

## طراحی مدلی برای برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد و تخفیف

عطا کاظمی \*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵ تاریخ چاپ: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

### چکیده

در این تحقیق به ارائه طراحی مدلی استوار برای برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد و تخفیف پرداخته شده است. با توجه به  $NP$ -Hard بودن مسأله، برای حل مسأله تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات ( $PSO$ ) استفاده شد و نتایج آن با الگوریتم‌های دقیق حل مسأله، مقایسه گردید. بر این اساس در ابتدا مسائل استاندارد تهیه شد، سپس با استفاده از رویکرد تاگوچی به تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی پرداخته شد. در نهایت بعد از حل مسئله نمونه به تحلیل پاسخ‌های حاصل پرداخته شد. نتایج تحقیق نشان داد در ۸ تست اول الگوریتم پیشنهادی به جواب بهینه مسأله خواهیم رسید اما با افزایش ابعاد مسأله، الگوریتم‌های دقیق حل مسأله برای بدست آوردن جوابهای کارا برای مسأله مناسب نبودند و الگوریتم تجمعی ذرات پیشنهادی به جوابهایی بهتر رسید. همچنین بیشترین خطا برای حل مسأله تحقیق در تست ۱۲ رخ داد.

### واژگان کلیدی

برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه، عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد، تخفیف.

<sup>۱</sup> نویسنده مسوول: ([kazemialborzgas@gmail.com](mailto:kazemialborzgas@gmail.com))

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

## ۱. مقدمه

امروزه پروژه‌ها، به خصوص پروژه‌های ساخت و ساز نقش عمده‌ای در پیشرفت و تکامل جوامع دارند، به طوری که تصور پیشرفت یک کشور بدون انجام پروژه‌های بزرگ غیر ممکن به نظر می‌آید (بیرجندی و موسوی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹). پروژه‌ها می‌توانند در ابعاد و اندازه‌های گوناگون و با اهدافی متفاوت طبقه بندی شوند. با این وجود یک خصوصیت مشترک در تمام پروژه‌ها وجود دارد و آن زمان لازم برای انجام پروژه است (آسیب و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۱).

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مناسب برای کنترل فعالیت‌های پروژه و همچنین کنترل هزینه‌ها و زمان در شاخه‌های مهندسی و اقتصادی از اهمیت بالا و قابل توجهی برخوردار است. به عنوان مثال در پروژه‌های عظیم ساخت و ساز نظیر ساخت فرودگاه، پالایشگاه، سد، قطار شهری و همچنین در پروژه‌های کوچکتری نظیر پروژه‌ی ساختمانی، ساخت یک قطعه، ساخت سوله‌ی جدید، تولید یک دارو و ...، داشتن یک طرح و زمان‌بندی مناسب اهمیت زیادی دارد به نحوی که از منابع پروژه بتوان حداکثر استفاده را برد و به هدف پروژه که می‌تواند مواردی نظیر کمینه کردن هزینه‌ها یا کاهش زمان انجام پروژه باشد دست یافت (آرخیپوف و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹). در حقیقت بدون داشتن یک برنامه‌ی زمان‌بندی مناسب، رسیدن به اهداف پروژه امری دشوار و در برخی شرایط غیر ممکن است (فرگانی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰؛ فاروق و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸).

روش‌های سنتی برای تعیین برنامه زمانی پروژه‌ها با حجم شدن اندازه‌ی پروژه‌ها تا حد زیادی کارآمدی خود را از دست داده چرا که واقعیات دنیای واقعی را به طور کامل مدنظر نمی‌گیرد. مدل سازی می‌بایست نمونه‌ی شبیه سازی شده‌ی شرایط واقعی باشد و اگر مدل نتواند واقعیات را به نحو مناسبی پوشش دهد، کاربردی ندارد و در صورت به کار گیری، نتایج نامناسبی ارائه می‌دهد (گارویش و ملنیکووا<sup>۶</sup>، ۲۰۱۹). از این جهت، در نظر گرفتن شرایطی که مدل را به واقعیت نزدیک‌تر کند بسیار ضروری است. در این راستا، تحقیق فعلی با مد نظر قرار دادن مواردی چون عدم قطعیت، تخفیف، توقفات تقویمی و نوع مواد مورد کاربرد در پروژه، در تلاش برای طراحی مدلی کاربردی و مبتنی بر شرایط واقعی دارد. از سویی دیگر، موضوعات مدیریت پروژه مانند زمان‌بندی و تامین منابع تصمیمات به هم پیوسته‌ای بوده و نگاه جداگانه و مجزا به این موضوعات از کیفیت و کاربردی بودن نتایج می‌کاهد (حسینی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۲۰). از این جهت، طراحی مدلی که تصمیمات زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تامین مواد را به شکل همزمان و یکپارچه ارائه کند مسأله‌ی چالش‌برانگیزی در تحقیقات محسوب می‌شود و از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو در این تحقیق به طراحی مدلی استوار برای

1 Birjandi and Mousavi

2 Acebes et al.

3 Arkhipov et al.

4 Fergany et al.

5 Farooq et al.

6 Gavrysh and Melnykova

7 Hoseini et al.

برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد و تخفیف پرداخته شده است.

در بخش بعدی مقاله به بررسی مبانی نظری و ادبیات پژوهش پرداخته می‌شود تا شکاف تحقیق و مفهوم متغیرهای تحقیق مشخص شود. سپس روش‌شناسی تحقیق تشریح می‌شود و در بخش بعد از آن یافته‌های تحقیق و نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل اطلاعات تحقیق ارائه می‌شود.

## ۲. مبانی نظری و ادبیات پژوهش

در شرایط واقعی مسائل و واقعیاتی وجود دارند که غفلت از آن‌ها می‌تواند از کیفیت مدل ارائه شده بکاهد. بنابراین در این پژوهش در نظر است تا چند موضوع مهم مورد توجه قرار گیرد. این موضوعات شامل تجدیدناپذیری<sup>۸</sup> مواد، فاسدشدنی بودن و همچنین فرض تخفیف در خرید اقلام مورد نیاز پروژه و عدم قطعیت و وقفه‌های تقویمی می‌باشد. در ادامه برای آشنایی بیشتر با این موضوعات، توضیحات کوتاهی از این موارد ذکر می‌شود (رحمان و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۲۱). در بیشتر پژوهش‌ها فرض می‌شود که فعالیت‌ها در یک وضعیت ایده آل انجام می‌گردند و زمان‌بندی ارائه شده می‌تواند به شکل دقیق منطبق بر برنامه اجرا گردد. در حقیقت، وجود فاکتورهای غیرقابل کنترل شامل عدم دسترسی به منابع، افزوده شدن فعالیت‌های غیر قابل پیش بینی به پروژه و شرایط بد آب و هوایی باعث تحقق نیافتن اهداف پروژه در مدت زمان معین می‌شود که این مسئله می‌تواند هزینه‌های زیاد و قابل ملاحظه‌ای به پروژه وارد آورد. از این روی، وجود فاکتورهای غیرقابل کنترل را می‌شود یکی از موضوعات اصلی پروژه‌های عمرانی ذکر نمود (هسیه و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۸). لذا اگر در برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته شده برای پروژه، سناریوهای متنوعی پیش بینی گردد و برنامه‌ریزی‌ها بر اساس آن‌ها صورت پذیرد، می‌شود تا حد قابل قبولی از تاثیر این فاکتورهای غیرقابل کنترل بر روی پروژه کم کرد (فرگانی و همکاران، ۲۰۲۰).

