Civil and Project Journal, 2024, 6(11), 11-42
https://doi.org/10.22034/cpj.2024.490357.1328

**Civil and Project Journal**
http://www.cpjournals.com/

*Research Article*

# Integrating Building Information Modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) Technologies to Improve the Planning and Control Process of Construction Projects

**Mehran Makhsusy[1]*, Aliasghar Amirkardoust[2], Davoud Sedaghat Shaygan[3]**

1*-*Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, RO.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran.*

2-*Faculty Member, Department of Civil Engineering, RO.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran*

3-Department of Civil Engineering, RO.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran

Received: 26 October 2024; Revised: 29 November 2024; Accepted: 02 December 2024; Published: 02 December 2024

## Abstract

*This research deals with the feasibility of integrating building information modeling (BIM) and artificial intelligence (AI) technologies to improve construction project planning and control processes. Examining successful construction projects shows that it is necessary to modify traditional planning methods; Because by using newer technologies such as BIM and AI, it is possible to reduce planning errors and thus affect project success. This research analyzes the advantages and different potentials of BIM and AI integration compared to traditional methods, discusses some useful BIM and AI tools for planning, and explains the possibility of their integration; Finally, the challenges of implementing these tools and suggestions for overcoming obstacles and future development are discussed. The result is that using BIM and AI integration tools can bring countless benefits (such as speeding up planning, more accurate forecasts, optimizing resources, and reducing risk) to the planning process. However, studies are still needed to facilitate the use of these technologies through adaptation, development of standard approaches, and education of construction industry stakeholders.*

**Keywords:** *Building Information Modelling (BIM); Artificial Intelligence (AI); Construction Management; Project Planning Process; Technology Integration.*

**Cite this article as:** Makhsusy,M. , Amirkardoust,A. and Sedaghat Shayegan,D. (2025). Integrating Building Information Modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) Technologies to Improve the Planning and Control Process of Construction Projects. (e210547). Civil and Project, 6(11), e210547. https://doi.org/10.22034/cpj.2024.490357.1328

**ISSN:** 2676-511X / **Copyright:** © 2024 by the authors.

**Open Access:** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

**Journal's Note:** CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address*: m.makhsusy@iau.ac.ir*

نشریه عمران و پروژه، ۱۴۰۳، ۶(۱۱)، ۱۱-۴۲
https://doi.org/10.22034/cpj.2024.490357.1328

**نشریه عمران و پروژه**
http://www.cpjournals.com/

# یکپارچه‌سازی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و هوش مصنوعی به‌منظور بهبود فرایند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌های ساختمانی

**مهران مخصوصی[1*]، علی‌اصغر امیرکاردوست[2]، داود صداقت‌شایگان[3]**

*۱-دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران.
۲-عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران.
۳-گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۰۵ آبان ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۹ آذر ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۲ آذر ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۲ آذر ۱۴۰۳

## چکیده:

*این پژوهش به امکان‌سنجی یکپارچه‌سازی فناوری‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و هوش مصنوعی (AI) به‌منظور بهبود فرایندهای برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌های ساختمانی می‌پردازد. بررسی پروژه‌های ساختمانی موفق نشان می‌دهد که اصلاح روش‌های سنتی برنامه‌ریزی ضروری است؛ زیرا با استفاده از فناوری‌های نوین مانند BIM و AI می‌توان احتمال بروز خطا در برنامه‌ریزی را کاهش داد و بر موفقیت پروژه‌ها تأثیر مثبت گذاشت. این پژوهش مزایا و پتانسیل‌های مختلف یکپارچه‌سازی BIM و AI را در مقایسه با روش‌های سنتی تحلیل کرده، برخی از ابزارهای مفید BIM و AI را برای برنامه‌ریزی موردبحث قرار داده و امکان یکپارچه‌سازی آن‌ها را توضیح می‌دهد؛ درنهایت چالش‌های پیاده‌سازی این ابزارها و پیشنهادهایی برای غلبه بر موانع و توسعه آینده موردبحث قرار می‌گیرد. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ابزارهای یکپارچه‌سازی BIM و AI می‌تواند مزایای بی‌شماری مانند تسریع در برنامه‌ریزی، پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، بهینه‌سازی منابع و کاهش ریسک را برای فرایند برنامه‌ریزی به ارمغان آورد. بااین‌حال، همچنان مطالعات بیشتری در زمینه تسهیل استفاده از این فناوری‌ها از طریق سازگاری، توسعه رویکردهای استاندارد و آموزش ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز موردنیاز است.*

**کلمات کلیدی:**

**مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، هوش مصنوعی، مدیریت ساخت، فرایند برنامه‌ریزی پروژه، یکپارچه‌سازی فناوری.**

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: *m.makhsusy@iau.ac.ir*

## ۱- مقدمه

در دنیای ساخت‌وساز امروزی، نیاز به برنامه‌ریزی کارآمدتر پروژه‌ها به طور فزاینده‌ای احساس می‌شود. تأخیرات زمانی، در کنار کمبود بودجه و منابع، ازجمله رایج‌ترین چالش‌های پروژه‌های ساختمانی هستند که می‌توانند منجر به زیان‌های مالی، کاهش بهره‌وری و درنتیجه نارضایتی سرمایه‌گذاران شوند. این پیامدها اهمیت بهبود و بهینه‌سازی فرایند برنامه‌ریزی را نمایان‌تر می‌سازند. دستیابی به این هدف می‌تواند با استفاده از رویکردها و ابزارهای نوآورانه‌ای مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و هوش مصنوعی (AI) محقق شود.

هوش مصنوعی[1] (AI) متعلق به شاخه‌ای از علوم کامپیوتری است که با توسعه سیستم‌ها و تکنیک‌های مختلف، رایانه‌ها را قادر می‌سازد تا کارهایی را انجام دهند که به طور سنتی به هوش انسانی نیاز دارند (Russell & Norvig, 2016). هوش مصنوعی در زمینه ساخت‌وساز نیز مجموعه‌ای از نوآوری‌ها و فرصت‌ها را برای بهبود فرایندهای برنامه‌ریزی، طراحی، اجرا، مدیریت و بهره‌برداری فراهم می‌سازد. یکی از کاربردهای کلیدی AI در ساخت‌وساز، بهبود مدل BIM از طریق افزودن توابع پیشرفته است. در این پژوهش یکپارچه‌سازی این دو فناوری با جزئیات بیشتری بررسی می‌شود.

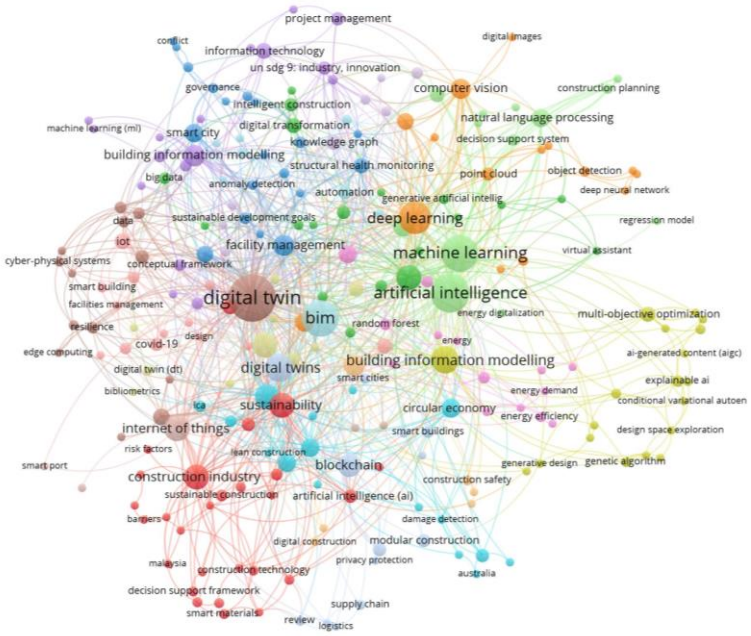
مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[2] (BIM) رویکردی انقلابی در طراحی، ساخت و مدیریت پروژه است که امکان تهیه مدل‌های دیجیتال با تمام اطلاعات مرتبط به پروژه را فراهم می‌سازد. استفاده از BIM تبادل اطلاعات و همکاری بین ذی‌نفعان پروژه (طراحان، سازندگان، سرمایه‌گذاران و...) را تسهیل می‌کند و از این مدل می‌توان در کل چرخه عمر ساختمان، از مراحل اولیه تا تخریب یا بازسازی استفاده نمود. یکی از اصلی‌ترین مزایای BIM استفاده از این ابزار برای درک بهتر پروژه‌ها در مراحل اولیه است که تشخیص خطاها را آسان‌تر نموده و درنتیجه زمان و هزینه تغییرات در حین ساخت را کاهش می‌دهد (Azhar, 2011). در زمینه برنامه‌ریزی نیز، BIM امکان پیش‌بینی و کنترل بهتر زمان‌بندی پروژه را با سهولت بیشتری ممکن می‌سازد.

اهمیت برنامه‌ریزی در مدیریت مربوط به یک قرن گذشته است؛ لذا با پیشرفت ابزارهای برنامه‌ریزی کامپیوتری و افزایش دوره‌های آموزش مدیریت پروژه، در تمام پروژه‌ها حتی آنهایی که با ناکامی به پایان می‌رسند، سطح خاصی از برنامه‌ریزی صورت می‌گیرد (Amirkardoust et al., 2024).

برنامه زمان‌بندی یکی از اصلی‌ترین فعالیت‌ها در پروژه‌های ساختمانی است که به پیش‌بینی مدت‌زمان لازم برای اجرای فعالیت‌های پروژه و سازمان‌دهی و توالی اجرای آن‌ها می‌پردازد. پس از اقدامات ذکرشده، برنامه زمان‌بندی پروژه تنظیم شده و به کمک آن می‌توان روند پیشرفت پروژه را پیگیری و تأخیرهای احتمالی را شناسایی نمود. اهمیت برنامه زمان‌بندی دقیقاً در این واقعیت نهفته است که موفقیت آن، تعیین‌کننده موفقیت کل پروژه است؛ زیرا اجرای فعالیت‌ها در چارچوب برنامه زمان‌بندی به همراه کیفیت و هزینه پیش‌بینی‌شده، از عوامل اصلی موفقیت پروژه هستند. برنامه زمان‌بندی مناسب، امکان استفاده بهینه از منابع را فراهم ساخته و کاهش بیشتر هزینه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد (Bahnaier, 2001).

برای بررسی این موضوع، ادبیات موجود در بسترهای معتبر آنلاین (مانند Web of Science و Scopus) مورد بررسی قرار گرفت که در شکل شماره ۱ ارتباط تصویری این ادبیات نشان داده شده است. همچنین در ادامه، ابزارها و تکنیک‌های موجود در زمینه BIM و AI که برای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی مفید هستند، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند؛ البته باتوجه‌به ماهیت نظری این پژوهش، از این ابزارها و برنامه‌های نرم‌افزاری استفاده نشده، بلکه تنها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته‌اند.

1 Artificial Intelligence
2 Building Information Modelling




**شکل ۱: ارتباط تصویری ادبیات موضوع پژوهش در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۰ الی ۲۰۲۴ (منبع: نگارنده)**

در این پژوهش یکپارچه‌سازی BIM و AI با تمرکز بر برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی مورد بررسی قرارگرفته و چگونگی کمک این یکپارچه‌سازی در شناسایی ریسک‌ها، منابع، مدت‌زمان فعالیت‌ها و سرانجام بهینه‌سازی فرایند برنامه‌ریزی مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ همچنین، کاربرد BIM و AI برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی زمان ساخت، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی زمان‌بندی فعالیت‌ها و منابع و پیاده‌سازی کاربرد آن‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت. نهایتاً چالش‌ها و محدودیت‌های این یکپارچه‌سازی در صنعت ساخت‌وساز شناسایی شده و سپس پیشنهادهایی برای رفع موانع و بهبود راهکارهای فناورانه، همراه با پیش‌بینی جهت‌گیری‌ها و تحولات آینده در زمینه توسعه BIM، AI و ساخت‌وساز ارائه خواهد شد.

اهمیت این یکپارچه‌سازی دقیقاً در این واقعیت نهفته است که این روش یکی از عوامل کلیدی است که می‌تواند برنامه زمان‌بندی و بودجه‌بندی پروژه را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد؛ زیرا ترکیب آن‌ها، فرصت‌های جدیدی را برای شناسایی دقیق‌تر ریسک‌ها، پیش‌بینی مدت‌زمان فعالیت‌ها و همچنین بهینه‌سازی منابع و سرانجام افزایش کارایی کلی پروژه‌های ساختمانی تهیه می‌کند.

هدف از این پژوهش، مروری کلی بر وضعیت موجود در زمینه یکپارچه‌سازی BIM و AI، به‌ویژه برای برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی، و برجسته‌کردن آخرین دستاوردها و کاربردهای بالقوه در این زمینه، و تشویق به تحقیقات بیشتر و به‌کارگیری رویکردهای نوآورانه است تا بتوان با کمک آن‌ها پایه‌های مستحکمی برای پروژه‌های ساختمانی بهره‌ورتر، کارآمدتر و پایدارتر در آینده تهیه کرد.

## ۱. کاربرد BIM و AI برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی زمان ساخت

در این بخش، کاربرد BIM و AI در صنعت ساخت‌وساز با تمرکز بر برنامه زمان‌بندی بررسی شده و مزایای مختلف استفاده از این ابزارها در مقایسه با روش‌های سنتی برنامه‌ریزی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. سپس یکپارچه‌سازی BIM و AI به همراه پتانسیل‌های موجود برای بهبود فرایند برنامه‌ریزی مورد بررسی قرار گرفته و سرانجام، وضعیت فعلی یکپارچه‌سازی BIM و AI و همچنین شرح ابزارهای مختلف BIM و AI که در برنامه زمان‌بندی قابل‌استفاده هستند و امکان یکپارچه‌سازی متقابل را دارند، ارائه شده است.

### ۱،۱ کاربرد BIM در صنعت ساخت‌وساز

امروزه پیاده‌سازی و به‌کارگیری BIM برای مدیریت پروژه‌های ساختمانی، به‌منظور انطباق با روندهای توسعه جهانی در بخش ساخت‌وساز بسیار ضروری است. به همین دلیل، بسیاری از دانشمندان و شرکت‌ها به طور فعال درگیر یادگیری، درک و بررسی امکانات مختلف BIM هستند. در این بخش، بر روی نقش و کاربرد BIM، به‌ویژه برای برنامه‌ریزی و مدیریت برنامه زمان‌بندی پروژه، تمرکز خواهد شد. همچنین راه‌هایی که کشورهای دیگر از BIM برای مدیریت پروژه‌ها و نظارت بر پیشرفت در طول عمر پروژه استفاده می‌کنند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. هدف این بخش بررسی دقیق و یافتن تمامی پیوندهای بین BIM و برنامه زمان‌بندی است که در طی آن مزایا، معایب و محدودیت‌های کاربردی BIM در مقایسه با روش‌های سنتی برنامه زمان‌بندی مشاهده خواهد شد.

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) فرایندی در مدیریت اطلاعات است که امکان ایجاد عناصر دیجیتالی را در طول مراحل مختلف پروژه، از مرحله طراحی و اجرا تا پایان پروژه و همچنین دوره بهره‌برداری را ممکن می‌سازد. مفهوم BIM در دهه ۱۹۷۰ در موسسه فناوری جورجیا مطرح شد و با درک ارزش یکپارچه‌سازی و مدیریت پروژه‌ها با استفاده از BIM توسط شرکت‌های ساختمانی توسعه پیدا کرد. اصطلاح «مدل‌سازی اطلاعات ساختمان» در سال ۲۰۰۲ برای توصیف طراحی مجازی، ساخت و مدیریت تأسیسات تهیه شد. باتوجه‌به اینکه BIM تنها به معنای یک مدل نبوده، بلکه فرایندی مدیریتی نیز هست، اخیراً اصطلاح مدیریت اطلاعات ساختمان بیش‌ازپیش مورداستفاده قرار گرفته است. اصطلاح مذکور شامل ابزارهای BIM شامل 3D/4D/5D به‌عنوان رویکردهای نوآورانه هنگام ساخت مدل‌های بصری، انجام تشخیص برخورد، شبیه‌سازی ساخت‌وساز و برنامه‌ریزی گرافیکی برای اطمینان از تکمیل به‌موقع پروژه است (Nguyen et al., 2024).

اطلاعات در مدل BIM را می‌توان در دو گروه اصلی، یعنی اطلاعات هندسی و غیرهندسی تقسیم کرد. اطلاعات هندسی شامل ابعاد و موقعیت اجزای ساختمان (به‌عنوان‌مثال، ستون‌ها، دیوارها، دال‌ها، تیرها، مبلمان از انواع مختلف و...) است، درحالی‌که اطلاعات غیرهندسی شامل داده‌هایی است که جزئیات بیشتری در مورد اجزای ساختمان ارائه می‌دهد (به‌عنوان‌مثال، سازنده، قیمت، زمان نگهداری و...) (Wu, 2023).

#### ۱،۱،۱ کاربرد BIM در برنامه زمان‌بندی

استفاده از BIM در برنامه زمان‌بندی پروژه‌ها، درواقع BIM چهاربعدی را موردتوجه قرار می‌دهد که علاوه بر مدل سه‌بعدی، برنامه زمان‌بندی پروژه را نیز شامل می‌شود. استفاده از BIM چهاربعدی، مدیریت پروژه‌ها را تسهیل می‌کند؛ زیرا امکان تجسم بهتر پیشرفت ساخت‌وساز را فراهم می‌سازد.

به‌طورکلی پذیرش فناوری‌ها و روش‌های جدید ساخت در صنعت ساخت‌وساز بسیار کند صورت می‌گیرد و این دقیقاً دلیل بسیاری از مشکلات همانند بهره‌وری پایین، تحمیل هزینه مالی، تکرار فعالیت‌ها، تأخیرات مکرر زمانی، مشکلات ارتباطی، خودکارسازی و همچنین دیجیتالی‌شدن است که مشخصه اصلی این صنعت به‌حساب میاید. BIM می‌تواند خودکارسازی و مدیریت را در صنعت ساخت‌وساز به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد، اما اجرای آن صرفاً به مهندسان و تمایلشان به یادگیری، مهارت‌ها و ظرفیت‌های آن‌ها بستگی دارد. بااین‌حال، اکثر شرکت‌های ساختمانی هنوز به‌صورت دستی پیشرفت پروژه را کنترل و به‌روز می‌کنند که این امر هم زمان‌بر است و هم احتمال خطا و درنهایت تأخیر پروژه را افزایش می‌دهد.

به گزارش مؤسسه ملی استاندارد و فناوری[1] (NIST) در سال ۲۰۰۴، مشکلاتی از قبیل عملکرد ضعیف و مدیریت ناکارآمد داده‌ها حدوداً ۱۵،۸ میلیارد دلار در سال برای صنعت ساخت‌وساز هزینه دارد که این رقم شامل ۳ تا ۴ درصد از کل هزینه‌های ساخت‌وساز می‌شود (Suermann & Issa, 2009).

1 The National Institute of Standards and Technology

این یکی از دلایلی است که در سال‌های اخیر تمرکز فزاینده‌ای بر روی استفاده از BIM برای برنامه‌ریزی زمان و هزینه‌ها شده و ثابت گردیده که BIM گزینه بهتری برای تهیه برنامه‌ها و ارزیابی و نظارت بر تغییرات است. همچنین، امکان ذخیره‌سازی برنامه مدیریت بهره‌برداری در مدل BIM، درک زمان‌بندی و مدت‌زمان وظایف مربوط به تعمیر و نگهداری را آسان‌تر کرده و باعث بهبود کارایی و عملی‌بودن مدیریت بهره‌برداری نیز می‌شود. این روش ورودی BIM تأثیر زیادی بر برنامه زمان‌بندی دارد؛ زیرا مشکلات برنامه‌ریزی ناشی از عوامل انسانی را کاهش می‌دهد. داده‌های مکانی نیز بر برنامه زمان‌بندی تأثیر می‌گذارند، زیرا برخی از فعالیت‌های ساخت‌وساز بر اساس مکان کارگران، تجهیزات یا مصالح برای اطمینان از ایمن‌ترین شرایط کاری و بهترین بازده ممکن برنامه‌ریزی می‌شوند (Nguyen et al., 2024).

