مجله علمی مطالعات پژوهشی در علوم مهندسی آینده، ۱۴۰۳، دوره ۱، شماره ۱، ص ص ۱-۱۲

مجله علمی مطالعات پژوهشی

در علوم مهندسی آینده

www.journalhi.com/eng/

طراحی مدل برنامه ریزی زمان و مواد پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت و وقفه های تقویمی: مورد مطالعه پروژه تعمیر منابع نفت

سیامک مرشد [۱]

۱- دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال،تهران، ایران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۷ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۲

ارائه در سایت: ۱۲ خرداد ۱۴۰۲

کلید واژگان:

مدل سناریو محور

زمان بندی پروژه با منابع محدود

عدم قطعیت

تخفیف

الگوریتم ژنتیک ترکیبی

چکیده

مسئله ی زمان بندی پروژه با منابع محدود یکی از مهم ترین دسته مسائل در زمینه ی موضوعات مدیریت پروژه می باشد که در سال های اخیر به شدت مورد توجه محققین قرار گرفته است. ترکیب این مسئله با سایر موضوعات مدیریت پروژه را می توان از جمله پررونق ترین موضوعات در این زمینه در سال های اخیر عنوان نمود. در این تحقیق، یک مدل برنامه ریزی استوار برای مسئله ی یکپارچه ی سفارش دهی مواد و زمان بندی پروژه در شرایط وجود عدم قطعیت، وقفه های تقویمی، تجدیدناپذیری، فسادپذیری و سناریوهای مختلف اجرای پروژه ارائه شد. مدنظر قرار دادن همزمان مباحث فوق الذکر در قالب این مدل منجر به نزدیک تر شدن مدل به شرایط دنیای واقعی، کاربردی تر شدن نتایج حاصله و بهبود کیفیت نتایج در عمل خواهد شد. مدل ارائه شده دارای تابع هدف حداقل سازی کلیه ی هزینه ها شامل هزینه های سفارش دهی، نگهداری، خرید و جریمه ی تاخیر منهای پاداش بابت زودتر تحویل دادن پروژه بود و با رویکرد امکانی نسبت به استوارسازی مدل اقدام شد. پس از ارائه ی مدل، یک روش حلّ ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار GAMS برای حل مسائل عددی در اندازه های مختلف طراحی شد. همچنین، مسئله ی نمونه ای مربوط به یک پروژه ی تعمیر منبع نفت و همچنین چندین مسئله ی عددی طراحی و با رویکرد مورد نظر حل شد. نتایج به دست آمده حکایت از کاهش قابل ملاحظه ی زمان حل با استفاده از رویکرد ترکیبی ارائه شده در این تحقیق داشت.

esigning a project time and materials planning model considering uncertainty and calendar interruptions: the case study of the oil resource repair project

Siamak Morshedi[1]

1- Ph.D., Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran.

Article Information

Original Research Paper
Received 18 March 2023
Accepted 02 October 2023
Available Online 04 October 2023

Keywords:
Scenario based model
Project scheduling with limited resources
uncertainty
Discount

Abstract

The problem of project scheduling with limited resources is one of the most important problems in the field of project management issues, which has been highly studied by researchers in recent years. The combination of this issue with other project management issues can be considered as one of the most booming issues in this field in recent years. In this research, a robust planning model was presented for the integrated problem of material ordering and project scheduling in the presence of uncertainty, calendar breaks, non-renewability, corruption and different project implementation scenarios. Simultaneous consideration of the aforementioned issues in the form of this model will lead to the model being closer to the real world conditions, making the results more practical and improving the quality of the results in practice. The presented model had the objective function of minimizing all costs, including the costs of ordering, maintenance, purchase and delay penalty minus the bonus for early delivery of the project, and it was carried out with a possible approach to model stabilization. After presenting the model, a combined solution method of genetic algorithm and GAMS software was designed to solve numerical problems of different sizes. Also, a sample problem related to an oil source repair project as well as several numerical problems were designed and solved with the desired approach. The obtained results indicate a significant reduction in the solution time using the combined approach presented in this research.

۱- مقدمه

در گذشته شیوه‌ی برنامه ریزی پروژه بیشتر مبتنی بر دیدگاه و مهارت های مدیریت پروژه بوده و به اصطلاح با رویکردهای ابتکاری و سرانگشتی این امر صورت می گرفته است (جوی و همکاران، ۲۰۲۱). با گذشت زمان و بزرگ شدن حجم پروژه ها و همچنین متنوع شدن ابزارهای مورد استفاده به منظور تکمیل یک پروژه، لزوم تغییر شیوه های برنامه ریزی پروژه از سنتی به علمی به خوبی محسوس است. در پروژه های عظیم یا در اصطلاح مگا پروژه هایی نظیر ساخت پالایشگاه، فرودگاه، سفینه ی فضایی، ماهواره، ساخت مترو و نظایر آن، لزوم ایجاد یک طرح و برنامه ی زمان بندی مناسب به نحوی که از منابع محدود و با ارزش موجود نهایت بهره برداری گردد تا اهداف پروژه که در سه ضلع مثلث پروژه یعنی زمان، هزینه و کیفیت نهفته است محقق شود (مبارک، ۲۰۱۵).

در رویکردهای کلاسیک نظیر زنجیره ی بحرانی فرض بر این است که منابع پروژه به صورت نامحدود در دسترس می باشند. با وجود این، فرض فوق در غالب پروژه ها منطقی به نظر نمی رسد. پس از آن، فرض محدودیت این منابع هم به مدل اضافه شده است که این گونه مسائل در دسته ی برنامه ریزی پروژه با محدودیت منابع یا RCPSP می گویند (لیو و همکاران، ۲۰۱۷).

در شرایط واقعی محدودیت ها و واقعیاتی وجود دارند که نادیده انگاشتن آن ها در مدل سازی می تواند از کاربردی بودن مدل ارائه شده بکاهد. بنابراین در این تحقیق در نظر داریم تا چند مبحث جدید و مهم را وارد ادبیات موضوع نماییم. این مباحث شامل تجدید ناپذیری مواد، فسادپذیر بودن و همچنین فرض تخفیف در منابع پروژه و عدم قطعیت و وقفه های تقویمی مورد استفاده است. در ادامه به منظور آشنایی بیشتر با این مفاهیم توضیحات مختصری از این مفاهیم ذکر می گردد.

در اغلب تحقیقات فرض می شود که فعالیت ها در یک شرایط ایده آل انجام می شود و زمان بندی ارائه شده می تواند به طور دقیق مطابق با برنامه اجرا شود (مبارک، ۲۰۱۵). در عمل، وجود عوامل غیرقابل کنترل نظیر نبود دسترسی به منابع، اضافه شدن فعالیت های پیش بینی نشده به پروژه و شرایط بد آب و هوایی منجر به عدم تحقق اهداف پروژه در مدت زمان مورد نظر می شود که این امر می تواند هزینه های قابل توجهی را به پروژه وارد نماید (آرتیگوس و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، وجود عوامل غیرقابل کنترل را می توان یکی از مشکلات اصلی پروژه های عمرانی دانست. از این روی، چنان چه در برنامه ریزی های انجام شده برای پروژه، سناریوهای مختلفی پیش بینی شود و برنامه ریزی ها بر مبنای این سناریوها انجام پذیرد، می توان تا حد زیادی از تاثیر این عوامل غیرقابل کنترل بر روی پروژه کاست (که و همکاران، ۲۰۱۵). رویکرد جدیدی که در سال های اخیر برای مقابله با عدم قطعیت داده ها در سناریوهای مختلف پیشنهاد می شود رویکرد بهینه سازی استوار است. در این رویکرد، جواب هایی نزدیک به بهینه مدنظر می باشند که با احتمال بالایی موجه بوده و در مقابل تغییرات مقاوم باشند. به عبارتی دیگر، با کمی صرف نظر نمودن از مقدار تابع هدف، موجه بودن جواب به دست آمده در سناریوهای مختلف تضمین شود (بن تال و همکاران، ۲۰۰۹). از این روی، در این تحقیق از یک رویکرد بهینه سازی استوار به منظور مواجهه با تغییرات در سناریوهای مختلف استفاده می شود تا تاثیر حالت های مختلف وقوع وقایع در پروژه بر روی صحت برنامه ریزی های انجام شده به حداقل برسد.

غالب فعالیت های پروژه به غیر از فعالیت هایی که در شبکه ی پروژه به عنوان فعالیت های مجازی در نظر گرفته می شوند برای انجام شدن به حداقل یکی از منابع پروژه نیاز دارند. فعالیت های مجازی فعالیت هایی هستند که نیاز به منبع ندارند، زمان آن ها صفر است و فقط برای نمایش رابطه بین فعالیت ها از آن استفاده می شود (کرزنر، ۲۰۱۷). تیم مدیریت پروژه باید تخمینی از مقدار منبع مورد نیاز داشته باشد. در مباحث زمان بندی و کنترل پروژه، انواع مختلفی از منابع وجود دارند. مواد تجدیدناپذیر آن دسته از منابعی هستند که با اتمام یک فعالیت، مقدار منابع تخصیص داده شده به آن به اتمام می رسند و دیگر از آن مقدار مشخص، نمی توان استفاده ی مجدد نمود (قادری و تبریزی، ۲۰۱۶). گچ، سیمان و اقلام مصرفی در پروژه را می توان از جمله ی این دسته از منابع نام برد. یکی از منابع تجدیدناپذیر ، منابع فاسدشدنی می باشند (کرزنر، ۲۰۱۷). منابع فاسدشدنی آن دسته از اقلامی می باشند که پس از طی مدتی کوتاه دچار فساد شده و دیگر قابل استفاده نیستند. به عنوان نمونه بتن مخلوط شده برای پروژه ی ساختمانی یک منبع فاسد شدنی است (چالشتری و شادرخ، ۲۰۱۱).

