دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد

گرایش مهندسی و مدیریت ساخت

ارائه رویکرد یکپارچه‌ی مبتنی بر مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) جهت زمان‌بندی پروژه‌های عمرانی تحت منابع چندحالته دارای محدودیت

نگارش:

سعید عصاری

استاد راهنما:

دکتر یعقوب علیپوری

تابستان ۱۴۰۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تأسیس ۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تائید هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان **ارائه رویکرد یکپارچه‌ی مبتنی بر مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) جهت زمان‌بندی پروژه‌های عمرانی تحت منابع چندحالته دارای محدودیت** توسط آقای **سعید عصاری** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش **مهندسی و مدیریت ساخت** با رتبه **خیلی خوب** مورد تائید قرار می دهند.

۱- استاد راهنما — آقای دکتر **یعقوب علیپوری**

۲- ممتحن خارجی — آقای دکتر **فریبرز جولای**

۳- ممتحن داخلی — آقای دکتر **حمیدرضا عباسیان جهرمی**

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه — آقای دکتر **حمیدرضا عباسیان جهرمی**

دانشکده عمران

تاریخ: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	**اظهارنامه دانشجو**	**شماره:** **تاریخ:**

اینجانب **سعید عصاری** دانشجوی کارشناسی‌ارشد **رشته مهندسی عمران** گرایش **مهندسی و مدیریت ساخت** دانشکده **عمران** - **عمران** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان **ارائه رویکرد یکپارچه‌ی مبتنی بر مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) جهت زمان‌بندی پروژه‌های عمرانی تحت منابع چندحالته دارای محدودیت** با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر **یعقوب علیپوری**، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت واصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده عمران - عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

۳- همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

*** توجه:**

این فرم می‌بایست پس از تکمیل، در نسخ تکثیر شده قرار داده شود.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

به پاس همه محبت های بی دریغشان

تقدیر و تشکر:

این جانب بر خود لازم می دانم تا بدین وسیله از زحمات بی دریغ، تلاش های بی وقفه و راهنمایی های ارزشمند استاد گرامی جناب آقای دکتر علیپوری در راستای انجام این پایان نامه تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چند حالته[1] (MRCPSP) به سبب وجود محدودیت منابع و روابط پیش نیازی میان فعالیت‌های پروژه، یکی از پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مسائل در حوزه‌ی دانشی زمان‌بندی پروژه به شمار می‌رود. هدف از حل این مسئله، یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های یک پروژه و انتخاب حالت‌های اجرایی برای هر فعالیت می‌باشد، به نحوی که انواع محدودیت‌های پروژه به طور همزمان تا حد امکان ارضا شده و همچنین معیارهای سنجش معینی از جمله زمان و هزینه‌ی انجام پروژه بهینه گردند. در یک دهه‌ی گذشته، فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[2] (BIM) نقش بسیار مهمی در توسعه‌ی صنعت ساخت و ساز داشته است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه‌ی رویکردی یکپارچه مبتنی بر فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان جهت حل مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چند حالته با هدف کمینه کردن زمان تکمیل پروژه می‌باشد. در چارچوب پژوهش حاضر ابتدا داده‌های لازم جهت حل مسئله، به کمک مدل اطلاعاتی ساختمان در نرم افزار Autodesk Navisworks Manage استخراج شده و در گام بعد مدل مسئله به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[3] (PSO) و با استفاده از داده‌های گام نخست، در Matlab برنامه نویسی و حل می‌شود. در انتها نیز به کمک کد برنامه‌ی رابط کاربری[4] (API) که در محیط visual studio و به زبان C# نوشته شده، خروجی مسئله جهت مدل‌سازی چهار بعدی و شبیه‌سازی فرآیند ساخت به ابزار TimeLiner منتقل می‌گردد. سپس چارچوب مذکور بر روی یک مدل فرضی پیاده‌سازی شده و اعتبار سنجی نتایج حاصل از پژوهش با استفاده از نظرات کارشناسان و خبرگان حوزه‌ی BIM و زمان بندی انجام می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده‌ی کارایی الگوریتم مورد استفاده در حل مسئله‌ی MRCPSP و نیز افزایش سرعت و دقت در استخراج داده‌ها و تسهیل در اعمال تغییرات و به روزرسانی مدل است.

کلمات کلیدی: زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چند حالته، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، رابط برنامه‌ی کاربری

---

[1] Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem
[2] Building Information Modeling
3 Particle Swarm Optimization
[4] Application Programming Interface

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه و کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسئله ۲

۱-۳- ضرورت پژوهش ۴

۱-۴- اهداف پژوهش ۶

۱-۵- سؤالات پژوهش ۷

۱-۶- ساختار پایان‌نامه ۷

۱-۷- جمع‌بندی ۸

فصل دوم: مرور بر ادبیات و پیشینه پژوهش ۹

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- مدیریت پروژه و جایگاه زمان‌بندی در آن ۱۰

۲-۲-۱- حوزه‌های دانش مدیریت پروژه ۱۱

۲-۲-۲- گروه‌های فرآیندی مدیریت پروژه ۱۲

۲-۲-۳- گروه‌های فرآیندی مدیریت پروژه ۱۳

۲-۳- آشنایی با زمان‌بندی پروژه‌ها ۱۴

۲-۳-۱- روش‌های نمایش زمان‌بندی یک پروژه ۱۴
۲-۳-۲- اجزای زمان‌بندی پروژه ۱۶
۲-۳-۳- انواع مسئله‌ی RCPSP و روش‌های حل آن ۱۷
۲-۳-۳-۱- دسته‌بندی مسئله‌ی RCPSP ۱۷
۲-۳-۳-۲- روش‌های حل مسائل زمان‌بندی پروژه ۱۹
۲-۴- ابعاد، کاربردها و ابزارهای BIM ۲۳
۲-۴-۱- ابعاد مختلف مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در طراحی و ساخت ۲۳
۲-۴-۲- کاربردهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان ۲۴
۲-۴-۳- ابزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان ۲۶
۲-۵- مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و زمان‌بندی ۲۹
۲-۵-۱- نقص‌ها و مشکلات روش‌های مرسوم برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه ۳۰
۲-۵-۲- مزایای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه با استفاده از BIM ۳۰
۲-۶- پیشینه پژوهش ۳۱
۲-۶-۱- پژوهش‌های خارجی ۳۲
۲-۶-۲- پژوهش‌های داخلی ۴۰

۲-۷- جمع‌بندی ۴۵

فصل سوم: روش‌شناسی پژوهش ۴۸

۳-۱- مقدمه ۴۹

۳-۲- انواع پژوهش ۴۹

۳-۳- روش‌های گردآوری اطلاعات ۵۱

۳-۴- روش کلی پژوهش ۵۱

۳-۴-۱- استخراج داده‌های اولیه ۵۳

۳-۴-۲- حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ۵۵

۳-۴-۲-۱- الگوریتم PSO ۵۶

۳-۴-۲-۱-۱- معرفی الگوریتم ۵۶

۳-۴-۲-۱-۲- پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم PSO ۵۸

۳-۴-۲-۲- روند حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم PSO ۶۰

۳-۴-۳- ایجاد مدل چهاربعدی بر اساس خروجی مسئله‌ی MRCPSP ۶۸

۳-۴-۳-۱- معرفی ابزار TimeLiner ۶۸

۳-۴-۳-۲- مشاهده اطلاعات ورودی مسئله در حین مدل‌سازی چهاربعدی ۶۹

۳-۵- جمع‌بندی ۷۰

فصل چهارم: تجزیه و تحلیل داده‌ها ۷۱

۴-۱- مقدمه ۷۲

۴-۲- فرآیند ارائه‌ی نتایج ۷۲

۴-۲-۱- معرفی مدل و فرضیات پروژه ۷۲

۴-۲-۲- روند استخراج داده‌های اولیه ۷۵

۴-۲-۲-۱- تهیه‌ی ساختار شکست کار فعالیت‌ها برای مدل پژوهش ۷۵

۴-۲-۲-۲- گروه‌بندی المان‌های مدل سه‌بعدی ۷۸

۴-۲-۲-۳- تعیین انواع منابع ۸۰

۴-۲-۲-۴- استخراج مقادیر منابع تجدید ناپذیر از مدل سه‌بعدی، تخمین منابع تجدید پذیر و زمان فعالیت ۸۲

۴-۲-۳- روند حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم PSO ۸۸

۴-۲-۳-۱- مقداردهی اولیه‌ی پارامترهای الگوریتم PSO ۸۹

۴-۲-۳-۲- بررسی عملکرد الگوریتم به کار رفته بر روی مسائل استاندارد ۹۰

۴-۲-۳-۳- خروجی مسئله‌ی MRCPSP ۹۰

۴-۲-۴- مدل‌سازی چهاربعدی مسئله‌ی MRCPSP ۹۲

۴-۳- اعتبار سنجی ۱۰۲

۴-۴- جمع‌بندی ۱۰۵

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۶

۵-۱- مقدمه ۱۰۷

۵-۲- ارائه‌ی نتایج ۱۰۷

۵-۳- پاسخ به سؤالات پژوهش ۱۰۸

۵-۴- نوآوری‌های پژوهش ۱۰۹

۵-۵- پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۱۰

فهرست مراجع ۱۱۱

پیوست ها ۱۲۱

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- تأثیر BIM بر کاهش زمان ساخت در پروژه‌های ساختمانی مورد مطالعه در پژوهش ربیعی و حیدری ۶

شکل ۲-۱- حوزه‌های دانشی و گروه‌های فرآیندی مدیریت پروژه ۱۱

شکل ۲-۲- شمایی از نمودار گانت برای زمان‌بندی یک پروژه ۱۵

شکل ۲-۳- نحوه نمایش اطلاعات بر روی بردار در شبکه‌ی AOA ۱۵

شکل ۲-۴- نحوه نمایش اطلاعات بر روی بردار در شبکه‌ی AON ۱۶

شکل ۲-۵- معیارهای دسته‌بندی مسئله‌یRCPSP ۱۸

شکل ۲-۶- کشف تداخل کانال تأسیساتی با تیرهای سقف کامپوزیت ۲۵

شکل ۲-۷- نمونه‌ی مدل BIM سوله در نرم‌افزار Revit ۲۸

شکل ۲-۸- نمایش پیشرفت پروژه در محیط نرم‌افزارNaviswork ۲۹

شکل۲-۹- روش زمان‌بندی پروژه با استفاده از BIM و IFC در پژوهش اندرسون و همکاران ۳۳

شکل ۲-۱۰- چارچوب استفاده از BIM و شبیه‌سازی جهت ایجاد مدل چهاربعدی در پژوهش وانگ و همکاران ۳۵

شکل ۲-۱۱- چارچوب اجرای مدل چهاربعدی در یک پروژه‌ی LNG در پژوهش ژو و همکاران..... ۳۶

شکل ۲-۱۲- چارچوب استفاده از BIM و شبیه‌سازی در پژوهش الحسین و همکاران ۳۷

شکل ۲-۱۳- چارچوب استفاده از مدل چهاربعدی و الگوریتم جست‌وجوی تابو در پژوهش روزاریوس و همکاران ۳۸

شکل ۲-۱۴- چارچوب ارتباط میان مدل سه‌بعدی، زمان‌بندی و پایگاه داده در پژوهش رضازاده و همکاران..... ۴۴

شکل ۲- ۱۵- ساختار کلی تولید خودکار برنامه‌ی زمان‌بندی با استفاده از BIM در پژوهش گل نهالی و روانشاد نیا..... ۴۵

شکل ۳-۱- چارچوب کلی پژوهش ۵۲

شکل ۳-۲- روند استخراج داده‌های اولیه جهت حل مسئله‌ی MRCPSP به کمک مدل BIM..... ۵۵

شکل ۳-۳- نحوه تغییر موقعیت یک ذره در الگوریتم PSO با توجه به جواب شخصی و عمومی ۵۸
شکل ۳-۴- روند کلی اجرای الگوریتم PSO ۵۹
شکل ۳-۵- روند اجرای الگوریتم تولید جواب موجه ابتدایی ۶۳
شکل ۳- ۶- روند کلی حل مسئله‌ی MRCPSP ۶۷
شکل ۴-۱- مدل سه‌بعدی معماری ساختمان موردمطالعه در Navisworks Manage ۷۳
شکل ۴-۲- مدل سه‌بعدی سازه ساختمان موردمطالعه در Navisworks Manage ۷۴
شکل ۴-۳- المان‌های مربوط به فعالیت بتن‌ریزی فونداسیون در مدل سه‌بعدی سازه موردمطالعه ۷۹
شکل ۴-۴- مجموعه‌ی گروه‌های مربوط به المان‌های مدل سه‌بعدی مطابق با WBS در ابزار Selection Sets ۸۰
شکل ۴-۵- اضافه کردن گروه اِلمان مربوط به فعالیت بتن‌ریزی فونداسیون در Item Catalog ۸۲
شکل ۴-۶- مقادیر بتن پی سازه موردمطالعه با استفاده از ابزار Quantification ۸۳
شکل ۴-۷- واردکردن اطلاعات در قالب CSV در ابزار TimeLiner ۹۳
شکل ۴-۸- اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها در ابزار TimeLiner ۹۴
شکل ۴-۹- انتخاب مجموعه‌ی المان‌های مربوط به ستون‌های طبقه‌ی اول در Selection Sets ۹۵
شکل ۴-۱۰- پیوست کردن مجموعه‌ی المان‌ها به فعالیت‌های تعریف‌شده در مدل پژوهش ۹۶
شکل ۴-۱۱- فرم تنظیم‌شده در visual studio با استفاده از API نویسی در پژوهش حاضر ۹۸
شکل ۴-۱۲- ورود اطلاعات مسئله‌ی MRCPSP به فرم ایجادشده در visual studio ۹۹
شکل ۴-۱۳- نمودار گانت مدل پژوهش حاضر در ابتدای فرآیند شبیه‌سازی ۱۰۰
شکل ۴-۱۴- شبیه‌سازی مدل در Navisworks Manage ۱۰۱
شکل ۴-۱۵- اتمام فرآیند شبیه‌سازی مدل و نمایش زمان اتمام پروژه در Navisworks Manage ۱۰۱
شکل ۴-۱۶- چارت سازمانی شرکت توسعه‌ی فناوری بایا بیم در حوزه‌های BIM و زمان‌بندی ۱۰۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱- ابزارهای BIM ۲۷

جدول ۲-۲- خلاصه پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون BIM و زمان‌بندی ۴۷

جدول ۴-۱- ساختار شکست کار فعالیت‌های مدل موردمطالعه ۷۶

جدول ۴-۲- منابع تجدید پذیر مورداستفاده در پروژه ۸۱

جدول ۴-۳- منابع تجدید ناپذیر مورداستفاده در پروژه ۸۱

جدول ۴-۴- مقادیر منابع تجدید ناپذیر مورداستفاده در مدل پژوهش ۸۴

جدول ۴- ۵- مقادیر منابع تجدید پذیر برای حالات مختلف اجرایی ۸۶

جدول ۴-۶- زمان اجرایی فعالیت‌های پروژه برای حالات اجرایی مختلف ۸۷

جدول ۴-۷- مقادیر اولیه‌ی پارامترهای الگوریتم PSO در پژوهش حاضر ۸۹

جدول ۴-۸- خروجی مسئله‌ی MRCPSP در پژوهش حاضر ۹۱

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به بیان مسئله‌ی پژوهش و معرفی مهم‌ترین مفاهیم و بخش‌های آن پرداخته می‌شود. سپس اهمیت پژوهش حاضر و اهداف آن، بیان شده و درنهایت ساختار کلی پایان‌نامه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف از نگارش این فصل، آشنایی مقدماتی و کلی با مفاهیم پژوهش حاضر و نیز دستیابی به ساختاری مناسب جهت انجام پایان‌نامه می‌باشد.

۱-۲- بیان مسئله

زمان‌بندی همواره یکی از دغدغه‌های اساسی در مدیریت پروژه‌های ساختمانی بوده است. روش مسیر بحرانی[5] (CPM) به‌عنوان یک راه حل اولیه و ابتدایی با هدف کمینه کردن مدت زمان کل انجام پروژه، منابع را با حداقل هزینه ممکن اختصاص می‌دهد. با این حال در روش CPM، مواردی همچون محدودیت منابع در نظر گرفته نمی‌شود که این امر سبب عدم دستیابی به پاسخ بهینه می‌گردد. به همین منظور حالت کامل‌تری از مسئله زمان‌بندی پروژه با عنوان زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ایجاد شده است. در این مدل علاوه بر محدودیت‌های زمانی و روابط پیش‌نیازی، محدودیت منابع هم در نظر گرفته‌شده است [۱]. مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود[6] (RCPSP) برای نخستین بار در سال ۱۹۶۲ مطرح شد و طی ده سال گذشته پیشرفت‌های قابل‌توجهی چه ازنظر مدل‌سازی ریاضی و چه ازنظر روش‌های حل برای آن ابداع شده است. مسئله‌ی RCPSP زیرمجموعه‌ی مسئله کلی زمان‌بندی پروژه است و در دسته مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد. این نوع مسائل در پی یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های یک پروژه می‌باشند، به‌نحوی‌که محدودیت‌های تقدم و تأخر شبکه پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منبعی موجود

[5]Critical Path Method
[6]Resource-Constrained Project Scheduling Problem

در پروژه به‌طور همزمان تا حد امکان ارضا شوند و همچنین معیارهای سنجش معینی ازجمله زمان انجام پروژه، هزینه انجام پروژه، تعداد فعالیت‌های تأخیردار و غیره بهینه شوند [۲].

در مسئله‌ی RCPSP کلاسیک، برای هر فعالیت یک حالت اجرایی با زمان و منابع ثابت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به وجود محدودیت منابع، چنین شرایطی (وجود فقط یک حالت اجرایی برای هر فعالیت) ممکن است سبب تأخیر فعالیت‌ها و بیکاری منابع گردد. لذا، در شرایط عملی، در تقسیم منابع محدود بین فعالیت‌های متعدد، برای هر فعالیت چندین حالت اجرایی با زمان و مقدار متفاوتی از منابع در نظر گرفته می‌شود که جهت زمان‌بندی آن، بایستی از مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع در حالت چندگانه (MRCPSP) استفاده کرد [۳]. همچنین، فرض کنیم که یک فعالیت در ۵ روز با ۳ کارگر و ۲ دستگاه از ماشین‌آلات موجود انجام می‌گیرد، اما مدیر پروژه تحت شرایطی تصمیم می‌گیرد که این فعالیت با ۲ کارگر و ۱ دستگاه از ماشین‌آلات موجود انجام شود. در مسئله‌ی MRCPSP، هر فعالیت می‌تواند در حالت‌های مختلفی اجرا شود که برای هرکدام مدت زمان و میزان منبع متفاوتی تعریف شده است [۴]. از طرفی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) یکی از تحولات بسیار امیدبخش در ساخت‌وساز بوده که مسیر متخصصان این حوزه را تغییر داده است و توانایی تشخیص خطا در مرحله طراحی اولیه و هدایت زمان‌بندی ساخت‌وساز به بهترین شکل را دارا می‌باشد [۵]. تعریف مؤسسه ملی علوم ساختمان[۷] از BIM، به‌صورت زیر است [۶]:

«یک نمایش دیجیتال با هندسه فیزیکی و دیگر پارامترهای عملکردی که در واقع یک پایگاه تبادل اطلاعات بوده و زمینه‌ای قابل اعتماد را برای تصمیمات در طول چرخه‌ی حیات پروژه، فراهم می‌کند.»

[7]National Institute of Building Science

مدل‌سازی چهاربعدی اطلاعات ساخت که از ترکیب مدل سه‌بعدی با زمان حاصل می‌شود ازجمله روش‌هایی است که سطح جدیدی از مدیریت پروژه را در اختیار مدیران قرار می‌دهد. این مدل با فراهم آوردن بصری‌سازی فضای سازه[۸] و شبیه‌سازی رفتار[۹] آن، باعث کاهش خطای برنامه‌ریزی و درنتیجه افزایش بهره‌وری اجرا می‌شود [۷].

همزمان با استفاده از روش‌های حل مسئله‌ی MRCPSP که به‌طور مفصل در فصل دوم بیان خواهند شد، بهره‌گیری از فناوری BIM در ترکیب با این روش‌ها می‌تواند به دقت و سرعت فرآیند زمان‌بندی کمک کند و همزمان با تغییرات منابع پروژه به‌روزرسانی پروژه نیز انجام شود. در این پژوهش چارچوبی برای یکپارچه‌سازی زمان‌بندی و تهیه‌ی مدل چهاربعدی با در نظر گفتن محدودیت منابع در چند حالت پیشنهاد شده است که مزایا و معایب آن سنجیده شده و علاوه بر بهبود کیفیت برنامه‌ریزی، در مرحله اجرا نیز می‌تواند بسیاری از نقاط ضعف فرایند کنترل پروژه و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با آن را با به‌روزرسانی برنامه زمان‌بندی، مرتفع نماید [۷].

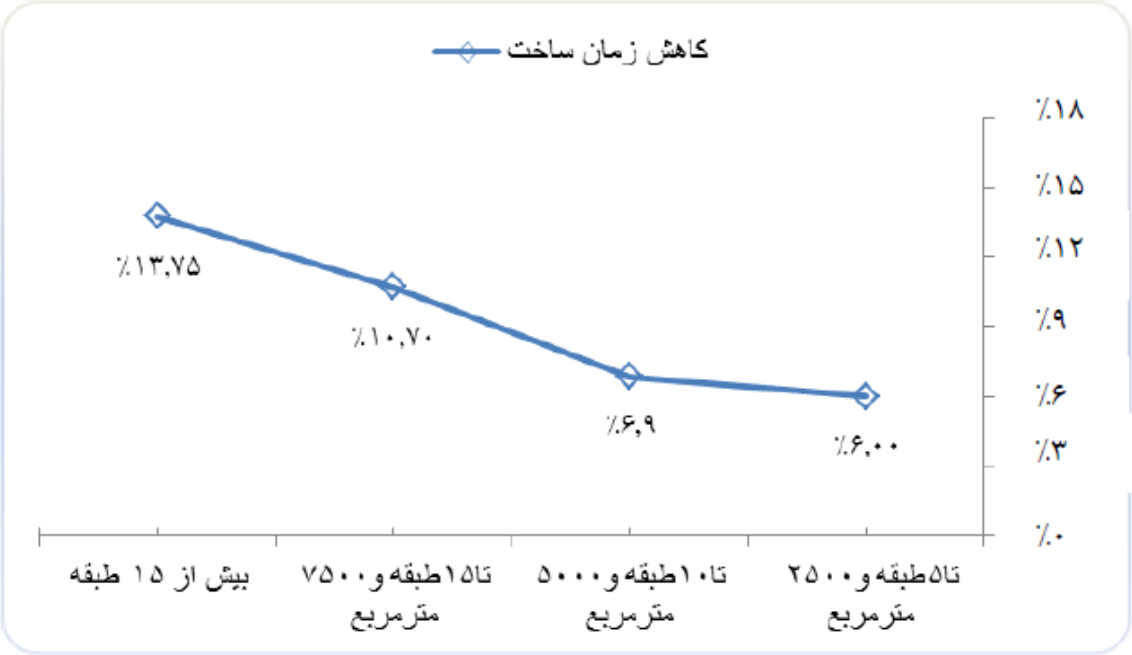
۱-۳- ضرورت پژوهش

اهمیت مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه را می‌توان از دو نظر مورد بررسی قرار داد. در دیدگاه اول، با توجه به ابعاد بزرگ پروژه‌ها در سطح کشور، ارائه‌ی الگوریتمی که بتواند در جواب‌های مسئله بهبودی ایجاد نماید، در عمل موجب صرفه‌جویی قابل‌توجهی در زمان و هزینه و کاهش ریسک انجام پروژه‌ها و افزایش حاشیه سود مجریان خواهد گردید. در دیدگاه دوم، در صورت عدم اتمام پروژه در زمان مقرر، هزینه‌های اضافی زیادی ازجمله هزینه‌ی تأخیر در بهره‌برداری یا سود ازدست‌رفته، هزینه ناشی از گران شدن منابع، هزینه‌ی تمدید مجوزها و غیره به پروژه اعمال خواهد شد که احتمال شکست پروژه به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت

[8]Structure Spatial Visualization
[9]Simulation of Behavior

[۸]. بر اساس تعریف مسئله‌ی MRCPSP، در شرایط عملی در تقسیم منابع محدود بین فعالیت‌های متعدد، برای هر فعالیت، چندین حالت اجرایی با زمان و مقدار متفاوتی از منابع در نظر گرفته می‌شود. این مسئله، در صنعت ساختمان بسیار کاربردی است. برای مثال جهت انجام فعالیت‌هایی نظیر بتن‌ریزی یا آرماتوربندی ممکن است به تجهیزات یا کارگران در یک زمان نیاز باشد که با توجه به ناکافی بودن منابع موردنیاز در یک زمان، ترکیبات مختلفی از مقدار منابع جهت شروع این فعالیت‌ها در نظر گرفته می‌شود [۹].

امروزه در دنیای پیشرفته علم و فناوری، پروژه‌ها روند فزاینده‌ای در پیچیده شدن و تخصصی شدن طی می‌کنند که این امر درنهایت به پیچیدگی بیشتر در فرآیند پروژه منجر شده و نیاز به استفاده از فناوری‌های نوین را بیش‌ازپیش آشکار می‌کند. پیاده‌سازی و استفاده از این فناوری‌های نوین امری ضروری بوده که دستیابی به موفقیت هرچه بیشتر در پروژه‌های ساخت را تسهیل می‌کند. BIM، فرآیندی است بر مبنای یکپارچه‌سازی مدل‌های سه‌بعدی هوشمند و پارامتریک از پروژه با یک پایگاه اطلاعات جامع که تمامی ذینفعان پروژه از مهندسان طراح گرفته تا بهره‌بردار نهایی از پروژه را یاری می‌کند تا در عمل به وظایف خود در طول چرخه عمر پروژه بهتر و مؤثرتر عمل کنند. مدل‌های مبتنی بر BIM صرفاً یک مدل سه‌بعدی نیستند، بلکه تمرکز اصلی در این مدل‌ها بر ایجاد پایگاه‌های جامع از اطلاعات مربوط به‌تمامی مراحل چرخه عمر پروژه اعم از اطلاعات مربوط به طراحی و مشخصات فنی پروژه، اطلاعات مربوط به ساخت و اجرای المان‌ها و همچنین اطلاعات مربوط به بهره‌برداری و نگهداری از پروژه است. موفقیت‌های کسب‌شده توسط مدل‌سازی اطلاعات ساخت، در تمامی جنبه‌ها ازجمله تأثیرگذاری بر زمان و هزینه احساس می‌شود [۱۰]. شکل ۱-۱، میزان تأثیر استفاده از فناوری BIM در کاهش زمان ساخت ساختمان‌های مورد بررسی در پژوهش ربیعی و حیدری [۱۱] را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- تأثیر BIM بر کاهش زمان ساخت در پروژه‌های ساختمانی مورد مطالعه در پژوهش ربیعی و حیدری [۱۱]

۱-۴- اهداف پژوهش

اهداف نگارش پژوهش حاضر را می‌توان شامل موارد زیر دانست:

- بررسی محدودیت انواع مختلف منابع مورد استفاده در پروژه‌های دارای فعالیت‌هایی با قابلیت داشتن منابع چندحالته برای اجرا تحت برنامه زمان‌بندی مبتنی بر BIM
- ارائه چارچوبی برای زمان‌بندی مبتنی بر BIM با در نظر گرفتن محدودیت منابع و شرایط چندحالته برای منابع
- ایجاد یک برنامه‌ی رابط کاربری (API) جهت ارتباط خروجی مسئله‌ی MRCPSP و مدل BIM سه‌بعدی

۱-۵- سؤالات پژوهش

در پژوهش حاضر سؤالات زیر قابل مطرح می‌باشند:

- مزایا و چالش‌های استفاده از BIM در حل مسئله‌ی MRCPSP کدام‌اند.
- استفاده از توابع API، چه کمکی به یکپارچگی فرآیند حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از BIM می‌نماید.
- استفاده از چارچوب ارائه‌شده در پژوهش تا چه میزان می‌تواند در پروژه‌های واقعی مؤثر باشد.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

پژوهش حاضر در قالب پنج فصل تدوین گردیده است. در فصل اول با عنوان مقدمه، اطلاعاتی کلی شامل موضوع پژوهش بیان مسئله، اهمیت انجام پژوهش حاضر و اهداف آن و درنهایت توالی فصول پایان‌نامه، بیان شد. در فصل دوم، ضمن اشاره به مفاهیم نظری، مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون BIM و زمان‌بندی ساخت صورت گرفته است. در فصل سوم ضمن اشاره به کاستی‌ها و نواقص پژوهش‌های گذشته، چارچوب کلی و روند ارتباط میان مسئله‌ی MRCPSP و مدل BIM به همراه جزئیات آن ذکر گردیده است. به‌منظور نمایش توانایی چارچوب ارائه‌شده و تشریح دقیق روند مدل‌سازی، یک مطالعه موردی بر روی مدل سازه یک ساختمان با تمرکز بر روی بخش‌های مختلف، در فصل چهارم مورد بررسی قرار گرفته است. درنهایت، نتایج، جمع‌بندی کلی و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی در فصل پنجم ارائه شده است.

۱-۷- جمع‌بندی

در این فصل، مسئله‌ی MRCPSP و فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در بخش بیان مسئله مورد بررسی قرار گرفت و در بخش اهمیت پژوهش، ضرورت به‌کارگیری این فناوری در مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه بیان گردید. در پایان نیز پس از مشخص شدن اهداف پژوهش، ساختار کلی پایان‌نامه جهت رسیدن به خواسته‌ی مطرح‌شده در قسمت بیان مسئله که در واقع ارائه‌ی رویکردی یکپارچه جهت ارتباط MRCPSP و فناوری BIM است، بیان شد. در فصل آتی مفاهیم نظری پژوهش حاضر به‌طور مفصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت و پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون ارتباط زمان‌بندی پروژه و فناوری BIM مرور خواهد شد.

فصل دوم

مرور بر ادبیات و پیشینه پژوهش

۲-۱- مقدمه

در این فصل، به بیان تعاریف و مفاهیم موجود در این پژوهش و علم مدیریت پروژه، از قبیل بیان مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه و تبیین جایگاه آن در مدیریت پروژه، امور مربوط به زمان‌بندی و روش‌های نمایش آن و بیان مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در حالت کلی و چندحالته و نیز روش‌های حل آن پرداخته می‌شود. سپس، فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و کاربردها و مزایای آن مورد ارزیابی قرار گرفته و ارتباط آن با زمان‌بندی پروژه بیان می‌شود. در انتهای این فصل نیز به پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون ارتباط مدل‌سازی اطلاعات ساختمان با زمان‌بندی و نیز مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالته اشاره خواهد شد و با بررسی کاستی‌ها و نواقص مقالات پیشین شکاف‌های تحقیقاتی موجود، بررسی و مشخص خواهد گردید.

۲-۲- مدیریت پروژه و جایگاه زمان‌بندی در آن

متداول‌ترین استاندارد مدیریت پروژه مربوط به موسسه‌ی مدیریت پروژه[۱۰] (PMI) می‌باشد که با عنوان پیکره‌ی دانش مدیریت پروژه[۱۱] (PMBOK) شناخته می‌شود [۱۲]. مطابق با استاندارد PMBOK تعریف پروژه به‌صورت زیر است:

«پروژه یک تلاش موقتی است که برای ایجاد یک محصول، خدمت یا نتیجه‌ی منحصربه‌فرد انجام می‌شود.»

مدیریت پروژه در ده حوزه‌ی دانشی و پنج گروه فرآیندی طبقه‌بندی می‌شود که مطابق با شکل ۲-۱ می‌باشد.

[10]Project Management Institute
[11]Project Management Body of Knowledge

شکل ۲-۱- حوزه‌های دانشی و گروه‌های فرآیندی مدیریت پروژه [۱۳]

۲-۲-۱- حوزه‌های دانش مدیریت پروژه

حوزه‌های دانش مدیریت پروژه مطابق با استاندارد PMBOK، شامل موارد زیر می‌باشد:

- **مدیریت یکپارچگی پروژه**: فعالیت‌هایی که برای شناسایی و هماهنگ کردن فعالیت‌های مدیریت پروژه مورد نیاز است.
- **دانش مدیریت محدوده‌ی پروژه**: شامل فرآیندهایی است که برای حصول اطمینان از شمول تمام فعالیت‌های پروژه انجام می‌گیرد

- **مدیریت زمان پروژه**: فرآیندهایی که برای مدیریت اتمام به‌موقع پروژه موردنیاز است.
- **مدیریت هزینه‌ی پروژه**: فرآیندهایی که در طرح‌ریزی و کنترل هزینه‌ها درگیر هستند.
- **مدیریت کیفیت پروژه**: فرآیندها و فعالیت‌های سازمانی که سیاست‌های مربوط به کیفیت، اهداف و مسئولیت‌ها را ارزیابی می‌کند، به‌طوری‌که نیازهای لازم برای انجام شدن پروژه را برآورده می‌کند.
- **مدیریت منابع انسانی پروژه**: فرآیندهای سازمان‌دهی، مدیریت و رهبری گروه.
- **مدیریت ریسک پروژه**: فرآیندهایی برای طرح‌ریزی، مدیریت و ارزیابی ریسک در پروژه.
- **مدیریت تدارکات پروژه**: فرآیندهای لازم برای خرید یا تهیه محصولات، خدمات، یا نتایج موردنیاز در خارج از گروه پروژه.
- **مدیریت ذینفعان پروژه**: فرآیندهایی که برای شناسایی کلیه افراد یا سازمان‌های تحت تأثیر پروژه، تحلیل انتظارات سهامداران و تأثیر آن بر پروژه و ایجاد استراتژی مدیریت مناسب برای درگیر شدن سهامداران در تصمیمات و اجرای پروژه نیاز است [۱۲].

۲-۲-۲- گروه‌های فرآیندی مدیریت پروژه

گروه‌های فرآیندی مدیریت پروژه مطابق با استاندارد PMBOK، شامل موارد زیر می‌باشد:

- **گروه فرآیندی آغازین**: این گروه شامل فرآیندهایی برای شناخت هدف و نوع پروژه است و شامل فرآیندهای تدوین منشور پروژه و شناسایی ذینفعان می‌شود.
- **گروه فرآیندی برنامه‌ریزی**: در این گروه فرآیندی، آنچه باید در طول پروژه انجام شود تدوین شده و نقشه راه اجرای پروژه مشخص می‌گردد.
- **گروه فرآیندی اجرا**: در این مرحله، برای آنچه در مرحله‌ی برنامه‌ریزی و به‌خصوص در سند مدیریت پروژه تدوین شده است، روش اجرایی تعیین می‌شود.

- **گروه فرآیندی کنترل**: در این گروه فرآیندی، به تفاوت میان آنچه برنامه‌ریزی شده بود با آنچه اجرا شده است پرداخته می‌شود و واحد کنترل پروژه با بررسی علل و میزان انحراف از برنامه‌ی تدوین‌شده، اقدام به اصلاح زمان‌بندی می‌کند.
- **گروه فرآیندی اختتام**: این گروه در مرحله پایانی پروژه انجام می‌شود و شامل اقداماتی همچون تحویل دادن محصولات پروژه به کارفرما و بستن قراردادهای جنبی می‌شود [۱۲].

۲-۲-۳- امور زمان‌بندی طبق استاندارد PMBOK

امور مربوط به زمان‌بندی پروژه در گروه فرآیندی برنامه‌ریزی و حوزه‌ی دانشی مدیریت زمان جای دارند که به شرح زیر می‌باشد:

- **برنامه‌ریزی مدیریت زمان‌بندی**: در این فرآیند در مورد نحوه‌ی انجام سایر فرآیندهای مربوط به زمان‌بندی مانند چگونگی تخمین زمان فعالیت ها تصمیم‌گیری می‌شود
- **تعریف فعالیت‌ها**: در این فرآیند با همکاری یک فرد خبره، فعالیت‌هایی که باید در طی پروژه انجام شوند مشخص شده و فهرستی از آن‌ها تهیه می‌شود.
- **مشخص کردن توالی فعالیت‌ها**: در این بخش توالی فعالیت‌های مشخص‌شده در قسمت قبلی با توجه ماهیتشان معین گردیده و روابط پیش‌نیازی مربوط به هر فعالیت تعریف می‌شود.
- **تخمین منابع فعالیت‌ها**: ازآنجایی‌که مدت زمان انجام یک فعالیت به منابع آن بستگی دارد، لازم است قبل از مشخص کردن مدت زمان انجام هر فعالیت، منابع آن مشخص شود. در این فرآیند با همکاری یک فرد خبره منابع لازم برای هر فعالیت مشخص می‌شود.
- **تخمین مدت زمان انجام هر فعالیت**: در این قسمت با توجه به منابع مشخص‌شده در قسمت قبل و با همکاری فرد خبره مدت‌زمان انجام هر فعالیت مشخص می‌شود.

- **تدوین زمان‌بندی**: این فرآیند پس از اتمام فرآیندهای پیشین انجام شده و در آن، نقطه زمانی شروع و پایان هر فعالیت مشخص می‌گردد.

مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در این فرآیند جای دارد زیرا موضوع اصلی آن زمان‌بندی است؛ بنابراین عمده کار انجام‌شده در پژوهش حاضر در این فرآیند قرار می‌گیرد [۱۲].

۲-۳- آشنایی با زمان‌بندی پروژه‌ها

جدول زمانی، فهرستی از فعالیت‌ها و اقلام تحویلی است که اغلب با تاریخ آغاز و پایان فعالیت‌ها در نظر گرفته و درج می‌شوند. در اغلب موارد، این آیتم‌ها را بر اساس تخصیص منابع، بودجه و مدت زمان، با اتصال به وابستگی‌ها و رویدادهای برنامه‌ریزی‌شده در جدول موردنظر وارد می‌کنند. در اصل برنامه زمان‌بندی، ساختار شکست کار پروژه[۱۲] (WBS) را در طول زمان اجرای پروژه با کمک روش‌های زیر به تصویر می‌کشد [۱۳].