به طور سنتی، مدل‌های چهاربعدی از ترکیب اجزای سه‌بعدی BIM با فعالیت‌های برنامه زمان‌بندی پروژه تهیه می‌شوند و چنین مدل‌هایی باتوجه‌به اینکه عمدتاً اطلاعاتی را در مورد اجزای سه‌بعدی ارائه می‌دهند، محدودیت‌های خاصی دارند. به‌منظور افزایش مزیت استفاده از BIM چهاربعدی و استفاده از امکانات آن برای کاهش نیازهای مصالح (مانند بتن و فولاد) و پشتیبانی از شبیه‌سازی فعالیت‌ها در سطح سایت، سیستمی پیشنهاد شده است که تبادل اطلاعات بین نرم‌افزارهای مختلف را تسهیل می‌کند. چنین سیستمی شبیه‌سازی عملیات را بهبود بخشیده، مدت‌زمان فعالیت‌های نامشخص و نیازهای منابع رقابتی را در نظر می‌گیرد و امکان ارزیابی آسان‌تر استراتژی‌های تخصیص منابع مختلف را برای تهیه یک برنامه بهینه پروژه فراهم می‌کند. سپس برنامه زمان‌بندی نهایی به اجزای BIM سه‌بعدی مرتبط می‌شود تا مدلی چهاربعدی مبتنی بر BIM پیشرفته تهیه شود (Wang et al., 2014).

### ۱،۱،۲ مزایای استفاده از BIM در برنامه زمان‌بندی

ترکیب BIM چهاربعدی، به‌عنوان یک تکنیک تکمیلی برای بهبود مدیریت پروژه، با فناوری مدیریت BIM به طور قابل‌توجهی کار طراحی و ساخت را ساده می‌کند. هدف اولیه BIM چهاربعدی بهبود تجسم پیشرفت ساخت‌وساز به‌وسیله پیونددادن مدل سه‌بعدی ساختمان با یک برنامه ازپیش‌تعیین‌شده است. پژوهشی در خصوص مقایسه بصری برای تأکید بر اثربخشی استفاده از BIM چهاربعدی برای مدیریت پروژه در مقایسه با روش‌های سنتی انجام شده است. جنبه‌های کلیدی این پژوهش عبارت‌اند از: برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، مقایسه پیشرفت پایه با پیشرفت واقعی، کنترل پیشرفت ساخت‌وساز، طراحی اولیه، تحلیل نیازمندی‌ها و حل اختلاف، ارائه روش‌های ساخت‌وساز، برنامه‌ریزی و مدیریت ایمنی کار، تحقیق و ایمنی مکان‌یابی جرثقیل برجی، مدیریت طرح کلی و مدیریت طراحی ساخت‌وساز. نتیجه این است که پذیرش مدیریت کلی پروژه با یک مدل BIM مشترک، نقطه عطفی محوری در عصر به‌کارگیری فناوری‌های جدید در مدیریت پروژه ساخت‌وساز است (Nguyen et al., 2024).

دلایل اصلی شروع به‌کارگیری BIM در پروژه‌های ساختمانی، صرفه‌جویی در هزینه پروژه، آگاهی از فناوری در صنعت، دردسترس‌بودن متخصصان آموزش‌دیده برای استفاده از ابزار BIM و مقرون‌به‌صرفه بودن نرم‌افزار است (Mostafa et al., 2023). یکی از مزایای اصلی استفاده از BIM برای برنامه زمان‌بندی این است که BIM امکان شناسایی فعالیت‌های همپوشانی در مرحله طراحی را فراهم می‌کند و درنتیجه زمان‌بندی پروژه را بهبود می‌بخشد. همچنین، BIM دارای قابلیت‌هایی است که درج، استخراج، به‌روزرسانی یا اصلاح داده‌های دیجیتال را نه‌تنها توسط مهندسان و معماران، بلکه توسط سرمایه‌گذاران، خریداران یا تأمین‌کنندگان نیز ساده می‌کند (Goedert & Meadati, 2008). با استفاده از مدل BIM، فرایند ذخیره‌سازی داده‌های پروژه ساده می‌شود و به همین دلیل است که می‌تواند به‌عنوان منبعی جامع برای تمامی داده‌های مربوط به پروژه عمل کند. داده‌های ذخیره‌شده در مورد پروژه را می‌توان برای مدیریت در کل چرخه عمر پروژه نیز استفاده کرد.

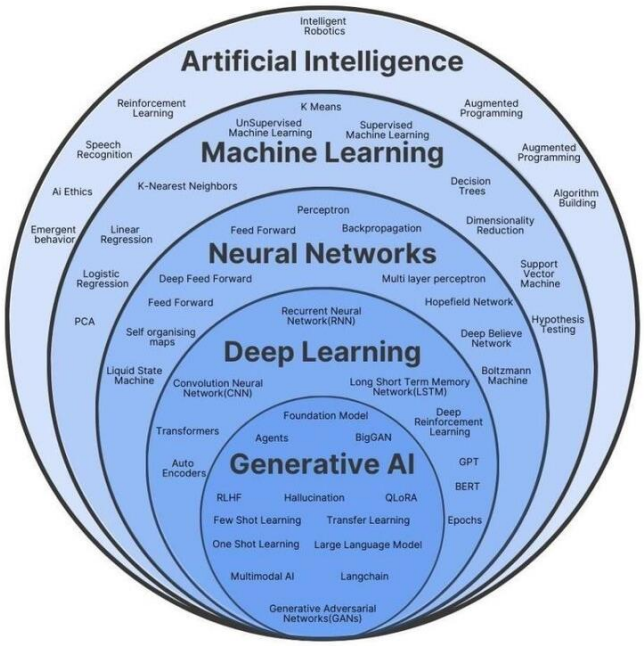
BIM مدلی جامع، حاوی اطلاعات لازم در مورد پروژه بوده و اشتراک میان ذی‌نفعان و بخش‌های مختلف پروژه از مرحله طراحی مفهومی تا اجرا و بهره‌برداری را تقویت می‌کند. این مدل نه‌تنها برای ذخیره و ارائه اطلاعات پروژه در طی مراحل مختلف پروژه بکار می‌رود، بلکه برای تولید و استفاده از منابع اطلاعاتی و ایجاد مدلی بصری از پروژه نیز کاربرد دارد. هدف از این رویکرد بهینه‌سازی طراحی، ساخت و فرایند مدیریت پروژه است و درعین‌حال دیدی جامع از پروژه در اختیار ذی‌نفعان قرار می‌دهد.

به‌این‌ترتیب موجبات تسهیل تصمیم‌گیری ذی‌نفعان، افزایش بهره‌وری کارگران، کاهش احتمال خطا و همچنین نیاز به تغییرات در طول مدت پروژه فراهم می‌گردد. در صورت نیاز به بازنگری، این مدل به همراه عناصر متصل به‌راحتی می‌تواند به‌روز شود و این قابلیت باتوجه‌به اینکه طرح در طول پروژه ساخت‌وساز و قبل از تأیید، معمولاً دچار تغییرات متعددی می‌شود، بسیار مفید است. باتوجه‌به این‌که ساخت‌وساز زمینه‌ای چندرشته‌ای است، تسهیل تشخیص خطاها و ناهماهنگی‌های طراحی برای رشته‌های مختلف توسط BIM، بسیار مفید است؛ بدین ترتیب تضاد بین حرفه‌ها را به حداقل رسانده و درنتیجه همکاری و هماهنگی آن‌ها را بهبود می‌بخشد (Nguyen et al., 2024).

باتوجه‌به اینکه غالباً، شرط اصلی برای برنده‌شدن یک پروژه در مناقصه عمومی پایین‌ترین قیمت است، بررسی اینکه آیا استفاده از BIM مزیت اقتصادی دارد یا خیر، بسیار مهم است. در هنگام طراحی می‌توان هزینه‌های تولید و طراحی را کاهش داد، همچنین به دلیل بهبود هماهنگی در حین اجرا، امکان صرفه‌جویی در هنگام تهیه منابع نیز وجود دارد. سرمایه‌گذار پروژه مبتنی بر BIM، دیدگاه کلی بسیار واضح‌تری از هزینه‌ها دارد و می‌تواند به‌راحتی اجزای مرتبط با هزینه یا زمان مشاهده کند. با استفاده از BIM مدلی به دست می‌آید که بر اساس آن می‌توان مشکلات احتمالی در حین ساخت را پیش‌بینی کرد که احتمال خرابی در محل ساخت‌وساز و به طور خودکار هزینه‌های غیرضروری کاهش می‌یابد.

### ۱,۲ کاربرد AI در صنعت ساخت‌وساز

هوش مصنوعی شاخه‌ای مهم از علوم کامپیوتری است که در سال‌های اخیر به مفهومی محبوب تبدیل شده است. هدف AI انجام مجموعه‌ای از وظایف مختلف است که به طور سنتی نیاز به هوش انسانی دارند و کاربرد آن در صنایع مختلف، ازجمله صنعت ساخت‌وساز رایج شده است. باوجوداینکه استفاده از AI در این صنعت نسبتاً دیر آغاز شد، اما تأثیر قابل‌توجهی از خود بجا گذاشته است. AI موجب بهبود کارایی و کیفیت شده و همچنین بر کاهش هزینه‌ها تأثیر می‌گذارد که این امر به‌ویژه برای صنعت ساخت‌وساز که ماهیتی بین‌رشته‌ای و بازده کاری نسبتاً پایینی دارد، بسیار مفید است. در شکل شماره ۲ الگوریتم‌های AI و حوزه‌های مربوط به آن نشان‌داده‌شده است.

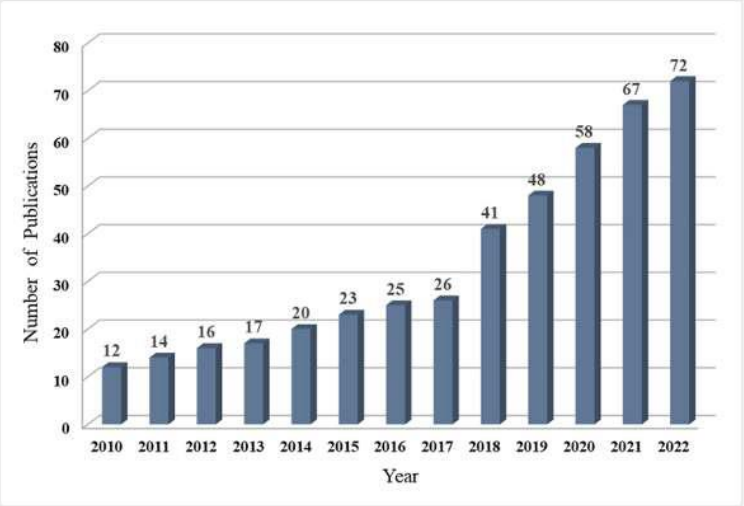



**شکل ۲: حوزه‌های هوش مصنوعی (منبع: (Al-Janabi, 2024))**

اگرچه استفاده از BIM و مدل‌سازی سه‌بعدی در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای گسترش پیدا کرده، بااین‌حال همچنان بسیاری از دست‌اندرکاران صنعت ساخت‌وساز با پذیرش و کاربرد AI مشکل دارند. عدم استفاده از AI در پروژه‌های ساختمانی

فرایندهای طراحی و اجرا را پیچیده می‌کند، درحالی‌که استفاده از AI حتی می‌تواند وقوع خطا را نیز به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. به‌عنوان‌مثال، حسگرها و دوربین‌های نظارتی می‌توانند اطلاعاتی را درباره وضعیت فعلی یک سایت ساخت‌وساز جمع‌آوری کرده و AI می‌تواند آن‌ها را با داده‌های ایمنی مقایسه نماید؛ در صورت تجاوز از محدودیت‌های ایمنی، با اصلاح عناصر علامت‌گذاری‌شده، احتمال وقوع حوادث در کارگاه‌های ساختمانی کاهش می‌یابد (Guoshen et al., 2020).

در خصوص برنامه زمان‌بندی نیز، دوربین‌های نظارتی و پهپادها می‌توانند ظاهر و ساختار یک پروژه در حال ساخت را اسکن کرده و داده‌های ساخت‌وساز توسط AI تجزیه‌وتحلیل و پردازش شود. این کار به ذی‌نفعان بینشی واقعی از وضعیت فعلی پروژه می‌دهد و نظارت بر پیشرفت و بررسی اینکه آیا فعالیت‌ها مطابق برنامه‌ریزی پیش می‌روند، دقیق‌تر می‌شود. این روش علاوه بر نظارت بر پیشرفت واقعی پروژه، برنامه‌ریزی بهینه پیشرفت ساخت‌وساز را نیز تسهیل می‌کند. همچنین درصورتی‌که در آینده مشکلی در ساختمان به وجود آید، باتوجه‌به اینکه تمامی اطلاعات و دستورالعمل‌های مربوط به ساخت‌وساز در یک محل جمع‌آوری و ذخیره شده‌اند، می‌توان با کمک AI دلیل مشکل را پیدا کرد (Shouxin, 2022).



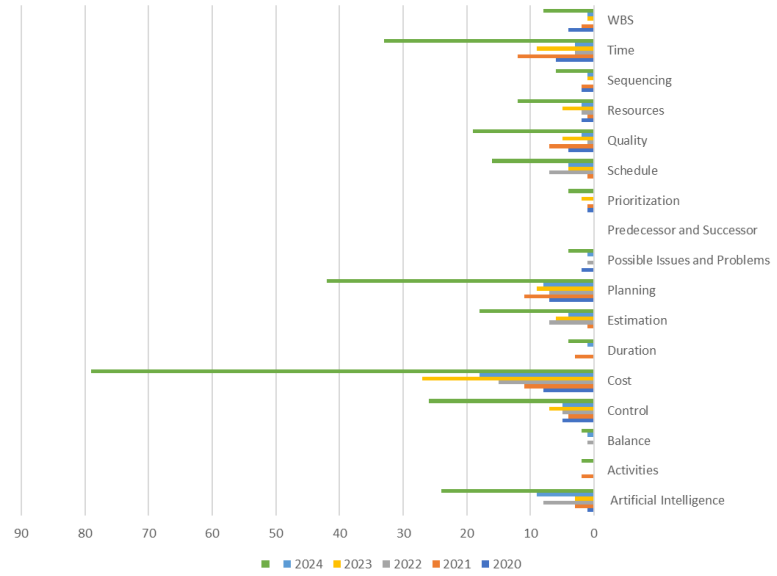

**شکل ۳: روند سالانه انتشارات مربوط به کاربرد هوش مصنوعی در صنعت ساخت‌وساز (منبع: (Datta et al., 2024))**

سطح شناخت و پیشرفت ایجادشده در یک زمینه تحقیقاتی خاص، توسط انتشارات سالانه در آن حوزه تعیین می‌شود. شکل شماره ۳، تحقیقات منتشرشده در زمینه کاربرد AI در صنعت ساخت‌وساز را بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. بررسی این نمودار شواهد روشنی از میزان پیشرفت انجام‌شده در تحقیقات مربوط به AI که توسط انتشارات سالانه در این زمینه تعیین شده را ارائه می‌دهد. با نگاهی به اعداد و ارقام نمودار می‌توان به پیشرفت استفاده از AI در این صنعت در چند سال اخیر پی برد. بیشترین جهش مربوط به سال ۲۰۱۸ است که تعداد انتشارات از ۲۶ به ۴۱ افزایش پیدا کرده است؛ البته یادگیری ماشین جهش بزرگ‌تری را تجربه کرده و از ۱۵ انتشار در سال ۲۰۱۷، به ۶۰ انتشار در سال ۲۰۱۸ و ۱۵۳ انتشار در سال ۲۰۲۲ رسیده است (Datta et al., 2024).

در شکل ۴ نیز انتشارات علمی در زمینه ارتباط BIM با مراحل فرایند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه و همچنین زمینه‌های مرتبط با AI در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۰ الی ۲۰۲۴ به نمایش درآمده است. این نمودار نشان‌دهنده آن است که از حدود ۳۰۰ تحقیق ثبت‌شده در این خصوص، بیشترین پژوهش‌ها به ترتیب مربوط به هزینه[1] (۲۶ درصد)، برنامه‌ریزی[2] (۱۴ درصد) و زمان[3] (۱۱ درصد) می‌شود؛ از سوی دیگر کمترین پژوهش‌ها در زمینه‌های فعالیت‌ها[4] و بالانس[5] (کمتر از ۰,۷ درصد) و مدت‌زمان[6]،

1 Cost
2 Planning
3 Time
4 Activities
5 Balance
6 Duration

مسائل و مشکلات احتمالی[1] و اولویت‌بندی[2] (حدود ۱,۳ درصد) بوده است. این در حالی است که در خصوص حوزه‌هایی مانند پیش‌نیازی و پس‌نیازی[3] هیچ‌گونه مطالعه‌ای صورت نگرفته است.




**شکل ۴: انتشارات علمی در زمینه ارتباط BIM با مراحل فرایند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه و هوش مصنوعی (منبع: نگارنده)**

### ۱,۲,۱ کاربرد AI در برنامه زمان‌بندی

برنامه زمان‌بندی تأثیر بسزایی بر موفقیت پروژه‌های ساختمانی دارد و عوامل مختلفی در پروژه‌های ساختمانی وجود دارند که دقت زمان‌بندی را کاهش می‌دهند؛ اما با استفاده از AI می‌توان این فرایند را آسان‌تر و سریع‌تر کرد. اگرچه استفاده از AI می‌تواند دقت، عملکرد و کارایی پروژه‌ها را بهبود بخشد، اما این احتمال نیز وجود دارد که استفاده از آن در زمان‌بندی پروژه‌ها مشکلاتی را به همراه داشته باشد؛ بنابراین، بررسی این موانع بسیار مهم است.

بر اساس گزارش بانک جهانی (۲۰۲۰)، بخش ساخت‌وساز در حال حاضر یکی از مهم‌ترین مشارکت‌کنندگان در رشد اقتصاد جهانی است که تقریباً ۱۰ درصد از تولید ناخالص داخلی جهانی را تشکیل می‌دهد. بااین‌حال، این صنعت همچنین یکی از کم دیجیتالی‌ترین صنعت‌ها است و تخمین زده می‌شود که ۴۰ تا ۶۰ درصد هزینه‌های این بخش به ناکارآمدی و ضایعات مربوط می‌شود. علاوه بر این، صنعت ساخت‌وساز اغلب در معرض تأخیرهای غیرمنتظره، مازاد بر هزینه‌ها و سایر مسائلی است که می‌تواند منجر به از دست رفتن مهلت‌های زمانی و هدر رفتن منابع شود (Victor, 2023).