یکی دیگر از واقعیات فعالیت های تجاری و کسب و کار، تخفیف است. برخی فروشندگان به ازای خرید در حجم معینی، به خریداران خود قیمت های پایین تری نسبت به قیمت استاندارد آن ارائه می دهند. 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-x) عددی مثبت) ارائه می نماید به این امید که فروش کالاها بیشتر و تمایل خریداران به خرید کالا بیشتر گردد (تبریزی و قادری، ۲۰۱۶). با توجه به این که برای اجرای پروژه های عمرانی غالبا" مقادیر فراوانی از مواد مصرفی مورد نیاز است، پیمانکاران و مدیران پروژه ها می توانند با برنامه ریزی مقادیر مناسب خرید مواد، پروژه را از تخفیفات کلی یا نموی ارائه شده بهره مند نمایند. از این روی، در برنامه ریزی پروژه های با منابع محدود، یکی از تصمیمات مهمی که باید توسط مدیریت اتخاذ شود آن است که مواد را در چه بازه های زمانی و در چه بازه های مقداری خریداری نماید تا ضمن این که نیاز پروژه به منابع تامین می شود، پروژه از تخفیفاتی که تامین کنندگان ارائه می دهند بهره مند شود (تبریزی ، ۲۰۱۸).

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 می باشند که در نظر نگرفتن این عدم قطعیت منجر به کاهش اعتبار مدل می گردد. عدم قطعیت در پروژه های عمرانی نیز نقش پررنگی داشته و بر روی برنامه ریزی های مدیران پروژه تاثیرگذار است (ما و همکاران، ۲۰۱۵). مواردی نظیر تغییرات قیمت مواد، تغییرات هزینه های پروژه، تغییر در زمان اجرای فعالیت ها نسبت به آن چه برنامه ریزی شده بود و مواردی از این دست را می توان از جمله مهم ترین جنبه های تاثیر عدم قطعیت در پروژه های عمرانی دانست (برونی و همکاران، ۲۰۱۷). رویکردهای سنتی مواجهه با عدم قطعیت به اطلاعات اضافی نظیر توزیع احتمال و تابع عضوی نیازمند می باشند و کار با این رویکردها به دلیل حجم بالای داده های مورد نیاز دشوار است. از این روی، به کارگیری سایر تئوری ها می تواند در این راه کمک کننده باشد (برتسیماس و همکاران، ۲۰۱۱).

وقفه های تقویمی نظیر تعطیلات رسمی و مناسبت ها که در آن پیمانکار ملزم به تعطیل نمودن پروژه است از جمله ی دیگر مسائلی است که لازم است در مدل سازی مسئله ی برنامه ریزی و زمان بندی پروژه در نظر

گرفته شود تا برنامه ریزی ارائه شده بیشترین تطابق را با شرایط دنیای واقعی داشته باشد.

با توجه به مطالب بیان شده، در این تحقیق به دنبال ارائه ی مدلی یکپارچه و استوار برای زمان بندی پروژه با منابع محدود با در نظر گرفتن محدودیت های تامین مواد می باشیم. با در نظر گرفتن مباحث و واقعیاتی نظیر وقفه های تقویمی، عدم قطعیت، تخفیفات و سناریوهای مختلف پروژه در تحقیق، انتظار می رود مدل یکپارچه ی زمان بندی و تامین مواد ارائه شده هر چه بیشتر با واقعیات جهان واقع منطبق گردد و خروجی های مدل ارائه شده برای افرادی که با برنامه ریزی و زمان بندی پروژه ها سر و کار دارند مفید باشد.

ادامه ی این مقاله به این نحو برنامه ریزی شده است: در بخش دوم به مروری بر ادبیات موضوع تحقیق پرداخته خواهد شد. بخش سوم به ارائه ی مدل تحقیق اختصاص دارد. بخش چهارم رویکرد حل را تشریح می نماید. بخش پنجم به تشریح یافته های عددی خواهد پرداخت و در نهایت بخش ششم نتیجه گیری تحقیق می باشد.

۲- مرور ادبیات

زمان بندی پروژه به صورت وسیعی و با موضوعات مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و انجام مطالعات در این زمینه رشد فراوانی دارد. همین امر موجب شده است تا مطالعاتی به دسته بندی این مسائل بپردازد. برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ در دانشکده ی مدیریت دانشگاه کالیفرنیا در آمریکا در سمیناری که تحت عنوان زمان بندی و جست و جوی ابتکاری برگزار شد، مسئله ی دسته بندی مسائل زمان بندی مورد بحث قرار گرفت (مبارک، ۲۰۱۵).

به طور کلی مطالعات در زمینه ی زمان بندی پروژه را بر اساس خصوصیات آن به سه دسته ی عمده تقسیم بندی می کنند (حبیبی و همکاران،۲۰۱۸).

- بر اساس خصوصیات منابع
- بر اساس خصوصیات فعالیت ها
- بر اساس معیار عملکرد و هدف مسئله

به همین منظور خصوصیات یک زمان بندی را با یک عبارت شامل سه پارامتر $\beta|\gamma\alpha$ نشان می دهند که به ترتیب α برای نشان دادن خصوصیات منابع، β برای نشان دادن خصوصیات فعالیت ها و γ به منظور نشان دادن معیار بهینگی مسئله می باشد (مبارک، ۲۰۱۵).

ادغام مسئله ی زمان بندی پروژه هم زمان با سفارش منابع نخستین بار توط آکوئیلانو و اسمیت (۱۹۸۰) معرفی شد. آنان یک مدل ادغامی شامل برنامه ریزی نیازمندی های مواد مانند لیست مواد، زمان انتظار مواد در راه، زمان بندی سطوح موجودی و روش مسیر بحرانی را توسعه دادند. پس از آن، تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شد که در ادامه به بخشی از جدیدترین آن ها پرداخته می شود.

برخی محققین موضوع عدم قطعیت را در مسئله ی زمان بندی پروژه در نظر گرفتند. بیرجندی و موسوی (۲۰۱۹) در تحقیقی یک رویکرد جدید برای حل مسئله ی زمان بندی پروژه با منابع محدود در شراط عدم قطعیت پرداختند. آن ها در این تحقیق، از رویکرد فازی به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترها استفاده نمودند. همچنین برونی و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله ای به ارائه ی یک رویکرد استوار برتسیماس و سیم (۲۰۰۴) برای بهینه سازی مسئله ی زمانبندی پروژه با منابع محدود با در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان فعالیت های پروژه پرداختند. تائو و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله ای به ارائه ی مدلی برای برنامه ریزی مسئله ی زمان بندی پروژه در شرایط احتمالی بودن زمان انجام فعالیت ها پرداختند. برونی و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله ای به ارائه ی یک رویکرد استوار برتسیماس و سیم برای بهینه سازی مسئله ی زمانبندی پروژه با منابع محدود با در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان فعالیت های پروژه پرداختند. که و همکاران در مقاله ای که در سال ۲۰۱۵ ارائه دادند به ارائه ی یک مدل غیرقطعی برای مسئله ی زمانبندی پروژه های با محدودیت منابع با ارائه ی یک رویکرد بهینه سازی استوار پرداختند. آن ها در این مقاله تمرکز خود را روی زمانبندی تدارکات پروژه قرار داده و زمان انجام فعالیت ها در تدارکات پروژه دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شد.

برخی محققین در مدل خود بر روی نوع منابع و مواد مورد نیاز در پروژه متمرکز شدند. لاسزکیک (۲۰۱۹) در تحقیقی به ارائه ی مدلی به منظور برنامه ریزی زمان انجام فعالیت ها در یک پروژه ی با منابع محدود با در نظر گرفتن منابع چند قابلیته پرداختند. حبیبی و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی به ارائه ی مدلی برای زمان بندی پروژه و سفارش دهی مواد با در نظر گرفتن فرض تخفیف، تجدیدپذیری مواد و شاخص های پایداری پرداختند. تبریزی (۲۰۱۸) در تحقیقی به مسئله ی یکپارچه ی زمان بندی پروژه و تامین مواد با در نظر گرفتن تخفیف، تجدیدپذیر بودن منابع و محدودیت های زیست محیطی پرداخت. تریشلر و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به ارائه ی یک رویکرد فراابتکاری ترکیبی برای حل مسئله ی زمان بندی پروژه در شرایط وجود محدودیت در منابع و با در نظر گرفتن انعطاف موجود در منابع پروژه پرداختند. تبریزی و قادری (۲۰۱۶) در تحقیقی به ارائه ی یک مدل دوهدفه برای برنامه ریزی هم زمان زمان و تامین مواد در پروژه های با منابع محدود در شرایط تخفیف قیمت کلی مواد و وجود منابع تجدیدپذیر پرداختند.

