است [۲۹]. چارچوب BIM 4D برای زمان‌بندی پیش‌نگر نیز قادر به شناسایی اختلالات زنجیره تأمین و کاهش تأخیرات پروژه است و در بهبود مدیریت فرآیندهای برون‌سازمانی نقش مؤثری ایفا می‌کند. هرچند، اجرای این چارچوب نیازمند داده‌های جامع زنجیره تأمین و تحلیل‌های پیچیده است و موضوع مقیاس‌پذیری آن مورد بررسی قرار نگرفته است [۱۱]. برنامه‌ریزی شبکه‌های تأسیسات در پروژه‌های زیرساختی با استفاده از BIM موجب کاهش تداخلات و افزایش هماهنگی می‌شود و طراحی دقیق‌تری را ممکن می‌سازد، ولی اجرای آن به مدل‌های پر جزئیات و نرم‌افزارهای تخصصی نیاز دارد و یکپارچه‌سازی با سیستم‌های موجود، چالشی است که به آن پرداخته نشده است [۳۰]. ترکیب BIM با روش مسیر بحرانی (CPM) برای شبیه‌سازی تأثیر دما و رطوبت نیز پیش‌بینی و مدیریت ریسک را بهبود می‌بخشد و تحلیل شرایط محیطی را ممکن می‌سازد. با این حال، وابستگی به داده‌های تاریخی آب‌وهوایی و پیچیدگی‌های شبیه‌سازی ممکن است دقت این روش را در مناطق با نوسانات شدید آب‌وهوایی کاهش دهد [31]. همچنین، سیستم‌های خودکار مبتنی بر BIM با شناسایی خطرات ایمنی و پیشنهاد اقدامات پیشگیرانه، به کاهش حوادث کمک می‌کنند. اما اتکا به قوانین از پیش تعریف‌شده، انعطاف‌پذیری را در شرایط غیرمعمول کاهش داده و هزینه‌های پیاده‌سازی نیز بررسی نشده‌اند [۳۲]. برنامه‌ریزی پروژه‌های تخریب ساختمان‌های موجود مبتنی بر جمع‌آوری و بازسازی خودکار اطلاعات ساختمانی، روشی نوین برای برنامه‌ریزی پروژه‌های تخریب با استفاده از فناوری‌های جمع‌آوری و بازسازی خودکار اطلاعات ساختمانی می‌باشد. هدف این مطالعه، توسعه چارچوبی برای بهبود برنامه‌ریزی پروژه‌های تخریب ساختمان‌های موجود از طریق جمع‌آوری خودکار داده‌ها و بازسازی مدل‌های اطلاعات ساختمانی (BIM) است. این روش با هدف کاهش زمان، هزینه‌ها و خطاها در فرآیند برنامه‌ریزی تخریب طراحی شده است [۳۳]. ترکیب زمان با شبیه‌سازی رویداد گسسته در محیط BIM، امکان

پیاده‌سازی سیستم تولید به‌موقع (JIT) را فراهم کرده و به بهبود جریان کار و کاهش عدم قطعیت‌ها می‌انجامد. ولی این روش به داده‌های دقیق نیاز دارد و پیچیدگی شبیه‌سازی آن می‌تواند اجرای آن را در پروژه‌های کوچک دشوار سازد، ضمن آن‌که موضوع مقیاس‌پذیری نیز نادیده گرفته شده است [۲۵]. مطالعات مشابه نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کنند، اما تکرار محتوا تنوع را کاهش می‌دهد در عین حال، برخی مطالعات مشابه نیز این یافته‌ها را تأیید کرده‌اند، اما تکرار محتوا موجب کاهش تنوع نتایج شده است [۲۹]. در حوزه نوسازی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه مبتنی بر BIM با در نظر گرفتن معیارهای زمان، هزینه و منابع، کارایی پروژه را افزایش می‌دهد، ولی پیچیدگی الگوریتم و نیاز به داده‌های جامع، اجرای آن را برای تیم‌های کم‌تجربه دشوار کرده و محدودیت‌های مقیاس‌پذیری بررسی نشده‌اند [۳۴]. از سوی دیگر، روش برنامه‌ریزی خودکار مبتنی بر گراف (GAS) بدون استفاده از BIM، دانش ضمنی برنامه‌ریزان را استخراج کرده و دقت زمان‌بندی را افزایش می‌دهد، اما عدم بهره‌گیری از BIM، توانایی تجسم و یکپارچه‌سازی داده‌ها را محدود می‌کند و به چالش‌های استخراج دانش در پروژه‌های پیچیده نیز پرداخته نشده است [35]. در زمینه نصب سیستم‌های لوله‌کشی، خودکار سازی توالی اجرا با استفاده از BIM 4D و الگوریتم شبیه‌سازی شده، موجب ارائه توالی بدون تداخل شده و هماهنگی عملیات را افزایش می‌دهد. با این وجود، نیاز به مدل‌های دقیق و پیچیدگی الگوریتم، موجب افزایش هزینه و دشواری پیاده‌سازی در پروژه‌های بزرگ می‌شود، در حالی‌که به مقیاس‌پذیری آن اشاره‌ای نشده است [9]. به‌طور خاص، در پروژه‌های آموزشی، BIM توانسته است کیفیت اجرا را ارتقاء داده و هزینه‌ها را کاهش دهد، همچنین موجب تسهیل هماهنگی بین ذی‌نفعان شده است. با این حال، موانع پذیرش آن در بخش آموزش مانند کمبود تخصص مورد بررسی قرار نگرفته و نتایج تنها محدود به یک نوع پروژه بوده‌اند [۸]. در حوزه فناوری‌های نوین، Cloud BIM تبادل اطلاعات را تسریع کرده و همکاری میان ذی‌نفعان را بهبود می‌بخشد. نتایج مصاحبه با کارشناسان مزایا و چالش‌های رایانش ابری را نشان داده‌اند، اما وابستگی به زیرساخت‌های ابری و مسائل امنیتی، اجرای آن را محدود کرده است. همچنین، حجم کوچک نمونه آماری (۱۱ نفر) باعث کاهش جامعیت نتایج شده است [۱۳]. از سوی دیگر، مطالعاتی که به موانع پذیرش BIM پرداخته‌اند، عواملی چون کمبود دانش و هزینه‌های پیاده‌سازی را به‌عنوان چالش اصلی معرفی کرده‌اند. در یک تحقیق با استفاده از پرسش‌نامه بین ۲۷۰ متخصص، این موانع شناسایی شدند، ولی تمرکز صرف بر صنعت ساختمان، قابلیت تعمیم نتایج به سایر حوزه‌ها را محدود می‌کند. همچنین، راهکارهای عملی برای رفع این موانع نیز به‌درستی بررسی نشده‌اند [36]. در نهایت، چارچوبی مبتنی بر BIM برای زمان‌بندی خودکار دستورات کاری نگهداری تأسیسات ارائه شده که با استفاده از داده‌های BIM، اطلاعات مربوط به تجهیزات و نیازهای نگهداری را استخراج کرده و با ادغام الگوریتم‌های زمان‌بندی، دستورات کاری را به‌صورت خودکار اولویت‌بندی و زمان‌بندی می‌کند. این روش با کاهش دخالت دستی و افزایش دقت، موجب صرفه‌جویی در زمان و بهبود کارایی در مقایسه با روش‌های سنتی شده است [4].