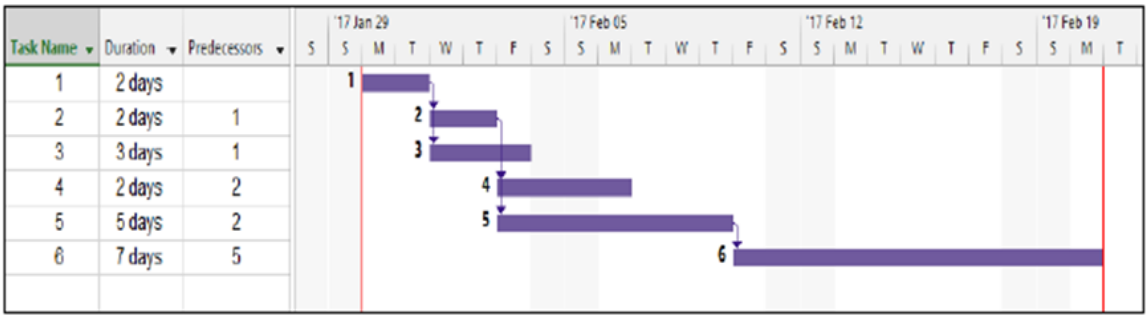
۲-۳-۱- روش‌های نمایش زمان‌بندی یک پروژه

پیمانکاران براساس عوامل مختلف، روش خاصی را برای نمایش برنامه زمان‌بندی پروژه‌ها استفاده می‌کنند. انتخاب روش زمان‌بندی مناسب، به عواملی همچون پیچیدگی پروژه، توانایی‌ها و سلایق برنامه ریز و الزامات قراردادی بستگی دارد. مرسوم‌ترین روش‌های نمایش برنامه زمان‌بندی شامل موارد زیراست:

- **نمودار گانت**: این نمودار برای اولین بار توسط هنری گانت ابداع شد. این نمودار به دلیل سادگی و قابل‌فهم بودن یکی از متداول‌ترین روش‌های نمایش یک پروژه می‌باشد. در نمودار گانت، فعالیت‌ها به‌صورت یک میله که در هر ردیف یک فعالیت قرار می‌گیرد نمایش داده می‌شوند و شروع و پایان

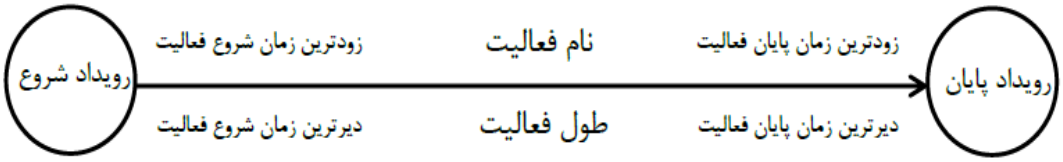
[12]Work Breakdown Structure

آن‌ها با توجه به رابطه‌ی آن‌ها با سایر فعالیت‌ها تعیین می‌شود. شکل ۲-۲ یک نمونه نمودار گانت را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۲-۲- شمایی از نمودار گانت برای زمان‌بندی یک پروژه [۱۴]

- **نمودار شبکه‌ای**: در این نمودارها با استفاده از بردار و گره، روند کلی یک پروژه ترسیم می‌شود. شبکه‌ها به دو دسته‌ی برداری[۱۳] (AOA) و گره‌ای[۱۴] (AON) تقسیم‌بندی می‌شوند. در شبکه AOA، هر فعالیت نمایانگر یک بردار و هر گره نمایانگر یک رویداد است. در این‌گونه شبکه‌ها یک رویداد، یک لحظه از زمان است که فقط شروع یا پایان یک فعالیت را نمایش می‌دهد. در شبکه‌های AOA می‌توان هر بردار را به‌صورت زیر نمایش داد [۱۵]. شکل ۲-۳، نحوه‌ی نمایش اطلاعات در شبکه‌ی AOA را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- نحوه نمایش اطلاعات بر روی بردار در شبکه‌ی AOA [۱۵]

[13] Activity On Arrows
[14] Activity On Node

در شبکه‌ی AON، فعالیت‌ها روی گره‌ها و روابط به‌صورت بردار نمایش داده می‌شوند. رسم و فهم این شبکه‌ها بسیار ساده‌تر از شبکه‌های AOA می‌باشد، لذا دامنه‌ی کاربرد آن‌ها بسیار وسیع‌تر از شبکه‌های AOA است. در شبکه‌های AON معمولاً هر گره به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود [۱۶]. شکل ۲-۴، نحوه نمایش اطلاعات در شبکه‌ی AON را نمایش می‌دهد.

زودترین زمان پایان	مدت زمان اجرا	زودترین زمان شروع
نام فعالیت		
دیرترین زمان پایان		دیرترین زمان شروع

شکل ۲-۴- نحوه نمایش اطلاعات بر روی گره در شبکه‌یAON [۱۶]

۲-۳-۲- اجزای زمان‌بندی پروژه

مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه را می‌توان به اجزای کوچک‌تری تقسیم نمود. این اجزا در اصل به وجود آورنده‌ی چارچوب اختیارات و تغییرپذیری شبکه پروژه، برای زمان‌بندی پروژه می‌باشند. اجزای زمان‌بندی پروژه شامل عوامل زیر است:

- **فعالیت‌ها**: کوچک‌ترین جزء عملیاتی تشکیل‌دهنده یک پروژه را فعالیت گویند. به‌طور معمول هر فعالیت با پارامترهایی مانند مدت زمان اجرا، میزان منابع موردنیاز، هزینه‌ی پردازش و محدودیت‌های پیش‌نیازی شناخته می‌شوند [۱۷].

- **منابع**: به کلیه‌ی تجهیزات، امکانات و نیروهای انسانی گفته می‌شود که برای انجام یک فعالیت مورد نیاز است. منابع ازنقطه‌نظر محدودیت، تجدید پذیر[۱۵]، تجدید ناپذیر[۱۶] و منابع با محدودیت دوگانه[۱۷] هستند [۱۸].
- **روابط پیش‌نیازی**: این روابط ترتیب انجام فعالیت‌ها را مشخص می‌کنند و به دو دسته‌ی امکانی و طبیعی تقسیم‌بندی می‌شوند. روابط پیش‌نیازی طبیعی به علت ماهیت کارها بر آن‌ها تحمیل می‌شود و قابل‌چشم‌پوشی نمی‌باشند و روابط پیش‌نیازی، امکانی بیشتر ناشی از تجارب قبلی می‌باشد [۱۹].
- **محدودیت‌ها**: محدودیت‌ها بیشتر براثر ترجیحات مدیریتی بر فعالیت‌ها تحمیل می‌شوند و مبین رابطه‌ی یک فعالیت با عواملی غیر از سایر فعالیت‌ها می‌باشد [۲۰].

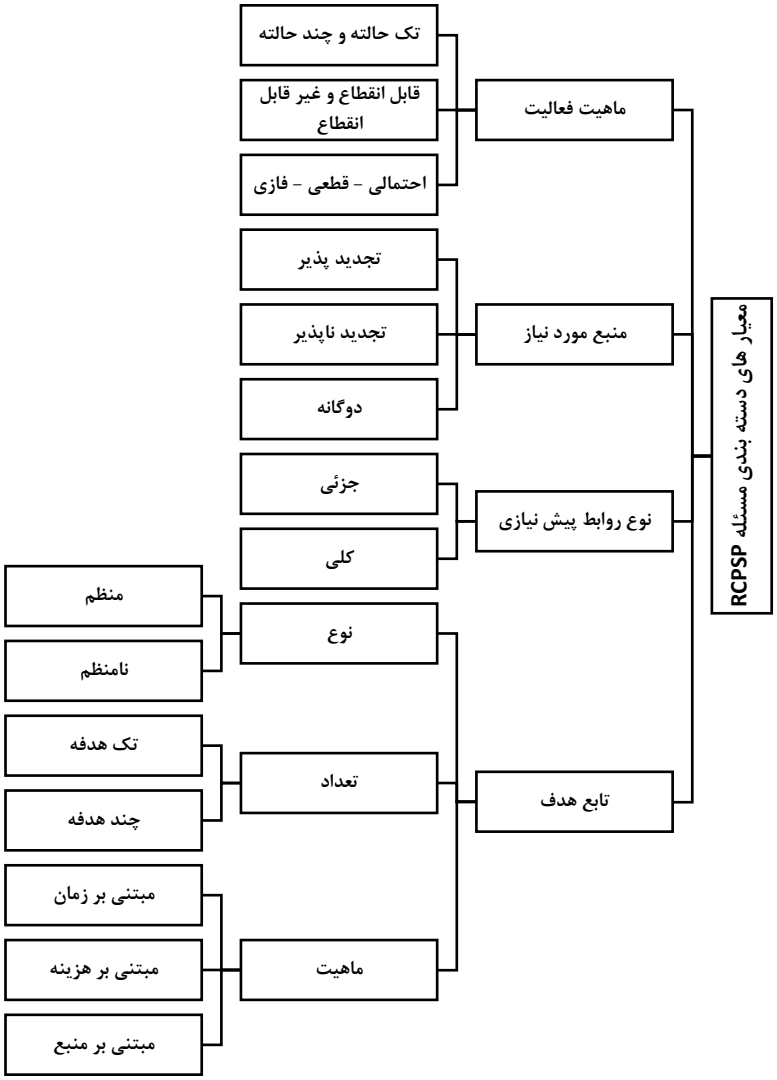
۲-۳-۳- انواع مسئله‌ی RCPSP و روش‌های حل آن

در این بخش ابتدا دسته‌بندی کلی از مسئله‌ی RCPSP کلاسیک بیان شده و سپس روش‌های حل مسئله و مزایا و معایب آن‌ها به‌طور کامل تشریح می‌شود. لازم به ذکر است که این روش‌ها برای حل مسئله‌ی MRCPSP نیز به کار می‌روند.

۲-۳-۳-۱- دسته‌بندی مسئله‌ی RCPSP

در مدل‌های ارائه‌شده برای زمان‌بندی پروژه با منابع محدود می‌توان با توجه به ماهیت و هدف پروژه، معیارهای مختلفی را جهت مشخص کردن انواع مسئله‌ی RCPSP مطرح نمود که در شکل ۲-۵ بیان شده است.

[15]Renewable Resource
[16]Non Renewable Resource
[17]Doubly Constrained Resource



شکل ۲-۵- معیارهای دسته‌بندی مسئله‌ی RCPSP [۲۱]

۲-۳-۳-۲- روش‌های حل مسائل زمان‌بندی پروژه

روش‌های حل مسائل زمان‌بندی پروژه ازجمله RCPSP و MRCPSP را می‌توان در قالب روش‌های دقیق[۱۸]، ابتکاری[۱۹]، فرا ابتکاری[۲۰] و ابر ابتکاری[۲۱] دسته‌بندی کرد. در این رویکردها تعیین برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه با توجه به روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع صورت می‌گیرد.

- **روش‌های دقیق**: این روش‌ها بااینکه جواب بهینه دقیقی را در اختیار ما قرار می‌دهند، اما کارایی عملی چندانی برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود ندارند؛ چراکه این دسته از مسائل اغلب شامل تعداد زیادی متغیر و محدودیت هستند. ازجمله این روش‌ها می‌توان برنامه‌ریزی خطی[۲۲]، برنامه‌ریزی عدد صحیح[۲۳]، برنامه‌ریزی صفر و یک[۲۴] و برنامه‌ریزی غیرخطی[۲۵] را نام برد [۲۲]. براکر[۲۶] و همکاران یک الگوریتم شاخه و کران برای زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با هدف کمینه‌سازی زمان انجام پروژه معرفی نمودند. در این روش، یک گراف نشان‌دهنده پیوستگی‌ها (محدودیت‌های پیش‌نیازی) و ناپیوستگی (محدودیت منابع) شروع شده و سپس محدودیت‌های جدا سازنده بین هر جفت از فعالیت‌ها یا مکان فعالیت‌ها را به‌صورت موازی بیان می‌کند [۲۳]. نابر[۲۷] و کولیش[۲۸] برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با مصرف منابع غیرثابت[۲۹] (FRCPSP) چند مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه دادند و پس از مقایسه مدل‌ها از لحاظ مدت زمان حل، کاراترین مدل را معرفی کردند [۲۴].

---

[18] exact
[19] heuristic
[20] meta-heuristic
[21] hyper-heauristic
[22] Linear Programming
[23] Integer Programming
[24] Binary Programming
[25] Non Linear Programming
[26] Brucker
[27] Naber
[28] Kolisch
[29] resource-constrained project scheduling problem with flexible resource profiles

- **روش‌های ابتکاری**: ازجمله روش‌های بهینه تقریبی است که مبتنی بر قوانین اولویت بوده و می‌توان از آن برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه در هر ابعادی استفاده نمود. در مدل‌های ابتکاری اگرچه مدل به جواب بهینه نمی‌رسد، اما با سرعت بیشتری جواب نزدیک به جواب بهینه را در اختیار می‌گذارد. نقطه‌ضعف استفاده از این روش فقدان وجود یک قاعده کلی برای مرتب کردن فعالیت‌هاست. این روش‌ها از دو جزء تشکیل‌شده‌اند: روش تولید برنامه زمانی[۳۰] و قوانین اولویت‌بندی. محبوب‌ترین قوانین اولویت عبارت‌اند از: حداقل شناوری[۳۱]، کمترین زمان اجرا[۳۲] و انتخاب تصادفی[۳۳]. هر یک از قوانین اولویت می‌تواند تأثیر متفاوتی بر عملکرد روش‌های ابتکاری داشته باشد. اتلی[۳۴] و کاهرامان[۳۵] در پژوهش خود با فازی در نظر گرفتن مدت زمان انجام فعالیت‌ها، مسئله‌ی MRCPSP را مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها با ارائه یک رویکرد ابتکاری مبتنی بر قواعد اولویتی حداقل شناوری، به حل مدل پرداختند و بهترین ترتیب ممکن برای اجرای فعالیت‌ها و روش اجرایی بهینه هر فعالیت را به دست آوردند [۲۵].
- **روش‌های فرا ابتکاری**: دسته دیگری از روش‌های بهینه تقریبی است که از یک یا چند جواب اولیه شروع می‌شوند و بر اساس جواب‌های موجود در هر تکرار، بهبود در جواب‌ها صورت می‌گیرد و درنهایت جواب بهینه را در مدت زمان مناسب برمی‌گرداند. اهمیت الگوریتم‌های فرا ابتکاری زمانی نمایان می‌شود که پیچیدگی مسئله به حدی باشد که نتوان با استفاده از روش‌های دقیق ریاضی جواب بهینه‌ی مسئله را پیدا کرد. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی[۳۶] (BBO)، الگوریتم ژنتیک[۳۷] (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی

[30]Schedule Generation Scheme
[31]Minimum Slack Time
[32]Shortest Process Time
[33]Random
[34]Atli
[35]Kahraman
[36]Biogeography Based Optimization
[37]Genetic Algorithms

مورچگان[۳۸] (ACO) نمونه‌هایی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری هستند. وانهوک[۳۹] و همکاران یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی پروژه‌های با منابع محدود چندحالته در محیط قطعی ارائه دادند. آن‌ها برای فعالیت‌ها قابلیت انقطاع در نظر گرفتند؛ بدین معنا که هر فعالیت مدتی پس از شروع می‌تواند به دلیل وجود شرایط نامطلوب مانند در دسترس نبودن منابع، متوقف شده و پس از مطلوب شدن شرایط مجدداً به پردازش خود ادامه دهد. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک با هدف مینیمم کردن زمان تکمیل اجرای پروژه، اقدام به حل مدل مسئله نمودند [۲۶].

توکلی مقدم و صادقی، به‌منظور کمینه کردن زمان انجام پروژه در یک مدل چندحالته، یک مدل ریاضی ارائه دادند و با استفاده از روش الکترومغناطیس اقدام به تخصیص روش بهینه به فعالیت‌ها کردند و در ادامه به کمک الگوریتم جستجوی محلی، مدل را بهبود بخشیدند. در پایان، بر اساس نمونه‌های حل‌شده عملکرد مدل را مناسب ارزیابی کردند [۲۷]. وانهوک و لیمن[۴۰] بر روی مسائل RCPSP و MRCPSP با در نظر گرفتن امکان تخفیف زمانی در جریان نقدی تمرکز کردند. مدل پیشنهادی آن‌ها دارای دو بخش می‌باشد. در بخش اول، هدف، زمان‌بندی پروژه به‌منظور بهبود ارزش فعلی پروژه بوده و در بخش دوم کارایی مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۲۸].

چشمی و همکاران اقدام به بهسازی پارامترهای حل‌کننده‌ی مسئله‌ی صدق پذیری برای مسئله‌ی MRCPSP نمودند. در پژوهش آن‌ها یک روش فرا ابتکاری برای حل این مسئله معرفی‌شده که از یک درخت شمارشی و یک حل‌کننده‌ی مسئله‌ی صدق پذیری برای تبدیل مسئله‌ی MRCPSP به RCPSP استفاده می‌کند؛ اما ایراد این روش نیازمندی به حافظه‌ی بالا

[38]Ant Colony Optimization
[39]Vanhoucke
[40]Leyman

و زمان بالا در پیمایش درخت شمارشی[۴۱] بود. از این رو در پژوهش موردنظر برای رفع مشکلات یادشده، دو رویکرد شامل مرتب‌سازی و هرس درخت شمارشی پیشنهاد گردید و اثرات آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که به‌کارگیری پیشنهادها در تعدیل مشکلات روش حل، به میزان قابل‌توجهی مؤثر بوده و بر اساس معیارهای تعیین‌شده، توانسته است در مواردی بیش از ۸۸ درصد را بهبود بخشد [۲۹]. قلی زاده و نجفی به بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی چندحالته پروژه با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی پرداخت و منابع محدود پرداختند. در مسئله‌ی پیشنهادی، برای در نظر داشتن هر چه بیشتر شرایط حاکم در دنیای واقعی، منابع تجدید پذیر (ازجمله نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات) و همچنین منابع تجدید ناپذیر (ازجمله هزینه) همزمان در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه‌ی پژوهش نیز مبحث زمان‌بندی و برنامه‌ریزی پرداخت پروژه با هدف افزایش ارزش فعلی خالص[۴۲] (NPV) و کاهش زمان اتمام پروژه، در مسئله بررسی می‌شود. به همین دلیل ابتدا بر اساس فرضیه‌های مطرح‌شده در فضای مسئله، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ریاضی برای فرموله سازی مسئله ارائه می‌شود. سپس برای اعتبارسنجی مدل، چندین مسئله‌ی نمونه در ابعاد مختلف طراحی شده و توسط نرم‌افزار GAMS و روش محدودیت اپسیلون[۴۳] حل می‌شود. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ نیز از روش الگوریتم NSGA-II بهره‌گیری شده و کارایی آن از طریق مقایسه با روش محدودیت اپسیلون سنجیده می‌شود [۳۰].

- **روش‌های ابر ابتکاری**: رویکرد ابر ابتکاری اولین بار در سال ۲۰۰۰ ارائه شده است. این روش اغلب با ترکیب تکنیک‌های یادگیری ماشین و با استفاده از رویه‌هایی چون انتخاب، ترکیب و تولید ابتکاراتی ساده (یا مؤلفه‌های این ابتکارات) به‌طور مؤثر مسئله جستجو را حل می‌کند. به‌این‌ترتیب رویکرد ابر ابتکاری یک سطح انتزاع بر فراز الگوریتم‌های فرا ابتکاری عمل می‌کند.

[41]Counting sort
[42]Net Present Value
[43]Epsilon-Constraint

یکی از انگیزه‌ها برای مطالعه‌ی رویکرد ابر ابتکاری، ساختن سامانه‌هایی است که دسته‌ای از مسائل را کنترل می‌کنند (نه فقط حل یک مسئله)؛ بنابراین این رویکرد به‌منظور بالا بردن سطح عمومیت در سامانه‌های بهینه‌سازی پیشنهاد شده است. این رویکرد به‌وسیله‌ی آگاهی از چندین رویه‌ی مختلف به مسائل گوناگون که هرکدام اجزا و مزیت خاص خود را دارند اختصاص داده شده است [۳۱].

۲-۴- ابعاد، کاربردها و ابزارهای BIM

در این بخش ابعاد مختلف فناوری BIM در چرخه‌ی حیات پروژه مورد بررسی قرار گرفته و سپس به بیان کاربردهای مختلف آن در صنعت ساختمان و نیز ابزارهای مربوطه جهت مدل‌سازی سه‌بعدی و پیاده‌سازی بعدهای دیگر پرداخته خواهد شد.

۲-۴-۱- ابعاد مختلف مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در طراحی و ساخت

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان از نمایش دوبعدی (طول و عرض) فراتر رفته و امروزه پاسخگوی نمایش سه‌بعدی مدل (بعد ارتفاع) نیز است تا جایی که این فناوری تا بعد ششم نیز پیشرفته است که این ابعاد عبارت‌اند از:

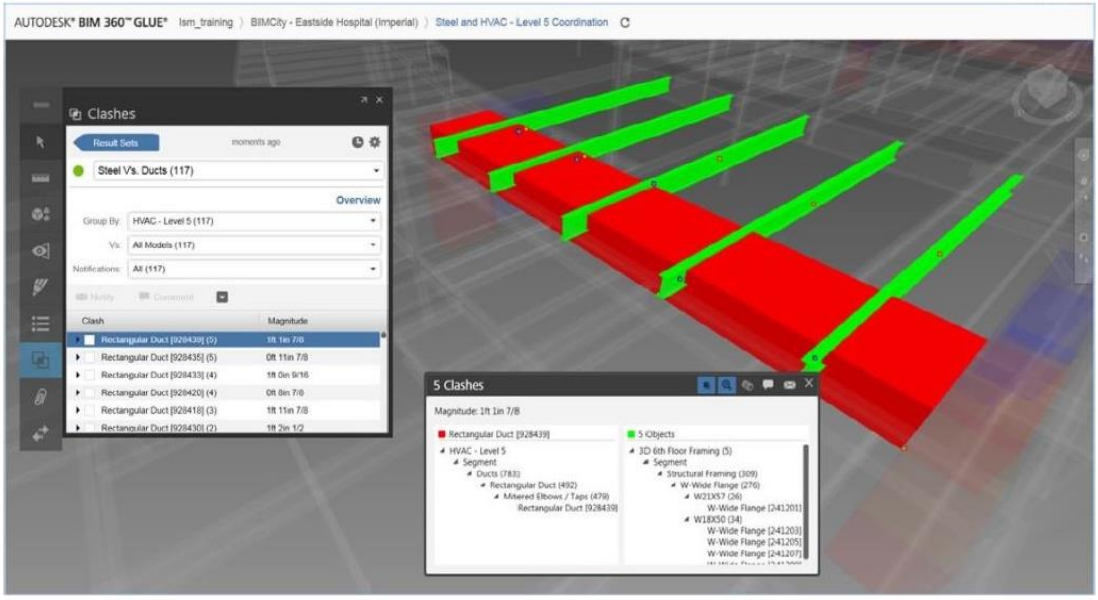
- بعد سوم: شامل پارامترهای طول، عرض و ارتفاع
- بعد چهارم: شامل بعد سوم نمایش و زمان‌بندی پروژه
- بعد پنجم: شامل بعد سوم نمایش، زمان‌بندی و هزینه پروژه
- بعد ششم: شامل بعد سوم نمایش، زمان‌بندی، هزینه و بهره‌برداری پروژه [۳۲].

۲-۴-۲- کاربردهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

همان طور که در فصل نخست بیان گردید، فناوری BIM به عنوان یک مفهوم و روش نوین در کل چرخه‌ی حیات یک پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله کاربردهای این فناوری در مراحل مختلف پروژه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- **تصویرسازی**: نخستین کاربرد BIM توسط گروه‌های مختلف در کارگاه‌های ساخت‌وساز، مشاهده‌ی خروجی‌های مورد انتظار و درک بهتر و دقیق‌تری ازآنچه طراح انتظار ساخت آن را دارد، است. تصویرسازی همچنین می‌تواند به‌عنوان اهرمی بنیادی جهت درک بهتر توالی فعالیت‌های پروژه باشد [۳۳].
- **قابلیت ساخت**: فرآیند قابلیت ساخت، استفاده‌ی بهینه از دانش و تجربه در برنامه‌ریزی، طراحی، تدارکات و سازمان‌دهی پروژه جهت رسیدن به اهداف کلی آن است. برای کنترل هزینه و قابلیت ساخت طرح توسط BIM، معمار و مدیر ساخت چگونگی ایجاد اسناد ساخت را بررسی کرده که این فرآیند به معنی رسیدن به یک سیستم یکپارچه‌ی تحویل پروژه است و سود و زیان حاصل از انجام پروژه به‌صورت دقیق در اختیار ذینفعان قرار می‌گیرد [۳۴].
- **هماهنگی و همکاری**: هماهنگی و همکاری در پروژه اطمینان می‌دهد که اطلاعات ایجاد شده در مراحل مختلف پروژه، یکپارچه و پیوسته خواهند بود. تصویرسازی و قابلیت ساخت برای کارکرد مناسب، نیازمند همکاری و درگیر کردن ذینفعان پروژه می‌باشد؛ بنابراین اگر این رویکرد در موافقت‌نامه‌های میان گروه‌های درگیر در پروژه لحاظ گردد، تحویل یکپارچه‌ی پروژه به‌خوبی انجام می‌گیرد و می‌توان توسط روش‌های ساخت ناب، فرآیند انجام مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را به‌خوبی کنترل کرد [۳۵].

- **کشف تداخلات و ناهماهنگی‌ها**: با کشف تداخل، مدل‌های اطلاعات ساختمان ارائه‌شده توسط گروه‌های مختلف طراحی، در کنار هم گردآوری شده و ناهماهنگی‌های مهندسی کنترل می‌شوند. تداخلات در مدل‌ها به سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: تداخلات سخت، نرم و تداخل جریان کار یا چهاربعدی. یک تداخل سخت زمانی اتفاق می‌افتد که دو جسم، فضا و مکانی یکسان اشغال می‌نمایند. برای مثال عبور کانال تأسیسات از تیرهای کامپوزیت سقف که در شکل ۲-۶ نمایش داده شده است. تداخل نرم به مقدار فضای مجاز اشاره دارد و تداخل چهاربعدی نیز به تداخلاتی که در برنامه‌ریزی کارکنان، ساخت تجهیزات و یا حمل مصالح وجود دارد اشاره می‌نماید [۳۶].



شکل ۲-۶- کشف تداخل کانال تأسیساتی با تیرهای سقف کامپوزیت [۳۴]

- **برآورد هزینه**: با برآورد هزینه که همان بعد پنجم BIM می‌باشد، اجسام در طرح سه‌بعدی به لیست قیمت‌ها و جنس مصالح مرتبط می‌گردند. لیست قیمت‌ها عمدتاً بر پایه واحد حجم مصالح است، اما برآوردهای جزئی‌تر می‌تواند شامل قیمت نیروی کار و تجهیزات نیز باشد. این کار قابلیت برآورد دقیق هزینه در هر نقطه از مرحله‌ی طراحی را فراهم می‌کند و اطلاعات مالی دقیق‌تری برای

تصمیمات طراحی ایجاد می‌کند. BIM می‌تواند به‌صورت آنی برآورد مقادیر را قبل از اینکه مترور بخواهد زمان زیادی را برای اندازه‌گیری مقادیر از نقشه‌های دوبعدی صرف کند، انجام دهد [۳۷].

- **پیگیری پیشرفت پروژه**: در بیشتر موارد، برنامه‌ریزی چهاربعدی (وارد کردن بعد زمان در مدل سه‌بعدی) از ارتباط بین فعالیت‌های گانت چارت به اجزای مشخص BIM تهیه می‌گردد. برنامه زمان‌بندی پروژه که در نرم‌افزارهایی مانند MS Project ایجاد می‌شود از یک‌سو و مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای ساختمان با نرم‌افزارهایی مانند Autodesk Revit از طرف دیگر مقدمات کار را فراهم می‌نمایند و پس از آن برای متصل نمودن برنامه‌ی زمان‌بندی به اجزای متناظر فعالیت‌ها از ابزارهایی همچون Navisworks Manage استفاده می‌شود که درنهایت برنامه‌ریزی چهاربعدی را به نمایش می‌گذارد. این قابلیت نیز وجود دارد که مقدار هزینه و کار انجام‌شده را در مقابل کمیت‌های متناظر در مدل BIM تعریف نمود [۳۸].

۲-۴-۳- ابزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان

در هر یک از مراحل چرخه‌ی حیات یک پروژه، می‌توان از نرم‌افزارهای مختلفی برای دستیابی به هدف آن مرحله استفاده کرد. جدول ۲-۲ انواع نرم‌افزارهای هوشمندی که در راستای اجرای هر یک از مراحل مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، مورداستفاده قرار می‌گیرند را نشان می‌دهد.

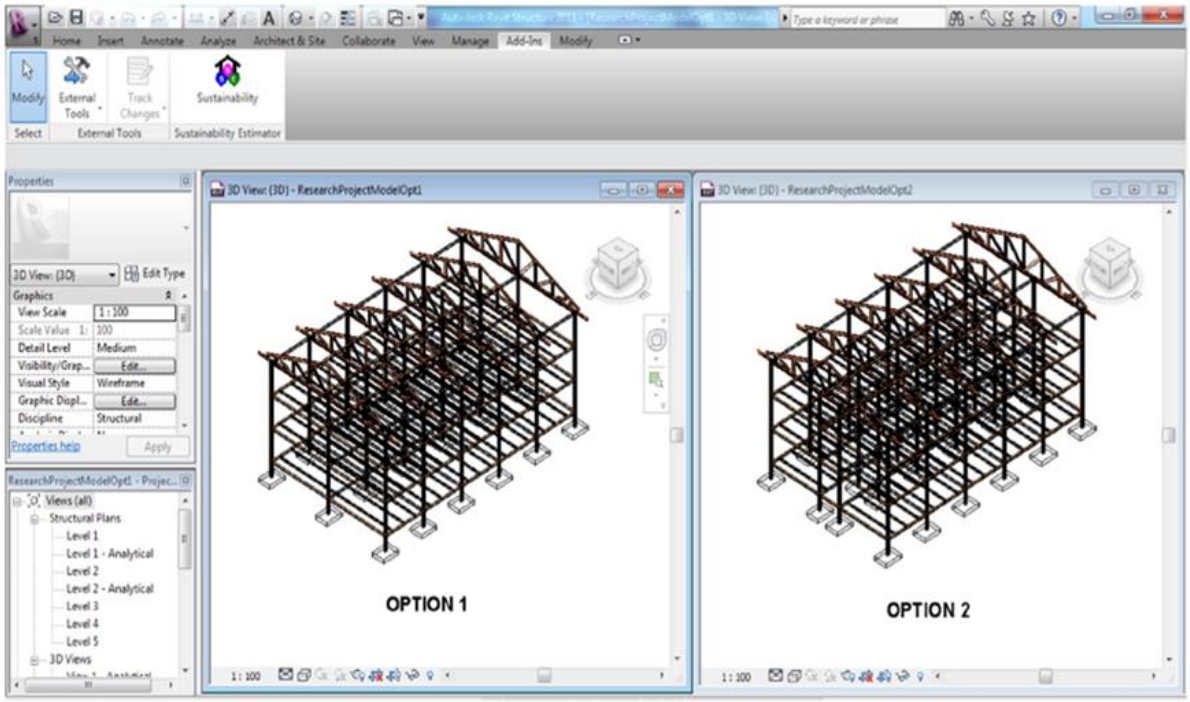
جدول ۲-۱- ابزارهای BIM [۳۸]

نام نرم‌افزار	کاربرد
Autodesk Revit Architecture,Bentley Architecture, Graphisoft ArchiCAD, Nemetschek Vector works Architect	Architectural Design
Autodesk Revit MEP, Bentley Building Mechanical Systems, Graphisoft MEP Modeler	MEP Design
Autodesk Revit Structure, Tekla Structures, Bentley Structural Modeler	Structural Design
Navisworks Manage, Solibri Model Checker	Clash Inter-Disciplinary Coordination and Detection, Scheduling
Solibri Model Checker	Code Checking

حال دو ابزار پرکاربرد که در جدول بالا اشاره شده است به‌طور مختصر معرفی می‌شود:

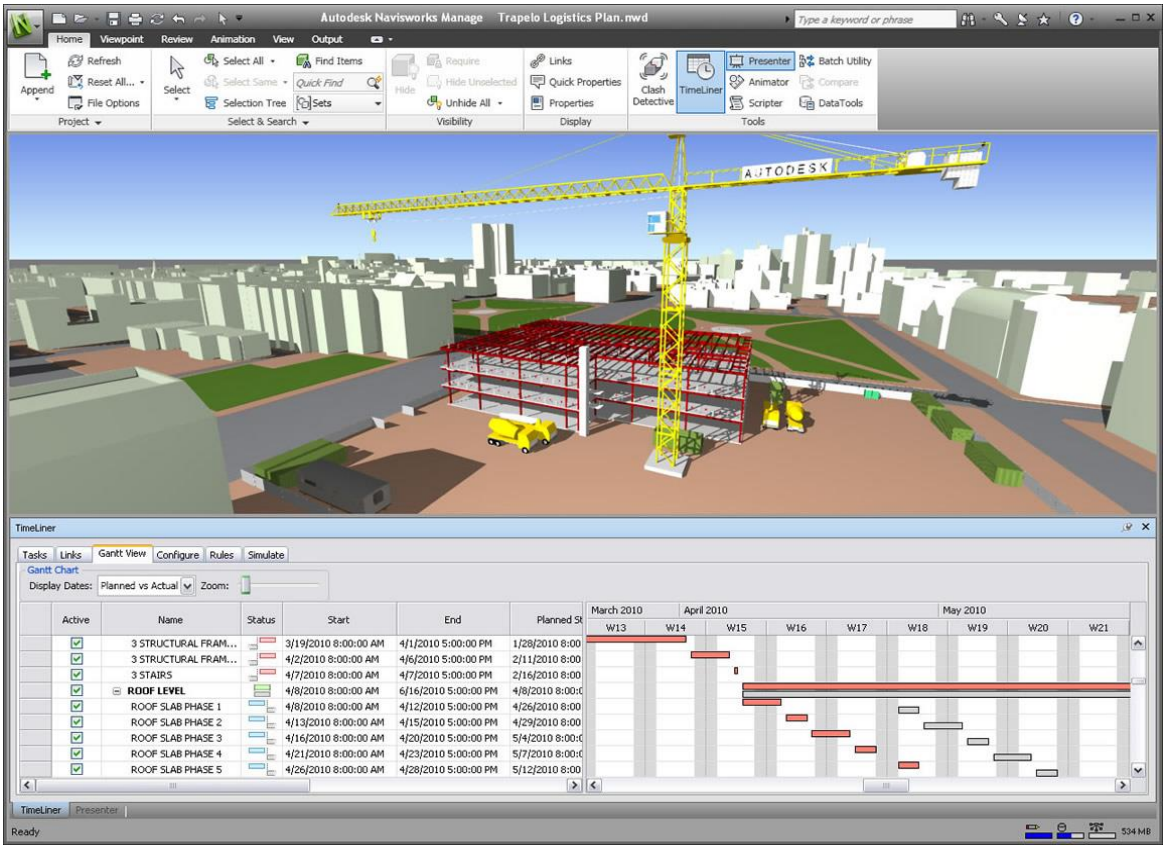
- **Autodesk Revit** که خانواده‌ای از محصولات یکپارچه، ازجمله معماری، سازه و تأسیسات می‌باشد. این برنامه به کاربران خود اجاره می‌دهد که یک ساختمان و اجزایش را به‌صورت سه‌بعدی طراحی کرده، مدل را با عناصر نوشتاری دوبعدی تفسیر کرده و به اطلاعات ساختمان از طریق پایگاه داده مدل‌های ساختمان دسترسی پیدا کند. Revit نرم‌افزاری با قابلیت BIM چهاربعدی به همراه ابزارهایی به‌منظور نقشه‌کشی و ردیابی مراحل مختلف در چرخه حیات ساختمان است که

از مفهوم اولیه گرفته تا ساخت و پس از آن تخریب را شامل می‌شود [۳۹]. شکل ۲-۷، نمونه‌ی مدل یک سوله در این نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷- نمونه‌ی مدل BIM سوله در نرم‌افزار Revit [۴۰]

- **Autodesk Navisworks Manage** که به‌عنوان JetStream هم شناخته می‌شود، نرم‌افزار مدیریت پروژه شرکت ادوبی است. این نرم‌افزار قابلیت‌های فراوانی برای هماهنگی، شبیه‌سازی ساخت و آنالیزهای کامل برای بررسی پروژه داشته و برای آنالیز و بهبود برنامه‌ریزی پروژه، شناسایی ناهماهنگی‌ها و افزایش همکاری در مدیریت پروژه، امکانات فراوانی دارد. همچنین قابلیت برآورد هزینه در مراحل مختلف را دارا می‌باشد و از بسیاری از فرمت‌های مرسوم پشتیبانی می‌کند. با این نرم‌افزار می‌توان برخی از مشکلات اساسی قبل از هرگونه ساخت‌وساز را پیش‌بینی کرد و هزینه‌های ساخت را به حداقل ممکن رساند. از کاربردهای مهم BIM، بصری سازی فرآیند ساخت و مدل‌سازی چهاربعدی بوده که یک نمونه از آن در شکل ۲-۸ نشان داده شده است [۴۱].



