E-ISSN: 3092-7005

Management: Modeling, Analysis and Application

www.mma.reapress.com

Manag. Model. Anal. Appl. Vol. 3, No. 4 (2026) 224–240.

Paper Type: Original Article

Optimization of a RCPSP Model with Multiple Execution Modes and Different Skill Levels Simultaneously

Kazem Gholizadeh[1], **Meghdad Jahromi**[1,*], **Mohammad Amin Maftoon**[1]

[1] *Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; kazem.gholizadeh@iau.ir; m.jahromi@iau.ac.ir; ma.maftoon@iau-tnb.ac.ir.*

Citation:

Gholizadeh, K., Jahromi, M., & Maftoon, M. A. (2026). Optimization of a RCPSP model with multiple execution modes and different skill levels simultaneously. *Management: Modeling, Analysis and Applications, 3*(4), 224-240.

Received: 05/01/2026 Reviewed: 15/04/2026 Revised: 20/05/2026 Accepted: 11/06/2026

Abstract

Purpose: Project scheduling under resource limitations, multiple activity execution modes, and operational risks represents a complex decision-making problem in project management. Selecting an appropriate execution mode for each activity affects not only its duration and resource consumption but also direct costs and risk management expenditures. Therefore, focusing solely on minimizing project completion time may overlook important economic and operational considerations. This study aims to develop an optimization model for multi-mode resource-constrained project scheduling by simultaneously considering direct activity costs, risk management costs, and delay penalties.

Methodology: This study formulates the multi-mode resource-constrained project scheduling problem as a mathematical programming model with binary decision variables. The objective function minimizes total direct activity execution costs, risk management costs associated with the selected execution modes, and penalties for delays beyond the project deadline. The model incorporates activity precedence constraints, renewable resource capacity limits, and the requirement to select a single execution mode for each activity. Given the problem's computational complexity, we develop a recursive heuristic algorithm. The algorithm first constructs an initial schedule using low-cost execution modes and then revises mode selections when the project deadline is violated. The proposed solution approach is evaluated using numerical instances of small, medium, and large sizes, and the results are compared with those obtained using GAMS.

Findings: The numerical experiments indicate that the proposed heuristic algorithm can generate project schedules for instances of different sizes. Comparing total project costs and computational times with GAMS results provides a basis for assessing solution quality and computational performance. Furthermore, the recursive structure enables adjustments to execution-mode selections in response to scheduling constraints and their associated cost implications. However, the reported results do not provide sufficient evidence to quantify precise performance improvements or establish the heuristic's general superiority over exact solution methods.

Originality/Value: The study incorporates execution-mode-specific risk management costs alongside direct activity costs and delay penalties within an integrated project scheduling framework. In addition, the recursive heuristic mechanism for revising execution-mode selections provides a computational approach to address the scheduling problem's complexity. The proposed framework may help project managers evaluate the economic consequences of alternative activity execution modes and develop schedules consistent with resource limitations.

Keywords: Resource-constrained project scheduling, Multi-mode project scheduling, Cost optimization, Project risk management, Recursive heuristic algorithm, Binary integer programming.

Corresponding Author: m.jahromi@iau.ac.ir https://doi.org/10.22105/mmaa.vi.111

Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مدیریت: مدلسازی، تحلیل و کاربرد

دوره ۳، شماره (۴)، (۱۴۰۵)، ۲۴۰-۲۲۴

www.mma.reapress.com

نشر رئا

نوع مقاله: پژوهشی

بهینه‌سازی مدل مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با وجود چند حالت اجرایی و سطوح مهارتی متفاوت به‌طور همزمان

کاظم قلی‌زاده[۱]، مقداد جهرمی[۱*]، محمد امین مفتون[۱]

[۱]گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: زمان‌بندی پروژه‌ها در شرایط محدودیت منابع، تنوع حالت‌های اجرایی فعالیت‌ها و وجود ریسک‌های عملیاتی، از مسایل پیچیده تصمیم‌گیری در مدیریت پروژه به‌شمار می‌رود. انتخاب حالت اجرایی مناسب برای هر فعالیت، علاوه‌بر مدت‌زمان اجرا و میزان مصرف منابع، بر هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های مرتبط با مدیریت ریسک تاثیر می‌گذارد. از این‌رو، تمرکز صرف بر کاهش زمان تکمیل پروژه نمی‌تواند تمامی ملاحظات اقتصادی و اجرایی را پوشش دهد. پژوهش حاضر با هدف توسعه مدلی برای بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌های چندحالته با محدودیت منابع و درنظرگرفتن همزمان هزینه‌های مستقیم فعالیت‌ها، مدیریت ریسک و جریمه تاخیر انجام شده است.

