

Solving multi-project scheduling problem under resource constraints (RCMPSP): an approach based on building information modeling

Mohammad Sajjad Moradnia¹, Yaghoub Alipouri^{2, *}

1- Graduated student, Construction engineering and management, Construction Engineering and Management Department, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Innovative Technologies Center for Construction Management, Construction Engineering and Management Department, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Solving the Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem (RCMPSP) is one of the most complex challenges in project management. This complexity arises from resource limitations and precedence relationships among project activities. When an organization manages multiple construction projects simultaneously, efficient scheduling is essential for on-time completion and optimal resource utilization. In recent decades, Building Information Modeling (BIM) has played a significant role in advancing the construction industry by providing a powerful framework for planning, design, and project management. However, BIM has not yet been fully leveraged to address the complexities of RCMPSP. This research presents an innovative approach to solving RCMPSP by enabling the use of BIM for multi-project scheduling under resource constraints, thereby helping to reduce delays and costs. First, the necessary data for solving the problem is extracted from a detailed Building Information Model using Autodesk Navisworks Manage software. This model records all relevant information about project phases, resource requirements, and activity dependencies. Next, the extracted data is processed using a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm implemented in Matlab. The PSO algorithm is well-suited for this problem due to its ability to search the solution space and identify near-optimal solutions within a short time frame. Finally, to simulate the construction process, the optimized schedule is transferred to the TimeLiner tool in Navisworks Manage via an API developed in C# using Visual Studio. This integration enables real-time simulation and analysis of the construction process. The proposed approach was evaluated using data from a hypothetical project, and the results demonstrated its effectiveness in solving RCMPSP. Adopting this approach can improve time management and resource allocation in construction companies, leading to significant cost savings and increased efficiency in project execution.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 December 2024

Revise Date: 05 January 2025

Accept Date: 02 February 2025

Keywords:

Resource-constrained multi-project scheduling problem (RCMPSP)
Building information modeling (BIM)
Particle swarm optimization (PSO) algorithm
Application programming interface (API)
TimeLiner tool

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.490336.3582](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.490336.3582)

*Corresponding author: Yaghoub Alipouri.
Email address: y.alipouri@kntu.ac.ir

حل مسئله زمان بندی چند پروژه‌های تحت محدودیت منابع (RCMPSP): رویکردی مبتنی بر مدل سازی اطلاعات ساختمان

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

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی و مدیریت ساخت، آزمایشگاه فناوری‌های نوین در مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

حل مسئله زمان بندی چند پروژه‌های با محدودیت منابع (RCMPSP) از پیچیده ترین چالش های مدیریت پروژه است. این پیچیدگی به دلیل محدودیت منابع و روابط تقدم و تأخر میان فعالیت های پروژهها مشهود است. هنگامی که یک سازمان چندین پروژه ساخت و ساز را هم زمان مدیریت می کند، زمان بندی کارآمد برای تکمیل به موقع و استفاده بهینه از منابع ضروری است. در دهه های اخیر، مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) نقش مهمی در تکامل و پیشرفت صنعت ساخت و ساز داشته و چارچوبی قدرتمند برای برنامه ریزی، طراحی و مدیریت پروژهها فراهم کرده است. با این حال، BIM هنوز به طور کامل برای رفع پیچیدگی های RCMPSP به کار نرفته است. این پژوهش یک رویکرد نوآورانه برای حل RCMPSP ارائه می دهد که استفاده از مدل BIM را برای زمان بندی چند پروژه های با محدودیت منابع ممکن کرده و به کاهش تأخیرات و هزینه ها کمک می کند. ابتدا، داده های مورد نیاز برای حل مسئله از طریق مدل اطلاعات ساختمانی دقیق و با نرم افزار Autodesk Navisworks Manage استخراج می شوند. این مدل، تمام اطلاعات مربوط به فازهای پروژه، نیازمندی های منابع و وابستگی های فعالیت ها را ثبت می کند. سپس داده های استخراج شده با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) که در Matlab پیاده سازی شده، پردازش می شوند. الگوریتم PSO به دلیل توانایی جست و جوی فضای حل و شناسایی راه حل های نزدیک به بهینه در زمان کوتاه، برای این مسئله مناسب است. در نهایت، برای شبیه سازی فرایند ساخت و ساز، زمان بندی بهینه از طریق API که به زبان C# در Visual Studio توسعه یافته به ابزار TimeLiner در Navisworks Manage منتقل می شود؛ این یکپارچه سازی امکان شبیه سازی و تحلیل بی درنگ فرایند ساخت و ساز را فراهم می کند. رویکرد پیشنهادی با داده های یک پروژه فرضی ارزیابی و نتایج مؤثر بودن آن در حل RCMPSP را نشان داده است. پذیرش این رویکرد می تواند مدیریت زمان و تخصیص منابع را در شرکت های ساخت و ساز بهبود بخشیده و منجر به صرفه جویی قابل توجه در هزینه ها و افزایش کارایی اجرای پروژهها شود.

کلمات کلیدی: زمان بندی چند پروژه‌های تحت محدودیت منابع (RCMPSP)، مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)، رابط برنامه نویسی کاربردی (API)، ابزار TimeLiner.

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | |
|---|------------|---------------|------------------------------------|------------|------------|
| doi: | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| 10.22065/jsce.2025.490336.3582 | ۱۴۰۴/۰۲/۳۱ | ۱۴۰۳/۱۱/۱۴ | ۱۴۰۳/۱۱/۱۴ | ۱۴۰۳/۱۰/۱۶ | ۱۴۰۳/۰۹/۲۲ |
| y.alipouri@kntu.ac.ir | | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | | |

می‌دهند. این مسئله نیاز به روش‌های جدید برای حل RCMPSP در این گونه محیط‌ها را نشان می‌دهد [۲۰]. در دهه گذشته، رویکردهای نوآورانه‌ای برای حل مسئله RCMPSP معرفی شده‌اند، از جمله استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند جستجوی محلی تکاملی و قوانین اولویت‌بندی برای بهینه‌سازی راه‌حل‌ها [۲۱]. همچنین مدل‌های جدیدی برای بهبود تخصیص منابع و زمان‌بندی پیشنهاد شده‌اند که عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی نشان داده‌اند [۲۲]. روش‌های ابتکاری مانند جستجوی محلی و الگوریتم‌های تولید تصادفی نیز به عنوان ابزارهای کارآمد برای حل مسائل RCMPSP معرفی شده‌اند [۲۳]. استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم‌های ژنتیک (GA) می‌تواند به حل مسائل پیچیده‌تر و بزرگ‌تر کمک کند. علاوه بر این، به‌کارگیری تکنیک‌های توزیع‌شده و استفاده از رویکردهای ترکیبی، چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای برای بهبود عملکرد در زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع ارائه می‌دهد. این روش‌ها راه‌حل‌های قدرتمندی را برای چالش‌های پیچیده و روزافزون در زمینه مدیریت پروژه فراهم می‌کنند [۶].

۱-۲- مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و زمان‌بندی

خودکارسازی زمان‌بندی پروژه‌های ساخت‌وساز با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به یکی از موضوعات کلیدی در مدیریت پروژه تبدیل شده است. این فرآیند با هدف بهینه‌سازی زمان‌بندی و تخصیص منابع انجام می‌شود. با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی، رایانش ابری و هوش مصنوعی، کارایی و دقت در پروژه‌های ساخت‌وساز بهبود یافته است. از آنجا که BIM امکان یکپارچه‌سازی داده‌های پروژه و شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای ساخت را فراهم می‌کند، ترکیب آن با زمان‌بندی خودکار گامی اساسی به سوی بهینه‌سازی پروژه‌ها به شمار می‌رود که منجر به کاهش زمان و هزینه‌ها می‌شود [۲۴]. مطالعات متعددی بر توسعه سیستم‌های خودکار مبتنی بر BIM تمرکز کرده‌اند. برای مثال فاضلی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) رویکردی برای توسعه خودکار مدل‌های BIM 4D ارائه کرده‌اند که شامل بهینه‌سازی تخصیص منابع و زمان‌بندی پروژه می‌باشد. این رویکرد نه تنها زمان‌بندی پروژه را به صورت خودکار انجام می‌دهد بلکه دقت و کارایی در مدیریت منابع را نیز بهبود می‌بخشد و این امر پیشرفت مهمی در خودکارسازی پروژه‌های ساخت‌وساز به حساب می‌آید [۲۴]. همچنین، حاملداری^۲ و همکاران (۲۰۱۷) بر به‌روزرسانی خودکار برنامه‌ها و پیشرفت پروژه بر اساس مدل‌های BIM 4D تأکید کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که این سیستم‌ها با ارائه به‌روزرسانی‌های آنی و کاهش دخالت‌های دستی در ردیابی و زمان‌بندی، بهره‌وری فرآیندهای مدیریت پروژه را بهبود می‌بخشند [۲۵]. جینگ^۳ و همکاران به برآورد هزینه و مدت زمان با استفاده از فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) پرداختند و دو رویکرد برای ایجاد برنامه زمان‌بندی در مدل BIM معرفی کردند. این رویکردها شامل استفاده از ابزارهای زمان‌بندی مدل BIM و ارتباط دادن مدل سه‌بعدی BIM با برنامه زمان‌بندی پروژه می‌باشد. همچنین سه نوع روش برآورد هزینه مورد بحث قرار گرفته است. اگرچه نتایج این پژوهش و اثربخشی آن‌ها در پروژه‌های واقعی مورد بررسی قرار نگرفت [۲۶]. پارک^۴ به توسعه چارچوبی برای خودکارسازی ایجاد برنامه زمان‌بندی در حین فرآیند مدل‌سازی BIM پرداخت. این رویکرد شامل تطبیق اجزای BIM با فعالیت‌های ساخت‌وساز بود، با این حال، یکی از چالش‌های این پژوهش زمان و تلاش زیادی بود که برای ارتباط عناصر BIM با فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده نیاز بود [۲۷]. به‌طور مشابه، تاسچر^۵ روشی نیمه‌خودکار برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی ساخت معرفی کرد که امکان مقایسه برنامه‌های ساخت جایگزین را فراهم می‌ساخت. این روش از مدل‌های BIM و تصویربرداری 4D برای شبیه‌سازی فرآیند ساخت استفاده کرد [۲۸]. از سوی دیگر، لی^۶ بر ساخت پانل‌های مدولار تمرکز کرد و روشی برای تولید خودکار برنامه‌های ساخت مبتنی بر BIM پیشنهاد داد. در این رویکرد، مدل BIM با استفاده از Autodesk Revit توسعه یافت و روابط تقدم فعالیت‌ها به‌طور خودکار استخراج شد. زمان‌بندی با استفاده از API Revit انجام شده و نتایج برای تحلیل بیشتر به Microsoft Project منتقل شدند [۲۹]. ولک^۷ نیز بر بازسازی خودکار اطلاعات ساختمان برای برنامه‌ریزی تخریب تمرکز دارد و سیستمی پیشنهاد می‌دهد که با

¹ Fazeli

² Hamledari

³ Jiang

⁴ Park

⁵ Tauscher

⁶ Liu

⁷ Volk

ادغام سنسورهای سخت‌افزاری، ماژول‌های نرم‌افزاری و مدل‌های سه‌بعدی، برنامه‌ریزی فعالیت‌ها را به صورت یکپارچه ممکن می‌سازد. این روش با استفاده از سیستم ترکیبی سنسورها و ماژول‌های نرم‌افزاری اطلاعات ساختمان را جمع‌آوری، بازسازی و برنامه‌ریزی می‌کند. ابر نقاطی برای ایجاد مدل سه‌بعدی ساختمان تولید شده و سپس به عناصر ساختمانی تجزیه و در پایگاه داده ذخیره می‌شوند. در ادامه، الگوریتم‌های بازسازی و زمان‌بندی از این اطلاعات برای لیست کردن و زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه استفاده می‌کنند [۳۰، ۳۱].

چن^۸ در دو مطالعه خود، چارچوب‌های مبتنی بر BIM برای برنامه‌ریزی نگهداری ارائه کرد. در اولین مطالعه، او بر نگهداری یکپارچه ساختمان تمرکز کرد و در مطالعه دوم به زمان‌بندی خودکار دستورات نگهداری پرداخت. این رویکرد شامل ایجاد یک مدل BIM از ساختمان، ادغام توزیع Weibull برای برنامه‌ریزی نگهداری، استفاده از زمان‌بندی دیجیتال و استفاده از فرمت‌های داده‌ای مناسب برای ساده‌سازی جریان کارها بود [۳۲]. در مطالعه دوم، چن چارچوبی مبتنی بر BIM و FMS برای زمان‌بندی خودکار دستورات نگهداری ارائه کرد که هدف آن بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت تأسیسات بود. این رویکرد شامل طراحی یک چارچوب FMM مبتنی بر BIM و FMS برای خودکارسازی دستورات نگهداری، ادغام داده‌ها، نمایش اطلاعات دستورات کار در BIM و استفاده از یک الگوریتم دایجکسترا بهبود یافته برای محاسبه مسیرهای نگهداری و ایجاد دستورات نگهداری (MWO) بود [۳۳]. علاوه بر این، الحسین^۹ و همکاران چارچوبی مبتنی بر BIM برای خودکارسازی حل مسئله RCPSA ارائه کردند و از اطلاعات غنی موجود در مدل‌های BIM و شبیه‌سازی رویدادهای گسسته برای تجسم فرآیندهای ساخت و بهینه‌سازی تخصیص منابع بهره‌گرفتند [۹]. وانگ^{۱۰} روش‌هایی را برای ادغام زمان‌بندی و هزینه در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از BIM ارائه کرد. وانگ یک مدل چهار مرحله‌ای را پیشنهاد کرد که از خروجی مدل BIM برای ایجاد منحنی‌های پیشرفت ساخت‌وساز استفاده می‌کند. این روش شامل استفاده از مدل BIM، شناسایی اقلام هزینه، تأکید بر اهمیت بارگذاری اقلام هزینه و قیمت واحد در نرم‌افزار برآورد هزینه است [۳۴].