از منظر اهداف، مدل های ارائه شده در ادبیات موضوع رویکردهای متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است. برخی مدل ها تک هدفه بودند. به عنوان نمونه، تابع هدف مدل بیرجندی و موسوی (۲۰۱۹) و تبریزی و قادری (۲۰۱۶)، حداقل سازی کل هزینه های مورد نیاز برای تکمیل پروژه بود. همچنین تروجت و همکاران (۲۰۱۱) مدلی با هدف حداقل کردن زمان اتمام پروژه مورد بررسی قرار دادند. برخی مدل ها دارای دو هدف بودند. به عنوان نمونه، لاسزکیک (۲۰۱۹) حداقل کردن زمان اتمام فعالیت ها و همچنین حداقل نمودن هزینه های پروژه را به عنوان اهدافی متضاد در مدل سازی مسئله مدنظر قرار دادند. مدل های سه هدفه را می توان دسته ی دیگری از مدل ها در زمینه ی موضوع دانست. حبیبی و همکاران (۲۰۱۸) سه هدف را به عنوان اهداف مدل برنامه ریزی ریاضی خود در نظر گرفتند: هدف اول حداکثر نمودن ارزش خالص فعلی جریانات نقدی در پروژه، هدف دوم حداکثرسازی امتیاز پروژه از منظر شاخص های زیست محیطی و هدف سوم نیز حداکثرسازی امتیاز پروژه از منظر شاخص های اجتماعی بود. مدل زورقی و همکاران (۲۰۱۸) نیز دارای سه هدف بود که شامل: حداقل کردن زمان اتمام پروژه، حداکثر نمودن استواری پروژه از طریق حداکثر کردن زمان های شناوری موجود در شبکه و همچنین حداقل کردن زمان اتمام فعالیت ها می باشد.

از جمله سایر رویکردها به منظور دسته بندی تحقیقات گذشته می توان به رویکرد حل مورد استفاده در تحقیقات گذشته استناد نمود. برخی تحقیقات از رویکرد ابتکاری برای حل مسئله استفاده کردند که از این جمله می توان به بیرجندی و موسوی (۲۰۱۹) اشاره نمود که رویکردی ابتکاری دو مرحله ای را برای حل مسائل عددی پیشنهاد کردند. آرخیپوف و همکاران

(۲۰۱۹) در تحقیقی به ارائه ی یک الگوریتم کارآی چندجمله ای برای یافتن حد پائین زمان اتمام فعالیت های پروژه در یک مسئله ی زمان بندی پروژه با منابع محدود پرداختند. به این منظور، از یک رویکرد تطابق دامنه استفاده شد. رویکردهای فراابتکاری از جمله دیگر رویکردهای مورد استفاده در ادبیات موضوع است. در این راستا، لاسزکیک (۲۰۱۹) و تبریزی (۲۰۱۸) از رویکرد فراابتکاری ژنتیک چندهدفه ی نامغلوب یا NSGA II بهره گرفت. همچنین حبیبی و همکاران (۲۰۱۹) از رویکردهای بهینه سازی ازدحام ذرات PSO و ژنتیک چندهدفه NSGA II استفاده کرد. جوزف جیگر (۲۰۱۸) در مقاله ای به ارائه ی یک الگوریتم جست و جوی محلی چند رشته ای برای مسئله ی چند حالته با منابع محدود برای زمان بندی همزمان چند پروژه پرداخت. زورقی و همکاران (۲۰۱۷) رویکردهای فراابتکاری ژنتیک چندهدفه NSGA II، بهینه سازی ازدحام ذرات MOPSO، الگوریتم تکاملی پارتوی تقویت شده SPEA II و الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر تجزیه MOEAD را مورد استفاده نمودند. معدودی از تحقیقات نیز از رویکرد دقیق برای حل مسئله استفاده کردند که رویکرد تجزیه ی محدودیت ها (لیو و همکاران، ۲۰۱۷; برونی و همکاران، ۲۰۱۸) و رویکرد محدودیت اپسیلون (تبریزی و قادری، ۲۰۱۶) از آن جمله می باشند.

در نهایت، یکی دیگر از دسته بندی های تحقیقات گذشته را می توان در فاکتورها و آیتم های در نظرگرفته شده توسط آنان عنوان نمود که این دسته بندی در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۱. خلاصه ی تحقیقات گذشته از منظر فاکتورهای در نظر گرفته شده

نویسنده اصلی	استوار	تامین مواد	وقفه تقویمی	عدم قطعیت	تخفیف	فاسدشدنی بودن
بیرجندی (۲۰۱۹)				✓		✓
آرخینپوف (۲۰۱۹)						
مرادی و همکاران (۲۰۱۹)	✓			✓		
بالوکا و کوهن (۲۰۱۹)	✓			✓		✓
لاسزکیک (۲۰۱۹)		✓				✓
حبیبی و همکاران (۲۰۱۹)		✓			✓	
برونی (۲۰۱۸)	✓			✓		
جوزف جیگر (۲۰۱۸)				✓		
تبریزی (۲۰۱۸)		✓			✓	✓
زورقی و همکاران (۲۰۱۷)		✓				✓
لیو و همکاران (۲۰۱۷)						
برونی و همکاران (۲۰۱۷)	✓					
تبریزی و قادری (۲۰۱۶)		✓			✓	
آستا و همکاران (۲۰۱۶)						
که و همکاران (۲۰۱۵)	✓	✓				✓
چالشتاری و شادرخ (۲۰۱۱)		✓				✓
تحقیق حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓

۳- مدل سازی مسئله

در این بخش به تشریح مدل برنامه ریزی ریاضی برای مسئله ی تحقیق پرداخته می شود. لذا ابتدا به تشریح مسئله ی تحقیق پرداخته و سپس اجزای مدل معرفی می گردند و در پایان نیز، نسبت به تشریح مدل و توضیح در خصوص اجزای آن اقدام می گردد.

۳-۱ تشریح مسئله

در این پروژه همزمان دو مسئله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و برنامه‌ریزی سفارش مواد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. منابع موردنیاز در پروژه به دو دسته‌ی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می‌شوند. منابع تجدیدپذیر مانند انواع ماشین‌آلات و نیروی انسانی در اجرای فعّالیّت‌ها صرفاً اشغال می‌شوند، بدین معنا که پس از انجام فعّالیّت آزاد شده و می‌توان از آن‌ها برای اجرای سایر فعّالیّت‌ها استفاده نمود. منابع تجدیدناپذیر مانند مصالح ساختمانی حین اجرای فعالیّت‌ها مصرف شده و دیگر قابل استفاده برای سایر فعّالیّت‌ها نیستند. به این دسته از منابع اصطلاح منابع مصرفی نیز اطلاق می‌شود و اصولاً دوره‌ی مصرف دارند بدین معنا که پس از آن دوره، فاسد شده و دیگر قابل استفاده نمی‌باشند.

برای پروژه چند تأمین‌کننده‌ی منابع مصرفی وجود دارد. هر تأمین‌کننده توانایی تأمین هر قلم از این منابع را داشته و به‌ازای مقادیر متفاوت خرید، تخفیف‌هایی را به‌صورت تخفیف کلّی ارائه می‌کنند.

این مسئله در محیط نادقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد بدین معنا که علاوه بر قیمت‌های خرید مواد، هزینه‌های سفارش‌دهی و مدّت زمان اجرای هر کدام از فعّالیّت‌ها نیز به‌صورت پارامترهای نادقیق درنظر گرفته شده‌اند. برطبق تحقیق چاکرابورتی (۲۰۱۷)، به‌دلیل وجود موارد غیرقابل پیش‌بینی مانند وضعیّت آب‌وهوا و خرابی ماشین‌آلات زمان اجرای فعّالیّت‌ها به سناریو-هایی مجزّا با احتمال وقوع مشخّص تفکیک می‌شود که در هر سناریو مدّت زمان اجرای هر فعّالیّت به‌طور قطعی مشخّص می‌باشد. هم‌چنین قیمت‌های

خرید و هزینه‌ی سفارش‌دهی مواد توسّط اعداد نادقیق فازی ذوزنقه‌ای تعیین می‌گردد.

مفروضات در نظر گرفته شده در این مسئله برای مدل سازی به شرح ذیل می باشند:

- حد بالای زمان تکمیل پروژه مشخّص می‌باشد و هر گونه تأخیر (تعجیل) در تحویل پروژه مستوجب جریمه (پاداش) خواهد بود.
- بنا به دلایل غیرقابل پیش‌بینی مانند آب‌وهوا، اختلال در ماشین-آلات برای زمان اجرای هر فعّالیّت چند سناریو با احتمال وقوع مشخّص درنظر گرفته شده است.
- قیمت خرید واحد هر کدام از مواد مصرفی در هر کدام از بازه‌های تخفیف، توسّط اعداد فازی ذوزنقه‌ای نشان داده می‌شود.
- هزینه‌ی سفارش‌دهی هر کدام از مواد مصرفی توسّط اعداد فازی ذوزنقه‌ای تعیین می‌گردد.
- مقدار موجود هر کدام از منابع تجدیدپذیر در هر دوره‌ی زمانی از حدّ بالایی فراتر نمی‌رود.
- هر فعّالیّت تنها زمانی اجازه‌ی شروع دارد که تمامی منابع (تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر) اجرای آن فراهم باشد.
- وقفه در اجرای هیچ کدام از فعّالیّت‌ها مجاز نیست.
- وقفه‌های تقویمی به‌عنوان فعّالیّت‌هایی با طول زمانی مشخّص و میزان نیازمندی به منابع برابر صفر در مدل لحاظ شده‌اند.
- برای هر فعّالیّت تنها یک‌بار سفارش مواد مصرفی آن فعّالیّت مجاز می‌باشد.
- خرید هر کدام از موادّ مصرفی از هر تأمین‌کننده دارای تابع تخفیف کلّی مخصوص به‌خود می‌باشد.
- موادّ مصرفی دارای دوره‌ی مصرف می‌باشند به‌نحوی که با گذشت تاریخ مصرف هر کدام، فاسد شده و دیگر قابل استفاده نمی‌باشد.
- وقفه های تقویمی را می توان به صورت فعّالیّت هایی با طول زمانی مشخّص و میزان نیاز به منابع برابر صفر در مدل لحاظ نمود.
- اختلالات در تسهیلات، شرایط جوّی و سایر عوامل محیطی را می‌توان به‌عنوان فاکتورهای سازنده‌ی سناریوهای عدم‌قطعیّت درنظر گرفت که درنهایت سناریوهایی با احتمال وقوع مشخّص را می‌سازند به‌نحوی که در هر سناریو مدّت زمان اجرای هر فعّالیّت پروژه مشخّص می‌باشد.