روش‌شناسی پژوهش: در این پژوهش، مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و حالت‌های اجرایی متعدد در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با متغیرهای دودویی صورت‌بندی شده است. تابع هدف، کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مستقیم اجرای فعالیت‌ها، هزینه مدیریت ریسک حالت‌های اجرایی انتخاب‌شده و جریمه تاخیر نسبت به موعد تحویل پروژه است. مدل شامل محدودیت‌های تقدم و تاخر فعالیت‌ها، ظرفیت منابع تجدیدپذیر و انتخاب یک حالت اجرایی برای هر فعالیت است. باتوجه‌به پیچیدگی محاسباتی مساله، یک الگوریتم ابتکاری با سازوکار بازگشتی طراحی شده است که ابتدا یک برنامه اولیه مبتنی بر انتخاب حالت‌های اجرایی کم‌هزینه ایجاد می‌کند و سپس، در صورت نقض موعد تحویل، با بازنگری در حالت‌های اجرایی به اصلاح برنامه می‌پردازد. عملکرد روش پیشنهادی با حل مسایل عددی در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ و مقایسه نتایج با خروجی نرم‌افزار *GAMS* ارزیابی شده است.

یافته‌ها: نتایج آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد که الگوریتم ابتکاری پیشنهادی قادر به تولید برنامه‌های زمان‌بندی برای مسایل با ابعاد مختلف است. مقایسه هزینه کل پروژه و زمان محاسباتی روش پیشنهادی با نتایج حاصل از *GAMS*، امکان ارزیابی کیفیت جواب‌ها و عملکرد محاسباتی الگوریتم را فراهم کرده است. همچنین، ساختار بازگشتی روش حل امکان بازنگری در انتخاب حالت‌های اجرایی را باتوجه‌به محدودیت‌های زمانی و پیامدهای هزینه‌ای آن‌ها فراهم می‌سازد. بااین‌حال، نتایج ارایه‌شده در مقاله برای تعیین میزان دقیق بهبود عملکرد یا اثبات برتری عمومی الگوریتم نسبت به روش‌های دقیق کافی نیست.

اصالت/ارزش افزوده علمی: ارزش افزوده این پژوهش در لحاظ‌کردن هزینه مدیریت ریسک هر حالت اجرایی در کنار هزینه مستقیم فعالیت‌ها و جریمه تاخیر در یک چارچوب یکپارچه زمان‌بندی پروژه است. همچنین، توسعه یک سازوکار ابتکاری بازگشتی برای اصلاح انتخاب حالت‌های اجرایی، رویکردی محاسباتی برای مواجهه با پیچیدگی مساله فراهم می‌کند. این چارچوب می‌تواند به مدیران پروژه در ارزیابی پیامدهای اقتصادی انتخاب شیوه‌های مختلف اجرای فعالیت‌ها و تدوین برنامه‌های زمان‌بندی متناسب با محدودیت منابع کمک کند.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، زمان‌بندی چندحالته، بهینه‌سازی هزینه، مدیریت ریسک پروژه، الگوریتم ابتکاری بازگشتی، برنامه‌ریزی عدد صحیح دودویی.

۱- مقدمه

برای زمان‌بندی پروژه‌ها همواره یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت پروژه‌ها به‌شمار می‌آید. در بسیاری از پروژه‌ها، منابع محدود هستند و انجام فعالیت‌ها تحت شرایط مختلف، نیازمند تخصیص دقیق منابع در زمان‌های مختلف است. یکی از مدل‌های متداول زمان‌بندی پروژه‌ها، مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و حالات اجرایی مختلف (*RCPSP*) است. این مساله شامل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مجموعه‌ای از فعالیت‌ها با منابع محدود و شرایط اجرایی مختلف است که باید به‌طور بهینه تخصیص یابند تا پروژه در زمان‌بندی معین به اتمام برسد. در مساله *RCPSP*،