پژوهش‌های فوق پیرامون ارتباط میان زمان‌بندی پروژه و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان مرور شدند که بیشتر آن‌ها پیرامون خودکارسازی زمان‌بندی با استفاده از BIM، ایجاد مدل چهاربعدی و شبیه‌سازی فرایند ساخت و تأثیر استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در زمان‌بندی فعالیت‌های مربوط به تعمیر و نگهداری ساختمان‌ها و تخریب و بهسازی آن‌ها بود. از جمله کاستی‌ها و نواقص مقالات پیشین که می‌تواند زمینه کارهای پژوهشی آتی باشد، می‌توان به عدم توجه کافی به بصری‌سازی فرایند ساخت، یکپارچه نبودن فرایندهای مدل‌سازی سه‌بعدی، برآورد مقادیر موردنیاز، عدم توجه به مسائل مربوط به محدودیت منابع شامل چند پروژه‌ای، چندحالتی و... و عدم توجه به وجود انقطاع (گسیختگی) در فعالیت‌ها به هنگام زمان‌بندی مبتنی بر BIM، اشاره نمود. پژوهش حاضر با در نظر گرفتن محدودیت منابع چند پروژه‌ای و بصری‌سازی فرایند ساخت با استفاده از مدل BIM و ایجاد یکپارچگی میان مجموعه برنامه‌های کاربردی به حل چند مورد از این شکاف‌های پژوهشی می‌پردازد.

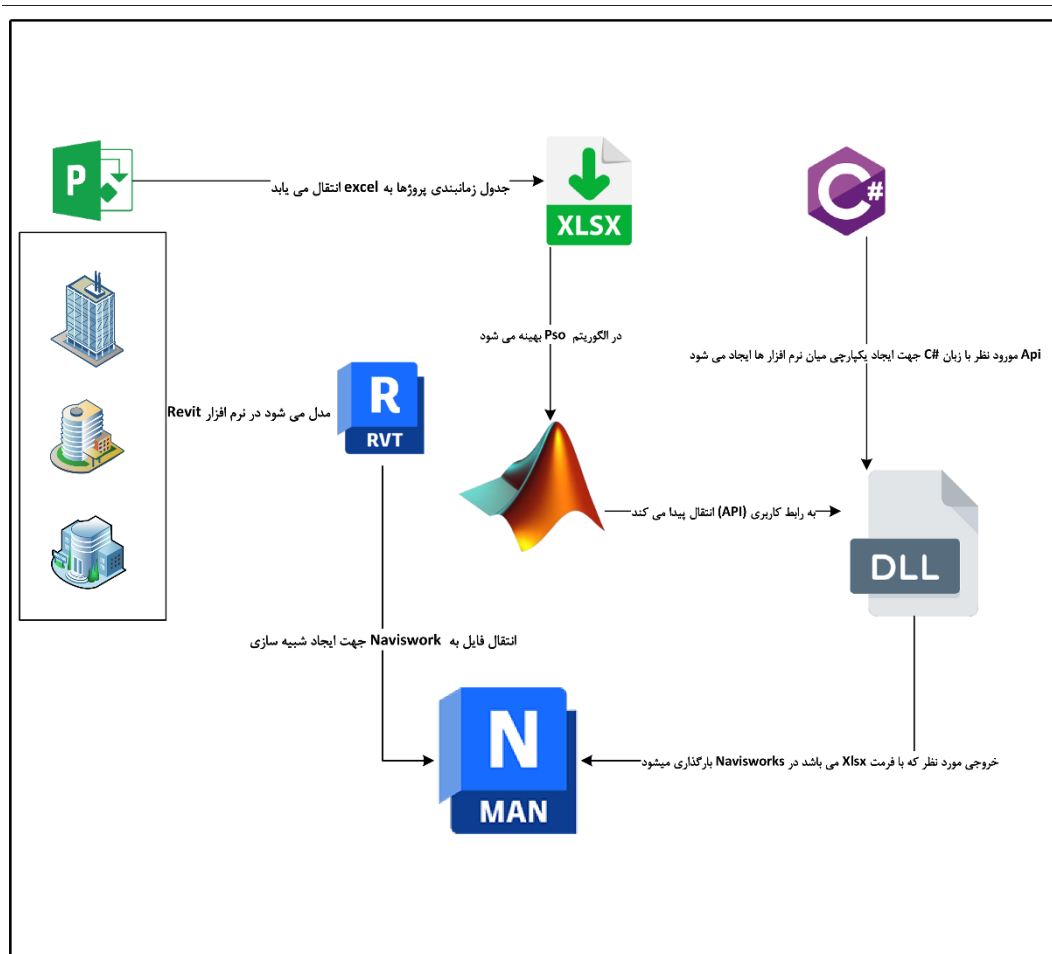
۳- روش تحقیق

در این بخش، به شرح مراحل انجام پژوهش حاضر پرداخته خواهد شد. شکل ۱ این مراحل را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱ ابتدا با استفاده از مدل BIM، داده‌های اولیه موردنیاز برای حل مسئله RCMPSP استخراج می‌شود. سپس با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری، مسئله RCMPSP توسط نرم‌افزار متلب حل می‌شود. در انتها با استفاده از رابط برنامه‌نویسی کاربردی (API) جهت مدل‌سازی چهاربعدی و شبیه‌سازی فرایند ساخت به ابزار TimeLiner در Navisworks Manage منتقل می‌شود.

⁸ Chen

⁹ Al-Husseini

¹⁰ Wang



شکل ۱: فرایند کلی پژوهش

۳-۱- مدل سازی پروژهها

در این مرحله، پروژهها ابتدا با استفاده از نرم افزار Revit مدل سازی می شوند و سپس با بهره گیری از افزونه مرتبط (Navisworks (NWC Export)، مدلها به نرم افزار Naviswork منتقل می شوند. در مرحله بعدی، در این نرم افزار، تمام عناصر مدل سازی شده بر اساس ساختار شکست کار و برنامه زمان بندی اولیه که قبلاً در نرم افزار MS Project تهیه شده اند و تمامی قسمت های سازه ای را شامل می شوند، با کمک ابزار مجموعه های انتخاب¹¹ گروه بندی می شوند.

۳-۲- مشخص کردن انواع منابع به کاررفته در پروژه

در این مرحله، برای مدل سازی چهاربعدی پروژه و انجام برنامه ریزی زمان بندی، اطلاعات مربوط به منابع تجدیدپذیر مانند ماشین آلات و نیروی انسانی باید مشخص شوند. در مسئله RCMPSP، تنها از منابع تجدیدپذیر استفاده می شود.

۳-۳- استخراج مقدار منابع تجدیدپذیر پروژه

¹¹ Set Selection

در مرحله اول از گروه بندی المان های مدل سه بعدی، مقادیر منابع تجدیدناپذیر پروژه از مدل استخراج می شوند. این کار با استفاده از ابزار Quantification در نرم افزار Navisworks Manager انجام می شود که دقت در برآورد مقادیر را بالا می برد. با انتقال تمامی المان های مشخص شده در مرحله اول به این ابزار، جدول مقادیر منابع تجدیدناپذیر پروژه در یک پایگاه داده ذخیره می شود. سپس با توجه به مقادیر به دست آمده، نیازمندی هر فعالیت به منابع تجدیدپذیر تخمین زده می شود.

۳-۴- الگوریتم فراابتکاری PSO

کندی و ابرهات^{۱۲} [۳۵] طراحان اصلی الگوریتم بهینه سازی با استفاده از حرکت جمعی پرندگان (PSO)^{۱۳} هستند. در این الگوریتم، به یک نقطه در فضای جست و جوی ز بعدی، ذره گفته می شود. هر ذره i به شکل چندبعدی، با یک بردار موقعیت تصادفی $x_{ij}(t)$ و یک بردار سرعت تصادفی $v_{ij}(t)$ مربوط به بعد j ام در زمان t تعریف شده که مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می نماید. هر ذره، یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می شود. جهت حرکت ذره، توسط بردار سرعت آن معین می شود. در الگوریتم PSO، تغییر مکان ذرات در فضای جست و جو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگان آنها است، بنابراین موقعیت دیگر توده های ذرات روی چگونگی جست و جوی یک ذره اثر می گذارد [36]. در ابتدا، اطلاعات مسئله که شامل (تعداد فعالیت ها و فهرست پیش نیازی های آنها، مدت زمان مورد نیاز برای اجرای هر یک از فعالیت ها و حداکثر مقدار موجود برای هر منبع قابل تجدیدپذیر در هر دوره زمانی) در یک فایل اکسل ذخیره و در نرم افزار Matlab فراخوانی می شوند.

۳-۵- چارچوب روش مبتنی بر PSO برای حل مسئله برنامه ریزی چند پروژه با محدودیت منابع

چندین نوع روش نمایشی (شبکه ای، گرافیکی، ماتریسی و فهرست فعالیت ها) برای مسئله برنامه ریزی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) وجود دارد. از آنجایی که روابط بین فعالیت ها و منابع را باید به صورت واضح و دقیق نشان داد و ارتباطات بین آنها را بررسی کرد، از روش ماتریسی استفاده می کنیم [۱۸]. در این روش، هر ذره را با یک فهرست فعالیت قابل اجرا نشان می دهیم. در اینجا چون حالت چند پروژه ای است، نمایش جواب به صورت یک ماتریس دو سطری تعریف می شود. به طور مثال در شکل زیر سطر اول نشانگر اندیس فعالیت ها و سطر دوم نشانگر شماره پروژه مربوطه است.

$$\pi = \begin{Bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 3 & 3 & 2 & 0 \end{Bmatrix}$$

یک روش مشخص برای تبدیل RCMPSP به برنامه زمان بندی باید مشخص شود، تا وضعیت هر ذره در طول فرایند جست و جو در ارتباط با مدت زمان پروژه مربوط به برنامه زمان بندی تولید شده ارزیابی شود. در اینجا، ما از الگوریتم روش تولید زمان بندی ترتیبی^{۱۴} (SSGS) را اتخاذ می کنیم.

الگوریتم ۱: روش تولید زمان بندی به صورت ترتیبی.

۱. فرض کنید $(\tau, M) = S$

۲. برای $i = 1, 2, \dots, n$

۳. فرض کنید j برابر $\pi(i)$

۴. وظیفه j را با مد M_j در اولین Slot (بازه زمانی) موجود زمان بندی کنید، به شرط حفظ امکان اجرای زمان بندی؛

۵. پایان. [37]

¹² Kennedy and Eberhart

¹³ Particle Swarm Optimization

¹⁴ serial schedule generation scheme

الگوریتم ۲: زمان بندی یک فعالیت در اسلات (بازه زمانی) زمانی اولین دسترس مناسب.

۱. فعالیت مورد نظر برای زمان بندی را با z مشخص می کنیم.

۲. مد مرتبط با z را با m نشان دهید.

۳. یک شاخص p را در نظر بگیرید به نحوی که $z \in A_p$ باشد.

۴. زمان شروع اولیه z را بر اساس فرمول زیر محاسبه کنید:

$$t_0 \leftarrow \max\{e_p, \max(T_{j'} + d_{j'm})\}$$

e_p زمان پایان آخرین فعالیت در مجموعه A_p و $(T_{j'} + d_{j'm})$ زمان پایان فعالیت های پیشین با مد m می باشد.

۵. با استفاده از تابع $TestSlot(j, t_0) \leftarrow t$ زمان شروع مناسب برای فعالیت z را بررسی و مشخص می کنیم.

۶. فعالیت z را با مد m در زمان t زمان بندی کنید و ظرفیت های باقی مانده را به روز کنید [37].

الگوریتم ۳: تابع آزمایشی $TestSlot(j, t + 1)$

این تابع زمان اولین $Slot$ (بازه زمانی) مناسب یا پس از t را که برای زمان بندی فعالیت z مناسب است، برمی گرداند.

۱. فرض کنید m مد مرتبط با z باشد.

۲. یک شاخص p را در نظر بگیرید به نحوی که $z \in A_p$ باشد.

۳. برای $t' \leftarrow t, t + 1, \dots, t + d_{jm} - 1$

۴. برای $k \in R_p^p$

۵. مقدار باقی مانده a از k در t' را در نظر بگیرید.

۶. اگر $r_{jkm}^p > a$ باشد، به ازای تابع $TestSlot(j, t + 1)$ برگردید.

۷. پایان بخش

۸. برای $k \in g^p$

۹. مقدار باقی مانده a از k در t' را در نظر بگیرید.

۱۰. اگر $g_{jkm}^p > a$ باشد، به ازای تابع $TestSlot(j, t + 1)$

۱۱. پایان بخش.

۱۲. پایان

۱۳. t را برگردانید.

این الگوریتم برای انتخاب زمان مناسب برای زمان بندی یک فعالیت در یک $Slot$ (بازه زمانی) استفاده می شود. در این الگوریتم، ابتدا مد مرتبط با فعالیت مورد نظر و شاخص مرتبط با مجموعه ای که فعالیت در آن قرار دارد را مشخص می کنیم. سپس برای هر زمان t تا $(t + d_{jm} - 1)$ ، که d_{jm} مدت زمان فعالیت z با مد m است) و برای هر منبع k از منابع مجموعه ی مرتبط، باقی مانده آن را در نظر می گیریم. در مرحله ی بعد، اگر باقی مانده کافی برای اجرای فعالیت وجود داشت، می توانیم آن زمان را به عنوان زمان مناسب برای

زمان بندی فعالیت انتخاب کنیم. در غیر این صورت، به زمان بعدی می‌رویم و همین روند را ادامه می‌دهیم. این الگوریتم به این ترتیب ادامه می‌یابد تا زمان مناسب برای زمان بندی فعالیت پیدا شود [۱۸]. جواب‌های اولیه، طبق روابط پیش‌نیازی به صورت تصادفی تولید می‌شوند.