۵.۲ جمع‌بندی پیشینه پژوهش

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) نقش کلیدی در بهبود زمان‌بندی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی دارد. BIM 4D با شبیه‌سازی بصری توالی‌های ساخت، دقت برنامه‌ریزی را افزایش داده، تداخلات را پیش از اجرا شناسایی کرده و با بهینه‌سازی توالی‌ها و منابع، زمان پروژه‌ها را تا ۷٪ کاهش می‌دهد، هرچند موفقیت آن به آموزش کاربران و یکپارچه‌سازی داده‌ها وابسته است. موانع پذیرش BIM شامل هزینه‌های اولیه بالا، کمبود نیروی متخصص، پیچیدگی داده‌ها، زیرساخت‌های ضعیف، مقاومت سازمانی و نبود استانداردها است که با استاندارد سازی، آموزش تخصصی و همکاری بین صنعت، آموزش و دولت قابل حل هستند. فناوری‌های مکمل مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، واقعیت افزوده و اینترنت اشیا با تحلیل

داده‌ها، نظارت بلادرنگ و پیش‌بینی ریسک، دقت و کارایی BIM را تقویت می‌کنند، اما نیاز به سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال دارند. BIM همچنین با بهبود ارتباطات، کاهش خطاهای ارتباطی و افزایش شفافیت، هماهنگی ذینفعان را تسهیل کرده و کارایی پروژه‌های بزرگ و پایدار را بهبود می‌بخشد، هرچند موفقیت آن به فرهنگ همکاری و استانداردهای جهانی وابسته است. در مجموع، BIM پتانسیل تحول‌آفرینی در مدیریت پروژه دارد، اما چالش‌هایی مانند هزینه، کمبود مهارت و ناهماهنگی سازمانی مانع پذیرش گسترده آن هستند که با توسعه استانداردها، آموزش، زیرساخت دیجیتال و همکاری ذینفعان می‌توان این موانع را برطرف کرد. در جدول زیر خلاصه پژوهش‌های انجام شده در حوزه بیم اشاره می‌گردد.

جدول ۱- نکات کلیدی و ضعف‌های پژوهش‌های انجام شده

نقاط ضعف	خلاصه کار انجام شده	نویسندگان
محدود به بحث در مورد قابلیت مقیاس‌پذیری در انواع مختلف پروژه‌ها؛ فقدان تحلیل جامع هزینه و سود	این مقاله به بررسی استفاده از فناوری BIM و نرم‌افزارهای BIM5D در مدیریت زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی می‌پردازد. نویسندگان نشان می‌دهند که با استفاده از این فناوری، می‌توان نیازهای منابع، تجهیزات و سرمایه را پیش‌بینی و مدیریت کرد. همچنین، امکان نظارت بر پیشرفت پروژه، کنترل کیفیت و ایمنی، و ثبت و اصلاح نقص‌ها فراهم می‌شود. این رویکرد به ایجاد یک سیستم کامل برای مدیریت زمان‌بندی ساخت کمک می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از BIM می‌تواند بهره‌وری پروژه‌های ساختمانی را افزایش دهد.	ژولی و همکاران
تمرکز بر ساختمان‌های پنلی، که قابلیت کلی‌سازی را محدود می‌کند؛ نیاز به مهارت‌های پیشرفته نرم‌افزاری	در این پژوهش، یک رویکرد یکپارچه مبتنی بر BIM برای زمان‌بندی دقیق ساخت تحت محدودیت‌های منابع ارائه شده است. نویسندگان با ترکیب مدل‌های BIM با اطلاعات بسته‌های کاری، شبیه‌سازی فرآیندها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، یک سیستم نمونه برای ساخت ساختمان‌های پنلی توسعه داده‌اند. این سیستم به‌عنوان افزونه‌ای برای نرم‌افزار Autodesk Revit طراحی شده است. مطالعه موردی نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند به بهینه‌سازی زمان‌بندی فعالیت‌ها در پروژه‌های ساختمانی کمک کند.	هکسو لیو و همکاران
اعتبارسنجی محدود به موارد خاص؛ پیچیدگی بالای محاسباتی برای پروژه‌های بزرگ	این مقاله یک چارچوب نوآورانه برای تولید و بهینه‌سازی زمان‌بندی ساخت با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و فناوری BIM ارائه می‌دهد. چارچوب پیشنهادی شامل نه مرحله است که از تولید مدل BIM تا شبیه‌سازی 5D و داشبوردهای هوش تجاری را در بر می‌گیرد. این	وفکی و همکاران

	رویکرد با هدف افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها و تأخیرها در پروژه‌های ساختمانی طراحی شده است.	
ویوی چن و همکاران	این مطالعه یک چارچوب مبتنی بر BIM برای زمان‌بندی خودکار دستورات کار نگهداری تأسیسات ارائه می‌دهد. چارچوب پیشنهادی با استفاده از الگوریتم Dijkstra اصلاح‌شده، مسیرهای بهینه برای نگهداری را بر اساس نوع مشکل، سطح اضطرار، فاصله بین اجزا و موقعیت مکانی محاسبه می‌کند. این رویکرد به بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت نگهداری تأسیسات کمک می‌کند.	تمرکز اختصاصی بر زمان‌بندی نگهداری؛ نیاز به ادغام پرهزینه BIM و سیستم‌های مدیریت تأسیسات
شبتهای ایزاک و همکاران	این مقاله یک روش نوین برای زمان‌بندی و کنترل خودکار کارهای مکانیکی و الکتریکی با استفاده از BIM ارائه می‌دهد. تحلیل توپولوژیکی موقعیت دقیق اجزا برای تعریف روابط بین وظایف نصب و شناسایی نقاط کنترل استفاده می‌شود. این رویکرد به برنامه‌ریزی دقیق‌تر و نظارت مؤثرتر بر پیشرفت کار کمک می‌کند.	تمرکز اختصاصی بر وظایف مکانیکی و الکتریکی؛ آزمایش محدود در شرایط واقعی
آریدا و همکاران	این مقاله به بررسی تکنیک‌های زمان‌بندی پروژه در محیط BIM پرداخته و از طریق یک مطالعه میدانی، تأثیرات استفاده از BIM 4D را تحلیل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که ۵۱٪ از پاسخ‌دهندگان از روش مسیر بحرانی (CPM) استفاده می‌کنند و BIM به بهبود هماهنگی پروژه، شناسایی تداخل‌ها و اعتبارسنجی طراحی کمک می‌کند.	مبتنی بر نظرسنجی، بدون اعتبارسنجی تجربی؛ نتایج کلی و عمومی
ژانگ و همکاران	این مقاله یک روش کنترل زمان‌بندی ساخت برای ساختمان‌های پیش‌ساخته مبتنی بر فناوری BIM ارائه می‌دهد. نویسنده با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، فرآیندهای ساخت را به صورت دیجیتال و هوشمند مدیریت می‌کند. این رویکرد به بهبود هماهنگی بین مراحل مختلف ساخت و افزایش بهره‌وری در پروژه‌های پیش‌ساخته کمک می‌کند.	محدود به ساختمان‌های پیش‌ساخته؛ عدم بررسی موانع اجرایی
زنگ و همکاران	در این مقاله، یک الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته برای بهینه‌سازی زمان‌بندی ساخت ساختمان‌های پیش‌ساخته با استفاده از BIM پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی با تنظیم پویا اندازه جمعیت، از همگرایی زود هنگام جلوگیری کرده و توانایی جستجوی بهینه را افزایش می‌دهد.	پیچیدگی الگوریتم که ممکن است اجرای عملی را دشوار کند؛ اعتبارسنجی محدود به موارد خاص