هر فعالیت معمولا دارای زمان اجرا و نیاز به منابع خاص است و بسته به وضعیت و انتخاب حالت‌های اجرایی مختلف برای هر فعالیت، ممکن است تغییرات قابل‌توجهی در زمان‌بندی پروژه ایجاد شود. در چنین شرایطی، وجود و شناسایی ریسک‌ها و مشکلات احتمالی بسیار اهمیت پیدا می‌کند. ریسک‌ها می‌توانند به شکل‌های مختلفی ظهور پیدا کنند که ازجمله آن‌ها، تغییرات در مدت‌زمان انجام فعالیت‌ها، عدم دردسترس‌بودن منابع یا پیشامدهای غیرمنتظره در طول اجرای پروژه می‌باشد.

مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود یکی از مسایل مهم در حوزه پژوهشی زمان‌بندی و کنترل پروژه می‌باشد. زمان‌بندی پروژه یکی از ارکان اساسی مدیریت پروژه است و به‌کارگیری تکنیک‌ها و روش‌های مناسب زمان‌بندی، یکی از عوامل موفقیت یک پروژه محسوب می‌گردد [1]. مساله زمان‌بندی پروژه عبارت است از تعیین زمان انجام فعالیت‌های یک پروژه، باتوجه‌به محدودیت‌های حاکم بر آن، برای رسیدن به یک هدف معین است. این هدف ممکن است جنبه مالی، زمانی و یا کیفی داشته باشد. در پروژه‌های واقعی، دو مقوله مهم وجود دارد، حداقل‌کردن زمان اتمام پروژه (باتوجه‌به ضرورت نیاز به استفاده از محصول پروژه) و محدودیت منابع، بر همین اساس موضوع زمان‌بندی پروژه و به تبع آن، زمان‌بندی بهینه پروژه به دلیل صرفه‌جویی اقتصادی، استفاده بهینه از منابع و تکمیل پروژه در بهترین زمان ممکن (زمان بهینه) جهت ارایه خدمات حاصل از پروژه دارای اهمیت زیادی می‌باشد [1]. مساله زمان‌بندی پروژه در ادبیات موضوع، با محدودیت‌هایی همراه بوده است. عمدتا این محدودیت‌ها از نوع منابع در نظر گرفته‌شده و با عنوان مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع شناخته می‌شود. در نسخه کلاسیک مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع هدف، ارایه یک‌زمان‌بندی بهینه برای توالی فعالیت‌ها تحت محدودیت منابع به‌طوری‌که مدت‌زمان انجام پروژه را حداقل نماید.

۲- بیان مساله

در حالت کلی، برای زمان‌بندی یک پروژه با محدودیت منابع در حالتی که همه عوامل مدل، قطعی هستند و برای انجام و تکمیل پروژه باید تعدادی فعالیت انجام شود. در هر بازه زمانی و نیز در کل پروژه، منابعی که در اختیار داریم نیز محدود است. هر فعالیت را فقط به یک شیوه می‌توان انجام داد که زمان انجام فعالیت‌ها و منابع موردنیاز آن فعالیت با سایر فعالیت‌ها متفاوت است. تابع هدف اینگونه مسایل عمدتا عبارت است از کمینه‌کردن زمان انجام کل پروژه، به‌نحوی‌که روابط تقدم و تاخر میان فعالیت‌ها رعایت شود و محدودیت‌هایی که در مورد منابع وجود دارند نیز نقض نشوند، می‌باشد. به‌محض شروع یک فعالیت، امکان توقف در انجام آن وجود ندارد. چندین فعالیت که نیاز به یک نوع منبع مشترک دارند، می‌توانند در یک‌زمان با همدیگر انجام شوند؛ فقط و فقط به شرطی که محدودیت‌های منابع را در هر دوره نقض در نظر گرفته شوند و رعایت شوند [2].