روش جدیدی که در سال‌های گذشته به منظور مقابله با عدم قطعیت داده‌ها در سناریوهای متنوع پیشنهاد شده است، رویکرد بهینه‌سازی استوار می‌باشد. در این روش، پاسخ‌هایی نزدیک به بهینه مدنظر هستند که با احتمال زیادی شدنی هستند و در برابر تغییرات مقاومند. به بیانی دیگر، با کمی چشم‌پوشی کردن از مقدار تابع هدف، شدنی بودن جواب حاصله در سناریوهای مختلف تضمین می‌گردد (برونی و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۸).

### ۲-۱. مواد تجدیدناپذیر و مواد فاسد شدنی

مواد تجدیدناپذیر موادی اطلاق می‌شوند که با اتمام یک فعالیت، میزان منابع تخصیص یافته به آن به تمام شده و دیگر از آن مقدار معین، نمی‌شود دوباره بهره گرفت. گچ، سیمان و مواد مصرفی در پروژه را می‌شود از جمله این دسته از منابع

8 Non-renewable

9 Rahman et al.

10 Hsieh et al.

11 Bruni et al.

نام نهاد. یکی از مواد تجدیدناپذیر<sup>۱۲</sup>، منابع فاسدشدنی<sup>۱۳</sup> هستند. منابع فاسدشدنی اقلامی می‌باشند که بعد از طی مدتی کوتاه فاسد شده و دیگر قابل بهره برداری نمی‌باشند. به عنوان مثال، بتن مخلوط شده برای پروژه‌ی عمرانی منبعی فاسد شدنی می‌باشد (چالشتری و شادرخ<sup>۱۴</sup>، ۲۰۱۱).

#### ۲-۲. تخفیف

یکی دیگر از واقعیات فعالیت‌های تجاری و کسب و کار، تخفیف است. برخی فروشندگان به ازای خرید در حجم معینی، به خریداران خود قیمت‌های پایین تری نسبت به قیمت استاندارد آن ارائه می‌دهند. به عنوان مثال چنانچه قیمت یک کالا  $p$  واحد پولی باشد، فروشنده به ازای خرید بیشتر از  $n$  عدد از این کالا، قیمت هر کالا را  $(p-nx)$  (عدد مثبت) ارائه می‌نماید به این امید که فروش کالاها بیشتر و تمایل خریداران به خرید کالا بیشتر گردد (تبریزی و قادری<sup>۱۵</sup>، ۲۰۱۵). با توجه به این که برای اجرای پروژه‌های عمرانی غالباً مقادیر فراوانی از مواد مصرفی مورد نیاز است، پیمانکاران و مدیران پروژه‌ها می‌توانند با برنامه‌ریزی مقادیر مناسب خرید مواد، پروژه را از تخفیفات کلی یا نمودی ارائه شده بهره مند نمایند. از این روی، در برنامه‌ریزی پروژه‌های با منابع محدود، یکی از تصمیمات مهمی که باید توسط مدیریت اتخاذ شود آن است که مواد را در چه بازه‌های زمانی و در چه بازه‌های مقداری خریداری نماید تا ضمن این که نیاز پروژه به منابع تامین می‌شود، پروژه از تخفیفاتی که تامین کنندگان ارائه می‌دهند بهره مند شود (تبریزی<sup>۱۶</sup>، ۲۰۱۸).

#### ۲-۳. عدم قطعیت

یکی دیگر از مواردی که در مسائل دنیای واقعی وجود دارد بحث عدم قطعیت در پارامترهای مسئله است. در شرایط واقعی برخی پارامترهای مسئله دارای عدم قطعیت می‌باشند که در نظر نگرفتن این عدم قطعیت منجر به کاهش اعتبار مدل می‌گردد. عدم قطعیت در پروژه‌های عمرانی نیز نقش پررنگی داشته و بر روی برنامه‌ریزی‌های مدیران پروژه تاثیرگذار است. مواردی نظیر تغییرات قیمت مواد، تغییرات هزینه‌های پروژه، تغییر در زمان اجرای فعالیت‌ها نسبت به آن چه برنامه‌ریزی شده بود و مواردی از این دست را می‌توان از جمله مهم‌ترین جنبه‌های تاثیر عدم قطعیت در پروژه‌های عمرانی دانست (آسبس و همکاران، ۲۰۲۱).

رویکردهای سنتی مواجهه با عدم قطعیت به اطلاعات اضافی نظیر توزیع احتمال و تابع عضوی نیازمند می‌باشند و کار با این رویکردها به دلیل حجم بالای داده‌های مورد نیاز دشوار است (برونی و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو استفاده از رویکردی مناسب جهت مواجهه با عدم قطعیت به منظور مواجهه با شرایط دنیای واقعی امری ضروری است.

12 Non-renewable resources

13 Perishable products

14 Chaleshtarti and Shadrokh

15 Tabrizi and Ghaderi

16 Tabrizi

## ۴-۲. وقفه‌های تقویمی

وقفه‌های تقویمی عبارتست از تعطیلات رسمی و مناسبت‌ها که در آن پیمانکار ملزم به تعطیل نمودن پروژه هستند (حبیبی و همکاران<sup>۱۷</sup>، ۲۰۱۹). مشکل وقفه‌های تقویمی از جمله‌ی مسائلی است که اگر در مدل سازی مسئله‌ی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه در نظر گرفته شود، برنامه‌ریزی ارائه شده بیشترین تطابق را با شرایط دنیای واقعی می‌تواند داشته باشد (احمدپور و قضاوتی<sup>۱۸</sup>، ۲۰۱۹).

با در نظر گرفتن مباحث و واقعیاتی نظیر وقفه‌های تقویمی، عدم قطعیت، تخفیفات، سناریوهای مختلف پروژه در تحقیق، انتظار می‌رود مدل یکپارچه‌ی زمان‌بندی و تامین مواد ارائه شده هر چه بیشتر با واقعیات جهان واقع منطبق گردد و خروجی‌های مدل ارائه شده برای افرادی که با برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌ها سر و کار دارند مفید باشد. در ادامه به معرفی پیشینه تحقیقات انجام شده در راستای موضوع تحقیق پرداخته می‌شود.