شکل ۲-۸- نمایش پیشرفت پروژه در محیط نرم‌افزار Navisworks [۴۱]

۲-۵- مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و زمان‌بندی

مدل‌سازی اطلاعات ساختمان می‌تواند به‌عنوان یک چارچوبی برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه به کار رود؛ بدین شکل که ابتدا WBS برای یک پروژه، تدوین شده و بر مبنای آن برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه ادامه می‌یابد. در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه می‌توان با استفاده از فرآیند BIM و نیز به‌کارگیری و ادغام روش مسیر بحرانی، گانت چارت و یک مدل‌سازی سه‌بعدی، به مدل چهاربعدی ساختمان دست پیدا کرد. این کار می‌تواند به دو صورت انجام پذیرد، در روش اول مدل‌سازی سه‌بعدی به‌وسیله‌ی نرم‌افزارهای مربوطه مانند Autodesk Revit، انجام می‌شود. سپس با توجه به مدل به‌وسیله‌ی نرم‌افزارهای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه مانند MS-Project، برنامه‌ریزی پروژه صورت می‌گیرد. در روش دوم از نرم‌افزارهای

مدل‌سازی چهاربعدی اطلاعات ساختمان استفاده می‌شود که مدل‌سازی و برنامه‌ریزی پروژه در یک برنامه به‌صورت یکجا انجام می‌شود [۴۲].

۲-۵-۱- نقص‌ها و مشکلات روش‌های مرسوم برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه

در این قسمت ابتدا به نقص‌ها و مشکلات روش مرسوم برنامه‌ریزی پروژه‌ها پرداخته می‌شود. در روش مرسوم، دانش ناکافی برنامه‌ریزان پروژه از روش اجرا و اجزای پروژه، در دسترس نبودن داده‌های فعالیت‌های مختلف و همچنین کمبود رابطه میان فعالیت‌ها، منجر به بروز اشتباهات در زمان‌بندی پروژه و درنهایت به وجود آمدن خسارات مالی می‌شود. برنامه‌ریزان پروژه به هر میزان که باتجربه باشند همچنان مجبور خواهند بود با فرض خود برنامه‌ریزی کنند که احتمال خطا در آن زیاد می‌شود. مشکلات اصلی روش‌های برنامه‌ریزی سنتی به شرح زیر است:

- عدم وجود الگوی واقعی برنامه‌ریزی و برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت بر اساس فرضیات و تجربه
- فقدان وجود یک رویکرد هدفمند فرآیند مدیریت اجرایی
- عدم وجود معیاری برای کنترل دقیق و استفاده از رویکرد اصلاحی
- عدم اجرای عملی برنامه‌ها به‌طور کامل
- برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه از روی تجربه و نه از داده‌های واقعی پروژه
- کمبود منابع کافی برای برنامه‌ریزی [۴۳].

۲-۵-۲- مزایای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه با استفاده از BIM

در روش برنامه‌ریزی با به‌کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در فاز طراحی و برنامه‌ریزی پروژه، درصد قابل توجهی از تضادها و مشکلات اجرایی قابل شناسایی است و پیش از برنامه‌ریزی برای مشکلات برنامه‌ریزی می‌شود و درنتیجه مشکلات اجرایی قبل از زمان اجرا رفع و یا در برنامه‌ریزی پروژه منظور

می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر در روش برنامه‌ریزی با به‌کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، دیگر نه از روی فرضیات و تجربیات بلکه از مدلی شبیه‌سازی‌شده و دقیق می‌توان برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی استفاده کرد و این خود باعث دقت بیشتر در اجرای کار می‌گردد. در حقیقت می‌توان گفت در روش برنامه‌ریزی و زمان‌بندی با به‌کارگیری اطلاعات ساختمان، برنامه‌ریزی از ابتدا صحیح و با دقت انجام می‌شود [۱۰]. موارد زیر مزایای کلی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه با به‌کارگیری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان را بیان می‌کنند:

- **شبیه‌سازی سه‌بعدی در مقابل ارائه‌ی دوبعدی**: نقشه‌های معمولی ساختمان شامل پلان، مقطع، نقشه‌های سازه، تأسیسات الکتریکی و مکانیکی است. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، امکان شبیه‌سازی سه‌بعدی ساختمان و مؤلفه‌های آن را به ما می‌دهد که این شبیه‌سازی می‌تواند تناقضات را نشان دهد و متغیرهای محیطی را در طرح‌های مختلف ساختمانی نمایان سازد و مقدار مصالح و زمان موردنیاز را محاسبه کند.
- **دقت در مقابل تخمین**: با امکان ایجاد مدل ساختمان قبل از ساخت آن، سطحی از دقت به کمیت‌ها و کیفیت‌های ساختمانی اضافه می‌شود.
- **بازدهی بیشتر در مقابل تکرار و اتلاف وقت**: تنها با یک‌مرتبه کشیدن اجزای ساختمانی، نماها، پلان و مقاطع به‌صورت خودکار ترسیم خواهند شد. سرعت کار نیز در این نوع مدل‌سازی بیشتر است [۴۴].

۲-۶- پیشینه پژوهش

در این بخش، پژوهش‌های داخلی و خارجی در حوزه زمان‌بندی و BIM تشریح می‌شود تا جمع‌بندی مناسبی از آن‌ها صورت گرفته و نواقص و کاستی‌های آن‌ها مشخص شود و درنهایت زمینه‌های انجام پژوهش‌های بعدی تعیین گردد.

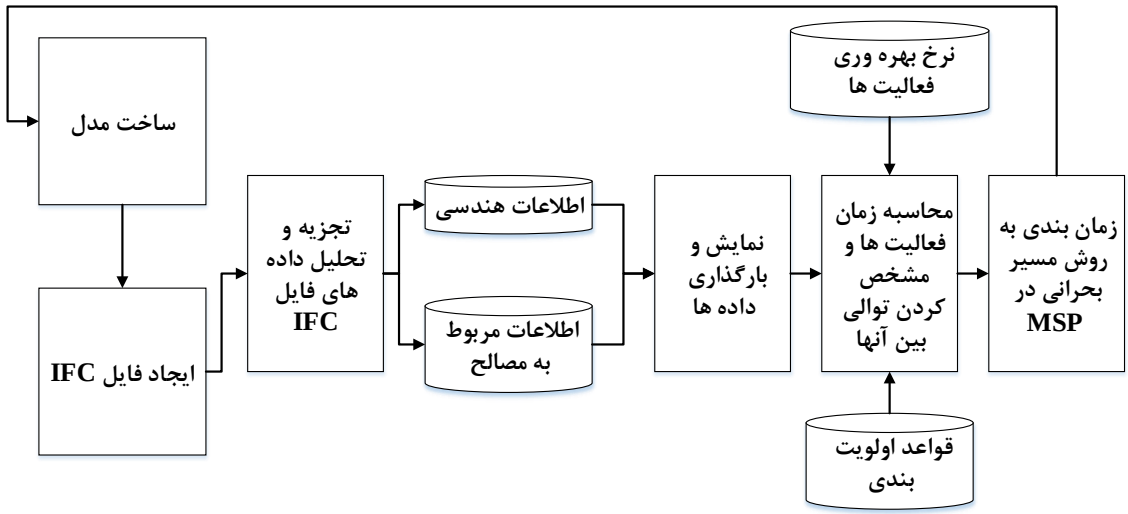
۲-۶-۱- پژوهش‌های خارجی

جیانگ[۴۴] در پژوهش خود به بررسی ابزارهای گوناگون BIM و حوزه‌های مختلف کاربرد آن به‌خصوص زمان‌بندی و برآورد هزینه پروژه پرداخت. بدین منظور دو موضوع مهم مطرح گردید؛ اول اینکه ابزارهای BIM چگونه با مدل‌سازی چهاربعدی ارتباط برقرار می‌کنند و دوم اینکه چگونه می‌بایست میان مدل چهاربعدی و مدل سه‌بعدی ارتباط برقرار نمود تا زمان‌بندی پروژه به روش مسیر بحرانی انجام شود. سپس سه روش برای تخمین هزینه‌ها در این پژوهش ارائه شد. نخست استخراج لیست برآورد مقادیر المان‌ها[۴۵] (QTO) و فرستادن آن به ابزارهای برآورد هزینه ازجمله اِکسل انجام می‌شود. سپس المان‌های مدل BIM به ابزار تخمین هزینه مرتبط می‌شوند. بر مبنای این روش‌ها، یک مطالعه موردی جهت زمان‌بندی و برآورد هزینه‌ی ساختمان مسکونی سه‌طبقه انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که ارتباط مدل چهاربعدی و فرآیند برآورد مقادیر با استفاده از BIM به‌صورت خودکار می‌تواند به‌خوبی برنامه‌ی زمان‌بندی پروژه در محیط چهاربعدی را نمایش دهد [۴۵]. سون[۴۶] و همکاران سیستمی را پیشنهاد داده‌اند که طرح‌های چون - برنامه[۴۷] و چون - ساخت[۴۸] را مقایسه می‌کند. در این سیستم با استفاده از نرم‌افزار Revit، انواع مدل‌ها مقایسه شده و زمان‌بندی به روش مسیر بحرانی، طبق اطلاعات جدید در نرم‌افزار MS Project اصلاح می‌شود. همچنین زمان‌های شروع و پایان جدید فعالیت‌ها به‌علاوه‌ی سایر اطلاعات مفید برای کنترل پروژه فراهم می‌آیند. با انجام یک مطالعه موردی بر روی ساختمان مسکونی ده طبقه با اسکلت فولادی، نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی به خودکارسازی فرآیند زمان‌بندی کمک شایانی کرده و روند به‌روزرسانی آن را مطمئن‌تر می‌کند[۴۶].

---

[44] Jiang
[45] Quantity Take-Off
[46] Son
[47] As Designed
[48] As Built

اندرسون[۴۹] و همکاران یک نمونه‌ی اولیه را برای خودکارسازی فرآیند زمان‌بندی پروژه به روش مسیر بحرانی با استفاده از فناوری BIM بررسی کردند. پژوهش آن‌ها عمدتاً بر خودکارسازی استخراج داده‌ها از مدل BIM در قالب فرمت IFC[50] و تجزیه و تحلیل اطلاعات به‌عنوان ورودی برنامه زمان‌بندی متمرکز بود. با استفاده از استخراج اطلاعات از مدل BIM، چارچوب مورد استفاده در این پژوهش ابتدا فعالیت‌های پروژه را مشخص نموده و سپس زمان فعالیت‌ها را بر اساس نرخ بهره‌وری آن‌ها محاسبه می‌نماید. در ادامه قواعد پیش‌نیازی فعالیت‌ها در این چارچوب اعمال شده و درنهایت برنامه‌ی زمان‌بندی را به‌عنوان خروجی نمایش می‌دهد. ساختار و روش این پژوهش در شکل ۲-۹ نمایش داده شده است. برای اثبات چارچوب پیشنهادی، عناصر اصلی یک ساختمان مسکونی دوطبقه شامل دیوارها، دال‌ها، ستون‌ها و تیرها مورد ارزیابی و مطالعه قرارگرفته‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از BIM برای بهینه کردن تقدم و تأخر فعالیت‌ها به‌منظور کاهش زمان کل پروژه مؤثر است [۴۷].

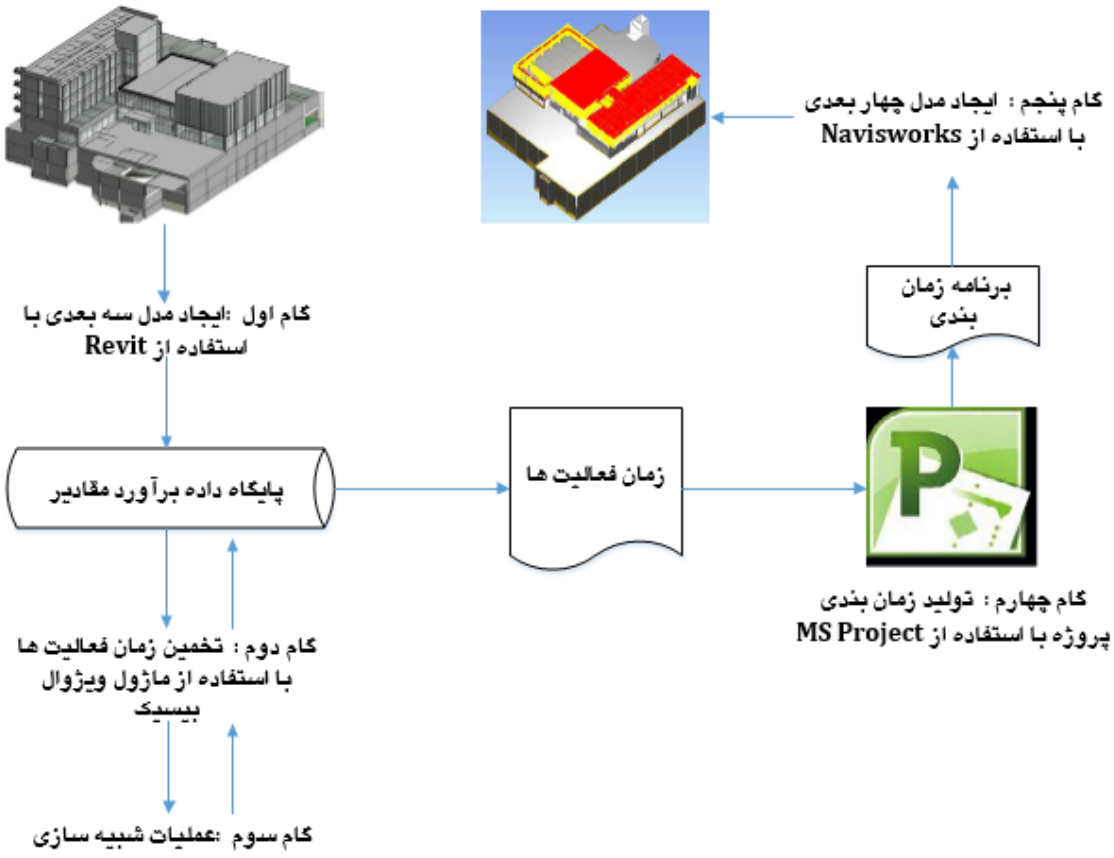


شکل۲-۹- روش زمان‌بندی پروژه با استفاده از BIM و IFC در پژوهش اندرسون و همکاران [۴۷]

[49]Anderson
[50]Industry Foundation Classes

وانگ[۵۱] و همکاران چارچوبی را برای فرآیند شبیه‌سازی فعالیت‌های کارگاهی و زمان‌بندی به روش مسیر بحرانی با استفاده از قابلیت‌های BIM ازجمله برآورد مقادیر مصالح موردنیاز ارائه کردند. سیستم پیشنهادی شامل مکانیسم‌هایی است که اطلاعات را در قالب دیتابیس‌های مختلف جمع‌آوری و ذخیره می‌کند. این چارچوب در شکل ۲-۱۰ نمایش داده شده است. این شبیه‌سازی قادر است که زمان فعالیت‌هایی که دارای عدم قطعیت می‌باشند را در نظر بگیرد که این مسئله، میزان نیاز این فعالیت‌ها را به منابع، اولویت‌بندی کرده و انواع استراتژی‌های مربوط به تخصیص منابع را ارزیابی می‌نماید. یکپارچگی سیستم ارائه‌شده در دو جنبه قابل بررسی است؛ نخست این‌که BIM می‌تواند با سرعت و دقت قابل توجهی عملیات برآورد مقادیر را جهت تخمین زمان انجام فعالیت‌ها انجام دهد و دوم این‌که توالی مناسب برای انجام فعالیت‌ها جهت کمینه کردن زمان انجام پروژه با استفاده از ادغام فرآیند شبیه‌سازی و فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به دست می‌آید که درنتیجه یک مدل چهاربعدی مبتنی بر BIM با خصوصیات ذکرشده ایجاد می‌گردد [۴۸].

[51] Wang

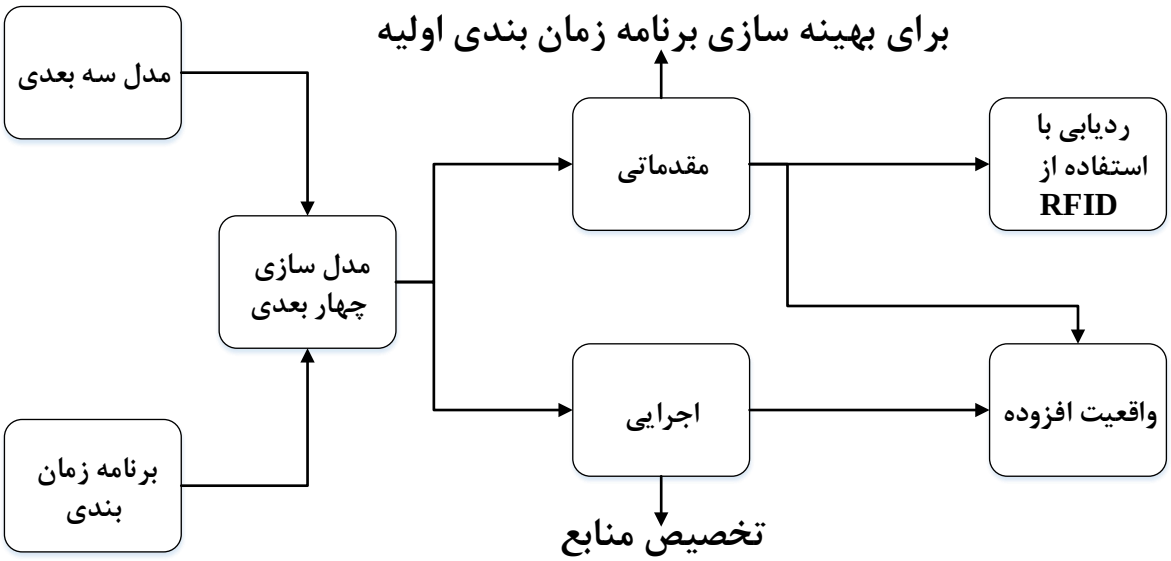


شکل ۲-۱۰- چارچوب استفاده از BIM و شبیه‌سازی جهت ایجاد مدل چهاربعدی در پژوهش وانگ و همکاران [۴۸]

ژو[۵۲] و همکاران در پژوهش خود به بررسی امکان‌سنجی و نیز فواید استفاده از مدل چهاربعدی در اجرای پروژه‌های مربوط به مخازن گاز مایع[۵۳] (LNG) پرداختند. در مقاله مذکور، مدل چهاربعدی در دو سطح مقدماتی و اجرایی، پیاده‌سازی و مقایسه شده است. همچنین بصری سازی عملیات ساخت مبتنی بر مدل سه‌بعدی سازه مخزن، به‌منظور کسب آمادگی لازم برای عملیات اجرایی اصلی، شناخت خطرات، ریسک انجام‌پذیر بودن پروژه و موارد ایمنی در کارگاه در این پژوهش انجام پذیرفته است. سپس زمان‌بندی مربوط به منابع و همکاری میان قسمت‌های مختلف پروژه با تلفیق مدل چهاربعدی و الگوریتم‌های ریاضی و به روش مسیر بحرانی انجام گردید. خلاصه‌ای از رویکرد به کار گرفته‌شده در این پژوهش در شکل ۲-۱۱

[52]Zhou
[53]Liquefied Natural Gas

نمایش داده شده است. در انتها نتایج حاصل از انجام یک مطالعه‌ی موردی نشان داد که استفاده از این رویکرد در بهینه‌سازی زمان انجام پروژه، تخصیص صحیح و دقیق‌تر منابع و بهبود ارتباط میان بخش‌های مختلف کارگاه بسیار مؤثر است [۴۹].

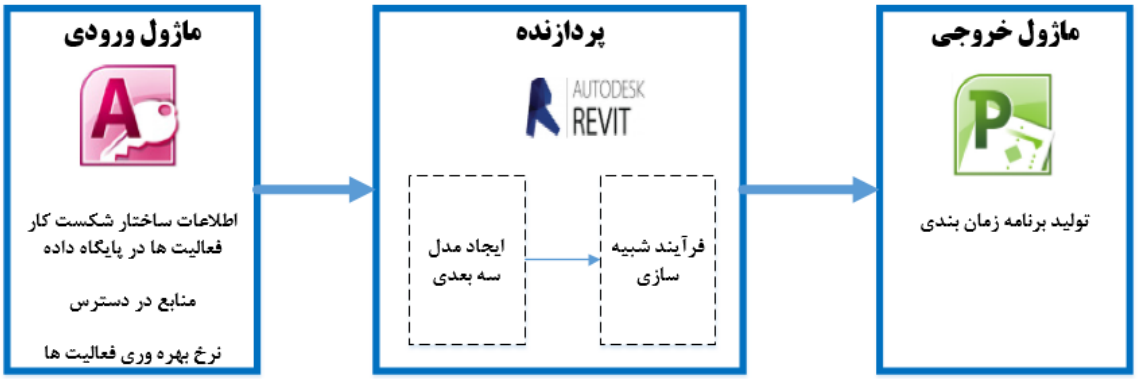


شکل ۲-۱۱- چارچوب اجرای مدل چهاربعدی در یک پروژه‌ی LNG در پژوهش ژو و همکاران [۴۹]

الحسین[۵۴] و همکاران چارچوبی مبتنی بر BIM جهت خودکارسازی فرآیند حل مسئله‌ی RCPSP ارائه کردند. این چارچوب از اطلاعات غنی موجود در مدل اطلاعات ساختمان و شبیه‌سازی گسسته رویدادها[۵۵] (DES) بهره می‌برد تا عملیات ساخت را به‌خوبی تجسم کرده و تخصیص منابع میان فعالیت‌ها را بررسی می‌کند. مدل‌سازی ساختمان در نرم‌افزار Revit، ثبت اطلاعات مربوط به ساختار شکست فعالیت‌ها در پایگاه داده و فرآیند شبیه‌سازی در Simphony. Net صورت گرفته و درنهایت یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی نیز در این چارچوب پیاده‌سازی می‌شود تا خودکارسازی فرآیند زمان‌بندی عملیات ساخت انجام شود که در شکل ۲-۱۲ نمایش داده شده است. به‌منظور ارزیابی این چارچوب، یک مطالعه‌ی موردی بر

[54] Al-Hussein
[55] Discrete Event Simulation

روی یک ساختمان دوطبقه با سیستم پانل[۵۶] انجام شد. نتایج نشان داد که این چارچوب به‌خوبی می‌تواند ارتباط میان مدل BIM، ذینفعان و مدیران پروژه را آسان‌تر کرده و خطای انسانی در زمان‌بندی پروژه را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد [۵۰].

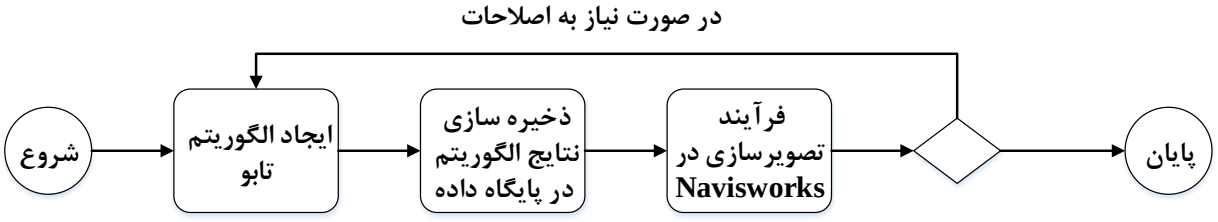


شکل ۲-۱۲- چارچوب استفاده از BIM و شبیه‌سازی در پژوهش الحسین و همکاران [۵۰]

مینکو[۵۷] و همکاران سیستمی را ایجاد نمودند که به‌طور خودکار و با استفاده از نرم‌افزارهای مدیریت پروژه، برنامه‌ی زمان‌بندی ساخت را به‌روزرسانی کرده و اطلاعات حیاتی و مهم آن را در اختیار مدیران پروژه قرار می‌دهد. این سیستم مبتنی بر داده‌های ابر - نقطه‌ای سه‌بعدی[۵۸] استخراج‌شده از مدل اطلاعاتی ساختمان و نیز یک مدل چهاربعدی است که بر مبنای برنامه‌ی زمان‌بندی مقدماتی که به روش مسیر بحرانی تهیه شده، بنا گشته است. یک مطالعه‌ی موردی جهت اعتبارسنجی این سیستم بر روی ساختمان مسکونی شش طبقه در کره جنوبی صورت گرفت و نتایج نشان داد که استفاده از مدل BIM به خودکارسازی به‌روزرسانی برنامه‌ی زمان‌بندی کمک کرده و روند آن با اطمینان و سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد [۵۱].

[56] panelized LGS construction
[57] Min-Koo
[58] point clouds

روزاریوس[۵۹] و همکاران با استفاده از مدل‌سازی چهاربعدی و الگوریتم جست‌وجوی تابو[۶۰]، زمان‌بندی ساخت پروژه‌های عمرانی را بهبود بخشیدند. در این پژوهش، ابتدا اطلاعات پروژه از مدل BIM استخراج شده و سپس یک برنامه‌ی زمانی کلی اولیه به روش مسیر بحرانی تولید می‌شود. بعدازآن نوبت به تنظیم پارامترهای اولیه‌ی الگوریتم تابو و بهینه‌سازی زمان‌بندی تهیه‌شده در مرحله قبل با در نظر گرفتن چندین تابع هدف شامل زمان، هزینه و منبع، می‌رسد. درنهایت مدل چهاربعدی با استفاده از فرآیند تصویرسازی ایجادشده و برنامه زمان‌بندی بهینه‌شده در مرحله قبل بر این اساس که تناقضی با مدل چهار به هدی نداشته باشد، به‌روزرسانی می‌گردد. مراحل این چارچوب در شکل ۲-۱۳ نمایش داده شده است. به‌منظور ارزیابی چارچوب ارائه‌شده یک مطالعه موردی بر روی ساختمان مسکونی یک طبقه صورت گرفته است. نتایج این بررسی کاهش هزینه، زمان و نوسان منابع به ترتیب به میزان چهار، سیزده و چهل‌ونه درصد را نشان داد [۵۲].



شکل ۲-۱۳- چارچوب استفاده از مدل‌سازی چهاربعدی و الگوریتم جست‌وجوی تابو در پژوهش روزاریوس و همکاران [۵۲]

اسکالتمن[۶۱] و همکاران اقدام به طراحی یک سیستم ترکیبی نمودند که از حسگر سخت‌افزاری برای کسب اطلاعات مدل ساختمان، فرآیند بازسازی سه‌بعدی، تشخیص اجسام و المان‌ها و حل مسئله‌ی MRCPSP استفاده می‌کند. سیستم‌های تلفن همراه این قابلیت را به برنامه ریزان، کارشناسان و مدیران پروژه می‌دهد تا بررسی دقیق‌تری از اطلاعات ساختمان داشته باشند و آن‌ها را به‌صورت سیستماتیک، آنالیز

[59] Rosarius
[60] Tabu-search Algorithm
[61] Schultmann

و ذخیره کنند. بدین منظور، حسگر موردنظر با استفاده از نقاط ابری و الگوریتم‌های توسعه‌یافته، اطلاعات پروژه را برای شناسایی المان‌های ساخت، تجزیه و تحلیل می‌نماید و از طریق این اطلاعات یک مدل سه‌بعدی ایجاد می‌گردد. درنهایت نیز یک برنامه‌ی زمان‌بندی بهینه‌شده تحت منابع محدود چندحالته تولید می‌شود. نتایج انجام یک مطالعه‌ی موردی در یک ساختمان تجاری نشان داد که سیستم ارائه‌شده قادر است جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز جهت بازسازی مجدد ساختمان را به‌خوبی انجام دهد و برنامه‌ریزی پروژه بر اساس روش انتخابی را به‌خوبی اجرا نماید [۵۳].

چن[۶۲] و همکاران چارچوبی مبتنی بر BIM و سیستم‌های مدیریت نگهداری[۶۳] (FMSs)، برای مدیریت تعمیر و نگهداری تأسیسات پروژه‌های ساختمانی ارائه دادند. این چارچوب می‌تواند به‌صورت خودکار، زمان‌بندی فعالیت‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری را به روش مسیر بحرانی انجام دهد تا امکان تصمیم‌گیری مناسبی برای مدیران پروژه در قسمت نگهداری و تعمیر تأسیسات فراهم نماید. اطلاعات بین BIM و FMSs به‌وسیله‌ی فرمت IFC، میان مدل سه‌بعدی و سیستم‌های مدیریت نگهداری به‌صورت یکپارچه انتقال می‌یابد. سپس اطلاعات مرتبط با فعالیت‌های تعمیر و نگهداری در مدل BIM با استفاده از API تصویرسازی می‌شود تا بدین‌وسیله اِلمان‌هایی که نیاز به تعمیر دارند، شناسایی شوند. سپس اطلاعات هندسی این اِلمان‌ها از مدل، استخراج شده تا رویکرد مناسب برای تعمیر و نگهداری آن‌ها انتخاب شود. درنهایت فرآیند زمان‌بندی خودکار فعالیت‌ها به‌وسیله‌ی الگوریتم اولین مسیر کوتاه دایجکسترا[۶۴] که چهار عامل نام المان، نوع خرابی ایجادشده، سطح آسیب و جایگاه المان در سازه را در نظر می‌گیرد، ایجاد شود. انجام دو مطالعه‌ی موردی به‌منظور ارزیابی چارچوب موردنظر نشان داد که توسعه‌ی فرمت IFC در این

[62] Chen
[63] facility management systems
[64] Dijkstra's Shortest Path First algorithm

پژوهش، یکپارچگی انتقال داده‌ها میان مدل BIM و سیستم‌های مدیریت نگهداری ساختمان را بیشتر کرده و انجام فعالیت‌های تعمیر و نگهداری با دقت و سرعت بیشتری، صورت می‌گیرد [۵۴].

لین[۶۵] و همکاران رویکردی یکپارچه جهت سهولت در انتقال اطلاعات از مدل سه‌بعدی به مدل RCPSP ارائه کردند. در این رویکرد ابتدا اطلاعات موردنیاز جهت حل مسئله‌ی RCPSP، از مدل BIM، به‌صورت بسته‌های اطلاعاتی مربوط به فعالیت‌ها[۶۶] و به‌طور خودکار استخراج می‌شود. این داده‌ها که به‌صورت چند منبعی[۶۷] هستند، با هم ادغام شده و سپس به مدل ریاضی RCPSP منتقل می‌شوند. یک مطالعه‌ی موردی جهت نشان دادن کارایی این چارچوب بر روی یک پروژه مسکونی انجام گرفت و نتایج حاصل از آن نشان داد که زمان استخراج داده از مدل سه‌بعدی و انتقال آن‌ها به مدل ریاضی RCPSP، یک‌هفتم زمان لازم برای انجام همان پروژه به‌صورت غیر خودکار بوده و استفاده از این چارچوب، دقت و سرعت حل مسئله را در مدل‌های جامع‌تر مسئله‌ی RCPSP بالاتر می‌برد [۵۵].

۲-۶-۲- پژوهش‌های داخلی

غمخوار در پژوهش خود به بررسی به‌کارگیری BIM جهت کاهش زمان و هزینه‌ی ترمیم و بهسازی سازه‌ها پرداخت. در این مطالعه، ضمن معرفی فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و نرم‌افزارهای مربوطه، نقش آن در ارتقای کیفیت و سرعت‌ترمیم، تقویت و بهسازی ساختمان‌ها از طریق حذف مرحله‌ی گردآوری اطلاعات در مورد ساختمان و شناسایی و قضاوت اولیه که منجر به کاهش زمان و هزینه‌ی عملیات ترمیم و تقویت و یا بهسازی می‌شود، مورد بررسی قرارگرفته است و تأثیرات استفاده از این فناوری در اتخاذ تصمیمات بهینه برای ترمیم و تقویت ساختمان‌ها در هنگام بحران، مورد مطالعه قرارگرفته است. در انتها نیز به مطالعه و بررسی یک نمونه‌ی موردی از ساختمان‌های شهری که برای ترمیم و تقویت آن، از فناوری مدل‌سازی

[65] Jia-Rui Lin
[66] work package-based information model
[67] multisource data

اطلاعات ساختمان استفاده شده، پرداخته شده است. برای مهیا کردن این مدل اطلاعاتی و ساخت مدل سه‌بعدی اولیه از ساختمان موجود، از تکنیک لیزر اسکن و نقاط ابری استفاده شد. سپس مدل سه‌بعدی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار تری دی مکس ایجاد گشته و برای ادامه‌ی مراحل مدل‌سازی اطلاعاتی، فایل‌های مدل سه‌بعدی به نرم‌افزار Revit فرستاده شدند. سپس با استفاده از فناوری BIM مدل سازه و تأسیسات این ساختمان نیز ایجاد شد و به مدل معماری سه‌بعدی اضافه گردید. بدین ترتیب مدل اطلاعاتی یکپارچه‌ای از ساختمان مورد مطالعه به وجود آمد که امکان اتخاذ تصمیم‌های صحیح مدیریتی، معماری، سازه‌ای، تأسیساتی و مالی را برای پروژه‌ی بازسازی ساختمان فراهم می‌آورد [۵۶].

قاسم و عباسیان جهرمی ضمن اشاره به معایب زمان‌بندی پروژه به روش قدیمی و نیز معرفی فناوری BIM، چارچوبی برای زمان‌بندی مبتنی بر این فناوری ارائه کردند. در این پژوهش ابتدا اطلاعات اجزا و فعالیت‌های پروژه از مدل سه‌بعدی ساختمان استخراج می‌گردد. سپس لیست WBS و روابط میان فعالیت‌ها تعریف شده و هماهنگی میان WBS و اطلاعات استخراج شده از مدل BIM انجام می‌پذیرد. درنهایت برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه به روش مسیر بحرانی با استفاده از نرم‌افزارهایی همچون MS Project تدوین می‌گردد. نتایج نشان داد که بهره‌گیری از BIM در موضوع زمان‌بندی پروژه، باعث افزایش بهره‌وری گروه اجرایی، کاهش اتلاف زمان و هزینه در پروژه و افزایش سرعت و دقت در اجرا می‌گردد [۵۷].

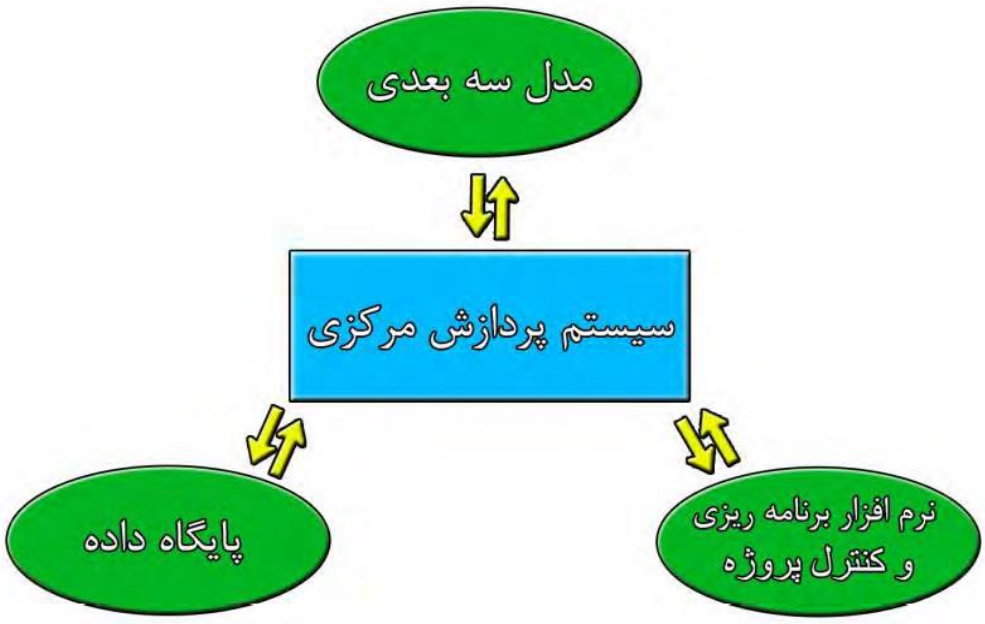
ربیعی و حیدری به بررسی اثر استفاده از BIM در کاهش زمان ساخت پروژه‌ها بر اساس حجم کار در ایران پرداختند. آن‌ها با بهره‌گیری از تکنیک‌های مختلف گردآوری داده، مانند روش کتابخانه‌ای و روش میدانی (ابزار پرسشنامه اینترنتی) این موضوع را بررسی کردند. برای این منظور با استفاده از Google Docs، پرسشنامه‌ای شامل اطلاعات عمومی و فنی درباره BIM طراحی شد که بخشی از آن توسط کل جامعه‌ی پژوهش و بخش دیگر آن فقط توسط مخاطبانی از جامعه‌ی پژوهش که در زمینه‌ی BIM تخصص داشتند، پاسخ داده شد. پرسشنامه از طریق درج لینک آن در سایت‌های اینترنتی، گروه‌ها و کانال‌های

تخصصی BIM در فضای مجازی، با پاسخ‌دهندگان به اشتراک گذاشته شد. پس از وصول پاسخ‌ها و تجزیه و تحلیل اطلاعات، نتایج نشان داد که با پیاده‌سازی BIM در ساختمان‌های تحت بررسی، متناسب با افزایش حجم کار، زمان ساخت آن‌ها به ترتیب، به میزان ۶ تا ۱۳/۷۵ درصد کاهش خواهد یافت [۱۱].