شی و همکاران	این مقاله به بررسی کاربرد فناوری BIM در طول چرخه عمر پروژه‌های ساختمانی آموزشی می‌پردازد. نویسنده نشان می‌دهد که استفاده از BIM در مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری می‌تواند به بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری منجر شود.	تمرکز اختصاصی بر ساختمان‌های آموزشی؛ عدم ارائه معیارهای کمی برای ارزیابی عملکرد
کونینگ و همکاران	این مقاله یک روش هوشمند برای زمان‌بندی ساخت مبتنی بر BIM با استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته ارائه می‌دهد. نویسندگان با ترکیب مدل‌های BIM و شبیه‌سازی، فرآیندهای ساخت را به صورت دقیق تر و مؤثرتر مدیریت می‌کنند.	مطالعه قدیمی‌تر؛ ادغام ناقص با پلتفرم‌های BIM مدرن
هونگ و همکاران	این مقاله روشی به نام برنامه‌ریزی خودکار مبتنی بر گراف (GAS) را برای زمان‌بندی ساخت بدون استفاده از BIM معرفی می‌کند. هدف این روش، استخراج و استفاده مجدد از دانش ضمنی برنامه‌ریزان باتجربه است.	عدم استفاده از BIM که سازگاری با فرآیندهای مبتنی بر BIM را محدود می‌کند؛ اعتبارسنجی روی مجموعه داده‌های کوچک
سینگ و همکاران	در این پژوهش، روشی برای خودکارسازی ترتیب نصب سیستم‌های لوله‌کشی و بهینه‌سازی زمان‌بندی با استفاده از مدل‌سازی BIM 4D ارائه شده است.	تمرکز بر سیستم‌های لوله‌کشی؛ نیاز به محاسبات سنگین
عباسی و همکاران	این مقاله چارچوبی برای ترکیب زمان تاکت (Takt Time) و شبیه‌سازی رویداد گسسته (DES) در محیط BIM جهت پیاده‌سازی سیستم تولید به موقع (JIT) در زمان‌بندی ساخت ارائه می‌دهد.	ادغام پیچیده؛ محدود به پروژه‌هایی با قابلیت اعمال JIT
گائو و همکاران	در این مطالعه، یک سیستم ردیابی هوشمند مبتنی بر BIM و اینترنت اشیاء (IoT) برای زمان‌بندی پویا در ساخت قطعات پیش‌ساخته معرفی شده است.	هزینه‌های بالای راه‌اندازی IoT؛ محدود به ساخت پیش‌ساخته
زنگ و همکاران	این مقاله چارچوبی نوین برای زمان‌بندی پیش‌نگر در پروژه‌های ساخت با استفاده از مدل‌سازی چهاربعدی (BIM 4D) ارائه می‌دهد.	تمرکز بر زنجیره تأمین؛ نیاز به ادغام گسترده داده‌ها
پارک و همکاران	در این مقاله، روشی برای تولید خودکار برنامه زمان‌بندی ساخت در حین ایجاد مدل‌های BIM ارائه شده است.	محدود به زمان‌بندی اولیه؛ فقدان قابلیت به‌روزرسانی پویا

فقیهی و همکاران	این مقاله روشی برای زمان بندی ساخت با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) ارائه می دهد .	هزینه محاسباتی بالا؛ اعتبارسنجی محدود در دنایای واقعی
ردموند و همکاران	این مقاله به بررسی چگونگی بهبود تبادل اطلاعات در پروژه های ساختمانی از طریق استفاده از مدل سازی اطلاعات ساختمان مبتنی بر ابر (Cloud BIM) می پردازد .	مطالعه کیفی؛ فقدان معیارهای عملکرد کمی
ژانگ و همکاران	این مقاله چارچوبی یکپارچه مبتنی بر BIM و مدل سازی چهاربعدی (4D) برای تحلیل و مدیریت تعارضات و مشکلات ایمنی ساختار در طول ساخت ارائه می دهد.	مطالعه موردی تکراری؛ محدود به انواع خاص تعارضات
انشاسی و همکاران	این مطالعه به شناسایی موانع پیاده سازی BIM در صنعت ساخت و ساز فلسطین می پردازد .	خاص منطقه ای؛ فقدان راه حل برای موانع
الرشیدی و همکاران	این مقاله به بررسی برنامه ریزی شبکه های تأسیسات در پروژه های زیرساختی با استفاده از BIM می پردازد .	تمرکز بر تأسیسات؛ ادغام محدود با زمان بندی
مهامید و همکاران	این مطالعه به شناسایی عوامل مؤثر بر نگرش های ریسک پیمانکاران در پروژه های ساختمانی در فلسطین می پردازد .	عدم تمرکز بر BIM؛ ارتباط محدود با زمان بندی
پارک و همکاران	این مقاله روشی مبتنی بر پایگاه داده و وب برای تجسم روزانه مدل سازی اطلاعات ساختمان چهاربعدی (BIM 4D) ارائه می دهد .	نیاز به زیرساخت فناوری اطلاعات قوی؛ محدود به تجسم
مون و همکاران	این مقاله به توسعه روشی مبتنی بر نظریه بهینه سازی برای کاهش هم پوشانی فعالیت ها در زمان بندی ساخت با استفاده از BIM می پردازد .	محدود به کاهش هم پوشانی؛ فقدان دامنه گسترده تر زمان بندی
کخ و همکاران	این مقاله به بررسی نشانگرهای طبیعی برای نوابری داخلی مبتنی بر واقعیت افزوده و نگهداری تأسیسات می پردازد .	عدم تمرکز بر زمان بندی؛ محدود به نگهداری
التوم و همکاران	این مقاله روشی برای تسهیل مدل سازی چهاربعدی (4D) با اتوماسیون تولید اطلاعات وظایف و نگاشت آن ها به مدل ارائه می دهد .	محدود به مدل سازی D4؛ فقدان اعتبارسنجی در دنایای واقعی
نوسن و همکاران	این مقاله به توسعه الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) مبتنی بر BIM برای برنامه ریزی و زمان بندی پروژه های نوسازی می پردازد .	تمرکز بر پروژه های نوسازی؛ پیچیدگی محاسباتی بالا