در بین تحقیقات انجام شده، یوان و همکاران<sup>۱۹</sup> (۲۰۲۱) در تحقیقی به مسئله زمان‌بندی پروژه چند هدفه با منابع محدود منابع با چند مهارت پرداخته‌اند. در این تحقیق یک مدل برنامه نویسی عدد صحیح مختلط، با هدف به حداقل رساندن زمان تکمیل پروژه و هزینه کل، توسعه یافته است. سپس، برای حل موثر این مشکل جدید، بازنمایی‌های راه حل موجود مرتبط و سازندگان برنامه را از ادبیات قبلی بررسی شده‌اند. نتایج تحقیق نشان داد نتایج تحقیق نشان داد طرح نمایش پیشنهادی ما و سازنده زمان‌بندی می‌تواند هم‌گرایی جبهه پارتو را بهبود بخشد، در حالی که سطح منابع را افزایش می‌دهد. اپراتور می‌تواند تا حد زیادی گسترش و تنوع جلو را بهبود بخشد. مورین و همکاران<sup>۲۰</sup> (۲۰۲۲) در تحقیقی به یک مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت‌های منابع جمع‌آوری شده دوره‌ای پرداخته‌اند و مدل مورد بررسی را با استفاده از برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط ارائه نموده‌اند. چن و همکاران<sup>۲۱</sup> (۲۰۲۲) یک چارچوب برنامه‌نویسی ژنتیکی فیلتر برای مسئله زمان‌بندی چند پروژه با منابع تصادفی تحت درج پروژه جدید ارائه کرده‌اند و نتایج مهمی در زمینه در نظر گرفتن منابع تصادفی به دست آورده‌اند. جوی و همکاران<sup>۲۲</sup> (۲۰۲۱) در تحقیقی به بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای مشکل زمان‌بندی پروژه با چند منبع محدود با سطوح منابع مختلف پرداخته‌اند و یک نسخه به‌روزرسانی شده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با سطوح مختلف منابع ارائه کرده‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان داد مدل تحقیق می‌تواند با استفاده از انواع منابع، تمام فعالیت‌ها را به طور موثر برنامه‌ریزی کند. همچنین ژیه و همکاران<sup>۲۳</sup> (۲۰۲۰) به توسعه الگوریتم ژنتیک برای زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع و عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان داد الگوریتم پیشنهادی، حداقل زمان تکمیل پروژه را با در نظر گرفتن

17 Habibi et al.

18 Ahmadpour and Ghezavati

19 Yuan et al.

20 Morin et al.

21 Chen et al.

22 Joy et al.

23 Xie et al.

محدودیت منابع اقتصادی و نیروی انسانی تولید می‌کند و این قابلیت را دارد که با اعداد فازی اجرا شده و جزئیات پروژه شامل زمان شروع، زمان پایان فعالیت‌ها و زمان تکمیل پروژه را به صورت اعداد فازی ارائه کند. مرور تحقیقات نشان می‌دهد تاکنون در مطالعات انجام شده به طراحی مدلی استوار برای برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد و تخفیف به طور همزمان پرداخته نشده و در این زمینه شکاف تحقیقاتی مشهود است.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

#### ۳-۱. شرح روش انجام تحقیق

این تحقیق با توجه به ماهیت مسأله اصلی تحقیق و همچنین اهداف، استراتژی، روش‌های گردآوری اطلاعات و روش‌های تحلیل اطلاعات مورد استفاده در آن، جزو تحقیقات کمی و کاربردی به شمار می‌رود. در این راستا مدلی استوار برای برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد و تخفیف ارائه شده است. برای حل مدل از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۲۴</sup> و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک<sup>۲۵</sup> و رویکرد تاگوچی<sup>۲۶</sup> استفاده شده است به این صورت که پس از بررسی مدل ریاضی تحقیق، برای ارزیابی عملکرد و صحت مدل و نیز قابلیت اجرایی آن به تولید مسائل «شدنی» پرداخته شد. در این راستا یک مثال عددی در اندازه کوچک انجام شد و پاسخ آن تحلیل گردید؛ سپس به علت ناتوانی نرم‌افزار لینگو در حل مسائل با ابعاد بزرگتر، بعد از تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی با استفاده از روش تاگوچی مدل ارائه شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات حل شد.

#### ۳-۲. مدل، پارامترها و اندیس‌ها و محدودیت‌های مدل

اندیس‌های مورد استفاده برای مدل سازی مسئله تحقیق به این شکل بودند:

$t$ : زمان ( $t = 1, \dots, T$ )

$i$ : منابع پروژه

$j$ : عدم قطعیت

$k$ : فسادپذیری مواد

$N$ : وقفه‌های تقویمی

$X_{ijkt}$  = زمان انجام پروژه بر اساس منابع، عدم قطعیت و سایر متغیرها

$Z_{ijt}$  = منابع انجام پروژه بر اساس منابع، عدم قطعیت و سایر متغیرها

پارامترهای ورودی مدل، به شرح زیر بودند:

24 Particle Swarm Optimization (PSO)

25 NSGA

26 Taguchi's approach

$Q_{ijt}$ : هزینه انجام پروژه دوره  $t$ ام.

$D_{it}$ : فسادپذیری موادها در دوره  $t$ .

$Lo_{it}$ : ریسک پروژه در دوره  $t$ .

$p_{ijt}$ : نوسان قیمت خرید مواد اولیه در دوره  $t$ .

$Tc_{ijkt}$ : هزینه حمل و نقل در دوره  $t$ .

$O_{ijt}$ : هزینه سفارش دهی در دوره  $t$ .

$c_{ijt}$ : ظرفیت عدم قطعیت در دوره  $t$ .

$B_{kt}$ : حداکثر فسادپذیری مواد در دوره  $t$ .

$w_{ijt}$ : وزن عوامل در دوره  $t$ .

$m_{ijt}$ : هزینه مدیریت پروژه در دوره  $t$ .

$G_t$ : بودجه ایمنی، بهداشت و سلامت در دوره  $t$ .

$\mu_{ijt}$ : میزان میزان سود پروژه در دوره  $t$ .

مدل ریاضی در سطح اول به شکل زیر بود (توضیحات مربوط به روابط در ادامه‌ی روابط ارائه شده است):

$$MIN Z1 = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T h_{it} \max \left( 0, \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (1 - q_{ijt}) x_{ijkt} - D_{it} \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Lo_{it} \max \left( 0, D_{it} - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (1 - q_{ijt}) x_{ijkt} \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T p_{ijt} x_{ijkt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T Tc_{ijkt} x_{ijkt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T O_{ijt} y_{ijkt} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijkt} \geq D_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ijkt} \leq c_{ijt} y_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3)$$

$$x_{ijkt} \geq y_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (4)$$

$$\left[ \sum_{j=1}^J x_{ijkt} (1 - q_{ijt}) \right] = \left[ \sum_{j=1}^J x_{fjkt} (1 - q_{fjt}) \right] \quad \forall k \in K, t \in T, i, f \in I \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ijt} x_{ijkt} \leq B_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (6)$$

$$x_{ijkt} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (7)$$

مدل ریاضی در سطح دوم به شکل زیر بود:

$$MAX Z2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T w_{ijt} \mu_{ijt} y_{ijkt} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T m_{ijt} z_{ijt} \quad (8)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T m_{ijt} z_{ijt} \leq G_t \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J c_{ijt} y_{ijkt} \geq \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijkt} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (10)$$

$$Z_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{k=1}^K y_{ijkt} \geq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (11)$$

$$y_{ijkt} \in \{0, 1\} \quad (12)$$

بررسی تابع هدف و محدودیت‌های مدل طبق روابط ۱ تا ۱۲:

در سطح اول این مسئله دوسطحی (رابطه ۱) بهینه کردن برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه در نظر گرفته شده است و در سطح دوم عوامل عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد و تخفیف در نظر گرفته میشوند (رابطه ۸).