سازوکار به‌روزرسانی جواب

در ادامه، روند $PSORoss(I_i, I_k, \rho)$ مرتبط با ترکیب یک نقطه بر روی ذره I_i با ذره دیگر I_k در موقعیت ρ ارائه می‌شود. پس از انجام عملیات ترکیب یک نقطه، مکان جدید ذره I_i به‌عنوان ذره با مدت‌زمان کمتر انتخاب می‌شود. در اینجا، با توجه به نوع جواب که حالت توالی دارد، از مکانیسم تقاطع یک نقطه‌ای^{۱۵} برای به‌روزرسانی جواب در هر مرحله استفاده می‌شود.

روند $PSORoss(X_i, X_k, \rho)$

مرحله ۱. موقعیت ρ در ذره X_i را انتخاب کنید؛

مرحله ۲. بخش اول را از X_i ، با نام S_{i1} و بخش دوم را با نام S_{i2} انتخاب کنید؛

مرحله ۳. بخش S_{k1} را با فعالیت‌هایی که در بخش S_{i1} وجود ندارند، از ذره X_k ایجاد کنید؛

مرحله ۴. بخش S_{k2} را با فعالیت‌هایی که در بخش S_{i2} وجود ندارند، از ذره X_k ایجاد کنید؛

مرحله ۵. بخش‌های S_{i1} و S_{k1} را ترکیب کنید تا ذره جدید N_1 شکل گیرد؛

مرحله ۶. بخش‌های S_{i2} و S_{k2} را ترکیب کنید تا ذره جدید N_2 شکل گیرد؛

پایان [۱۸].

• عملگر باز مرتب‌سازی^{۱۶}

برای فرار از بهینگی محلی، در هر مرحله پس از به‌روزرسانی جواب، عمل باز مرتب‌سازی انجام می‌شود تا جواب را مختل کند. این عملگر به این صورت عمل می‌کند که یک فعالیت را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و یک موقعیت a از شکاف بین موقعیت خود فعالیت و موقعیت فعالیت پیش‌نیازی آن به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و این فعالیت را در موقعیت a قرار می‌دهد. این فرایند، به تعداد معین تکرار می‌شود.

۱- تولید ذره‌های اولیه

۲- ارزیابی هر ذره با الگوریتم SSGS و به‌دست‌آوردن بهینگی محلی برای هر ذره یعنی بهترین جوابی^{۱۷} که هر ذره در مسیر خود به دست آورده است و بهینگی کلی^{۱۸} یعنی بهترین جواب در بین تمام ذره‌ها.

۳- اختلال هر ذره با عملگر باز مرتب‌سازی

۴- به‌روزرسانی هر ذره با عملگر crossover با بهینگی محلی و بهینگی کلی (در این حالت ۴ جواب به دست می‌آید که بهترین آن به‌عنوان موقعیت جدید ذره ثبت می‌شود).

۵- اگر شرایط توقف برقرار است، stop. در این غیر این صورت به قدم ۲ برگردید.

۶- خروجی global best solution.

¹⁵ one-point crossover

¹⁶ Reshuffle

¹⁷ Local best Solution

¹⁸ global best solution

۳-۶- ایجاد مدل چهاربعدی بر اساس خروجی مسئله RCMPSP

در تحقیق حاضر، مدل سازی چهاربعدی (ارسال خروجی های زمان بندی به مدل سه بعدی و شبیه سازی فرایند ساخت)، با استفاده از نرم افزار Naviswork Manage و ابزار TimeLiner انجام می پذیرد. در این پژوهش، اطلاعات خروجی مسئله RCMPSP در یک فایل اکسل ذخیره می شود و در قالب فایلی با پسوند CSV، به TimeLiner، منتقل می گردد. سپس مطابق با گروه بندی المان های مدل سه بعدی انجام شده، هر یک از گروه ها به فعالیت مربوطه اختصاص می یابند. در نهایت، فرایند شبیه سازی آغاز شده و زمان بندی پروژه انجام می شود.

۳-۷- مشاهده اطلاعات ورودی مسئله در حین مدل سازی چهاربعدی

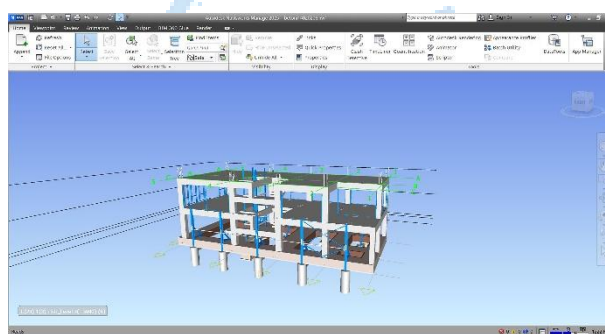
در این بخش، اطلاعات ورودی و خروجی های مربوط به مسئله RCMPSP که پیش تر در یک فایل اکسل ذخیره شده بود، توسط تابع API به همراه مدل سازی چهاربعدی نمایش داده می شود. در این مطالعه، کدنویسی تابع API به زبان برنامه نویسی C# در نرم افزار Visual Studio انجام شده است. این کد به صورتی نوشته شده که کاربر بتواند به طور همزمان یک یا چند مدل سه بعدی را به صورت دلخواه، در ابزار مدل سازی BIM وارد نموده و از طرفی فایل اطلاعات مربوط به مسئله RCMPSP برای پروژه خود را به طور همزمان در حین مدل سازی چهاربعدی، مشاهده نماید.

۴- مطالعه موردی

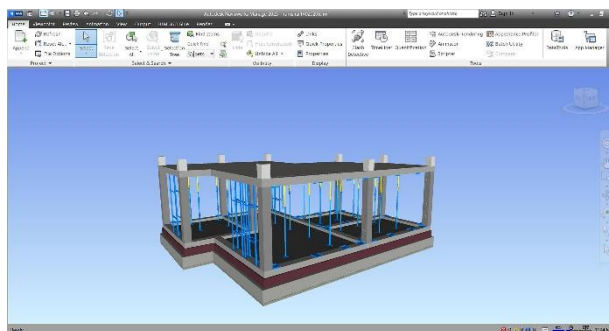
در این بخش، روش تحقیق شرح داده شده در بخش ۳ برای زمان بندی ۳ پروژه بر مبنای BIM و به عنوان یک مطالعه موردی ارائه می شود. مراحل به ترتیب ارائه شده و روش به دست آمده داده های ورودی و خروجی برای هر مرحله توضیح داده می شود.

مرحله اول) - معرفی مدل ها و فرضیات پروژه ها

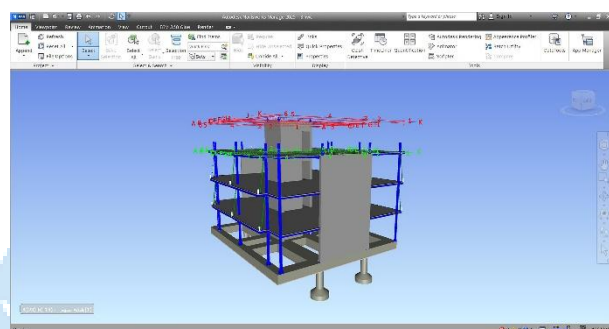
مدل های فرضی به کاررفته در این پژوهش، ساختمان هایی با کاربری مسکونی هستند. اسکلت ساختمان این پروژه ها، بتنی و بنایی و فلزی بوده و فرم کلی سازه آن ها در نرم افزار Naviswork Manage مطابق شکل های ۲، ۳ و ۴ زیر است.



شکل ۲: مدل سه بعدی ساختمان الف (بتنی) در نرم افزار Naviswork Manage



شکل ۳: مدل سه بعدی ساختمان ب (بنایی) در نرم افزار Naviswork Manage



شکل ۴: مدل سه بعدی ساختمان ج (فلزی) در نرم افزار Naviswork Manage

جهت انجام پروژه مفروضاتی در نظر گرفته شده که شامل موارد زیر است:

مدت زمان انجام فعالیت‌ها و نیازمندی هر یک از آن‌ها به منابع، مشخص و قطعی است.

پروژه‌ها به طور هم‌زمان در یک روز آغاز می‌شوند.

روابط پیش‌نیازی از نوع پایان به شروع (FS) است.

ظرفیت منابع تجدیدپذیر در هر دوره زمانی مشخص، ثابت است.

هر فعالیت تنها یک‌بار قابلیت شروع داشته و به صورت پیوسته و بدون انقطاع پایان می‌یابد.

زمان‌بندی بخش سازه و تیغه‌چینی این پروژه‌ها در پژوهش حاضر مدنظر است.

منابع برای هر فعالیت به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که محدودیت منابع در اجرای پروژه‌ها ایجاد شود

مرحله دوم) تهیه ساختار شکست کار فعالیت‌ها برای مدل‌های پژوهش

در این پژوهش هر مورد ساختار شکست کار در این مدل‌ها، با چهار ورودی تعریف می‌شود؛ شناسه ساختار شکست، توضیح ساختار شکست، مدت زمان و پیش‌نیاز. ساختار شکست کار باید به نحوی شناسه بندی شود که قابلیت نمایش مناسب نتایج مدل‌سازی را داشته باشد. ساختارهای شکست کار پروژه‌های مطالعه موردی در جداول ۱ تا ۳ قابل مشاهده هستند.

جدول ۱: ساختار شکست کار پروژه الف

| پیش‌نیاز | شماره ردیف | مدت | شرح فعالیت |
|----------|------------|-----|---|
| | ۰ | ۰ | شروع |
| ۰ | ۱ | ۱ | تحويل زمین |
| ۱ | ۲ | ۲ | ابلاغ نقشه‌های تأیید توسط کارفرما به پیمانکار |
| ۲ | ۳ | ۲ | اخذ پروانه ساختمانی پروژه |
| ۳ | ۴ | ۵ | تجهیز کارگاه |
| ۴ | ۵ | ۳ | خاک‌برداری با ماشین |
| ۵ | ۶ | ۲ | تکمیل حفاری شمع‌ها |
| ۶ | ۷ | ۲ | قفس بافی و قفس گذاری |
| ۷ | ۸ | ۲ | بتن‌ریزی شمع‌ها |
| ۸ | ۹ | ۴ | اجرای سازه نگهبان |
| ۹ | ۱۰ | ۱ | رگلاژ کف |
| ۱۰ | ۱۱ | ۱ | اجرای بتن مگر |
| ۱۱ | ۱۲ | ۱ | اجرای چاله آسانسور |
| ۱۲ | ۱۳ | ۴ | اجرای آرماتوربندی فونداسیون |
| ۱۳ | ۱۴ | ۱ | آکس‌بندی و اجرای آرماتوربندی ریشه ستون و دیوار |
| ۱۴ | ۱۵ | ۳ | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی فونداسیون |
| ۱۵ | ۱۶ | ۴ | اجرای آرماتوربندی ستون‌های طبقه همکف |
| ۱۶ | ۱۷ | ۱ | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی ستون‌های طبقه همکف |
| ۱۷ | ۱۸ | ۵ | اجرای آرماتوربندی تیر و دال طبقه همکف |
| ۱۸ | ۱۹ | ۲ | اجرای قالب‌بندی و تیرچه گذاری طبقه همکف |
| ۱۹ | ۲۰ | ۱ | اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه همکف |
| ۲۰ | ۲۱ | ۴ | اجرای آرماتوربندی ستون‌های طبقه اول |
| ۲۱ | ۲۲ | ۱ | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی ستون‌های طبقه اول |
| ۲۲ | ۲۳ | ۵ | اجرای آرماتوربندی تیر طبقه اول |
| ۲۳ | ۲۴ | ۲ | اجرای قالب‌بندی و تیرچه گذاری طبقه اول |
| ۲۴ | ۲۵ | ۱ | اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه اول |
| ۲۵ | ۲۶ | ۲ | اجرای شاسی‌کشی آسانسور |
| ۲۶ | ۲۷ | ۲ | اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای جانبی |
| ۲۷ | ۲۸ | ۲ | اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای داخلی |
| ۲۸ | ۲۹ | ۲ | اجرای چارچوب‌گذاری درب‌ها و نعل‌درگاه‌های بازشوها |
| ۲۹ | ۳۰ | ۰ | تحويل موقت پروژه |
| ۳۰ | ۳۱ | ۳ | برچیدن کارگاه |
| ۳۱ | ۳۲ | ۰ | پایان |

جدول ۲: ساختار شکست کار پروژه ب

| پیش‌نیاز | شماره ردیف | مدت | شرح فعالیت |
|----------|------------|-----|-----------------------------|
| - | ۰ | ۱ | شروع |
| ۰ | ۱ | ۰ | تحويل زمین |
| ۱ | ۲ | ۱ | اخذ پروانه ساختمانی |
| ۲ | ۳ | ۱ | تجهیز کارگاه |
| ۳ | ۴ | ۳ | گودبرداری |
| ۴ | ۵ | ۱ | تسطیح و رگلاژ |
| ۵ | ۶ | ۱ | بتن مگر |
| ۶ | ۷ | ۵ | اجرای آرماتوربندی فونداسیون |
| ۷ | ۸ | ۳ | قالب‌بندی فونداسیون |
| ۸ | ۹ | ۱ | بتن‌ریزی فونداسیون |

| | | | |
|----|----|---|--|
| ۹ | ۱۰ | ۳ | اجرای آرماتور کلاف زیر دیوار بیرونی |
| ۱۰ | ۱۱ | ۲ | اجرای قالب کلاف بیرونی ساختمانی |
| ۱۱ | ۱۲ | ۲ | اجرای بتن ریزی کلاف زیر دیوار بیرونی |
| ۱۲ | ۱۳ | ۸ | اجرای آرماتوربندی کلاف قائم طبقه اول |
| ۱۳ | ۱۴ | ۵ | اجرای قالب بندی کلاف قائم های طبقه اول |
| ۱۴ | ۱۵ | ۲ | اجرای بتن ریزی کلاف قائم های طبقه اول |
| ۱۵ | ۱۶ | ۴ | اجرای قالب بندی سقف طبقه اول |
| ۱۶ | ۱۷ | ۴ | اجرای آرماتوربندی سقف طبقه اول |
| ۱۷ | ۱۸ | ۱ | اجرای بتن ریزی سقف طبقه اول |
| ۱۸ | ۱۹ | ۲ | اجرای آرماتوربندی ستون جان پناه |
| ۱۹ | ۲۰ | ۲ | اجرای قالب بندی ستون جان پناه |
| ۲۰ | ۲۱ | ۱ | اجرای بتن ریزی ستون جان پناه |
| ۲۱ | ۲۲ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای جانبی |
| ۲۲ | ۲۳ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای داخلی |
| ۲۳ | ۲۴ | ۲ | اجرای چارچوب گذاری دربها و نعل درگاه های بازشوها |
| ۲۴ | ۲۵ | ۱ | تحويل موقت پروژه |
| ۲۵ | ۲۶ | ۱ | برچیدن کارگاه |
| ۲۶ | ۲۷ | . | پایان |