یکی از موارد توسعه مدل *RCPSP* درنظرگرفته‌شده توسط پژوهشگران این است که هر فعالیت می‌تواند از چند راه یا چند حالت انجام پذیرد که هر یک از این حالت‌های منعکس‌کننده ترکیبی از زمان لازم و منابع موردنیاز برای انجام فعالیت موردنظر هستند. این مفهوم جدید سبب توسعه یکی از عمومی‌ترین حالت‌های مساله زمان‌بندی با عنوان زمان‌بندی پروژه با منابع محدودیت چندحالته یا *MRCPSP* شده است که بسیاری از مسایل واقعی را با استفاده از آن می‌توان مدلسازی کرد. در این مسایل، فعالیت‌ها بیش از یک نوع حالت اجرایی دارند. در هر یک از حالت‌های اجرایی، مقدار منابع و زمان اجرایی فعالیت‌ها مشخص است [3]. بر اساس مطالعه انجام‌شده توسط اسپرچر و درکل [4]، برای اولین بار این مساله به نام مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالته موردبررسی قرار گرفته است. در واقعیت، به دلیل تغییرات محیط بیرونی (مانند آب‌وهوا، کمبود فضا، حوادث طبیعی و غیرتکراری‌بودن یا عدم‌مواجهه مدیران پروژه با فعالیت مشابه در تجربیات قبلی) عدم‌قطعیت در تعیین مدت‌زمان فعالیت‌های پروژه وجود دارد که این عدم‌قطعیت در فعالیت‌های پروژه احداث بسیار پررنگ‌تر است؛ بنابراین این عدم‌قطعیت بایستی در مسایل زمان‌بندی پروژه در نظر گرفته‌شده و مدیریت شود [5]. برای مواجهه با این عدم‌قطعیت، دو متدولوژی وجود دارد: رویکرد فازی و رویکرد احتمالی. در حالت غیرقطعی، فرض می‌شود که تخمین دقیقی از زمان انجام فعالیت‌ها و حداکثر مقدار منابع دردسترس وجود ندارد [6]. باتوجه‌به اینکه مساله *RCPSP*، به‌عنوان یک مساله *NP-hard* شناخته‌شده است، درنتیجه استفاده از روش‌های دقیق برای حل این مساله در ابعاد بزرگ توجیه‌پذیر نبوده و به‌شدت کارایی خود را از دست می‌دهند. لذا برای حل این مسایل از روش‌های ابتکاری و فرابتکاری کمک رفته می‌شود [7]. باتوجه‌به توضیحات فوق، مساله اصلی در این تحقیق، مدلسازی و حل بهینه مدل زمان‌بندی پروژه در حالت وجود محدودیت منابع و در چندین حالت اجرایی برای انجام بسته‌های کاری و همچنین ریسک‌های مرتبط با حالات مختلف اجرایی می‌باشد.

۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

همان‌طورکه پیشتر اشاره‌شده، مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع و حالات اجرایی مختلف (*RCPSP*) یکی از مدل‌های پیچیده و چالش‌برانگیز در علم مدیریت پروژه است که به تخصیص منابع محدود به مجموعه‌ای از فعالیت‌ها می‌پردازد. در این مساله، باید تعیین شود که هر فعالیت در چه زمانی شروع و پایان یابد، به‌طوری‌که منابع مورد نیاز برای انجام فعالیت‌ها در هر زمان به‌طور همزمان و دردسترس باشد. همچنین، در این مدل ممکن است فعالیت‌ها دارای چندین حالت اجرایی مختلف باشند که هر یک زمان اجرایی متفاوتی دارند. به همین دلیل، حالت‌های مختلف اجرای هر فعالیت می‌تواند اثرات عمده‌ای بر زمان‌بندی کل پروژه و تخصیص منابع داشته باشد. در *RCPSP*، معمولا هدف این است که زمان تکمیل پروژه (که به‌عنوان *Makespan* شناخته می‌شود) به حداقل برسد، درحالی‌که محدودیت‌های منابع و دیگر شرایط اجرایی باید رعایت شود. اما مهم‌ترین چالش این است که در طول اجرای پروژه، ممکن است پیشامدهای غیرمنتظره‌ای رخ دهد که باعث تغییرات در مدت زمان اجرای فعالیت‌ها یا دردسترس‌بودن منابع شوند. این ناپایداری‌ها و عدم‌قطعیت‌ها معمولا تحت عنوان «ریسک» در پروژه‌ها شناخته می‌شوند. زمان‌بندی و تخصیص منابع و بودجه‌بندی و تامین سرمایه در سراسر یک پروژه ازجمله مواردی است که برنامه‌ریزی پروژه را شکل می‌دهد.