محدودیت‌های مدل سطح اول:

رابطه (۲) این محدودیت بیانگر آن است که، کل هزینه‌های پروژه‌ی  $i$  باید سودآوری پروژه را تامین کند.

رابطه (۳) این محدودیت بیانگر آن است که مقدار کل کل هزینه‌های پروژه‌ی  $i$  به هر عدم قطعیت  $j$  نباید از ظرفیت آن عدم قطعیت تجاوز کند.

رابطه (۴) این محدودیت بیانگر آن است که، وقفه‌های تقویمی نباید از حد مجاز زمان پروژه بیشتر شود.

رابطه (۵) این محدودیت بیانگر آن است که، فسادپذیری مواد باید در زمان پروژه لحاظ شود.

رابطه (۶) بیانگر محدودیت عدم قطعیت است.

رابطه (۷) این محدودیت بیانگر آن است که، متغیر  $X$  مقدار صحیح و مثبت دارد.

محدودیت‌های مدل در سطح دوم به شرح زیر است:

رابطه (۹) این محدودیت مربوط به بودجه‌ی مدیریت پروژه است (در واقع با انتخاب هر عاملی مانند عدم قطعیت یا وقفه‌های تقویمی متحمل چنین هزینه‌ی می‌شویم).

رابطه (۱۰) این محدودیت بیانگر آن است که، حداقل منابع پروژه باید به اندازه‌ای باشد که بتوانند انجام پروژه در زمان تعیین شده را تامین کنند.

رابطه (۱۱) این محدودیت بیانگر آن است که، تخفیف باید از حد مجاز بیشتر نشود.

رابطه (۱۲) این محدودیت بیانگر آن است که،  $y$  یک متغیر باینری است.

#### ۴. یافته‌های پژوهش

جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی ابتدا به ایجاد مسائل نمونه استاندارد پرداختیم که بتوانند تا حد امکان فضای حل را پوشش دهند. بدین منظور با توجه به متغیرهای مدل، مسأله در دو دسته‌ی بزرگ و کوچک طراحی شد و سطوح متناسب با آنها برای پارامترها در نظر گرفته شد. مقادیر مناسب برای متغیرها مطابق جدول ۱ بودند:



جدول ۱) سطوح پارامترهای مدل در مسائل تولید شده

پارامترهای ورودی	مسائل کوچک	مسائل بزرگ
زمان	Unif (2000-4000)	Unif (5000-10000)
منابع پروژه	Unif (100-300)	Unif (500-700)
عدم قطعیت	Unif (80-250)	Unif (450-650)
وقفه‌های تقویمی	Unif (20-50)	Unif (60-80)
فسادپذیری مواد	Unif (5000-15000)	Unif (10000-25000)
تخفیف	Unif (100-200)	Unif (400-500)
برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه	Unif (1000-5000)	Unif (8000-10000)

سپس جهت اعتبارسنجی مدل ارائه شده و تصدیق صحت عملکرد آن یک مسأله در اندازه کوچک تولید نموده و آن را با نرم‌افزار لینگو حل کردیم. در نهایت جواب بهینه به دست آمده با پاسخ حاصل از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی مقایسه می‌گردد. در این راستا پارامترهای ورودی مسأله به شرح زیر هستند:

$$D_{it} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \end{bmatrix}$$

$$m_{ijt} = \begin{bmatrix} 2000 & 1500 \\ 3000 & 2000 \\ 100 & 800 \end{bmatrix}$$

$$B_{kt} = \begin{bmatrix} 2000 \\ 2000 \end{bmatrix}$$

$$q_{ijt} = \begin{bmatrix} 0.005 & 0.02 & 0.04 \\ 0.01 & 0.03 & 0.06 \end{bmatrix} (t=1)$$

$$w_{ijt} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.5 & 0.4 \\ 0.8 & 0.5 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$P_{ijt} = \begin{bmatrix} 100 & 90 & 100 \\ 150 & 150 & 180 \end{bmatrix}$$

$$TC_{ij1t} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

$$c_{ijt} = \begin{bmatrix} 120 & 140 & 90 \\ 100 & 110 & 100 \end{bmatrix}$$

$$P_{ijt} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 9 \\ 11 & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

$$TC_{ij2t} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

همچنین خروجی مسأله به شکل زیر بود:

$$x_{1111} = 98, x_{1121} = 2, Others = 0$$

$$x_{2111} = 98, x_{2121} = 2, Others = 0$$

$$Objective\ value = 5850$$

مقدار متغیر تصمیم  $X_{ijkt}$  با توجه به مقدار متغیر  $Y_{ijkt}$  که در سطح دوم (سطح پیرو) محاسبه شده است، تعیین میشود.

بنابراین با توجه به مقادیر بدست آمده برای متغیر تصمیم زمان‌بندی همزمان زمان و هزینه پروژه  $Y_{ijkt}$  هر دو متغیر زمان و منابع پروژه برابر شده‌اند.

در ادامه به تنظیم پارامترها پرداخته شد.

نکته قابل توجه در مورد کارایی هر روشی تنظیم صحیح پارامترهای آن می‌باشد. روش‌های آماری متنوعی برای طراحی

آزمایشات مطرح شده است، اما استفاده از رویکرد جامعی مثل آزمایشات عاملی کامل همواره کارایی لازم را ندارند، به

این دلیل که با افزایش تعداد عامل‌های مورد بررسی انجام محاسبات پیچیده و فوق‌العاده زمانبر می‌شود.

تاگوچی (۱۹۸۶) دسته‌ای از آزمایشات عاملی کسری را معرفی کرد که بطور قابل توجهی تعداد آزمایشات مورد نیاز جهت بررسی را با حفظ اطلاعات مورد نیاز برای نمایش کاهش می‌دهد. مطابق روش تاگوچی فاکتورها (عامل‌ها) به دو دسته تقسیم می‌شوند: فاکتورهای قابل کنترل و اغتشاشی. با استفاده از این روش عامل‌های اغتشاش بیرون از آرایه متعامد (ارتوگونال) و فاکتورهای قابل کنترل در آرایه داخلی قرار می‌گیرند. هدف روش یافتن سطوح بهینه عامل‌های مهم قابل کنترل و کمینه کردن اثر فاکتورهای اغتشاش است. در این روش ویژگی‌های کیفی مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایشات به نسبت سیگنال به نویز (S/N) تبدیل می‌شود. این نرخ نشان دهنده میزان انحرافات نمایش داده شده در متغیر پاسخ است. برای اندازه‌گیری نسبت‌های S/N تاگوچی سه معادله‌ی زیر را ارائه نموده است:

$$1- \text{هر چه کمتر، بهتر: در صورتی استفاده می‌شود که بهینگی سامانه وقتی پاسخ تا حد ممکن کوچک باشد به دست آید.} \\ S/N \text{ ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (13)$$

$$2- \text{هر چه بزرگتر، بهتر: در صورتی استفاده می‌شود که بهینگی سامانه وقتی پاسخ تا حد ممکن بزرگ باشد به دست آید.} \\ S/N \text{ ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (14)$$

$$3- \text{بهترین اسمی: در صورتی استفاده می‌شود که منظور کاهش تغییر پذیری پیرامون مقدار خاص هدف باشد.} \\ \frac{S}{N} \text{ ratio} = -10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (15)$$