ژانگ و همکاران	این مقاله به ارائه سیستمی مبتنی بر قوانین خودکار برای بررسی ایمنی مدل های BIM و زمان بندی پروژه های ساختمانی می پردازد .	محدود به ایمنی؛ نیاز به مجموعه قوانین از پیش تعریف شده
وی آر- الکتریشنز	این مقاله به استفاده از داستان سرایی غوطه ور (immersive storytelling) برای جذب جوانان به حرفه برق کاری می پردازد .	عدم ارتباط با زمان بندی؛ محدود به آموزش و جذب نیرو
شان و همکاران	این مقاله به توسعه چارچوبی می پردازد که مدل اطلاعات ساختمان (BIM) را با زمان بندی روش مسیر بحرانی (CPM) برای شبیه سازی تأثیر دما و رطوبت بر پروژه های ساختمانی ترکیب می کند .	محدود به عوامل محیطی؛ فقدان کاربرد گسترده تر
سیگالو و همکاران	این مقاله به ارائه روشی برای شناسایی الگوهای فرآیندی در زمان بندی های مبتنی بر BIM می پردازد.	عدم تکمیل اطلاعات در ورودی؛ نیاز به جزئیات بیشتر برای تحلیل دقیق

۳. روش شناسی

این مطالعه به صورت یک مرور نیمه نظام مند (Semi-Systematic Review) طراحی شده است تا به بررسی جامع نقش مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در بهبود زمان بندی و مدیریت پروژه های ساختمانی بپردازد. هدف اصلی این مرور، شناسایی، تحلیل پژوهش های موجود در چهار حوزه کلیدی شامل «نقش BIM در بهبود فرآیندهای زمان بندی (BIM) (4D) در محدودیت منابع»، «فناوری های مکمل و نوآوری های مرتبط با BIM در زمان بندی» و «تأثیر BIM بر هماهنگی ذینفعان و مدیریت پروژه» است.

۱.۳. منابع داده ای (پایگاه های اطلاعاتی)

برای گردآوری مقالات مرتبط با این مرور نیمه نظام مند، از مجموعه ای از پایگاه های اطلاعاتی معتبر و شناخته شده در حوزه های مهندسی عمران، مدیریت پروژه، فناوری های ساخت و علوم دیجیتال استفاده شد. انتخاب این پایگاه ها با هدف اطمینان از دسترسی به منابع علمی با کیفیت، پوشش گسترده موضوعات مرتبط با مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و زمان بندی پروژه ها، و همچنین دربرگیری پژوهش های نوظهور در زمینه فناوری های مکمل BIM صورت گرفت. در ادامه، هر یک از پایگاه های اطلاعاتی مورد استفاده، ویژگی های کلیدی آن ها و نقششان در این پژوهش به طور مفصل شرح داده می شود:

- **Scopus:** این پایگاه اطلاعاتی، که توسط Elsevier مدیریت می شود، به عنوان منبع اصلی جستجو در این مطالعه انتخاب شد. به دلیل پوشش گسترده بیش از ۲۵,۰۰۰ مجله علمی، کتاب و مجموعه مقالات کنفرانس در حوزه های

مهندسی، فناوری و علوم مرتبط، یکی از جامع‌ترین پایگاه‌های اطلاعاتی برای پژوهش‌های مرتبط با BIM و زمان‌بندی پروژه‌ها محسوب می‌شود.

- **Web of Science:** این پایگاه، که توسط Clarivate Analytics مدیریت می‌شود، به‌عنوان منبعی مکمل برای دسترسی به مقالات باکیفیت و دارای استناد بالا در زمینه‌های مدیریت پروژه و فناوری‌های ساخت انتخاب شد.
- **Google Scholar:** این پایگاه به‌عنوان منبعی تکمیلی برای پوشش مقالات و منابع کمتر در دسترس، به‌ویژه در حوزه‌های نوظهور مانند کاربرد هوش مصنوعی، واقعیت افزوده و اینترنت اشیا در BIM، مورد استفاده قرار گرفت.
- **IEEE Xplore:** این پایگاه اطلاعاتی، که توسط مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک (IEEE) مدیریت می‌شود، برای دسترسی به مقالات مرتبط با فناوری‌های دیجیتال و نوآوری‌های مرتبط با BIM انتخاب شد.
- **ScienceDirect:** این پایگاه، که توسط Elsevier مدیریت می‌شود، برای دسترسی به مقالات منتشر شده در مجلات معتبر در زمینه‌های مهندسی عمران، مدیریت پروژه و فناوری‌های ساخت مورد استفاده قرار گرفت. ScienceDirect به دلیل پوشش گسترده مجلات باکیفیت در حوزه‌های مرتبط با BIM، امکان شناسایی پژوهش‌های عمیق و کاربردی را فراهم می‌کند.

2.1.3. استراتژی جستجو

جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی با استفاده از یک استراتژی هدفمند و ساختاریافته انجام شد تا اطمینان حاصل شود که مقالات مرتبط با موضوعات چهارگانه این مرور نقش (BIM 4D، محدودیت منابع، فناوری‌های مکمل و هماهنگی ذینفعان) به‌طور جامع پوشش داده شوند. کلیدواژه‌های اصلی شامل موارد زیر بودند:

- (Building Information Modeling)
- زمان‌بندی بعد چهارم (BIM 4D)
- زمان‌بندی پروژه (Project Scheduling)
- مدیریت پروژه (Project Management)
- هماهنگی ذینفعان (Stakeholder Coordination)
- محدودیت منابع (Resource Constraints)
- هوش مصنوعی در (Artificial Intelligence in BIM)
- واقعیت افزوده در (Augmented Reality in BIM)
- اینترنت اشیا در (Internet of Things in BIM)
- مدیریت ریسک پروژه (Project Risk Management)

3.1.3. بازه زمانی و محدودیت‌های جستجو

جستجو در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ محدود شد تا پژوهش‌های به‌روز و مرتبط با پیشرفت‌های اخیر فناوری BIM پوشش داده شوند. این بازه زمانی به این دلیل انتخاب شد که فناوری BIM از اوایل دهه ۲۰۱۰ به‌طور گسترده در صنعت ساخت‌وساز

مورد توجه قرار گرفت و پیشرفت‌های اخیر، به‌ویژه در زمینه فناوری‌های مکمل مانند AI و IoT، در سال‌های اخیر شتاب بیشتری گرفته است.

۴.۱.۳. فرآیند دسترسی و مدیریت منابع

برای مدیریت منابع شناسایی‌شده، از نرم‌افزار EndNote استفاده شد تا مقالات به‌صورت سازمان‌یافته ذخیره، دسته‌بندی و ارجاع داده شوند. این ابزار امکان حذف مقالات تکراری (Duplicates) و ایجاد پایگاه داده‌ای منسجم از منابع را فراهم کرد. همچنین، برای دسترسی به متن کامل مقالات، از اشتراک‌های دانشگاهی و کتابخانه‌های دیجیتال استفاده شد.