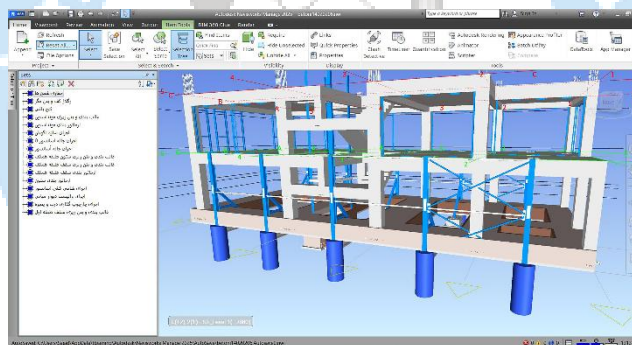
جدول ۳: ساختار شکست کار پروژه ج

| پیش نیاز | شماره ردیف | مدت | شرح فعالیت |
|----------|------------|-----|-----------------------------------|
| - | ۰ | ۱ | شروع |
| ۰ | ۱ | ۰ | تحويل زمین |
| ۱ | ۲ | ۱ | اخذ پروانه ساختمانی |
| ۲ | ۳ | ۱ | تجهیز کارگاه |
| ۳ | ۴ | ۲ | تکمیل حفاری شمعها |
| ۴ | ۵ | ۲ | قفس بافی و قفس گذاری |
| ۵ | ۶ | ۲ | بتن ریزی شمعها |
| ۶ | ۷ | ۵ | ساخت ستون مرحله اول |
| ۷ | ۸ | ۵ | ساخت ستون مرحله دوم |
| ۹ | ۱۰ | ۵ | ساخت تیرهای اصلی طبقه اول |
| ۱۱ | ۱۱ | ۵ | ساخت تیرهای اصلی طبقه دوم |
| ۱۲ | ۱۳ | ۵ | ساخت تیرهای فرعی طبقه اول |
| ۱۳ | ۱۴ | ۵ | ساخت تیرهای فرعی طبقه دوم |
| ۱۵ | ۱۶ | ۴ | خاک برداری مرحله اول |
| ۱۶ | ۱۷ | ۲ | علامت گذاری مختصات زمین مرحله اول |
| ۱۷ | ۱۸ | ۳ | تسطیح و رگلاژ مرحله اول |
| ۱۸ | ۱۹ | ۵ | بتن مگر پی مرحله اول |
| ۱۹ | ۲۰ | ۶ | آرماتوربندی پی مرحله اول |
| ۲۰ | ۲۱ | ۵ | قالب بندی پی مرحله اول |
| ۲۱ | ۲۲ | ۳ | نصب صفحه ستون پی مرحله اول |
| ۲۲ | ۲۳ | ۶ | بتن ریزی پی مرحله اول |
| ۲۳ | ۲۴ | ۶ | قالب بندی سقف طبقه همکف |
| ۲۴ | ۲۵ | ۶ | آرماتوربندی سقف طبقه همکف |
| ۲۵ | ۲۶ | ۱ | بتن ریزی سقف طبقه همکف |
| ۲۶ | ۲۷ | ۶ | قالب بندی سقف طبقه اول |

| | | | |
|----|----|---|--|
| ۲۷ | ۲۸ | ۶ | آرماتوربندی سقف طبقه اول |
| ۲۸ | ۲۹ | ۱ | بتن ریزی سقف طبقه اول |
| ۲۹ | ۳۰ | ۶ | قالب بندی سقف طبقه دوم |
| ۳۰ | ۳۱ | ۶ | آرماتوربندی سقف طبقه دوم |
| ۳۱ | ۳۲ | ۱ | بتن ریزی سقف طبقه دوم |
| ۳۲ | ۳۳ | ۲ | اجرای شاسی کشی آسانسور |
| ۳۳ | ۳۴ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای جانبی |
| ۳۴ | ۳۵ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای داخلی |
| ۳۶ | ۳۷ | ۱ | تحويل موقت پروژه |
| ۳۷ | ۳۸ | ۱ | برچیدن کارگاه |
| ۳۸ | ۳۹ | ۰ | پایان |

مرحله سوم) گروه بندی المان های مدل سه بعدی

در فرایند تقسیم بندی اجزای پروژه های مورد مطالعه، به منظور ارتباط آن ها با فعالیت های تعریف شده در ساختار تجزیه و تحلیل کار و نمایش آن ها در فرایند شبیه سازی، از ابزار مجموعه های انتخاب در نرم افزار Naviswork Manage استفاده شد. در این فرایند، هر یک از عناصری که به فعالیت مرتبط در نظام تجزیه و تحلیل کار (WBS) خود ارتباط دارند، در یک گروه قرار می گیرند و در این ابزار ذخیره می شوند. به عنوان نمونه، مطابق با شکل ۵، همه المان های شمع سازه مورد مطالعه، در یک گروه به نام "حفاری شمع ها" ترتیب داده می شوند و در مجموعه های انتخاب ذخیره می گردند.



شکل ۵: مجموعه گروه های مربوط به المان های مدل سه بعدی مطابق با WBS در ابزار مجموعه های انتخاب

مرحله چهارم) تعیین انواع منابع

از آنجایی که در این پروژه تمرکز بیشتر بر روی استفاده منظم از منابع تجدید پذیر است؛ لذا این منابع به دودسته منابع انسانی (شامل کارگر ساده، کارگر حرفه ای، استادکار، آرماتوربند، قالب بند، جوشکار و راننده) و ماشین آلات (شامل جرثقیل، پمپ بتن، آب پاش، گریدر، همزن، ویراتور، کامیون و بیل مکانیکی) طبقه بندی کرد. در این پژوهش برای ایجاد محدودیت منابع، مقدار منابع تجدید پذیر را کمتر از مقدار مورد نیاز در نظر گرفتیم که در نتیجه باعث ایجاد محدودیت در پروژه می شود (جدول ۴).

جدول ۴: منابع تجدید پذیر مورد استفاده در پروژه ها

| نام منبع | بیشترین مقدار | نوع | R | واحد |
|------------|---------------|------------|--------|------|
| آرماتوربند | ۵ | تجدید پذیر | انسانی | نفر |

| | | | | |
|--------|--------|-----------|----|---------------|
| نفر | انسانی | تجدیدپذیر | ۵ | قالب‌بند |
| نفر | انسانی | تجدیدپذیر | ۱۰ | کارگر حرفه ای |
| نفر | انسانی | تجدیدپذیر | ۱۰ | کارگر ساده |
| نفر | انسانی | تجدیدپذیر | ۴ | استادکار |
| نفر | انسانی | تجدیدپذیر | ۴ | جوشکار |
| نفر | انسانی | تجدیدپذیر | ۵ | راننده |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۳ | لودر |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۲ | گریدر |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۲ | آبپاش |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۲ | غلتک |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۳ | خاموت زن |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۳ | همزن |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۲ | ویبراتور |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۲ | کامیون |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۱ | جرثقیل |
| دستگاه | ماشین | تجدیدپذیر | ۲ | بیل مکانیکی |

در گام بعد بایستی مقادیر منابع تجدیدپذیر مورد استفاده در پژوهش حاضر، مشخص شوند که در جداول ۵-۷ این موارد برای هر سه پروژه مشخص شده‌اند. اعداد داخل براکت نشان دهنده مقدار مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر برای آن فعالیت است. همچنین این اعداد فرضی هستند و جهت ایجاد نوعی محدودیت در منابع تخصیص یافته‌اند.

جدول ۵: مقادیر منابع تجدیدپذیر برای پروژه الف

| منابع | شرح فعالیت |
|--|--|
| | شروع |
| | تحويل زمین |
| | ابلاغ نقشه‌های تا توسط کارفرما به پیمانکار |
| | اخذ پروانه ساختمانی پروژه |
| کارگر ساده (۵) | تجهیز کارگاه |
| بیل مکانیکی (۳)، راننده (۵)، گریدر (۱)، لودر (۲)، کامیون (۴) | خاک‌برداری با ماشین |
| کارگر ساده (۵) | تکمیل حفاری شمع‌ها |
| کارگر ساده (۵) | قفس بافی و قفس گذاری |
| کارگر ساده (۴)، همزن (۳)، کارگر فنی (۲) | بتن‌ریزی شمع‌ها |
| جوشکار (۳)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۱) | اجرای سازه نگهدار |
| کارگر ساده (۵) | رگلاژ کف |
| کارگر ساده (۴)، همزن (۳)، کارگر فنی (۲) | اجرای بتن مگر |
| کارگر ساده (۲)، کارگر فنی (۲) | اجرای چاله آسانسور |
| خاموت زن (۳)، کارگر ساده (۴)، آرماتوربند (۳)، کارگر فنی (۲) | اجرای آرماتوربندی فونداسیون |
| کارگر ساده (۵) | آکس‌بندی و اجرای آرماتوربندی ریشه ستون و دیوار |
| قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۶)، کارگر ساده (۵) | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی فونداسیون |
| آرماتوربند (۳)، خاموت زن (۳)، کارگر ساده (۴)، کارگر فنی (۴) | اجرای آرماتوربندی ستون‌های طبقه همکف |
| قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۴) | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی ستون‌های طبقه همکف |
| قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۴) | اجرای آرماتوربندی تیر و دال طبقه همکف |
| خاموت زن، کارگر ساده (۴)، آرماتوربند (۲)، کارگر فنی (۲) | اجرای قالب‌بندی و تیرچه گذاری طبقه همکف |
| قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۶) | اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه همکف |

| | |
|---|---|
| اجرای آرماتوربندی ستون‌های طبقه اول | آرماتوربند (۳)، خاموت زن (۳)، کارگر ساده (۴)، کارگر فنی (۴) |
| اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی ستون‌های طبقه اول | قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۴) |
| اجرای آرماتوربندی تیر طبقه اول | قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۶)، کارگر ساده (۵) |
| اجرای قالب‌بندی و تیغه‌گذاری طبقه اول | آرماتوربند (۴)، خاموت زن (۴)، کارگر ساده (۴)، کارگر فنی (۵) |
| اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه اول | قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۳) |
| اجرای شاسی‌کشی آسانسور | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۶)، استادکار (۳) |
| اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای جانبی | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۶)، استادکار (۳) |
| اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای داخلی | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۶)، استادکار (۳) |
| اجرای چارچوب‌گذاری درب‌ها و نعل‌درگاه‌های بازشوها | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۶)، استادکار (۳) |
| تحويل موقت پروژه | |
| برچیدن کارگاه | کارگر ساده (۵) |
| پایان | |

جدول ۶: مقادیر منابع تجدیدپذیر برای پروژه ب

| شرح فعالیت | منابع |
|---|--|
| شروع | |
| تحويل زمین | |
| اخذ پروانه ساختمانی | |
| تجهیز کارگاه | کارگر ساده (۵) |
| گودبرداری | بیل مکانیکی (۲)، راننده (۵)، گریدر (۱)، لودر (۲)، کامیون (۳) |
| تسطیح و رگلاژ | کارگر ساده (۵) |
| بتن مگر | کارگر ساده (۴)، همزن (۴)، کارگر فنی (۴) |
| اجرای آرماتوربندی فونداسیون | کارگر ساده (۵) |
| قالب‌بندی فونداسیون | قالب‌بند (۵)، کارگر فنی (۴)، کارگر ساده (۴) |
| بتن‌ریزی فونداسیون | قالب‌بند (۵)، کارگر فنی (۴)، کارگر ساده (۴) |
| اجرای آرماتور کلاف زیر دیوار بیرونی | آرماتوربند (۴)، خاموت زن (۴)، کارگر ساده (۴)، کارگر فنی (۴) |
| اجرای قالب کلاف بیرونی ساختمانی | قالب‌بند (۴)، کارگر فنی (۶)، کارگر ساده (۵) |
| اجرای بتن‌ریزی کلاف زیر دیوار بیرونی | کارگر ساده (۵) |
| اجرای آرماتوربندی کلاف قائم طبقه اول | قالب‌بند (۵)، کارگر فنی (۳)، کارگر ساده (۴) |
| اجرای قالب‌بندی کلاف قائم‌های طبقه اول | قالب‌بند (۵)، کارگر فنی (۳)، کارگر ساده (۴) |
| اجرای بتن‌ریزی کلاف قائم‌های طبقه اول | کارگر ساده (۵) |
| اجرای قالب‌بندی سقف طبقه اول | قالب‌بند (۵)، کارگر فنی (۳)، کارگر ساده (۴) |
| اجرای آرماتوربندی سقف طبقه اول | قالب‌بند (۵)، کارگر فنی (۳)، کارگر ساده (۴) |
| اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه اول | کارگر ساده (۵) |
| اجرای آرماتوربندی ستون جان‌پناه | قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۶)، کارگر ساده (۵) |
| اجرای قالب‌بندی ستون جان‌پناه | قالب‌بند (۳)، کارگر فنی (۶)، کارگر ساده (۵) |
| اجرای بتن‌ریزی ستون جان‌پناه | کارگر ساده (۴) |
| اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای جانبی | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۶)، استادکار (۳) |
| اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای داخلی | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۶)، استادکار (۳) |
| اجرای چارچوب‌گذاری درب‌ها و نعل‌درگاه‌های بازشوها | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۶)، استادکار (۳) |
| تحويل موقت پروژه | |
| برچیدن کارگاه | کارگر ساده (۵) |
| پایان | |