پروژه‌ها در بسیاری از کشورها نقش بسیار مهمی در توسعه ملی و بهبود اقتصادی کشور دارند. رشد اقتصادی در چنین کشورهایی به دلیل اجرای پروژه‌ها در نظر گرفته شده است. به‌طورکلی، پروژه‌های انجام‌شده در سطح ملی دارای ابعاد بزرگی بوده و برای انجام آن‌ها باید بودجه‌های کلانی اختصاص داده شود؛ بنابراین مدیریت بهینه و مناسب منجر به اجرای موفق پروژه شده، درآمدها را افزایش داده و نیز باعث کاهش هزینه‌ها شده است. لذا این مدیریت باید به‌دقت و به‌طور صحیح انجام گیرد [8]. یکی از وظایف مهم و پر چالش مدیریت پروژه در مراحل طراحی و اجرا، زمان‌بندی مناسب و کارای فعالیت‌ها باتوجه‌به محدودیت منابع دردسترس است. در موقعیت‌های مختلف باتوجه‌به اهدافی که از اجرای پروژه مدنظر است و باتوجه‌به محدودیت‌ها و شرایط مختلف ناشی از جنبه‌های مالی قرارداد یا ویژگی‌های فنی و ذاتی پروژه، مساله زمان‌بندی پروژه به صورت‌های گوناگونی مطرح می‌شود که یکی از آن‌ها زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع نام دارد [8].

در دهه اخیر مساله زمان‌بندی پروژه از جنبه‌های گوناگون موردبررسی قرار گرفته و توسعه داده‌شده است. این توسعه‌ها ابعاد مختلف این مساله را در بر می‌گیرد. ارایه مدل‌های مختلف خطی و غیرخطی برای مساله، تک‌حالته یا چندحالته‌بودن و منقطع یا غیرمنقطع‌بودن فعالیت‌ها، وجود منابع از انواع مختلف، توابع هدف گوناگون، قطعیت یا عدم‌قطعیت پارامترهای مساله و ... از ابعاد مختلف این مساله در نظر گرفته شده است. موضوع زمان‌بندی پروژه‌ها با منابع محدود در واقع کلی‌ترین موضوع زمان‌بندی است که مسایل زمان‌بندی کارگاهی، زمان‌بندی جریان کارگاهی و سایر مسایل زمان‌بندی همگی زیرمجموعه‌ای از این موضوع به‌حساب می‌آیند [9]. به‌طورکلی *RCPSP* در پی یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های یک پروژه است به‌نحوی‌که محدودیت‌های تقدم و تاخر شبکه پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منبعی موجود در پروژه به‌طور همزمان باید ارضا شوند و معیار سنجش معینی ازجمله زمان پروژه، هزینه انجام، تعداد فعالیت‌های تاخیردار و ... بهینه شوند. مدل‌های مختلفی تاکنون برای حل این مساله توسعه داده‌شده‌اند. کاربردی‌بودن این مساله باعث توجه بیش‌ازپیش محققین به این مساله در سال‌های اخیر شده است. هدف اصلی در این تحقیق مدلسازی و حل بهینه مدل زمان‌بندی پروژه است درحالتی‌که پروژه با منابع محدود مواجه است و همچنین فعالیت‌های پروژه، در چند حالت اجرایی قابل انجام است، به‌طوری‌که ریسک‌های حالات مختلف نیز در نظر گرفته شوند.

۴- پیشینه پژوهش

گودرزی و همکاران [10] یک مدل ریاضی توسعه دادند که مساله زمان‌بندی پروژه‌ای با محدودیت منابع (*RCMPSP*) و مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندگانه (*MSRCPSP*) را ترکیب می‌کرد. باتوجه‌به اهمیت مدیریت منابع، فرمول پیشنهادی شامل ملاحظات سطح‌بندی منابع نیز می‌باشد. هدف مدل بهینه‌سازی همزمان موارد زیر بود: ۱- کل زمان برای انجام تمام پروژه ها و ۲- انحراف کل مصرف منابع از سطوح استفاده یکنواخت.