۳-۲ مدل قطعی مسئله

مدل ریاضی مسئله در حالت قطعی به شرح روابط ۱- ۸ می‌باشد.

$$Min\ TC = \sum_f \sum_s \sum_t \sum_{k=1}^{K_{fs}} \tilde{A}_{fs}^{k} Y_{fkst} + \sum_t \sum_f \sum_i \tilde{H}_l \left[\sum_{\tau=t-EX_f}^{t} \sum_s \sum_{k=1}^{K_{fs}} Z_{fksi\tau} - u_{if} \sum_{\tau=1}^{t} X_{i\tau} \right] + \sum_t \sum_f \sum_s \sum_i \sum_{k=1}^{K_{fs}} \tilde{C}_{fks}^{k} u_{if} Z_{fksit} + \sum_{t=DT+1}^{T} P\left(t-DT\right) X_{(n+1)t} + UC \sum_m \sum_i \sum_j \mathrm{Prob}\left(m\right) \Delta_{ij}^{m} - \sum_{t=1}^{DT-1} B\left(DT-t\right) X_{(n+1)t} \quad (۱)$$

$$\sum_t X_{it} = 1 \quad ;\forall i \quad (۲)$$

$$\sum_t \left(d_i^m - t\right) X_{it} - \Delta_{ij}^m \le \sum_t t X_{jt} \quad ;\forall j,m,\forall i \in \Pr\left(j\right) \quad (۳)$$

$$\sum_i \sum_t r_{il} X_{it} \le R_l^{\max} \quad ;\forall l \quad (۴)$$

$$\gamma_{f(k-1)s} Y_{fkst} \le \sum_i u_{if} Z_{fksit} \le \gamma_{fks} Y_{fkst} \quad ;\forall f,s,t,\forall k \le K_{fs} \quad (۵)$$

$$\sum_{k=1}^{K_{fs}} Y_{fkst} \le 1 \quad ;\forall f,s,t \quad (۶)$$

$$X_{it} \le \sum_{\tau=t-EX_f}^{t} \sum_s \sum_{k=1}^{K_{fs}} Z_{fksit} \quad ;\forall f,i,t \quad (۷)$$

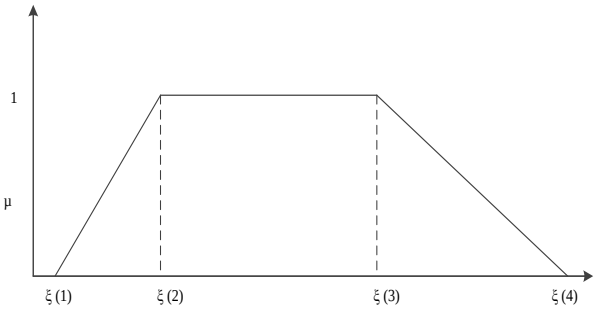
$$Y_{fkst}, Z_{fksit}, X_{it} \in \{0\ or\ 1\} \ ;\forall i,\ f,k,s,t$$
$$\Delta_{ij}^m \ge 0 \quad ;\forall i,\ j,m \quad (۸)$$

رابطه‌ی ۱، تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد و برابر مجموع هزینه‌ها (سفارش‌دهی، نگه‌داری، خرید و جریمه‌ی تأخیر در تحویل پروژه) منهای پاداش تعجیل در تحویل پروژه می‌باشد. رابطه‌ی ۲ اجرای تمامی فعّالیّت‌های پروژه را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۳ رعایت روابط پیش‌نیازی را تضمین می‌کند. رابطه‌ی ۴ رعایت سقف استفاده از منابع تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. روابط ۵ و ۶ تضمین می‌کنند که تنها در یکی از سطوح تخفیف از هر منبع مصرفی سفارش صورت گیرد. رابطه‌ی ۷ اجرای هر فعّالیّت را منوط به تأمین منابع مصرفی آن فعّالیّت می‌داند. رابطه‌ی ۸ دامنه‌ی مقادیر متغیّرها را نشان می-دهد.

۳-۳ استوارسازی مدل

با عنایت به روابط ۱- ۸ تنها رابطه‌ی دارای پارامترهای نادقیق رابطه‌ی ۱ می‌باشند که پارامترهای نادقیق فازی ذوزنقه‌ای را دارا می‌باشد. لذا برای استوارسازی تنها توجّه به این رابطه کفایت می‌کند. یکی از مهم ترین رویکردهای استوارسازی مدل های سناریویی مدل مولوی می باشد. رویکرد ملوی در زمانی کاربرد دارد که سناریوهای وقوع چندان اشتراکی با هم نداشته باشند امّا در این مورد ممکن است بیش از نیمی از فعّالیّت‌ها بین دو یا چند سناریو، زمان وقوع یکسان داشته باشند به‌عبارت بهتر تا لحظه‌ی اجرای آخرین فعّالیّت هر سناریو نتوان نوع سناریو را تعیین و در نتیجه برنامه‌ریزی مدوّنی ارائه نمود. به این دلیل نیز امکان استفاده از رویکرد ملوی در عمل معنا نخواهد داشت.

فرض کنید پارامتر نادقیقی مانند $\tilde{\xi} = (\xi(1),\xi(2),\xi(3),\xi(4))$ یک عدد فازی ذوزنقه‌ای باشد، تابع عضویّت امکانی $\mu(\xi)$ این پارامتر در شکل ۱ نشان داده شده است (پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۲). لازم به ذکر است که این تابع، امکان وقوع هر کدام از مقادیر پارامتر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تابع عضویت امکانی یک عدد فازی ذوزنقه‌ای

با توجه به پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) معادل استوار امکانی رابطه‌ی ۱ به‌شرح رابطه‌ی ۹ خواهد شد.

$$Min\ TC = Avg + \gamma\left(TC^{max} - TC^{min}\right)$$
$$Avg = \sum_f\sum_s\sum_i\sum_{k=1}^{K_{fs}}\left(\frac{A_{fs}^1 + A_{fs}^2 + A_{fs}^3 + A_{fs}^4}{4}\right)Y_{fsi} + \sum_i\sum_f\sum_t\left(\frac{H_f^1 + H_f^2 + H_f^3 + H_f^4}{4}\right)\left[\sum_{t=t-EX_f}^{t}\sum_s\sum_{k=1}^{K_{fs}}Z_{fsiit'} - u_{ij}\sum_{t=1}^{t}X_{it}\right]$$
$$+\sum_i\sum_f\sum_s\sum_t\sum_{k=1}^{K_{fs}}\left(\frac{C_{fsi}^1 + C_{fsi}^2 + C_{fsi}^3 + C_{fsi}^4}{4}\right)u_{ij}Z_{fsiit} + \sum_{t=DT+1}^{T}P(t-DT)X_{(t+1)jr} + UC\sum_m\sum_i\sum_j \mathrm{Prob}(m)\Delta_{ij}^m - \sum_{t=1}^{DT-1}B(DT-t)X_{(t+1)jr} \quad (۹)$$
$$TC^{max} = \sum_f\sum_s\sum_i\sum_{k=1}^{K_{fs}}A_{fs}^4Y_{fsi} + \sum_i\sum_f\sum_t H_f^4\left[\sum_{t=t-EX_f}^{t}\sum_s\sum_{k=1}^{K_{fs}}Z_{fsiit'} - u_{ij}\sum_{t=1}^{t}X_{it}\right] + \sum_i\sum_f\sum_s\sum_t\sum_{k=1}^{K_{fs}}C_{fsi}^4u_{ij}Z_{fsiit}$$
$$TC^{min} = \sum_f\sum_s\sum_i\sum_{k=1}^{K_{fs}}A_{fs}^1Y_{fsi} + \sum_i\sum_f\sum_t H_f^1\left[\sum_{t=t-EX_f}^{t}\sum_s\sum_{k=1}^{K_{fs}}Z_{fsiit'} - u_{ij}\sum_{t=1}^{t}X_{it}\right] + \sum_i\sum_f\sum_s\sum_t\sum_{k=1}^{K_{fs}}C_{fsi}^1u_{ij}Z_{fsiit}$$

در این رابطه پارامتر γ هزینه‌ی واحد اختلاف بین TC^{max} و TC^{min} می‌باشد.