جدول ۷: مقادیر منابع تجدیدپذیر برای پروژه ج

| شرح فعالیت | منابع |
|--|--|
| شرح فعالیت | |
| شروع | |
| تحويل زمین | |
| اخذ پروانه ساختمانی | |
| تجهیز کارگاه | کارگر ساده (۵) |
| تکمیل حفاری شمعها | کارگر ساده (۵) |
| قفس بافی و قفس گذاری | کارگر ساده (۵) |
| بتن ریزی شمعها | کارگر ساده (۵)، همزن (۳)، کارگر فنی (۴) |
| ساخت ستون مرحله اول | جوشکار (۴)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۳) |
| ساخت ستون مرحله دوم | جوشکار (۴)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۳) |
| ساخت تیرهای اصلی طبقه اول | جوشکار (۴)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۳) |
| ساخت تیرهای اصلی طبقه دوم | جوشکار (۴)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۳) |
| ساخت تیرهای فرعی طبقه اول | جوشکار (۴)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۳) |
| ساخت تیرهای فرعی طبقه دوم | جوشکار (۴)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۳) |
| خاکبرداری مرحله اول | بیل مکانیکی (۲)، راننده (۵)، گریدر (۱)، لودر (۲)، کامیون (۳) |
| علامت گذاری مختصات زمین مرحله اول | کارگر ساده (۵) |
| تسطیح و رگلاژ مرحله اول | کارگر ساده (۵) |
| بتن مگر پی مرحله اول | کارگر ساده (۵)، همزن (۴)، کارگر فنی (۴) |
| آرماتوربندی پی مرحله اول | آرماتوربند (۳)، خاموت زن (۳)، کارگر ساده (۶)، کارگر فنی (۵) |
| قالببندی پی مرحله اول | قالببند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۶) |
| نصب صفحه ستون پی مرحله اول | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۲) |
| بتن ریزی پی مرحله اول | کارگر ساده (۴) |
| قالببندی سقف طبقه همکف | قالببند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۴) |
| آرماتوربندی سقف طبقه همکف | آرماتوربند (۴)، خاموت زن (۴)، کارگر ساده (۴)، کارگر فنی (۴) |
| بتن ریزی سقف طبقه همکف | کارگر ساده (۵) |
| قالببندی سقف طبقه اول | قالببند (۴)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۵) |
| آرماتوربندی سقف طبقه اول | آرماتوربند (۴)، خاموت زن (۳)، کارگر ساده (۴)، کارگر فنی (۵) |
| بتن ریزی سقف طبقه اول | کارگر ساده (۵) |
| قالببندی سقف طبقه دوم | قالببند (۳)، کارگر فنی (۲)، کارگر ساده (۴) |
| آرماتوربندی سقف طبقه دوم | آرماتوربند (۴)، خاموت زن (۴)، کارگر ساده (۴)، کارگر فنی (۵) |
| بتن ریزی سقف طبقه دوم | کارگر ساده (۵) |
| اجرای شاسی کشی آسانسور | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۲) |
| اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای جانبی | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۲) |
| اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای داخلی | جوشکار (۳)، کارگر ساده (۴)، استادکار (۲) |
| تحويل موقت پروژه | |
| برچیدن کارگاه | کارگر ساده (۵) |
| پایان | |

مرحله پنجم) حل مسئله RCMPSP با استفاده از الگوریتم PSO

برای حل این مسئله، ابتدا باید اطلاعات مورد نیاز برای اجرای پروژه را به صورت دقیق و سازمان یافته در نرم افزار MATLAB وارد کنیم. این اطلاعات شامل فهرست پیش نیازی فعالیتها، زمان اولیه آنها و مقادیر انواع منابع برای حالت های مختلف اجرایی است که در جداول مراحل قبل قابل مشاهده است. این داده ها به دلیل حجم بالا، در یک فایل اکسل ذخیره می شوند و سپس از طریق نرم افزار متلب فراخوانی می شوند. در مرحله بعدی، ابتدا به پارامترهای الگوریتم بهینه سازی PSO مقاردهی اولیه می شود (جدول ۸). این پارامترها تأثیر مستقیمی بر عملکرد الگوریتم دارند و نیاز است که به صورت دقیق تنظیم شوند. این پارامترها بر اثر عملکرد الگوریتم در تحقق بهینه سازی تأثیر گذار هستند.

جدول ۸: مقادیر اولیه پارامترهای الگوریتم PSO در پژوهش حاضر

| پارامتر | مقدار |
|-------------------------|-------|
| اندازه جمعیت | ۱۰۰ |
| تعداد نسل | ۱۰ |
| ضریب وزن اینرسی | ۰/۷۵ |
| ضریب ثابت یادگیری شخصی | ۱/۵ |
| ضریب ثابت یادگیری عمومی | ۱/۵ |

مرحله ششم) خروجی مسئله RCMPSP

بعد از اجرای کد مسئله RCMPSP، توالی بهینه‌ای از حالت‌های اجرایی برای انجام فعالیت‌ها به همراه زمان شروع و پایان آن‌ها، با فرمت فوق در خروجی تولید خواهد شد. این اطلاعات سپس در یک فایل اکسل ابتدایی ذخیره خواهند شد. این محتوا به صورت دقیق در جداول ۹-۱۱ ارائه شده است. از آنجایی که تمام پروژه‌ها در تاریخ ۲۰۲۳/۰۱/۰۱ میلادی شروع می‌شوند این تاریخ را به عنوان مبنا در نظر می‌گیریم و شروع و پایان تمام فعالیت‌ها نسبت به این تاریخ سنجیده می‌شود. این خروجی‌های الگوریتم PSO را در یک فایل اکسل جداگانه با پسوند csv ذخیره شدند تا بتوان آن‌ها را به نرم‌افزار Naviswork Manage انتقال داد. همچنین، در آخر ستونی به عنوان task type ایجاد شد و تمام فعالیت‌ها در حالت Construct قرار داده شدند. این ستون تعیین می‌کند که چگونه موارد متصل به فعالیت در طول شبیه‌سازی نمایش داده خواهند شد. به عنوان مثال، یک دنباله ساخت با نمایش همه موارد مخفی شروع می‌شود، همان‌طور که فعالیت آغاز می‌شود، موارد متصل نمایش داده می‌شوند؛ ولی به صورت سبز شفاف، سپس هنگام پایان فعالیت، موارد متصل به همان صورتی که در نمایش عادی مدل است نمایش داده می‌شوند.

جدول ۹: خروجی زمان‌بندی پروژه الف پس از اجرای الگوریتم

| Task type | پایان | شروع | شناوری فعالیت | زمان پایان فعالیت | زمان شروع فعالیت | مدت | شرح فعالیت |
|-----------|------------|------------|---------------|-------------------|------------------|-----|--|
| Construct | | ۰۱۰۰۱۰۲۰۲۳ | | | | ۰ | شروع |
| Construct | ۰۲۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰۱۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | تحويل زمین |
| Construct | ۰۴۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰۲۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۳ | ۱ | ۲ | ابلاغ نقشه‌های تا توسط کارفرما به پیمانکار |
| Construct | ۰۶۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰۴۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۵ | ۳ | ۲ | اخذ پروانه ساختمانی پروژه |
| Construct | ۱۱۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰۶۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۱۰ | ۵ | ۵ | تجهیز کارگاه |
| Construct | ۱۴۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۱۱۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۱۳ | ۱۰ | ۳ | خاک‌برداری با ماشین |
| Construct | ۱۶۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۱۴۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۱۵ | ۱۳ | ۲ | تکمیل حفاری شمع‌ها |
| Construct | ۱۸۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۱۶۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۱۷ | ۱۵ | ۲ | قفس بافی و قفس گذاری |
| Construct | ۲۰۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۱۸۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۲۰ | ۱۹ | ۱۷ | ۲ | بتن‌ریزی شمع‌ها |
| Construct | ۲۴۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۲۰۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۴۳ | ۳۹ | ۴ | اجرای سازه نگهبان |
| Construct | ۲۵۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۲۴۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۴۴ | ۴۳ | ۱ | رگلاژ کف |
| Construct | ۲۶۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۲۵۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۴۵ | ۴۴ | ۱ | اجرای بتن مگر |
| Construct | ۲۷۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۲۶۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۴۶ | ۴۵ | ۱ | اجرای چاله آسانسور |
| Construct | ۳۱۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۲۷۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۵۰ | ۴۶ | ۴۴ | اجرای آماتور بندی فونداسیون |
| Construct | ۰۱۰۰۲۰۲۰۲۳ | ۳۱۰۰۱۰۲۰۲۳ | ۰ | ۵۱ | ۵۰ | ۱ | آکس‌بندی و اجرای آرماتوربندی ریشه ستون و دیوار |
| Construct | ۰۴۰۰۲۰۲۰۲۳ | ۰۱۰۰۲۰۲۰۲۳ | ۶ | ۵۴ | ۵۱ | ۳ | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی فونداسیون |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|------------|----|-----|-----|---|---|
| Construct | ۰۸-۰۲-۲۰۲۳ | ۰۴-۰۲-۲۰۲۳ | ۱ | ۶۴ | ۶۰ | ۴ | اجرای آرماتوربندی ستون‌های طبقه همکف |
| Construct | ۰۹-۰۲-۲۰۲۳ | ۰۸-۰۲-۲۰۲۳ | ۰ | ۶۶ | ۶۵ | ۱ | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی ستون‌های طبقه همکف |
| Construct | ۱۴-۰۲-۲۰۲۳ | ۰۹-۰۲-۲۰۲۳ | ۰ | ۷۱ | ۶۶ | ۵ | اجرای آرماتوربندی تیر و دال طبقه همکف |
| Construct | ۱۶-۰۲-۲۰۲۳ | ۱۴-۰۲-۲۰۲۳ | ۰ | ۷۳ | ۷۱ | ۲ | اجرای قالب‌بندی و تیرچه گذاری طبقه همکف |
| Construct | ۱۷-۰۲-۲۰۲۳ | ۱۶-۰۲-۲۰۲۳ | ۰ | ۷۴ | ۷۳ | ۱ | اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه همکف |
| Construct | ۲۱-۰۲-۲۰۲۳ | ۱۷-۰۲-۲۰۲۳ | ۲ | ۷۸ | ۷۴ | ۴ | اجرای آرماتوربندی ستون‌های طبقه اول |
| Construct | ۲۲-۰۲-۲۰۲۳ | ۲۱-۰۲-۲۰۲۳ | ۰ | ۸۱ | ۸۰ | ۱ | اجرای قالب‌بندی و بتن‌ریزی ستون‌های طبقه اول |
| Construct | ۲۷-۰۲-۲۰۲۳ | ۲۲-۰۲-۲۰۲۳ | ۰ | ۸۶ | ۸۱ | ۵ | اجرای آرماتوربندی بی‌طبقه اول |
| Construct | ۰۱-۰۳-۲۰۲۳ | ۲۷-۰۲-۲۰۲۳ | ۶ | ۸۸ | ۸۶ | ۲ | اجرای قالب‌بندی و تیرچه گذاری طبقه اول |
| Construct | ۰۲-۰۳-۲۰۲۳ | ۰۱-۰۳-۲۰۲۳ | ۰ | ۹۵ | ۹۴ | ۱ | اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه اول |
| Construct | ۰۴-۰۳-۲۰۲۳ | ۰۲-۰۳-۲۰۲۳ | ۴ | ۹۷ | ۹۵ | ۲ | اجرای شاسی‌کشی آسانسور |
| Construct | ۰۶-۰۳-۲۰۲۳ | ۰۴-۰۳-۲۰۲۳ | ۰ | ۱۰۳ | ۱۰۱ | ۲ | اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای جانبی |
| Construct | ۰۸-۰۳-۲۰۲۳ | ۰۶-۰۳-۲۰۲۳ | ۰ | ۱۰۵ | ۱۰۳ | ۲ | اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای داخلی |
| Construct | ۱۰-۰۳-۲۰۲۳ | ۰۸-۰۳-۲۰۲۳ | ۰ | ۱۰۷ | ۱۰۵ | ۲ | اجرای چارچوب‌گذاری درب‌ها و نعل‌درگاه‌های بازشوها |
| Construct | ۱۰-۰۳-۲۰۲۳ | ۱۰-۰۳-۲۰۲۳ | ۱۵ | ۱۰۷ | ۱۰۷ | ۰ | تحويل موقت پروژه |
| Construct | ۱۳-۰۳-۲۰۲۳ | ۱۰-۰۳-۲۰۲۳ | ۰ | ۱۲۵ | ۱۲۲ | ۳ | برچیدن کارگاه |