به همین دلیل، استفاده از AI در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی فرصتی را برای افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود ایمنی این صنعت ارائه می‌دهد. استفاده از این فناوری قابلیت بهینه‌سازی زمان‌بندی و درنتیجه کاهش هزینه‌ها و مدت‌زمان پروژه را دارد و درعین‌حال ایمنی را افزایش می‌دهد. از AI می‌توان برای برنامه‌ریزی و بررسی داده‌ها و مطالعه آن‌ها استفاده کرد و سپس با به‌کارگیری یادگیری ماشین و الگوریتم‌های پیشرفته می‌توان نتایج فعالیت‌ها را پیش‌بینی نمود و درنتیجه بهترین راه‌حل یعنی برنامه زمان‌بندی بهینه را ارائه داد. یادگیری ماشین[4] (ML) برای یافتن الگوها، تشخیص شباهت‌ها و ایجاد مدل‌هایی که برای برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی استفاده می‌شوند، مفید است. پردازش زبان طبیعی[5] (NLP) نیز زیرمجموعه

1 Possible Issues and Problems
2 Prioritization
3 Predecessor and Successor
4 Machine Learning
5 Natural Language Processing

آموزش ماشین است و به رایانه‌ها و ماشین‌ها امکان می‌دهد تا زبان انسانی را درک و تفسیر کنند و با یکدیگر ارتباط برقرار نمایند و در صنعت ساخت‌وساز، قراردادها و اسناد مربوط به پروژه‌ها را تفسیر کنند.

برای تشویق به استفاده از AI برای برنامه‌ریزی پروژه، لازم است پتانسیل آن را مطالعه نمود، به این معنی که استفاده از آن می‌تواند چه مزایایی برای صنعت ساخت‌وساز داشته باشد. به همین منظور، تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۸ توسط گروه مشاوره بوستون انجام شد، نشان داد که استفاده از AI در صنعت ساخت‌وساز می‌تواند منجر به کاهش ۴۰ درصدی مدت‌زمان پروژه و کاهش ۲۰ درصدی هزینه‌های پروژه شود؛ البته پتانسیل AI در برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی برای اولین بار در اوایل دهه ۲۰۰۰ شناسایی، و تحقیقات در مورداستفاده از آن برای تقسیم وظایف، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرایند آغاز شد (Victor, 2023). امروزه AI به طور فزاینده‌ای برای برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی به‌منظور بهبود دقت در برنامه‌ریزی، ارزیابی ریسک‌ها، افزایش ایمنی و کنترل برنامه استفاده می‌شود.

کاربرد AI به مرحله چرخه عمر پروژه ساختمانی بستگی دارد. مرحله برنامه‌ریزی به طور قابل‌توجهی بر موفقیت کلی پروژه تأثیر می‌گذارد؛ زیرا مؤلفه‌هایی مانند هزینه، مدت‌زمان و کیفیت پروژه را تعیین می‌کند. در سال‌های اخیر، استفاده از AI به طور فزاینده‌ای برای بهینه‌سازی برنامه‌های زمان‌بندی، متداول شده است؛ به‌ویژه، برای برنامه زمان‌بندی و پیش‌بینی مدت‌زمان دقیق یک پروژه، ارزیابی پیشرفت در مراحل مختلف پروژه، پیش‌بینی هزینه‌های ساخت و زمان‌بندی عملکرد و ارزیابی خطرات بالقوه استفاده می‌شود (Datta et al., 2024).

### ۱,۲,۲ مزایای استفاده از AI در برنامه زمان‌بندی

از AI در صنعت ساخت‌وساز برای خودکارسازی فرایندها و درنتیجه تصمیم‌گیری‌ها استفاده می‌شود که باعث افزایش سرعت تصمیم‌گیری و کاهش احتمال خطا در برنامه‌ریزی می‌شود؛ بنابراین واضح است که استفاده از AI می‌تواند مزایای بی‌شماری را برای ذی‌نفعان پروژه به همراه داشته باشد که در ادامه این بخش این مزایا ذکر شده و توضیح داده خواهند شد.

استفاده از AI می‌تواند مزایای مختلفی را برای ذی‌نفعان یک پروژه دررابطه‌با زمان‌بندی به همراه داشته باشد. یکی از مزیت‌های اصلی برای مدیران پروژه، امکان شناسایی راحت‌تر ریسک‌ها و همچنین پیش‌بینی نتیجه نهایی پروژه است که باعث بهبود برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نهایی پروژه می‌شود. مزیت دیگر، امکان بهینه‌سازی منابع است که هدررفت مصالح را کاهش می‌دهد. (Victor, 2023). مزیت AI این است که اعلان‌هایی را در مورد پیشرفت پروژه در زمان واقعی ارائه می‌دهد، به همین دلیل است که مدیران پروژه همیشه می‌توانند یک برنامه زمان‌بندی به‌روز داشته باشند و بدین ترتیب تصمیم‌گیری و تعیین تغییرات موردنیاز آسان‌تر می‌شود.

بهترین راه اثبات مزایای استفاده از AI، تشریح نتایج تحقیقات مختلف و مقایسه آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های سنتی است. در چند سال گذشته، تحقیقات زیادی در مورد اینکه چگونه می‌توان از AI برای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی استفاده کرد، انجام شده است. در مطالعه‌ای توسط لیو و همکاران (۲۰۲۱)، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی مدت‌زمان یک پروژه ساخت‌وساز بر اساس مکان، اندازه و پیچیدگی آن استفاده شد. این مطالعه نشان داد که الگوریتم‌های یادگیری ماشین بهتر از روش‌های زمان‌بندی سنتی در تعیین مدت‌زمان انجام یک پروژه هستند (Liu et al., 2021).

در مطالعه دیگری، ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) از یادگیری ماشین و پردازش زبان طبیعی برای تهیه برنامه‌های ساخت‌وساز به طور خودکار استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که ابزار زمان‌بندی مجهز به AI می‌تواند زمان‌بندی‌ها را سریع‌تر و دقیق‌تر از روش‌های سنتی انجام دهد (Zhang et al., 2020).

در مطالعه سینگ و همکاران (۲۰۲۰)، محققان از الگوریتم‌های AI برای پیش‌بینی احتمال افزایش هزینه در پروژه‌های ساختمانی استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که ابزار مدیریت ریسک مبتنی بر AI می‌تواند هزینه‌های بیش‌ازحد را با درجه

بالایی از دقت پیش‌بینی کند. این امر به مدیران پروژه اجازه می‌دهد تا گام‌های پیشگیرانه برای مدیریت ریسک‌ها بردارند (Singh et al., 2020).

### ۱,۳ یکپارچه‌سازی BIM و AI برای برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه ساخت‌وساز

یکپارچه‌سازی BIM و AI، پتانسیل قابل‌توجهی برای تغییر روش مدیریت پروژه‌های ساختمانی در زمینه‌های مدیریت برنامه زمان‌بندی، هزینه‌ها، کیفیت و ایمنی پروژه‌ها دارد. با این یکپارچه‌سازی می‌توان کارایی و دقت پروژه‌ها را به میزان قابل‌توجهی افزایش داد و بدین ترتیب در زمان و هزینه‌های اضافی صرفه‌جویی کرد. به‌طورکلی، BIM نمایشی دیجیتالی از پروژه را با تمام عناصر و داده‌های لازم ارائه داده و AI این داده‌ها را تفسیر نموده و با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به تصمیم‌گیری آگاهانه کمک می‌کند.

باتوجه‌به مزایای پرشمار ارائه‌شده برای BIM و همچنین قابلیت‌های محاسباتی AI، ترکیب آن‌ها امکان استفاده حداکثری از تمامی مزایا را به آسان‌ترین شکل، ممکن ساخته و یکپارچه‌سازی آن‌ها خودکارسازی فرایند مدیریت داده‌ها را امکان‌پذیر می‌کند که باعث صرفه‌جویی در زمان می‌شود، کارایی را افزایش می‌دهد، فرایندهای مدیریتی را تسهیل می‌کند و احتمال خطاها و شرایط ناامن را در محل ساخت‌وساز کاهش می‌دهد.

این یکپارچه‌سازی امکان خودکارسازی وظایف مختلف مربوط به زمان‌بندی ساخت‌وساز را نیز فراهم می‌کند. الگوریتم‌های AI می‌توانند ایجاد برنامه زمان‌بندی را بر اساس نیازمندی‌های پروژه، دردسترس‌بودن منابع و محدودیت‌ها به طور خودکار انجام دهند. این زمان‌بندی‌های خودکار را می‌توان به طور مداوم با در دسترس قرارگرفتن داده‌های جدید بهینه‌سازی کرد و اطمینان حاصل نمود که روند ساخت‌وساز در مسیر و در چارچوب بودجه باقی می‌ماند. همچنین بار کارهای اداری توسط خودکارسازی از روی مدیران پروژه برداشته می‌شود و به ایشان اجازه می‌دهد که بر جنبه‌های استراتژیک‌تر مدیریت پروژه متمرکز شوند (Rane, 2023).

یکی از مزیت‌های اصلی این یکپارچه‌سازی، به‌ویژه دررابطه‌با برنامه زمان‌بندی، امکان تشخیص ریسک و تخصیص بهتر منابع است. این امر به دلیل توانایی تجزیه‌وتحلیل داده‌های قبلی پروژه مانند برنامه‌های زمان‌بندی پروژه‌های قبلی امکان‌پذیر است. هرچه اطلاعات این طرح‌ها بیشتر باشد، می‌توان برنامه زمان‌بندی به‌مراتب دقیق‌تری به دست آورد. اگر برنامه‌های زمان‌بندی پروژه‌های قبلی حاوی اطلاعاتی در مورد بهره‌وری کارگران باشد، با استفاده از یادگیری ماشین، تعیین مدت‌زمان دقیق فعالیت‌های فردی آسان‌تر خواهد بود. این امر باعث می‌شود برنامه زمان‌بندی کلی دقیق‌تر و قابل‌اطمینان‌تر باشد و همچنین تغییرات برنامه زمان‌بندی که ممکن است در صورت بروز تأخیرهای پیش‌بینی‌نشده در محل ساخت‌وساز رخ دهد، به‌دقت و سرعت انجام می‌شود. همین امر در مورد سایر اطلاعات مربوط به پروژه، مانند شرایط آب‌وهوایی روزانه محل ساخت‌وساز یا دردسترس‌بودن منابع نیز صدق می‌کند، در این صورت AI می‌تواند به بهینه‌سازی تخصیص منابع و درنتیجه هزینه‌های پروژه کمک کند.

یکی دیگر از مزایای قابل‌توجه برنامه‌ریزی هوشمند از طریق این یکپارچه‌سازی، توانایی انجام تحلیل‌های «چه می‌شود اگر» است. صنعت ساخت‌وساز اغلب با عدم قطعیت‌های مختلفی مانند آب‌وهوای نامساعد، کمبود مصالح یا تغییرات غیرمنتظره طراحی مواجه می‌شوند. BIM می‌تواند مدل دیجیتال جامعی ارائه دهد که در سناریوهای مختلف دست‌کاری و تجزیه‌وتحلیل شوند. الگوریتم‌های AI توانایی شبیه‌سازی شرایط مختلف و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر زمان‌بندی پروژه را دارند. این قابلیت به گروه‌های سازنده قدرت می‌دهد تا برنامه‌های اضطراری را طراحی کرده و تصمیمات پیش‌گیرانه‌ای برای کاهش مخاطرات احتمالی بگیرند (Rane, 2023). با تحقیق در سناریوهای مختلف، بهترین شانس این است که برنامه زمان‌بندی به‌گونه‌ای شناسایی شود که بیشترین کارآمدی و بهترین شانس را برای تکمیل پروژه در بازه زمانی معین داشته باشد.

باتوجه‌به احتمال بالای رخ‌دادن برخی رویدادهای پیش‌بینی‌نشده در مرحله اجرا که می‌تواند باعث تأخیر و تغییرات در طرح شود، نظارت بر وضعیت کارها در زمان واقعی از مزیت بالایی برخوردار است. سیستم BIM-AI نظارت بر زمان واقعی اجرای فعالیت‌ها را تسهیل می‌کند. حسگرهای موجود در سایت می‌توانند داده‌ها را جمع‌آوری کرده و وارد سیستم BIM-AI کنند.

داده‌های جمع‌آوری‌شده را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های AI تجزیه‌وتحلیل کرد و تأخیرهای احتمالی را پیش‌بینی نمود. بدین ترتیب مدیران پروژه هشدارهای به‌موقع در مورد تأخیرها دریافت می‌کنند که به آن‌ها امکان می‌دهد واکنش نشان داده و اقدامات اصلاحی را انجام دهند (Rane, 2023). باتوجه‌به تمامی موارد فوق، احتمال تأخیر در پروژه به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

مزیت دیگر این یکپارچه‌سازی، بهبود تجسم است. مدل BIM حاوی داده‌هایی در مورد کل پروژه است و تمامی اجزای آن را نشان می‌دهد. مدل سه‌بعدی می‌تواند به فعالیت‌های برنامه زمان‌بندی متصل شده و یک مدل چهاربعدی تشکیل شود. هنگامی‌که یک ابزار AI با چنین مدلی ترکیب شود، تشخیص برخوردها، یعنی عناصر یا فعالیت‌های همپوشانی، در مرحله طراحی امکان‌پذیر شده و می‌تواند به روشی ساده نمایش داده شود. به لطف تجسم بهبودیافته، نه‌تنها می‌توان مشکلات را به‌موقع تشخیص داد، بلکه به‌راحتی در مورد تغییرات لازم در پروژه نیز تصمیم گرفت. به‌این‌ترتیب، زمان لازم برای تصمیم‌گیری و همچنین تعداد تغییرات لازم کاهش می‌یابد. باتوجه‌به اینکه ابزارهای AI می‌توانند برنامه زمان‌بندی بهینه‌ای پیشنهاد کنند، تأخیرها به حداقل رسیده و فعالیت‌ها به بهترین نحو توزیع می‌شوند. این برنامه‌های زمان‌بندی، علاوه بر جلوگیری از امکان تداخل فعالیت‌ها، استفاده بهینه از زمان را نیز به دلیل امکان شناسایی فرصت‌ها برای اجرای موازی فعالیت‌های خاص بدون به خطر انداختن کیفیت یا ایمنی پروژه تضمین می‌کنند.

یکی از ویژگی‌های اصلی BIM و همچنین AI، تسهیل ارتباط بین ذی‌نفعان یا گروه‌های مختلف شرکت‌کننده در پروژه و درنتیجه هماهنگی بین ایشان است که این امر به لطف دیجیتالی‌شدن امکان‌پذیر خواهد بود؛ زیرا همه ذی‌نفعان پروژه در هر زمان به آخرین داده‌های پروژه دسترسی خواهند داشت. داده‌های به‌روزرسانی شده پروژه را می‌توان توسط الگوریتم‌های AI پردازش کرد و سپس بسته به نیاز آن‌ها به ذی‌نفعان مختلف اطلاع داد؛ بنابراین، لازم نیست اطلاعات حائز اهمیت برای به‌عنوان‌مثال مدیر پروژه و طراح یکسان باشد. با ترویج همکاری، شفافیت اطلاعات در مورد پروژه نیز ارتقایافته و باعث افزایش اعتماد بین ذی‌نفعان داخلی و خارجی و تسهیل هماهنگی پروژه می‌گردد.

یکپارچه‌سازی BIM و AI در برنامه زمان‌بندی می‌تواند تأثیر مثبتی بر ساخت‌وساز پایدار از طریق بهینه‌سازی منابع، یعنی نیروی انسانی، مواد یا تجهیزات داشته باشد. اگر داده‌هایی در مورد مصالح مصرف‌شده، مصرف انرژی یا ضایعات وجود داشته باشد، الگوریتم‌های AI می‌توانند چنین داده‌هایی را تجزیه‌وتحلیل کرده و یک برنامه زمان‌بندی پیشنهاد کنند که ضایعات را به حداقل رسانده و ازنظر تأثیر بر محیط‌زیست نیز بهینه باشد.

یکپارچه‌سازی BIM و AI علاوه بر بهینه‌سازی برنامه‌های زمان‌بندی، می‌تواند هزینه‌های پروژه را نیز بهینه نماید. این امر به دلیل بهینه‌سازی منابع که هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و نیز به علت افزایش دقت برآورد هزینه امکان‌پذیر است. الگوریتم‌های AI داده‌های هزینه قبلی مانند قیمت مواد، هزینه نیروی کار یا قیمت تجهیزات را تجزیه‌وتحلیل کرده و تخمین هزینه قابل‌اعتمادی را ارائه می‌کنند که به تخمین واقعی بودجه کمک می‌نماید. همچنین AI در طول مدت پروژه می‌تواند به طور مداوم هزینه‌های پروژه را به‌صورت بلادرنگ رصد کرده و داده‌ها را با بودجه مقایسه نموده و در صورت تجاوز از هزینه‌های برنامه‌ریزی‌شده هشدار دهد و به‌این‌ترتیب از افزایش هزینه‌ها جلوگیری کند (Rane, 2023).

### ۱,۴ ابزار BIM و AI برای برنامه زمان‌بندی

در این بخش مروری بر ابزارهای BIM و AI موجود که در جهت بهبود و تسهیل برنامه زمان‌بندی مورداستفاده قرار می‌گیرند، ارائه می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که فقط ابزارهایی که امکان ترکیب متقابل را دارند بررسی شده‌اند. ابتدا، ابزارهای BIM که توانایی ایجاد یا معرفی یک برنامه زمان‌بندی را دارند و به دنبال آن ابزارهای AI که می‌توانند داده‌ها را از ابزارهای خاص BIM وارد کنند، فهرست می‌شوند. به‌این‌ترتیب، ترکیب این فناوری‌ها و درعین‌حال تسهیل فرایند برنامه زمان‌بندی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی از طریق مزایای مختلفی که ارائه می‌دهند، انجام می‌شود.

### ۱,۴,۱ ابزارهای BIM برای برنامه زمان‌بندی

در خصوص ابزارهای BIM مورداستفاده برای برنامه زمان‌بندی، باید به این نکته اشاره کرد که رایج‌ترین روش، ایجاد یک مدل چهاربعدی در ابزار BIM و سپس واردکردن داده‌ها به یکی از ابزارهای AI و مطالعه و بهینه‌سازی توسط آن است. در این پژوهش مشخص شد که تقریباً همه ابزارهای BIM گزینه واردکردن به یکی از ابزارهای برنامه زمان‌بندی مانند MS Project یا Oracle Primavera P6 را ارائه می‌دهند، اما اکثر ابزارهای BIM قابلیت تهیه برنامه زمان‌بندی به شکل مستقیم را نیز دارند.

- **Autodesk Navisworks**

Navisworks یکی از ابزارهای پیشرفته در زمینه BIM است که به طور خاص برای تجزیه‌وتحلیل، تجسم و شبیه‌سازی پروژه‌های ساختمانی طراحی شده است. این نرم‌افزار به کاربران این امکان را می‌دهد که مدل‌های سه‌بعدی را از منابع مختلف ترکیب کرده و به شناسایی مشکلات و تضادها بپردازند.

ویژگی‌های Navisworks عبارت‌اند از:

- شبیه‌سازی زمان و هزینه: این ابزار به کاربران اجازه می‌دهد تا زمان‌بندی‌های دقیق و هزینه‌های مربوط به پروژه‌ها را شبیه‌سازی کنند. این قابلیت به مدیران پروژه کمک می‌کند تا پیش‌بینی دقیقی از مدت‌زمان موردنیاز برای تکمیل فعالیت‌ها داشته باشند.
- قابلیت همکاری با سایر نرم‌افزارهای Autodesk: این نرم‌افزار به‌راحتی با دیگر ابزارهای Autodesk مانند Revit و AutoCAD ترکیب شده و امکان تبادل اطلاعات بین گروه‌های مختلف را فراهم می‌آورد.
- ابزارهای تجزیه‌وتحلیل: Navisworks ابزارهای متعددی برای تجزیه‌وتحلیل مدل‌ها ارائه می‌دهد که شامل بررسی تضادها، ارزیابی زمان‌بندی و شناسایی مشکلات بالقوه قبل از شروع کار می‌شود.