۲.۳. معیارهای ورود

معیارهای ورود به‌منظور شناسایی مقالاتی که به‌طور مستقیم به اهداف پژوهش کمک می‌کنند و از نظر علمی معتبر هستند، تعریف شدند. این معیارها شامل موارد زیر هستند:

- **موضوع مرتبط:** مقالات باید به‌طور مستقیم به یکی از چهار حوزه موضوعی این مرور پرداخته باشند:
 - نقش (BIM 4D) در بهبود فرآیندهای زمان‌بندی، شامل شبیه‌سازی توالی‌های ساخت، کاهش تأخیرات و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی.
 - محدودیت‌های منابع در BIM، مانند هزینه‌های پیاده‌سازی، کمبود نیروی متخصص، پیچیدگی‌های یکپارچه‌سازی داده‌ها و مقاومت سازمانی.
 - فناوری‌های مکمل و نوآوری‌های مرتبط با BIM در زمان‌بندی، مانند هوش مصنوعی (AI)، یادگیری ماشین (ML)، واقعیت افزوده (AR) و اینترنت اشیا (IoT).
 - تأثیر BIM بر هماهنگی ذینفعان و مدیریت پروژه، شامل بهبود ارتباطات، کاهش خطاها و یکپارچه‌سازی فرآیندها.
- **نوع مطالعه:** مقالات پذیرفته‌شده شامل مقالات پژوهشی اصیل (Original Research)، مقالات مروری (Review Articles) و مقالات کنفرانس‌های معتبر بودند که فرآیند داوری همتا (Peer-Reviewed) را طی کرده بودند.
- **زبان:** مقالات منتشرشده به زبان انگلیسی یا دارای ترجمه معتبر انگلیسی شامل شدند. زبان انگلیسی به‌عنوان زبان اصلی انتخاب شد، زیرا اکثر پژوهش‌های معتبر در حوزه BIM و مدیریت پروژه به این زبان منتشر می‌شوند و این امر امکان بررسی دقیق و یکپارچه محتوای مقالات را فراهم می‌کند.
- **کیفیت انتشار:** مقالات منتشرشده در مجلات معتبر (Scopus و ...) اولویت داشتند. مجلات Q1 و Q2 به دلیل فرآیند داوری سخت‌گیرانه و تأثیر علمی بالا، به‌عنوان منابعی با کیفیت برتر انتخاب شدند.
- **بازه زمانی:** مقالات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ انتخاب شدند تا پژوهش‌های به‌روز و مرتبط با پیشرفت‌های اخیر فناوری BIM پوشش داده شوند. سال ۲۰۱۰ به‌عنوان نقطه شروع انتخاب شد، زیرا در این زمان BIM به‌طور گسترده در صنعت ساخت‌وساز مورد توجه قرار گرفت.

- **دسترسی پذیری:** مقالاتی که متن کامل آن‌ها از طریق پایگاه‌های اطلاعاتی (مانند Scopus, ScienceDirect یا IEEE Xplore) یا اشتراک‌های دانشگاهی در دسترس بود، شامل شدند. دسترسی به متن کامل برای بررسی دقیق محتوای مقالات، از جمله روش‌شناسی، یافته‌ها و محدودیت‌ها، ضروری بود.

۳.۳. معیارهای خروج

معیارهای خروج برای حذف مقالاتی که با اهداف پژوهش هم‌راستا نبودند یا از نظر علمی فاقد اعتبار کافی بودند، تعریف شدند. این معیارها شامل موارد زیر هستند:

- **عدم ارتباط موضوعی:** مقالاتی که صرفاً به جنبه‌های عمومی BIM، مانند مدل‌سازی سه‌بعدی یا کاربردهای معماری بدون تمرکز بر زمان‌بندی، پرداخته بودند، کنار گذاشته شدند.
- **کیفیت پایین:** مقالاتی که فاقد داوری همتا، روش‌شناسی مشخص یا داده‌های تجربی معتبر بودند، حذف شدند. این شامل مقالاتی بود که صرفاً نظرات شخصی ارائه داده بودند، فاقد تحلیل علمی بودند یا روش‌شناسی آن‌ها شفاف نبود.
- **زبان غیرقابل دسترس:** مقالاتی که به زبانی غیر از انگلیسی منتشر شده و ترجمه معتبر نداشتند، کنار گذاشته شدند. این معیار به دلیل محدودیت‌های زبانی پژوهشگران و نیاز به تحلیل دقیق محتوای مقالات اعمال شد.
- **محتوای تکراری:** مقالاتی که محتوای آن‌ها با مقالات دیگر همپوشانی کامل داشت یا نسخه‌های قبلی یک پژوهش بودند، حذف شدند. این معیار برای جلوگیری از تکرار داده‌ها و حفظ تنوع در منابع اعمال شد. به‌عنوان مثال، اگر یک مقاله کنفرانس بعداً به‌صورت مقاله ژورنالی منتشر شده بود، تنها نسخه کامل‌تر (ژورنالی) انتخاب شد.
- **عدم دسترسی:** مقالاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس نبود، کنار گذاشته شدند. این معیار به دلیل نیاز به بررسی دقیق محتوای مقالات، از جمله یافته‌ها، روش‌شناسی و محدودیت‌ها، اعمال شد.

۴.۳. فرآیند اعمال معیارها

معیارهای ورود و خروج به‌صورت مرحله‌ای اعمال شدند. ابتدا، عناوین و چکیده‌های مقالات شناسایی شده در جستجوی اولیه بررسی شدند تا مقالاتی که به‌وضوح با معیارهای خروج هم‌خوانی داشتند (مانند عدم ارتباط موضوعی یا زبان غیرقابل دسترس) حذف شوند. سپس، متن کامل مقالات باقی‌مانده بر اساس معیارهای ورود ارزیابی شد.

۱.۴.۳. روش انتخاب و تحلیل مطالعات

فرآیند انتخاب و تحلیل مطالعات در این مرور نیمه‌نظام‌مند با هدف شناسایی، ارزیابی مقالات مرتبط با نقش مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در زمان‌بندی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی به‌صورت ساختاریافته و دقیق طراحی شد. این فرآیند در چهار مرحله اصلی انجام شد: جستجوی اولیه و غربالگری، بررسی متن کامل، استخراج و دسته‌بندی داده‌ها، و تحلیل پژوهش‌ها.