بنابراین مدل استوار مسئله به شرح روابط ۲-۹ می‌باشد.

۴. رویکرد حل

مسائل زمان بندی پروژه با محدودیت منابع در دسته مسائل بهینه سازی NP-hard قرار می گیرند که در عمل یکی از سخت ترین مسائل کلاسیک تحقیق در عملیات و مدیریت پروژه هاست (آرتیگس و همکاران، ۲۰۰۸). لذا با توجه به این که مدل تحقیق حاضر نسبت به مدل های کلاسیک زمان بندی پروژه با منابع محدود دارای متغیرها و محدودیت های بیشتری است، دارای پیچیدگی زمانی بیشتری بوده و لذا این مدل نیز در دسته مسائل بهینه سازی NP-hard قرار می گیرد. حل این مدل ها برای مسائل عددی در اندازه های بزرگ و نزدیک به شرایط دنیای واقعی بسیار زمان بر بوده و در برخی موارد حل آن ها با نرم افزارهای تجاری غیرممکن می باشد (آرتیگوس، ۲۰۱۳). از این روی، به منظور حل این مدل در این تحقیق از رویکرد فراابتکاری برای کاهش زمان حل استفاده می شود. روش‌های حل شامل استفاده از سالور سیپلکس و الگوریتم ژنتیک ترکیب با سالور سیپلکس می‌باشد. به‌عبارت ساده‌تر در روش پیشنهادی دوّم زمانبندی پروژه با کمک الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی سفارش مواد با توجّه به برنامه‌ی زمانی تولیدی هر جواب از الگوریتم ژنتیک، توسّط سالور سیپلکس صورت می‌گیرد.

۴-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک تکنیک جستجو در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی مدل، ریاضی و مسائل جستجو است. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی فرگشتی مانند وراثت، جهش زیست‌شناسی و اصول انتخابی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌شود (میرجلیلی، ۲۰۱۹). الگوریتم‌های ژنتیک اغلب گزینه خوبی برای تکنیک‌های پیش‌بینی بر مبنای رگرسیون هستند. در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک یک تکنیک برنامه‌نویسی است که از تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگوی حل مسئله استفاده می‌کند (وایتلی، ۱۹۹۴). مسئله‌ای که باید حل شود دارای ورودی‌هایی می‌باشد که طی یک فرایند الگوبرداری شده از تکامل ژنتیکی به راه‌حل‌ها تبدیل می‌شود سپس راه حل‌ها به عنوان کاندیداها توسط تابع برازش یا تابع برازندگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و چنانچه شرط خروج مسئله فراهم شده باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد. به‌طور کلی یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به صورت فرایندهای تصادفی انتخاب می‌شوند که این الگوریتم‌ها از بخش‌های تابع برازش، نمایش، انتخاب و تغییر تشکیل می‌شوند (گنلین، ۲۰۰۴).

الگوریتم‌های ژنتیک یکی از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی است که ایده آن برگرفته از طبیعت می‌باشد. الگوریتم‌های ژنتیک برای روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی در حل مسائل خطی، محدب و برخی مشکلات مشابه بسیار موفق بوده‌اند ولی الگوریتم‌های ژنتیک برای حل مسائل گسسته و غیر خطی بسیار کاراتر می‌باشند. به عنوان مثال می‌توان به مسئله فروشنده دوره‌گرد اشاره کرد. در طبیعت از ترکیب کروموزوم‌های بهتر، نسل‌های بهتری پدید می‌آیند. در این بین گاهی اوقات جهش‌هایی نیز در کروموزوم‌ها روی می‌دهد که ممکن است باعث بهتر شدن نسل بعدی شوند. الگوریتم ژنتیک نیز با استفاده از این ایده اقدام به حل مسائل می‌کند (متیو، ۲۰۱۲).

گام‌های این الگوریتم به صورت زیرند (دب و همکاران، ۲۰۰۲):

۱. ایجاد جمعیت تصادفی و ارزیابی آن‌ها.
۲. انتخاب والدین و ترکیب آن‌ها و ایجاد جمعیت فرزندان نوع یک با استفاده از عملگر تقاطع.
۳. انتخاب اعضای جمعیت و اعمال جهش روی آن‌ها و ایجاد جمعیت جهش‌یافتگان (فرزندان نوع دو) با استفاده از عملگر جهش.
۴. ادغام جمعیت اصلی ، فرزندان و جهش‌یافتگان، مرتب‌سازی جمعیت شکل گرفته برحسب هزینه اعضا و به‌صورت صعودی و انتخاب جمعیت اصلی جدید(به تعداد اعضای جمعیت اولیه فرد اول از جمعیت مرتب‌شده).
۵. تکرار فرآیند از مرحله دوم درصورتی که شرایط توقف حاصل نشده باشد.
۶. پایان.

دلیل بهره گیری از این الگوریتم در این تحقیق، خواصی است که الگوریتم ژنتیک در حل مسائل دارد که برخی از آن ها به شرح ذیل هستند (میرجلیلی، ۲۰۱۹):

- یافته های محاسباتی و نظری در ادبیات موضوع تحقیق حکایت از آن دارد که الگوریتم ژنتیک در حل مسائل عددی که متغیرهای عددی صحیح باینری زیادی دارند، عملکرد بسیار مناسب تری از سایر رویکردها داشته است.
- این الگوریتم رویکرد جست و جوی ساده ای داشته و زمان پردازش نسبتا مناسبی در غالب مسائل از خود نشان می دهد.
- انعطاف بالایی دارد و با هر نوعی از تابع هدف و محدودیت در فضای جست و جو فعالیت می کند.
- صرفا از مقادیر تابع هدف به منظور اجرای بهینه سازی استفاده نموده و به همین دلیل حافظه ی کمتری را اشغال می نماید.

در ادامه، نحوه ی آماده سازی الگوریتم برای حل مسئله ی تحقیق تشریح می گردد.

۴-۲ نحوه ی آماده سازی الگوریتم

ایجاد جمعیت تصادفی:

یکی از پارامترهای ورودی الگوریتم تعداد افراد جمعیت جواب می‌باشد که این پارامتر با n_{pop} نشان‌داده می‌شود که در حقیقت به‌تعداد این پارامتر جواب اولیه تولید می‌شود.

ساختار جواب در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی:

چون هدف این بخش از روش حل تعیین زمان شروع اجرای هر کدام از فعّالیّت‌ها می‌باشد، ساختار جواب در واقع برداری سطری با تعداد درایه‌های برابر تعداد فعّالیّت‌های غیر موهومی (بجز فعّالیّت‌های شروع و پایان پروژه) بوده که هر درایه زمان شروع آن فعّالیّت را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال پروژه‌ای با پنج فعّالیّت و زمان کلّ اجرا برابر ده روز را درنظر بگیرید یک رشته جواب برای زمان‌بندی این پروژه به‌صورت شکل ۲ می‌باشد.

2	4	8	9	10

شکل ۲. یک رشته جواب برای پروژه‌ای با ۵ فعّالیّت و زمان اجرای ۱۰ روز

ارزیابی جواب‌ها:

پس از تعیین برنامه‌ی زمانبندی پروژه نوبت به برنامه‌ریزی سفارش منابع می‌رسد که این مورد با داشتن ستون زمان‌های شروع اجرای فعّالیّت‌ها توسّط نرم‌افزار GAMS انجام می‌پذیرد. بدین‌ترتیب خروجی سالور سیپلکس درواقع هزینه‌ی کلّ برنامه‌ی زمانی (TC) و متغیّر زمان سفارش از هر منبع برای هر فعّالیّت (z_{fi}^{t}) خواهد بود.

انتخاب اعضا:

انتخاب اعضا در هر دو مرحله ۲ و ۳ از الگوریتم با استفاده از چرخه رولت انجام می‌گیرد. فرایند انتخاب با این شیوه به این صورت است که برحسب هزینه هر کدام از اعضای جمعیت یک احتمال انتخاب برای آن عضو محاسبه نموده و احتمال‌های تجمعی را محاسبه می‌نماییم سپس یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه صفر تا یک تولید می‌کنیم ، اولین عضو جمعیت که احتمال تجمعی انتخاب آن بزرگتر از عدد تصادفی ایجادشده باشد انتخاب می‌گردد. لازم به توضیح است؛ در فاز دوم که عمل تقاطع انجام می‌گیرد نظر به اینکه دو عضو از جمعیت به‌عنوان والد انتخاب شوند هر والد به‌طور جداگانه با مکانیزم چرخه رولت از بین تمامی اعضا انتخاب می‌گردد و در هر بار استفاده از این مکانیزم یک عدد تصادفی منحصر به‌فرد ایجاد می‌شود.در این پژوهش احتمال انتخاب اعضا با روش بولتزمان به شرح رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌گردد:

C_i : هزینه‌ی عضو iام جمعیّت مرتّب شده به‌صورت صعودی هزینه‌ها.

P_i : احتمال انتخاب عضو iام جمعیّت مرتّب شده به‌صورت صعودی هزینه‌ها.