هادوی و توکلان چارچوبی برای مدل‌سازی چهاربعدی اطلاعات ساختمان با استفاده از DES را ارائه کردند. مسئله‌ی زمان‌بندی این پژوهش از نوع اولیه و کلی بوده و با استفاده از روش مسیر بحرانی انجام می‌شود. بهره‌مندی از این مدل، نیازمند مدیریت سه بخش اصلی است؛ مدیریت اطلاعات اولیه، مدیریت متغیرها و مدیریت نتایج. در بخش مدیریت اطلاعات اولیه اِلمان‌بندی ساختمان، انجام شده و فعالیت‌های استاندارد موردنیاز، به‌صورت پایگاه داده‌ی فهرست‌بها یا تعریف دستی، وارد مدل می‌شود. بخش مدیریت متغیرها بر روی شرایط خاص پروژه متمرکز است. در این بخش کاربر با واردکردن متره پروژه، تعریف روابط منطقی بین فعالیت‌ها، تعریف منابع موردنیاز هر فعالیت برای شروع آن و تعریف متغیرهای شبیه‌سازی ساخت، شرایط خاص پروژه را در برنامه‌ریزی موردتوجه قرار می‌دهد. در این پژوهش برای زمان‌بندی پروژه از شبیه‌سازی مقید استفاده شده است. در این روش، ابتدا محدودیت‌هایی برای شروع هر فعالیت تعریف شده، سپس فعالیت‌ها برحسب اولویت بالاتر انتخاب شده و در بهترین زمان ممکن که تمام محدودیت‌ها را ارضا کند، آغاز می‌شوند. با بررسی شرایط پیش‌بینی‌شده در آینده و تغییر پارامترهای مدیریتی تعریف‌شده، کاربر می‌تواند برنامه‌ریزی مناسبی برای ادامه‌ی کار تهیه کند. قالب استفاده‌شده در این پژوهش، به‌منظور دریافت اطلاعات، پردازش و نمایش خروجی‌ها، نرم‌افزار اِکسل است. اطلاعات اولیه در فرم‌هایی استاندارد و از پیش تعریف‌شده وارد نرم‌افزار اِکسل شده و به کمک کد نویسی در قالب ویژوال‌بیسیک پردازش می‌شود. با بهره‌مندی از چارچوب پیشنهادی، می‌توان برنامه‌ریزی مناسبی برای پروژه تهیه کرد و سپس نتایج مربوط به زمان، هزینه، منابع و مصالح را در سطح اِلمان‌های سازه به‌عنوان خروجی دریافت نمود [۵۸].

هادوی و خانزادی به بررسی تأثیر تداخل فضاهای کاری در فعالیت‌های اجرایی پروژه‌های عمرانی و ارائه‌ی راهکارهای قابل انجام برای رفع آن‌ها پرداختند. تحلیل و بررسی و همچنین رفع مشکلات ذکرشده به کمک مدل چهاربعدی اطلاعات ساختمان که همان تلفیق مدل سه‌بعدی با زمان‌بندی است، صورت می‌گیرد. پس از ارائه‌ی معیارهای مربوط به تفکیک فضاهای کاری، برنامه‌ریزی برای رفع مشکل کمبود فضا در چهار مرحله صورت می‌گیرد. در پایان با برنامه‌ریزی مجدد برای فعالیت‌های در نظر گرفته‌شده، برای اطمینان از درستی روند طی شده برای رفع مشکلات، روند ارائه‌شده مجدداً تکرار می‌شود. مدل چهاربعدی اطلاعات ساختمان این امکان را می‌دهد که با بررسی قسمت‌های مختلف پروژه، بازدهی انجام کار با رفع کمبود فضای کاری افزایش یابد [۵۹].

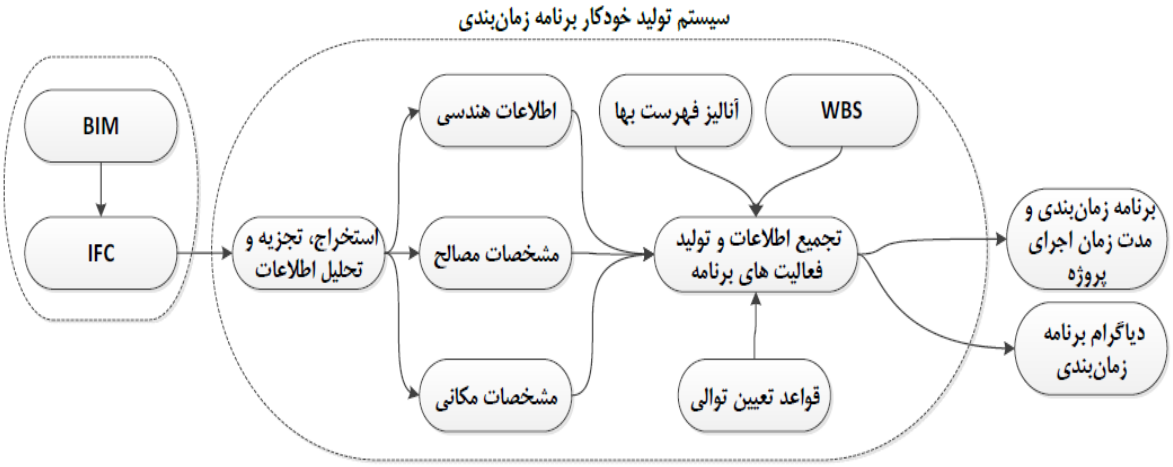
رضازاده و همکاران یک سیستم هوشمند خودکار و یکپارچه‌ی کنترل پروژه پیشنهاد دادند که با توجه به استفاده از مدل سه‌بعدی، تصویرسازی و نیز یکپارچه‌سازی اطلاعات، کمک مؤثری در بهبود درک مدیران پروژه از وضعیت پیشرفت و شرایط کلی پروژه نموده و فرآیند تصمیم‌گیری را سریع‌تر و مؤثرتر می‌نماید. این سیستم به نحوه جمع‌آوری اطلاعات چون - ساخت پروژه وابسته نمی‌باشد و این اطلاعات می‌توانند از هر منبعی دریافت شوند. اجزای مختلف چارچوب پیشنهادی و نیز نرم‌افزارهای مورداستفاده برای پیاده‌سازی آن در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از چارچوب پیشنهادی، نحوه‌ی تعامل با مدل سه‌بعدی آسان‌تر می‌شود و امکانات موجود در آن باعث سادگی کار با برنامه‌ی زمان‌بندی‌شده و نیاز به کار کردن همزمان با دو نرم‌افزار برای ورود اطلاعات و گزارش‌گیری از اطلاعات را بر طرف می‌کند [۶۰].



شکل ۲-۱۴- چارچوب ارتباط میان مدل سه‌بعدی، زمان‌بندی و پایگاه داده در پژوهش رضازاده و همکاران [۶۰]

روانشادنیا و گل نهالی مدلی را برای تولید خودکار برنامه‌ی زمان‌بندی به روش مسیر بحرانی با استفاده از BIM ایجاد نمودند. در این پژوهش، سیستم پیشنهادی، مدل اطلاعاتی ساختمان را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و با استفاده از قواعد توالی ساخت، فعالیت‌های اجرایی را تولید می‌کند. مدت زمان هر فعالیت با استفاده از نرخ تولید فعالیت ارائه‌شده در گزارش تجزیه بهای سازمان برنامه و بودجه، توسط سیستم محاسبه شده و درنهایت این سیستم با استفاده از روش مسیر بحرانی برنامه‌ی زمان‌بندی را ارائه می‌دهد. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به کار گرفته‌شده در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Revit برای یک ساختمان سه‌طبقه‌ی بتنی انجام شده است. شکل ۲-۱۵ چارچوب این پژوهش را نشان می‌دهد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده از سیستم یادشده باعث افزایش سرعت و دقت در فرآیند زمان‌بندی پروژه می گردد

[۶۱].



شکل ۲- ۱۵- ساختار کلی تولید خودکار برنامه‌ی زمان‌بندی با استفاده از فناوری BIM در پژوهش گل‌نهالی و روانشادنیا [۶۱]

۲-۷- جمع‌بندی

در این فصل به مباحثی ازجمله جایگاه زمان‌بندی پروژه در استاندارد PMBOK، تفاوت RCPSP با مسئله‌ی زمان‌بندی کلی، بیان ریاضی مسئله‌ی MRCPSP، کاربردها، مزایا و ابزارهای فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و نیز ارتباط آن با زمان‌بندی اشاره شد. در ادامه به مرور پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون ارتباط میان زمان‌بندی پروژه و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان پرداخته شد که بیشتر آن‌ها پیرامون خودکارسازی زمان‌بندی با استفاده از BIM، ایجاد مدل چهاربعدی و شبیه‌سازی فرآیند ساخت، در نظر گرفتن محدودیت منابع در زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی مبتنی بر فناوری BIM و تأثیر استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در زمان‌بندی فعالیت‌های مربوط به تعمیر و نگهداری ساختمان‌ها و تخریب و بهسازی آن‌ها بود. ازجمله کاستی‌ها و نواقص مقالات پیشین که می‌تواند زمینه‌ی کارهای پژوهشی باشد می‌توان به عدم توجه به بصری سازی فرآیند ساخت، یکپارچه نبودن فرآیندهای مدل‌سازی سه‌بعدی، برآورد مقادیر و زمان‌بندی، عدم توجه به مسائل مربوط به محدودیت منابع شامل چند پروژه‌ای، چندحالته و ... و

وجود انقطاع (گسیختگی) در فعالیت‌ها در زمان‌بندی مبتنی بر BIM، اشاره نمود. در میان پژوهش‌های بررسی‌شده، پژوهش الحسین و همکاران بیشترین قرابت را به موضوع پژوهش حاضر دارد. خلاصه این پژوهش‌ها در جدول ۲-۲ بیان شده است. بررسی مقالات و پژوهش‌های مربوط به حوزه‌ی BIM و زمان‌بندی نشان می‌دهد که استفاده از فناوری BIM در حل مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چند حالته مورد توجه قرار نگرفته است؛ لذا در پژوهش حاضر تلاش بر این است که این نقیصه پوشش داده شود.

جدول ۲-۲- خلاصه پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون BIM و زمان‌بندی

جیانگ	پیشرفت‌ها و تحولات در زمینه برآورد هزینه و زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی با استفاده از فناوری BIM
سون و همکاران	مقایسه نقشه‌های As-Design و As-Built جهت زمان‌بندی صحیح پروژه‌های ساختمانی با استفاده از مدل BIM
اندرسون و همکاران	تهیه برنامه زمان‌بندی پروژه از طریق استخراج خودکار داده‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان
وانگ و همکاران	یکپارچه‌سازی مدل‌های اطلاعات ساختمان با شبیه‌سازی فرآیند ساخت جهت بهبود فرآیند زمان‌بندی پروژه
ژو و همکاران	کاربرد مدل‌سازی چهاربعدی در زمان‌بندی ساخت نیروگاه‌های گاز طبیعی
الحسین و همکاران	ارائه یک رویکرد یکپارچه مبتنی بر BIM جهت زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع
چو و همکاران	به‌روزرسانی خودکار برنامه زمان‌بندی پروژه با استفاده از مدل چهاربعدی
روزاریوس و همکاران	استفاده از الگوریتم جستجوی تابو و مدل‌سازی چهاربعدی جهت بهبود زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی
اسکالتمن و همکاران	زمان‌بندی فعالیت‌های مربوط به تخریب ساختمان‌های موجود با استفاده از استخراج خودکار داده‌ها از مدل BIM
چن و همکاران	ارائه چارچوبی مبتنی بر BIM جهت زمان‌بندی فعالیت‌های مربوط به تعمیر و نگهداری ساختمان
لین و همکاران	مدل‌سازی اطلاعات ساختمان مبتنی داده‌های چند منبعی کار برای زمان‌بندی پروژه‌های با منابع محدود
مهسا غمخوار	به‌کارگیری BIM جهت کاهش زمان و هزینه ترمیم و بهسازی سازه‌ها
قاسم و عباسیان جهرمی	مزایای استفاده از BIM در زمان‌بندی پروژه‌ها
ربیعی و حیدری	اثرات استفاده از فناوری BIM در کاهش زمان ساخت پروژه بر اساس حجم کار
هادوی و توکلان	مدل‌سازی چهاربعدی مبتنی بر شبیه‌سازی فرآیند ساخت
خانزادی و هادوی	تدوین برنامه زمان‌بندی با توجه به محدودیت و تداخل فضاهای کاری در کارگاه‌ها بر مبنای فناوری BIM
رضازاده و همکاران	ارتباط میان مدل سه‌بعدی، زمان‌بندی و پایگاه داده
روانشاد نیا و گل نهالی	ارائه چارچوبی مبتنی بر BIM جهت خودکارسازی زمان‌بندی پروژه‌های ساختمانی

فصل سوم

روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- مقدمه

در فصل دوم، به‌طور کامل به پژوهش‌ها و مقالات حوزه‌ی زمان‌بندی و BIM و نیز خودکارسازی این فرآیند اشاره شد و کاربرد فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساختمان در زمان‌بندی موضوعاتی همچون مدیریت نگهداری، ترمیم و بهسازی و نیز فرآیند تخریب ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با مطالبی که در بخش جمع‌بندی فصل قبل بیان گردید، یکی از کاستی‌ها و کمبودهای پژوهش‌های گذشته پیرامون BIM و زمان‌بندی، عدم توجه به محدودیت منابع است. پژوهش حاضر ضمن پوشش این موضوع، راهکاری یکپارچه جهت حل مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع چندحالته با استفاده از فناوری BIM را ارائه می‌دهد. همچنین در این فصل، ضمن بیان انواع مختلف پژوهش و روش‌های گردآوری اطلاعات، روش مورداستفاده در این پژوهش و توضیحات مربوط به آن، به همراه ابزار مورداستفاده و علت به‌کارگیری آن‌ها نیز شرح داده می‌شود.

۳-۲- انواع پژوهش

به‌طور کل، پژوهش‌ها بر اساس دو معیار هدف و نیاز پژوهش به فرضیات، طبقه‌بندی می‌شوند که به شرح زیر می‌باشد:

- **انواع پژوهش بر اساس هدف**

۱- بنیادی: در این نوع پژوهش، محقق نظریات موجود در زمینه‌ای خاص را بررسی کرده و رابطه‌ی بین پدیده‌ها را بیان می‌نماید. هدف اصلی این نوع پژوهش، کشف قوانین و اصول علمی و توسعه دادن مجموعه‌ی علوم موجود است و به کاربرد عملی یافته‌ها توجهی ندارد [۶۲].

۲- کاربردی: این نوع تحقیق با هدف توسعه‌ی علوم کاربردی و حل مشکلات اجتماعی انجام می‌گیرد که عملکردهای مشخصی در ارتباط با زندگی بشریت دارد. این نوع پژوهش، شیوه جدیدی را به وجود می‌آورد که در جهت زندگی بهتر و به‌صورت مشخص و ویژه در جامعه، مورداستفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که تحقیقات کاربردی متکی بر پژوهش‌های بنیادی هستند [۶۲].

۳- توسعه‌ای: این نوع تحقیق، کاوشی است که بر مبنای پژوهش‌های بنیادین و کاربردی بوده و به‌منظور تولید، توسعه و یا اصلاح فرآیندها و روش‌ها صورت می‌گیرد؛ بنابراین، هرگونه پژوهش حول موضوعاتی که بتواند به گسترش این علوم کمک کند، در دسته‌ی پژوهش‌های توسعه‌ای قرار می‌گیرد [۶۲].

- **انواع پژوهش بر اساس نیاز به فرضیات**

۱- اکتشافی: این تحقیقات، حول وجود یا عدم وجود یک پدیده تمرکز می‌نمایند. در این نوع از پژوهش‌ها، تلاش بر این است که برای موضوعات و مشکلاتی که واضح و روشن نیستند، پاسخی حاصل شود. تحقیقات اکتشافی به جهت این‌که در بسیاری از زمینه‌ها قابلیت انجام دارند، ازجمله گسترده‌ترین و انعطاف‌پذیرترین روش‌های تحقیق می‌باشند [۶۳].

۲- توصیفی: این نوع پژوهش به توصیف و تشریح شرایط و روابط موجود می‌پردازد. به‌عبارت‌دیگر تحقیق توصیفی با آزمایش یک پدیده، تعریفی متفاوت از آن را با سایر پدیده‌ها بیان می‌کند. هدف اصلی این نوع پژوهش، توصیف واقعی خصوصیات یک موضوع مشخص است [۶۳].

۳- آزمایشی: تحقیق آزمایشی، به‌منظور برقراری روابط علت و معلولی بین دو یا چند متغیر به کار می‌رود. هدف از آزمایش، آزمودن یک فرضیه و یافتن یک تبیین تجربی از یک پدیده با مکانیزم علت و معلولی می‌باشد [۶۳].

ازآنجایی‌که هدف پژوهش حاضر، ایجاد یک رویکرد و فرآیند یکپارچه مبتنی بر مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، جهت حل مسئله‌ی MRCPSP می‌باشد، لذا نوع این پژوهش کاربردی است.

۳-۳- روش‌های گردآوری اطلاعات

یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر پژوهش، جمع‌آوری اطلاعات مربوطه است. درصورتی‌که این کار به‌طور منظم و صحیح صورت پذیرد، روند تجزیه، تحلیل و نتیجه‌گیری از داده‌ها با سرعت بیشتری انجام خواهد شد. به‌طورکلی روش‌های جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات به دو دسته‌ی میدانی و کتابخانه‌ای تقسیم می‌شوند که به شرح زیر است:

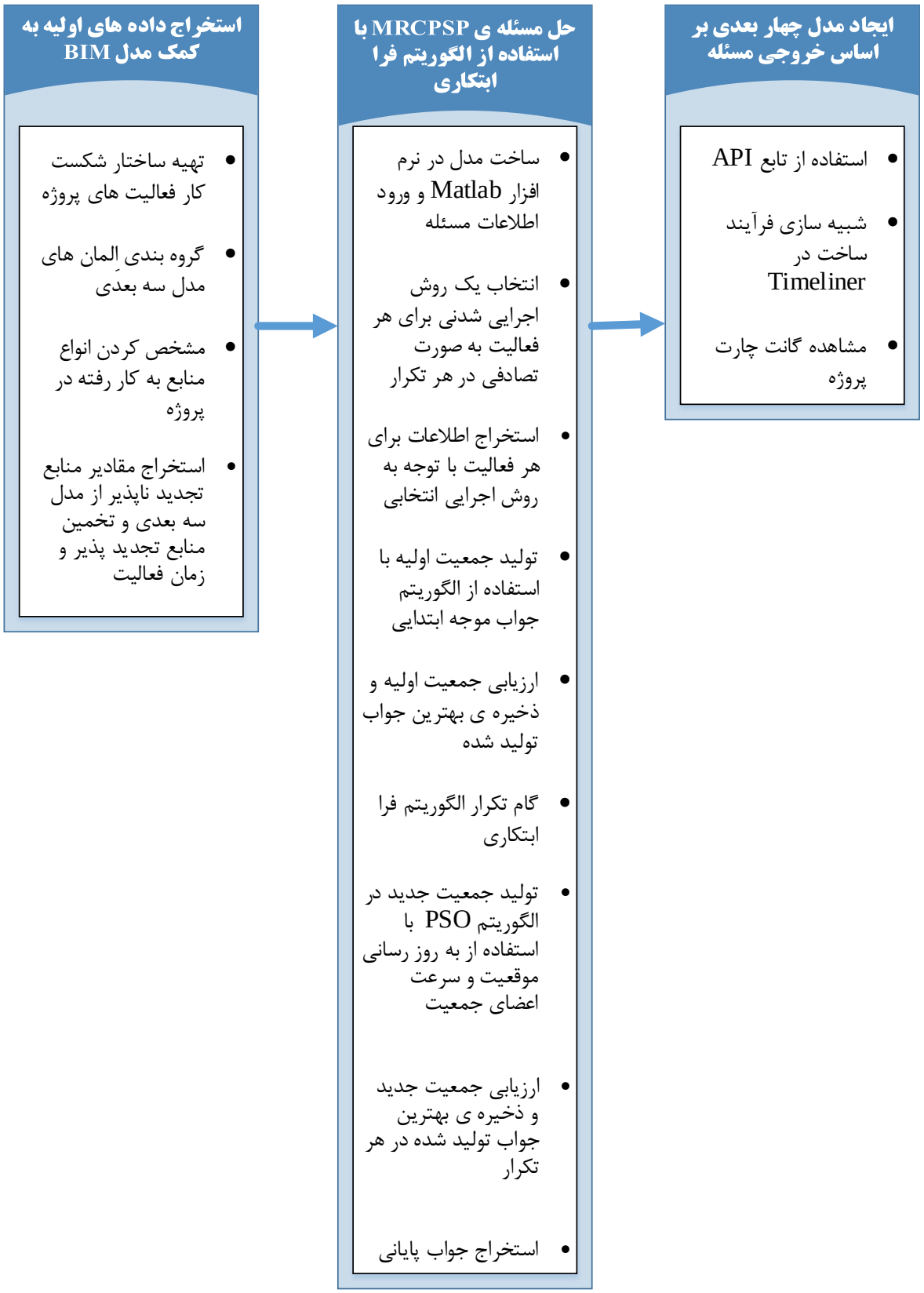
- مطالعات کتابخانه‌ای: در برخی از پژوهش‌ها، داده‌هایی که باید مورد بررسی قرار گیرند از پیش آماده هستند. به بیان دیگر محقق به دنبال اطلاعات جدید نیست؛ بلکه می‌تواند نسبت به گردآوری داده‌هایی که پیش از این تهیه‌شده‌اند و در پرونده‌ها و اسناد موجود است اقدام کند [۶۳].

- مطالعات میدانی: به مجموعه‌ی روش‌هایی گفته می‌شود که در اجرا و جمع‌آوری داده‌های تحقیقاتی که کارهای می‌دانی را شامل می‌شوند، استفاده می‌گردد. انجام مصاحبه، تهیه‌ی پرسشنامه، مشاهده، انجام آزمایشات و به‌طورکلی هر روشی که غیر از مطالعات کتابخانه‌ای باشد، در زمره‌ی روش‌های می‌دانی قرار می‌گیرد [۶۳].

در پژوهش حاضر، روش گردآوری اطلاعات، روش کتابخانه‌ای بوده و تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده نیز مبتنی بر مطالعات انجام‌شده، صورت خواهد گرفت.

۳-۴- روش کلی پژوهش

در این بخش تلاش بر این است تا مراحل اجرای پژوهش شرح داده شود. مطابق با فرآیند نشان داده‌شده در شکل ۳-۱، مراحل انجام پژوهش حاضر از این قرار می‌باشد: استخراج داده‌های اولیه موردنیاز برای حل مسئله‌ی MRCPSP به کمک BIM، حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری و در انتها ایجاد مدل چهاربعدی با استفاده از خروجی مسئله.



شکل ۳-۱- چارچوب کلی پژوهش

۳-۴-۱- استخراج داده‌های اولیه

مجموعه‌ی اطلاعات موردنیاز جهت حل مسئله‌ی MRCPSP، شامل تعداد فعالیت‌ها و لیست پیش‌نیازی آن‌ها، تعداد روش‌های اجرایی هر فعالیت، مدت زمان انجام هر روش اجرایی برای فعالیت، تعداد منابع تجدید پذیر و تجدید ناپذیر و مقدار نیازمندی هر روش اجرایی به آن‌ها جهت انجام فعالیت، حداکثر مقدار موجود هر منبع تجدید پذیر در هر دوره زمانی و حداکثر مقدار موجود هر منبع تجدید ناپذیر در کل پروژه، می‌باشد. روند کلی استخراج داده‌های اولیه به کمک مدل BIM، شامل مراحل زیر است:

مرحله‌ی ۱) تهیه ساختار شکست کار فعالیت‌های پروژه

تهیه‌ی ساختار شکست پروژه از بالاترین سطح تا سطح فعالیت‌های ساخت، نخستین مرحله برای مدل‌سازی چهاربعدی پروژه و استخراج اطلاعاتی شامل تعداد فعالیت‌ها، مشخص کردن روابط میان آن‌ها و درنتیجه لیست پیش‌نیازی فعالیت‌ها، است. درنتیجه، در فرم ساختار شکست کار، فعالیت‌های پروژه باید تا سطح موردنیاز پروژه برای دریافت خروجی‌ها، شکسته شود.

مرحله‌ی ۲) گروه‌بندی اِلمان‌های مدل سه‌بعدی

مدل‌سازی مبتنی بر BIM، نیازمند شکست بنا به سطحی قابل مدیریت از اِلمان‌ها است. شکست بنا، باید تا سطحی که نیازمند تهیه‌ی مدل‌سازی اطلاعات ساخت است، ادامه یابد. درنتیجه، تهیه‌ی ساختار شکست بنا و تبدیل آن به مجموعه‌ای از اِلمان‌ها، ازجمله مهم‌ترین گام‌های فرایند مدل‌سازی است. لیست نهایی تهیه‌شده برای اِلمان‌ها، باید تمام بخش‌های بنا را پوشش دهد. مطابق با توضیحات مرحله‌ی قبل، پس از مشخص شدن لیست فعالیت‌های پروژه در ساختار شکست کار، هر یک از آن‌ها جهت ایجاد مدل‌سازی چهاربعدی، با مجموعه‌ی مشخصی از اِلمان‌ها مرتبط می‌شود. درنتیجه، کاربر باید اِلمان‌ها را بنابر خروجی‌های دلخواه خود از مدل تعریف کند. در این پژوهش، با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار Navisworks

Manage ازجمله بصری سازی ساخت، مشاهده پیشرفت پروژه در فرآیند شبیه‌سازی، استخراج دقیق منابع تجدید ناپذیر و سایر مواردی که در فصل دوم بدان اشاره شد، جهت مدل‌سازی چهاربعدی از آن استفاده شده است.

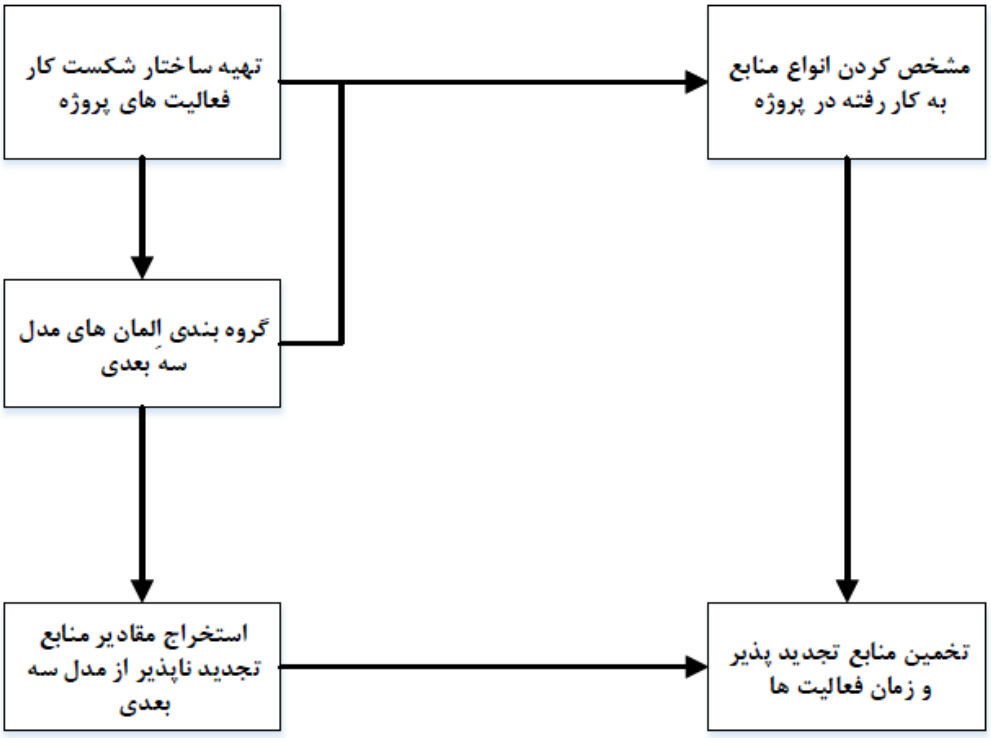
مرحله‌ی ۳) مشخص کردن انواع منابع به کار رفته در پروژه

در این مرحله، با استفاده از گروه‌بندی اِلمان‌های مدل سه‌بعدی و ساختار شکست کار فعالیت‌های پروژه (مراحل ۱و ۲)، منابع تجدید پذیر مانند ماشین‌آلات و نیروی انسانی مربوط به هر یک از فعالیت‌ها در دسته‌ای به نام R و نیز منابع تجدید ناپذیر موردنیاز نظیر بتن، مقاطع فلزی و آرماتورها در دسته‌ی N، برای هر مجموعه از اِلمان‌های مدل، تعریف می‌شوند.

مرحله‌ی ۴) استخراج مقادیر منابع تجدید ناپذیر از مدل سه‌بعدی، تخمین منابع تجدید پذیر و زمان فعالیت

بر اساس گروه‌بندی اِلمان‌های مدل سه‌بعدی (مرحله‌ی دوم)، مقادیر مربوط به انواع منابع تجدید ناپذیر به‌کاررفته در پروژه که در گام قبلی مشخص گردید، از مدل استخراج می‌شوند. این فرآیند در ابزار Quantification در نرم‌افزار Navisworks Manage انجام می‌گیرد. این ابزار، دقت در فرآیند برآورد مقادیر را بالا می‌برد و با انتقال تمامی مجموعه اِلمان‌های مشخص‌شده در مرحله‌ی دوم به آن، می‌توان جدول مقادیر انواع منابع تجدید ناپذیر به‌کاررفته در پروژه را در قالب یک پایگاه داده، ذخیره نمود. سپس نیازمندی هر یک از فعالیت‌ها به منابع تجدید پذیر و زمان‌های مربوط به یک روش اجرایی، متناسب با مقادیر به‌دست‌آمده، تخمین‌زده می‌شوند. لازم به ذکر است که تغییر میزان نیازمندی به منابع تجدید پذیر برای سایر روش‌های اجرایی فعالیت‌ها، باید به‌گونه‌ای باشد که درنهایت، از حداکثر مقادیر موجود در طول

پروژه تجاوز نکند. در شکل ۳-۲، روند کلی استخراج داده‌های اولیه‌ی موردنیاز جهت حل مسئله‌ی MRCPSP بیان شده است.



شکل ۳-۲- روند استخراج داده‌های اولیه جهت حل مسئله‌ی MRCPSP به کمک مدل BIM

۳-۴-۲- حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری

همان‌طور که در فصل دوم پژوهش حاضر بیان شد، مسئله‌ی MRCPSP به روش‌های دقیق، ابتکاری، فرا ابتکاری و ابر ابتکاری قابل‌حل است و بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه‌ی مسائل MRCPSP که در فصل دوم بیان گردید، روش‌های دقیق شامل تعداد زیادی متغیر و محدودیت هستند و روش‌های ابتکاری نیز با وجود داشتن سرعت بیشتری نسبت به روش‌های دقیق، جواب نزدیک به جواب بهینه را در اختیار می‌گذارد و نقطه‌ی ضعف استفاده از این روش، فقدان وجود یک قاعده‌ی کلی برای مرتب کردن فعالیت‌هاست و مطلوبیت جواب حاصل از قواعد اولویت‌دهی مختلف، به شبکه‌ی فعالیت‌های پروژه بستگی دارد. همچنین مطابق با جدول ۲-۱، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی حل مسئله‌ی MRCPSP از الگوریتم‌های

فرا ابتکاری همچون BBO، GA، PSO و غیره برای بهینه‌سازی پاسخ‌های این مسئله استفاده نموده‌اند. پیش از توضیح روند الگوریتم حل مسئله‌ی MRCPSP پژوهش حاضر، الگوریتم مورداستفاده به‌طور کامل معرفی می‌گردد.

۳-۴-۲-۱- الگوریتم PSO

کندی[۶۸] و ابرهارت[۶۹] صاحبان اصلی ایده الگوریتم PSO هستند. این الگوریتم یکی از روش‌های هوش جمعی موفق در زمینه‌ی بهینه‌سازی پیوسته و گسسته بر مبنای تولید تصادفی جمعیت اولیه است که در سال ۱۹۹۵ با الهام از حرکت گروهی پرندگان و حرکت توده‌ای ماهی‌ها برای یافتن غذا ارائه گردید [۶۴].

۳-۴-۲-۱-۱- معرفی الگوریتم

در این الگوریتم، به یک نقطه در فضای جستجوی j بعدی، ذره گفته می‌شود. هر ذره‌ی 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 قرارگرفته است، محاسبه می‌نماید. هر ذره، یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود. جهت حرکت ذره، توسط بردار سرعت آن معین می‌شود. در الگوریتم PSO، تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگان آن‌ها است، بنابراین موقعیت دیگر توده‌ی ذرات روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد [۶۵].

اساس کار PSO بر این اصل استوار است که در هر تکرار زمانی، ذرات سرعت خود را مطابق معیارهای برازندگی تعدیل می‌کنند و هر ذره به طرف ذراتی با برازندگی بهتر در میان اعضای گروه حرکت می‌کند.

---

[68] Kennedy
[69] Eberhart

همچنین موقعیت جدید بعد j ام هر ذره با توجه به بردار سرعت فعلی، بهترین موقعیت یافت شده توسط آن ذره و بهترین موقعیت یافت شده در کل همسایگی خود، به‌روزرسانی می‌گردد [۶۶].

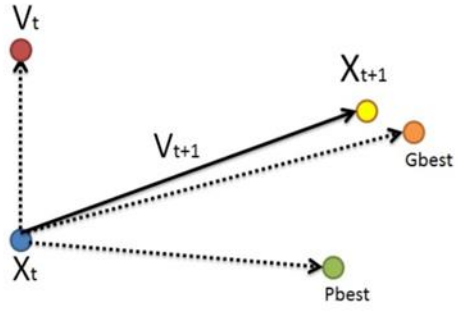
ازجمله نقاط قوت الگوریتم PSO عبارت‌اند از: کاربرد در مسائل پیوسته و گسسته، فهم آسان و پیاده‌سازی راحت الگوریتم. کمتر بودن پارامترهای تنظیم PSO نسبت به الگوریتم‌هایی همچون GA و BBO از دیگر نقاط قوت این الگوریتم به شمار می‌رود. هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب سعی می‌کند با تغییر بردار سرعت v_i طبق رابطه‌ی (۳-۱)، به سمت وضعیت جدیدی طبق رابطه‌ی (۳-۲) که از مجموع موقعیت گذشته و سرعت جدید حاصل شده است، حرکت کند [۶۷].

$$v_{ij}(t+1)=w*v_{ij}(t)+c_1*r_1*\left(p_{best،\,ij}(t)-x_{ij}(t)\right) \qquad (۳-۱)$$

$$+c_2*r_2*\left(g_{best،\,ij}(t)-x_{ij}(t)\right)$$

$$x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+v_{ij}(t+1) \qquad (۳-۲)$$

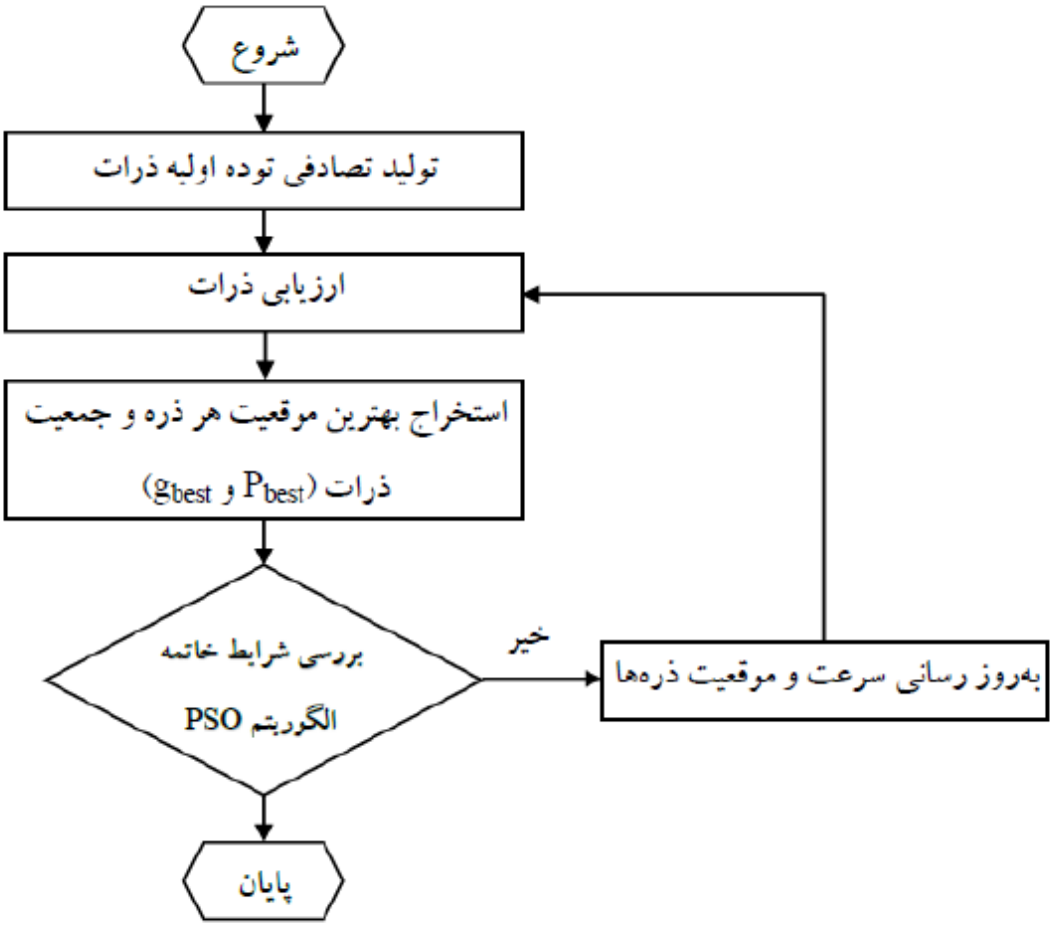
در روابط فوق، $x_{ij}(t)$ موقعیت کنونی بعد j ام هر ذره در تکرار t، $v_{ij}(t)$ سرعت کنونی بعد j ام هر ذره در تکرار t، $p_{best،\,ij}$ مختصات بهترین جوابی که ذره تا آن مرحله به دست آورده (جواب شخصی) و g_{best} بهترین جواب به‌دست‌آمده توسط کلیه‌ی ذرات موجود در فضای مسئله (جواب عمومی) است. r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت صفر و یک بوده که خاصیت تصادفی بودن الگوریتم را حفظ می‌کند. در شکل ۳-۳، موقعیت جدید دو ذره با توجه به p_{best} و g_{best} نشان داده شده است [۶۷].