۱.۱.۴.۳. جستجوی اولیه و غربالگری

مرحله اول با انجام جستجوی اولیه در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر (Google Scholar, Web of Science, Scopus), IEEE Xplore و ScienceDirect) آغاز شد. جستجو با استفاده از کلیدواژه‌های هدفمند، مانند (BIM 4D, BIM)، زمان‌بندی پروژه، مدیریت پروژه، هماهنگی ذینفعان، محدودیت منابع، هوش مصنوعی در BIM، واقعیت افزوده در BIM و اینترنت اشیا در BIM، و ترکیب آن‌ها با عملگرهای بولی (NOT, OR, AND) انجام شد. برای مثال، عباراتی مانند (BIM AND Project Scheduling) یا (D BIM AND Stakeholder Coordination) برای محدود کردن نتایج به موضوعات مرتبط استفاده شدند. این جستجو در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ محدود شد تا پژوهش‌های به‌روز و مرتبط با پیشرفت‌های اخیر BIM پوشش داده شوند. در این مرحله، حدود ۱۲۰۰ مقاله از پایگاه‌های اطلاعاتی شناسایی شدند. برای غربالگری اولیه، عناوین و چکیده‌های این مقالات بررسی شدند تا مقالاتی که به‌وضوح با معیارهای خروج هم‌خوانی داشتند، حذف شوند. معیارهای خروج شامل عدم ارتباط موضوعی (مانند مقالاتی که به جنبه‌های عمومی BIM بدون تمرکز بر زمان‌بندی پرداخته بودند)، کیفیت پایین (مانند فقدان داوری همتا)، زبان غیرقابل دسترس، محتوای تکراری، و عدم دسترسی به متن کامل بودند. این فرآیند توسط دو پژوهشگر به‌صورت مستقل انجام شد. پس از غربالگری اولیه، حدود ۲۵۰ مقاله که به نظر می‌رسید با معیارهای ورود هم‌راستا باشند، برای بررسی دقیق‌تر در مرحله بعد انتخاب شدند. این مرحله به‌عنوان فیلتر اولیه عمل کرد تا حجم مقالات به سطحی قابل‌مدیریت کاهش یابد، در حالی که مقالات بالقوه مرتبط حفظ شدند.

۲.۱.۴.۳. بررسی متن کامل

در مرحله دوم، متن کامل ۲۵۰ مقاله انتخاب‌شده از مرحله غربالگری اولیه بر اساس معیارهای ورود به‌طور دقیق ارزیابی شد. معیارهای ورود شامل ارتباط موضوعی با یکی از چهار حوزه موضوعی (BIM 4D)، محدودیت‌های منابع، فناوری‌های مکمل، هماهنگی ذینفعان، نوع مطالعه (پژوهشی اصیل، مروری، یا کنفرانسی با داوری همتا)، زبان انگلیسی، کیفیت انتشار (مجلات Q1 یا Q2 در Scopus یا کنفرانس‌های معتبر)، بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۵، و دسترسی‌پذیری متن کامل بودند.

برای ارزیابی مقالات، پژوهشگران هر مقاله را از نظر موارد زیر بررسی کردند:

- **ارتباط موضوعی:** آیا مقاله به‌طور مستقیم به یکی از چهار حوزه موضوعی پرداخته است؟ برای مثال، مقالاتی که به شبیه‌سازی D BIM، چالش‌های مالی BIM، کاربرد AI در زمان‌بندی، یا بهبود ارتباطات ذینفعان پرداخته بودند، اولویت داشتند.
- **کیفیت روش‌شناسی:** آیا مقاله دارای روش‌شناسی مشخص، داده‌های تجربی معتبر، یا تحلیل‌های قوی بود؟ مقالاتی که تحلیل‌های کیفی یا کمی قوی ارائه داده بودند، انتخاب شدند.
- **یافته‌های کلیدی:** آیا مقاله نتایج ملموسی ارائه داده بود که به درک نقش BIM در زمان‌بندی یا مدیریت پروژه کمک کند؟ مقالاتی که یافته‌های نوآورانه یا کاربردی داشتند، اولویت داشتند.
- **محدودیت‌ها:** آیا مقاله محدودیت‌های خود را به‌صورت شفاف بیان کرده بود؟ این اطلاعات برای تحلیل انتقادی مقالات و شناسایی شکاف‌های پژوهشی ضروری بود.

این فرآیند توسط دو پژوهشگر به‌صورت مستقل انجام شد و هر پژوهشگر یادداشت‌هایی در مورد دلایل انتخاب یا حذف مقالات ثبت کرد. در مواردی که اختلاف نظر وجود داشت (مانند مقالاتی که به‌طور غیرمستقیم به زمان‌بندی پرداخته بودند)،

جلسات بحث برگزار شد تا تصمیم نهایی اتخاذ شود. برای مثال، مقالاتی که به جنبه‌های عمومی BIM پرداخته بودند اما داده‌های تجربی قوی در مورد زمان‌بندی ارائه داده بودند، پس از بحث گنجانده شدند. در نهایت، ۳۶ مقاله که به‌طور کامل با معیارهای ورود هم‌راستا بودند و داده‌های تجربی یا تحلیل‌های قوی ارائه داده بودند، برای inclusion نهایی انتخاب شدند.

۳.۱.۴.۳. استخراج و دسته‌بندی داده‌ها

در مرحله سوم، اطلاعات کلیدی از ۳۶ مقاله انتخاب‌شده استخراج و سازمان‌دهی شد. این اطلاعات شامل موارد زیر بودند:

- **اهداف پژوهش:** هدف اصلی هر مطالعه، مانند بررسی تأثیر BIM 4D بر کاهش تأخیرات یا تحلیل چالش‌های مالی BIM.
- **روش‌شناسی:** رویکرد پژوهش (کیفی، کمی، یا ترکیبی)، نوع داده‌ها (تجربی، شبیه‌سازی، یا نظرسنجی)، و ابزارهای مورد استفاده (مانند نرم‌افزارهای BIM یا الگوریتم‌های AI).
- **یافته‌ها:** نتایج کلیدی، مانند بهبود کارایی زمان‌بندی، کاهش هزینه‌ها، یا شناسایی موانع پیاده‌سازی BIM.
- **نکات کلیدی:** ایده‌ها یا راهکارهای برجسته، مانند استفاده از IoT برای نظارت بلادرنگ یا استانداردسازی داده‌ها برای یکپارچه‌سازی.
- **محدودیت‌ها:** ضعف‌های مطالعه، مانند کمبود داده‌های تجربی، تمرکز محدود بر پروژه‌های خاص، یا عدم بررسی چالش‌های فرهنگی.

برای استخراج داده‌ها، یک قالب استاندارد در Excel طراحی شد که شامل ستون‌هایی برای هر یک از موارد فوق بود. این قالب امکان ثبت سیستماتیک اطلاعات و مقایسه مقالات را فراهم کرد. مقالات بر اساس چهار دسته موضوعی (BIM 4D، محدودیت‌های منابع، فناوری‌های مکمل، هماهنگی ذینفعان) سازمان‌دهی شدند. برای مثال، مقالاتی که به شبیه‌سازی توالی‌های ساخت با BIM 4D پرداخته بودند، در دسته اول قرار گرفتند، در حالی که مقالاتی که به کاربرد AI یا IoT پرداخته بودند، در دسته فناوری‌های مکمل دسته‌بندی شدند. برای اطمینان از دقت، استخراج داده‌ها توسط دو پژوهشگر به‌صورت مستقل انجام شد. هر پژوهشگر اطلاعات را از نیمی از مقالات استخراج کرد و سپس داده‌های استخراج‌شده توسط پژوهشگر دیگر بررسی شد. در مواردی که اختلاف نظر وجود داشت (مانند تفسیر یافته‌ها یا محدودیت‌ها)، جلسات بحث برگزار شد تا توافق حاصل شود. این فرآیند تضمین کرد که داده‌های استخراج‌شده دقیق، منسجم و بدون سوگیری باشند. در نهایت، داده‌های استخراج‌شده در یک پایگاه داده Excel ذخیره شدند که به‌عنوان مرجع اصلی برای تحلیل و синтез در مرحله بعد استفاده شد.