در این مطالعه نسبت S/N ویژگی "هر چه کوچکتر بهتر" دارد. لذا تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق طبق فاکتورهای کنترلی روش تاگوچی شامل پارامترهای الگوریتم PSO انجام شد. سطوح فاکتورهای این الگوریتم در جدول ۲ برای مسائل بزرگ و کوچک نمایش داده شده است:

جدول ۲) فاکتورهای الگوریتم PSO به همراه سطوحشان

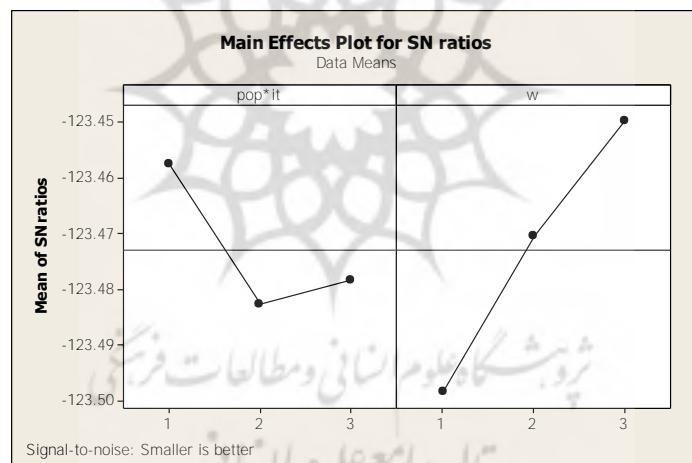
فاکتورها	سطوح در مسائل کوچک			سطوح در مسائل بزرگ		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Pop*it	۷۵*۲۰۰	۱۰۰*۱۵۰	۱۵۰*۱۰۰	۱۰۰*۳۰۰	۱۵۰*۲۰۰	۳۰۰*۱۰۰
$\omega$	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۰/۹	۱	۱/۵

لازم به ذکر است اگر طراحی تست‌های عاملی کامل دو عامل الگوریتم PSO، برای پنج نوع مسأله نمونه فرض شود و بر همین اساس نیز هر کدام از آنها سه بار اجرا شود، به تعداد  $5 \times 3 \times 3^2 = 135$  تست برای اجرا در هر سایز لازم است اما با در نظر گرفتن زمان و هزینه این کار، انجام این حجم از تست مقرون به صرفه نخواهد بود لذا از آزمایشات کسری استفاده کردیم. بر این اساس نخست باید درجه آزادی محاسبه شد. در این راستا ۱ درجه آزادی برای میانگین کل و ۲ درجه آزادی برای فاکتورهای ۳ سطحی داشتیم. لذا درجه آزادی کل برای الگوریتم PSO برابر با  $5(2 \times 2 + 1) = 25$  به دست آمد. بر این اساس آرایه متعامد برای الگوریتم PSO باید حداقل دارای ۵ سطر و ۲ ستون باشد تا با ۲ فاکتور الگوریتم مطابقت نماید. طبق جدول ۳، از جداول استاندارد آرایه‌های متعامد (جدول ارتوگونال)، مناسب‌ترین آرایه الگوریتم PSO،  $L9(2^3)$  بود که شرایط لازم جهت تنظیم پارامترهای الگوریتم را دارا بود.

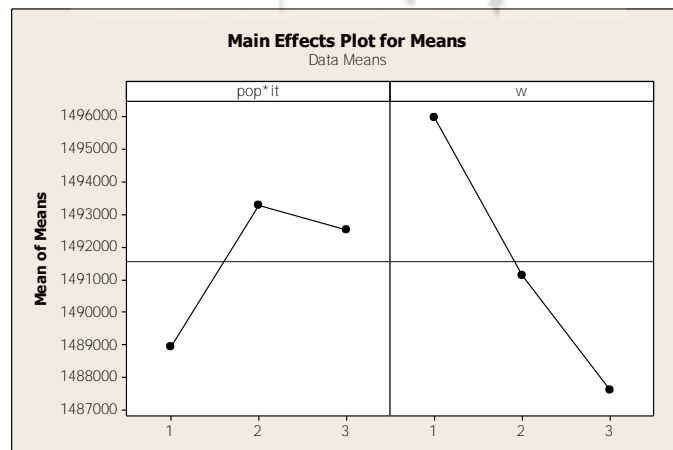
جدول ۳) آرایه متعامد  $L9(2^3)$

Trial	A	B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

همانطور که بیان گردید جهت انجام آزمایشات، چهار مسأله (۲ مسأله در اندازه کوچک و ۲ مسأله اندازه بزرگ) در نظر گرفته شد. الگوریتم‌ها در محیط متلب کدنویسی و و ۹ سناریوی طراحی شده در آرایه متعامد، برای هر کدام از مسائل اجرا گردید. جهت دستیابی به جواب‌های دارای قابلیت اطمینان مطلوب، هر مسئله پنج بار اجرا گردید. در نمودار ۱ مقادیر نسبت  $S/N$  برای سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم PSO در مسائل با اندازه‌ی کوچک نشان داده شده است.

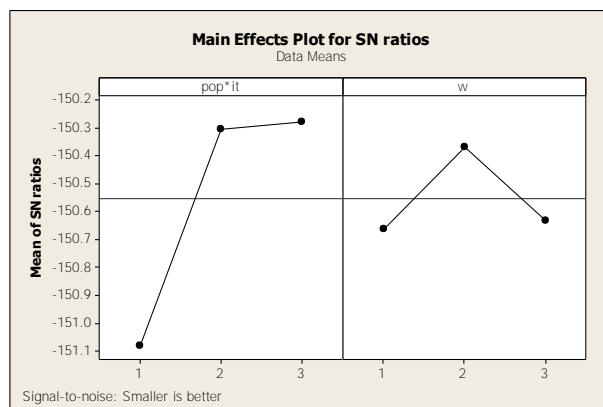


نمودار ۱) نسبت  $S/N$  برای توابع هدف در الگوریتم PSO برای مسائل کوچک

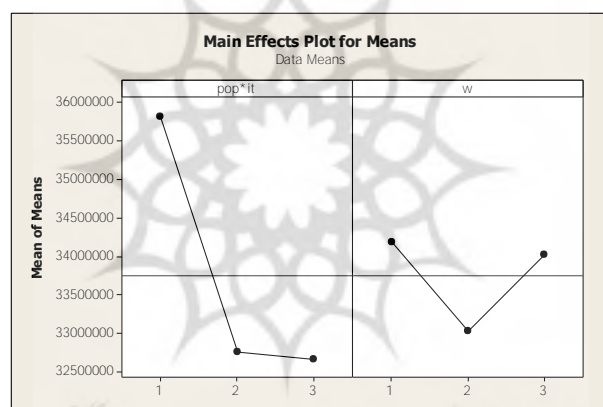


نمودار ۲) اثر میانگین داده‌ها روی میانگین‌ها در سطوح عامل‌ها برای مسائل کوچک

همانطور که در نمودار ۱ و ۲ مشخص شده است، کاهش انحرافات الگوریتم مربوط به زمانی است که پارامترها بر سطوح ترکیب تعداد ذرات اولیه، و تکرار روی سطح ۱، و همچنین وزن اینرسی روی سطح ۳ تنظیم گردند. از سوی دیگر در در نمودارهای ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر نسبت  $S/N$  در سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم PSO و نمودار تأثیرات میانگین داده‌ها روی میانگین‌ها برای مسائل با اندازه بزرگ نشان داده شده است.