جدول ۱۰: خروجی زمان‌بندی پروژه ب پس از اجرای الگوریتم

| task type | پایان | شروع | شماره فعالیت | زمان پایان فعالیت | زمان شروع فعالیت | مدت | شرح فعالیت |
|-----------|------------|------------|--------------|-------------------|------------------|-----|---|
| Construct | | ۲۰۲۳-۰۱-۰۱ | | | | ۰ | شروع |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۲ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | تحويل زمین |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۳ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۲ | ۰ | ۲ | ۱ | ۱ | اخذ پروانه ساختمانی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۴ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۳ | ۰ | ۳ | ۲ | ۱ | تجهیز کارگاه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۷ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۴ | ۴ | ۶ | ۳ | ۳ | گود برداری |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۸ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۷ | ۰ | ۱۱ | ۱۰ | ۱ | تسطیح و رگلاژ |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۹ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۸ | ۷ | ۱۲ | ۱۱ | ۱ | بتن مگر |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۱۴ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۹ | ۰ | ۲۴ | ۱۹ | ۵ | اجرای آرماتور بندی فونداسیون |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۱۷ | ۲۰۲۳-۰۱-۱۴ | ۰ | ۲۷ | ۲۴ | ۳ | قالب بندی فونداسیون |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۱۸ | ۲۰۲۳-۰۱-۱۷ | ۰ | ۲۸ | ۲۷ | ۱ | بتن ریزی فونداسیون |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۲۱ | ۲۰۲۳-۰۱-۱۸ | ۰ | ۳۱ | ۲۸ | ۳ | اجرای آرماتور کلاف زیر دیوار بیرونی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۲۳ | ۲۰۲۳-۰۱-۲۱ | ۰ | ۳۳ | ۳۱ | ۲ | اجرای قالب کلاف بیرونی ساختمانی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۲۵ | ۲۰۲۳-۰۱-۲۳ | ۰ | ۳۵ | ۳۳ | ۲ | اجرای بتن ریزی کلاف زیر دیوار بیرونی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۰۲ | ۲۰۲۳-۰۱-۲۵ | ۱۱ | ۴۳ | ۳۵ | ۸ | اجرای آرماتور بندی کلاف قائم طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۰۷ | ۲۰۲۳-۰۲-۰۲ | ۱۹ | ۵۹ | ۵۴ | ۵ | اجرای قالب‌بندی کلاف قائم‌های طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۰۹ | ۲۰۲۳-۰۲-۰۷ | ۱۷ | ۸۰ | ۷۸ | ۲ | اجرای بتن‌ریزی کلاف قائم‌های طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۱۳ | ۲۰۲۳-۰۲-۰۹ | ۶ | ۱۰۱ | ۹۷ | ۴ | اجرای قالب‌بندی سقف طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۱۷ | ۲۰۲۳-۰۲-۱۳ | ۰ | ۱۱۱ | ۱۰۷ | ۴ | اجرای آرماتوربندی سقف طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۱۸ | ۲۰۲۳-۰۲-۱۷ | ۱ | ۱۱۲ | ۱۱۱ | ۱ | اجرای بتن‌ریزی سقف طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۰ | ۲۰۲۳-۰۲-۱۸ | ۰ | ۱۱۵ | ۱۱۳ | ۲ | اجرای آرماتوربندی ستون جان‌پناه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۲ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۰ | ۰ | ۱۱۷ | ۱۱۵ | ۲ | اجرای قالب‌بندی ستون جان‌پناه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۳ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۲ | ۰ | ۱۱۸ | ۱۱۷ | ۱ | اجرای بتن‌ریزی ستون جان‌پناه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۴ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۳ | ۰ | ۱۱۹ | ۱۱۸ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای جانبی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۵ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۴ | ۰ | ۱۲۰ | ۱۱۹ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه‌چینی دیوارهای داخلی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۷ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۵ | ۰ | ۱۲۲ | ۱۲۰ | ۲ | اجرای چارچوب‌گذاری درب‌ها و نعل‌درگاه‌های بازشوها |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۸ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۷ | ۰ | ۱۲۳ | ۱۲۲ | ۱ | تحويل موقت پروژه |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|------------|---|-----|-----|---|---------------|
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۰۱ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۸ | ۰ | ۱۲۴ | ۱۲۳ | ۱ | برچیدن کارگاه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۰۱ | ۲۰۲۳-۰۳-۰۱ | | | | ۰ | پایان |

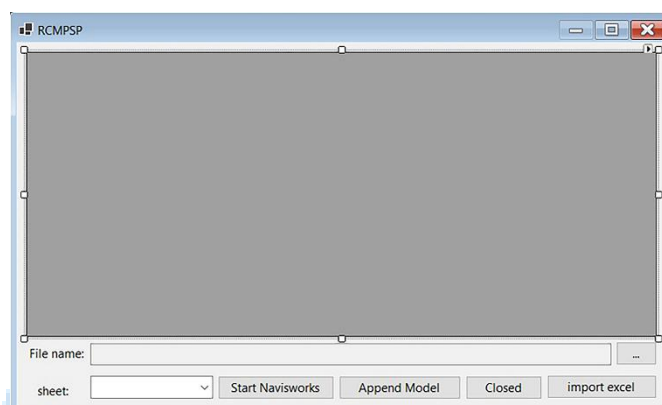
جدول ۱۱: خروجی زمان بندی پروژه ج پس از اجرای الگوریتم

| task type | پایان | شروع | شناوری فعالیت‌ها | زمان پایان فعالیت | زمان شروع فعالیت | مدت | شرح فعالیت |
|-----------|------------|------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----|--|
| Construct | | ۲۰۲۳-۰۱-۰۱ | | | | ۰ | شروع |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۲ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | تحويل زمین |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۳ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۲ | ۰ | ۲ | ۱ | ۱ | اخذ پروانه ساختمانی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۴ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۳ | ۰ | ۳ | ۲ | ۱ | تجهیز کارگاه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۶ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۴ | ۰ | ۵ | ۳ | ۲ | تکمیل حفاری شمع‌ها |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۰۸ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۶ | ۰ | ۷ | ۵ | ۲ | قفس بافی و قفس گذاری |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۱۰ | ۲۰۲۳-۰۱-۰۸ | ۰ | ۹ | ۷ | ۲ | بتن ریزی شمع‌ها |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۱۵ | ۲۰۲۳-۰۱-۱۰ | ۰ | ۱۴ | ۹ | ۵ | ساخت ستون مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۲۰ | ۲۰۲۳-۰۱-۱۵ | ۰ | ۱۹ | ۱۴ | ۵ | ساخت ستون مرحله دوم |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۲۵ | ۲۰۲۳-۰۱-۲۰ | ۰ | ۲۴ | ۱۹ | ۵ | ساخت تیرهای اصلی طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۱-۳۰ | ۲۰۲۳-۰۱-۲۵ | ۰ | ۲۹ | ۲۴ | ۵ | ساخت تیرهای اصلی طبقه دوم |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۰۴ | ۲۰۲۳-۰۱-۳۰ | ۰ | ۳۴ | ۲۹ | ۵ | ساخت تیرهای فرعی طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۰۹ | ۲۰۲۳-۰۲-۰۴ | ۰ | ۳۹ | ۳۴ | ۵ | ساخت تیرهای فرعی طبقه دوم |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۱۳ | ۲۰۲۳-۰۲-۰۹ | ۰ | ۴۳ | ۳۹ | ۴ | خاک برداری مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۱۵ | ۲۰۲۳-۰۲-۱۳ | ۰ | ۴۵ | ۴۳ | ۲ | علامت گذاری مختصات زمین مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۱۸ | ۲۰۲۳-۰۲-۱۵ | ۰ | ۴۸ | ۴۵ | ۳ | تسطیح و رگلاز مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۲-۲۳ | ۲۰۲۳-۰۲-۱۸ | ۱ | ۵۳ | ۴۸ | ۵ | بتن مگر پی مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۰۱ | ۲۰۲۳-۰۲-۲۳ | ۰ | ۶۰ | ۵۴ | ۶ | آرماتور بندی پی مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۰۶ | ۲۰۲۳-۰۳-۰۱ | ۰ | ۶۵ | ۶۰ | ۵ | قالب بندی پی مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۰۹ | ۲۰۲۳-۰۳-۰۶ | ۰ | ۶۸ | ۶۵ | ۳ | نصب صفحه ستون پی مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۱۵ | ۲۰۲۳-۰۳-۰۹ | ۰ | ۷۴ | ۶۸ | ۶ | بتن ریزی پی مرحله اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۲۱ | ۲۰۲۳-۰۳-۱۵ | ۰ | ۸۰ | ۷۴ | ۶ | قالب بندی سقف طبقه همکف |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۲۷ | ۲۰۲۳-۰۳-۲۱ | ۰ | ۸۶ | ۸۰ | ۶ | آرماتور بندی سقف طبقه همکف |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۳-۲۸ | ۲۰۲۳-۰۳-۲۷ | ۱ | ۸۷ | ۸۶ | ۱ | بتن ریزی سقف طبقه همکف |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۰۳ | ۲۰۲۳-۰۳-۲۸ | ۰ | ۹۴ | ۸۸ | ۶ | قالب بندی سقف طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۰۹ | ۲۰۲۳-۰۴-۰۳ | ۰ | ۱۰۰ | ۹۴ | ۶ | آرماتور بندی سقف طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۱۰ | ۲۰۲۳-۰۴-۰۹ | ۰ | ۱۰۱ | ۱۰۰ | ۱ | بتن ریزی سقف طبقه اول |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۱۶ | ۲۰۲۳-۰۴-۱۰ | ۰ | ۱۰۷ | ۱۰۱ | ۶ | قالب بندی سقف طبقه دوم |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۲ | ۲۰۲۳-۰۴-۱۶ | ۰ | ۱۱۳ | ۱۰۷ | ۶ | آرماتور بندی سقف طبقه دوم |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۳ | ۲۰۲۳-۰۴-۲۲ | ۰ | ۱۱۴ | ۱۱۳ | ۱ | بتن ریزی سقف طبقه دوم |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۵ | ۲۰۲۳-۰۴-۲۳ | ۰ | ۱۱۶ | ۱۱۴ | ۲ | اجرای شاسی کشی اسانسور |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۶ | ۲۰۲۳-۰۴-۲۵ | ۰ | ۱۱۷ | ۱۱۶ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای جانبی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۷ | ۲۰۲۳-۰۴-۲۶ | ۰ | ۱۱۸ | ۱۱۷ | ۱ | اجرای وال پست و تیغه چینی دیوارهای داخلی |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۸ | ۲۰۲۳-۰۴-۲۷ | ۳ | ۱۱۹ | ۱۱۸ | ۱ | تحويل موقت پروژه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۹ | ۲۰۲۳-۰۴-۲۸ | ۰ | ۱۲۳ | ۱۲۲ | ۱ | برچیدن کارگاه |
| Construct | ۲۰۲۳-۰۴-۲۹ | ۲۰۲۳-۰۴-۲۹ | | | | ۰ | پایان |

البته پیش از شبیه‌سازی فرایند ساخت تحت محدودیت منابع از یک تابع API جهت ایجاد یکپارچگی میان دو نرم‌افزار Excel و Naviswork استفاده شد که این تابع در فضای Visual Studio توسط زبان C# نوشته شده است (شکل ۶). قسمت‌های مختلف این فرم به ترتیب زیر اجرا می‌شوند:

• Start Navisworks و Append Model: در این بخش نرم‌افزار مربوطه و مدل موردنظر در نرم‌افزار باز می‌شود.

• Sheet و File Name: در این بخش فایل اکسل اطلاعات پروژه، انتخاب شده و داده‌های آن در قسمت بالایی فرم نمایش داده می‌شود.

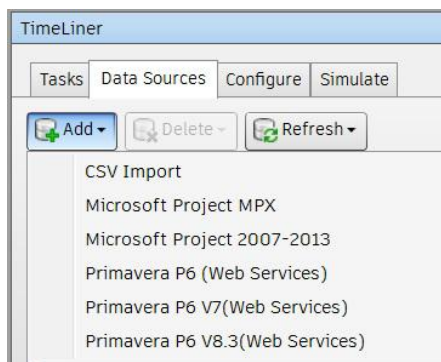


شکل ۶: فرم اولیه ایجاد شده در Visual Studio

خروجی حل مسئله RCMPSP که در یک فایل CSV ذخیره شده است در فرم مربوطه اجرا می‌شود و پیش از بارگذاری در نرم‌افزار Naviswork قابل رویت است (شکل‌های ۷ و ۸).

| element id | مدت | زمان شروع فعالیت | زمان پایان فعالیت | start | finish | task type |
|---------------------|-----|------------------|-------------------|----------|----------|-----------|
| شروع | 0 | | | 1/1/2023 | | Construct |
| تحویل زمین | 1 | 0 | 1 | 1/1/2023 | 1/2/2023 | Construct |
| اخذ پروانه ساختمانی | 1 | 1 | 2 | 1/2/2023 | 1/3/2023 | Construct |
| تجهیز کارگاه | 1 | 2 | 3 | 1/3/2023 | 1/4/2023 | Construct |
| گود برداری | 3 | 3 | 6 | 1/4/2023 | 1/7/2023 | Construct |
| تسطیح و رگلاژ | 1 | 10 | 11 | 1/7/2023 | 1/8/2023 | Construct |
| بتن مگر | 1 | 11 | 12 | 1/8/2023 | 1/9/2023 | Construct |

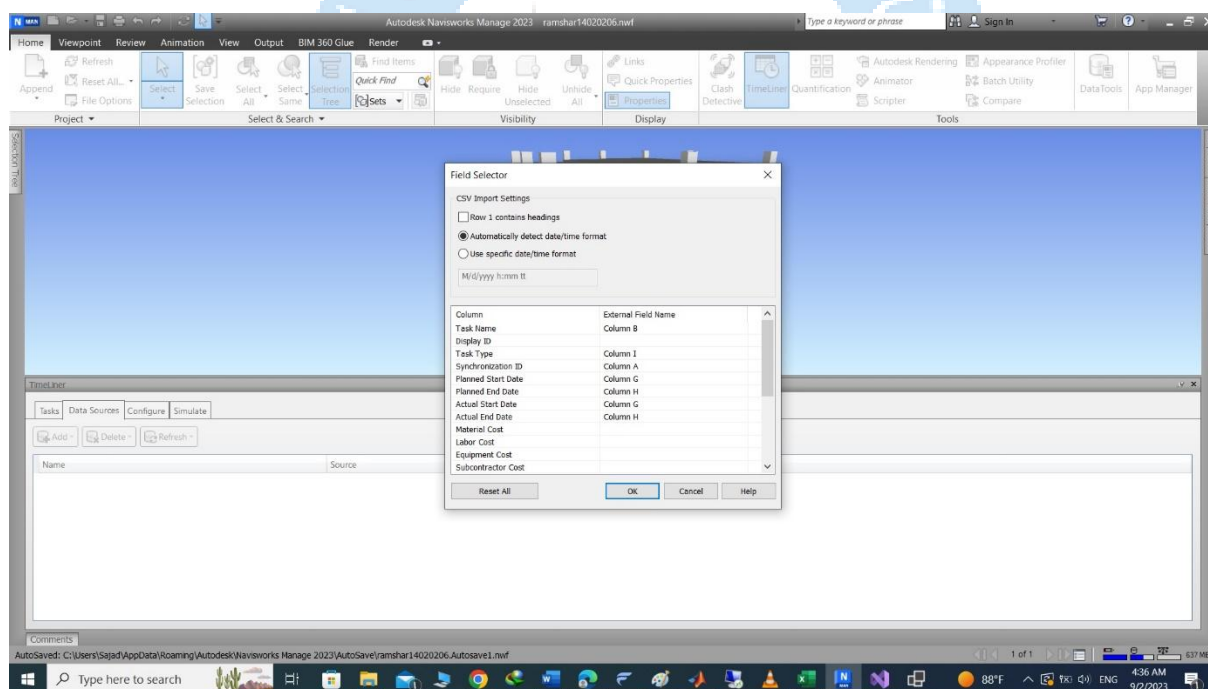
شکل ۷: فرم ایجاد شده جهت یکپارچگی عملیات