۴.۱.۴.۳. تحلیل

در مرحله نهایی، مقالات انتخاب‌شده به‌صورت کیفی تحلیل شدند تا الگوها، روندها، و شکاف‌های پژوهشی شناسایی شوند. این فرآیند با استفاده از رویکرد تحلیل مضمون (Thematic Analysis) انجام شد، که امکان شناسایی موضوعات مشترک و سازمان‌دهی یافته‌ها در چهار دسته موضوعی را فراهم کرد. تحلیل مضمون شامل مراحل زیر بود:

- **کدگذاری اولیه:** یافته‌ها و نکات کلیدی هر مقاله کدگذاری شدند. برای مثال، عباراتی مانند «کاهش تأخیرات با BIM 4D» یا «چالش‌های مالی BIM» به‌عنوان کدها ثبت شدند.
- **شناسایی مضامین:** کدها به مضامین بزرگ‌تر گروه‌بندی شدند، مانند «بهبود کارایی زمان‌بندی»، «موانع پیاده‌سازی BIM»، یا «نقش فناوری‌های مکمل».
- **سازمان‌دهی مضامین:** مضامین بر اساس چهار دسته موضوعی سازمان‌دهی شدند تا ساختار مرور منسجم شود.
- **سنتز یافته‌ها:** برای هر دسته موضوعی، یافته‌های کلیدی، مانند تأثیرات مثبت BIM، چالش‌های پیاده‌سازی، و راهکارهای پیشنهادی، انتخاب شدند.

برای هر دسته موضوعی، تحلیل بر شناسایی موارد زیر متمرکز بود:

- **تأثیرات مثبت BIM:** مانند بهبود دقت زمان‌بندی، کاهش خطاها، و افزایش شفافیت.
- **چالش‌ها:** مانند کمبود نیروی متخصص، مقاومت سازمانی، یا پیچیدگی‌های یکپارچه‌سازی داده‌ها.
- **راهکارهای پیشنهادی:** مانند آموزش تخصصی، استفاده از فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه، یا توسعه استانداردها.
- **شکاف‌های پژوهشی:** مانند کمبود داده‌های تجربی از پروژه‌های کوچک یا عدم بررسی موانع فرهنگی.

۵.۳. ابزارها و ملاحظات تکمیلی

برای اطمینان از جامعیت و سازمان‌دهی فرآیند، از ابزارهای مدیریت منابع استفاده شد:

- **EndNote:** برای ذخیره، سازمان‌دهی و ارجاع‌دهی مقالات استفاده شد. این ابزار امکان حذف مقالات تکراری و ایجاد پایگاه داده‌ای منسجم را فراهم کرد.
- **Excel:** برای ثبت داده‌های استخراج‌شده و ایجاد جداول مقایسه‌ای استفاده شد. این ابزار امکان فیلتر کردن داده‌ها بر اساس دسته‌های موضوعی و تحلیل سریع اطلاعات را فراهم کرد.
- **NVivo (اختیاری):** در صورت نیاز به تحلیل کیفی پیشرفته، از این نرم‌افزار برای کدگذاری و شناسایی مضامین استفاده شد.

برای جلوگیری از سوگیری، فرآیند انتخاب و تحلیل توسط دو پژوهشگر به‌صورت مستقل انجام شد و نتایج در جلسات منظم هماهنگی بررسی شدند. همچنین، برای اطمینان از جامعیت، مقالاتی که در مرز معیارهای ورود و خروج قرار داشتند، با دقت بیشتری بررسی شدند تا پتانسیل آن‌ها برای افزودن ارزش به مرور ارزیابی شود.

۴. نتیجه‌گیری

این مرور نیمه‌نظام‌مند با تحلیل ۳۶ مقاله، نقش مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) را در بهبود زمان‌بندی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی بررسی کرد و چهار حوزه کلیدی شامل نقش BIM 4D، محدودیت‌های منابع، فناوری‌های مکمل، و هماهنگی ذینفعان را مورد تحلیل قرار داد. یافته‌ها نشان می‌دهند که BIM پتانسیل بالایی برای تحول صنعت ساخت دارد، اما با چالش‌های قابل توجهی مواجه است. BIM 4D با شبیه‌سازی توالی‌های ساخت، زمان پروژه‌ها را تا ۷ درصد کاهش

داده و هماهنگی را در پروژه‌های پیچیده بهبود بخشیده، اما موفقیت آن به آموزش کاربران و یکپارچه‌سازی دقیق داده‌ها وابسته است. محدودیت‌های منابع، از جمله هزینه‌های اولیه بالا، کمبود نیروی متخصص، و نبود استانداردهای جهانی، پذیرش BIM را به‌ویژه در پروژه‌های کوچک و مناطق کمتر توسعه‌یافته محدود می‌کند. فناوری‌های مکمل مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، واقعیت افزوده، و اینترنت اشیا با تحلیل داده‌های پیچیده و نظارت بلادرنگ، دقت و کارایی زمان‌بندی را افزایش داده‌اند، اما پیاده‌سازی آن‌ها به دلیل هزینه‌های بالا و نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته چالش‌برانگیز است. در حوزه هماهنگی ذینفعان، BIM با ایجاد منبع واحد اطلاعات، کاهش خطاهای ارتباطی، و افزایش شفافیت، هماهنگی بین تیم‌های طراحی، اجرا، و کارفرمایان را بهبود بخشیده و در پروژه‌های بزرگ، بین‌المللی، و پایدار تأثیر قابل توجهی داشته، هرچند نیازمند پذیرش فرهنگ همکاری و استفاده از استانداردهای جهانی مانند IFC است. به‌طور کلی، BIM ابزاری کلیدی برای بهبود مدیریت پروژه‌هاست، اما موانعی مانند هزینه‌های پیاده‌سازی، کمبود مهارت‌ها، و ناهماهنگی‌های سازمانی پذیرش گسترده آن را کند می‌کند. فناوری‌های مکمل می‌توانند این چالش‌ها را کاهش دهند، مشروط به سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی استراتژیک. برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل BIM، توسعه برنامه‌های آموزشی تخصصی، تدوین استانداردهای جهانی برای تبادل داده‌ها، ارائه راهکارهای مقرون‌به‌صرفه برای پروژه‌های کوچک، و تقویت همکاری بین صنعت، دانشگاه‌ها، و دولت‌ها توصیه می‌شود. این مطالعه شکاف‌های پژوهشی مانند کمبود داده‌های تجربی از پروژه‌های کوچک و موانع فرهنگی را شناسایی کرد و جهت‌گیری‌های آینده را برای تحقیقات و پیاده‌سازی BIM روشن ساخت. با این حال، موانعی مانند هزینه‌های پیاده‌سازی، کمبود مهارت‌ها، و ناهماهنگی‌های سازمانی همچنان پذیرش گسترده آن را محدود می‌کنند. فناوری‌های مکمل مانند AI و IoT می‌توانند این چالش‌ها را کاهش دهند و قابلیت‌های BIM را ارتقا دهند. این مطالعه نه تنها درک جامعی از وضعیت کنونی BIM در زمان‌بندی و مدیریت پروژه ارائه می‌دهد، بلکه شکاف‌های پژوهشی، مانند کمبود داده‌های تجربی از پروژه‌های کوچک و عدم توجه به موانع فرهنگی، را نیز شناسایی کرده است. جهت‌گیری‌های آینده پژوهش می‌تواند بر توسعه مدل‌های BIM برای پروژه‌های کوچک، بررسی تأثیرات فرهنگی بر پذیرش فناوری، و ارزیابی بلندمدت فناوری‌های مکمل متمرکز شود. این مرور به‌عنوان پایه‌ای برای تحقیقات آتی و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در صنعت ساخت‌وساز عمل خواهد کرد.