زمینه‌های کاربردی Navisworks:

- مدیریت تضادها: یکی از کاربردهای اصلی این ابزار، شناسایی تضادها در مراحل اولیه طراحی است. این امر به کاهش خطاها و مشکلات در مراحل بعدی ساخت کمک می‌کند.
- تجسم پروژه: با استفاده از قابلیت‌های تجسم سه‌بعدی، گروه‌های پروژه می‌توانند نمای دقیقی از پروژه نهایی را مشاهده کنند که این امر به تسهیل تصمیم‌گیری کمک می‌کند.
- برنامه زمان‌بندی: این نرم‌افزار به کاربران این امکان را می‌دهد که زمان‌بندی دقیق‌تری برای فعالیت‌ها ایجاد کنند و پیشرفت پروژه را در طول زمان پیگیری کنند.

بنابراین، استفاده از Autodesk Navisworks در برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی می‌تواند به طور قابل‌توجهی دقت و کارایی فرایندها را افزایش دهد. این نرم‌افزار با ارائه ابزارهای پیشرفته برای تجزیه‌وتحلیل و شبیه‌سازی، به مدیران پروژه کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کرده و موفقیت بیشتری در اجرای پروژه‌های خود داشته باشند.

- **Vico Office (Vico Schedule Planner)**

Vico Office یک نرم‌افزار جامع برای مدیریت پروژه‌های ساختمانی است که شامل ابزارهایی برای برنامه زمان‌بندی، تخمین هزینه‌ها و مدیریت منابع می‌شود. ویژگی‌های این نرم‌افزار عبارت‌اند از: قابلیت ترکیب با مدل‌های BIM، ابزارهای پیشرفته برای تخمین هزینه‌ها و زمان‌بندی، امکان ایجاد گزارش‌های دقیق از پیشرفت پروژه.

در سال ۲۰۱۷، در دانشگاه پاپی کاتولیک در پرو، کارگاهی بین دانشجویان سال آخر مهندسی عمران برگزار شد که روش‌های مختلف برنامه‌ریزی را با استفاده از ابزارهایی مانند Excel، Revit، Navisworks و Vico Office مقایسه کنند. از Vico Office برای خودکارسازی طرح و مقایسه روش‌های چهاربعدی و پنج‌بعدی به روش‌های takt-time و flowlines استفاده شد. در طول کارگاه، دانش‌آموزانی که قرار بود از Vico Office برای تجسم مدل‌های چهاربعدی و پنج‌بعدی، ایجاد خودکار طرح‌بندی و نظارت

بر تغییرات ایجادشده در هنگام تغییر داده‌ها در مدل پنج‌بعدی استفاده کنند، متوجه شدند که مدل پنج‌بعدی تکنیک‌ها و ابزارهای مختلف برنامه‌ریزی را با امکان دسترسی به اطلاعات خودکار در یک ساختار مجازی منحصربه‌فرد ترکیب می‌کند، درحالی‌که تجسم مدل چهاربعدی، تشخیص تضادهایی را که در مرحله ساخت‌وساز ایجاد می‌شوند، امکان‌پذیر می‌سازد (Brioso et al., 2017).

- **BEXEL Manager**

BEXEL یک نرم‌افزار BIM است که به طور خاص برای برنامه‌ریزی، زمان‌بندی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی طراحی شده است. این ابزار به کاربران این امکان را می‌دهد تا تمام اطلاعات مربوط به پروژه را در یک محیط واحد جمع‌آوری و مدیریت کنند.

ویژگی‌های BEXEL عبارت‌اند از:

- ترکیب با مدل‌های BIM: این ابزار قابلیت ترکیب با مدل‌های BIM را دارد که این امر به کاربران اجازه می‌دهد تا اطلاعات مربوط به زمان‌بندی و منابع را به‌راحتی با مدل‌های سه‌بعدی ترکیب کنند.
- مدیریت زمان و هزینه: این نرم‌افزار ابزارهای پیشرفته‌ای برای برنامه زمان‌بندی و تخمین هزینه‌ها ارائه می‌دهد که به مدیران پروژه کمک می‌کند تا برآوردهای دقیقی از زمان و هزینه‌های پروژه داشته باشند.
- تحلیل داده‌ها: BEXEL قابلیت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها را فراهم می‌کند که به کاربران این امکان را می‌دهد تا عملکرد پروژه را ارزیابی کرده و تصمیمات بهتری اتخاذ کنند.

زمینه‌های کاربردی BEXEL:

- برنامه‌ریزی و زمان‌بندی: مدیران پروژه با استفاده از این ابزار می‌توانند زمان‌بندی دقیق‌تری برای فعالیت‌ها ایجاد کنند و منابع را به طور مؤثرتری تخصیص دهند.
- نظارت بر پیشرفت پروژه: این نرم‌افزار به کاربران اجازه می‌دهد تا پیشرفت واقعی پروژه را با برنامه زمان‌بندی مقایسه کنند و در صورت وجود انحرافات، اقدامات لازم را انجام دهند.
- بهبود همکاری: BEXEL امکان همکاری بین گروه‌های مختلف پروژه را تسهیل می‌کند، زیرا تمامی اعضای گروه می‌توانند به اطلاعات مشابهی دسترسی داشته باشند و درنتیجه هماهنگی بهتری داشته باشند.

بدین ترتیب، استفاده از BEXEL Manager در برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی می‌تواند دقت و کارایی فرایندهای ساخت‌وساز را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. این نرم‌افزار با ارائه ابزارهای پیشرفته برای مدیریت زمان، هزینه و منابع، به مدیران پروژه کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کرده و موفقیت بیشتری در اجرای پروژه‌های خود داشته باشند.

- **Tekla Structures**

اگرچه کارکرد اصلی این ابزار در برنامه زمان‌بندی نیست، اما از آن می‌توان برای مدیریت زمان در ترکیب با ابزارهایی که هدف اصلی آن‌ها تهیه برنامه زمان‌بندی است، مانند MS Project یا Primavera P6 استفاده کرد. در ترکیب Tekla با ابزارهای ذکرشده، می‌توان برنامه‌های زمان‌بندی را وارد کرد و با اتصال با یک مدل سه‌بعدی، یک مدل چهاربعدی ایجاد نمود که شبیه‌سازی ساخت‌وساز را باتوجه‌به زمان معین امکان‌پذیر می‌کند. برای اتصال مدل سه‌بعدی و برنامه زمان‌بندی می‌توان از Tekla Task Manager استفاده نمود که امکان نمایش جریان ساخت‌وساز در فازهای مختلف را فراهم کرده و تضمین می‌نماید که هر یک از فعالیت‌های پروژه به طور بهینه سازمان‌دهی شده و با بقیه پروژه هماهنگ شده است. مدل‌سازی چهاربعدی، تجسم مرحله اجرا و درنتیجه شناسایی مشکلات، توقف‌های احتمالی در محل ساخت‌وساز و بهینه‌سازی توالی فعالیت‌ها را آسان‌تر می‌کند. دستور Visual 4 Dimensions دارای یک منطق تجسمی است که بوسیله آن می‌توان مدل را مطابق تاریخ واردشده نمایش داد و نتایج تجسم چهاربعدی را در پیشرفت پروژه و در طول مدت آن با استفاده از "Project Status Visualization" مشاهده نمود (Pardosi & Khatimi, 2022).

- **SYNCHRO 4D Pro**

SYNCHRO یک ابزار پیشرفته برای برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های ساختمانی است که به طور خاص برای ترکیب BIM با زمان‌بندی پروژه طراحی شده است. این نرم‌افزار به کاربران این امکان را می‌دهد که زمان‌بندی‌های دقیق و شبیه‌سازی‌های واقع‌گرایانه‌ای از پروژه‌های خود ایجاد کنند.

ویژگی‌های SYNCHRO عبارت‌اند از:

- مدل‌سازی زمان و فضا: این ابزار به کاربران اجازه می‌دهد تا مدل‌های سه‌بعدی پروژه را با زمان‌بندی فعالیت‌ها ترکیب کنند. این قابلیت به مدیران پروژه کمک می‌کند تا پیشرفت پروژه را در زمان واقعی مشاهده کنند و انحرافات از برنامه زمان‌بندی را شناسایی نمایند.
- شبیه‌سازی پیشرفت پروژه: این نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف را فراهم می‌آورد که به کاربران اجازه می‌دهد تأثیر تغییرات در زمان‌بندی و تخصیص منابع را ارزیابی کنند.
- تحلیل داده‌ها: SYNCHRO ابزارهای تحلیلی متعددی را ارائه می‌دهد که به کاربران کمک می‌کند تا داده‌های مربوط به پیشرفت پروژه را تجزیه‌وتحلیل کنند و تصمیمات بهتری بگیرند.

زمینه‌های کاربردی SYNCHRO:

- برنامه‌ریزی دقیق: مدیران پروژه با استفاده از این ابزار می‌توانند زمان‌بندی دقیق‌تری برای فعالیت‌ها ایجاد کرده و منابع را به طور مؤثرتری تخصیص دهند.
- نظارت بر پیشرفت: این نرم‌افزار به مدیران اجازه می‌دهد تا پیشرفت واقعی پروژه را با برنامه زمان‌بندی مقایسه کنند و در صورت وجود انحرافات، اقدامات لازم را انجام دهند.
- بهبود همکاری: SYNCHRO امکان همکاری بین گروه‌های مختلف پروژه را تسهیل می‌کند، زیرا تمامی اعضای گروه می‌توانند به اطلاعات مشابهی دسترسی داشته باشند و درنتیجه هماهنگی بهتری داشته باشند.

بنابراین، استفاده از SYNCHRO 4D Pro در برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی می‌تواند دقت و کارایی فرایندهای ساخت‌وساز را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. این نرم‌افزار با ارائه ابزارهای پیشرفته برای شبیه‌سازی و تحلیل، به مدیران پروژه کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کرده و موفقیت بیشتری در اجرای پروژه‌های خود داشته باشند.

درمجموع، این ابزارها نقش مهمی در بهبود فرایند برنامه زمان‌بندی در پروژه‌های ساختمانی ایفا می‌کنند و به کاهش خطاها، افزایش دقت زمان‌بندی و بهینه‌سازی منابع کمک می‌کنند. با استفاده از این فناوری‌ها، مدیران پروژه قادر خواهند بود تا تصمیمات بهتری اتخاذ کرده و موفقیت بیشتری در اجرای پروژه‌های خود داشته باشند.

### ۱,۴,۲ ابزار AI برای برنامه زمان‌بندی

ابزارهای AI می‌توانند اطلاعات لازم مربوط به انسان را از داده‌های بزرگ در قالب‌های فایل مختلف از پروژه‌های گذشته بازیابی کنند و از این طریق فرایندهای ساخت‌وساز و کنترل پروژه را تسهیل و بهینه کنند (Shamsabadi et al., 2024).

در این بخش، ابزارهای AI که به بهبود و بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی کمک می‌کنند، توضیح داده می‌شود. هنگام بررسی، به نحوه عملکرد AI برای تسهیل برنامه زمان‌بندی و همچنین نحوه ترکیب این ابزارها با ابزارهای برنامه‌ریزی BIM توجه شده است. همان‌گونه که اشاره شد، این یکپارچگی نه‌تنها برای برنامه زمان‌بندی، بلکه برای کل فرایند مدیریت پروژه ساخت‌وساز (کنترل پیشرفت کار، کنترل هزینه و غیره) مزایای متعددی را به همراه دارد.

در این بررسی، مشخص شد که ابزارهایی وجود دارند که می‌توانند با ابزارهای برنامه زمان‌بندی مانند MS Project و Primavera P6 ترکیب شوند، اما نمی‌توانند با ابزارهای BIM ترکیب گردند. باتوجه‌به موضوع این پژوهش، تنها ابزارهای AI که امکان ترکیب با BIM را دارند (همچنین امکان ترکیب با MS Project یا Primavera P6 را نیز دارند)، ارائه شده‌اند. ترکیب از

طریق واردکردن مدل چهاربعدی BIM از یکی از ابزارهای BIM انجام شده و پس‌ازآن از الگوریتم‌های مختلف AI برای تسهیل برنامه زمان‌بندی استفاده می‌شود. روش‌های ترکیب و همچنین مزایای ارائه‌شده توسط الگوریتم‌های AI، برای هر یک از ابزارها با جزئیات بیشتری توضیح داده خواهد شد.

- **ALICE Technologies**

این ابزار اولین پلتفرم AI در جهان است که برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساخت‌وساز طراحی شده است. شرکت ALICE Technologies در سال ۲۰۱۵ بر اساس تحقیقات دانشگاه استنفورد تأسیس شد و امروزه با شرکت‌های ساختمانی پیشرو در زمینه‌های زیرساختی، ساخت‌وساز صنعتی و تجاری همکاری می‌کند. این شرکت در سه کشور به‌ویژه در آمریکا (کالیفرنیا)، جمهوری چک (پراگ) و هند (پونا) دفاتری دارد و چشم‌اندازش کاهش ۲۵ درصدی هزینه‌های ساخت‌وساز در سطح جهانی است. از این پلتفرم در صنعت ساخت‌وساز به منظور تسهیل برنامه‌ریزی دقیق زمان استفاده می‌شود؛ زیرا فرایندهای ایجاد و به‌روزرسانی برنامه‌هایی که هزینه‌ها، زمان ساخت و درعین‌حال خطر را کاهش می‌دهند، ساده می‌کند.

این پلتفرم سعی می‌کند با کمک فناوری، راه‌حل‌ها و پاسخ‌های بهینه را برای مشکلات مربوط به برنامه زمان‌بندی، خرابی، استفاده از منابع و کاهش ریسک بیابد. بسیاری از پروژه‌های ساخت‌وساز غالباً بیشتر از حد لازم طول می‌کشند، به همین دلیل تلاش‌هایی برای یافتن راه‌هایی انجام می‌شود که در آن از فناوری برای ایجاد جدول زمان‌بندی سریع‌تر/کوتاه‌تر استفاده شود. همچنین می‌توان بررسی کرد که چگونه با کمک فناوری می‌توان توقف‌ها را کاهش و کارایی کارگران را افزایش داد. امروزه تمرکز زیادی بر ساخت‌وسازهای پایدار و کاهش ضایعات شده و به همین دلیل یافتن راه‌هایی برای استفاده بهینه از منابع ضروری است. هر بار که پروژه از برنامه زمان‌بندی و بودجه تعیین‌شده منحرف می‌شود، خطرات افزایش می‌یابد و به همین دلیل است که استفاده از فناوری برای ایجاد یک جدول زمان‌بندی که بیشترین احتمال را برای تحویل پروژه در زمان و بودجه مشخص داشته باشد، ضروری است.

ALICE یک ابزار AI است که به طور خاص برای صنعت ساخت‌وساز ساخته شده و دارای قابلیت‌هایی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی است که ابزارهای برنامه‌ریزی سنتی ندارند. این ابزار به‌ویژه برای پروژه‌های بزرگ با حداقل ۷۵ میلیون دلار بسیار مفید است، زیرا خطرات برنامه‌ریزی را کاهش و امکان دستیابی به پروژه‌های سودآور را افزایش می‌دهد. این پلتفرم در مرحله ساخت‌وساز نیز مفید است، زیرا اگر تغییرات متعددی به وجود آید، به بازگشت پروژه به مسیر اصلی کمک می‌کند. مالکان، پیمانکاران و مشاوران پروژه‌های بزرگ در جهان موفق شدند تاکنون بیش از ۴۵ میلیارد دلار از حجم ساخت‌وساز را با ALICE بهینه کنند. درمجموع پروژه‌هایی که از این ابزار استفاده کرده‌اند، تغییراتی به شرح زیر را شاهد بوده‌اند:

- کاهش مدت‌زمان پروژه تا ۱۷ درصد،
- صرفه‌جویی در هزینه نیروی کار تا ۱۴ درصد،
- صرفه‌جویی در هزینه‌های تجهیزات تا ۱۲ درصد.

باتوجه‌به اینکه از این ابزار اغلب برای پروژه‌های چندمیلیون‌دلاری استفاده می‌شود، این صرفه‌جویی تفاوت محسوسی را ایجاد می‌کند.

کاربرد و سودمندی این ابزار توسط شرکت‌های بزرگ مختلفی که از آن در پروژه‌های خود استفاده و در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرده‌اند، تأیید شده است. استفاده از این ابزار به شرکت ساخت‌وساز Hawaiian Dredging این فرصت را داد تا گزینه‌های مختلفی را بررسی و مقایسه کرده و درنتیجه بهترین راه را برای اجرای پروژه دراسرع‌وقت تعیین نماید؛ زیرا برنامه‌ریزی‌های سنتی معمولاً تک‌نسخه‌ای هستند. همچنین این پلتفرم به شرکت Parsons کمک نمود تا در مناقصات رقابتی‌تر و در مرحله اجرا کارآمدتر باشد.

پلتفرم ALICE برای سازه‌های خاص مانند تونل‌ها نیز مفید است؛ به‌کارگیری موفق این ابزار در مرحله ساخت تونل Copthall در لندن و توسط گروه سرمایه‌گذاری‌های مشترک Skanska, Costain, and Strabag (SCS) این ادعا را تأیید می‌کند. در این

پروژه، ALICE به مدیر پروژه کمک کرد تا با واردکردن پارامترهای لازم و الزامات مربوط به پروژه، در عرض ۱۰ دقیقه پاسخ‌هایی در مورد سودآوری و سرعت یک برنامه زمان‌بندی مشخص دریافت نماید. همچنین با ایجاد یک برنامه زمان‌بندی جدید و همسوکردن منابع، این اطمینان را بوجود آورد که از همه منابع استفاده می‌شود. این برنامه بگونه‌ای تنظیم شده بود که نیازی به بازنگری نداشت؛ بدین ترتیب کمک زیادی به مدیریت زمان و منابع شد. با این برنامه‌ریزی، حفاری تونل یک سال زودتر به پایان رسید و این فرصت را ایجاد کرد تا کل پروژه نیم سال زودتر به تمام شود.

پلتفرم ALICE دو محصول مختلف به نام‌های ALICE Pro و ALICE Core را ارائه می‌دهد. باتوجه‌به اینکه یکی از اهداف این پژوهش استفاده از ابزارهای AI است که قابلیت ترکیب با ابزارهای BIM را دارند، ALICE Pro مورد بررسی قرار خواهد گرفت؛ زیرا استفاده از آن با یک مدل BIM سه‌بعدی شروع می‌شود. زمانی که مدل BIM موجود باشد، یک قالب با نیازهای پروژه و روش‌های ساخت ایجاد شده و پس‌ازآن برنامه زمان‌بندی با ALICE Pro شبیه‌سازی و بهینه‌سازی می‌شود. درنهایت بر اساس گزینه‌های داده شده تصمیم‌گیری و پروژه مدیریت می‌شود. مزیت استفاده از این ابزار امکان تحقیق در مورد راه‌های بالقوه متعدد برای ساخت یک پروژه به روشی بسیار سریع‌تر و آسان‌تر، قبل از شروع فاز ساخت است که ضمن افزایش احتمال برنده‌شدن پروژه‌ها، ریسک را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

باتوجه‌به اینکه ALICE Pro به مدل BIM متصل است، گزینه‌های بیشتری نسبت به ALICE Core ارائه می‌دهد، به همین دلیل است که می‌توان یک طرح پایه بر اساس مدل اولیه ایجاد کرد و پس‌ازآن از بین گزینه‌ها/سناریوهای مختلف ارائه‌شده برنامه‌های زمان‌بندی، گزینه بهینه را انتخاب نمود و آن را به‌صورت چهاربعدی تجسم کرد. این گزینه برای همکاری بین پیمانکاران و مشتریان در پروژه‌های بزرگ و پیچیده ایده‌آل است.