جیانگ و همکاران [11] عملکرد ساخت‌وساز پیش‌ساخته به برنامه‌ریزی کارآمد در محل و زمان‌بندی اجزای پیش‌ساخته متکی است. بااین‌حال، تحقیقات موجود در درجه اول به برنامه‌ریزی توالی مونتاژ یا برنامه‌ریزی فرایند ساخت‌وساز می‌پردازد. تعامل بین این عناصر و ماهیت پویای محیط‌های ساخت‌وساز اغلب نادیده گرفته می‌شود. این مقاله یک روش برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دومرحله‌ای جدید را ارایه می‌کند که از یک سیستم

چندعاملی[1] و یادگیری عمیق برای محاسبه محیط ساخت‌وساز، خدمه، مواد، تجهیزات و توالی مونتاژ استفاده می‌کند. اول، اجزای پیش‌ساخته در منطقه ساخت‌وساز به گروه‌هایی بر اساس حالت‌های جفت آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. سپس یک ترانسفورماتور گراف تقویت‌شده دانش برای تعیین توالی مونتاژ اجزای درون‌گروهی با درنظرگرفتن ویژگی‌های فیزیکی و روابط توپولوژیکی آن‌ها معرفی می‌شود. متعاقبا، *MAS* برای هماهنگ‌کردن توالی فعالیت‌های ساخت‌وساز بین گروهی، پرداختن به عواملی مانند شلوغی سایت، جابه‌جایی کارگران و مصرف مواد ایجاد می‌شود. ترانسفورماتور گراف افزایش‌یافته دانش به‌عنوان یک عامل هوشمند در *MAS* ادغام شده است تا هماهنگی بین برنامه‌ریزی درون‌گروهی و بین‌گروهی را تسهیل کند. در نهایت، یک مورد مهندسی برای تایید اثربخشی روش پیشنهادی انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با روش‌های متداول *MAS*، طرح مبتنی بر گروه منجر به کاهش ۳/۱% درصدی زمان ساخت، کاهش ۶ تا ۱۰ درصدی در مسافت پیاده‌روی خدمه می‌شود و به‌طور موثر مشکلات مونتاژ را کاهش می‌دهد. این نتایج، استراتژی‌ها و دیدگاه‌های نوآورانه‌ای را برای بهینه‌سازی گردش کار ساخت‌وساز به مدیران ساخت‌وساز ارایه می‌دهد.

یوان و همکاران [12] ساخت ساختمان‌های پیش‌ساخته شامل فرایندهای پیچیده‌ای است که دارای عدم‌قطعیت‌های بالا و تضادهای عینی است که مانع از بهبود عملکرد ساخت‌وساز می‌شود. هدف این مطالعه بهینه‌سازی همزمان منطق فعالیت و اهداف چندگانه عملکرد ساخت‌وساز (مربوط به زمان، هزینه، کیفیت و انتشار CO_2) ساخت‌وساز ساختمان‌های پیش‌ساخته تحت تاثیر عوامل نامشخص است. تکنیک حذف، ترکیب، تنظیم مجدد و ساده‌کردن[2] با فناوری شبیه‌سازی هوشمند ترکیب می‌شود تا یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را برای ساخت‌وساز ساختمان‌های پیش‌ساخته با درنظرگرفتن اهداف متعدد و عوامل نامشخص مختلف ایجاد کند.

حنیفی و همکاران [13] هدف اصلی این تحقیق، ارتقای خواص یک ماده ابتکاری و پایدار مبتنی بر نشاسته گندم *(NaCl-binder (WBS* است. این دامنه کاربردهای زیست‌محیطی و ساختاری مواد و پتانسیل استفاده از سنگ‌فرش را در بر می‌گیرد. ایجاد نمونه‌های *WBS* آبگریز و سازگار با محیط‌زیست در شرایط پخت مایکروویو با استفاده از ملات نمک با اندازه‌های مختلف دانه‌های نمک، آب و نشاسته گندم به‌عنوان یک عامل اتصال به‌دست آمد. تکامل روش‌های تولید خاکستر سودا را بررسی می‌کند و تغییر به‌سمت شیوه‌های پایدارتر را برجسته می‌کند.

رحیم پور و همکاران [14] چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی روش‌های سنتی ازجمله مصرف بالای انرژی، آلودگی و تولید زباله را تحلیل می‌کند. بحث به‌صورت زمانی پیش می‌رود و روش‌های طبیعی منسوخ و جایگزینی تدریجی آن‌ها با تکنیک‌های کارآمدتر مانند فرایند *Solvay* را بررسی می‌کند.