نمودار ۳) نسبت  $S/N$  در توابع هدف برای سطوح مختلف از عامل‌های الگوریتم PSO برای مسائل بزرگ



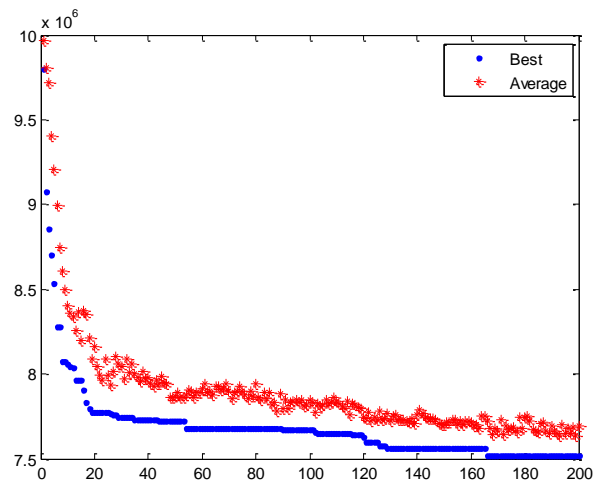
نمودار ۴) آثار میانگین داده‌ها بر میانگین‌ها برای سطوح مختلف عامل‌های الگوریتم PSO برای مسائل بزرگ

نمودار ۳ و ۴ نشان می‌دهد کاهش انحرافات الگوریتم مربوط به زمانی بوده است که پارامترها روی سطوح ترکیب تعداد ذرات اولیه و تکرار روی سطح ۳، و همچنین وزن اینرسی روی سطح ۲ تنظیم گردند. لذا سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم PSO به شکل جدول ۴ به دست آمد:

جدول ۴) سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم PSO

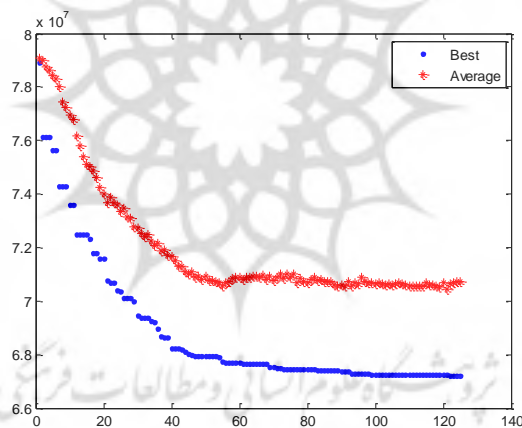
روش حل	فاکتورها	سطح بهینه
در مسائل کوچک	Pop*it	۷۵*۲۰۰
	$\omega$	۱/۲۵
الگوریتم PSO	Pop*it	۳۰۰*۱۰۰
	$\omega$	۱/۵

جهت اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی تحقیق از «نمودار همگرایی» استفاده گردید. متوسط و بهترین مقدار تابع هدف در نمودارهای ۵ و ۶ بر اساس شماره تکرارها ارائه شده است:



نمودار ۵) نمودار همگرایی الگوریتم *PSO* پیشنهاد شده برای مسأله در ابعاد کوچک

نتایج نمودار ۵ بیانگر همگرایی الگوریتم پیشنهادی در اندازه کوچک می‌باشد. همچنین در نمودار ۶ نتایج نمودار همگرایی برای مسأله‌ای در ابعاد بزرگ‌تر نشان داده شده است:



نمودار ۶) نمودار همگرایی الگوریتم *PSO* پیشنهاد شده برای مسأله در ابعاد بزرگ

نتایج نمودار ۶ بیانگر همگرایی الگوریتم پیشنهادی در اندازه بزرگ است.

پس از اینکه سطوح بهینه برای پارامترهای الگوریتم پیشنهادی تحقیق برای مدل مسئله مورد بررسی در مقاله با روش تاگوچی ارزیابی شد، نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم از نظر مقدار تابع هدف و زمان حل با نرم‌افزار لینگو<sup>۳۷</sup> مقایسه شد. در این راستا تعداد ۳۰ مسأله آزمایشی انجام شد که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵) پارامترهای ورودی برای مسأله‌های آزمایشی طراحی شده در تحقیق

تخفیف	فسادپذیری موارد	وقفه‌های تقویمی	عدم قطعیت	منابع	زمان	شماره آزمایش <sup>۲۸</sup>	اندازه مسأله
2	2	1	2	2	1	1	
2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	3	2	2	3	
2	3	3	3	3	2	4	
2	3	2	4	3	2	5	
3	2	2	2	2	3	6	
3	3	3	5	3	3	7	
3	4	3	6	4	3	8	مسائل کوچک
3	5	5	6	5	3	9	
4	3	4	4	3	4	10	
4	4	4	8	4	4	11	
4	6	4	10	6	4	12	
5	6	5	12	6	5	13	
5	8	5	12	8	5	14	
6	8	6	15	8	6	15	
6	15	6	17	15	6	16	
7	15	7	20	15	7	17	
7	17	8	25	17	7	18	
8	18	9	25	18	8	19	
8	20	9	30	20	8	20	
8	22	10	30	22	8	21	
8	24	10	35	24	8	22	
9	26	12	40	26	9	23	مسائل بزرگ
9	28	12	45	28	9	24	
9	30	14	50	30	9	25	
9	32	14	55	32	9	26	
10	30	16	60	30	10	27	
10	32	16	70	32	10	28	
10	35	18	80	35	10	29	
10	40	18	100	40	10	30	

طبق جدول ۵ مسائل ضمن دو دسته مسائل کوچک و بزرگ، تولید شده‌اند؛ جهت حذف عدم قطعیت در خروجی‌های بدست آمده، الگوریتم PSO برای هر یک از مسائل ۳ بار اجرا گردید و میانگین جواب‌ها به عنوان جواب نهایی گزارش شد. در جدول ۶ نتایج محاسباتی به دست آمده از حل مسائل آزمایشی مطرح شده ارائه شده است:

جدول ۶) نتایج محاسباتی به دست آمده از حل مسائل آزمایشی مطرح شده

شماره آزمایش	Lingo		PSO			RPD
	Obj	t(s)	mean Objective	best Objective	mean time	
1	1646163 <sup>a</sup>	2	1646163.00	1646163.00	4.06	0
2	2492838 <sup>a</sup>	4	2492838.00	2492838.00	5.48	0
3	2054635 <sup>a</sup>	10	2054635.00	2054635.00	5.89	0
4	1741985 <sup>a</sup>	26	1756093.67	1742236.00	8.74	0.80
5	3418141 <sup>a</sup>	140	3453213.33	3418218.00	13.58	1.02
6	2646374 <sup>a</sup>	335	2646374.00	2646374.00	7.96	0
7	4002123 <sup>a</sup>	782	4069247.00	4005499.00	19.03	1.67
8	4480915 <sup>b</sup>	1200	4530791.67	4481106.00	21.64	1.11
9	7299851 <sup>b</sup>	2850	7419202.33	7293531.00	30.61	1.72
10	7898298 <sup>b</sup>	3685	7837368.50	7714528.00	29.52	1.59
11	6689848 <sup>b</sup>	6900	6561879.00	6536515.00	30.43	0.38
12	7252315 <sup>b</sup>	7200	7015342.33	6803714.00	37.49	3.11
13	*	7200	11016869.00	10900561.00	55.61	1.06
14	*	7200	10947666.00	10735437.00	60.67	1.97
15	*	7200	15476655.33	15453541.00	93.88	0.14
<b>Mean</b>						<b>0.97</b>
16	*	7200	15412864.67	15186853.00	115.68	1.48
17	*	7200	24092556.67	23991229.00	181.52	0.42
18	*	7200	26381826.67	26176974.00	212.77	0.78
19	*	7200	35230721.67	34884613.00	307.70	0.99
20	*	7200	34917018.00	34716028.00	348.26	0.57
21	*	7200	41201859.00	41000961.00	381.43	0.48
22	*	7200	39679279.33	39050643.00	502.23	1.60
23	*	7200	54384444.33	53655601.00	800.13	1.35
24	*	7200	56282003.33	56082069.00	979.33	0.35
25	*	7200	64529348.67	64393203.00	1215.78	0.21
26	*	7200	68190109.00	66702707.00	1503.45	2.22
27	*	7200	85680519.00	83637410.00	1877.41	2.44
28	*	7200	90708778.33	89735983.00	2093.23	1.08
29	*	7200	99519464.33	98107252.00	2873.30	1.43
30	*	7200	103233596.00	102692344.00	4524.31	0.52
<b>Mean</b>						<b>1.010199</b>

<sup>a</sup> Global optimal<sup>b</sup> Local optimal

در جدول ۶ t(s) زمان محاسباتی بر حسب ثانیه است. مقادیر global و local نیز به ترتیب عبارتند از مقادیر تابع هدف بهینه نهایی و محلی در نرم‌افزار لینگو. همچنین مقادیر میانگین و بهترین جواب به دست آمده حاصل از سه بار اجرای

الگوریتم PSO، به ترتیب در ستون‌های mean و best ارائه شده است. در ستون mean time، متوسط زمان اجرای الگوریتم در سه مرتبه اجرا بر حسب ثانیه و در ستون RPD نیز انحراف جواب‌های حاصل از بهترین مقدار، نشان داده شده است. با توجه به اینکه حل مسأله برای ابعاد متوسط در مسائل ۸ الی ۱۲ در نرم‌افزار لینگو زمان گیر بود و در بیش از دو ساعت نیز نتوانست جواب بهینه نهایی را ارائه کند، بهترین جواب به دست آمده در این بازه زمانی به عنوان جواب بهینه نهایی قلمداد شد. همچنین لازم به ذکر است در مسائل با ابعاد بزرگتر، نرم‌افزار قادر به حل مسأله نبود و برای مسائل ابعاد ۱۳ به بالا، هیچ جوابی در مدت زمان تعیین شده به دست نیامد. این امر با علامت (\*) در جدول ۶ نشان داده شده است.

شاخص RPD که فاکتورهای تعدیلی مسأله است به صورت رابطه محاسبه می‌شود:

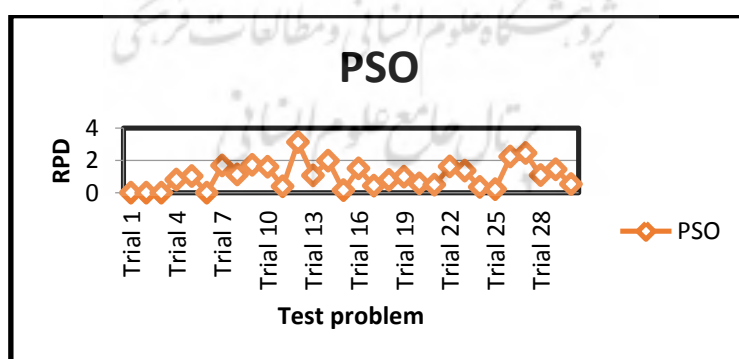
$$RPD_{ij} = \frac{(Alg_{sol})_{ij} - Min_{sol}}{Min_{sol}} * 100 \quad (16)$$

در رابطه ۱۶،  $Alg_{sol}$  عبارتست از ارزش هدفی که حاصل هر دور آزمایش توسط یک الگوریتم است و  $Min_{sol}$  عبارتست از بهترین مقداری که به ازای هر آزمایش به وسیله هر الگوریتم ارزیابی می‌گردد. لذا مثلاً در نمونه ۴ میتوان مقدار این شاخص را به شکل زیر محاسبه کرد:

$$RPD = \frac{1756093.67 - 1741985}{1741985} \times 100 = 0.80$$

طبق میانگین ارزیابی شده برای این شاخص در هر دو دسته مسائل بزرگ و کوچک در جدول ۵ و ۶ نتیجه گرفتیم کوچکتر بودن مقدار میانگین محاسبه شده (از مقدار خطای ۲ درصد) نشانگر دقت بالای الگوریتم پیشنهادی تحقیق در حل مسائل است.

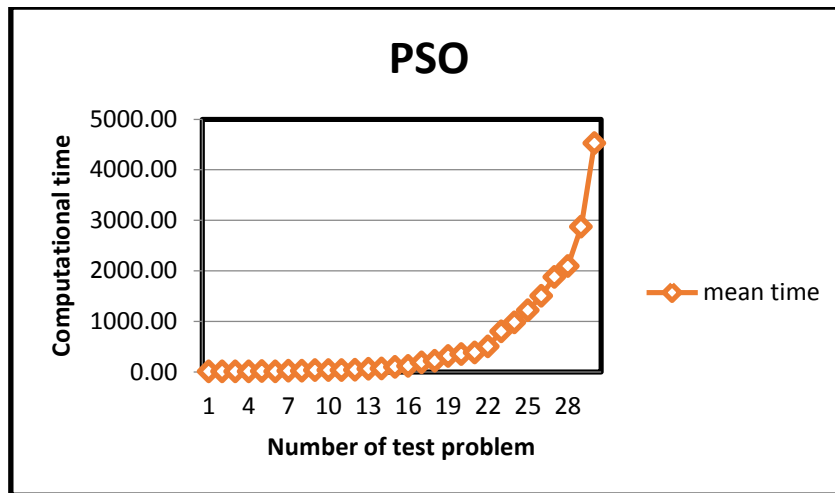
در نمودار شماره ۷ میزان دقت (خطا) برای الگوریتم پیشنهادی تحقیق بر اساس مسائل تولید شده به مقایسه شده و نتایج آن ارائه شده است:



نمودار ۷) نتایج مقایسه متوسط انحرافات الگوریتم پیشنهادی در تحقیق بر اساس نمونه‌های آزمایشی تولید شده در الگوریتم

نتایج به دست آمده از نمودار ۷ نشان داد در ۸ آزمایش نخست الگوریتم پیشنهادی تحقیق جواب بهینه مسأله به دست آمده است اما با افزایش اندازه و ابعاد مسأله به نظر می‌رسد الگوریتم‌های دقیق حل مسأله جهت دستیابی به جوابهای کارا مناسب نیستند و در حیطه جواب‌های محلی قرار می‌گیرند اما الگوریتم PSO تحقیق به پاسخیابی بهتر از الگوریتم دقیق در فضای محلی دست پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان داد بیشترین خطا در حل مسأله، در آزمایش ۱۲ رخ داده است.