پس از تعیین طرح بهینه، هر دو ابزار ALICE، به دلیل قابلیت همکاری با Oracle P6 و Oracle Primavera Cloud، امکان خروجی در چندین فرمت کلاسیک مختلف را ارائه می‌دهند. این امر به‌اشتراک‌گذاری طرح را با دیگران آسان می‌کند. در مرحله ساخت، می‌توان از ALICE برای تجسم پیشرفت استفاده کرد و در صورت مشاهده تأخیر، با کمک AI می‌توان برنامه را به‌سرعت تنظیم نمود تا برنامه در مسیر پیش‌بینی‌شده باقی بماند. بدین ترتیب هنگامی‌که تأخیرها و تغییرات پیش‌بینی‌نشده در برنامه به وجود می‌آید، می‌توان هفته‌هایی را که برنامه‌ریزی سنتی برای اصلاح برنامه زمان‌بندی نیاز دارد، صرفه‌جویی کرد. با استفاده از این ابزار می‌توان سناریوهای مخاطره‌آمیز مختلف را عمداً وارد کرد و تأثیر آن‌ها را بر کل پروژه مشاهده نمود.

ALICE Pro تنها ابزاری در این پلتفرم است که می‌تواند با ابزارهای BIM ترکیب شود. در حال حاضر، فرمت‌های مدل پیشنهادی برای رابط ALICE عبارت از Autodesk's Revit (RVT) و Navisworks (NWC/NWD) هستند و این فرمت‌ها را می‌توان مستقیماً در ALICE بارگذاری نمود. اگرچه این ابزارها بیشتر توصیه می‌شوند، اما قطعاً تنها ابزارهایی نیستند که می‌توانند با ALICE Pro ترکیب شوند. به‌طورکلی می‌توان هر مدل ایجادشده در پلتفرم‌های نرم‌افزاری که قابلیت خروجی در فرمت‌های DWG، NWC یا IFC دارند را با این پلتفرم ترکیب نمود. نمونه‌هایی از برخی از پلتفرم‌هایی که قادر به چنین خروجی هستند عبارت‌اند از Rhino، Civil 3D، Archicad، Tekla، Infraworks، Inventor، AECOsim، Microstation، OpenBridge/Road و غیره.

ALICE Core ابزار جدیدی در پلتفرم ALICE است که برای شرکت‌هایی که از BIM در پروژه‌های خود استفاده نمی‌کنند نیز مفید است؛ زیرا به این ابزار می‌توان زمان‌بندی‌های موجود ایجادشده در MS Project، Primavera P6 یا Primavera Cloud را وارد کرد و پس‌ازآن فرایند ایجاد سناریوهای مختلف و بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی را پیش برد.

تفاوت بین Core و Pro در این است که Pro تولید طرح از مدل‌های سه‌بعدی و نیز تجسم چیدمان به‌صورت چهاربعدی را امکان‌پذیر می‌کند ولی در Core این امر امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، چیزی که Pro برخلاف Core ندارد، توانایی بارگیری برنامه زمان‌بندی منابع از نرم‌افزارهای MS Project، Primavera P6 یا Oracle Primavera Cloud (OPC) و خروجی برنامه OPC است. جدای از این تفاوت‌ها، سایر امکانات صرف‌نظر از اینکه کدام محصول ALICE باشد یکسان است و این امکانات عبارت‌اند از:

- بهینه‌سازی برنامه‌ریزی اولیه،
- مدل‌سازی ریسک مولد و کاهش ریسک،
- تجزیه‌وتحلیل سریع «چه می‌شود اگر»،
- برنامه‌ریزی تجزیه‌وتحلیل حساسیت،
- تسطیح منابع،
- بازنگری به دلیل خرابی و تأخیر،
- خروجی برای برنامه P6،
- خروجی برای برنامه MS Project.

پلتفرم ALICE مزایایی را ارائه می‌دهد که اکثر ابزارهای دیگر ندارند. یکی از مزیت‌های اصلی این است که محدودیتی برای تعداد کاربران وجود ندارد و امکان همکاری بین همه ذی‌نفعان ضروری در شرکت را در طول مدت پروژه فراهم می‌کند و ارتباط آن‌ها را تسهیل می‌کند که برای پروژه بسیار مهم است. علاوه بر کاربران نامحدود، داده‌های نامحدودی نیز وجود دارد؛ زیرا این پلتفرم برای پشتیبانی از نیازهای ذخیره‌سازی داده‌های پروژه‌های بزرگ و پیچیده طراحی شده است. این نرم‌افزار «مبتنی بر ابر» بوده و به همه اعضای پروژه اجازه می‌دهد تا از هر مکانی به داده‌های پروژه دسترسی داشته باشند. این پلتفرم هنگام شروع به کار با ابزارهای ALICE، کارگاه‌ها و آموزش‌های مختلفی را ارائه می‌دهد که حتی با پروژه آن شرکت تطبیق داده شده است و به‌این‌ترتیب روند یادگیری کار را به میزان قابل‌توجهی تسهیل و سرعت می‌بخشد و تمام گزینه‌هایی که این ابزار ارائه می‌دهند را کشف می‌کند.

ALICE Pro برای پروژه‌های ساختمانی بزرگ و گران‌قیمتی که نیاز به برنامه‌ریزی پیشرفته مرحله اجرا دارند و می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر نتایج نهایی پروژه تأثیر بگذارد، مناسب‌تر است. این‌گونه پروژه‌ها شامل پروژه‌های مختلف صنعتی، زیربنایی و تجاری است. پروژه‌های صنعتی شامل نیروگاه‌ها و کارخانه‌های مختلف و صنعتی شامل بزرگراه‌ها، پل‌ها، مسیرهای عبوری، تونل‌ها، راه‌آهن و مترو است. ALICE Pro اغلب برای پروژه‌های تجاری پیچیده؛ مانند ساختمان‌های بلند یا آسمان‌خراش‌ها، امکانات مراقبت‌های بهداشتی، امکانات چندمنظوره و غیره استفاده می‌شود.

### - OpenSpace

OpenSpace پلتفرمی در خدمت ثبت وقایع و مبتنی بر هوش مصنوعی برای صنعت ساخت‌وساز است. OpenSpace ضبط خودکار و نقشه‌برداری از سایت‌های ساخت‌وساز را با ویدئوی ۳۶۰ درجه اختراع کرد و پیشرفته‌ترین، سریع‌ترین و ساده‌ترین ابزار را ارائه می‌دهد. از این محصول در بیش از ۳۴ میلیارد فوت مربع از سایت‌های ساختمانی و ۲ میلیارد تصویر از پروژه‌های فعال در بیش از ۵۰۰۰۰ پروژه در سراسر جهان استفاده شده است. این پلتفرم توسط بیش از ۲۴۴ هزار کاربر در ۹۵ کشور مختلف استفاده می‌شود و چندین محصول و فناوری‌های مختلف ازجمله OpenSpace Capture، OpenSpace Vision Engine، OpenSpace Track و OpenSpace BIM+ را به کاربران خود ارائه می‌دهد. برای برنامه زمان‌بندی، بر روی OpenSpace Track تمرکز شده زیرا ابزاری است که برای پیگیری پیشرفت فعالیت‌های برنامه زمان‌بندی استفاده می‌شود. توابع و مزایای OpenSpace Capture نیز نشان داده خواهد شد، زیر ابتدا باید از OpenSpace Capture برای عملکرد OpenSpace Track استفاده شود. درنهایت، امکانات ارائه‌شده توسط OpenSpace BIM+ پوشش داده خواهد شد و به‌این‌ترتیب مزایای یکپارچه‌سازی این محصول با BIM به بهترین شکل توضیح داده خواهد شد.

OpenSpace Track ابزاری است که به طور خودکار پیشرفت در محل ساخت‌وساز را به‌منظور نظارت و بررسی درصد تکمیل کار و سرعت کار به‌آسانی انجام می‌دهد. محاسبه خودکار پیشرفت با استفاده از هوش مصنوعی، یعنی بینایی کامپیوتری و یادگیری ماشین امکان‌پذیر است که به طور قابل‌اعتمادی کار انجام شده را با داده‌های ردیابی سریع و بسیار دقیق با میانگین بیش از ۹۹ درصد دقت بررسی می‌کند. این روش، مقایسه کار انجام شده با فعالیت‌های برنامه‌ریزی‌شده را آسان‌تر کرده و در زمان موردنیاز برای نظارت دستی پیشرفت صرفه‌جویی می‌کند.

این ابزار دارای توابع/گزینه‌های متعددی است که برای برنامه زمان‌بندی مفید است. یکی از آن‌ها جدول نمای کلی است که پیشرفت فعالیت‌ها را باتوجه‌به درصد تکمیل، وضعیت و مقادیر کل پروژه نشان می‌دهد. نمایش پیشرفت همچنین می‌تواند به‌صورت نموداری ارائه شود و هر بار که از OpenSpace استفاده می‌شود به‌روز می‌شود و چنین نمایش بصری درک پیشرفت را آسان‌تر می‌کند. نقشه‌های حرارتی پلان کارگاه ساختمانی که درصد اتمام هر مکان در آن قابل‌مشاهده است به درک پیشرفت کمک می‌کند و با کلیک بر روی مکان، تصاویری از وضعیت فعلی نیز قابل‌مشاهده است. علاوه بر نظارت بر زمان موردنیاز برای انجام فعالیت‌ها، امکان نظارت بر هزینه‌ها نیز وجود دارد تا هزینه‌ها با اقلام بودجه مرتبط با شناسه‌های فعالیت برنامه زمان‌بندی هماهنگ شوند. اگر قرار باشد پیشرفت با سایر ذی‌نفعان پروژه نیز به اشتراک گذاشته شود، این امر با خروجی داده‌های پیشرفت در قالب یک فایل PDF یا CSV یا با اتصال به ابزارهای تحلیلی مانند Power BI امکان‌پذیر است.

برای استفاده از OpenSpace Track، لازم است با استفاده از OpenSpace Capture یک عکس فوری گرفته شود، پس‌ازآن می‌توان پیشرفت را کنترل کرد. OpenSpace Track از داده‌های OpenSpace Capture برای پردازش، تراز، مکان‌یابی و توزیع تصاویر استفاده می‌کند. با استفاده از OpenSpace Vision Engine، عکس‌ها به طور خودکار به جدول زمان‌بندی وارد می‌شوند. تصاویری که با استفاده از تشخیص اشیا قرار گرفته و طبقه‌بندی می‌شوند را می‌توان با استفاده از ابرهای نقطه‌ای در فضای سه‌بعدی قرار داد و در طول زمان ردیابی کرد. بدین ترتیب نقشه کمی از فعالیت‌های پروژه به دست می‌آید که می‌توان از آن برای بررسی بهره‌وری در یک مکان خاص استفاده نمود. این ابزار همچنین می‌تواند برای بهبود دقت تخمین‌ها استفاده شود، زیرا داده‌ها را در مورد میزان زمان صرف شده برای یک فعالیت و مصالح استفاده‌شده ذخیره می‌کند؛ بنابراین بزرگ‌ترین مزیت این ابزار، بهبود دقت زمان‌بندی و همچنین امکان بینش سریع در مورد اینکه آیا کارها طبق برنامه پیش می‌روند و آیا مازاد بر زمان یا هزینه وجود دارد یا خیر، می‌باشد.

OpenSpace Capture ابزاری است که برای ثبت تصاویری از محل ساخت‌وساز استفاده می‌شود و برای تجسم پیشرفت، کاهش ریسک و حل مشکلات در مرحله ساخت‌وساز مفید است. تصویربرداری از محل ساخت‌وساز با اتصال دوربین انجام می‌شود و پس‌ازآن با لمس برنامه، ضبط شروع می‌شود. ثبت ۲۵۰۰۰ فوت مربع در ۱۰ دقیقه امکان‌پذیر است و باتوجه‌به هوش مصنوعی که این ابزار را به حرکت درمی‌آورد، این امکان وجود دارد که پس از میانگین ۱۵ دقیقه اطلاعات بررسی شده و به‌این‌ترتیب یک رکورد کامل از وضعیت سایت به دست می‌آید. اگر اطلاعات مهمی وجود داشته باشد که کل گروه باید بدانند، افزودن یادداشت‌های میدانی OpenSpace ارتباطات و تصمیم‌گیری را تسهیل می‌کند. علاوه بر ضبط با دوربین، از سال ۲۰۲۱ امکان ضبط با پهپاد نیز وجود دارد که می‌توان از آن برای پرواز بر فراز محل ساخت‌وساز استفاده کرد و سپس با استفاده از دوربین دوگانه ۳۶۰ درجه یکپارچه، فیلم را روی نقشه‌های ارتفاعی کپی کرد. شرکت‌هایی که شروع به استفاده از این ابزار کرده‌اند متوجه شده‌اند که به طور متوسط هزاران دلار در هر پروژه و ساعات کار بیشتری در هفته صرفه‌جویی می‌کنند.

OpenSpace Capture قابلیت ترکیب با BIM را دارد. اگر شرکتی با BIM کار کند، می‌تواند مدل خود را به OpenSpace منتقل کند و درنتیجه پیشرفت واقعی را در مقایسه با مدل اولیه کنترل کند. به‌طورکلی، OpenSpace Capture با نرم‌افزارهای: Revizto، Procore، PlanGrid و Autodesk Construction Cloud (BIM 360 & Build) ترکیب می‌شود. ترکیب با BIM 360 Issue Tracker نیز با ارسال داده‌ها از OpenSpace Field Notes امکان‌پذیر است. همچنین می‌توان کارت شریک را به داشبورد پروژه اضافه کرد و بدین ترتیب یک نمای کلی از پروژه OpenSpace دریافت کرد و از همه ویژگی‌های OpenSpace در BIM 360/ACC استفاده کرد.

OpenSpace BIM+ مجموعه‌ای از ابزارهای سه‌بعدی است که برای بهبود کارایی هماهنگی BIM بین دفتر و محل ساخت‌وساز با تسهیل مشاهده و پیمایش مدل BIM در محل برای مهندسان طراحی شده است. این ابزار علاوه بر کاربردی‌بودن، روند به‌روزرسانی مدل‌ها و ضبط‌ها را سرعت بخشیده و ساده می‌کند و این امکان را فراهم می‌کند تا همیشه آخرین اطلاعات مربوط به مدل موجود باشد. اگر فردی از گروه پروژه در دفتر در مورد یک موضوع خاص سؤالی داشته باشد، مهندس در سایت ساخت‌وساز می‌تواند در عرض چند دقیقه پاسخی را از محل ساخت‌وساز به‌صورت تصویر یا ویدئو ارسال کند و باعث صرفه‌جویی در وقتی می‌شود که برای رسیدن به محل ساخت‌وساز صرف خواهد شد.

OpenSpace BIM+ به طور خاص برای ترکیب با مدل BIM ایجاد شده است و درواقع اگر شرکتی مدل BIM خود را نداشته باشد نمی‌توان از آن استفاده کرد. ازآنجایی‌که OpenSpace یکپارچه‌سازی با BIM را ارائه می‌دهد، می‌توان مدل‌ها را مستقیماً از BIM 360 Docs یا Autodesk Construction Cloud Build وارد کرد. پس از ترکیب، این مدل برای همه کارکنان شرکت، ازجمله مهندسان در دفتر و کسانی که در محل ساخت‌وساز هستند، در دسترس قرار می‌گیرد. همچنین امکان الحاق چندین مدل به پروژه وجود دارد که به‌این‌ترتیب یک مدل بزرگ‌تر را می‌توان به چند مدل کوچک‌تر تقسیم کرد و تمرکز بر روی بخشی را که نیاز به تجزیه‌وتحلیل جداگانه دارد آسان‌تر می‌کند. علاوه بر این، چنین کاری می‌تواند باعث صرفه‌جویی در زمان در مخفی‌کردن قطعات غیرضروری مدل شود و اتفاقاً باتوجه‌به کوچک‌تر بودن مدل، سریع‌تر بارگذاری می‌شود. در این محصول همچنین می‌توان دید که چه کسانی مدل را مشاهده می‌کنند و یک مدل خاص چند بار مشاهده شده است.

به‌طورکلی، OpenSpace BIM+ یک ماژول اضافی از OpenSpace Capture است و بدون OpenSpace Capture قابل‌استفاده نیست. OpenSpace BIM+ قابلیت‌های مقایسه BIM و ناوبری، تحلیل و مدیریت مدل‌های BIM را با استفاده از داده‌ها (مانند تصاویر و مکان) از OpenSpace Capture گسترش می‌دهد.

**- SmartPM Technologies**

SmartPM پلتفرمی است که برای مدیریت پروژه‌های ساختمانی با کمک هوش مصنوعی ساخته شده است و دقت برنامه‌ریزی را بهبود می‌بخشد. این پلتفرم یک رویکرد سیستماتیک برای تجزیه‌وتحلیل عملکرد پروژه و کنترل ریسک ارائه می‌دهد و مدیریت مؤثر منابع، اجرای تغییرات و پیش‌بینی ریسک‌ها و تأخیرها را ممکن می‌سازد.

SmartPM ابزاری است که از طریق کنترل کیفیت برنامه زمان‌بندی خودکار، برنامه‌های موجود را تقویت می‌کند. کنترل کیفیت با ارزیابی توالی فعالیت‌ها، تخصیص منابع و چارچوب زمان‌بندی انجام می‌شود و درعین‌حال هرگونه برنامه‌ریزی غیرواقعی و ناهماهنگی که می‌تواند بر پروژه تأثیر منفی بگذارد، شناسایی می‌شود. این ابزار چندین گزینه مختلف ازجمله به‌روزرسانی یکپارچگی، تجزیه‌وتحلیل تأخیر و بازیابی، تجزیه‌وتحلیل پیشرفت و عملکرد و ردیابی نقطه عطف را ارائه می‌دهد. کنترل کیفی برنامه زمان‌بندی تأیید می‌کند که این برنامه بر اساس بهترین شیوه‌ها ساخته شده و بنابراین منبع قابل‌اعتمادی برای اندازه‌گیری پیشرفت کار در محل ساخت‌وساز و همچنین برای پیش‌بینی نقاط عطف و تأخیرها/مشکلات احتمالی است. اگر در طول مدت پروژه به دلیل به‌روزرسانی‌های قبلی طرح نیاز به افزودن، حذف یا تغییر فعالیت‌های خاصی وجود داشته باشد، مهم است که اطمینان حاصل شود که فعالیت‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که همچنان امکان انجام همه کارها در داخل وجود داشته باشد. محدودیت زمان‌بندی این امر با خودکارسازی فوری و با تعیین کمیت میزان تأخیر و هر چیزی که برای بازیابی لازم است تسهیل می‌شود. همچنین، SmartPM در همان ابتدا ابزارهایی را فراهم می‌کند که می‌توانند از بروز چنین تأخیرهایی در وهله اول جلوگیری کنند. نظارت بر پیشرفت کارها با نظارت بر عملکرد انجام می‌شود که با برنامه زمان‌بندی مقایسه شده و هم‌زمان تصویرسازی می‌شود. علاوه بر نظارت بر اجرا، همچنین می‌توان با بینش‌های خاصی نتایج پروژه را پیش‌بینی کرد که می‌توان از آن برای پیش‌بینی زمان اتمام پروژه و همچنین موانع احتمالی استفاده کرد و درنتیجه پروژه را به نحو احسن مدیریت کرد.