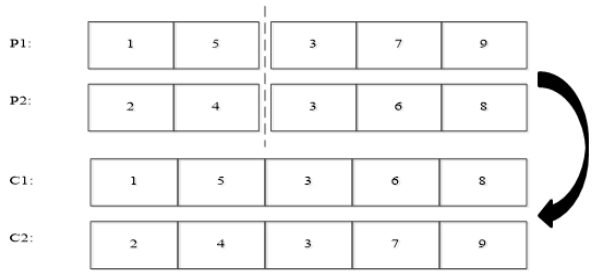
n : تعداد کلّ اعضای جمعیّت.

β : پارامتر فشار انتخاب، این پارامتر در بازه‌ی صفر و یک بوده و هر چه بزرگتر باشد احتمال انتخاب افراد با هزینه‌ی کمتر بیشتر و هر چه کوچکتر باشد احتمال انتخاب افراد به سمت برابری با هم سوق پیدا می‌کند.

$$P_i = \frac{e^{-\beta C_i}}{\sum_{j=1}^{n} e^{-\beta C_j}} \qquad (۱۰)$$

عملگر تقاطع[1]:

در این پژوهش از عملگر معروف تک نقطه‌ای استفاده کرده‌ایم بدین معنا که یک نقطه به‌تصادف از بازه‌ی $[1,n]$ (n معرّف تعداد فعّالیّت‌های پروژه می‌باشد) انتخاب نموده و از آنجا دو رشته جواب والد را برش می‌زنیم. قسمت سمت چپ رشته‌ی والد اوّل با قسمت سمت راست رشته‌ی والد دوّم، رشته جواب فرزند اوّل و قسمت سمت چپ رشته‌ی والد دوّم با قسمت سمت راست رشته‌ی والد اوّل، رشته جواب فرزند دوّم را تشکیل می‌دهند. برای درک بهتر موضوع به شکل ۳ مراجعه بفرمایید.



شکل ۳. عملگر تقاطع تک نقطه‌ای

عملگر جهش[2]:

عمل جهش روی یک عضو جمعیت اعمال شده و تنها یک فرزند نیز نتیجه می‌دهد.همانند انتخاب اعضا در عمل تقاطع انتخاب عضو برای اعمال این عملگر نیز با استفاده از چرخه رولت صورت می‌گیرد.این عملگر تنها یک پارامتر با نام μ دارد که نشان‌دهنده درصدی از درایه‌های قابل تغییر جواب انتخاب شده است که طی فرآیند جهش دچار تغییر می‌شوند. عمل جهش مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب طی گام‌های زیر انجام می‌گیرد.

۱. تعیین تعداد درایه‌های قابل تغییر در موجود در بردار رشته جواب (n_μ)، این مورد طبق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود. در این رابطه n تعداد درایه‌های رشته جواب بوده و تابع $ceil(\ )$ حاصل ضرب را به بالا رند می‌کند.

$$n_\mu = ceil(\mu * n) \qquad (۱۰)$$

۲. تعیین درایه‌های قابل تغییر از رشته جواب (SE)، این مورد نیز طبق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه خواهد شد. در این رابطه تابع $randsample(\ )$ به‌صورت تصادفی از درایه‌های رشته جواب به تعداد n_μ درایه را انتخاب می‌کند.

$$SE = randsample(n, n_\mu) \qquad (۱۱)$$

۳. تغییر مقدار درایه‌های انتخاب شده در این گام رخ می‌دهد. به‌عبارت ساده‌تر در این مرحله مقدار هر درایه‌ی انتخابی با یک عدد تصادفی در بازه‌ی $[1,800]$ جایگزین می‌شود.

۳-۴ تنظیم پارامترها

نوع عملکرد الگوریتم های متاهیوریستیک وابستگی زیادی به مقدار مولفه های الگوریتم دارد. در همین راستا، رویکردهای متعددی به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم های متاهیوریستیک به منظور داشتن یک رویکرد حل قدرتمند وجود دارد. در این بخش از رویکرد تاگوچی به دلیل ویژگی های متمایزی مثل کاهش قابل توجه تعداد آزمایشات و همچنین حفظ اطلاعات مورد نیاز استفاده می شود. داشتن مولفه های متعامد بر یکدیگر در این رویکرد آن را قادر می سازد تا متغیرهای تصمیم متعددی را با استفاده از تعداد کمی از آزمایشات در نظر بگیرد. حاجی پور (۲۰۱۴) در پژوهش خود به این نتیجه رسید که رویکرد تاگوچی موجب تنظیم بهینه ی سطوح پترتمترهای الگوریتم بر مبنای تحلیل های آماری و تحلیل حساسیت ها می شود. نتایج یافته شده برای هر یک از مجموعه پارامترها به شکل مقدار متوسط و واریانس ارکان الگوریتم ارائه می گردد. مقادیر متوسط و واریانس

[1] Crossover

[2] Mutation

در پایان یکپارچه و معیاری واحد به اسم نرخ سیگنال نسبت به نویز و یا S/N[1] ارائه می گردد. در این جا، سیگنال و نویز نشان دهنده ی مقادیر مناسب (متغیرهای پاسخ) و نامناسب (انحراف استاندارد) می باشند.

با حفظ چارچوب های اصل روش، یک نسخه ی تاگوچی چندهدفه در رابطه ی شماره ۱۲ در راستای محاسبه ی مقدار هدف y که متغیر کیفیت نام دارد ارائه شده به نحوی که y_i و n نشان دهنده ی ارزش پاسخ i امین تست و تعداد آرایه های متعامد هستند. علاوه بر این، مقادیر جواب های آزمایش ها توسط رابطه ی ۱۳ حساب می شوند. مهم ترین مزیت بهره گیری از این رابطه آن است که این معیار به طور هم زمان واگرایی و همگرایی را در بطن خود در نظر می گیرد.

$$(۱۲) S/N = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}{n}\right]$$

$$(۱۳) = \frac{MID}{DM};\ i = 1, 2, \ldots, n \quad y_i$$

به منظور داشتن الگوریتمی قدرتمندتر و تخصصی تر، تنظیم پارامترها بر مبنای اندازه ی مسئله انجام پذیرفت. در این راستا، مسائل در سه گروه شامل مسائل کوچک، متوسط و بزرگ طبقه بندی شدند. مسائلی با داشتن ۲۰ فعالیت به عنوان مسائلی در ابعاد کوچک، مسائلی با حداکثر ۵۰ فعالیت به عنوان مسائلی در ابعاد متوسط و مسائلی با بیشتر از ۵۰ فعالیت به عنوان مسائلی در ابعاد بزرگ دسته بندی می شود. جدول ۲ آرایه های طراحی شده برای الگوریتم NSGA II است. هر آرایه پنج بار برای محاسبه ی نرخ S/N تکرار شده است.

فاکتورهای جمعیت اولیه، تعداد تکرار، نرخ تقاطع، نرخ جهش و نرخ بازتولید به عنوان پارامترهای اصلی در الگوریتم مورد نظر بوده اند. در جدول ۲، A نشان گر اندازه جمعیت، B نشان دهنده ی تعداد تکرار، C نماد نرخ تقاطع، D نرخ بازتولید و همچنین E نشان گر نرخ جهش است.

جدول ۲. آرایه ی در نظر گرفته شده برای الگوریتم NSGA II

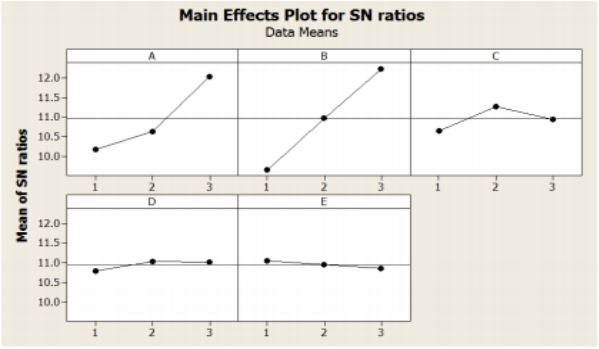
آزمایش	A	B	C	D	E
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۲
۳	۱	۱	۱	۱	۳
۴	۱	۲	۲	۲	۱
۵	۱	۲	۲	۲	۲
۶	۱	۲	۲	۲	۲
۷	۱	۳	۳	۲	۱
۸	۱	۳	۲	۳	۱
۹	۱	۳	۳	۳	۳
۱۰	۲	۱	۲	۳	۱
۱۱	۲	۱	۳	۳	۲
۱۲	۱	۲	۱	۳	۳
۱۳	۲	۲	۳	۱	۱
۱۴	۲	۲	۳	۱	۲
۱۵	۱	۲	۳	۱	۲
۱۶	۲	۳	۱	۲	۱
۱۷	۲	۳	۱	۲	۲
۱۸	۲	۳	۱	۱	۳
۱۹	۲	۱	۳	۲	۱
۲۰	۳	۱	۳	۲	۲
۲۱	۲	۱	۳	۱	۳
۲۲	۳	۲	۱	۳	۲
۲۳	۲	۱	۱	۳	۲
۲۴	۳	۲	۱	۲	۳
۲۵	۳	۳	۲	۲	۳
۲۶	۳	۲	۲	۱	۲
۲۷	۳	۲	۲	۲	۱

پارامترهای الگوریتم و سطوح بهینه ی آن در جدول ۳ به نمایش در آمده است. همچنین، شاخص سیگنال به نویز و مقادیر بهینه ی پارامترها در شکل ۴ به نمایش در آمده است. چنان که در جدول ۳ قابل مشاهده است، اندازه ی جمعیت بهینه برای مسائل عددی کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب برابر با ۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۴۵ است. همچنین تعداد تکرار بهینه برای مسائل فوق به ترتیب ۱۴۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ است.