نمودار ۸) زمان محاسباتی الگوریتم تحقیق بر اساس نمونه آزمایشی تولید شده در الگوریتم

در نهایت نتایج نمودار ۸ که زمان‌های حل مسأله را طبق شماره‌های نمونه‌ها را ارائه می‌کند نشان داد با افزایش اندازه و ابعاد مسأله، زمان حل مسأله افزایش پیدا کرده است.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با مد نظر قرار دادن مواردی چون عدم قطعیت، تخفیف، توقفات تقویمی و نوع مواد مورد کاربرد در پروژه، تلاش کردیم مدلی کاربردی و مبتنی بر شرایط واقعی ارائه کنیم. در این زمینه از آنجاییکه موضوعات مدیریت پروژه مانند زمان‌بندی و تامین منابع تصمیمات به هم پیوسته‌ای هستند و نگاه جداگانه و مجزا به این موضوعات از کیفیت و کاربردی بودن نتایج می‌کاهد (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰) لذا طراحی مدلی که تصمیمات زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تامین مواد را به شکل همزمان و یکپارچه ارائه کند از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو در این تحقیق به طراحی مدلی استوار برای برنامه‌ریزی همزمان زمان و منابع پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، وقفه‌های تقویمی، فسادپذیری مواد و تخفیف پرداخته شد. از آنجاییکه مسأله تحقیق جزو مسائل *NP-Hard* بود، برای حل آن از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (*PSO*) استفاده گردید و نتایج آن با الگوریتم‌های دقیق حل مسأله، مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد در ۸ تست اول الگوریتم پیشنهادی به جواب بهینه مسأله خواهیم رسید اما با افزایش ابعاد مسأله، الگوریتم‌های دقیق حل مسأله برای بدست آوردن جوابهای کارا برای مسأله مناسب نبودند و الگوریتم تجمعی ذرات پیشنهادی به جوابهایی بهتر رسید. همچنین بیشترین خطا برای حل مسأله تحقیق در تست ۱۲ رخ داد.

## ۶. منابع و مآخذ

1. Acebes, F. D. Poza J.M. González-Varon, J.Pajares, López-Paredes, A. (2021). On the project risk baseline: Integrating aleatory uncertainty into project scheduling, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 160, October 2021, 107537.
2. Ahmadpour, Sama and Ghezavati, Vahidreza (2019). Modeling and solving multi-skilled resource-constrained project scheduling problem with calendars in fuzzy condition, *Journal of Industrial Engineering International* (2019) 15 (Suppl 1):S179–S197 .

3. Arkhipov, D., Battaïa, O., & Lazarev, A. (2019). An efficient pseudo-polynomial algorithm for finding a lower bound on the makespan for the Resource Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 35-44 .
4. Birjandi, A. and Mousavi, S. M. (2019). Fuzzy resource-constrained project scheduling with multiple routes: A heuristic solution. *Automation in Construction*, 100, 84-102 .
5. Bruni, M. E., Pugliese, L. D. P., Beraldi, P., & Guerriero, F. (2018). An adjustable robust optimization model for the resource-constrained project scheduling problem with uncertain activity durations. *Omega*, 71, 66-84.
6. Chaleshtarti, A. S. and Shadrokh, S. (2011). Branch and bound algorithms for resource constrained project scheduling problem subject to cumulative resources. In 2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, IEEE, Vol. 1, pp. 147-152.(
7. Chen, Haojie, Guofu, Ding, South, Jian Zhang, Rong, L. (2022). A filtering genetic programming framework for stochastic resource constrained multi-project scheduling problem under new project insertions, *Expert Systems with Applications* 198(1):116911 .
8. Farooq, M.U. Thaheem, MJ. Arshad, H. (2018). Improving the risk quantification under behavioural tendencies: A tale of construction projects, *International Journal of Project Management*, 36, pp. 414-428 .
9. Fergany, M. Fergany, O. El-Nawawy, M. Badawy et al. (2020). Estimation of the overall risk in residential building in Egypt, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 11 (2020), pp. 1568-1574.
10. Gavrysh, O. and Melnykova, V. (2019). Project risk management of the construction industry enterprises based on fuzzy set theory, *Problems and Perspectives in Management*, 17 (2019), pp. 203-213 .
11. Habibi, F., Barzinpour, F., & Sadjadi, S. J. (2019). A mathematical model for project scheduling and material ordering problem with sustainability considerations: A case study in Iran. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 690-710.
12. Hoseini, E. M. Bosch-Rekveltdt, M. Hertogh, M. (2020). Cost contingency and cost evolvement of construction projects in the preconstruction phase, *Journal of Construction Engineering & Management*, 146 (2020), p. 05020006 .
13. Hsieh, Y.C. Hsu, C.T. Lin, M.Y. (2018). Risk assessment in new software development projects at the front end: A fuzzy logic approach, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9 (2018), pp. 295-305.
14. Joy, Jiby, Srijith, Rajeeva, Eldhose Abraham, C. (2021). Particle swarm optimization for multi resource constrained project scheduling problem with varying resource levels, *Materials Today*, Volume 47, Part 15, Pages 5125-5129 .
15. Morin, P.A. ,Artigues, C and Haït, A and Kis, Tamás and Spieksma, R. (2022.) A project scheduling problem with periodically aggregated resource-constraints. *COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH*, 141 .
16. Rahman, Humyun Fuad, Ripon K. Chakraborty; Michael J. Ryan (2021). Managing Uncertainty and Disruptions in Resource Constrained Project Scheduling Problems: A Real-Time Reactive Approach, *IEEE Access*, Volume 9, Page(s): 45562 – 45586 .

17. Tabrizi, B. H. (2018). Integrated planning of project scheduling and material procurement considering the environmental impacts. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 103-115 .
18. Tabrizi, B. H. and Ghaderi, S. F. (2015). A Bi-Objective Model to Address Simultaneous Formulation of Project Scheduling and Material Ordering. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9(11), 1969-1972 .
19. Xie, L.; Chen, Y.; Chang, R. (2021). Scheduling Optimization of Prefabricated Construction Projects by Genetic Algorithm. *Appl. Sci.*, 11, 5531.
20. Yuan, Yisong, Sudong, Yea, Lin, Lin, Mitsuo, G. (2021). Multi-objective multi-mode resource-constrained project scheduling with fuzzy activity durations in prefabricated building construction, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 158, 107316.