کنترل‌های زمان‌بندی SmartPM شامل قابلیت‌های مختلفی است که برای کنترل برنامه زمان‌بندی و همچنین پیش‌بینی آن، به‌منظور فعال‌کردن تحویل به‌موقع پروژه، خدمت می‌کنند. یکی از عملکردهای اصلی، تجزیه‌وتحلیل کیفیت است که می‌تواند در چند ثانیه انجام شود و درنتیجه قابلیت اطمینان برنامه زمان‌بندی بررسی شود. همچنین می‌توان از طریق شناسایی فعالیت‌هایی که باعث تأخیر شده‌اند، تأخیر را تجزیه‌وتحلیل کرد، همچنین می‌توان فعالیت‌هایی را که هنوز می‌توانند بازیابی و مطابق برنامه زمان‌بندی اولیه انجام شوند، تعیین کرد. تجسم برای نظارت آسان‌تر ضروری است و این به‌راحتی با مقایسه کارهای برنامه‌ریزی‌شده با کارهای واقعی انجام می‌شود. به‌این‌ترتیب بین برنامه‌ریزی اولیه و بهره‌وری قابل‌دستیابی تعادل برقرار می‌شود که تحقق اهداف پروژه را تضمین می‌کند. این ابزار ارزیابی امکان‌سنجی کارها را در محدوده زمانی آسان‌تر می‌کند و از تعیین محدودیت زمانی بسیار کوتاه و فشار بیش‌ازحد نیروی کار جلوگیری می‌کند. همچنین گزینه‌ای به نام «گزارش تغییرات» وجود

دارد که در آن تغییرات کلیدی مشخص می‌شوند که باید مورد تجزیه‌وتحلیل یا بحث قرار گیرند زیرا می‌توانند باعث تأخیر یا تسریع در پروژه شوند.

در Smart PM می‌توان چندین برنامه زمان‌بندی مختلف داشت و بسته به نیاز، از یک برنامه به برنامه دیگر رفت. به لطف این انعطاف‌پذیری، SmartPM می‌تواند با نیازهای خاص بسیاری از پروژه‌های مختلف سازگار شود. SmartPM برای کار خود از ابر استفاده می‌کند که از هر رایانه، تبلت یا تلفن همراه قابل‌دسترسی است و برای استفاده از این ابزار نیازی به نصب آن نیست. همچنین SmartPM به تعداد نامحدودی کاربر اجازه استفاده می‌دهد و درنتیجه ارتباط و همکاری بین کارکنان شرکتی که از آن استفاده می‌کند را تسهیل می‌کند.

این ابزار برای تشخیص خطاها در برنامه زمان‌بندی نیز مفید است، به‌ویژه در روش مسیر بحرانی[1] (CPM) و برنامه‌ای که دارای یک مسیر بحرانی مشخص‌شده از فعالیت‌هایی است که شناوری زمانی ندارند. رایج‌ترین اشتباهات مشاهده‌شده فقدان منطق، طولانی‌بودن مدت فعالیت‌ها، تکالیف غیرواقعی و انحراف در برنامه زمان‌بندی است. هنگامی‌که SmartPM چنین خطاهایی را در برنامه زمان‌بندی شناسایی می‌کند، گزارش مفصلی برای تسهیل درک و درنتیجه ایجاد تغییرات یا تنظیمات در برنامه ارائه می‌دهد. تصحیح خطاهای برنامه زمان‌بندی با استفاده از SmartPM، از تأخیرهای احتمالی پروژه و همچنین هزینه‌های غیرضروری که ممکن است از تأخیر در فعالیت‌ها یا یک برنامه زمان‌بندی ضعیف ناشی شود، جلوگیری می‌شود. خطاها از طریق بررسی خودکار برنامه زمان‌بندی و کیفیت برنامه شناسایی و تجزیه‌وتحلیل شده و پیشنهادهایی برای تنظیمات لازم ارائه می‌شوند. اگرچه این فرایند خودکار است، بهتر است هرگونه تغییر پیشنهادی قبل از پذیرش آن‌ها و به‌روزرسانی برنامه بررسی شود. با کنترل برنامه زمان‌بندی می‌توان به طور صحیح فعالیت‌های پروژه را هماهنگ کرد و این امر احتمال اتمام کارها در محدوده زمانی را افزایش می‌دهد. همچنین، SmartPM شامل یک ویژگی Changelog است که در آن تمام تغییرات ایجادشده توسط به‌روزرسانی‌ها ذخیره می‌شوند و می‌توان مشاهده نمود که کدام تغییرات عمده یا حیاتی بوده و چگونه بر ادامه پروژه تأثیر گذاشته است. علاوه بر این ویژگی، یک نقشه حرارتی جغرافیایی نیز مشخص می‌شود که ارائه ریسک‌ها را در پروژه تسهیل می‌کند.

ترکیب SmartPM با ابزارهای موجود امکان‌پذیر است و این کار با ترکیب موتور تجزیه‌وتحلیل SmartPM با برخی از ابزارهای مورداستفاده توسط شرکت‌ها انجام می‌شود، بدین ترتیب گردش کار با رابط برنامه‌نویسی کاربردی[2] (API) و بدون نیاز به تغییر ابزارهای برنامه زمان‌بندی ساده می‌شود. SmartPM یکپارچه‌سازی با ابزارهای کلاسیک برنامه زمان‌بندی مانند MS Project و Oracle Primavera P6 را امکان‌پذیر می‌کند، اما از نوامبر ۲۰۲۳ با Construction Cloud Autodesk نیز ترکیب شده است. این ترکیب برای کمک به ذی‌نفعان پروژه طراحی شده که به‌سرعت عوامل حیاتی را ارزیابی کرده و به آن‌ها زمان بیشتری برای تمرکز بر مدیریت پروژه و کاهش ریسک می‌دهد. به همین دلیل، اکنون امکان تعبیه مدیریت پروژه و تجزیه‌وتحلیل عملکرد SmartPM به طور مستقیم در داشبورد Autodesk's Build Insights یا BIM 360 Project Home وجود دارد.

**- Doxel**

Doxel یک ابزار هوش مصنوعی است که برای مدیریت پروژه‌های ساختمانی و بهینه‌سازی آن‌ها از طریق نظارت خودکار پیشرفت ساخت‌وساز طراحی شده است. این پلتفرم دارای تجزیه‌وتحلیل قدرتمند و ابزارهای آسان برای نظارت و پایبندی به برنامه‌ها، تأیید مقادیر و عناصر نصب‌شده، کاهش خطر و مستندسازی سایت‌های ساخت‌وساز است، به همین دلیل است که ادعا می‌شود این ابزار دقیق‌ترین ردیابی پیشرفت ساخت‌وساز را ارائه می‌دهد.

نظارت بر پیشرفت ساخت‌وساز با استفاده از بینایی کامپیوتری به‌صورت خودکار انجام می‌شود، یعنی با فیلم‌برداری ۳۶۰ درجه از محل ساخت‌وساز و شمارش هر عنصر و مترمربع خطی از مواد نصب‌شده که سپس با BIM مقایسه می‌شود. به‌این‌ترتیب

1 Critical Path Method
2 Application Programming Interface

داده‌های عینی پیشرفت در محل ساخت‌وساز با درصد دقیق تکمیل تک‌تک کارها به دست می‌آید که باعث افزایش اعتماد مشتریان می‌شود.

Doxel تنها راه‌حل کامل برای نظارت بر مرحله ساخت‌وساز به شمار می‌آید، زیرا تمام عملکردهای لازم برای نظارت بر پیشرفت در یک ابزار قرار دارند. Doxel می‌تواند تمام کارهای قابل‌مشاهده را نظارت کند و حتی کوچک‌ترین جزئیاتی را که به طور بالقوه می‌تواند باعث توقف و درنتیجه تأخیر در پروژه شود را ضبط کند. با استفاده از این ابزار هوش مصنوعی، مدیران پروژه راحت‌تر و عینی‌تر از وضعیت کار مطلع می‌شوند و مهندسانی که بر پیشرفت کار در محل ساخت‌وساز نظارت می‌کنند، می‌توانند تا ۹۵ درصد زمان کمتری را نسبت به حالت عادی صرف کنند. علاوه بر نظارت بر وضعیت در محل ساخت‌وساز، با استفاده از Doxel می‌توان خطرات را نیز کاهش داد و درنتیجه به طور خودکار قابلیت اطمینان و پیش‌بینی پروژه‌های ساختمانی را افزایش داد. همچنین می‌توان مشکل تأخیر در محل ساخت‌وساز را حل کرد و کاهش داد. همان‌گونه که از داده‌ها مشخص است، مدیران پروژه‌ای که از Doxel استفاده می‌کنند، می‌توانند به طور متوسط ۱۱٪ سرعت کار را افزایش دهند و ۱۰٪ هزینه‌ها را در جریان نقدی ماهانه کاهش دهند.

Doxel نظارت ساده، دقیق و خودکار پیشرفت را در سایت امکان‌پذیر می‌کند. با استفاده از این ابزار، به دلیل عینی‌بودن آن، دقت به میزان قابل‌توجهی افزایش‌یافته است. همچنین می‌توان تا ۹۵ درصد در زمان نظارت و هماهنگی پیشرفت صرفه‌جویی کرد؛ زیرا بینشی از وضعیت کارها را بدون نیاز به مشاهده صدها عکس از محل ساخت‌وساز ارائه می‌دهد. همچنین امکان هماهنگی بصری گروه وجود دارد، زیرا می‌توان به هر جزء یک رنگ خاص اختصاص داد. در نمایش وضعیت محل ساخت، تاریخ ضبط، کف، اتمام کارها به‌صورت درصد (بسته به نوع کار) و نمودار بهره‌وری در ۶ هفته گذشته را می‌توان مشاهده کرد که خطوط مربوط به کارهای برنامه‌ریزی‌شده و کارهای واقعی انجام شده را نشان می‌دهد.

برای ثبت وضعیت در محل ساخت‌وساز کافی است؛ مانند حالت بدون دوربین از محل ساخت‌وساز عبور کرد، به همین دلیل این ضبط نیاز به تلاش یا زمان اضافی ندارد. ضبط، یعنی پیاده‌روی در محل ساخت، توسط یکی از مهندسان در محل ساخت‌وساز با راه‌اندازی اپلیکیشن Doxel بر روی تلفن همراه انجام می‌شود، اما این امکان نیز برای Doxel وجود دارد که عضو خود را برای ضبط محل ساخت‌وساز ارائه دهد.

علاوه بر دوربینی که در محل ساخت‌وساز به کلاه ایمنی وصل شده، می‌توان با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین یا لیدار نیز فیلم‌برداری کرد. Doxel در حال حاضر از دو مدل دوربین (Insta360 ONE X2 یا Insta360 ONE RS) پشتیبانی می‌کند و فیلم‌های پهپاد نظارتی ساخت‌وساز بیرونی شامل فرمت‌های MP4 و MOV برای ویدئو و JPEG برای تصاویر است. هر چیز ضبط‌شده را می‌توان از هر مکانی مشاهده کرد و بنابراین به‌راحتی از وضعیت پروژه مطلع شد.

موارد فوق به لطف هوش مصنوعی و یادگیری ماشین امکان‌پذیر است که این نرم‌افزار با آن آموزش‌دیده تا عناصر را از تصاویر تشخیص دهد و به‌مرورزمان در آن بهتر می‌شود. هنگامی‌که Doxel یک فایل ویدئویی ۳۶۰ درجه می‌گیرد، نرم‌افزار تصاویر را تجزیه‌وتحلیل می‌کند، هر عنصر قابل‌مشاهده را از انواع مختلف کار (که به معماری، سازه، حفاظت در برابر آتش و غیره تقسیم می‌شود) شناسایی و شمارش می‌کند. پس‌ازاین مراحل مشخص‌شده تکمیل برای انواع کارها به‌صورت بصری در مدل سه‌بعدی پروژه برجسته می‌شود و گروه کیفیت نتایج نرم‌افزار را بررسی می‌کند که به آموزش نرم‌افزار و بهبود آن در طول زمان کمک بیشتری می‌کند.

ازنظر برنامه زمان‌بندی، گزینه مقایسه کارهای برنامه‌ریزی‌شده با وضعیت واقعی کار در محل ساخت‌وساز حائز اهمیت است. برای درک پیشرفت و تاریخ‌های کلیدی که نشان‌دهنده نقاط عطف پروژه هستند، یکپارچگی با ابزار برنامه زمان‌بندی ضروری است که به‌زودی در مورد آن کمی بیشتر گفته می‌شود.

این ابزار علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، می‌تواند برای صرفه‌جویی در هزینه نیز مفید باشد، زیرا امکان پرداخت هزینه کار بر اساس عملکرد، یعنی پیشرفت عینی را فراهم می‌کند، در مقابل پرداخت زمانی که تخمین زده می‌شود برای انجام یک کار خاص نیاز است. مزیت بزرگ این ابزار این است که می‌تواند تعیین کند کدام آثار در یک‌لحظه خاص حیاتی هستند و درنتیجه بیشترین

اولویت را برای اجرا دارند. عملکرد جالبی که Doxel دارد، توانایی دیدن آنچه در پشت دیوارها یا سقف‌ها وجود دارد است که به‌ویژه در هنگام بازسازی یا نوسازی و زمانی که به‌طورقطع مشخص نیست که کدام لایه‌ها را می‌توان در داخل عناصر یافت بسیار مفید است.

از دیدگاه سرمایه‌گذار، Doxel یک ابزار ایده‌آل است؛ زیرا امکان دید کامل را فراهم می‌کند که به‌ویژه هنگام نظارت بر پیشرفت و هنگام پرداخت مفید است، زیرا سرمایه‌گذار می‌تواند مقادیر واقعی نصب‌شده، نه‌فقط برآورد آن‌ها را ببیند. برای مهندسان در محل، این ابزار بیشترین تفاوت را در جلسات هماهنگی ایجاد می‌کند، جلساتی که سازنده‌تر هستند؛ زیرا پیشرفت کار به طور عینی و سریع پیگیری می‌شود.

در Doxel، امکان ترکیب یک برنامه زمان‌بندی ایجادشده در MS Project یا Primavera P6 وجود دارد، ابزارهایی که به طور خاص برای تهیه برنامه‌های زمان‌بندی ساخته شده‌اند. ابزارهای BIM که می‌توانند با Doxel ترکیب شوند، Autodesk's Forge و Navisworks هستند که Navisworks توانایی ایجاد یک مدل چهاربعدی را ارائه می‌دهد و سپس به Doxel داده می‌شود تا پیشرفت را در مقایسه با مدل BIM ردیابی کند. Autodesk Forge برای مقایسه عکس‌های ۳۶۰ درجه با مدل BIM استفاده می‌شود. برخی از ابزارهای دیگری که می‌توانند ترکیب شوند عبارت‌اند از Insta360، Dron و Navvis (که برای ثبت وضعیت محل ساخت‌وساز استفاده می‌شوند)، سپس Revizto، Procore و BIM Track (برای مشکلات ردیابی) و Onedrive، MS Sharepoint، Box، Google. Drive و Dropbox (که برای به‌اشتراک‌گذاری فایل استفاده می‌شوند).

به‌طورکلی در طول مدت پروژه تغییرات مکرری در برنامه زمان‌بندی و همچنین مدل BIM وجود دارد. با درنظرگرفتن این موضوع، Doxel به‌گونه‌ای طراحی شده است که وقتی برنامه زمان‌بندی یا مدل به‌روز می‌شود، تغییرات به طور خودکار در Doxel به‌روز می‌شود، به همین دلیل است که همیشه به طور خودکار آخرین داده‌های پروژه را دارد.

درنهایت، برخی از داده‌هایی که در مورد مزایای استفاده از این ابزار در صنعت ساخت‌وساز صحبت می‌کنند عبارت‌اند از:

- ۹۵ درصد زمان کمتر موردنیاز برای پیگیری پیشرفت با خودکارسازی هوش مصنوعی،
- کاهش ۱۰۰ درصدی مشکل صورتحساب با داده‌های بصری به‌عنوان پشتیبان،
- ۲۱ درصد از میانگین بیش‌ازحد در صنعت ساخت‌وساز با داده‌های عینی حذف می‌شود،
- ۱۱ درصد تحویل پروژه سریع‌تر به دلیل افزایش بهره‌وری نیروی کار.

## ۲. شناسایی چالش‌ها و محدودیت‌های یکپارچه‌سازی BIM و AI در ساخت‌وساز

فقدان فرم استاندارد قرارداد برای اجرای BIM، پذیرش و اجرای آن را در پروژه‌های ساختمانی کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه محدود می‌کند. این امر باعث ایجاد مشکل در بهبود عملکرد پروژه‌های ساختمانی با استفاده از فناوری‌های پیشرفته می‌شود (Hojati et al., 2024).

توسعه فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی (AI) و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) پتانسیل‌های زیادی را برای بهینه‌سازی فرایند در صنعت ساخت‌وساز به ارمغان می‌آورد. هوش مصنوعی تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ، تجزیه‌وتحلیل پیش‌بینی‌کننده، خودکارسازی فرایند و سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند را امکان‌پذیر می‌کند، درحالی‌که BIM یک نمایش دیجیتالی جامع از پروژه‌های ساخت‌وساز را در کل چرخه عمر آن‌ها ارائه می‌کند. ترکیب این دو فناوری نوید تسریع فرایند، کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت و کارایی را می‌دهد.

بااین‌حال، باوجود مزایای آشکار، یکپارچه‌سازی BIM و AI با تعدادی چالش و محدودیت مواجه است. در این بخش موانع کلیدی که مانع پذیرش گسترده‌تر این فناوری‌ها در ساخت‌وساز می‌شوند، ازجمله جنبه‌های فنی، سازمانی، اقتصادی و مقرراتی

بررسی می‌شوند. شناسایی این چالش‌ها کلید توسعه استراتژی‌هایی است که اجرای موفقیت‌آمیز و بهره‌برداری از پتانسیل BIM و AI در صنعت را ممکن می‌سازد.

## ۲,۱ چالش‌های یکپارچه‌سازی BIM و AI

اگرچه یکپارچه‌سازی BIM و AI مزایای زیادی را به همراه دارد، اما چالش‌های خاصی وجود دارد که باید با آن‌ها روبرو شد. شناسایی و برجسته‌کردن چالش‌ها ضروری است، زیرا درک آن‌ها حل چنین موانعی را تسهیل کرده و امکان اجرای ابزارها را با پتانسیل کامل آن‌ها فراهم می‌کند.

به‌طورکلی، مشخصه اصلی صنعت ساخت‌وساز، دیجیتالی‌شدن کند و وابستگی بیش‌ازحد به روش‌های سنتی و دستی است؛ بنابراین، چالش‌های این صنعت اغلب با سطوح پایین پذیرش فناوری و تخصص فناوری ناکافی مرتبط است که منجر به تأخیر در پروژه، افزایش هزینه‌ها، بهره‌وری پایین و تصمیم‌گیری ناآگاهانه می‌شود (Datta et al., 2024).

باتوجه‌به اینکه هوش مصنوعی و کاربرد آن در صنعت ساخت‌وساز هنوز یک مفهوم نسبتاً جدید برای اکثر شرکت‌ها است، امکان مواجهه با چالش‌های خاصی دررابطه‌با کاربرد هوش مصنوعی برای برنامه زمان‌بندی، مانند عدم دسترسی به داده‌های تأییدشده یا درک ضعیف از فناوری و پتانسیل‌های آن وجود دارد.

از سوی دیگر، تعداد شرکت‌ها و ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز که از BIM استفاده می‌کنند سال‌به‌سال در حال افزایش است. باوجوداین، استقبال و استفاده از آن همچنان کمتر از حد انتظار است و دلیل آن چالش‌های خاصی است که ذی‌نفعان این صنعت در هنگام پیاده‌سازی ابزارهای BIM با آن مواجه هستند. رایج‌ترین چالش‌های این پیاده‌سازی، نبود تخصص موردنیاز برای استفاده از ابزار BIM و استاندارد نبودن صنعت ساخت‌وساز است و به همین دلیل سرمایه‌گذاری در آموزش ضرورت دارد.

### ۲,۱,۱ قابلیت همکاری و یکپارچه‌سازی داده‌ها

اصلی‌ترین و رایج‌ترین چالش‌ها هنگام یکپارچه‌سازی BIM و AI مربوط به قابلیت همکاری و یکپارچه‌سازی داده‌ها است، زیرا اغلب اتفاق می‌افتد که ابزارهای BIM و AI از ساختارهای داده متفاوتی استفاده می‌کنند که تبادل و همگام‌سازی داده‌ها را دشوار یا حتی غیرممکن می‌کند.