جدول ۳. پارامترها و مقادیر بهینه ی آن ها در NSGA II

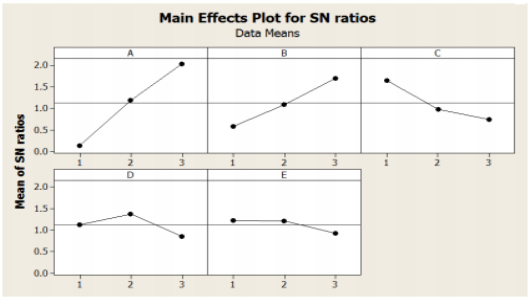
فاکتور	نماد	مسائل کوچک	مسائل متوسط	مسائل بزرگ
اندازه ی جمعیت	A	۱۱۰	۱۳۰	۱۴۵
تعداد تکرار	B	۱۴۰	۱۴۰	۱۷۰
نرخ تقاطع	C	۷۵٪	۶۵٪	۶۵٪
نرخ بازتولید	D	۴٪	۶٪	۸٪
نرخ جهش	E	۴۹٪	۴۹٪	۵۴٪

همچنین شکل ۴ نشانگر سطوح بهینه ی پارامترهای الگوریتم برای مسائل عددی در اندازه های متنوع است. به عنوان مثال، شکل ۴ (الف) بیان می دارد که برای مسائل کوچک، شاخص اندازه جمعیت (A) در سطح ۳ مقدار بهینه دارد چرا که شاخص سیگنال به نویز بیشتری نسبت به سطوح شماره ی ۱ و ۲ است. همچنین برای پارامتر تعداد تکرار (B) هم سطح ۳ مقدار بهینه را از نظر شاخص سیگنال به نویز ایجاد می کند.

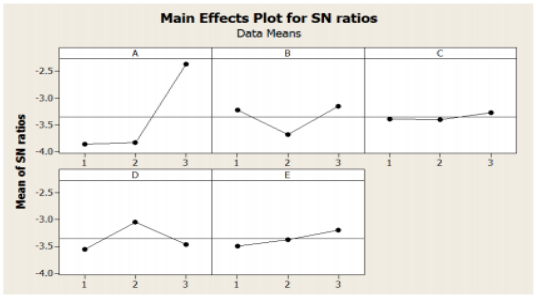


شکل ۴ (الف) مسائل کوچک

[1] Signal to Noise



شکل ۴ (ب) مسائل متوسط



شکل ۴ (ج) مسائل بزرگ

شکل ۴. نمودار نرخ سیگنال به نویز برای الگوریتم NSGA II

۴- یافته های عددی

در این بخش به تشریح یافته های عددی و نتایج حاصل از محاسبات عددی مدل پرداخته می شود. لذا ابتدا نحوه ی تهیه ی داده ها توضیح داده می شود و سپس نتایج حاصل از حل مسئل تشریح می شوند.

۴-۱ داده های مسئله

به منظور ارزیابی کارآیی رویکرد پیشنهادی، الگوریتم بر روی سه مسئله ی نمونه ای اجرا شده و نتایج مشخص شدند. کلیه ی مسائل با نرم¬افزار GAMS بر روی سیستمی با جنبه های فنی Intel Core i5 CPU و ۳.۴ GHz و ۸ GB RAM پیاده سازی شدند. ساختار کلی مسائل نمونه¬ای در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که مسائل ۱ و ۲ و ۳ دارای شبکه پیش نیازی (CPM) مشابه است. فعالیت¬های ابتدا و انتها در هر مسئله موهومی است و زمان و منابع مورد نیاز آن ها ۰ است.

این مسائل و صدها مسئله ی دیگر با نرم افزار زمان بندی پروژه ایجاد و در سایت گانت چارت (http:// www.ganttchart.com) موجود است. از میان مسائلی با سایزهای متنوع که در این سایت موجود است، تعدادی از آنان در اندازه های متنوع انتخاب و همراه با نمودار روابط پیش نیازی آن ها در این پژوهش استفاده شدند.

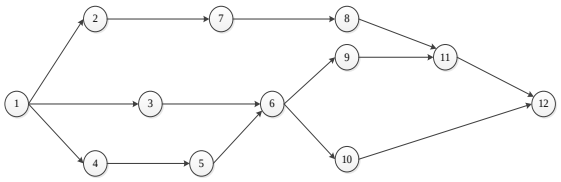
جدول ۴ داده های مربوط به مسائل عددی را نشان می دهد.

جدول ۴. داده های مربوط به مسائل عددی

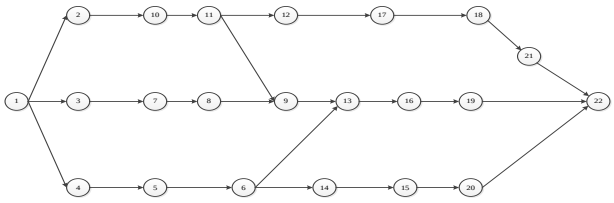
شماره مسئله	کد	n	L	F	T	S	M	K
۱	model1	۱۰	۳	۵	۲۰	۳	۳	۳
۲	model2	۲۰	۳	۵	۴۰	۳	۳	۳
۳	model3	۳۰	۴	۵	۶۰	۴	۴	۳
۴	model4	۳۰	۵	۶	۸۰	۴	۴	۴

در این جدول همان¬گونه که در قسمت تشریح مسئله نیز عنوان شد نمادهای به¬ترتیب تعداد فعّالیّت¬ها، تعداد منابع تجدیدپذیر، تعداد منابع تجدیدناپذیر، تعداد دوره¬های زمانی، تعداد تأمین¬کنندگان، تعداد سناریوهای زمان اجرای فعّالیّت¬ها و تعداد بازه¬های تخفیف در خرید منابع تجدیدناپذیر را نشان می¬دهند.

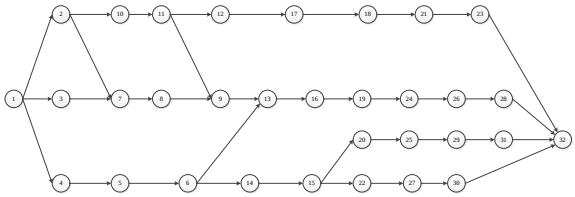
شبکه¬ی AON مسائل نمونه¬ای اوّل (model1)، دوّم (model2)، سوم و چهارم (model3,4) به¬ترتیب در اشکال ۵-۷ قابل مشاهده است.



شکل ۵. شبکه¬ی AON مسئله¬ی نمونه¬ای شماره¬ی یک



شکل ۶. شبکه¬ی AON مسئله¬ی نمونه¬ای شماره¬ی دو



شکل ۷. شبکه¬ی AON مسئله¬ی نمونه¬ای شماره¬ی سه

۴-۲ نتایج حل مسائل

جدول ۵ نتایج حاصل از حل مسائل عددی را نشان می دهد.

به عنوان نمونه، جداول ۶ و ۷ اطلاعات مربوط به برنامه زمانی بهینه و همچنین زمان بندی مسئله ی نمونه ای شماره ی ۲ را به نمایش می گذارند.

جدول ۵. نتایج حاصل از حل مسائل عددی

روش حلّ پیشنهادی		نرم‌افزار GAMS		کد مسئله
زمان حل(ثانیه)	TC	زمان حل (ثانیه)	TC^*	
۴۲	-۱۰۳۷۷۴۱.۵	۱۰۰	-۱۰۲۵۲۱۷.۵	model1
۱۸۲	-۳۸۰۹۶۲۳	۳۰۰	-۳۸۰۲۷۹۳.۵	model2
۵۷۸	-۸۰۰۳۹۴۲.۵	۹۰۰	-۷۹۹۲۸۴۵.۵	model3
۱۳۲۰	-۱۰۷۸۷۴۳۴.۵	۱۸۰۰	-۱۰۷۸۶۳۵۲.۵	model4

جدول ۶. برنامه زمانی بهینه ی آغاز فعالیت¬های مسئله ۲

شماره فعالیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲
روز آغاز فعالیت	1	3	8	2	5	11	10	24	25	14	19	16	17	16	18	21	22	26	29	27	26	30

جدول ۷. سیاست بهینه سفارش¬دهی منابع در مسئله ۲

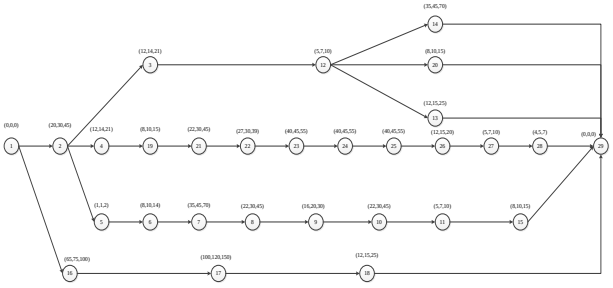
روز	میزان سفارش منبع ۱	میزان سفارش منبع ۲	میزان سفارش منبع ۳	میزان سفارش منبع ۴
۱	12	11	5	1
۲	21	22	11	3
۳	23	20	7	4
۴	25	21	9	5
۵	29	17	8	4
۶	29	37	11	8
۷	26	29	5	9
۸	22	30	10	14
۹	37	38	10	26
۱۰	56	36	15	14
۱۱	42	30	8	31
۱۲	58	66	8	33
۱۳	59	46	16	32
۱۴	50	44	29	53
۱۵	69	81	12	34
۱۶	85	65	19	45
۱۷	80	98	27	42
۱۸	79	57	27	77
۱۹	83	76	17	67
۲۰	126	96	12	49
۲۱	59	80	47	11
۲۲	105	73	14	115
۲۳	141	124	34	56
۲۴	34	156	45	87
۲۵	115	121	60	30
۲۶	41	123	37	104
۲۷	252	254	31	76
۲۸	97	42	59	53
۲۹	71	18	14	77
۳۰	42	34	21	24

همان گونه که در جدول ۵ مشاهده می شود، الگوریتم ترکیبی ارائه شده توانسته است مدت زمان مورد نیاز برای حل مسائل عددی را به شدت کاهش دهد و این کاهش قابل توجه زمان حل در کنار فاصله ی بسیار کم نسبت به حل دقیق، نشان دهنده ی عملکرد بسیار مناسب الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از منظر روش حل و نزدیکی به جواب بهینه می باشد.