شکل ۳-۳- نحوه تغییر موقعیت یک ذره در الگوریتم PSO با توجه به جواب شخصی و عمومی [۶۷]

۳-۴-۲-۱-۲- پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم PSO

- اندازه جمعیت (nPop): تعداد پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش این پارامتر، ممکن است کیفیت جواب بهبود یابد اما زمان حل مسئله افزایش پیدا می‌کند.
- تعداد نسل (MaxIt): تعداد تکرار برای تولید جمعیت را نشان می‌دهد. تغییر مقدار این پارامتر نیز ممکن است باعث بهبود پاسخ‌های حاصله شود اما در زمان حل مسئله تأثیر می‌گذارد.
- ضریب وزن اینرسی (w): این ضریب برای کنترل اثر سرعت مرحله‌ی قبل بر سرعت کنونی است که با توجه به مسئله‌ی موردنظر و به روش تجربی تعیین می‌گردد.
- ضریب ثابت یادگیری شخصی (c_1): ثابت شتاب یک ذره، به بهترین موقعیت خودش است. با افزایش این ضریب، جواب به‌دست‌آمده به بهترین جواب شخصی ذره، نزدیک‌تر می‌شود.
- ضریب ثابت یادگیری عمومی (c_2): ثابت شتاب یک ذره، بهترین موقعیت در بین کل ذرات است. ضرایب c_1 و c_2 با توجه به مسئله‌ی موردنظر به روش تجربی تعیین می‌شوند [۶۸]. شکل ۳-۴، روند کلی اجرای الگوریتم PSO را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۴- روند کلی اجرای الگوریتم PSO [۶۸]

در مرحله‌ی اول جمعیت اولیه‌ی ذرات به همراه موقعیت آن‌ها، در فضای جستجوی مسئله، به‌طور تصادفی و نیز مقداری تصادفی برای سرعت اولیه‌ی آن‌ها تعیین می‌گردد. برای جلوگیری از واگرا شدن بردار سرعت، تغییرات آن در محدوده $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ قرار دارد. تعداد جمعیت اولیه نیز با توجه به مسئله تعیین می‌گردد [۶۹].

در مرحله ارزیابی، باید هر یک از ذرات که نشان‌دهنده‌ی یک راه‌حل برای مسئله‌ی مورد بررسی است، ارزیابی شود. هر ذره حاوی اطلاعات کاملی از پارامترهای ورودی مسئله است که این اطلاعات درنهایت

استخراج شده و در تابع هدف قرار می‌گیرد. پس از مرحله‌ی ارزیابی ذرات، بهترین موقعیت برای هر ذره (p_{best}) و بهترین موقعیت در بین کل ذرات (g_{best}) در هر تکرار ثبت می‌گردند. در تکرار اول، موقعیت فعلی هر ذره به‌عنوان بهترین محل یافت شده برای آن ذره در نظر گرفته می‌شود، اما در سایر تکرارها مقدار تابع هدف برای هر ذره محاسبه شده و درصورتی‌که این مقدار، بهتر از مقدار ثبت‌شده برای این ذره در تکرار قبلی باشد، آنگاه محل این ذره جایگزین مقدار قبلی می‌گردد. درنهایت، سرعت و موقعیت ذرات با توجه به مقادیر p_{best} و g_{best} و مطابق با روابط (۳-۱) و (۳-۲) به‌روزرسانی می‌شوند [۶۹].

۳-۴-۲-۲- روند حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم PSO

مرحله‌ی ۱) ساخت مدل در نرم‌افزار Matlab و ورود اطلاعات مسئله

در این مرحله، اطلاعات مسئله وارد نرم‌افزار Matlab شده تا در هنگام اجرای الگوریتم PSO، فراخوانی گردد. این اطلاعات شامل تعداد فعالیت‌ها و لیست پیش‌نیازی آن‌ها، تعداد روش‌های اجرایی هر فعالیت، مدت زمان انجام هر روش اجرایی برای فعالیت، تعداد منابع و مقدار نیازمندی هر روش اجرایی به آن‌ها، حداکثر مقدار موجود هر منبع تجدید پذیر در هر دوره زمانی و حداکثر مقدار موجود هر منبع تجدید ناپذیر در کل پروژه، است.

مراحل ۲ و ۳) انتخاب یک روش اجرایی شدنی برای هر فعالیت به‌صورت تصادفی در هر تکرار و استخراج اطلاعات برای هر فعالیت با توجه به روش اجرایی انتخابی

در روش پیشنهادی به‌منظور حل مدل مسئله، هر جواب به‌صورت دو فهرست نشان داده می‌شود. فهرست اول، روش اجرایی فعالیت‌ها بوده و فهرست دوم، یک توالی ممکن برای انجام فعالیت‌ها است. ازآنجایی‌که مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه از نوع مسائل گسسته جایگشتی است، الگوریتم مورداستفاده جهت حل مسئله، بایستی با این فضای گسسته تطبیق داده شود؛ بنابراین در این پژوهش بدین‌صورت عمل می‌شود که با تغییر ساختار مسئله، ورودی الگوریتم پیوسته باشد؛ یعنی الگوریتم با مسئله به‌صورت پیوسته برخورد کند

اما خروجی آن، گسسته خواهد بود. استفاده از روش کلید تصادفی[۷۰] رویکردی در مواجهه با چنین شرایطی است. در این روش یک دسته اعداد حقیقی تصادفی بین صفر و یک، تولید و در لیستی به نام pop(i). Mode. Position ذخیره می‌شود. سپس به‌صورت تصادفی، یک روش اجرایی برای هر فعالیت با کمک گرفتن از اعداد تصادفی لیست مذکور و استفاده از رابطه‌ی (۳-۳) انتخاب می‌گردد. لیست Counter Mode(i) شماره روش اجرایی برای فعالیت i را نشان می‌دهد و نام روش اجرایی در لیست دیگری به نام NameMode قرار می‌گیرد [۷۰].

$$\text{Counter Mode}= \min([\text{nMode}(i)*\text{Mode. Position}(i)+1], \text{nMode}(i)) \quad (۳-۳)$$

ممکن است روش‌های اجرایی تخصیص داده‌شده به فعالیت‌ها درلیست ایجادشده به‌گونه‌ای باشد که میزان مصرف منابع تجدید ناپذیر در کل پروژه بیشتر از ظرفیت مجاز آن‌ها باشد که این موضوع امری نشدنی بوده و آن بخش از جمعیت که در اصل، زمان‌بندی را غیرعملی می‌سازند، باید در فرآیند انتخاب، جریمه[۷۱] شوند [۷۰].

در رویکردی که در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است، با استفاده از یک الگوریتم جستجوی محلی، می‌توان لیست حالات اجرایی را به‌گونه‌ای ایجاد کرد که در همان ابتدا روش اجرایی امکان ناپذیر ایجاد نشود. در این الگوریتم برای هر منبع تجدید ناپذیر، مقدار شاخص امکان‌پذیری (ERR) مطابق با رابطه‌ی (۳-۴) محاسبه می‌شود [۶۸].

$$\text{ERR}(u)=\max\{0, \sum_{j=1}^{N} r_{jm_{ju}}^{NR}-Q_u^{NR}\} \quad (۳-۴)$$

[70]Random Key Representation
[71]Penalize

اگر $ERR(u)=0، \forall u=1,\ldots, NR$ باشد، آنگاه لیست CounterMode شدنی بوده و با توجه به روش‌های اجرایی انتخاب‌شده در لیست، برای هر فعالیت اطلاعاتی شامل مدت زمان اجرا و مقدار نیازمندی هر فعالیت به منابع تجدید پذیر، استخراج می‌گردد؛ اما درصورتی‌که مقدار $ERR(u)$ بزرگ‌تر از صفر باشد، آنگاه لیست CounterMode نشدنی بوده و جهت اصلاح آن، روش اجرایی یک و یا دو فعالیت، به‌طور تصادفی تغییر کرده و مقدار $ERR(u)$ مجدداً محاسبه می‌شود. این روند تا برقراری شرط اولیه، ادامه می‌یابد و درنهایت لیست‌های CounterMode و NameMode به‌روزرسانی می‌گردد [۶۸].

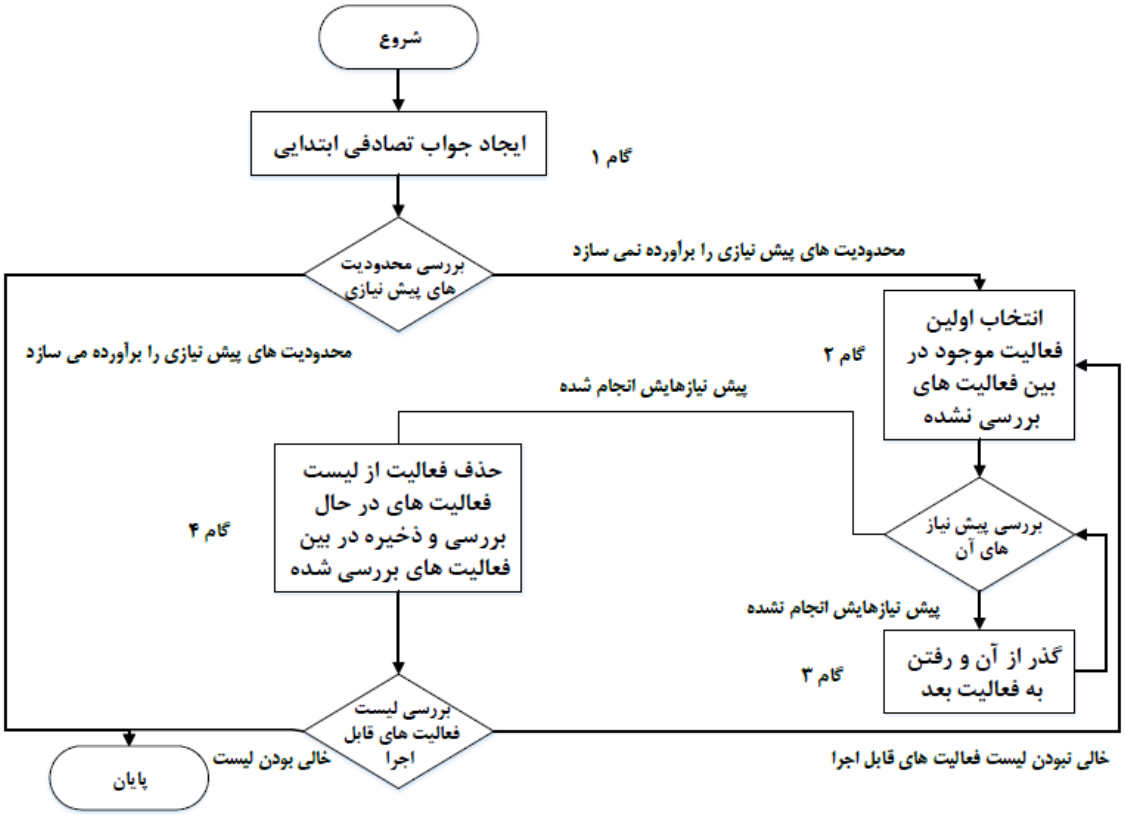
مرحله‌ی ۴) تولید جمعیت اولیه با استفاده از الگوریتم جواب موجه ابتدایی

دو روش سری و موازی جهت تولید برنامه‌ی زمان‌بندی وجود دارد. ازآنجاکه کولیش[۷۲] اثبات نمود که با استفاده از روش تولید زمان‌بندی موازی، گاهی اوقات رسیدن به جواب بهینه غیرممکن است؛ در این پژوهش، از روش تولید زمان‌بندی سری استفاده می‌شود. در هر مرحله از این روش، مجموعه‌ی فعالیت‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- فعالیت‌هایی که تا مرحله‌ی جاری زمان‌بندی شده‌اند. ۲- فعالیت‌هایی که برای زمان‌بندی واجد شرایط هستند. ۳- فعالیت‌هایی که تا مرحله‌ی جاری زمان‌بندی نشده‌اند و امکان زمان‌بندی آن‌ها در این مرحله وجود ندارد [۷۱].

جهت تولید برنامه‌ی زمان‌بندی، ابتدا با استفاده از روش کلید تصادفی به هر فعالیت پروژه یک عدد حقیقی تصادفی بین صفر و یک، تخصیص داده می‌شود. ترتیب اعداد تخصیص داده‌شده به فعالیت‌ها، نقش قاعده اولویت را برای هر فعالیت، ایفا می‌کند. جایگشت حاصل از مرتب شدن این اعداد تصادفی به‌عنوان جواب در نظر گرفته می‌شود. البته ممکن است این جواب به علت رعایت نکردن اولویت فعالیت‌ها، نشدنی باشد که با استفاده از الگوریتم محاسبه جواب موجه ابتدایی، اصلاح می‌شود. شکل ۳-۵، روند اجرایی این الگوریتم را نشان می‌دهد [۲۱].

---

[72] Kolisch



شکل ۳-۵- روند اجرای الگوریتم تولید جواب موجه ابتدایی [۲۱]

گام‌های این الگوریتم به‌صورت زیر است:

گام ۱) یک جواب تصادفی ابتدایی که اولویت اجرای فعالیت‌ها را نشان می‌دهد، ایجاد می‌گردد؛ بدین‌صورت که از میان $N!$ طریق ممکن در بین اولویت‌های اجرای فعالیت‌ها، بدون توجه به محدودیت‌های مسئله، یک جواب تصادفی انتخاب می‌شود. درصورتی‌که جواب تصادفی به‌دست‌آمده از لحاظ محدودیت‌های پیش‌نیازی صحیح باشد، جواب موجه ابتدایی حاصل شده است؛ در غیر این صورت گام دوم اجرا خواهد شد.

گام ۲) اولین فعالیت در بین فعالیت‌های بررسی نشده را در نظر می‌گیرد. اگر تمامی پیش‌نیازی‌های آن انجام گرفته باشد، گام چهارم و در غیر این صورت گام سوم الگوریتم اجرا می‌شود. در نخستین مرحله، تنها فعالیت‌هایی که می‌توانند انتخاب شوند، فعالیت‌های مجازی آغازین و پایانی پروژه خواهد بود.

گام ۳) فعالیتی را که پیش‌نیازش انجام نگرفته، رها می‌کند و به گام دوم بازمی‌گردد. از بین دیگر فعالیت‌های بررسی نشده‌ی موجود، فعالیت بعدی را انتخاب می‌نماید.

گام ۴) فعالیت بررسی‌شده در گام دوم را از فهرست فعالیت‌های قابل بررسی حذف می‌کند و به فهرست فعالیت‌های بررسی‌شده، انتقال می‌دهد. درصورتی‌که هنوز فعالیت بررسی نشده‌ای باقی‌مانده باشد، الگوریتم به گام دوم بازخواهد گشت؛ در غیر این صورت، فعالیت‌های ذخیره‌شده در فهرست فعالیت‌های بررسی‌شده را به ترتیب ذخیره شدن، مرتب می‌کند و به‌عنوان جواب ابتدایی اصلاح‌شده یا جواب موجه ابتدایی، نمایش می‌دهد [۲۱].

مرحله‌ی ۵) ارزیابی جمعیت اولیه و ذخیره‌ی بهترین جواب تولیدشده

در این مرحله، برای هر توالی ممکن ایجادشده با توجه به روش اجرایی آن، ارزیابی مناسب صورت می‌گیرد تا زمان تکمیل پروژه مشخص شود که این مقدار در متغیری با نام pop. Cost که مختص به هر عضو از جمعیت است، ذخیره می‌گردد. برای یافتن زمان شروع یک فعالیت بدین‌صورت عمل می‌شود که ابتدا پس از انتخاب یک فعالیت، تمامی پیش‌نیازهایش بررسی شده و حداکثر زمان اتمام آن‌ها، به‌عنوان زمان شروع فعالیت انتخابی به شرط در دسترس بودن منابع تجدید پذیر موردنیاز آن، در نظر گرفته می‌شود. در صورت عدم دسترسی کافی به منابع، زمان شروع فعالیت به زودترین زمانی که منابع در دسترس باشد، شیفت پیدا می‌کند. جمعیت مذکور، با توجه به pop. Cost هر عضو آن، مرتب‌سازی شده و مناسب‌ترین جواب به نام BestSolMode ذخیره می‌گردد [۷۲].

مرحله‌ی ۶) گام تکرار الگوریتم فرا ابتکاری

تا زمانی که شرایط خاتمه‌ی الگوریتم PSO ازجمله گذشتن از تعداد تکرار مشخص، رسیدن به پاسخی قابل قبول و عدم مشاهده‌ی بهبودی در نتیجه برآورده نشده است معیارهای توقف برای مسئله ایجاد نشده است، مراحل هفتم و هشتم به تعداد تکرار معین اجرا می‌شوند [۷۲].

مرحله‌ی ۷) تولید جمعیت جدید در الگوریتم PSO با استفاده از به‌روزرسانی موقعیت و سرعت اعضای جمعیت

برای افزایش قدرت جستجو و سرعت الگوریتم، جستجوی محلی به‌طور همزمان در هر دو فضای مربوط به روش‌های اجرایی و توالی انجام فعالیت‌ها، صورت می‌گیرد. سپس بهترین فهرست روش یافت شده به همراه توالی متناسب با آن گزارش می‌شود. در این مرحله برای تمامی اعضای جمعیت، یک فهرست روش اجرایی جدید تولید می‌شود؛ بنابراین، با استفاده از به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذره‌ها، جستجو در فهرست فعالیت‌ها و تولید جمعیت جدید در الگوریتم PSO، انجام می‌پذیرد. مطابق با رابطه‌ی (۳-۱)، سرعت هر عضو از جمعیت پس از به‌روزرسانی، در محلی به نام pop(i). Velocity ذخیره می‌شود. برای جلوگیری از واگرا شدن بردار سرعت یک ذره، تغییرات سرعت در محدوده‌ی مشخصی قرار می‌گیرد و سرعت هر مؤلفه، مطابق روابط (۳-۵) و (۳-۶) بوده و حد بالا و پایین بردار سرعت نیز به‌وسیله‌ی رابطه‌ی (۳-۷) محاسبه می‌شود [۶۷].

$$pop(i).\ Velocity=\max\{pop(i).\ Velocity، V_{min}\} \quad (۵-۳)$$

$$pop(i).\ Velocity=\min\{pop(i).\ Velocity، V_{max}\} \quad (۶-۳)$$

$$V_{max}=0.1*(VarMax-VarMin) \quad (۷-۳)$$

$$V_{min}= -V_{max}$$

سپس بردار موقعیت هر عضو از جمعیت، مطابق با رابطه‌ی (۳-۲) به‌روزرسانی شده و در محلی به نام pop(i). Position ذخیره می‌گردد. پس از پایان فرآیند مذکور، جمعیت جدید شکل خواهد گرفت.

مرحله‌ی ۸) ارزیابی جمعیت جدید و ذخیره‌ی بهترین جواب تولیدشده در هر تکرار

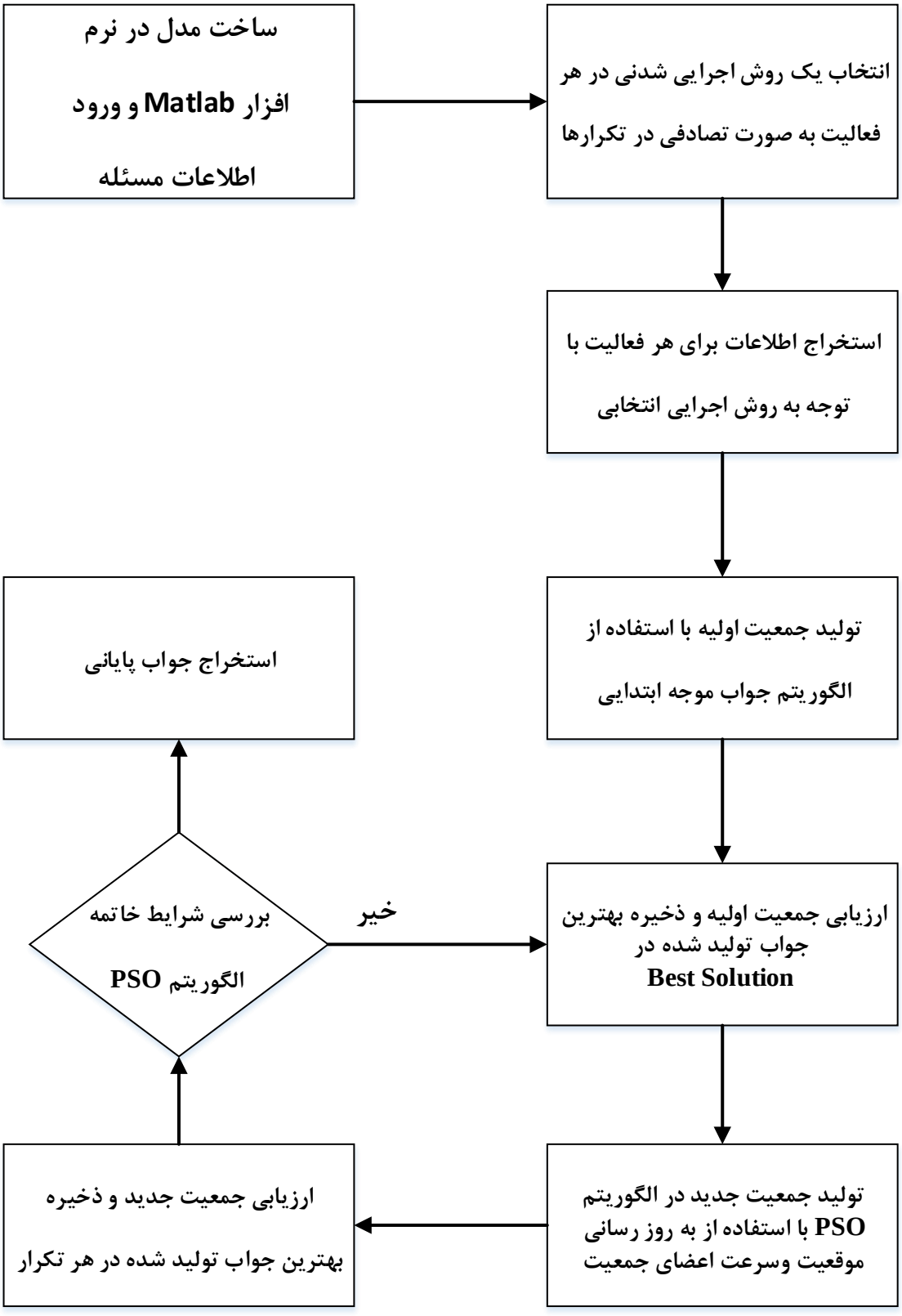
در این مرحله، خروجی مسئله‌ی MRCPSP در هر تکرار در لیستی به نام BestSolList ذخیره می‌گردد.

مراحل ۹ و ۱۰) استخراج جواب پایانی تحت نام BestSol

در انتهای کار، بعد از انجام تکرارهای معین، جواب پایانی تحت نام BestSol برگردانده می‌شود. پاسخ نهایی، شامل موارد زیر است که به همراه مجموعه‌ی اطلاعات ورودی، جهت برقراری ارتباط با مدل BIM، در یک فایل اِکسل ذخیره می‌گردد.

- بهترین روش اجرایی برای فعالیت
- توالی بهینه برای انجام فعالیت‌ها
- زمان تکمیل پروژه
- زمان شروع و پایان فعالیت‌ها
- میزان منابع تجدید ناپذیر استفاده شده و باقیمانده در پروژه
- میزان منابع تجدید پذیر استفاده‌شده و باقیمانده در هر دوره زمانی

شکل ۳-۶، روند کلی پیشنهادی جهت حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم PSO را نشان می‌دهد.



شکل ۳- ۶- روند کلی حل مسئله‌ی MRCPSP

۳-۴-۳- ایجاد مدل چهاربعدی بر اساس خروجی مسئله‌ی MRCPSP

در این بخش ابتدا ابزار موردنیاز جهت شبیه‌سازی فرآیند ساخت و ایجاد مدل چهاربعدی معرفی شده و سپس به نحوه برقراری ارتباط میان خروجی مسئله‌ی MRCPSP با مدل BIM پرداخته خواهد شد.

۳-۴-۳-۱- معرفی ابزار TimeLiner

مدل‌سازی چهاربعدی در پژوهش حاضر (ارسال خروجی‌های زمان‌بندی به مدل سه‌بعدی و شبیه‌سازی فرآیند ساخت)، در نرم‌افزار Navisworks Manage، با استفاده از ابزار TimeLiner انجام می‌پذیرد. استفاده از این ماژول، درک صحیحی از شبیه‌سازی توالی ساخت را برای مدیران و پیمانکاران پروژه فراهم می‌نماید و فرآیند شبیه‌سازی را برای اِلمان‌ها، لایه‌ها و مجموعه‌های مختلف مدل، به‌خوبی پوشش می‌دهد. علاوه بر این، با استفاده از قابلیت‌های TimeLiner، می‌توان برنامه‌ی زمان‌بندی مربوط به مدل سه‌بعدی را که در نرم‌افزارهایی همچون MS Project تدوین شده و یا اطلاعات آن در پایگاه داده موجود است، در TimeLiner وارد نمود و نمودار گانت مربوط به پروژه را مشاهده کرد. در این نوار ابزار، اطلاعات مربوط به برنامه‌ی زمان‌بندی مانند لیست فعالیت‌های پروژه، زمان شروع و پایان آن‌ها، هزینه‌ی انجام فعالیت‌ها شامل مصالح، نیروی انسانی و ماشین‌آلات و نیز درصد پیشرفت فعالیت‌ها نمایش داده می‌شوند. با اختصاص دادن مجموعه‌ی اِلمان‌های تعریف‌شده در مدل سه‌بعدی به فعالیت‌های مربوطه در ابزار TimeLiner، می‌توان شبیه‌سازی فرآیند ساخت را به اجرا درآورد [۷۳].

در این پژوهش، اطلاعات خروجی مسئله‌ی MRCPSP که پیش‌تر در یک فایل اِکسل ذخیره‌شده‌اند، در قالب فایلی با پسوند CSV، به TimeLiner، منتقل می‌گردند. سپس مطابق با گروه‌بندی اِلمان‌های مدل سه‌بعدی انجام‌شده در مراحل قبل، هر یک از گروه‌ها به فعالیت مربوطه اختصاص می‌یابند. درنهایت، با داشتن زمان شروع و پایان فعالیت‌ها و نیز روش اجرایی انتخاب‌شده برای هر فعالیت، فرآیند شبیه‌سازی آغاز شده و زمان‌بندی پروژه به همراه درصد پیشرفت فعالیت‌ها و نمودار گانت مربوط به آن‌ها نمایش داده

می‌شود. در پژوهش حاضر، این امکان وجود ندارد که انتقال تمام داده‌های مسئله‌ی MRCPSP به TimeLiner، به دلیل حجم بالای اطلاعات صورت گیرد. برای مشاهده‌ی همزمان تمامی داده‌های مربوط به مسئله و نیز فرآیند شبیه‌سازی مدل، از تابع API که در قسمت بعد به آن اشاره خواهد شد، استفاده می‌گردد.

۳-۴-۳-۲- مشاهده اطلاعات ورودی مسئله در حین مدل‌سازی چهاربعدی

در این قسمت اطلاعات ورودی و خروجی‌های مسئله‌ی MRCPSP که پیش‌تر در فایل اکسلی ذخیره شده بود، توسط تابع API، به همراه مدل‌سازی چهاربعدی نمایش داده می‌شود. تابع API، به یک ابزار یا کتابخانه‌ای اشاره می‌کند که به توسعه‌دهندگان کمک می‌کند تا کدی بنویسند که با نرم‌افزارهای دیگر ارتباط برقرار می‌کند. این کدها که در زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف همچون VB. Net و C# نوشته می‌شوند، از ابزارهای سطح پایین که برنامه‌های ویندوز استفاده می‌کنند، کمک می‌گیرند تا از جنبه‌های زیرساختی سیستم‌عامل استفاده کنند. برخی از توابع API، ابزارهایی هستند که امکانات برنامه‌های موبایل را تأمین می‌کنند. به‌طور خلاصه API روشی برای برقراری ارتباط بین یک برنامه رایانه‌ای با برنامه‌های رایانه‌ای دیگر را فراهم می‌سازد [۷۴].

در پژوهش حاضر، کد نویسی تابع API، در نرم‌افزار visual studio و تحت زبان برنامه‌نویسی C# انجام شده است. علت استفاده از این نرم‌افزار، داشتن مزایایی همچون جستجوی راحت در محیط نرم‌افزار، اجرا کردن چندین پروژه به‌طور همزمان، به‌روزرسانی مشکلات مربوط به نسخه‌های قبلی، یادگیری راحت نرم‌افزار، تشکیل فرم‌هایی جهت نوشتن توابع API، امکان برقراری ارتباط آسان با پایگاه داده و نیز سرویس‌های تحت وب می‌باشد. این کد به صورتی نوشته شده که کاربر بتواند به‌طور همزمان یک یا چند مدل سه‌بعدی را به‌صورت دلخواه، در ابزار مدل‌سازی BIM وارد نموده و از طرفی فایل اطلاعات مربوط به مسئله‌ی MRCPSP برای پروژه‌ی خود را به‌طور همزمان در حین مدل‌سازی چهاربعدی، مشاهده نماید.

۳-۵- جمع‌بندی

در این فصل، ضمن معرفی انواع پژوهش و روش‌های گردآوری اطلاعات، مشخص گردید که پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش گردآوری اطلاعات، کتابخانه‌ای است. سپس چارچوب کلی پژوهش که شامل سه بخش کلی استخراج داده‌های اولیه جهت حل مسئله‌ی MRCPSP به کمک مدل BIM، استفاده از الگوریتم PSO جهت حل مسئله و درنهایت مدل‌سازی چهاربعدی به کمک ابزار TimeLiner و استفاده از تابع API است، تشریح گردید و علت استفاده از ابزارهای مربوطه در هر بخش بیان شد.

فصل چهارم

تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱- مقدمه

مطابق با آنچه در فصل سوم اشاره شد، در روش پژوهش، ابتدا اطلاعات لازم جهت حل مسئله‌ی MRCPSP به کمک مدل BIM، جمع آوری شده و سپس به‌عنوان ورودی به کد برنامه‌ی مربوط به حل مسئله زمان‌بندی با استفاده از الگوریتم PSO، منتقل می‌شود. پس از اجرای برنامه، اطلاعات خروجی مجدداً به مدل BIM منتقل شده و فرآیند شبیه‌سازی ساخت صورت می‌پذیرد.

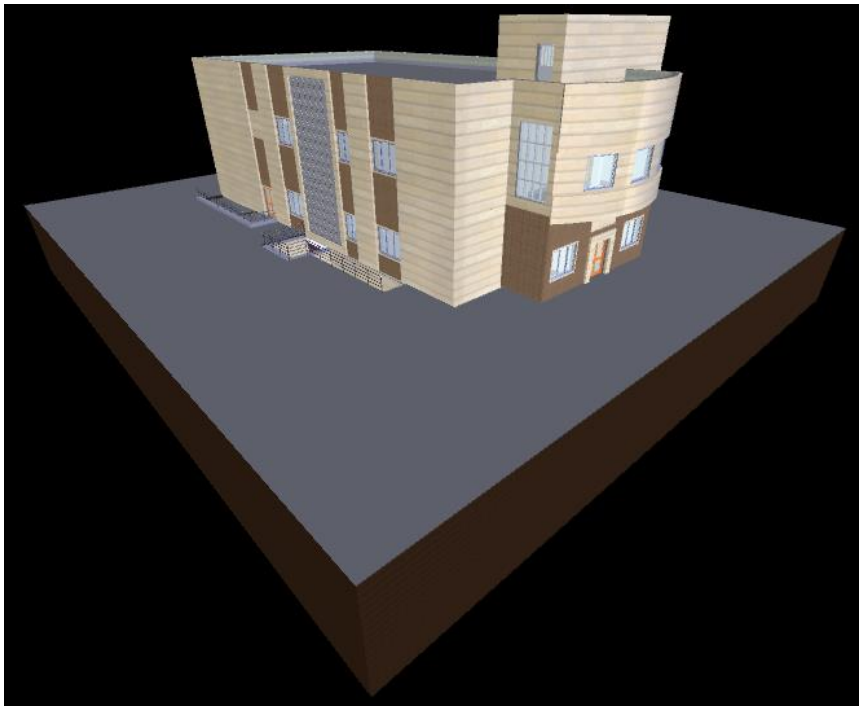
در این فصل جهت ارائه‌ی نتایج، فرآیند مربوط به روش پژوهش به ترتیبی که در فصل قبل بیان گردید، بر روی مدل یک ساختمان سه طبقه با کاربری آزمایشگاه پیاده‌سازی شده و اطلاعات ورودی و خروجی پروژه مربوطه نمایش داده می‌شود. سپس ضمن اشاره به انواع روش‌های اعتبار سنجی، بررسی میزان قابلیت اعتماد به نتایج حاصل از پژوهش حاضر انجام می‌پذیرد. در انتهای فصل نیز مهم‌ترین نتایج از حاصل از این پژوهش در بخش جمع‌بندی بیان می‌گردد.

۴-۲- فرآیند ارائه‌ی نتایج

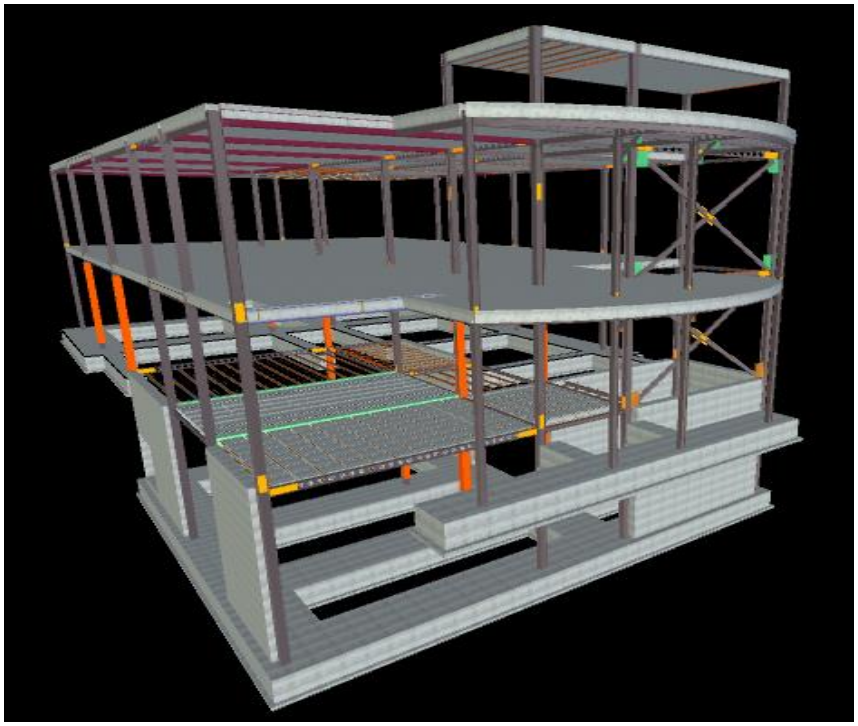
در این بخش مراحل انجام پژوهش برای مدل BIM، مطابق با روش بیان‌شده در فصل سوم، به ترتیب ارائه شده و نحوه به دست آوردن اطلاعات ورودی و خروجی برای هر بخش بیان می‌شود.

۴-۲-۱- معرفی مدل و فرضیات پروژه

مدل فرضی به‌کاررفته در این پژوهش، ساختمان سه طبقه با کاربری آزمایشگاه و زیربنای ۱۲۵۰ مترمربع است. اسکلت سازه، فلزی بوده و دارای شش دیوار حائل بتنی و دو فونداسیون نواری می‌باشد. فرم کلی سازه در نرم‌افزار Navisworks Manage مطابق اشکال زیر می‌باشد.



شکل ۴-۱- مدل سه‌بعدی معماری ساختمان موردمطالعه در Navisworks Manage



شکل ۴-۲- مدل سه‌بعدی سازه ساختمان موردمطالعه در Navisworks Manage

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

- زمان‌بندی تنها یک پروژه، مدنظر بوده و روابط پیش‌نیازی از نوع پایان به شروع (FS) است.
- مدت زمان انجام فعالیت‌ها و نیازمندی هر یک از آن‌ها به منابع، مشخص و قطعی است.
- منابع از دو نوع تجدید پذیر و تجدید ناپذیر هستند.
- ظرفیت منابع تجدید پذیر در هر دوره‌ی زمانی مشخص، ثابت است.
- ظرفیت منابع تجدید ناپذیر در کل پروژه، مشخص و قطعی می‌باشد.
- جهت سهولت در حل مسئله، فقط برخی از فعالیت‌ها دارای چند حالت اجرایی می‌باشند که در این پروژه، به‌صورت مفروض بوده و هر فعالیت تحت همان روش اجرایی که آغاز گردیده، اتمام پیدا می‌کند.
- هر فعالیت تنها یک بار قابلیت شروع داشته و به‌صورت پیوسته و بدون انقطاع، پایان می‌یابد.

- زمان‌بندی بخش سازه‌ی این پروژه در پژوهش حاضر مدنظر می‌باشد.

۴-۲-۲- روند استخراج داده‌های اولیه

در فرآیند استخراج داده‌های اولیه، علاوه بر اطلاعاتی که در فصل سوم بدان اشاره گردید، در پژوهش حاضر، مشخص کردن تعداد روش‌های اجرایی برای هر فعالیت، تغییر میزان نیازمندی به منابع تجدید پذیر و نیز زمان لازم برای دیگر روش‌های اجرایی هر فعالیت و حداکثر مقدار منابع تجدید پذیر در طول انجام پروژه، به‌صورت فرضی در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۲-۱- تهیه‌ی ساختار شکست کار فعالیت‌ها برای مدل پژوهش

هر آیتم ساختار شکست کار در این مدل، با دو ورودی تعریف می‌شود؛ شناسه‌ی ساختار شکست و توضیح ساختار شکست. شناسه بندی ساختار شکست می‌تواند در بالاترین سطح با اعداد ۱،۲، ۳ و غیره آغاز شده و برای سطوح پایین‌تر مانند (۲-۳-۱)، با خط تیره نمایش داده شود. ساختار شکست کار باید به نحوی شناسه بندی شود که قابلیت نمایش مناسب نتایج مدل‌سازی را داشته باشد.