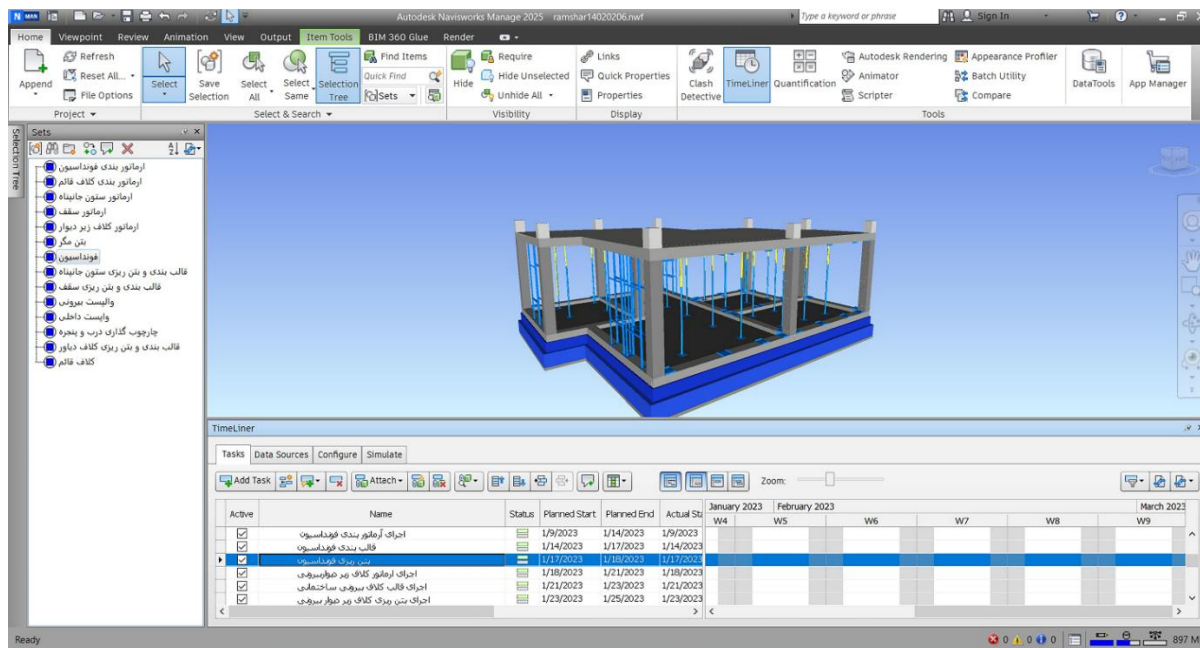
شکل ۸: نحوه انتقال فایل csv به Naviswork

مرحله هفتم) مدل سازی چهاربعدی مسئله RCMSP

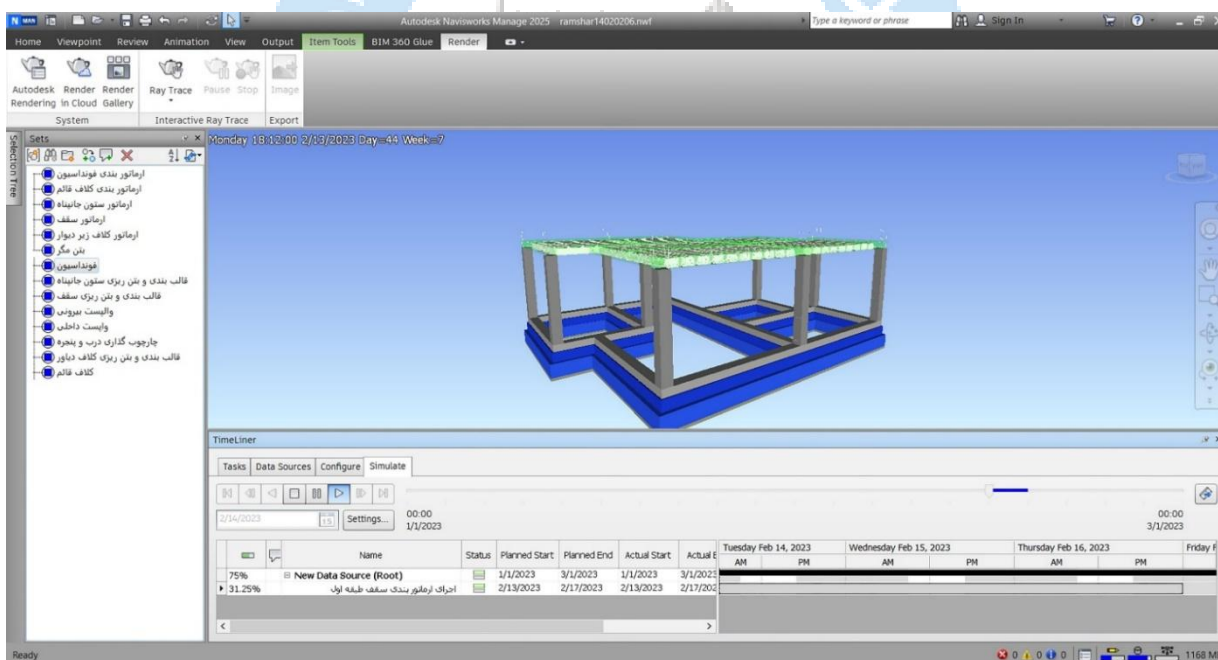
قبل از وارد کردن فایل CSV در نرم افزار Naviswork، باید در قسمت Field selector ستون های موجود در فایل CSV را با ستون های پیش فرض نرم افزار Naviswork هماهنگ سازی ۱۹ و مورد مطابقت قرارداد شوند (شکل ۹). این کار برای تطابق داده ها انجام می گیرد. در گام بعد، برای انجام فرایند شبیه سازی، بایستی المان های مدل سه بعدی به فعالیت های پروژه ارتباط داده شوند. این کار به وسیله ابزار مجموعه های انتخاب قابل انجام است (شکل ۱۰). در نهایت برآیند شبیه سازی انجام می شود (شکل ۱۱).



شکل ۹: هماهنگ سازی ستون موجود در فایل csv با ستون های پیش فرض نرم افزار Navisworks



شکل ۱۰: تنظیم کردن فعالیت‌های موجود در فایل Naviswork با csv



شکل ۱۱: ایجاد فرآیند شبیه‌سازی در پایان

۵- بحث

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به‌عنوان یک فناوری پیشرو در مدیریت پروژه‌های ساختمانی، تأثیرات چشمگیری بر بهبود فرآیند حل مسئله زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع (RCMPSP) دارد. این فناوری با فراهم آوردن امکان یکپارچه‌سازی داده‌ها،

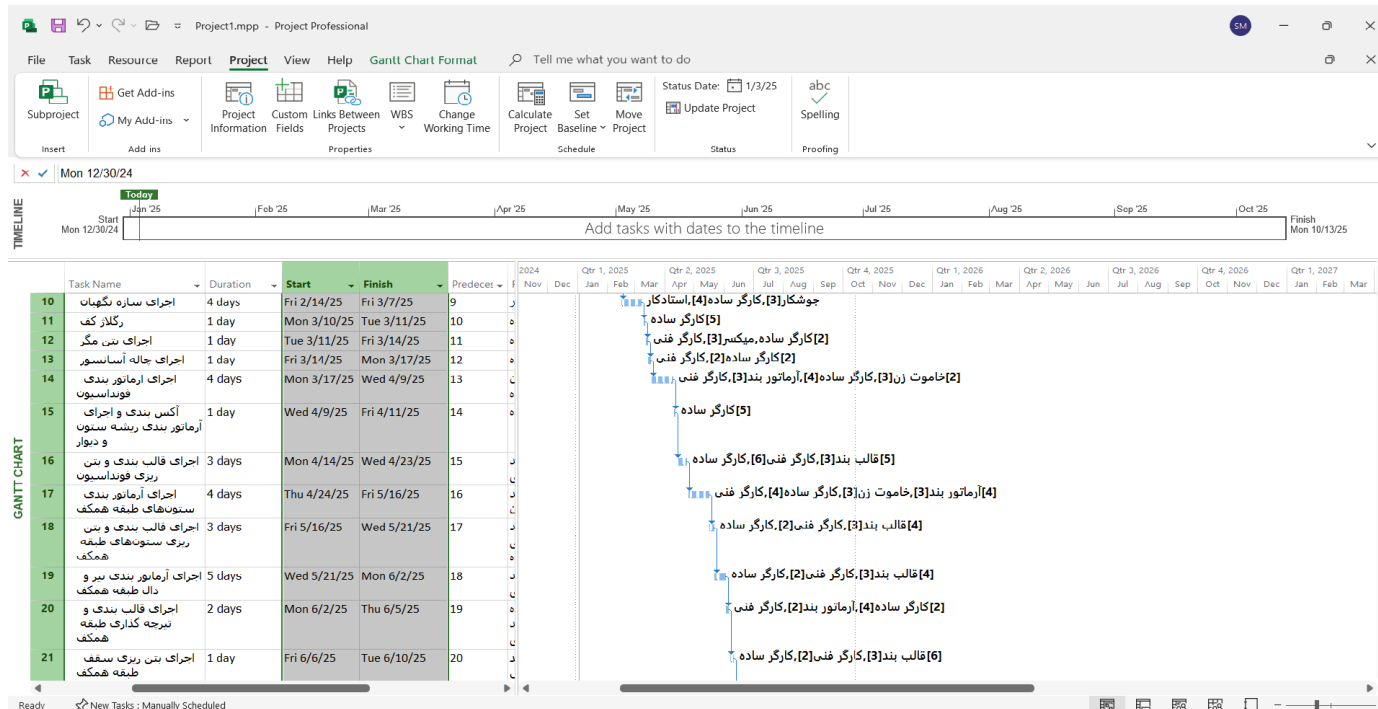
شبیه‌سازی‌های دقیق و بهبود تخصیص منابع، می‌تواند بهره‌وری و کارایی پروژه‌ها را افزایش دهد. یکی از چالش‌های اساسی در فرآیند زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع (RCMPSP) تخصیص دقیق منابع به هر پروژه است. در صورتی که از فناوری BIM استفاده نشود، تخمین منابع معمولاً به صورت تقریبی یا با در نظر گرفتن حد بالای نیازها انجام می‌شود. این رویکرد محافظه‌کارانه به این دلیل اتخاذ می‌شود که کمبود منابع در مراحل حساس پروژه رخ ندهد و ریسک تأخیرات به حداقل برسد. با این حال، در عمل، این روش منجر به تخصیص بیش از حد منابع شده و هدر رفت منابع و کاهش بهره‌وری را به دنبال دارد.

در رویکرد مبتنی بر BIM، از آنجا که داده‌ها به صورت یکپارچه و دقیق در اختیار قرار می‌گیرند، منابع به صورت بهینه تخصیص یافته و با حداقل هدر رفت، تمامی فعالیت‌ها در زمان مناسب انجام می‌شوند. در مدل BIM، نیازهای هر فعالیت با جزئیات کامل مشخص می‌شود و روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌ها نیز به طور شفاف در مدل لحاظ می‌گردد؛ بنابراین، منابع بر اساس نیاز واقعی تخصیص داده می‌شوند، بدون اینکه از حد لازم فراتر بروند یا کمبود ایجاد شود.

در این پژوهش، جهت ارزیابی کارایی رویکرد پیشنهادی مبتنی بر BIM و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، فرآیندی مجزا انجام شد (شکل ۱۲). ابتدا پروژه‌ها به صورت جداگانه در نرم‌افزار Microsoft Project زمان‌بندی شدند. با توجه به اینکه این نرم‌افزار به طور پیش‌فرض توانایی مدیریت چند پروژه‌ای با محدودیت منابع را ندارد، محدودیت منابع به گونه‌ای اعمال شد که تمامی منابع کل شرکت تنها با یک سوم ظرفیت قبلی به هر پروژه تخصیص داده شدند. این روش به طور مصنوعی شرایط واقعی محدودیت منابع را برای هر پروژه شبیه‌سازی کرد. در این فرآیند، هر پروژه به صورت مجزا و بدون استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) زمان‌بندی شد. نتایج این تحلیل نشان داد که مدت زمان اجرای پروژه‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافت. این افزایش عمدتاً ناشی از عدم توانایی روش سنتی در هماهنگی دقیق فعالیت‌ها و تخصیص بهینه منابع بود. جدول زیر، تفاوت مدت زمان پروژه‌ها با استفاده و بدون استفاده از الگوریتم PSO و رویکرد BIM را نشان می‌دهد:

جدول ۱۲: تفاوت مدت زمان پایان هر پروژه بدون استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی

| پروژه | زمان‌بندی چند پروژه ایی تحت محدودیت منابع با الگوریتم بهینه‌سازی PSO | زمان‌بندی تک پروژه ایی تحت محدودیت منابع بدون استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO | درصد افزایش زمان | اثرات کاربرد فرآیند BIM |
|-----------|--|--|------------------|--------------------------------|
| پروژه الف | ۷۱ | ۲۷۵ | ۲۸۷٪ | برآورد درست و دقیق |
| پروژه ب | ۵۹ | ۱۲۷ | ۱۱۵٪ | میزان منابع مورد نیاز هر پروژه |
| پروژه ج | ۱۱۸ | ۲۰۵ | ۷۳٪ | |



شکل ۱۲: زمانبندی هر پروژه در نرم افزار MS Project با ایجاد محدودیت منابع

از سوی دیگر، توانایی شبیه‌سازی و تحلیل بی‌درنگ فرآیند ساخت‌وساز یکی از مهم‌ترین مزایای BIM است. این شبیه‌سازی‌ها به مدیران پروژه اجازه می‌دهد تا مشکلات بالقوه را پیش از وقوع شناسایی و اقدامات اصلاحی لازم را به‌موقع اجرا کنند. چنین توانمندی‌هایی در محیط‌های بدون BIM، به دلیل کمبود ابزارهای تجسمی و تحلیلی، به‌مراتب دشوارتر است و در نتیجه احتمال وقوع بحران‌های برنامه‌ریزی و هزینه‌های اضافی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه منابع پروژه‌ها محدود هستند، تخصیص نادرست یا بیش از حد منابع در روش سنتی می‌تواند به کاهش بهره‌وری منجر شود. در این شرایط، زمانی که منابع غیرضروری به فعالیت‌های کم‌اهمیت تخصیص می‌یابند، ممکن است فعالیت‌های حیاتی با کمبود منابع مواجه شوند که این امر ناگزیر به تأخیر در تکمیل پروژه‌ها منتهی می‌شود. در رویکرد مبتنی بر BIM، منابع به‌صورت بهینه تخصیص‌یافته و هدر رفت کاهش می‌یابد.