۳-۴ نمونه موردی

به منظور سنجش عملکرد الگوریتم در حل مسائل عددی در ابعاد واقعی، داده های مربوط به نمونه ی موردی در خصوص یک پروژه تعمیر منبع نفت جمع آوری شد و در این قسمت نسبت به پیاده سازی مدل بر روی این نمونه ی موردی اقدام می گردد. پروژه مربوط به تعمیر یک مخزن نفت یک میلیون بشکه ای می باشد. شبکه ی AON مطالعه ی موردی در شکل ۸ نشان داده شده است.

در این شکل اعداد داخل پرانتز به¬ترتیب از چپ به راست طول مدّت خوشبینانه، محتمل و بدبینانه زمان اجرای هر فعّالیّت را نشان می¬دهند. همان¬گونه که از شکل برمی¬آید فعّالیّت¬های شماره¬ی ۱ و ۲۹ به¬ترتیب فعّالیّت¬های موهومی معرّف زمان شروع و ختم پروژه با مدّت زمان قطعی صفر را نشان می¬دهند. همان¬گونه که از شکل ۸ برمی¬آید این پروژه به¬ازای هر سه سناریو یک مسیر بحرانی یکسان دارد؛ این مسیر در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸. شبکه¬ی AON نمونه ی موردی

شکل ۹. مسیر بحرانی نمونه ی موردی

همان¬گونه که شکل ۹ نشان می¬دهد مدّت زمان اجرای پروژه به¬ازای سه سناریوی خوشبینانه، محتمل و بدبینانه به-ترتیب برابر ۲۳۰، ۲۷۶ و ۳۶۷ روز می¬باشد. ضمن مشورت با متخصّصین امر هزینه¬ی نقض محدودیّت پیش¬نیازی تنها برای فعّالیّت¬های موجود در مسیر بحرانی درنظر گرفته شده و این میزان به¬ازای واحد زمانی برابر ۲۱۰۰۰۰ واحد پولی درنظر گرفته می¬شود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل بهینه¬سازی استوار امکان برای مسئله¬ی زمانبندی پروژه با منابع محدود همراه با برنامه¬ریزی سفارش مواد ارائه شد. در این تحقیق فرض شد که چند سناریو برای انجام پروژه مطرح می باشد و در هر سناریو زمان انجام کار با سناریوی دیگر تفاوت داشت. مدل ارائه شده در تحقیق حاضر به دنبال کمینه سازی هزینه های پروژه شامل هزینه های سفارش¬دهی، نگه¬داری، خرید و جریمه¬ی تأخیر در تحویل پروژه منهای پاداش تعجیل در تحویل پروژه بود. پس از ارائه ی مدل، با رویکرد امکانی استوارسازی مدل انجام شد. از جمله نکات برجسته در مدل، در نظر گرفتن هم زمان مباحث تجدید ناپذیری مواد، فسادپذیر بودن و همچنین فرض تخفیف در منابع پروژه و عدم قطعیت، وقفه های تقویمی و سناریوهای مختلف زمانی پروژه بود. در نظر گرفتن همه ی این موارد در قالب مدل یکپارچه ی زمان بندی و سفارش دهی مواد می تواند منجر به کاربردی تر شدن مدل و نزدیک تر شدن آن به شرایط دنیای واقعی شود. برای مدل پیشنهادی یک روش ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و نرم¬افزار گمز طرّاحی شد. نرم¬افزار گمز نسبت به روش ترکیبی پیشنهادی نتایج بهتر ولی با زمان حلّ بیشتر ارائه نمود. رویکرد ارائه شده توانست در عین کاهش قابل ملاحظه ی زمان حل، جواب هایی نزدیک به جواب های بهینه ارائه نماید و لذا کارکرد مناسب رویکرد حل ارائه شده برای حل مسائل عددی در اندازه های مختلف به تایید رسید.

به¬منظور پیشنهاداتی جهت بهبود تحقیق کنونی می¬توان استفاده از اعداد نادقیق فازی در تعیین زمان اجرای هر فعّالیّت را درنظر گرفت و حتّی از مفاهیم بدیعی مانند تاب¬آوری در مدل¬سازی بهره برد. هم¬چنین از سایر الگوریتم¬های فراابتکاری برای حلّ مسئله استفاده نمود.

مراجع

Aquilano, N. J., & Smith, D. E. (1980). A formal set of algorithms for project scheduling with critical path scheduling/material requirements planning. Journal of Operations Management, 1(2), 57-67.

Artigues, C., Demassey, S., & Neron, E. (Eds.). (2013). Resource-constrained project scheduling: models, algorithms, extensions and applications. John Wiley & Sons.

Ben-Tal, A., El Ghaoui, L., & Nemirovski, A. (2009). Robust optimization. Princeton university press.

Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. Operations research, 52(1), 35-53.

Bertsimas, D., Brown, D. B., & Caramanis, C. (2011). Theory and applications of robust optimization. SIAM review, 53(3), 464-501.

Birjandi, A., Mousavi, S. M., Hajirezaie, M., & Vahdani, B. (2019). A new weighted mixed integer nonlinear model and FPND solution algorithm for RCPSP with multi-route work packages under fuzzy uncertainty. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 37(1), 737-751.

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.

Chakrabortty, R. (2017). Managing uncertainties and disruptions in resource constrained project scheduling (Doctoral dissertation, The University of New South Wales, Canberra, Australia).

Chaleshtarti, A. S., & Shadrokh, S. (2011, November). 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 (Vol. 1, pp. 147-152). IEEE.

Habibi, F., Barzinpour, F., & Sadjadi, S. (2018). Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments. Journal of project management, 3(2), 55-88.

Hajipour, V., Rahmati, S. H. A., Pasandideh, S. H. R., & Niaki, S. T. A. (2014). A multi-objective harmony search algorithm to optimize multi-server location–allocation problem in congested systems. Computers & Industrial Engineering, 72, 187-197.

Joy, J., Rajeev, S., & Abraham, E. C. (2021). Particle swarm optimization for multi resource constrained project scheduling problem with varying resource levels. Materials Today: Proceedings.

Ke, H., Wang, L., & Huang, H. (2015). An uncertain model for RCPSP with solution robustness focusing on logistics project schedule. International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, 3, 71-83.

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

Laszczyk, M., & Myszkowski, P. B. (2019). Improved selection in evolutionary multi–objective optimization of Multi–Skill Resource–Constrained project scheduling problem. Information Sciences, 481, 412-431.

Liu, Z., Yang, L., Deng, R., & Tian, J. (2017). An effective approach with feasible space decomposition to solve resource-constrained project scheduling problems. Automation in Construction, 75, 1-9.

Ma, G., Gu, L., & Li, N. (2015). Scenario-based proactive robust optimization for critical-chain project scheduling. Journal of Construction Engineering and Management, 141(10), 04015030.

Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. In Evolutionary algorithms and neural networks (pp. 43-55). Springer, Cham.

Moradi, M., Hafezalkotob, A., & Ghezavati, V. (2019). Robust resource-constrained project scheduling problem of the project's subcontractors in a cooperative environment under uncertainty: Social complex construction case study. Computers & Industrial Engineering, 133, 19-28.

Mubarak, S. A. (2015). Construction project scheduling and control. John Wiley & Sons.

Tabrizi, B. H., & Ghaderi, S. F. (2016). A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement. Computers & industrial engineering, 98, 11-29.

Tabrizi, B. H. (2018). Integrated planning of project scheduling and material procurement considering the environmental impacts. Computers & Industrial Engineering, 120, 103-115.

Tritschler, M., Naber, A., & Kolisch, R. (2017). A hybrid metaheuristic for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles. European Journal of Operational Research, 262(1), 262-273.

Trojet, M., H'Mida, F., & Lopez, P. (2011). Project scheduling under resource constraints:Application of the cumulative global constraint in a decision support framework.Computers & Industrial Engineering, 61(2), 357-363.

Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. Statistics and computing, 4(2), 65-85.

Zoraghi, N., Shahsavar, A., Abbasi, B., & Van Peteghem, V. (2017). Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with material ordering under bonus–penalty policies. Top, 25(1), 49-79.