در این پژوهش، ساختار شکست کار فعالیت‌ها، با استفاده از پروژه‌های مشابه و تجربیات گذشته، می‌باشد. دلیل این موضوع این است که امکان دارد، المان‌های مربوط به برخی از فعالیت‌های پروژه مانند، قالب‌بندی و خاکبرداری، در مدل سه‌بعدی وجود نداشته باشند؛ اما در زمان‌بندی پروژه و تخصیص منابع نقش به سزایی خواهند داشت. جدول ۴-۱، ساختار شکست کار مربوط به پروژه‌ی حاضر را نمایش می‌دهد.

جدول ۴-۱- ساختار شکست کار فعالیت‌های مدل موردمطالعه

اندیس پیش‌نیازی فعالیت	ردیف فعالیت	نام فعالیت	شناسه فعالیت در ساختار شکست کار
---	---	**عملیات اجرایی پروژه نمونه**	۱
---	**۱**	**شروع**	۱.۱
---	---	**پروژه ۱**	۱.۲
۱	**۲**	خاکبرداری و پی‌کنی	۱.۲.۱
---	---	اجرای فونداسیون و اسکلت	۱.۲.۲
---	---	**فونداسیون**	۱.۲.۲.۱
۲	**۳**	بتن مگر	۱.۲.۲.۱.۱
۳	**۴**	آرماتوربندی فونداسیون	۱.۲.۲.۱.۲
۴	**۵**	قالب‌بندی فونداسیون	۱.۲.۲.۱.۳
۵	**۶**	بتن‌ریزی فونداسیون	۱.۲.۲.۱.۴
---	---	**اجرای اسکلت فولادی**	۱.۲.۲.۲
---	---	طبقه زیرزمین	۱.۲.۲.۲.۱
۶	**۷**	ساخت و برپایی ستون‌ها	۱.۱.۲.۲.۲.۱
۷	**۸**	ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف و راه‌پله	۲.۱.۲.۲.۲.۱
۸	**۹**	اجرای اتصالات	۳.۱.۲.۲.۲.۱
---	---	طبقه همکف	۱.۲.۲.۲.۲
۷	**۱۰**	ساخت و برپایی ستون‌ها	۱.۲.۲.۲.۲.۱

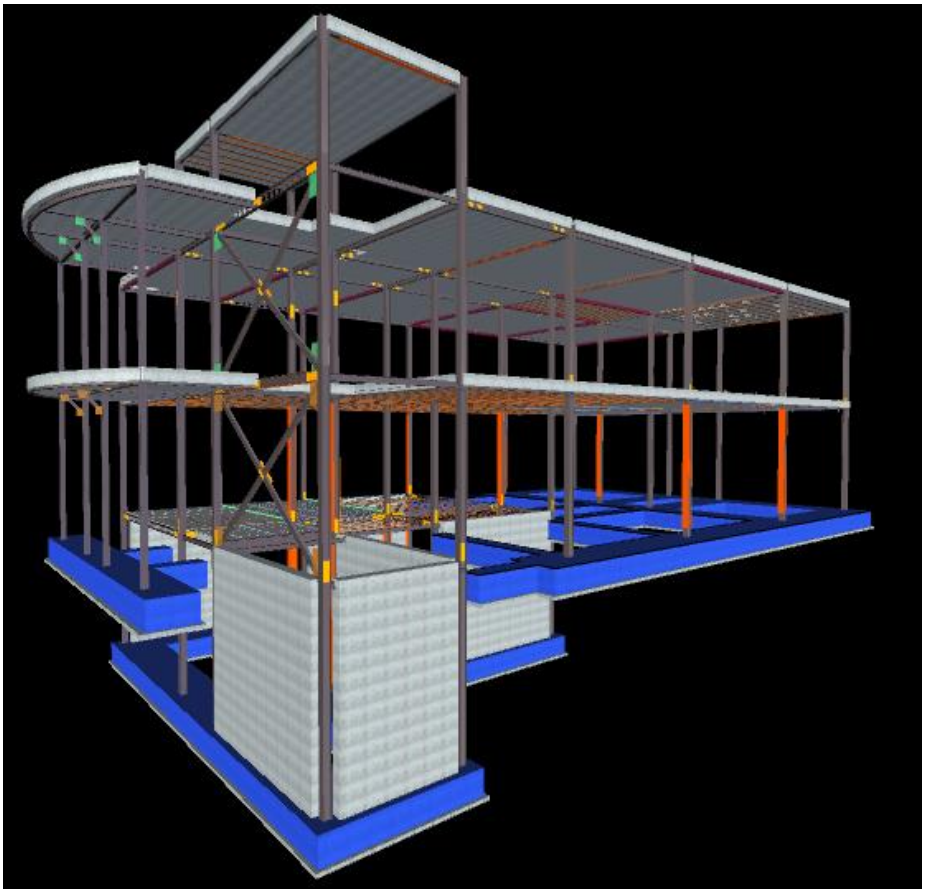
اندیس پیش‌نیازی فعالیت	ردیف فعالیت	نام فعالیت	شناسه فعالیت در ساختار شکست کار
۱۰	**۱۱**	ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف و راه‌پله	۱.۲.۲.۲.۲.۲
۱۱	**۱۲**	اجرای اتصالات	۱.۲.۲.۲.۲.۳
---	---	طبقه اول	۱.۲.۲.۲.۳
۱۰	**۱۳**	ساخت و برپایی ستون‌ها	۱.۱.۲.۲.۲.۳
۱۳	**۱۴**	ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف و راه‌پله	۲.۱.۲.۲.۲.۳
۱۴	**۱۵**	اجرای اتصالات	۳.۱.۲.۲.۲.۳
---	---	طبقه بام	۱.۲.۲.۲.۴
۱۳	**۱۶**	ساخت و برپایی ستون‌های خرپشته	۱.۱.۲.۲.۲.۴
۱۶	**۱۷**	ساخت و برپایی تیرهای اصلی خرپشته	۲.۱.۲.۲.۲.۴
۱۷	**۱۸**	اجرای اتصالات خرپشته	۳.۱.۲.۲.۲.۴
---	---	اجرای دیوارهای حائل زیرزمین	۱.۲.۳
۸	**۱۹**	آرماتوربندی	۱.۱.۲.۳
۱۹	**۲۰**	قالب‌بندی	۲.۱.۲.۳
۲۰	**۲۱**	بتن‌ریزی	۳.۱.۲.۳
---	---	اجرای سقف	۱.۲.۴
---	---	**طبقه زیرزمین**	۱.۱.۲.۴

اندیس پیش‌نیازی فعالیت	ردیف فعالیت	نام فعالیت	شناسه فعالیت در ساختار شکست کار
۹	**۲۲**	قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی	۱.۱.۱.۲.۴
۲۲	**۲۳**	بتن‌ریزی	۱.۲.۱.۲.۴
---	---	طبقه همکف	۲.۱.۲.۴
۱۲	**۲۴**	قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی	۲.۱.۱.۲.۴
۲۴	**۲۵**	بتن‌ریزی	۲.۲.۱.۲.۴
---	---	طبقه اول	۳.۱.۲.۴
۱۵	**۲۶**	قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی	۳.۱.۱.۲.۴
۲۶	**۲۷**	بتن‌ریزی	۳.۲.۱.۲.۴
---	---	طبقه بام	۴.۱.۲.۴
۱۸	**۲۸**	قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی	۴.۱.۱.۲.۴
۲۸	**۲۹**	بتن‌ریزی	۴.۲.۱.۲.۴
۲۱،۲۳،۲۵،۲۷،۲۹	**۳۰**	**پایان**	۱.۳

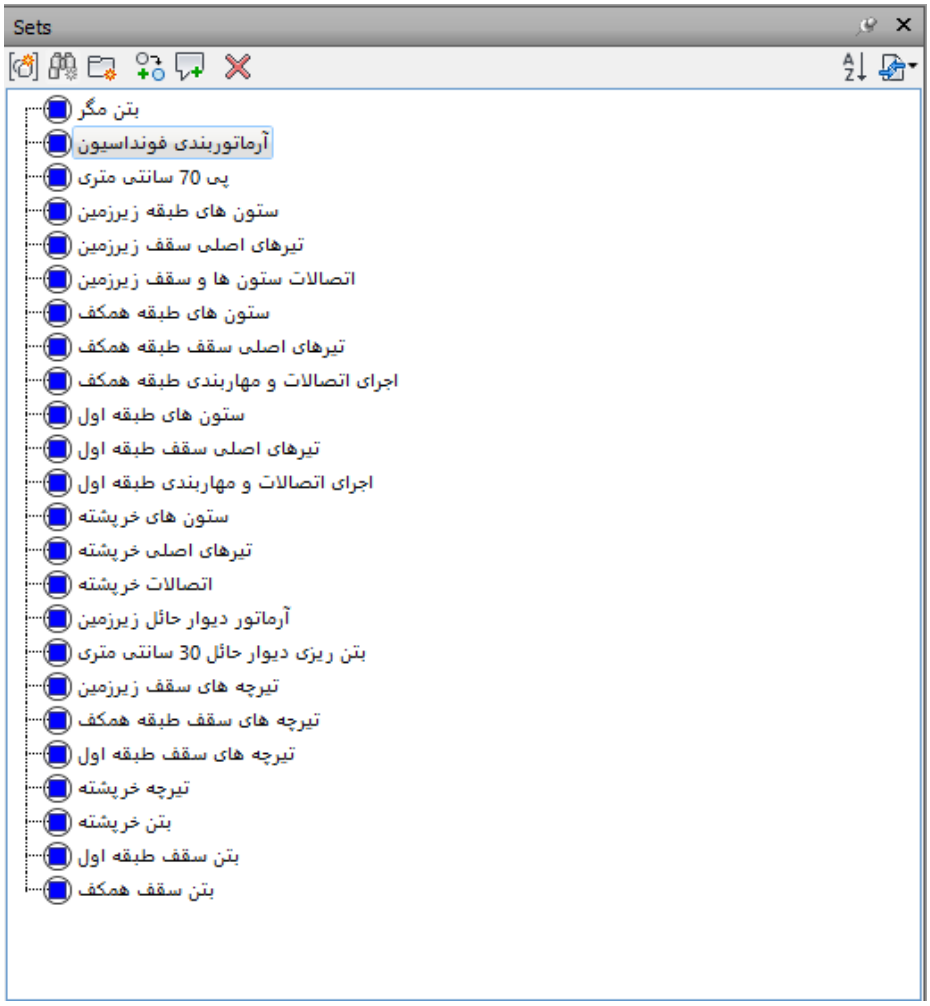
۴-۲-۲-۲- گروه‌بندی المان‌های مدل سه‌بعدی

فرآیند گروه‌بندی اجزای مدل سازه‌ی موردمطالعه، جهت ضمیمه کردن آن‌ها به فعالیت‌های تعریف‌شده در ساختار شکست کار و نمایش آن‌ها در فرآیند شبیه‌سازی، توسط ابزار Selection Sets در نرم‌افزار Navisworks Manage انجام می‌پذیرد. در این فرآیند، هرکدام از المان‌هایی که به فعالیت مربوط به خود در WBS، ارتباط دارند در یک گروه قرار گرفته و در ابزار مذکور ذخیره می‌شوند. برای مثال، مطابق با شکل ۴-۳، تمام المان‌های بتنی فونداسیون سازه‌ی موردمطالعه با ضخامت ۷۰ سانتی‌متر، در گروهی با

نام پی هفتاد سانتی‌متری، انتخاب شده و در Selection Sets قرار می‌گیرد و در هنگام انجام فرآیند زمان‌بندی و شبیه‌سازی ساخت به فعالیت مربوطه (بتن‌ریزی فونداسیون) ضمیمه خواهد شد. به همین ترتیب، فرآیند مذکور برای سایر اجزای مدل سه‌بعدی نیز انجام می‌شود که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. استفاده از این جریان در فرآیند تشخیص تداخلات ساخت نیز کاربرد دارد.



شکل ۴-۳- المان‌های مربوط به فعالیت بتن‌ریزی فونداسیون در مدل سه‌بعدی سازه موردمطالعه



شکل ۴-۴- مجموعه‌ی گروه‌های مربوط به المان‌های مدل سه‌بعدی مطابق با WBS در ابزار Selection Sets

۴-۲-۲-۳- تعیین انواع منابع

با استفاده از شکل ۴-۴ و نیز فعالیت‌های تعریف‌شده در WBS مدل، می‌توان منابع تجدید پذیر پروژه را به دو دسته‌ی منابع انسانی (شامل کارگر ساده، کارگر حرفه‌ای، آرماتوربند، قالب‌بند و جوشکار) و ماشین‌آلات (شامل جرثقیل، پمپ بتن، میکسر، کامیون و بیل مکانیکی) طبقه‌بندی کرد. همچنین منابع تجدید ناپذیر در چهار دسته‌ی مقاطع فلزی، آرماتور، بتن و قالب در این پروژه موجود هستند. دسته بندی منابع تجدید پذیر و تجدید ناپذیر به کار رفته در مدل مورد مطالعه، به ترتیب در جداول ۴-۲ و ۴-۳ آمده است.

جدول ۴-۲- منابع تجدید پذیر مورداستفاده در پروژه

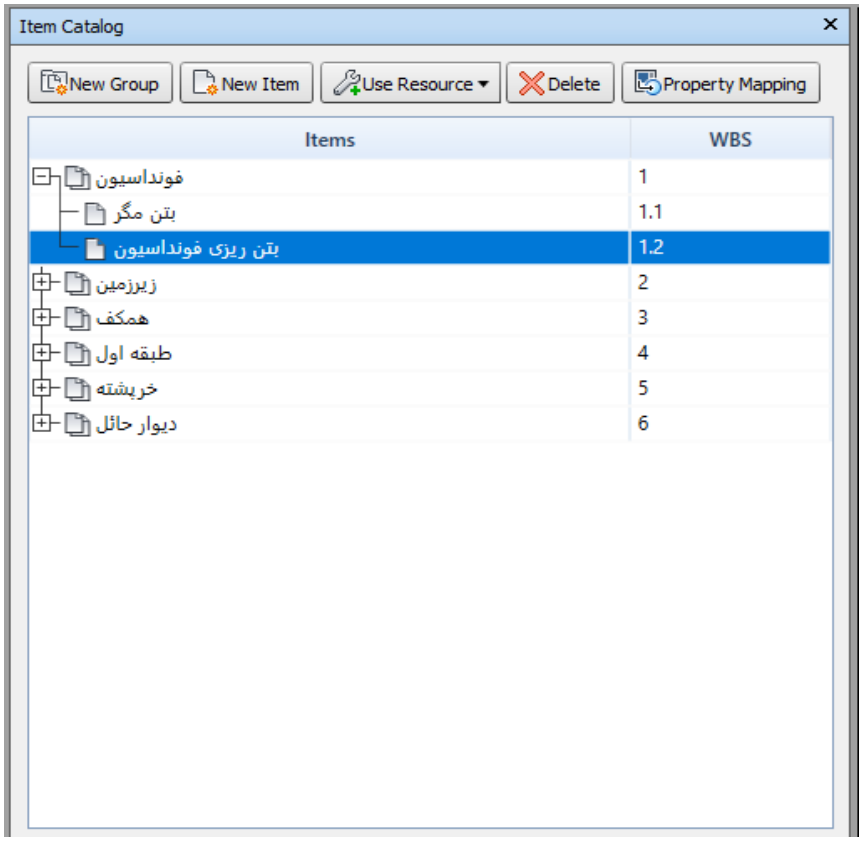
منبع	نوع	R	واحد
جوشکار	**تجدید پذیر**	**منابع انسانی (R1)**	**نفر**
کارگر ساده	**تجدید پذیر**	**منابع انسانی (R1)**	**نفر**
بیل مکانیکی با راننده	**تجدید پذیر**	**ماشین‌آلات (R2)**	**دستگاه**
جرثقیل	**تجدید پذیر**	**ماشین‌آلات (R2)**	**دستگاه**
پمپ بتن	**تجدید پذیر**	**ماشین‌آلات (R2)**	**دستگاه**
تراک میکسر	**تجدید پذیر**	**ماشین‌آلات (R2)**	**دستگاه**
کامیون با راننده	**تجدید پذیر**	**ماشین‌آلات (R2)**	**دستگاه**
کارگر حرفه‌ای	**تجدید پذیر**	**منابع انسانی (R1)**	**نفر**
آرماتوربند	**تجدید پذیر**	**منابع انسانی (R1)**	**نفر**
قالب‌بند	**تجدید پذیر**	**منابع انسانی (R1)**	**نفر**

جدول ۴-۳- منابع تجدید ناپذیر مورداستفاده در پروژه

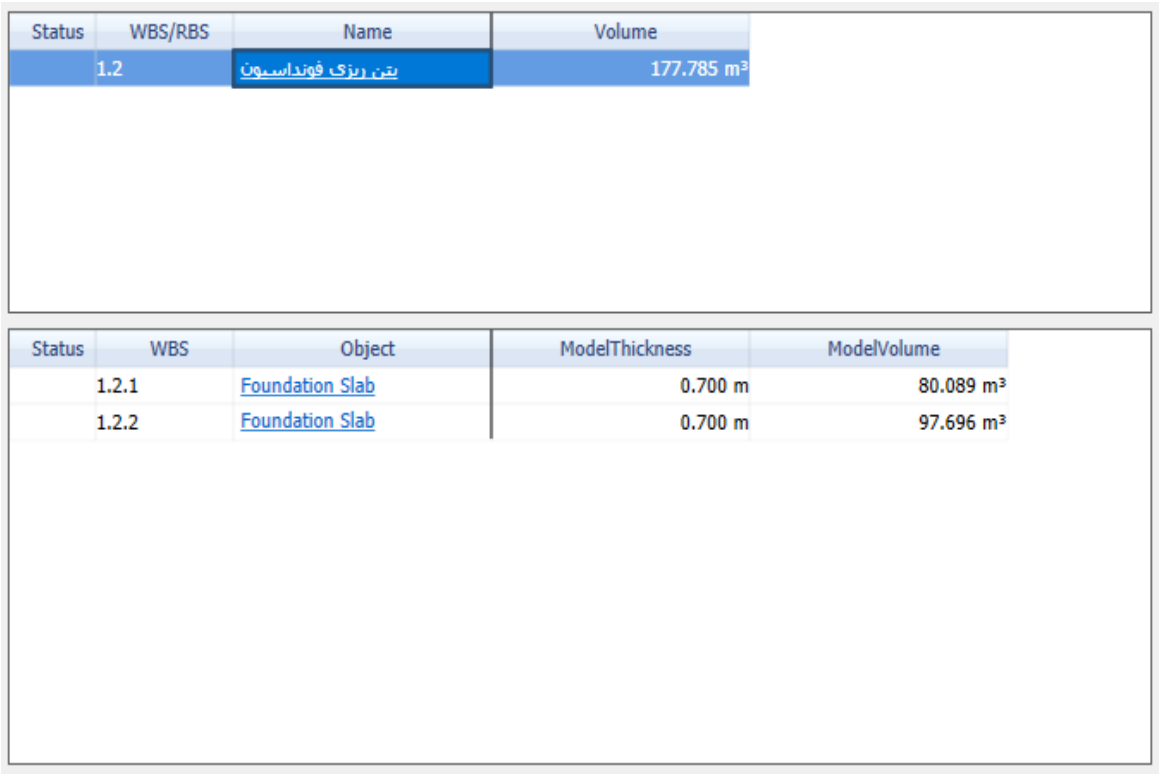
شناسه‌ی منبع	نام منبع	نوع N	واحد
N1	**مقاطع فلزی**	**تجدید ناپذیر**	**کیلوگرم**
N2	**آرماتور**	**تجدید ناپذیر**	**کیلوگرم**
N3	**بتن**	**تجدید ناپذیر**	**مترمکعب**
N4	**قالب**	**تجدید ناپذیر**	**کیلوگرم**

۴-۲-۲-۴- استخراج مقادیر منابع تجدید ناپذیر از مدل سه‌بعدی، تخمین منابع تجدید پذیر و زمان فعالیت

در این مرحله، ابتدا مقدار منابع تجدید ناپذیر مورداستفاده در مدل که در جدول ۴-۳ بیان شد، از طریق ابزار Quantification در نرم‌افزار Navisworks Manage، استخراج شده و خروجی آن در یک فایل اطلاعاتی جداگانه ذخیره می‌گردد. برای مثال، فعالیت بتن‌ریزی فونداسیون که المان‌های آن در گروهی با نام بتن پی در Selection Sets ذخیره‌شده بود، در نظر گرفته می‌شود. این مجموعه در بخش Item Catalog در ابزار Quantification اضافه شده و سپس مقادیر آن‌ها به‌صورت تفکیکی و سرجمع در بخش Quantification Workbook، نمایش داده می‌شود. اَشکال ۴-۵ و ۴-۶، فرآیند مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵- اضافه کردن گروه اِلمان مربوط به فعالیت بتن‌ریزی فونداسیون در Item Catalog



Status	WBS/RBS	Name	Volume
	1.2	بتن ریزی فونداسیون	177.785 m³

Status	WBS	Object	ModelThickness	ModelVolume
	1.2.1	Foundation Slab	0.700 m	80.089 m³
	1.2.2	Foundation Slab	0.700 m	97.696 m³

شکل ۴-۶- مقادیر بتن پی سازه موردمطالعه با استفاده از ابزار Quantification

به همین ترتیب برای سایر گروه‌های اِلمان تعریف‌شده، مقادیر منابع تجدید ناپذیر استخراج می‌گردد. در پژوهش حاضر، مقادیر اجزایی که در مدل سه‌بعدی سازه وجود نداشته (برای مثال قالب فونداسیون و دیوارهای حائل) اما فعالیت مرتبط با آن‌ها در ساختار شکست کار ذکر گردیده است، به‌صورت دستی محاسبه می‌شود. جدول ۴-۴، مقادیر منابع تجدید ناپذیر و مقدار موجودی آن‌ها را برای مدل پژوهش حاضر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر منابع تجدید ناپذیر برای تمامی حالت‌های اجرایی مسئله‌ی MRCPSP، ثابت و یکسان است.

جدول ۴-۴- مقادیر منابع تجدید ناپذیر مورداستفاده در مدل پژوهش

نام فعالیت	N1	N2	N3	N4
شروع	۰	۰	۰	۰
خاکبرداری و پی‌کنی	۰	۰	۰	۰
بتن مگر	۰	۰	۳۰	۰
آرماتوربندی فونداسیون	۰	۱۵۰۰	۰	۰
قالب‌بندی فونداسیون	۰	۰	۰	۶۰۰۰
نام فعالیت	**N1**	**N2**	**N3**	**N4**
بتن‌ریزی فونداسیون	۰	۰	۱۸۰	۰
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه زیرزمین	۳۱۶۰	۰	۰	۰
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف و راه‌پله طبقه زیرزمین	۲۲۹۰	۰	۰	۰
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه زیرزمین	۱۰۲۰	۰	۰	۰
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه همکف	۴۹۰۰	۰	۰	۰
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف طبقه و راه‌پله همکف	۹۵۳۰	۰	۰	۰
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه همکف	۲۲۰۰	۰	۰	۰
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه اول	۴۷۴۰	۰	۰	۰
ساخت و برپایی تیرهای اصلی و راه‌پله طبقه اول	۸۲۱۰	۰	۰	۰
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه اول	۱۳۴۰	۰	۰	۰
ساخت و برپایی ستون‌های خرپشته	۷۲۰	۰	۰	۰
ساخت و برپایی تیرهای اصلی خرپشته	۴۵۰	۰	۰	۰
اجرای اتصالات تکمیلی خرپشته	۱۶۰	۰	۰	۰
آرماتوربندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۰	۴۵۴۰	۰	۰
قالب‌بندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۰	۰	۰	۵۶۸۰
بتن‌ریزی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۰	۰	۴۵	۰
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف زیرزمین	۰	۶۰۰	۰	۰

نام فعالیت	N1	N2	N3	N4
بتن‌ریزی سقف زیرزمین	۰	۰	۱۰۰	۰
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه همکف	۰	۹۰۰	۰	۰
بتن‌ریزی سقف همکف	۰	۰	۱۳۵	۰
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه اول	۰	۹۰۰	۰	۰
بتن‌ریزی سقف طبقه اول	۰	۰	۱۳۵	۰
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی خرپشته	۰	۳۰۰	۰	۰
بتن‌ریزی خرپشته	۰	۰	۱۱	۰
پایان	۰	۰	۰	۰
موجودی منابع تجدید ناپذیر	۳۸۷۲۰	۸۷۴۰	۵۴۰	۱۱۶۸۰

در گام بعد بایستی مقادیر منابع تجدید پذیر مورداستفاده در پژوهش حاضر، مشخص شوند. دو حالت اجرایی برای انجام پروژه در نظر گرفته شده است. منابع تجدید پذیر مربوط به حالت اجرایی اول با توجه به مقادیر جدول ۴-۴ و نیز استفاده از اطلاعات پروژه‌هایی با وضعیت مشابه تخمین زده می‌شوند و برای حالت دوم، این مقادیر به‌صورت فرضی تغییر می‌کنند. ضمناً برای اجرای این پروژه، حداکثر مقادیر منبع نوع R1 (منابع انسانی) برابر ۱۰ واحد و منبع نوع R2 (ماشین‌آلات)، ۷ دستگاه در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به این منابع برای هر دو حالت اجرایی در جدول ۴-۵ آمده است.

جدول ۴- ۵- مقادیر منابع تجدید پذیر برای حالات مختلف اجرایی

	mode 1		mode 2	
نام فعالیت	R1	R2	R1	R2
شروع	۰	۰	۰	۰
خاکبرداری و پی‌کنی	۵	۶	۵	۶
بتن مگر	۳	۲	۵	۲
آرماتوربندی فونداسیون	۳	۰	۴	۰
قالب‌بندی فونداسیون	۲	۰	۳	۰
بتن‌ریزی فونداسیون	۶	۲	۶	۲
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه زیرزمین	۲	۱	۲	۱
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف و راه‌پله طبقه زیرزمین	۴	۱	۴	۱
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه زیرزمین	۵	۰	۴	۰
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه همکف	۵	۱	۵	۱
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف طبقه و راه‌پله همکف	۷	۱	۷	۱
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه همکف	۸	۰	۹	۰
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه اول	۹	۱	۵	۱
ساخت و برپایی تیرهای اصلی و راه‌پله طبقه اول	۷	۱	۷	۱
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه اول	۸	۰	۵	۰
ساخت و برپایی ستون‌های خرپشته	۲	۱	۲	۱
ساخت و برپایی تیرهای اصلی خرپشته	۲	۱	۲	۱
اجرای اتصالات تکمیلی خرپشته	۳	۰	۲	۰
آرماتوربندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۲	۰	۴	۰
قالب‌بندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۳	۰	۲	۰
بتن‌ریزی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۶	۲	۷	۲
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف زیرزمین	۵	۰	۴	۰
بتن‌ریزی سقف زیرزمین	۲	۲	۳	۲

نام فعالیت	R1	R2	R1	R2
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه همکف	۵	۱	۳	۱
بتن‌ریزی سقف همکف	۳	۲	۴	۲
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه اول	۵	۱	۴	۱
بتن‌ریزی سقف طبقه اول	۳	۲	۵	۲
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی خرپشته	۲	۱	۲	۱
بتن‌ریزی خرپشته	۱	۲	۱	۲
پایان	۰	۰	۰	۰

سپس زمان انجام فعالیت‌ها به‌عنوان ورودی مسئله‌ی MRCPSP، با توجه مقادیر منابع به کار رفته در پروژه برای هر حالت اجرایی تخمین زده می‌شود. این مقادیر برای هردو حالت اجرایی این مدل، در جدول ۶-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- زمان اجرایی فعالیت‌های پروژه برای حالات اجرایی مختلف

	حالت اجرایی اول	حالت اجرایی دوم
نام فعالیت	برحسب روز	برحسب روز
شروع	۰	۰
خاکبرداری و پی‌کنی	۸	۸
بتن مگر	۲	۲
آرماتوربندی فونداسیون	۱۵	۱۰
قالب‌بندی فونداسیون	۱۰	۱۰
بتن‌ریزی فونداسیون	۲	۱
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه زیرزمین	۱۰	۱۰
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف و راه‌پله طبقه زیرزمین	۸	۸
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه زیرزمین	۵	۸

ساخت و برپایی ستون‌های طبقه همکف	۱۵	۱۵
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف طبقه و راه‌پله همکف	۸	۸
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه همکف	۵	۳
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه اول	۱۵	۱۵
ساخت و برپایی تیرهای اصلی و راه‌پله طبقه اول	۸	۸
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه اول	۵	۱۰
ساخت و برپایی ستون‌های خرپشته	۵	۵
ساخت و برپایی تیرهای اصلی خرپشته	۳	۳
اجرای اتصالات تکمیلی خرپشته	۲	۵
آرماتوربندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۳۰	۲۰
قالب‌بندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۲۰	۲۵
بتن‌ریزی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	۱۲	۸
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف زیرزمین	۹	۱۲
بتن‌ریزی سقف زیرزمین	۳	۱
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه همکف	۹	۱۵
بتن‌ریزی سقف همکف	۳	۲
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه اول	۹	۱۵
بتن‌ریزی سقف طبقه اول	۳	۲
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی خرپشته	۲	۲
بتن‌ریزی خرپشته	۱	۱
پایان	۰	۰

۴-۲-۳- روند حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم PSO

ابتدا بایستی اطلاعات موردنیاز جهت حل مسئله شامل لیست پیش‌نیازی فعالیت‌ها، زمان اولیه‌ی آن‌ها و مقادیر انواع منابع برای حالت‌های مختلف اجرایی که در جداول بخش قبل بدان اشاره شد، وارد نرم‌افزار

MATLAB گردد. این اطلاعات به دلیل حجم بالا، در یک فایل اِکسل ذخیره شده و در MATLAB فراخوانی می‌گردد. داده‌های این فایل در هنگام نمایش نمودار گانت پروژه به‌طور همزمان توسط تابع API، در نرم‌افزار Navisworks Manage ارائه می‌گردد.

۴-۳-۲-۱- مقداردهی اولیه‌ی پارامترهای الگوریتم PSO

در گام بعد، کد مربوط به مسئله در MATLAB مطابق با آنچه در فصل قبل بیان شد، نوشته می‌شود که این کد در بخش پیوست به‌طور کامل بیان شده است. بعد از هر اجرای کد مسئله در MATLAB، یک پاسخ برای آن به دست می‌آید که درنهایت مطابق با فصل قبل به‌وسیله‌ی بهینه‌سازی این پاسخ‌ها توسط الگوریتم PSO، جواب نهایی مسئله شامل حالت اجرایی بهینه‌ی انتخاب‌شده، زمان شروع و پایان فعالیت‌ها و زمان تکمیل پروژه به همراه میزان منابع مورداستفاده، به دست می‌آید. پارامترهای لازم جهت استفاده در الگوریتم PSO برای پژوهش حاضر، به‌صورت فرضی در نظر گرفته‌شده‌اند و با تغییر برخی از آن‌ها مانند جمعیت اولیه، ممکن است که پاسخ بهتری حاصل شود. مقادیر این پارامترها در جدول ۴-۷، بیان شده است.

جدول ۴-۷- مقادیر اولیه‌ی 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**

۴-۲-۳-۲- بررسی عملکرد الگوریتم به کار رفته بر روی مسائل استاندارد

قبل از اجرای نهایی کد مسئله‌ی MRCPSP، لازم است که صحت الگوریتم مربوط به آن ارزیابی شود. در سال ۱۹۹۷، والپرت[۷۳] قضیه‌ای را مطرح کرد که مطابق با آن اگر الگوریتمی برای برخی از مسائل، پاسخ بهتری نسبت به الگوریتم دیگر ایجاد کند، لزوماً برای همه‌ی مسائل بهترین پاسخ را نخواهد داد؛ بنابراین جست‌وجوی پژوهشگران بر یافتن مؤثرترین در همه‌ی حالات متمرکز شد. صحت سنجی الگوریتم‌های فرا ابتکاری با استفاده از مسائل استاندارد زمان‌بندی که در کتابخانه‌ی PSPLIB موجود است، صورت می‌گیرد [۷۵]. در حوزه‌ی موضوع بررسی‌شده در پژوهش حاضر، از نتایج مربوط به مسئله‌ی J1010_1 که از دسته‌ی مسائل استاندارد MRCPSP در کتابخانه‌ی مذکور می‌باشد، استفاده می‌شود. اطلاعات ورودی و خروجی این مسئله، در پیوست پایان‌نامه بیان شده است. در این پژوهش، پس از پیاده‌سازی الگوریتم بر روی مسئله‌ی استاندارد ذکرشده، پاسخ‌های نهایی با متوسط درصد انحراف ۰/۴۸درصد، به جواب‌های مسئله‌ی استاندارد مذکور نزدیک بودند.

۴-۲-۳-۳- خروجی مسئله‌ی MRCPSP

با توجه به این موضوع که در نرم‌افزار Navisworks Manage، فرمت مربوط به زمان شروع و پایان فعالیت‌ها در TimeLiner به‌صورت تاریخ میلادی ثبت می‌شود، پس از اجرای کد مسئله‌ی MRCPSP، حالت‌های اجرایی بهینه برای انجام فعالیت‌ها، توالی مناسب برای انجام آن‌ها به همراه زمان شروع و پایان، با فرمت ذکرشده به‌عنوان خروجی استخراج گردیده و در فایل اِکسل ابتدایی ذخیره خواهد شد. این اطلاعات در جدول ۴-۸ بیان شده است.