در مجموع، به‌کارگیری BIM و الگوریتم بهینه‌سازی PSO در حل مسئله RCMPSP می‌تواند منجر به افزایش دقت در بهینه‌سازی زمان‌بندی، بهبود تخصیص منابع، کاهش ریسک‌ها و بهبود ارتباطات میان تیم‌ها شود. عدم استفاده از این فناوری می‌تواند منجر به بروز چالش‌های بیشتر در مدیریت پروژه، افزایش تأخیرات و هزینه‌های اضافی گردد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که سازمان‌ها و مدیران پروژه‌ها با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های BIM، مزایای فوق‌را در پروژه‌های خود به دست آورند.

۶- نتیجه‌گیری

این تحقیق یک رویکرد جدید برای زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) ارائه می‌دهد. این رویکرد از داده‌های مدل BIM، الگوریتم PSO، زبان برنامه‌نویسی Matlab و ابزار TimeLiner برای حل مسئله RCMPSP و کاهش زمان تکمیل پروژه‌ها استفاده می‌کند. نتایج حاصل از اجرای چارچوب فوق بر روی سه مدل فرضی، مورد ارزیابی قرار گرفت و اعتبارسنجی توسط کارشناسان در حوزه‌های زمان‌بندی و BIM در قسمت چهارم صورت گرفت. در این بخش، مهم‌ترین نتایج تحقیق به صورت موردی به شرح زیر است:

۱- ارائه چارچوبی مبتنی بر BIM و الگوریتم PSO برای حل مسئله RCMPSP و کاهش زمان تکمیل پروژه.

مدل BIM اطلاعات دقیق و یکپارچه‌ای از تمامی منابع لازم برای پروژه را در اختیار تیم‌های مختلف قرار می‌دهد. این امر موجب بهبود تصمیم‌گیری و مدیریت منابع می‌شود و امکان پیش‌بینی تغییرات و نوسانات احتمالی در طول پروژه را فراهم می‌آورد. به عبارت دیگر، استفاده از BIM در زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی می‌تواند به تسهیل فرآیندهای اجرایی و کاهش مشکلات ناشی از عدم هماهنگی کمک کند.

۲- کاهش زمان حل مسئله با بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری PSO.

استفاده از الگوریتم فراابتکاری PSO در حل مسئله RCMPSP موجب کاهش زمان حل مسئله و بهبود کارایی در زمان‌بندی پروژه‌ها شده است. این الگوریتم به‌ویژه در پروژه‌های پیچیده که نیاز به بهینه‌سازی دقیق دارند، مؤثر بوده و توانسته است در کاهش زمان تکمیل پروژه‌ها نقش مهمی ایفا کند.

۳- یکپارچه‌سازی اطلاعات و فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از توابع API

استفاده از ابزار TimeLiner و توابع API جهت مشاهده هم‌زمان اطلاعات مسئله و فرآیند شبیه‌سازی، به یکپارچه‌سازی چارچوب پژوهش کمک شایانی می‌کند. این ابزارها به تیم اجرایی پروژه این امکان را می‌دهند که تغییرات پروژه را به‌صورت لحظه‌ای مشاهده کرده و در صورت نیاز، زمان‌بندی را به‌طور مؤثر به‌روز رسانی کنند.

۴- شبیه‌سازی تغییرات و پیش‌بینی نقاط ضعف پروژه

این تحقیق نشان داد که ابزارهای BIM و الگوریتم‌های فراابتکاری به تیم‌های اجرایی کمک می‌کنند تا با استفاده از شبیه‌سازی تغییرات، نقاط ضعف پروژه را پیش‌بینی کرده و زمان‌بندی را به‌طور بهینه بهبود بخشند. این شبیه‌سازی‌ها می‌توانند به پیش‌بینی نوسانات پروژه و واکنش سریع به آن‌ها کمک کنند. در انتها پیشنهاد کارهای تحقیقاتی آتی مانند توسعه مدل‌های ساختمانی اطلاعات، مدیریت انقطاع در اجرای فعالیت‌های پروژه و حل مسائل RCMPSP با الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری و مقایسه آن‌ها، می‌تواند فرصت‌های جدیدی را برای اعمال روش‌های پیچیده‌تر و هوشمندانه‌تر در زمان‌بندی پروژه و مدیریت ساخت ایجاد کند.

مراجع

- [1] V. Faghihi, K. F. Reinschmidt, and J. H. Kang, (2014) "Construction scheduling using genetic algorithm based on building information model," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 16, pp. 7565-7578. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.047>
- [2] A. Kastor and K. Sirakoulis, (2009) "The effectiveness of resource levelling tools for resource constraint project scheduling problem," *International Journal of Project Management*, vol. 27, no. 5, pp. 493-500. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.08.006>
- [3] L. Özdamar and G. Ulusoy, (1995). "A survey on the resource-constrained project scheduling problem," *IIE transactions*, vol. 27, no. 5, pp. 574-586. <https://doi.org/10.1080/07408179508936773>
- [4] J. Blazewicz, J. K. Lenstra, and A. R. Kan, (1983) "Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity," *Discrete applied mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 11-24. [https://doi.org/10.1016/0166-218X\(83\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0166-218X(83)90012-4)
- [5] F. Kong and D. Dou, (2021) "Resource-constrained project scheduling problem under multiple time constraints," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 147, no. 2, p. 04020170. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001990](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001990)
- [6] T. R. Browning and A. A. Yassine, (2010) "A random generator of resource-constrained multi-project network problems," *Journal of scheduling*, vol. 13, pp. 143-161. <https://doi.org/10.1007/s10951-009-0131-y>
- [7] S. Hartmann and D. Briskorn, (2022) "An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem," *European Journal of operational research*, vol. 297, no. 1, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004>

- [8] M. G. Sánchez, E. Lalla-Ruiz, A. F. Gil, C. Castro, and S. Voß, (2023) "Resource-constrained multi-project scheduling problem: A survey," *European Journal of Operational Research*, vol. 309, no. 3, pp. 958-976. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.09.033>
- [9] H. Liu, M. Al-Hussein, and M. Lu, (2015) "BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints," *Automation in Construction*, vol. 53, pp. 29-43. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.008>
- [10] J. Tulke and J. Hanff, (2007) "4D construction sequence planning—new process and data model," in *Proceedings of CIB-W78 24th International Conference on Information Technology in Construction, Maribor, Slovenia*, pp. 79-84. <https://itc.scix.net/pdfs/w78-2007-012-088-Tulke.pdf>
- [11] H. Kim, K. Anderson, S. Lee, and J. Hildreth, (2013) "Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology," *Automation in Construction*, vol. 35, pp. 285-295, 2. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.020>
- [12] S. S. Martins, A. C. J. Evangelista, A. W. Hammad, V. W. Tam, and A. Haddad, (2022) "Evaluation of 4D BIM tools applicability in construction planning efficiency," *International Journal of Construction Management*, vol. 22, no. 15, pp. 2987-3000. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1837718>
- [13] W.-C. Wang, S.-W. Weng, S.-H. Wang, and C.-Y. Chen, (2014) "Integrating building information models with construction process simulations for project scheduling support," *Automation in construction*, vol. 37, pp. 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.009>
- [14] K. Sigalov and M. König, (2017) "Recognition of process patterns for BIM-based construction schedules," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 33, pp. 456-472. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.12.003>
- [15] J. Crowther and S. O. Ajayi, (2021) "Impacts of 4D BIM on construction project performance," *International Journal of Construction Management*, vol. 21, no. 7, pp. 724-737. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1580832>
- [16] R. Torba, S. Dauzère-Pérès, C. Yugma, C. Gallais, and J. Pouzet, (2024) "Solving a real-life multi-skill resource-constrained multi-project scheduling problem," *Annals of Operations Research*, pp. 1-46. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05784-7>
- [17] S. Xin, Q. Su, Q. Wang, and Q. Wang, (2015) "Optimization of resource-constrained multi-project scheduling problem based on the genetic algorithm," *15th International conference on service systems and service management (ICSSSM)*, 2018, pp. 1-6: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2018.8465086>
- [18] D. Linyi and L. Yan, (2007) "A particle swarm optimization for resource-constrained multi-project scheduling problem," in *2007 International conference on computational intelligence and security (CIS 2007)*, pp. 1010-1014: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CIS.2007.157>
- [19] N. Zoraghi, A. Shahsavari, B. Abbasi, and V. Van Peteghem, (2017) "Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with material ordering under bonus-penalty policies," *Top*, vol. 25, pp. 49-79. <https://doi.org/10.1007/s11750-016-0415-2>
- [20] D. Liu, Z. Xu, and F. Li, (2019) "Distributed resource constrained multi-project scheduling problem with cooperative-game based negotiation mechanism," *Syst. Eng.-Theory Pract*, vol. 39, no. 6, pp. 1507-1516.
- [21] R. K. Chakraborty, R. A. Sarker, and D. L. Essam, (2017) "Resource constrained multi-project scheduling: A priority rule based evolutionary local search approach," in *Intelligent and Evolutionary Systems: The 20th Asia Pacific Symposium, IES 2016, Canberra, Australia, November 2016, Proceedings*, pp. 75-86: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49049-6_6
- [22] L. Zhang and R. Sun, (2011) "An improvement of resource-constrained multi-project scheduling model based on priority-rule based heuristics," in *ICSSSM11*, pp. 1-5: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2011.5959321>
- [23] H. Zhang, H. Li, and C. Tam, (2006) "Heuristic scheduling of resource-constrained, multiple-mode and repetitive projects," *Construction management and economics*, vol. 24, no. 2, pp. 159-169. <https://doi.org/10.1080/01446190500184311>

- [24] A. Fazeli, S. Banihashemi, A. Hajirasouli, and S. R. Mohandes, (2024) "Automated 4D BIM development: The resource specification and optimization approach," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 31, no. 5, pp. 1896-1922. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2022-0665>
- [25] H. Hamledari, B. McCabe, S. Davari, and A. Shahi, (2017) "Automated schedule and progress updating of IFC-based 4D BIMs," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 31, no. 4, p. 04017012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000660](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000660)
- [26] X. Jiang, (2011) "Developments in cost estimating and scheduling in BIM technology," Northeastern University. <https://www.proquest.com/openview/a8dc41f96a6107e652b09b075ce58400/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>
- [27] J. Park and H. Cai, (2015) "Automatic construction schedule generation method through BIM model creation," in *Computing in Civil Engineering 2015*, pp. 620-627. <https://doi.org/10.1061/9780784479247.077>
- [28] E. Tauscher, K. Smarsly, M. König, and K. Beucke, (2014) "Automated generation of construction sequences using building information models," in *Computing in Civil and Building Engineering*, pp. 745-752. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.093>
- [29] H. Liu, Z. Lei, H. X. Li, and M. Al-Hussein, (2014) "An automatic scheduling approach: building information modeling-based onsite scheduling for panelized construction," in *Construction Research Congress 2014: Construction in a Global Network*, pp. 1666-1675. <https://doi.org/10.1061/9780784413517.170>
- [30] R. Volk, T. H. Luu, J. S. Mueller-Roemer, N. Sevilimis, and F. Schultmann, (2018) "Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information," *Automation in construction*, vol. 91, pp. 226-245. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.017>
- [31] R. Volk, N. Sevilimis, and F. Schultmann, (2015) "Deconstruction project planning based on automatic acquisition and reconstruction of building information for existing buildings," <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/71171bf4-f6eb-44a4-87e2-3213bc326af2>
- [32] C. Chen and L. Tang, (2019) "BIM-based integrated management workflow design for schedule and cost planning of building fabric maintenance," *Automation in construction*, vol. 107, p. 102944. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102944>
- [33] W. Chen, K. Chen, J. C. Cheng, Q. Wang, and V. J. Gan, (2018) "BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders," *Automation in construction*, vol. 91, pp. 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.007>
- [34] K.-C. Wang, W.-C. Wang, H.-H. Wang, P.-Y. Hsu, W.-H. Wu, and C.-J. Kung, (2016) "Applying building information modeling to integrate schedule and cost for establishing construction progress curves," *Automation in construction*, vol. 72, pp. 397-410. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.005>
- [35] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, 1995, pp. 39-43: Ieee. <https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215>
- [36] M. Khalilzadeh, F. Kianfar, A. Shirzadeh Chaleshtari, S. Shadrokh, and M. Ranjbar, (2012) "A modified PSO algorithm for minimizing the total costs of resources in MRCPSP," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/365697>
- [37] S. Asta, D. Karapetyan, A. Kheiri, E. Özcan, and A. J. Parkes, (2016) "Combining Monte-Carlo and hyper-heuristic methods for the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem," *Information Sciences*, vol. 373, pp. 476-498. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.09.010>