BIM داده‌های گسترده مربوط به ویژگی‌های پروژه، روابط و کمیت‌های فضایی و اطلاعات جغرافیایی را تولید می‌کند؛ از سوی دیگر، سیستم‌های AI بر داده‌های ساختاریافته موردنیاز برای تصمیم‌گیری تکیه می‌کنند. به همین دلیل، اغلب هنگام یکپارچه‌سازی BIM و AI به دلیل تفاوت در قالب‌های داده، استانداردها و معناشناسی، مشکلاتی وجود دارد.

### ۲,۱,۲ ضعف پذیرش کاربر و نیازهای آموزشی

ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز عموماً در برابر تغییرات و روش‌های جدید کار مقاومت می‌کنند. این یک چالش بزرگ برای اجرای موفقیت‌آمیز BIM و AI در پروژه‌های ساختمانی است؛ زیرا مستلزم کسب پذیرش از سوی ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز شامل طراحان، مهندسان سایت، مدیران پروژه، معماران و دیگران است. به همین دلیل بسیار مهم است که بر عدم آگاهی آن‌ها تأثیر گذاشته شود. باتوجه‌به اینکه ممکن است نیاز به استفاده از ابزارهای BIM و AI برای پروژه وجود داشته باشند، هدف اولیه آموزش و دستیابی به پذیرش افراد حرفه‌ای در این صنعت به دلیل تأثیر قابل‌توجه آن‌ها بر سایر ذی‌نفعان و پذیرش و درک سرمایه‌گذاران است. برای دستیابی به این مهم، اطلاع‌رسانی و آموزش متخصصان و سرمایه‌گذاران در مورد تمامی مزایای این ابزارها و درنتیجه تشویق آن‌ها به استفاده از آن‌ها بسیار مهم است. متأسفانه، روند پذیرش BIM و AI بسیار کند است که نشان‌دهنده ترمزی برای سرمایه‌گذاری در توسعه بیشتر این ابزارها است.

شروع استفاده از این ابزارها برای برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی با این واقعیت دشوار روبرو شده است که برای استفاده مؤثر از آن‌ها، درک الگوریتم‌های هوش مصنوعی ضروری است. به همین دلیل است که سازمان‌دهی آموزش برای کارکنان ضروری است که نشان‌دهنده سرمایه‌گذاری اضافی در زمان و پول است. ضرورت آموزش همراه با کمبود برنامه‌های آموزشی، چالش بزرگی را برای پیاده‌سازی ابزارها و فناوری‌های جدید به نمایش می‌گذارد.

### ۲,۱,۳ هزینه‌های سرمایه‌گذاری

یکی دیگر از موانعی که باعث می‌شود بسیاری از شرکت‌ها استفاده از BIM و AI را کنار بگذارند، هزینه است. برای یکپارچه‌سازی BIM و AI در پروژه‌های ساختمانی، لازم است مبالغ قابل‌توجهی برای خرید مجوزهای نرم‌افزاری و قطعات کامپیوتری مناسب (کارت‌های گرافیک، حافظه رم...) سرمایه‌گذاری شود و همچنین به کارکنان آموزش داده شود تا یاد بگیرید که چگونه از تمام ویژگی‌های این ابزار استفاده کنید. باتوجه‌به نیاز به سرمایه‌گذاری‌های کلان در همان ابتدا، شرکت‌های ساختمانی باید تمام مزایا، یعنی مزایای ابزارهای BIM و AI را بادقت بررسی کنند و سپس احتمال بازگشت سرمایه[1] (ROI) یعنی سودآوری سرمایه‌گذاری در ابزارهای مذکور. را بسنجند. چنین مطالعه و محاسبه سودآوری سرمایه‌گذاری در ابزارهای BIM و AI یکپارچه زمان زیادی را برای شرکت‌های ساختمانی می‌گیرد، به همین دلیل است که نشان‌دهنده چالش بزرگی برای پیاده‌سازی BIM و AI در ساخت‌وساز است.

همچنین تقریباً ۹۰ درصد شرکت‌های ساختمانی را بنگاه‌های کوچک یا خرد تشکیل می‌دهند و به همین دلیل معمولاً سرمایه کافی برای سرمایه‌گذاری در ابزارهای BIM و AI که قیمت آن‌ها بالاست را ندارند. با مطالعه ابزارهای AI که در حال حاضر در بازار وجود دارند و برای تسهیل برنامه زمان‌بندی مفید هستند، می‌توان متوجه شد که اکثر شرکت‌ها ابزارهای خود را برای تعداد نامحدودی از کاربران ارائه می‌دهند؛ بنابراین، شرکتی که تصمیم به خرید یک ابزار AI می‌گیرد، این امکان را پیدا می‌کند که همه اعضایش بتوانند از آن ابزار استفاده کنند. به همین دلیل است که واضح است که ابزارهای AI برای شرکت‌های بزرگ که تنها تعداد کمی از آن‌ها وجود دارد، سود بیشتری خواهند داشت.

### ۲,۱,۴ پیچیدگی پروژه‌های ساختمانی

پروژه‌های ساختمانی از تعداد زیادی اجزای مختلف مانند مصالح یا فناوری‌های مختلف ساختمانی تشکیل شده‌اند که به دلیل پیچیدگی و پویایی خود، چالش قابل‌توجهی را برای یکپارچه‌سازی BIM و AI برای مدیریت پروژه‌های ساختمانی نشان می‌دهند. برای اینکه الگوریتم‌های AI بتوانند داده‌های پروژه را مدیریت کنند، باید بتوانند ساختارهای داده‌های مختلف را درک و تجزیه‌وتحلیل کنند، درصورتی‌که قالب‌های داده استاندارد نیستند و از پروژه‌ای به پروژه دیگر یا از شرکتی به شرکت دیگر متفاوت است. علاوه بر این‌که الگوریتم‌های AI باید داده‌های پروژه را درک کنند، به دلیل ML باید بتوانند در مدت‌زمان کوتاهی تصمیم بگیرند و درنتیجه برنامه‌های زمان‌بندی یا سایر جنبه‌های پروژه مانند بهینه‌سازی هزینه‌ها، کیفیت یا ایمنی را بهینه کنند. باتوجه‌به تمامی موارد ذکرشده و همچنین باتوجه‌به اینکه پروژه‌های ساختمانی و مدل‌های آن‌ها مدام در حال تغییر و بهبود هستند، الگوریتم‌های AI باید بهبود یابند تا به‌روز بمانند و بتوانند با پروژه‌های جدید با حفظ دقت سازگار شوند.

### ۲,۱,۵ نیاز به حجم بالای داده پروژه برای یادگیری ماشین

در موارد متعددی، در خصوص نیاز به حجم زیادی از داده‌های پروژه برای اجرای موفقیت‌آمیز هوش مصنوعی مطالبی بیان شد. این دقیقاً یکی از چالش‌های اصلی است؛ زیرا اکثر شرکت‌های ساختمانی نمی‌توانند داده‌های کافی برای الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ارائه پیش‌بینی‌ها و تحلیل داده‌های جامع و دقیق ارائه دهند.

1 Return of Investment

یکی از چالش‌های اصلی به‌کارگیری هوش مصنوعی در صنعت ساخت‌وساز، نبود داده‌های استاندارد در این صنعت است. منحصربه‌فرد بودن پروژه‌های ساخت‌وساز منجر به داده‌های طراحی می‌شود که ممکن است به‌آسانی در قالب‌های قابل‌استفاده توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی در دسترس نباشند (Victor, 2023). همچنین برای ارائه پیشنهادها یا تصمیم‌گیری در مورد جدول زمان‌بندی، هوش مصنوعی از یادگیری ماشین استفاده می‌کند که به مقدار زیادی داده در مورد پروژه و پروژه‌های قبلی نیاز دارد. باتوجه‌به اینکه در صنعت ساخت‌وساز کمبود چنین داده‌هایی وجود دارد، این موضوع نشان‌دهنده یک مانع قابل‌توجه در اجرای این فناوری‌ها است.

### ۲,۱,۶ امنیت داده‌ها

پروژه‌های ساختمانی حاوی مقدار زیادی داده شامل اطلاعات ارزشمند و محرمانه مربوط به محاسبه، طراحی، برنامه زمان‌بندی یا پروتکل ایمنی هستند. یکپارچه‌سازی BIM و AI باتوجه‌به اینکه داده‌های پروژه که حساس هستند به‌صورت دیجیتالی در آن ذخیره و پردازش می‌شوند، خطرات امنیت سایبری را به وجود می‌آورد. پروژه‌های ساختمانی به دلیل اطلاعات ارزشمندی که دارند، می‌توانند هدف حملات سایبری قرار بگیرند و الگوریتم‌های هوش مصنوعی که داده‌های BIM را تجزیه‌وتحلیل می‌کنند می‌توانند در معرض هک، نقض داده‌ها و دسترسی غیرمجاز باشند. باتوجه‌به تمام موارد ذکرشده، ترس خاصی در هنگام اجرای این ابزارها وجود دارد که روند پذیرش BIM و AI در صنعت ساخت‌وساز را به طور قابل‌توجهی کند می‌کند؛ بنابراین، حل این مشکل از طریق معرفی اقدامات امنیتی قوی سایبری برای محافظت از سیستم BIM-AI در برابر فعالیت‌های مخرب، یکی از چالش‌های اصلی برای پیاده‌سازی BIM و هوش مصنوعی است (Rane, 2023).

## ۲,۲ پیشنهادها برای حل موانع و بهبود راه‌حل‌های فناوری

در این بخش از مقاله برخی از ایده‌ها و پیشنهادهایی که می‌توانند پیاده‌سازی و یکپارچه‌سازی BIM و AI را بهبود بخشند، عنوان می‌شود. در ادامه، پیشنهادهای توسعه از جنبه‌های نظارتی، سازمانی، فنی و اقتصادی ارائه شده تا بتوان از تمام پتانسیل‌های BIM و AI در صنعت ساخت‌وساز بهره‌برداری کرد.

### ۲,۲,۱ ایجاد فرمت‌های استاندارد داده

باتوجه‌به اینکه یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های یکپارچه‌سازی BIM و AI قابلیت همکاری و ترکیب داده‌ها است، این مشکل باید یکی از محورهای اصلی تحقیقات آینده باشد. یک فعالیت کلیدی برای پرداختن به این موضوع، توسعه رویکردی استاندارد برای نمایش و اشتراک‌گذاری داده‌ها خواهد بود. به‌این‌ترتیب، ارتباط مؤثر بین BIM و AI فعال شده و همکاری و انسجام در پروژه‌های ساختمانی تقویت می‌شود.

ایجاد فرمت‌های استاندارد داده نه‌تنها تبادل بین سیستم BIM-AI را آسان می‌کند، بلکه ارتباط بین سیستم‌های اینترنت اشیا[1] (IoT) را نیز تسهیل می‌کند. استاندارد پیشنهادی که همه ابزارهای BIM می‌توانند و باید به آن پایبند باشند، قالب کلاس‌های بنیاد صنعت[2] (IFC) است. اگر ابزارهای اینترنت اشیا از پروتکل‌های ارتباطی استانداردشده مانند انتقال تله‌متری صف پیام‌های مهندسی[3] (MQTT) یا پروتکل برنامه کاربردی محدودشده[4] (CoAP) استفاده کنند، قابلیت همکاری و سازگاری بین سیستم BIM-AI و IoT امکان‌پذیر است (Rane et al., 2023).

به‌منظور فعال‌کردن برنامه‌های نرم‌افزاری مختلف برای برقراری ارتباط مؤثر و اشتراک‌گذاری داده‌های پروژه، بسیار مهم است که از رابط‌های برنامه‌نویسی کاربردی باز استفاده شود. رابط‌های برنامه‌نویسی کاربردی[5] (API). با ترکیب APIهای باز،

1 Internet of Things
2 Industry Foundation Classes
3 Message Queuing Telemetry Transport
4 Constrained Application Protocol
5 Application Programming Interfaces

پلتفرم‌هایی مانند BIM توانایی برقراری ارتباط یکپارچه با الگوریتم‌های هوش مصنوعی و حسگرهای اینترنت اشیا را دارند، درنتیجه توسعه راه‌حل‌ها و برنامه‌های کاربردی سفارشی‌شده را برای رفع نیازهای پروژه تقویت می‌کنند (Rane et al., 2023).

همچنین مهم است که همه پلتفرم‌ها «مبتنی بر ابر» [1] باشند تا تجزیه‌وتحلیل و ذخیره‌سازی مجموعه‌داده‌های بزرگ مشخصه ابزارهای BIM را تسهیل کند، اما همچنین برای برآوردن نیازهای محاسباتی ابزارهای هوش مصنوعی، باتوجه‌به اینکه الگوریتم‌های هوش مصنوعی به قدرت پردازش زیادی نیاز دارند.

### ۲،۲،۲ تنظیم استانداردهای بین‌المللی مدیریت اطلاعات

برای دستیابی به هماهنگی، استانداردسازی قالب داده برای ویرایش و به‌روزرسانی استانداردهای بین‌المللی فعلی ضروری است. این بخش، به طور خاص بر استانداردهای بین‌المللی برای مدیریت اطلاعات در طول چرخه عمر دارایی‌های ساخته‌شده با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (ISO 19650) و استانداردسازی قالب‌های داده برای تبادل (ISO 16739) تمرکز خواهد کرد.

ISO 19650 شکل تحویل اطلاعات پروژه را تشریح می‌کند و سه حوزه مدیریت اطلاعات را در نظر می‌گیرد: مشخص‌کردن اطلاعات موردنیاز توسط کارفرما یا تأمین‌کنندگان مالی، برنامه‌ریزی تحویل اطلاعات توسط هماهنگ‌کننده BIM و تحویل اطلاعات توسط شرکت برنامه‌ریزی و ساخت‌وساز. بااین‌حال، برخی از مسائل مربوط به مدیریت اطلاعات با BIM وجود دارد که به طور کامل توسط استانداردهای ISO پوشش داده نمی‌شود. به‌عنوان‌مثال، این استاندارد نحوه ترکیب ابزارهای BIM را در فرایندهای سنتی اساسی صنعت ساخت‌وساز تعریف نمی‌کند؛ همچنین، فرایند تبادل اطلاعات بین همه ذی‌نفعان و نحوه تبادل و به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات در فرایند BIM تعریف نشده است. استانداردهایی برای یک محیط داده مشترک و عملیات «مبتنی بر ابر» نیز هنوز برای برنامه‌های فعلی BIM ایجاد نشده است (Shamreeva & Doroschkin, 2021)؛ بنابراین، این استاندارد رویکرد خاصی را برای اجرای مؤثر BIM در شرکت‌های طراحی یا ساخت‌وساز پیشنهاد نمی‌کند و این چیزی است که باید روی آن کار کرد تا فرایند پیاده‌سازی تسهیل شود.

### ۲،۲،۳ کاهش میزان داده‌های موردنیاز

تعداد زیادی از شرکت‌های ساختمانی تمام داده‌های لازم در مورد پروژه‌های خود را ندارند یا این داده‌ها به‌درستی ذخیره نمی‌شوند. ازآنجایی‌که یادگیری ماشین به حجم زیادی از داده‌های پروژه نیاز دارد، این موضوع می‌تواند مشکل‌ساز باشد. این مشکل را می‌توان با معرفی پروتکلی برای مدیریت و ذخیره‌سازی داده‌ها و همچنین از طریق نوآوری‌های هوش مصنوعی حل کرد و در آینده می‌توان به کارکرد ابزارهایی دست‌یافت که پیش‌بینی دقیق آن‌ها به مقدار کمتری از اطلاعات نیاز دارد.

انجمن تحقیقاتی Fraunhofer در حال کار برای حل این مشکل از طریق تحقیقات یادگیری ماشین با مقادیر کمتر داده است (Shamreeva & Doroschkin, 2021). این تحقیق می‌تواند تأثیر بسزایی در آینده پیاده‌سازی هوش مصنوعی داشته باشد.

### ۲،۲،۴ ایجاد یک محیط امن دیجیتال

یکی از مشکلات اصلی یکپارچه‌سازی BIM و AI، ترس از تخریب حریم خصوصی و امنیت داده‌ها است که می‌تواند منجر به سوءاستفاده از اطلاعات پروژه شود و نشان‌دهنده ترمز بزرگی برای ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز برای استفاده از چنین ابزارهایی است. برای حل این مشکل، شرکت‌های ساختمانی باید روی یک سیستم امنیتی سرمایه‌گذاری کنند تا از تمام اطلاعات ذخیره شده دیجیتال محافظت شود. علاوه بر سرمایه‌گذاری توسط شرکت‌های ساختمانی، سرمایه‌گذاری در امنیت سایبری ابزارهای

1 Cloud-based platforms

BIM و AI برای افزایش حفاظت از آن‌ها نیز مهم است و آن‌ها را به مکان بسیار امن‌تری برای ذخیره‌سازی داده‌های دیجیتال تبدیل می‌کند. با سرمایه‌گذاری در امنیت، ترس از پیاده‌سازی این ابزارها کاهش‌یافته و به طور خودکار تعداد کاربران را افزایش می‌دهد.

همچنین به موضوع حقوقی مربوط به مسئولیت در صورت اشتباه و تصمیمات نادرست مبتنی بر AI نیز باید رسیدگی شود. به‌منظور کاهش نگرانی‌ها و بی‌اعتمادی هنگام یکپارچه‌سازی BIM و AI در پروژه‌های ساختمانی، تعیین مقررات و استانداردهای واضحی که جنبه‌های اخلاقی و قانونی را تنظیم می‌کنند، ضروری است (Rane, 2023).

### ۲,۲,۵ آموزش ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز

یکی از راه‌های سرعت‌بخشیدن به فرایند پیاده‌سازی فناوری‌های BIM و AI، نیاز به نیروی کار ماهرتر در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه در فناوری‌های دیجیتال است. این امر می‌تواند از طریق اجرای برنامه‌های آموزشی جامع و همچنین آموزش بهتر دانش‌آموزان در طول تحصیل امکان‌پذیر شود، بدین ترتیب با هر نسل جدید، ذی‌نفعان بیشتری در ساخت‌وساز وجود خواهند داشت که سواد فناوری اطلاعات بیشتری دارند و با عملکرد برخی ابزارهای BIM و AI آشناتر هستند.

به‌منظور تحقق پتانسیل کامل ابزارهای BIM و AI، یک چارچوب آموزشی جامع برای گسترش پذیرش و اجرای ابزارهای BIM یکپارچه با AI پیشنهاد می‌شود؛ به‌این‌ترتیب می‌توان نیروی انسانی متخصص در مدیریت و استفاده از ابزارهای BIM و AI ایجاد کرد و از تمام امکاناتی که این ابزار برای مدیریت پروژه ارائه می‌دهد، استفاده نمود.

### ۲,۲,۶ شفافیت سودآوری سرمایه‌گذاری در ابزارهای BIM و AI

ضرورت دارد که هنگام پیاده‌سازی ابزارهای BIM و AI، مبالغ بیشتری برای شروع استفاده از آن‌ها اختصاص داده شود. باتوجه‌به افزایش سرمایه‌گذاری، شرکت‌های ساختمانی باید برای مطالعه مزایای ابزار و احتمال بازگشت سرمایه وقت بگذارند و این چالشی است که باید در آینده روی آن تمرکز کرد. پیشنهادی برای کاهش هزینه‌ها این است که آموزش در قیمت مجوز گنجانده شود تا شرکت‌ها بتوانند بلافاصله با استفاده از تمام مزایای این ابزار شروع به کار کنند. همچنین، ارائه واضح تمام مزایایی که این ابزارها ارائه می‌دهند، مانند کاهش زمان و هزینه ساخت، همراه با بهبود کیفیت و ایمنی، برای سرعت‌بخشیدن به اجرا بسیار مفید خواهد بود. به‌این‌ترتیب شرکت‌ها برای سرمایه‌گذاری اولیه توجیه شده و زمان کمتری را برای محاسبه سودآوری سرمایه‌گذاری صرف می‌کنند و این امر روند پیاده‌سازی BIM و AI را تسریع می‌کند.