[73] Wolpert

جدول ۴-۸- خروجی مسئله‌ی MRCPSP در پژوهش حاضر

نام فعالیت	حالت اجرایی اول	حالت اجرایی دوم	زمان شروع	زمان پایان
شروع	*		۲۰۲۱/۰۲/۲۵	۲۰۲۱/۰۲/۲۵
خاکبرداری و پی‌کنی	*		۲۰۲۱/۰۲/۲۵	۲۰۲۱/۰۳/۰۵
بتن مگر	*		۲۰۲۱/۰۳/۰۶	۲۰۲۱/۰۳/۰۸
آرماتوربندی فونداسیون		*	۲۰۲۱/۰۳/۰۹	۲۰۲۱/۰۳/۱۹
قالب‌بندی فونداسیون	*		۲۰۲۱/۰۳/۲۰	۲۰۲۱/۰۳/۳۰
بتن‌ریزی فونداسیون		*	۲۰۲۱/۰۳/۳۱	۲۰۲۱/۰۴/۰۱
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه زیرزمین	*		۲۰۲۱/۰۴/۰۲	۲۰۲۱/۰۴/۱۲
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف و راه‌پله طبقه زیرزمین	*		۲۰۲۱/۰۴/۱۳	۲۰۲۱/۰۴/۲۱
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه زیرزمین		*	۲۰۲۱/۰۴/۲۲	۲۰۲۱/۰۴/۳۰
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه همکف	*		۲۰۲۱/۰۴/۱۳	۲۰۲۱/۰۴/۲۸
ساخت و برپایی تیرهای اصلی سقف طبقه و راه‌پله همکف	*		۲۰۲۱/۰۴/۲۹	۲۰۲۱/۰۵/۰۷
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه همکف		*	۲۰۲۱/۰۵/۰۸	۲۰۲۱/۰۵/۱۱
ساخت و برپایی ستون‌های طبقه اول	*		۲۰۲۱/۰۴/۲۹	۲۰۲۱/۰۵/۱۴
ساخت و برپایی تیرهای اصلی و راه‌پله طبقه اول	*		۲۰۲۱/۰۵/۱۵	۲۰۲۱/۰۵/۲۳
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه اول	*		۲۰۲۱/۰۵/۲۴	۲۰۲۱/۰۵/۲۹
ساخت و برپایی ستون‌های خرپشته	*		۲۰۲۱/۰۵/۱۵	۲۰۲۱/۰۵/۲۰
ساخت و برپایی تیرهای اصلی خرپشته	*		۲۰۲۱/۰۵/۲۱	۲۰۲۱/۰۵/۲۴
اجرای اتصالات تکمیلی خرپشته	*		۲۰۲۱/۰۵/۲۵	۲۰۲۱/۰۵/۲۷
آرماتوربندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	*		۲۰۲۱/۰۴/۲۲	۲۰۲۱/۰۵/۲۲
قالب‌بندی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین	*		۲۰۲۱/۰۵/۲۳	۲۰۲۱/۰۶/۱۲
بتن‌ریزی دیوارهای حائل بتنی زیرزمین		*	۲۰۲۱/۰۶/۱۳	۲۰۲۱/۰۶/۲۱
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف زیرزمین	*		۲۰۲۱/۰۵/۰۱	۲۰۲۱/۰۵/۱۰

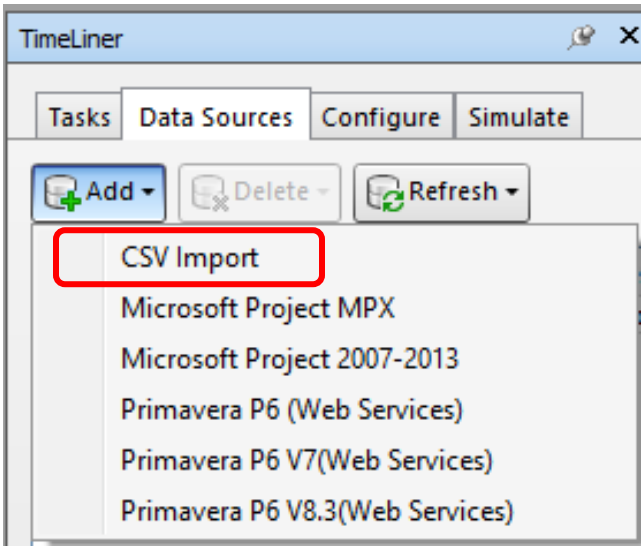
نام فعالیت	حالت اجرایی اول	حالت اجرایی دوم	زمان شروع	زمان پایان
بتن‌ریزی سقف زیرزمین		*	۲۰۲۱/۰۵/۱۱	۲۰۲۱/۰۵/۱۲
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه همکف	*		۲۰۲۱/۰۵/۱۲	۲۰۲۱/۰۵/۲۱
بتن‌ریزی سقف همکف		*	۲۰۲۱/۰۵/۲۲	۲۰۲۱/۰۵/۲۴
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی سقف طبقه اول		*	۲۰۲۱/۰۵/۳۰	۲۰۲۱/۰۶/۱۴
بتن‌ریزی سقف طبقه اول		*	۲۰۲۱/۰۶/۱۵	۲۰۲۱/۰۶/۱۷
قرارگیری تیرچه‌ها و آرماتوربندی خرپشته	*		۲۰۲۱/۰۵/۲۸	۲۰۲۱/۰۵/۳۰
بتن‌ریزی خرپشته	*		۲۰۲۱/۰۵/۳۱	۲۰۲۱/۰۶/۱
پایان	*		۲۰۲۱/۰۶/۲۱	۲۰۲۱/۰۶/۲۱
زمان اتمام پروژه برحسب روز			۱۱۷	

۴-۲-۴- مدل‌سازی چهاربعدی مسئله‌ی MRCPSP

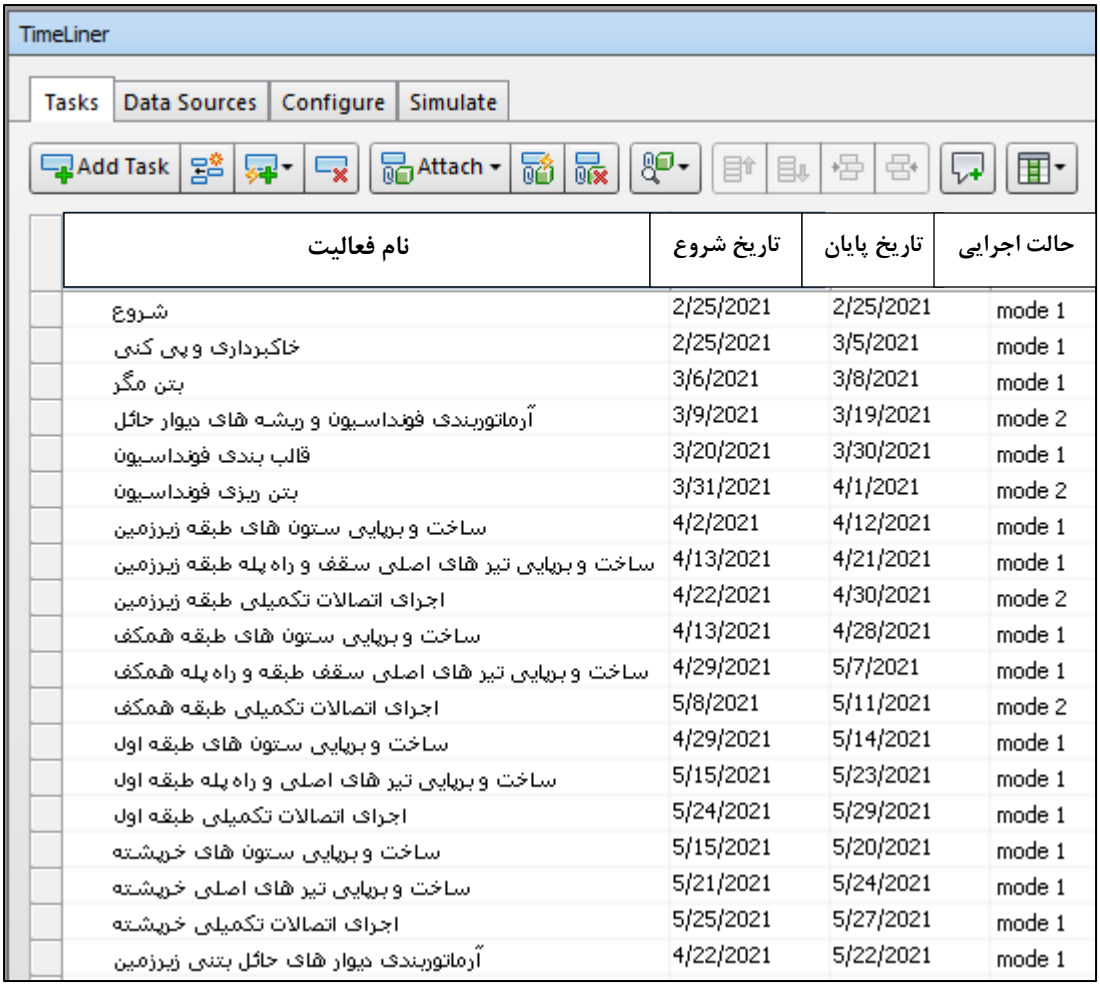
در این بخش ابتدا نحوه‌ی ارسال اطلاعات خروجی مسئله به TimeLiner موردبررسی قرارگرفته و سپس فرآیند شبیه‌سازی، با استفاده از این ابزار و تابع API انجام می‌پذیرد. همان‌طور که در فصل گذشته بدان اشاره شد، ابزار TimeLiner، این قابلیت را دارد که اطلاعات مربوط به برنامه‌ی زمان‌بندی مانند لیست فعالیت‌های پروژه، زمان شروع و پایان آن‌ها، هزینه‌ی انجام فعالیت‌ها شامل مصالح، نیروی انسانی و ماشین‌آلات و نیز درصد پیشرفت فعالیت‌ها را نمایش دهد. با توجه به حجم بالای داده‌ها در مسئله‌ی MRCPSP و نیز امکان بروز تغییرات آن‌ها، بهتر است که فقط اطلاعات زیر در ابزار TimeLiner وارد شود و سایر آن‌ها به‌وسیله‌ی یک تابع API، به نرم‌افزار Navisworks Manage ارتباط داده شوند:

- نام فعالیت‌های پروژه
- تاریخ شروع و پایان هر فعالیت
- حالت اجرایی انتخاب‌شده برای انجام هر فعالیت

اطلاعات فوق که در فایل اِکسل ایجادشده در بخش‌های قبلی ذخیره‌شده بود، در قالب CSV و از طریق گزینه‌ی CSV Import در ابزار TimeLiner قرار می‌گیرد. فقط ستون‌های مربوط به اطلاعات فوق در این ابزار انتخاب گردیده و سایر گزینه‌ها غیرفعال می‌شوند. این فرآیند در اَشکال ۴-۷ و ۴-۸ نشان داده‌شده است.



شکل ۴-۷- واردکردن اطلاعات در قالب CSV در ابزار TimeLiner


TimeLiner

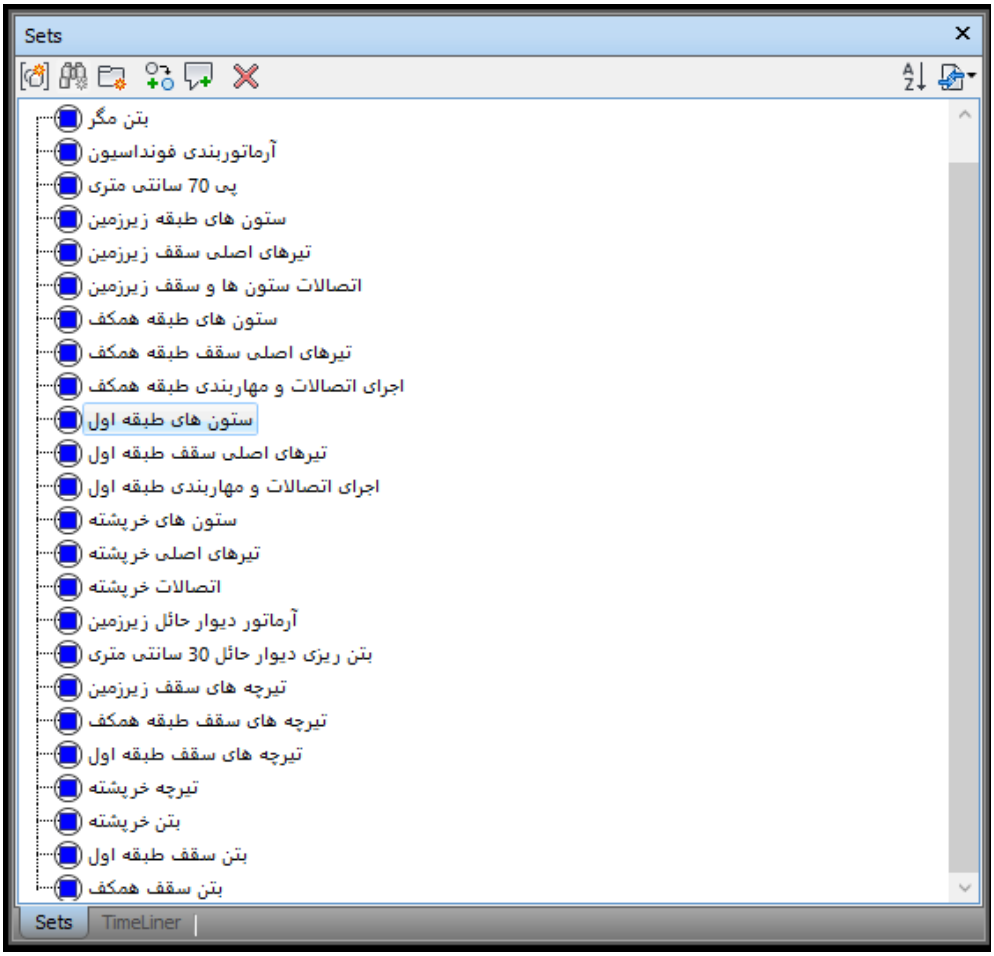
Tasks | Data Sources | Configure | Simulate

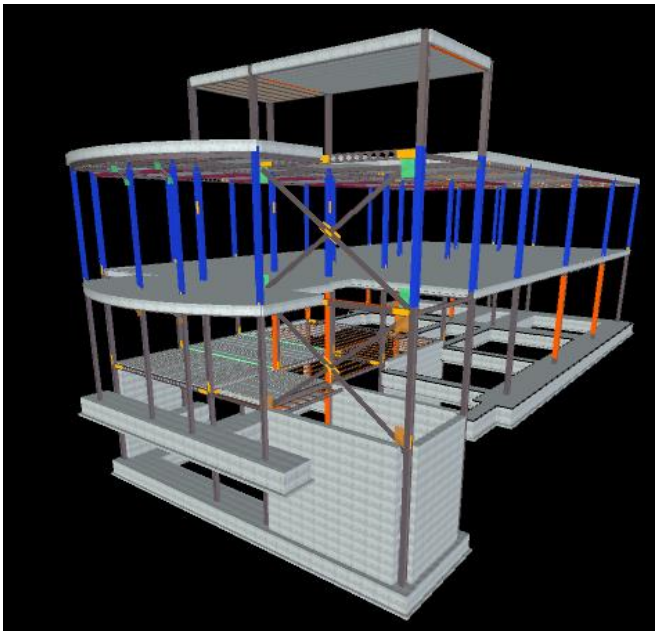
Add Task | Attach

نام فعالیت	تاریخ شروع	تاریخ پایان	حالت اجرایی
شروع	2/25/2021	2/25/2021	mode 1
خاکبرداری و پی کنی	2/25/2021	3/5/2021	mode 1
بتن مگر	3/6/2021	3/8/2021	mode 1
آرماتوربندی فونداسیون و ریشه های دیوار حائل	3/9/2021	3/19/2021	mode 2
قالب بندی فونداسیون	3/20/2021	3/30/2021	mode 1
بتن ریزی فونداسیون	3/31/2021	4/1/2021	mode 2
ساخت و برپایی ستون های طبقه زیرزمین	4/2/2021	4/12/2021	mode 1
ساخت و برپایی تیر های اصلی سقف و راه پله طبقه زیرزمین	4/13/2021	4/21/2021	mode 1
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه زیرزمین	4/22/2021	4/30/2021	mode 2
ساخت و برپایی ستون های طبقه همکف	4/13/2021	4/28/2021	mode 1
ساخت و برپایی تیر های اصلی سقف طبقه و راه پله همکف	4/29/2021	5/7/2021	mode 1
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه همکف	5/8/2021	5/11/2021	mode 2
ساخت و برپایی ستون های طبقه اول	4/29/2021	5/14/2021	mode 1
ساخت و برپایی تیر های اصلی و راه پله طبقه اول	5/15/2021	5/23/2021	mode 1
اجرای اتصالات تکمیلی طبقه اول	5/24/2021	5/29/2021	mode 1
ساخت و برپایی ستون های خرپشته	5/15/2021	5/20/2021	mode 1
ساخت و برپایی تیر های اصلی خرپشته	5/21/2021	5/24/2021	mode 1
اجرای اتصالات تکمیلی خرپشته	5/25/2021	5/27/2021	mode 1
آرماتوربندی دیوار های حائل بتنی زیرزمین	4/22/2021	5/22/2021	mode 1

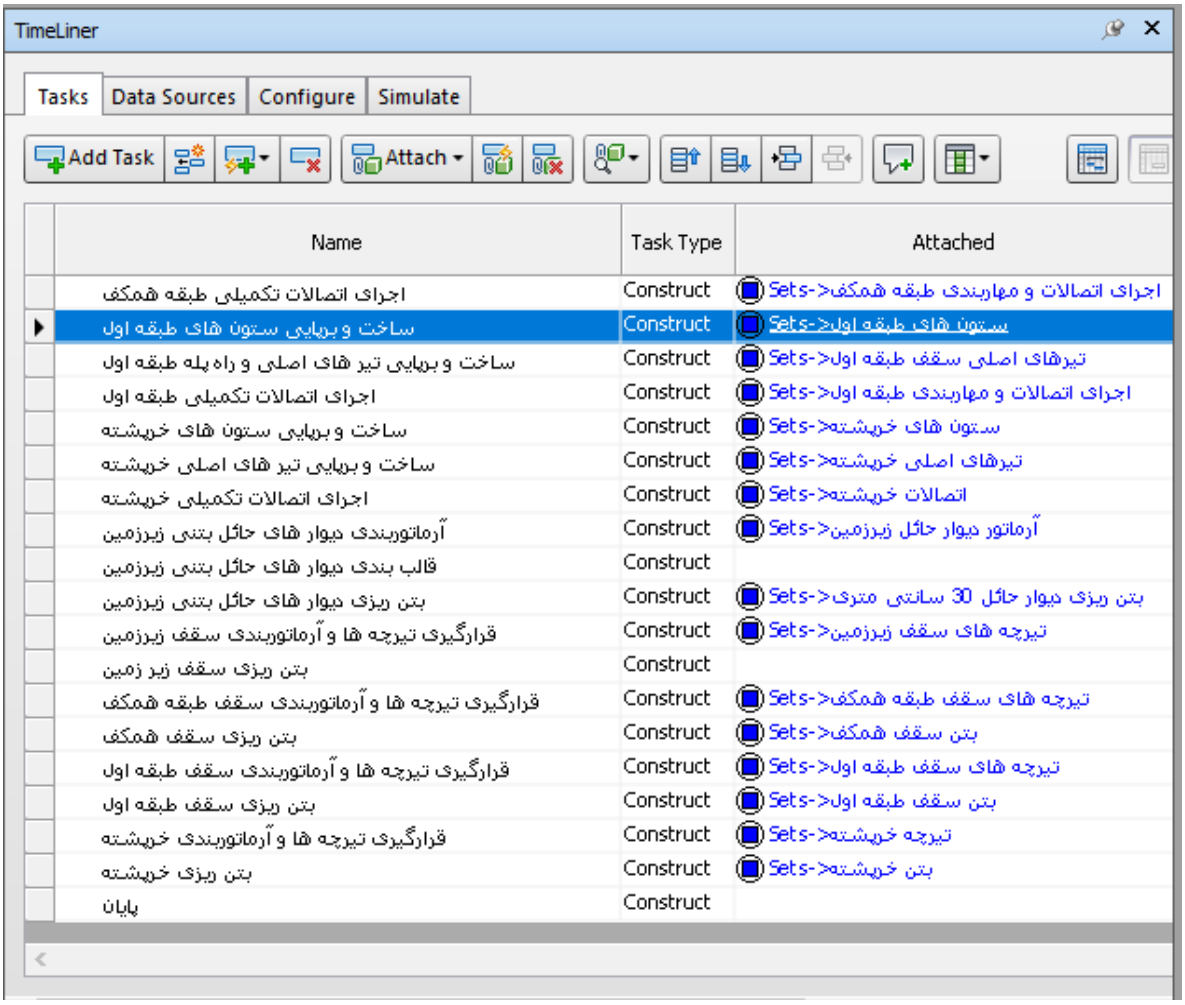
شکل ۴-۸- اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها در ابزار TimeLiner

در گام بعد به‌منظور انجام فرآیند شبیه‌سازی، بایستی المان‌های مدل سه‌بعدی به فعالیت‌های پروژه ارتباط داده شوند. بدین منظور، ابتدا هر یک از مجموعه‌های تعریف‌شده در قسمت Selection Sets، انتخاب شده و سپس به‌وسیله‌ی Attach Sets وارد ابزار TimeLiner می‌شود. لازم به ذکر است که در قسمت Task Type با توجه به این مطلب که فعالیتی مربوط به تخریب سازه وجود ندارد، گزینه‌ی Construct برای تمامی فعالیت‌های پروژه، فعال می‌شود. به همین ترتیب برای سایر المان‌ها نیز این فرآیند انجام می‌شود که برای ستون‌های طبقه‌ی اول به‌طور نمونه در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.





شکل ۴-۹- انتخاب مجموعه‌ی المان‌های مربوط به ستون‌های طبقه‌ی اول در Selection Sets



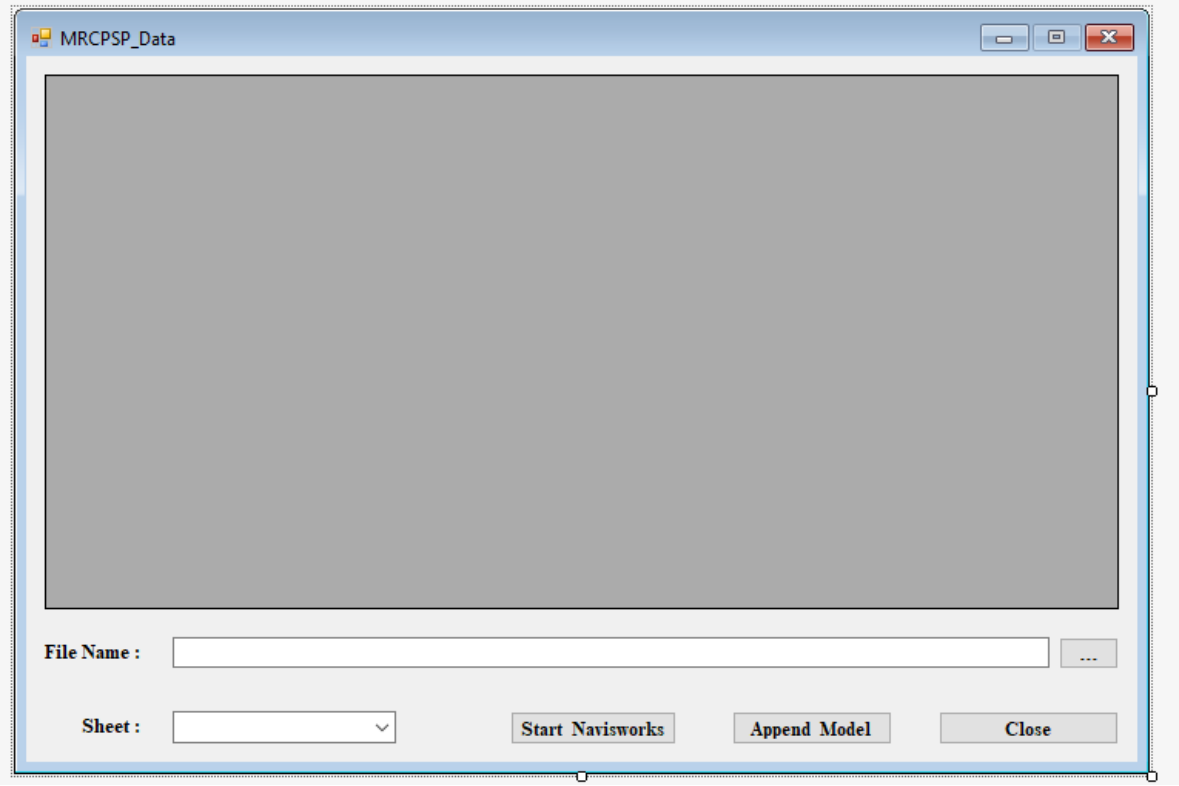
شکل ۴-۱۰- پیوست کردن مجموعه‌ی المان‌ها به فعالیت‌های تعریف‌شده در مدل پژوهش

پیش از آن‌که فرآیند شبیه‌سازی صورت گیرد، کد برنامه‌ی یک تابع API جهت برقراری ارتباط میان مدل سه‌بعدی و اطلاعات مسئله‌ی MRCPSP در visual studio نوشته می‌شود. این کد API به کاربر کمک می‌کند تا علاوه بر مشاهده‌ی کامل اطلاعات مسئله حین زمان‌بندی در نرم‌افزار Navisworks Manage، بتواند با ایجاد تغییرات در داده‌های پروژه و یا تکمیل آن، نتایج را با سرعت بیشتری بررسی کرده و مدل را به‌روزرسانی نماید. جهت دسترسی به نرم‌افزار Navisworks Manage و نیز فایل اِکسل تعریف‌شده در بخش‌های قبل، بایستی در هنگام کد نویسی از فایل با فرمت dll استفاده شود. dll، پیوندی پویا میان برنامه‌های مختلف می‌باشد که درون آن می‌توان انواعی از داده‌ها همانند کد، تصویر، صوت و غیره را قرار داد.

فایل‌های dll، قابلیت بالایی ازنظر صرفه‌جویی در مصرف حافظه دارند. درواقع هر قسمت از dll که فراخوانی می‌شود همان قسمت به حافظه وارد شده و در صورت عدم نیاز نیز از حافظه خارج می‌شود. درواقع دلایل استفاده از این فایل‌ها را می‌توان شامل موارد زیر دانست:

- توانایی اشتراک کردن کد بین چند برنامه و حتی خود ویندوز
- استفاده مجدد از کدهای نوشته‌شده
- استفاده بهینه از منابع ویندوز و منابع سیستمی
- جدا کردن کدهای مختلف و ارتباط دادن آن‌ها با یکدیگر

بدین منظور کد مربوط به فرآیند ذکرشده، با تنظیم یک فرم در محیط visual studio تحت زبان برنامه‌نویسی C# نوشته شده و پس اجرای کد مربوطه، فرم موردنظر در قالب شکل ۴-۱۱ به دست می‌آید.



شکل ۴-۱۱- فرم تنظیم‌شده در visual studio با استفاده از API نویسی در پژوهش حاضر

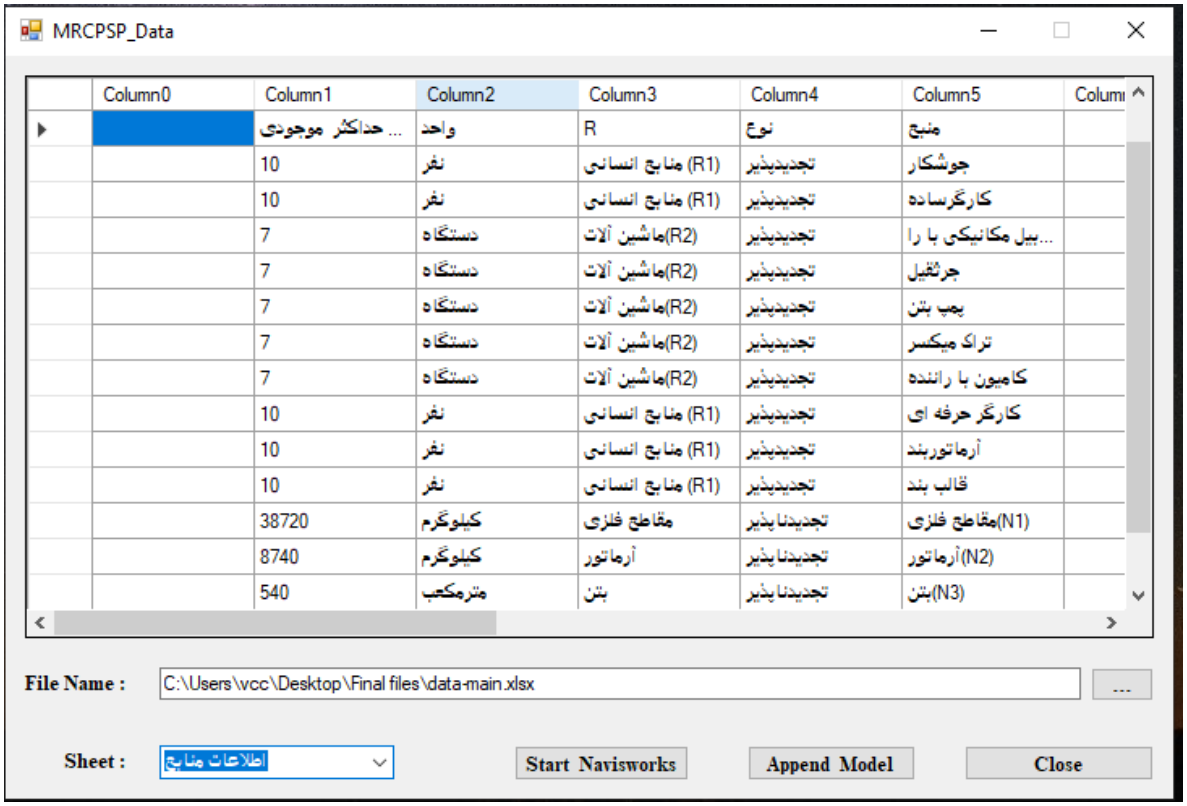
فرم ایجادشده در شکل ۴-۱۱ به دو بخش تقسیم شده که هرکدام، با کد API منحصربه‌فرد خود نوشته‌شده است. بخش اول کد مربوط به استخراج اطلاعات داده‌های موجود در یک فایل اِکسل دلخواه و بخش دوم آن، ارتباط با نرم‌افزار Navisworks Manage برای دسترسی به مدل سه‌بعدی است که در کد نویسی این بخش از فایل Autodesk.Navisworks.Api.dll استفاده شده است.

قسمت‌های مختلف این فرم به ترتیب زیر اجرا می‌شوند:

- Start Navisworks و Append Model: در این بخش نرم‌افزار مربوطه اجرا شده و سپس فایل مربوط به مدل چهاربعدی پژوهش حاضر، پیوست می‌گردد. این فایل شامل المان‌های مدل سه‌بعدی و قسمتی از اطلاعات مسئله در ابزار TimeLiner، می‌باشد.

- File Name و Sheet: در این بخش پیش از اینکه فرآیند شبیه‌سازی آغاز گردد، فایل اِکسل اطلاعات پروژه، انتخاب شده و داده‌های آن در قسمت بالایی فرم نمایش داده می‌شود. نام فایل داده‌های پروژه و صفحات مختلف موجود آن نیز در این بخش قابل‌مشاهده هستند.

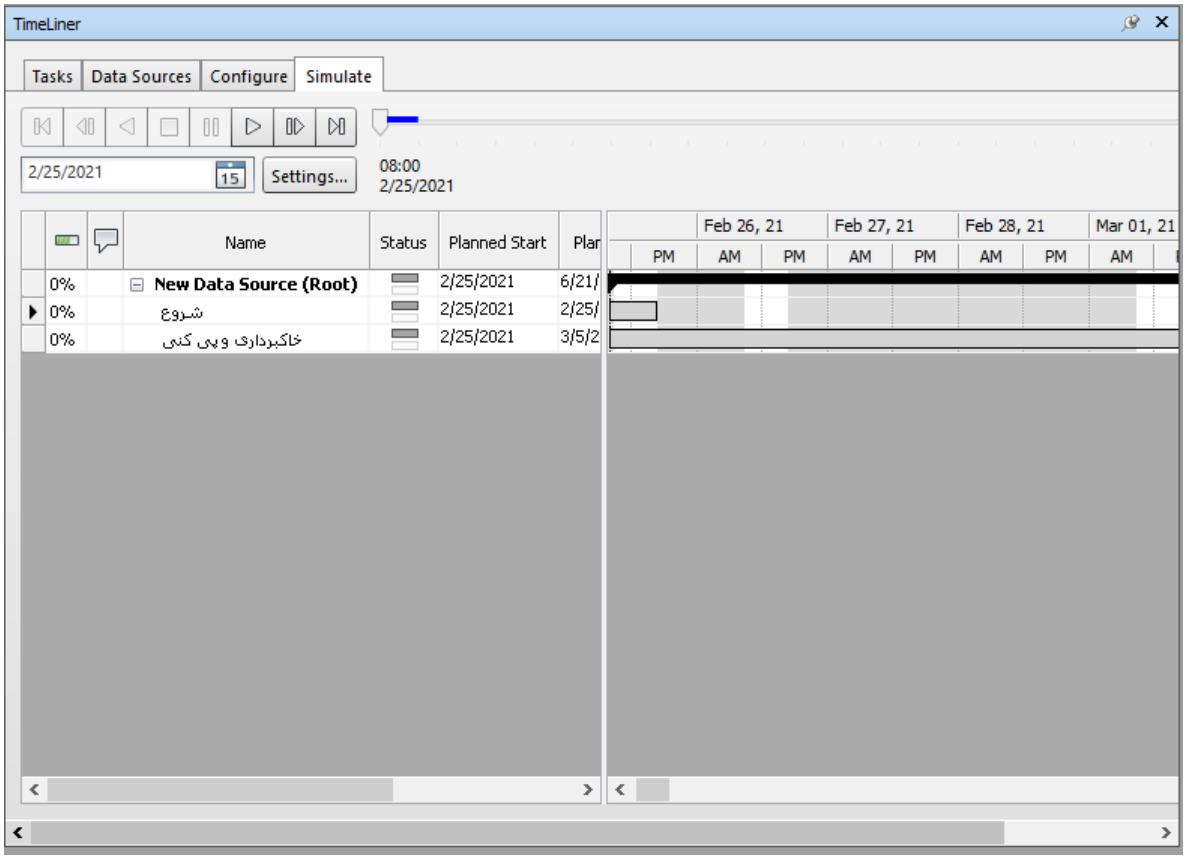
شکل ۴-۱۲، نتایج اجرای فرآیند فوق را نمایش می‌دهد.



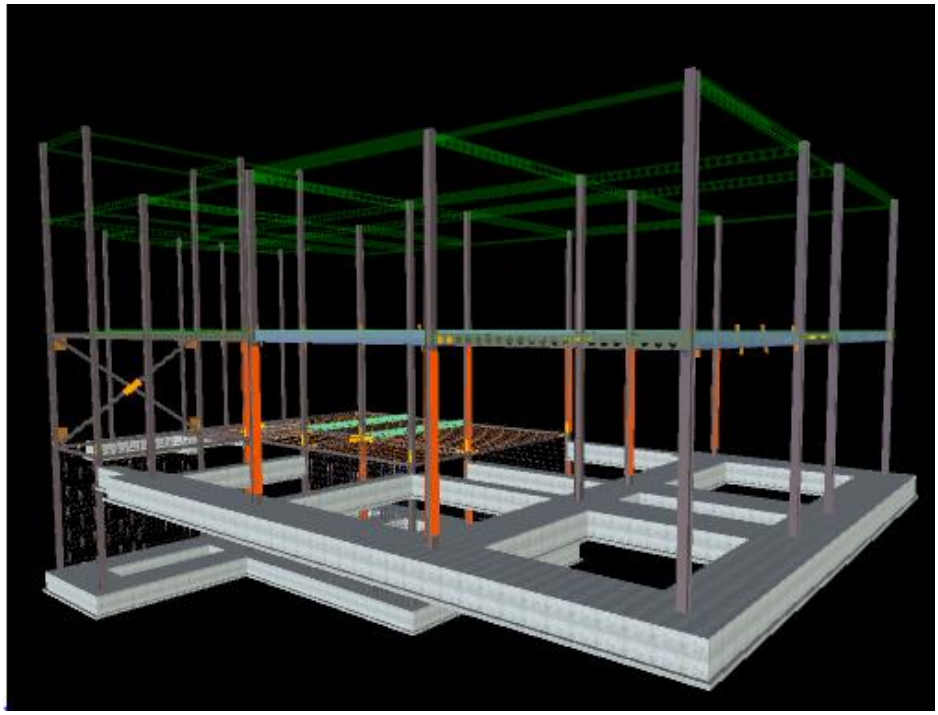
شکل ۴-۱۲- ورود اطلاعات مسئله‌ی MRCPSP به فرم ایجادشده در visual studio

پس از اجرای مراحل فوق، فرآیند شبیه‌سازی آغاز می‌گردد. پیش از اجرای دستور Simulation در ابزار TimeLiner، نمودار گانت مربوط به زمان‌بندی پروژه در ابتدای فرآیند فقط فعالیت مجازی شروع و فعالیت مربوط به خاکبرداری و پی‌کنی را نشان می‌دهد و هیچ اِلمانی از سازه در ابتدای کار مشاهده نمی‌شود. پس اجرای این دستور، فعالیت‌های پروژه همزمان با پیشرفت نمودار گانت به ترتیب اولویت در TimeLiner نمایش داده شده و در حین پیشرفت این نمودار، تمامی المان‌های مدل سه‌بعدی که قبلاً به

فعالیت‌ها پیوست شده بودند، به‌صورت یک انیمیشن نمایش داده می‌شوند تا درنهایت با اتمام فرآیند زمان‌بندی در نمودار گانت، شکل اولیه‌ی سازه نمایش داده شود. فرآیند مذکور در اَشکال ۴-۱۳، ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- نمودار گانت مدل پژوهش حاضر در ابتدای فرآیند شبیه‌سازی



شکل ۴-۱۴- شبیه‌سازی مدل در Navisworks Manage

شکل ۴-۱۵- اتمام فرآیند شبیه‌سازی مدل و نمایش زمان اتمام پروژه در Navisworks Manage

۴-۳- اعتبار سنجی

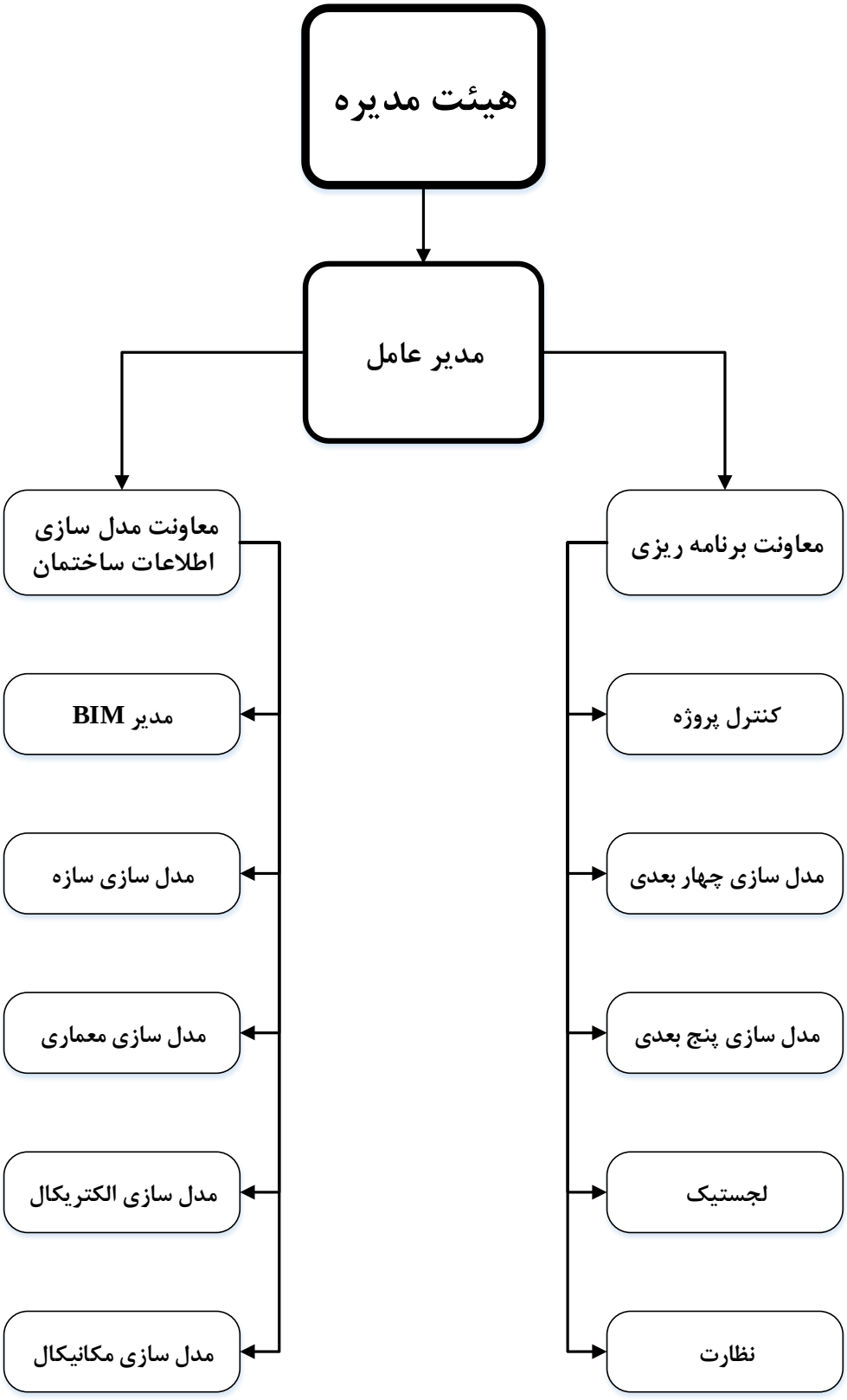
در این بخش بررسی می‌شود که نتایج حاصل از پژوهش حاضر تا چه میزان قابلیت اطمینان و اعتماد دارد. سه روش کلی در اعتبار سنجی نتایج عبارت‌اند از:

- تحقیقات آزمایشگاهی: استفاده از نمونه‌های شاهد
- کارهای آماری: استفاده از یک پرسش‌نامه جهت مقایسه با پژوهش‌های گذشته و یا پرسش‌نامه‌ای که به‌طور مجزا با هدف اعتبار سنجی تهیه می‌گردد.
- الگوبرداری از کار دیگران یا بنچ مارکینگ[۷۴]: در این روش، کاری که قبلاً در زمینه‌ی تحقیق حاضر انجام شده، توسط شخص پژوهشگر نیز انجام می‌شود و نتایج آن، با نتایج حاصل از پژوهش مقایسه می‌گردد.