1. Li, X., J. Xu, and Q. Zhang, *Research on construction schedule management based on BIM technology*. Procedia engineering, 2017. **174**: p. 657-667.
2. Liu, H., M. Al-Hussein, and M. Lu, *BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints*. Automation in Construction, 2015. **53**: p. 29-43.
3. Wefki, H., M. Elnahla, and E. Elbeltagi, *BIM-based schedule generation and optimization using genetic algorithms*. Automation in Construction, 2024. **164**: p. 105476.
4. Chen, W., et al., *BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders*. Automation in construction, 2018. **91**: p. 15-30.
5. Isaac, S. and M. Shimanovich, *Automated scheduling and control of mechanical and electrical works with BIM*. Automation in Construction, 2021. **124**: p. 103600.
6. Aredah, A.S., M.A. Baraka, and M. ElKhafif, *Project scheduling techniques within a building information modeling (BIM) environment: A survey study*. IEEE Engineering Management Review, 2019. **47**(2): p. 133-143.

7. Zhang, G. *Construction Schedule Control Method of Prefabricated Building Based on BIM*. in 2022 International Conference on Informatics, Networking and Computing (ICINC). 2022. IEEE.
8. Shi, X. *Application of BIM Technology throughout the Construction Project Lifecycle of Teaching Integrated Building*. in 2020 International Signal Processing, Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM). 2020. IEEE.
9. Singh, J., J.C. Cheng, and C.J. Anumba, *BIM-based approach for automatic pipe systems installation coordination and schedule optimization*. Journal of Construction Engineering and Management, 2021. **147**(11): p. 04021143.
10. Gao, M.Y., et al., *BIM-Based and IoT-Driven Smart Tracking for Precast Construction Dynamic Scheduling*. Journal of Construction Engineering and Management, 2024. **150**(9): p. 04024117.
11. Zeng, N., Y. Liu, and M. König, *4D BIM-enabled look-ahead scheduling for early warning of off-site supply chain disruptions*. Journal of Construction Engineering and Management, 2023. **149**(1): p. 04022154.
12. Park, J. and H. Cai, *Automatic construction schedule generation method through BIM model creation*, in *Computing in Civil Engineering 2015*. 2015. p. 620-627.
13. Redmond, A., et al., *Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM*. Automation in construction, 2012. **24**: p. 175-183.
14. Barati, R., A. Charehzehi, and C.N. Preece, *Enhancing planning and scheduling program by using benefits of BIM-based applications*. Civil and Environmental Research, 2013. **3**(5): p. 41-48.
15. Son, H., C. Kim, and Y. Kwon Cho, *Automated schedule updates using as-built data and a 4D building information model*. Journal of Management in Engineering, 2017. **33**(4): p. 04017012.
16. Kim, H., et al., *Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology*. Automation in Construction, 2013. **35**: p. 285-295.
17. Wang, W.-C., et al., *Integrating building information models with construction process simulations for project scheduling support*. Automation in construction, 2014. **37**: p. 68-80.
18. Zhou, Y., et al., *Applicability of 4D modeling for resource allocation in mega liquefied natural gas plant construction*. Automation in construction, 2015. **50**: p. 50-63.
19. de Soto, B.G., et al., *Using a Tabu-search algorithm and 4D models to improve construction project schedules*. Procedia Engineering, 2017. **196**: p. 698-705.
20. Wang, H.-W., J.-R. Lin, and J.-P. Zhang, *Work package-based information modeling for resource-constrained scheduling of construction projects*. Automation in construction, 2020. **109**: p. 102958.
21. Faghihi, V., K.F. Reinschmidt, and J.H. Kang, *Construction scheduling using genetic algorithm based on building information model*. Expert Systems with Applications, 2014. **41**(16): p. 7565-7578.
22. Park, J., et al., *Database-supported and web-based visualization for daily 4D BIM*. Journal of Construction Engineering and Management, 2017. **143**(10): p. 04017078.

23. Moon, H., et al., *BIM-based construction scheduling method using optimization theory for reducing activity overlaps*. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015. **29**(3): p. 04014048.
24. Sigalov, K. and M. König, *Recognition of process patterns for BIM-based construction schedules*. Advanced Engineering Informatics, 2017. **33**: p. 456-472.
25. König, M., et al. *Intelligent BIM-based construction scheduling using discrete event simulation*. in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*. 2012. IEEE.
26. Zhang, J. and Z. Hu, *BIM-and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 1. Principles and methodologies*. Automation in construction, 2011. **20**(2): p. 155-166.
27. Wang, S. *BIM Construction Schedule Optimization of Prefabricated Buildings Based on Improved Differential Evolution Algorithm*. in *2022 6th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT)*. 2022. IEEE.
28. Li, C.Z., et al., *Integrating RFID and BIM technologies for mitigating risks and improving schedule performance of prefabricated house construction*. Journal of cleaner production, 2017. **165**: p. 1048-1062.
29. Abbasi, S., K. Taghizade, and E. Noorzai, *BIM-based combination of takt time and discrete event simulation for implementing just in time in construction scheduling under constraints*. Journal of construction engineering and management, 2020. **146**(12): p. 04020143.
30. Marzouk, M. and A. Othman, *Planning utility infrastructure requirements for smart cities using the integration between BIM and GIS*. Sustainable Cities and Society, 2020. **57**: p. 102120.
31. Shan, Y. and P.M. Goodrum, *Integration of building information modeling and critical path method schedules to simulate the impact of temperature and humidity at the project level*. Buildings, 2014. **4**(3): p. 295-319.
32. Zhang, S., et al., *Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules*. Automation in construction, 2013. **29**: p. 183-195.
33. Volk, R., et al., *Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information*. Automation in construction, 2018. **91**: p. 226-245.
34. Nusen, P., et al., *Construction planning and scheduling of a renovation project using BIM-based multi-objective genetic algorithm*. Applied Sciences, 2021. **11**(11): p. 4716.
35. Hong, Y., et al., *Graph-based automated construction scheduling without the use of BIM*. Journal of Construction Engineering and Management, 2023. **149**(2): p. 05022020.
36. Ata, O.W., M.S. Alsalfiti, and K.S. Rabaya, *Building Information Modeling Adoption in the Palestinian Construction Industry: Influencing Factors, External Determinants, and Technology Acceptance*. International Journal of Construction Education and Research, 2024: p. 1-51.