### ۲,۲,۷ تحقیقات بیشتر در مورد کاربرد عملی

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که یکپارچه‌سازی BIM و AI پردازش داده‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد، به همین دلیل می‌توان طراحی و برنامه‌ریزی پروژه را تجزیه‌وتحلیل کرد، خطرات را پیش‌بینی نمود و همچنین بر تجهیزات نظارت کرد. بااین‌حال، اگرچه بسیاری از کارشناسان از استفاده از سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی حمایت می‌کنند، اما درواقع مطالعات زیادی وجود ندارد که کاربرد عملی این روش‌ها را در صنعت ساخت‌وساز نشان دهد (Shamreeva & Doroschkin, 2021). مطالعاتی وجود دارد که برخی از متداول‌ترین روش‌های مورداستفاده هوش مصنوعی در ساخت‌وساز را شرح داده است، اما اکثریت‌قریب‌به‌اتفاق این مطالعات به‌جای عملی، تئوری هستند.

به دنبال این مشکل، تحقیقات در مورد رباتیک و مزایای آن در خودکارسازی فرایند ساخت‌وساز در سال‌های اخیر رواج یافته، اما این تحقیقات عموماً در آزمایشگاه‌ها انجام شده است. محیط‌های آزمایشگاهی می‌توانند به طور قابل‌توجهی با کاربرد و شرایط در سایت‌های ساخت‌وساز واقعی متفاوت باشند، به همین دلیل لازم است که تحقیقاتی در سایت‌های ساخت‌وساز واقعی نیز انجام شود.

باتوجه‌به همه موارد فوق، می‌توان به این نتیجه رسید که در خصوص ترکیب عملی این ابزارها در برخی از شرکت‌های ساختمانی هنوز به‌اندازه کافی تحقیق نشده است. به‌علاوه، تأثیر استفاده از چنین سیستم‌هایی بر یک پروژه ساخت‌وساز واقعی نیز به طور مبهم تعریف شده است (Shamreeva & Doroschkin, 2021). به همین دلیل تأثیر این ابزارها بر صنعت ساخت‌وساز را باید از طریق مطالعه کاربردهای عملی با جزئیات بیشتری بررسی کرد. یک پیشنهاد برای تحقیقات آینده، تمرکز بر مطالعه کاربرد عملی ابزارهای ترکیبی BIM و AI است. این امر از طریق مطالعات موردی مختلف امکان‌پذیر است که در آن‌ها کاربرد ابزارهای خاص در برنامه زمان‌بندی پروژه‌های واقعی توضیح داده می‌شود و پس‌ازآن می‌توان تأثیر این کاربرد را بر پروژه (مثلاً تأثیر بر کاهش مدت‌زمان و هزینه‌ها و افزایش ایمنی سایت ساخت‌وساز) توصیف کرد.

### ۲,۲,۸ پذیرش فناوری‌های جدید و ادامه تحقیقات

به‌منظور دستیابی به پیشرفت در امکانات فناوری‌های BIM و AI، پذیرش برخی از فناوری‌های جدیدتر مانند اینترنت اشیا و واقعیت افزوده[1] (AR) مفید خواهد بود (Rane, 2023). باتوجه‌به اینکه پروژه‌های ساختمانی و درنتیجه مدل‌های آن‌ها دائماً در حال پیشرفت و تغییر هستند، ابزارهای BIM و AI برای به‌روز ماندن و سازگاری با پروژه‌های جدید با حفظ اثربخشی نیاز به بهبود دارند.

درنهایت، برای ادامه توسعه BIM و AI، ادامه تحقیقات مشترک بسیار مهم است. به‌این‌ترتیب می‌توان به پیشرفت الگوریتم‌های هوش مصنوعی و همچنین نرم‌افزار BIM پی برد که منجر به مدل‌های پیش‌بینی پیچیده و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری می‌شود که با نیازهای ساخت‌وساز سازگار می‌شوند (Rane, 2023). درهرحال، تقویت همکاری بین ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز ضروری است، زیرا تسریع در پذیرش این فناوری‌ها در بسیاری از شرکت‌ها و پروژه‌های ساختمانی ضروری است. همه موارد فوق برای دستیابی به نوآوری و همچنین بهبود پایداری ساخت‌وساز و کارایی این صنعت کلیدی است.

## ۳. بحث

یکپارچه‌سازی BIM و AI توسط بسیاری از کارشناسان به‌عنوان محرک نوآوری در صنعت ساخت‌وساز شناخته شده است. به لطف پیشرفت‌های فنّاورانه اخیر، مدیریت پایگاه‌داده به طور قابل‌توجهی تغییر کرده و امکان توسعه بیشتر سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را فراهم کرده است. در ۲۰ سال گذشته حجم تحقیقات در زمینه هوش مصنوعی رشد قابل‌توجهی داشته است و بسیاری از کشورها باتوجه‌به اینکه حتی می‌تواند بر رقابت‌پذیری ملی تأثیر بگذارد، روی تحقیقات هوش مصنوعی سرمایه‌گذاری می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، چین با طرح توسعه هوش مصنوعی خود، تبدیل‌شدن به یک رهبر جهانی در تئوری، فناوری و کاربرد هوش مصنوعی را هدف خود قرار داده است. در اروپا و آمریکا نیز هوش مصنوعی به یکی از موضوعات اصلی تحقیق و نوآوری تبدیل شده است (Shamreeva & Doroschkin, 2021).

اگرچه استفاده از روش‌های BIM و AI برای برنامه زمان‌بندی و مدیریت کلی پروژه‌های ساخت‌وساز به مزیت رقابتی شرکت‌ها کمک می‌کند، اما تحقیقات مؤسسه Fraunhofer IAO نشان داده است که تنها ۲۲ درصد از سهام‌داران صنعت ساخت‌وساز همیشه یا اغلب از BIM (آن‌هم برای ایجاد مدل‌های ساختمان سه‌بعدی) استفاده می‌کنند. حتی ۴۱ درصد از شرکت‌ها هرگز از BIM استفاده نکرده‌اند و مدل پنج‌بعدی BIM که شامل زمان و هزینه به‌عنوان ابعاد برنامه‌ریزی اضافی است، توسط درصد بسیار کمی از شرکت‌های ساختمانی استفاده می‌شود. همچنین، هنگام تجزیه‌وتحلیل پیاده‌سازی برای شرکت‌های طراحی و ساخت، مشخص شد که شرکت‌های ساختمانی بیشتر از شرکت‌های طراحی مزایایی را در BIM پنج‌بعدی مشاهده می‌کنند (Shamreeva & Doroschkin, 2021).

1 Augmented Reality

با بیان مزایا و امکاناتی که هوش مصنوعی ازنظر برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی ارائه می‌دهد، مشخص می‌شود که چرا باید به پیشرفت و استفاده روزافزون از آن در آینده علاقه داشت. توسعه بیشتر هوش مصنوعی به دلیل پتانسیلی که برای کوتاه‌کردن مدت‌زمان مرحله اجرا دارد و همچنین برای کاهش هزینه‌ها و منابع مهم است. همچنین هوش مصنوعی می‌تواند تأثیر زیادی در ایجاد توسعه پایدار داشته باشد.

از سوی دیگر، معایب مختلفی وجود دارد که کاربرد هوش مصنوعی در ساخت‌وساز را دشوار می‌کند. به همین دلیل، تحقیقات مختلفی آغاز شده است که مشکلاتی مانند در دسترس نبودن داده‌ها را در نظر می‌گیرد. چنین تحقیقاتی درحال‌توسعه الگوریتم‌های هوش مصنوعی است که می‌توانند با مجموعه‌داده‌های کوچک کار کرده و درعین‌حال پیش‌بینی‌های دقیقی را ارائه دهند. به‌منظور افزایش تعداد داده‌های موجود، در حال حاضر منابع داده‌های مختلفی ازجمله داده‌های ذخیره شده در مدل‌ها/ابزارهای BIM یا اینترنت اشیا در حال بررسی هستند (Victor, 2023).

دولت آلمان در حال کار بر روی شبیه‌سازی به‌اشتراک‌گذاری داده‌ها بین ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز با مدل‌های مدیریتی است. به لطف چنین مدل‌هایی، ذی‌نفعان می‌توانند داده‌ها و اطلاعات را برای اهداف علمی و اقتصادی بدون نگرانی در خصوص حفاظت از داده‌ها یا امکان کنترل فرایند مبادله کنند. به‌این‌ترتیب مشکل تنوع داده شرکت‌های ساختمانی برطرف می‌شود (Shamreeva & Doroschkin, 2021).

یکی از روندهای جدیدتر، برنامه‌ریزی پروژه‌های ساختمانی با استفاده از هوش مصنوعی قابل‌توضیح[1] (XAI) است. این اصطلاح مخفف زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی است که برای درک اینکه چگونه الگوریتم‌های هوش مصنوعی به تصمیم‌های خاصی رسیده‌اند، کمک می‌کند؛ بنابراین، استفاده از XAI به افزایش شفافیت و درنتیجه افزایش اعتماد به سیستم‌های هوش مصنوعی کمک می‌کند که برای کاربرد آن‌ها در پروژه‌های ساختمانی بسیار مهم است (Liu et al., 2021).

همچنین، انتظار می‌رود که فناوری‌های مبتنی بر بینایی کامپیوتری به دلیل وجود دستگاه‌های مقرون‌به‌صرفه و شایسته؛ مانند دوربین‌های دیجیتال، شاهد افزایش پذیرش در صنعت ساخت‌وساز باشند. این امر به‌ویژه در مرحله اجرا که با فعالیت‌های مخاطره‌آمیز مختلف مانند کار در ارتفاع یا دست‌زدن به مواد و تجهیزات بالقوه خطرناک مشخص می‌شود، اهمیت دارد. تاکنون، روش‌های تشخیص ترک مبتنی بر دید محبوبیت زیادی به دست آورده‌اند و ثابت کرده‌اند که یک رویکرد قابل‌اعتماد در نظارت و ارزیابی وضعیت ساختمان و فرایندهای ساخت‌وساز هستند (Datta et al., 2024). استفاده مکرر از دوربین‌ها در محل ساخت‌وساز می‌تواند بر برنامه زمان‌بندی تأثیر بگذارد، زیرا امکان بررسی وضعیت فعالیت در محل ساخت‌وساز را فراهم می‌کند و درنتیجه به‌روزرسانی برنامه‌های زمان‌بندی را آسان‌تر و دقیق‌تر می‌کند.

درنهایت، اگرچه در سال‌های اخیر BIM و AI از موضوعات رایج بوده و تحقیقات زیادی در زمینه کاربردهای آن‌ها انجام شده است، اما ادامه تحقیقات به‌منظور تحقق پتانسیل کامل این فناوری‌ها در ساخت‌وساز، به‌ویژه در برنامه زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی ضروری است.

## ٤. نتیجه‌گیری

یکپارچه‌سازی فناوری‌های BIM و AI فرصتی برای بهبود و بهینه‌سازی فرایند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه است. پیشرفت در برنامه‌ریزی نشان‌دهنده پیشرفت در مدیریت کلی پروژه‌های ساختمانی است؛ زیرا بر هزینه‌ها، کیفیت و ایمنی پروژه تأثیر می‌گذارد.

در این پژوهش کاربرد و امکان یکپارچه‌سازی BIM و AI برای بهبود فرایند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه بررسی شده است. همان‌گونه که مشاهده شد فرایند برنامه‌ریزی و کنترل پروژه را می‌توان با استفاده از فناوری‌های جدیدتر مانند BIM و AI به میزان قابل‌توجهی تسهیل کرده و بهبود بخشید. به لطف الگوریتم‌های AI، می‌توان دقت برنامه زمان‌بندی را افزایش داده و زمان

1 Explainable artificial intelligence

برنامه‌ریزی را کوتاه نمود. همچنین امکان پیش‌بینی خطرات در مرحله اجرا وجود دارد که احتمال خرابی یا آسیب در محل ساخت‌وساز را کاهش و ایمنی کل پروژه را افزایش می‌دهد. هنگام تهیه یک برنامه زمان‌بندی، می‌توان با تغییر پارامترهای ورودی، برنامه‌های مختلف را به‌سرعت تجزیه‌وتحلیل نمود و درنتیجه برنامه زمان‌بندی بهینه را پیدا کرد. همچنین می‌توان منابع را بهینه کرد و زمان و هزینه پروژه را کاهش داد و درنتیجه رقابت‌پذیری پروژه را در مرحله مناقصه افزایش داد. BIM از طریق ایجاد یک مدل دیجیتال از ساختمان، توانایی تجسم، تجزیه‌وتحلیل و کنترل جزئیات را در تمامی مراحل پروژه فراهم می‌کند.

از مجموع موارد فوق مشهود است که استفاده از این فناوری‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی برنامه‌ریزی مزایای مختلفی را به همراه دارد. بااین‌حال، تحقیقات نشان داده است که پیاده‌سازی BIM و AI در پروژه‌های واقعی شرکت‌های ساختمانی بسیار کند پیش می‌رود. دلیل این امر نیز چالش‌های مختلفی است که ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز هنگام تلاش برای پیاده‌سازی ابزارهای BIM و AI با آن مواجه هستند. برخی از رایج‌ترین چالش‌های مشاهده‌شده، قابلیت همکاری و یکپارچه‌سازی داده‌ها، هزینه‌های اولیه بالا و نیاز به آموزش برای استفاده از ابزارها است. به‌منظور سرعت‌بخشیدن به فرایند به‌کارگیری BIM و AI، کار بر روی حل این چالش‌ها از طریق تهیه فرمت‌های استاندارد داده، ایجاد یک محیط دیجیتال امن و سرمایه‌گذاری در آموزش ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز ضروری است.

درنتیجه، اگرچه چالش‌هایی در پیاده‌سازی BIM و AI در زمان‌بندی پروژه وجود دارد، اما نباید از مزایایی که این ترکیب برای بهبود مدیریت پروژه ساخت‌وساز ارائه می‌کند، غافل شد. با توسعه بیشتر فناوری‌های BIM و AI، خودکارسازی سیستم‌های برنامه زمان‌بندی تحقق می‌یابد که باعث افزایش دقت و کارایی و درعین‌حال کاهش هزینه‌ها و مدت‌زمان پروژه‌های ساختمانی می‌شود. باتوجه‌به تمام موارد فوق، این مقاله می‌خواهد بر اهمیت تحقیق در مورد این فناوری‌ها و کار بر روی توسعه آن‌ها به‌منظور تسهیل کاربرد BIM و AI در پروژه‌های ساخت‌وساز واقعی و درنتیجه بهبود عملکرد کل صنعت ساخت‌وساز تأکید کند.

## منابع


Amirkardoust, A., Tavakoli, O., & Sedaghat Shaygan, D. (2024). Planning and Its Impact on the Success of Civil Projects. *Civil and Project*, *5*(10), 37-46. https://doi.org/10.22034/cpj.2024.433416.1249

Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and management in engineering*, *11*(3), 241-252. https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127

Bahnaier, W. W. (2001). *Scheduling guide for program managers*. DIANE Publishing. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=oR_TVAZfZRQC&oi=fnd&pg=PR1&dq=Scheduling+guide+for+program+managers&ots=ZNsmD5XPk3&sig=J0HH46rwkbjBRgg-r-aMkGgei9o

Brioso, X., Murguia, D., & Urbina, A. (2017). Comparing three scheduling methods using BIM models in the Last Planner System. *Organization, technology & management in construction: an international journal*, *9*(1), 1604-1614. https://doi.org/10.1515/otmcj-2016-0024

Datta, S. D., Islam, M., Sobuz, M. H. R., Ahmed, S., & Kar, M. (2024). Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888

Goedert, J. D., & Meadati, P. (2008). Integrating construction process documentation into building information modeling. *Journal of construction engineering and management*, *134*(7), 509-516. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:7(509)

Guoshen, S., Tianying, D., & Jun, L. (2020). Artificial intelligence and big data simplify the operation and maintenance of intelligent building control systems. *Building Electrical*, *05*, 60-63.

Hojati, A., Amirkardoust, A., & Sedaghat Shaygan, D. (2024). An overview of the factors related to building information modeling and evaluating its effects on the performance of construction projects. *Civil and Project*, *5*(12), 29-41. https://doi.org/10.22034/cpj.2024.440827.1257

Liu, Y., Zhang, C., & Shou, W. (2021). Predicting construction project duration using machine learning: A comparative study. *Automation in Construction*, *122*.

Mostafa, A. L., Mohamed, M. A., Ahmed, S., & Youssef, W. M. M. (2023). Application of Artificial Intelligence Tools with BIM Technology in Construction Management: Literature Review. *International Journal of BIM and Engineering Science (IJBES)*, *6*(2), 39-54. https://doi.org/10.54216/IJBES.060203

Nguyen, T. A., Nguyen, T. A., & Tran, T. V. (2024). Building Information Modeling (BIM) for Construction Project Schedule Management: A Review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *14*(2), 13133-13142. https://doi.org/10.48084/etasr.6834

Pardosi, K. F., & Khatimi, H. (2022). Implementation of 4D Building Information Modeling (BIM) Using Tekla Structures. *CERUCUK*, *6*(2), 111-122. https://doi.org/10.20527/crc.v6i2.5833

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)*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4616055

Rane, N., Choudhary, S., & Rane, J. (2023). Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT)-based sensors for monitoring and controlling in architecture, engineering, and construction: applications, challenges, and opportunities. *Available at SSRN 4642197*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4642197

Russell, S. J., & Norvig, P. (2016). *Artificial intelligence: a modern approach*. Pearson. https://www.ece.uvic.ca/~kinli/ECE470-569A/Unit0-202405-ECE470-569A-Outline-v1.pdf

Shamreeva, A., & Doroschkin, A. (2021). Analysis of the influencing factors for the practical application of BIM in combination with AI in Germany. In *ECPPM 2021-eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction* (pp. 536-543). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003191476-72

Shamsabadi, A. A., Pishkar, I., & Anaraki, M. T. (2024). The Role of Neural Networks in Improving Construction Project Scheduling. *International Journal of Smart Electrical Engineering*, *13*(2), 107-116. http://sanad.iau.ir/fa/Article/1074782

Shouxin, Z. (2022). Research on the Application of Artificial Intelligence Technology in Housing construction. Proceedings of the 2022 Engineering Construction and Management Symposium,

Singh, A., Singh, G., & Chakraborty, S. (2020). A predictive model for cost overruns in construction projects using machine learning. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, *26*(8), 733-742.

Suermann, P. C., & Issa, R. R. (2009). Evaluating industry perceptions of building information modelling (BIM) impact on construction. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, *14*(37), 574-594. http://www.itcon.org/2009/37

Victor, N. O. C. (2023). The application of artificial intelligence for construction project planning. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2801695/v1

Wang, W.-C., Weng, S.-W., Wang, S.-H., & Chen, C.-Y. (2014). Integrating building information models with construction process simulations for project scheduling support. *Automation in Construction*, *37*, 68-80. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.009

Wu, R. (2023). Application of AI in Construction. *Applied and Computational Engineering*, *8*, 98-102. https://doi.org/10.54254/2755-2721/8/20230090

Zhang, H., Chen, H., & Chen, Z. (2020). An AI-based automatic scheduling method for construction projects. *Automation in Construction*, *113*(103139).