با توجه به روش پژوهش حاضر که در فصل سوم بیان شد، دو روش نخست نمی‌تواند برای صحت سنجی نتایج مورداستفاده قرار گیرد. ازآنجایی‌که پژوهشی در این زمینه صورت نگرفته است و پروژه‌ی واقعی پیرامون موضوع این پایان‌نامه وجود ندارد تا مطالعه‌ی موردی بر روی آن انجام گیرد، اعتبار سنجی نتایج حاصل، با استفاده از نظرات کارشناسان و خبرگان حوزه‌ی BIM و زمان‌بندی در شرکت توسعه‌ی فناوری بایا بیم انجام شده که چارت سازمانی مربوط به حوزه‌های تخصصی این کارشناسان در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. در انجام مطالعه‌ی موردی بر روی مدل فرضی که در بخش‌های قبل صورت گرفت، نتایج حاصل‌شده، بازخورد مثبتی از طرف معاونت برنامه‌ریزی داشته و با انجام یک مقایسه‌ی منطقی مطابق با انتظار کارشناسان، چارچوب پژوهش مورد راستی آزمایی قرارگرفته است. از دیدگاه معاونت مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و برنامه‌ریزی، چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش، با داشتن مزایایی همچون برآورد دقیق میزان منابع تجدید ناپذیر، استفاده از ابزار TimeLiner جهت بصری سازی فرآیند ساخت و ایجاد توابع API

[74]Benchmarking

برای دسترسی آسان‌تر به اطلاعات پروژه، به تسهیل و یکپارچه‌سازی فرآیند حل مسئله‌ی MRCPSP به کمک فناوری BIM کمک شایانی می‌نماید.



شکل ۴-۱۶- چارت سازمانی شرکت توسعه‌ی فناوری بایا بیم در حوزه‌های BIM و زمان‌بندی

۴-۴- جمع‌بندی

در این فصل، نتایج پژوهش با پیاده‌سازی چارچوب ارائه‌شده در یک مدل فرضی در سه مرحله‌ی کلی شامل استخراج داده‌ها به کمک BIM، حل مسئله‌ی MRCPSP به کمک الگوریتم فرا ابتکاری PSO و درنهایت مدل‌سازی چهاربعدی به کمک تابع API، حاصل گردید. سپس به‌منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل از پژوهش، از نظرات کارشناسان حوزه‌ی زمان‌بندی و BIM استفاده شد که بر کارا بودن چارچوب پیشنهادی جهت زمان‌بندی مبتنی بر BIM و نیز الگوریتم به کار رفته در این پژوهش صحه می‌گذارد. در فصل آتی به جمع‌بندی مطالب ذکرشده در پژوهش حاضر و ارائه‌ی پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی پرداخته می‌شود.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا موضوع و روش پژوهش به‌طور مختصر بیان شده و سپس مهم‌ترین نتایج حاصل‌شده در فصل چهارم توضیح داده می‌شود. در گام بعد پاسخ سؤالاتی که در فصل نخست مطرح گشته، بیان خواهد شد و در انتهای این فصل نیز نوآوری‌های پژوهش حاضر ذکر شده و پیشنهاداتی برای انجام تحقیقات آتی بیان خواهد شد.

۵-۲- ارائه‌ی نتایج

مطابق با فصول اول و دوم پژوهش حاضر، توجه به استفاده از فناوری BIM در چرخه‌ی حیات پروژه و به‌ویژه ارتباط آن بازمان بندی پروژه‌های ساختمانی که در آن‌ها محدودیت منابع وجود دارد، در سال‌های اخیر اهمیت زیادی پیدا کرده است. با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه‌ی زمان‌بندی و BIM مشخص شد که موضوع چند حالته بودن در محدودیت منابع کمتر موردتوجه قرارگرفته است. لذا در این پژوهش، چارچوبی مبتنی بر فناوری BIM جهت تسهیل و یکپارچه‌سازی حل مسئله‌ی MRCPSP ارائه شده است. در روش پژوهش حاضر، ابتدا اطلاعات موردنیاز برای حل مسئله به کمک مدل BIM استخراج شده و در گام بعد با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری PSO، به حل مسئله‌ی MRCPSP پرداخته شد. در انتهای کار نیز به کمک API نویسی، ارتباط میان داده‌های مسئله با مدل سه‌بعدی و نیز اجرای فرآیند شبیه‌سازی ساخت مدل به همراه نمایش نمودار گانت پروژه انجام پذیرفت.

مطابق با فصل چهارم، نتایج حاصل‌شده از پیاده‌سازی چارچوب ذکرشده بر روی یک مدل فرضی و اعتبار سنجی آن‌ها توسط کارشناسان حوزه‌ی زمان‌بندی و BIM حاکی از آن است که استفاده از بعد چهارم این فناوری به کمک ابزار TimeLiner، نمایش زمان‌بندی و نیز شبیه‌سازی فرآیند ساخت را تسهیل نموده و استفاده از ابزار Quantification، سرعت و دقت در برآورد مقادیر منابع تجدید ناپذیر و به‌تبع آن تخمین

منابع تجدید پذیر و زمان اولیه‌ی فعالیت‌ها را افزایش می‌دهد. استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ذکرشده نیز نسبت به سایر روش‌های حل مسئله‌ی MRCPSP، در کاهش زمان حل مسئله مؤثر بوده و کارایی الگوریتم استفاده‌شده جهت بهبود در جواب‌ها مناسب ارزیابی شده است. همچنین استفاده از توابع API جهت مشاهده‌ی همزمان اطلاعات مسئله و فرآیند شبیه‌سازی، به یکپارچه‌سازی چارچوب پژوهش کمک شایانی نموده و امکان به‌روزرسانی در پروژه و مشاهده‌ی تغییرات در نتایج حاصل را فراهم می‌نماید.

۵-۳- پاسخ به سؤالات پژوهش

در این بخش پرسش‌های پژوهش، مجدداً مطرح‌شده و بر اساس نتایجی که در فصل چهارم حاصل گردیده، پاسخ داده می‌شوند:

- مزایا و چالش‌های استفاده از BIM در حل مسئله‌ی MRCPSP کدام‌اند.
- استفاده از توابع API، چه کمکی به یکپارچگی فرآیند حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از BIM می‌نماید.
- استفاده از چارچوب ارائه‌شده در پژوهش تا چه میزان می‌تواند در پروژه‌های واقعی مؤثر باشد.

در پاسخ به پرسش اول، می‌توان گفت که قابلیت بصری سازی فرآیند ساخت و ایجاد مدل چهاربعدی برای مسئله‌ی MRCPSP در ابزارهای مربوط به فناوری BIM، افزایش سرعت و دقت در برآورد مقادیر منابع تجدید ناپذیر، امکان به‌روزرسانی مدل مسئله و مشاهده‌ی دقیق‌تر تغییرات در نتایج حاصل‌شده در پروژه حین استفاده از فناوری BIM و امکان افزودن اطلاعات تکمیلی مربوط به پروژه، از مزایای به‌کارگیری فناوری BIM در حل مسئله‌ی MRCPSP می‌باشد. اما چالش‌هایی نیز در این بین وجود دارد که می‌توان به مواردی همچون عدم آگاهی و درک صحیح نسبت‌ها به کاربردها و ابزارهای BIM، هزینه‌ی استفاده از برخی ابزارهای BIM در سازمان‌ها و نهادهای کنترل و برنامه‌ریزی پروژه و ناقص بودن اطلاعات اولیه‌ی

پروژه که به‌تبع آن ورودی مسئله‌ی MRCPSP نیز دچار نقصان شده و باعث اختلال در فرآیند زمان‌بندی پروژه می‌گردد، اشاره کرد.

در پاسخ به پرسش دوم می‌توان اظهار داشت که با توجه به نتایج ارائه‌شده، کاربر می‌تواند با استفاده از تابع API به‌عنوان یک رابط برنامه‌ی مناسب جهت برقراری ارتباط میان ابزارهای مختلف، همزمان با اجرای مدل چهاربعدی، کلیه‌ی اطلاعات مربوط به پروژه را در فرم تشکیل‌شده به‌وسیله‌ی این تابع، مشاهده نماید که این موضوع به یکپارچه شدن فرآیند مربوط به پیاده‌سازی چارچوب مسئله کمک می‌کند.

در مورد پرسش سوم با توجه به اعتبار سنجی نتایج که در فصل قبل انجام گرفت، استفاده از چارچوب ارائه‌شده در پژوهش می‌تواند در افزایش کارایی و دقت در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌های ساخت در واقعیت مناسب باشد و به هماهنگی و تعامل میان بخش‌های مختلف پروژه کمک کند. البته این چارچوب در پروژه‌ای با مقیاس کوچک پیاده‌سازی شده است و تخمین برخی از پارامترهای لازم جهت حل مسئله‌ی MRCPSP مانند منابع تجدید پذیر و زمان اولیه‌ی فعالیت‌های پروژه‌هایی با مقیاس بزرگ صرفاً بر اساس سوابق و تجربیات گذشته رویکرد مناسبی نخواهد بود.

۵-۴- نوآوری‌های پژوهش

موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نوآوری‌های پژوهش حاضر مطرح نمود:

- در نظر گرفتن منابع تجدید ناپذیر و چند حالته بودن فعالیت ها در حل مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با استفاده از فناوری BIM
- انتقال خروجی مسئله‌ی MRCPSP به ابزار TimeLiner در نرم‌افزار Navisworks Manage جهت نمایش نمودار گانت پروژه و مدل‌سازی چهاربعدی
- یکپارچه سازی فرآیند زمان بندی مسئله به جهت استفاده همزمان از تابع API و ابزار TimeLiner جهت برقراری ارتباط میان اطلاعات مسئله‌ی MRCPSP با مدل چهاربعدی

۵-۵- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی که در این حوزه قابل انجام هستند، شامل موارد زیر است:

- خودکار سازی فرآیند زمان‌بندی و تبادل اطلاعات میان مدل BIM و خروجی مسئله‌ی MRCPSP
- ایجاد انقطاع در فعالیت‌های پروژه
- حل مسئله‌ی MRCPSP با چندین هدف به‌طور همزمان مانند بهینه‌سازی زمان و هزینه
- در نظر گرفتن میزان منابع مورداستفاده و زمان فعالیت‌ها به‌صورت غیرقطعی به‌منظور نزدیک شدن مدل به پروژه‌های واقعی
- اضافه شدن مدل معماری و تأسیسات جهت بهبود و تکمیل نتایج حاصل از پژوهش

فهرست مراجع

[۱] A. Sprecher, "Network Decomposition Techniques For Resource-Constrained Project Scheduling," vol. 53, no. 4, pp. 405-414, 2002.

[۲] J. D. Wiest, "The Scheduling Of Large Projects With Limited Resources," Carnegie Inst Of Tech Pittsburgh Pa Graduate School Of Industrial Administration, 1962.

[۳] B. Yang, J. Geunes, O. brien, "Resource-Constrained Project Scheduling: Past Work And New Directions," 2001.

[۴] S. E. Elmaghraby ,Activity Networks: Project Planning And Control By Network Models, 1977.

[۵] S. Kubba, Handbook Of Green Building Design And Construction: Leed, Breeam, And Green Globes. butterworth-heinemann, 2012.

[۶] National Institute of Building Sciences (NIBS), United States National Building Information Modeling Standard: Version 1 – Part 1: Overview, Principles and Methodologies. NIBS, 2007.

[۷] J. Crowther and S. Ajayi,"Impacts Of 4D Bim On Construction Project Performance," pp. 1-14, 2019.

[۸] S. Hartmann and D. Briskorn, "A Survey Of Variants And Extensions Of The Resource-Constrained Project Scheduling Problem," vol. 207, no. 1, pp. 1-14, 2010.

[۹] L. Wang, C. Fang, "An Effective Estimation Of Distribution Algorithm For The Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem," vol. 39, no. 2, pp. 449-460, 2012.

[۱۰] S. Azhar, "Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, And Challenges For The AEC Industry," vol. 11, no. 3, pp. 241-252, 2011.

[۱۱] ربیعی، علی و حیدری، علی, "بررسی اثر مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) بر کاهش زمان ساخت پروژه ها بر اساس حجم کار در ایران", کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهر سازی ایران معاصر, ۱۳۹۶.

[۱۲] H. Kerzner, Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons, 2017.

[۱۳] ذاکرمشفق، مسعود و خلیل زاده، محمد, "افزودن حوزه دانشی مدیریت موفقیت پروژه به PMBOK", سیزدهمین کنفرانس بین المللی مدیریت پروژه, ۱۳۹۶.

[۱۴] H. Jia, J. Y. Fuh, A. Y. Nee, Y. zhang, "Integration Of Genetic Algorithm And Gantt Chart For Job Shop Scheduling In Distributed Manufacturing Systems," vol. 53, no. 2, pp. 313-320, 2007.

[۱۵] J. Weglarz, "Project Scheduling: Recent Models, Algorithms And Applications", springer science & business media, 2012.

[۱۶] O. Giran, R. Temur, and g. bekdaş, "Resource Constrained Project Scheduling By Harmony Search Algorithm," vol. 21, no. 2, pp. 479-487, 2017.

[۱۷] P. B. Rao, k. chaitanya, "Resource Constrained Project Scheduling Problems-A Review Article," vol. 4, no. 3, pp. 1509-15, 2015.

[۱۸] A. M. Vartouni, L. M. Khanli, "A Hybrid Genetic Algorithm And Fuzzy Set Applied To Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem," vol. 26, no. 3, pp. 1103-1112, 2014.

[۱۹] زاهدی راد، مصطفی و بشیری، مهدی, "زمان بندی پروژه با منابع محدود با استفاده از ماتریس وابستگی روابط فازی" , دومین کنفرانس بین المللی مدیریت و کسب و کار, ۱۳۹۷.

[۲۰] A. Cesta, A. Oddi, and S. Smith, "A Constraint-Based Method For Project Scheduling With Time Windows," vol. 8, no. 1, pp. 109-136, 2002.

[۲۱] صفری، حسین و فقیه، علیرضا, "حل مسائل زمان بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری اصلاح شده", ۱۳۹۴.

[۲۲] C. Artigues, P. Michelon, and S. Reusser, "Insertion Techniques For Static And Dynamic Resource-Constrained Project Scheduling," vol. 149, no. 2, pp. 249-267, 2003.

[۲۳] P. Brucker, A .Drexl, R. Möhring, K. Neumann, and E. Pesch, "Resource-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models, And Methods," vol. 112, no. 1, pp. 3-41, 1999.

[۲۴] A. Naber and R. Kolisch, "Mip Models For Resource-Constrained Project Scheduling With Flexible Resource Profiles," vol. 239, no. 2, pp. 335-348, 2014.

[۲۵] O. Atli, C. Kahraman, "Resource-Constrained Project Scheduling Problem With Multiple Execution Modes And Fuzzy/Crisp Activity Durations," vol. 26, no. 4, pp. 2001-202, 2014.

[۲۶] V. Van Peteghem and M. Vanhoucke, "A Genetic Algorithm For The Preemptive And Non-Preemptive Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem," vol. 201, no. 2, pp. 409-418, 2010.

[۲۷] صادقی، محمدحسین و توکلی مقدم، رضا, "ارائه الگوریتم الکترومغناطیس تلفیقی برای مسئله زمان بندی پروژه با منابع محدود چند حالته", ۱۳۹۴.

[۲۸] P. Leyman and M. Vanhoucke, "A New Scheduling Technique For The Resource Constrained Project Scheduling Problem With Discounted Cash Flows," vol. 53, no. 9, pp. 2771-2786, 2015.

[۲۹] چشمی، راضیه, طارقیان، حامدرضا و یوسف زاده، حمیدرضا, "بهسازی پارامترهای حل کننده مسئله صدق پذیری برای زمان بندی پروژه با منابع محدود چندحالته", ۱۳۹۶.

[۳۰] قلی‌زاده، ابراهیم و افشارنجفی، بهروز, "حل مسئله دوهدفه زمان‌بندی چندحالته پروژه با درنظرگرفتن برنامه‌ریزی پرداخت و منابع محدود با استفاده از الگوریتم NSGA-II", ۱۳۹۷.

[۳۱] S. Asta, D. Karapetyan, A. Kheiri, E. Özcan, and A. Parkes, "Combining Monte-Carlo And Hyper-Heuristic Methods For The Multi-Mode Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Problem," vol. 373, pp. 476-498, 2016.

[۳۲] M. Reizgevičius, L. Ustinovičius, D. Cibulskienė, V. Kutut, and L. Nazarko, "Promoting Sustainability Through Investment In Building Information Modeling (BIM) Technologies: A Design Company Perspective," vol. 10, no. 3, p. 600, 2018.

[۳۳] L. Khemlani, "Agc's Winter 2011 BIMforum, Part 1", 2011.

[۳۴] فانی، فرزاد, طاهرخانی، روح الله و سبزه پرور، مجید, "کاربرد های مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در مدیریت پروژه های ساخت و ساز", اولین کنگره سراسری فناوری های نوین ایران با هدف دستیابی به توسعه پایدار, ۱۳۹۳.

[۳۵] A. Sharma, "An Interactive Visual Approach To Construction Project Scheduling", 2009.

[۳۶] D. Bryde, M. Broquetas, and J. Volm, "The Project Benefits Of Building Information Modelling (BIM)," vol. 31, no. 7, pp. 971-980, 2013.

[۳۷] E. Plebankiewicz, K. Zima, and M. Skibniewski, "Analysis Of The First Polish Bim-Based Cost Estimation Application," vol. 123, pp. 405-414, 2015.

[۳۸] S. Azhar, J. Brown, and R. Farooqui, "BIM-Based Sustainability Analysis: An Evaluation Of Building Performance Analysis Software," in proceedings of the 45th asc annual conference, vol. 1, no. 4, pp. 276-292, 2009.

[۳۹] ابراهیمی، حمیدرضا, گلابچی، محمود و شعفی، فرهنگ, "نقش مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در پیشگیری از انحراف هزینه در مدیریت پروژه", سومین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و طراحی شهری, ۱۳۹۷.

[۴۰] A. H. Oti, W. Tizani, F. Abanda, A. Jaly-Zada, and J. J. A. i. C. Tah, "Structural sustainability appraisal in BIM," vol. 69 ,pp. 44-58, 2016.

[٤١] M. S. Alshabab, A. Vysotskiy, M. Petrichenko, and T. Khalil, "BIM-Based Quantity Takeoff in Autodesk Revit and Navisworks Manage," in International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, pp. 413-421, 2019.

[٤٢] J. Park and H. Cai, "Automatic construction schedule generation method through BIM model creation," in Computing in Civil Engineering, pp. 620-627, 2015.

[٤٣] R. Barati, A. Charehzehi, C. N. J. C. Preece, and E. Research" ,Enhancing planning and scheduling program by using benefits of BIM-based applications," vol. 3, no. 5, pp. 41-48, 2013.

[٤٤] E. Krygiel and B. Nies, Green BIM: successful sustainable design with building information modeling. John Wiley & Sons, 2008.

[٤٥] X. Jiang, "Developments in cost estimating and scheduling in BIM technology," 2011.

[٤٦] H. Son, C. Kim, and Y. J. J. o. M. i. E. Kwon Cho, "Automated schedule updates using as-built data and a 4D building information model," vol. 33, no. 4, p. 04017012 , 2017.

[٤٧] H. Kim, K. Anderson, S. Lee, and J. J. A. i. C. Hildreth, "Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology," vol. 35, pp. 285-295, 2013.

[٤٨] W.-C. Wang, S.-W. Weng ,S.-H. Wang, and C.-Y. J. A. i. c. Chen, "Integrating building information models with construction process simulations for project scheduling support," vol. 37, pp. 68-80, 2014.

[۴۹] Y. Zhou, L. Ding, X. Wang, M. Truijens, and H. J. A. i. c. Luo, "Applicability of 4D modeling for resource allocation in mega liquefied natural gas plant construction," vol. 50, pp. 50-63, 2015.

[۵۰] H. Liu, M. Al-Hussein, and M. J. A. i. C. Lu, "BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints," vol. 53, pp. 29-43, 2015.

[۵۱] Q. Wang and M.-K. J. A. E. I. Kim, "Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018," vol. 39, pp. 306-319, 2019.

[۵۲] B. G. de Soto, A. Rosarius, J .Rieger, Q. Chen, and B. T. J. P. E. Adey, "Using a Tabu-search algorithm and 4D models to improve construction project schedules," vol. 196, pp. 698-705, 2017.

[۵۳] R. Volk, T. H. Luu, J. S. Mueller-Roemer, N. Sevilmis, and F. J. A. i. c. Schultmann, "Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information," vol. 91, pp. 226-245, 2018.

[۵۴] W. Chen, K. Chen, J. C. Cheng, Q. Wang, and V. J. J. A. i. c. Gan, "BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders," vol. 91, pp. 15-30, 2018.

[۵۵] H.-W. Wang, J.-R. Lin, and J.-P. J. A. i. c. Zhang, "Work package-based information modeling for resource-constrained scheduling of construction projects," vol. 109 ,p. 102958, 2020.

[۵۶] غمخوار، مهسا، "به کارگیری تکنولوژی مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) جهت کاهش زمان و هزینه ترمیم و بهسازی ساختمان ها"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، ۱۳۹۱.

[۵۷] قاسم، رضا و عباسیان جهرمی، حمیدرضا، "کاربرد فرآیند مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در برنامه ریزی و زمان بندی پروژه های عمرانی"، چهارمین همایش ملی معماری، عمران و محیط زیست شهری، ۱۳۹۴.

[۵۸] هادوی سیاه بومی، پویا و توکلان، مهدی، "مدل سازی چهاربعدی اطلاعات ساختمان با استفاده از نرم افزار مدیریت پروژه مبتنی بر شبیه سازی ساخت"، چهارمین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ۱۳۹۵.

[۵۹] هادوی سیاه بومی، پویا و خانزادی، مصطفی، "ارایه ی یک چارچوب برای تدوین برنامه ی زمانبندی در پروژه های ساخت با توجه به محدودیت فضا در کارگاه بر مبنای مدل سازی اطلاعات ساختمان"، چهارمین کنفرانس بین المللی فناوری های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، ۱۳۹۶.

[۶۰] رضازاده، محمد، رستمی نیکو، رضا و خانزادی، مصطفی، "ارائه سیستم جامع کنترل پروژه با ایجاد ارتباط بین زمان بندی مدل سه بعدی و پایگاه داده"، اولین کنفرانس بین المللی مدل سازی اطلاعات ساختمان، ۱۳۹۷.

[۶۱] گل نهالی، یوسف و روانشادنیا، مهدی، "ارایه مدل تولید خودکار برنامه زمان بندی پروژه های ساختمانی با استفاده از BIM" ، چهاردهمین کنفرانس بین المللی مدیریت پروژه، ۱۳۹۷.

[۶۲] خاکی، غلامرضا، "روش تحقیق با رویکرد پایان‌نامه‌نویسی"، نشر بازتاب، ۱۳۸۷.

[۶۳] صیفی، روح الله، "انواع تحقیقات علمی"، ششمین کنفرانس ملی مدیریت، اقتصاد و حسابداری، ۱۳۹۵.

[۶۴] 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, pp. 39-43, 1995.

[۶۵] H. Zhang, X. Li, H. Li, and F. J. A. i. c. Huang, "Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling," vol. 14, no. 3, pp. 393-404, 2005.

[۶۶] M. Shan, J. Wu, and D. Peng, "Particle swarm and ant colony algorithms hybridized for multi-mode resource-constrained project scheduling problem with minimum time lag," in 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp. 5898-5902, 2007.

[۶۷] R.-M. J. E. S. w. A. Chen, "Particle swarm optimization with justification and designed mechanisms for resource-constrained project scheduling problem," vol. 38, no. 6, pp. 7102-7111, 2011.

[۶۸] الماسیان، فریبز, "زمان بندی پروژه های ساخت با منابع محدود چندگانه در چندین حالت اجرایی و در نظر گرفتن عدم قطعیت در فعالیت ها با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری", ۱۳۹۶.

[۶۹] M. Khalilzadeh, F. Kianfar, A. Shirzadeh Chaleshtari, S. Shadrokh, and M. J. M. P. i. E. Ranjbar, "A modified PSO algorithm for minimizing the total costs of resources in MRCPSP," vol. 2012, 2012.

[۷۰] A. Lova, P. Tormos, M. Cervantes, and F. J. I .J. o. P. E. Barber, "An efficient hybrid genetic algorithm for scheduling projects with resource constraints and multiple execution modes," vol. 117, no. 2, pp. 302-316, 2009.

[۷۱] R. J. E. J. o. O. R. Kolisch, "Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation," vol. 90, no. 2, pp. 320-333, 1996.

[۷۲] J. Cui and L. Yu, "An efficient discrete particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem," in 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 858-862, 2014.

[۷۳] D. Zhang and Z. Gao, "Project time and cost control using building information modeling," in ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability, pp. 545-554, 2013.

[۷۴] K. G. Jafari, N. S. G. Sharyatpanahi, E. J. J. o. E. Noorzai, Design, and Technology, "BIM-based integrated solution for analysis and management of mismatches during construction," 2020.

[۷۵] غفوری، سعید و تقی زاده یزدی، محمدرضا, "ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله زمان بندی پروژه در شرایط محدودیت منابع و حل آن با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری کرم شب تاب و تبرید شبیه‌سازی شده", ۱۳۹۶.

پیوست‌ها

پیوست ۱- کد مربوط به حل مسئله‌ی MRCPSP با استفاده از الگوریتم PSO

```
function z=sumsum(A,N1,N2,N3,N4,x)
for i=1:28
  Asum(i)=A(i,x(i));
  N1sum(i)=N1(i,x(i));
  N2sum(i)=N2(i,x(i));
  N3sum(i)=N3(i,x(i));
  N4sum(i)=N4(i,x(i));
end
%z=sum(Asum).^2+(38720-sum(N1sum)).^2+(8740-sum(N2sum)).^2+(540-sum(N3sum)).^2+(11680-
sum(N4sum)).^2;
z=sum(Asum);
end


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Reading the Excell file
sheetNumber = 2; % second sheet counting from the left
excelFileName  = 'data.xlsx';
[numbers, text, textAndNumbers] = xlsread(excelFileName, sheetNumber);
numberOfRow = size(textAndNumbers,1);
A=[textAndNumbers(4:31,10),textAndNumbers(4:31,17)];


A=cell2mat(A);%% convert array to cell
A(isnan(A))=10000;%% Substituting NaN with 10000
% Reproducable SOURCES
N1=[textAndNumbers(4:31,6),textAndNumbers(4:31,13)];
N1=cell2mat(N1);
N1(isnan(N1))=0;
N2=[textAndNumbers(4:31,7),textAndNumbers(4:31,14)];
N2=cell2mat(N2);
N2(isnan(N2))=0;
```

```
N3=[textAndNumbers(4:31,8),textAndNumbers(4:31,15)];
N3=cell2mat(N3);
N3(isnan(N3))=0;
N4=[textAndNumbers(4:31,9),textAndNumbers(4:31,16)];
N4=cell2mat(N4);
N4(isnan(N4))=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Cost Function
funcost=@(a1,a2,a3,a4,a5,a6) sumsum(a1,a2,a3,a4,a5,a6);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PSO CODE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Constriction Coefficients
kappa = 1;
phi1 = 2.05;
phi2 = 2.05;
phi = phi1 + phi2;
chi = 2*kappa/abs(2-phi-sqrt(phi^2-4*phi));
nvar=1;
varsize=[28 1];
NPOP=10;
varmin=1; % lower bound
varmax=2; % upper bound
NUMIT=10;  %number of iteration
w=chi;
c1=chi*phi1;
c2=chi*phi2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PSO Structure
empty_particle.Position=[ ];
empty_particle.Velocity=[ ];
empty_particle.Cost=[ ];
empty_particle.Best.Position=[ ];
empty_particle.Best.Cost=[ ];
particle=repmat(empty_particle,NPOP,1);
GlobalBest.Cost=inf;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Initial Particles
```

```
for i=1:NPOP
    particle(i).Position= randi([varmin varmax],28,1);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:NPOP
    %particle(i).Position=[unifrnd(varmin1,varbase,1),unifrnd(varbase,varmax1,1)];
    particle(i).Velocity=zeros(varsize);
    particle(i).Cost=funcost(A,N1,N2,N3,N4,round(particle(i).Position));
    particle(i).Best.Position=particle(i).Position;
    particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;


    if (particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost)
        GlobalBest=particle(i).Best;
    end
end
BestCosts=zeros(NUMIT,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Main Loop
for it=1:NUMIT
    for i=1:NPOP
      particle(i).Velocity=w*particle(i).Velocity+c1*rand(varsize).*(particle(i).Best.Position-
particle(i).Position)+c2*rand(varsize).*(GlobalBest.Position-particle(i).Position);
      particle(i).Position=particle(i).Position+particle(i).Velocity;
      particle(i).Position=max(particle(i).Position,varmin);
      particle(i).Position=min(particle(i).Position,varmax);
      %% Forcing particle positions within the bound
      % Updationg the positions
      temp1=round(particle(i).Position);
      temp2=temp1;
      for j=1:28
        if A(j,temp1(j))==10000
          if temp1(j)==1
              temp2(j)=2;
         else
            temp2(j)=1;
         end
        end
```

```
        end
        particle(i).Position=temp2;
        %% Calculating CostFunction
        particle(i).Cost=funcost(A,N1,N2,N3,N4,(particle(i).Position));

        if (particle(i).Cost<particle(i).Best.Cost)
         particle(i).Best.Position=(particle(i).Position);
         particle(i).Best.Cost=particle(i).Cost;
        end
          if (particle(i).Best.Cost<GlobalBest.Cost)
         GlobalBest=particle(i).Best;
       end
    end

    BestCosts(it)=GlobalBest.Cost;
    w=1*w;
end
hold on
plot(1:it,BestCosts,'*')
%% Results
BestCosts;
modes=GlobalBest.Position;
%% Converting array to cell
mode1=num2cell(GlobalBest.Position);
%% Adding new columns
for i=1:28
    day(i)=A(i,modes(i));
end
day1=num2cell(day);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MODE(1,1)={'mode'};
MODE(2,1)={''};
MODE(3,1)={''};
for i=4:31
     MODE(i,1)=mode1(i-3);
end
MODE(32,1)={0};
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
DAY(1,1)={'days'};
DAY(2,1)={''};
DAY(3,1)={''};
for i=4:31
    DAY(i,1)=day1(i-3);
end
DAY(32,1)={sum(day)};
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ADD NULL COLUMN
for i=1:32
  nullcolumn(i,1)={''};
end
%% Saving the results in Sheet3
newData = [textAndNumbers,nullcolumn,MODE,DAY];
xlswrite('data.xlsx',newData,'Sheet3', 'A1');
```

پیوست ۲- اطلاعات مسئله‌ی استاندارد J1010_1

```
******************************************************************************
file with basedata            : mm10_.bas
initial value random generator: 19747
******************************************************************************
projects                      :  1
jobs (incl. supersource/sink ):  12
horizon                       :  77
RESOURCES
  - renewable                 :  2   R
  - nonrenewable              :  2   N
  - doubly constrained        :  0   D
******************************************************************************
PROJECT INFORMATION:
pronr.  #jobs rel.date duedate tardcost  MPM-Time
    1     10      0       17        9       17
******************************************************************************
PRECEDENCE RELATIONS:
jobnr.    #modes  #successors   successors
   1        1          3           2   3   4
   2        3          2           5  11
   3        3          2           5  11
   4        3          2           9  11
   5        3          1           6
   6        3          3           7   8  10
   7        3          1           9
   8        3          1           9
   9        3          1          12
  10        3          1          12
  11        3          1          12
  12        1          0
******************************************************************************
REQUESTS/DURATIONS:
jobnr. mode duration  R 1  R 2  N 1  N 2
```

1	1	0	0	0	0	0
2	1	1	7	0	7	0
	2	4	0	4	7	0
	3	6	0	3	7	0
3	1	1	0	6	2	0
	2	7	0	6	0	6
	3	10	8	0	0	6
4	1	1	7	0	6	0
	2	2	0	5	0	8
	3	10	0	5	5	0
5	1	1	9	0	9	0
	2	8	0	6	8	0
	3	10	8	0	8	0
6	1	3	0	9	0	7
	2	3	3	0	0	6
	3	4	0	8	7	0
7	1	5	5	0	0	6
	2	8	0	7	4	0
	3	10	0	6	0	4
8	1	2	4	0	8	0
	2	3	0	6	0	4
	3	7	4	0	0	4
9	1	7	0	6	8	0
	2	8	6	0	7	0
	3	9	0	3	6	0
10	1	3	7	0	7	0
	2	4	0	5	6	0
	3	5	0	3	0	1
11	1	4	0	2	4	0
	2	6	4	0	0	1
	3	6	0	2	0	1
12	1	0	0	0	0	0

****

RESOURCEAVAILABILITIES:

R 1	R 2	N 1	N 2
11	9	42	17

پیوست ۳- کد تابع API

```
using ExcelDataReader;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.IO;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using Autodesk.Navisworks.Api.Automation;

namespace MRCPSP_File_Reader
{
   public partial class Form1 : Form
   {
      private Func<object, ExcelDataTableConfiguration> ConfigureDataTable;
      public NavisworksApplication NwApp { get; private set; }
      public Form1()
      {
         InitializeComponent();
      }

      private void label1_Click(object sender, EventArgs e)
      {

      }

      private void textBox1_TextChanged(object sender, EventArgs e)
      {

      }
```

```
    DataTableCollection tableCollection;


    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
      using (OpenFileDialog openFileDialog = new OpenFileDialog() { Filter = "Excel 97-2003
Workbook|*.xlsx|Excel Workbook|*.xlsx" })
      {
        if(openFileDialog.ShowDialog()==DialogResult.OK)
        {
          txtFilename.Text = openFileDialog.FileName;
          using (var stream = File.Open(openFileDialog.FileName, FileMode.Open, FileAccess.Read))
          {
            using (IExcelDataReader reader = ExcelReaderFactory.CreateReader(stream))
            {
              DataSet result = reader.AsDataSet(new ExcelDataSetConfiguration());
              {
                ConfigureDataTable = (_) => new ExcelDataTableConfiguration() { UseHeaderRow =
true };
              };
              tableCollection = result.Tables;
              cboSheet.Items.Clear();
              foreach (DataTable table in tableCollection)
                cboSheet.Items.Add(table.TableName);
            }
          }
        }
    }

    private void comboBox1_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
    {
      DataTable dt = tableCollection[cboSheet.SelectedItem.ToString()];
      dataGridView1.DataSource = dt;
    }

    private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
    {
```

```
}

private void dataGridView1_CellContentClick(object sender, DataGridViewCellEventArgs e)
{

}

private void btStart_MouseUp(object sender, MouseEventArgs e)
{
   NwApp = new Autodesk.Navisworks.Api.Automation.NavisworksApplication();
   NwApp.Visible = true;
}

private void btAppend_MouseUp(object sender, MouseEventArgs e)
{
   try
   {
      var dg = new OpenFileDialog();
      if (dg.ShowDialog() == DialogResult.OK)
      {
            NwApp.AppendFile(dg.FileName);
      }
   }
   catch (Exception exception)
   {
      MessageBox.Show(exception.Message);
   }
}

protected override void OnClosing(CancelEventArgs e)
{
   NwApp.Dispose();
   base.OnClosing(e);
}

private void btClose_MouseUp(object sender, MouseEventArgs e)
{
```

```
            NwApp.Dispose();
        }
    }
}
```

Abstract

Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) is one of the most complex and useful problems in the knowledge field of project scheduling due to the lack of resources and Predecessor between project activities. The goal of solving this problem is to find a suitable sequence for performing the activities of a project and select the operating modes for each activity, in such a way that the various constraints of the project are simultaneously satisfied as well as certain measurement metrics, including time and cost of project execution. In the last decade, Building Information Modelling (BIM) has played a crucial role in the development of construction industry. The main purpose of this study is to present an integrated approach based on Building Information Modelling Technology to solve Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem with the aim of minimizing the project completion time. In the present study, first data are extracted to solve the problem, with the help of Building Information Model created in Autodesk Navisworks Manage, and in the next step, the problem model is programmed and solved in Matlab using Particle Swarm Optimization (PSO) using first step data. Finally, with the Application Programming Interface (API), which is written in visual studio and C# language, the issue output is transferred to the TimeLiner to 4D modelling and simulation of the construction process. Then the framework is implemented on an assumed model and the validation of the results of the research is done using the opinions of experts in the field of BIM and scheduling. These results show the effectiveness of the algorithm used in solving the MRCPSP problem and increasing the speed and accuracy in extracting data and facilitating the changes and updating the model.

Keywords: Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem, Building Information Modeling, Particles Swarm Optimization, Application Programming Interface

K. N. Toosi University of Technology

Faculty of Civil Engineering

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the

Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)

In Civil Engineering.

Providing an integrated BIM-based approach to schedule construction projects under multi-mode resource constraints

By:

Saeed Assari

Supervisor:

Yaghoub Alipouri Ph.D.

Summer 2021