مورین و همکاران [15] در تحقیقی به یک مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت‌های منابع جمع‌آوری‌شده دوره‌ای پرداختند. در این تحقیق، مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ادغام‌شده در نظر گرفته می‌شود. این مشکل توسط مورین و همکاران [16] گونه‌ای از مشکل شناخته‌شده زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع است که امکان استفاده انعطاف‌پذیرتر از محدودیت‌های منابع را فراهم می‌کند. درحالی که زمان شروع و تکمیل فعالیت‌ها می‌تواند لحظه‌های دلخواه در زمان باشد، محدودیت‌های استفاده از منابع به‌طور متوسط در دوره‌های مجموع طول پارامتر در نظر گرفته می‌شوند. این مقاله نتایج نظری و تجربی جدیدی را برای این مساله ارایه می‌کند. ابتدا، وضعیت پیچیدگی مشکل را با اثبات *NP-hardness* تعدادی از موارد خاص مشکل حل می‌کنیم. دوم، یک فرمول برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط جدید از مساله را با تفکیک محدودیت‌های تقدم در دوره‌ها پیشنهاد می‌کنیم. یک مقایسه نظری نشان می‌دهد که فرمول جدید از نظر قدرت آرامش بر فرمول پیشنهادی قبلی غالب است. در نهایت، آزمایش‌های محاسباتی بر روی نمونه‌هایی از ادبیات انجام می‌دهیم تا شایستگی‌های فرمول‌بندی‌های مختلف مقایسه شود.

چن و همکاران [17] در تحقیقی به یک چارچوب برنامه‌نویسی ژنتیکی فیلتر برای مساله زمان‌بندی چند پروژه با منابع تصادفی تحت درج پروژه جدید پرداختند. در این مقاله، چارچوبی جدید مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیکی فیلتر و فراابتکاری برای تکامل قوانین اولویت‌بندی با هدف حل مساله زمان‌بندی چندپروژه‌ای، با درنظرگرفتن همزمان مدت‌زمان تصادفی فعالیت‌ها و ورود پروژه‌های جدید، پیشنهاد شده است. مشکل زمان‌بندی چند پروژه با محدودیت منابع تحت درج‌های پروژه جدید، در زمان محاسبات اکتشافی. برنامه‌ریزی ژنتیکی فیلتر مبتنی بر بیش‌ابتکاری برای تقسیم تکامل سنتی به نمونه‌برداری و تکامل فیلتر برای فیلترکردن همزمان دو نوع پارامتر تشکیل‌دهنده *PRs*، یعنی محدوده عمق و ویژگی، برای

[1] Multi-Agent System (MAS)

[2] Eliminate, Combine, Rearrange, and Simplify (ECRS)

به‌دست‌آوردن جواب های موثرتر طراحی شده است. بر این اساس، جست‌وجوی ژنتیکی موجود و جست‌وجوی محلی برای برآورده‌کردن محدودیت‌های عمق بهبود می‌یابند و یک مکانیسم ارزیابی چندهدفه برای دستیابی به فیلترینگ موثر طراحی شده است. تحت معیار موجود، برنامه‌ریزی ژنتیکی فیلتر مبتنی بر بیش‌ابتکاری با روش‌های موجود برای تایید اثربخشی آن مقایسه و تجزیه‌وتحلیل می‌شود.

تیان و همکاران [18] در تحقیقی به مساله زمان‌بندی پروژه چندهدفه با منابع محدود منابع با چند مهارت پرداختند. این مقاله توسعه جدیدی از مساله زمان‌بندی پروژه با منابع چند مهارتی را پیشنهاد می‌کند: *MS-RCPSP* با سوئیچ‌های مهارت. در محیط دنیای واقعی، تغییر بین مهارت‌ها برای یک منبع اغلب مستلزم زمان عملیات اضافی و هزینه برای برآوردن نیاز کار است. یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط، با هدف به‌حداقل‌رساندن زمان تکمیل پروژه و هزینه کل، توسعه یافته است. سپس، برای حل موثر این مشکل جدید، بازنمایی‌های راه‌حل موجود مرتبط و سازندگان برنامه را از ادبیات قبلی بررسی می‌کنیم. بر اساس بررسی، ما یک طرح نمایش راه‌حل انعطاف‌پذیر جدید با فضای جست‌وجوی کاهش‌یافته و یک طرح برنامه‌ساز جدید حریصانه پیشنهاد می‌کنیم که برای کاهش سوئیچ‌های مهارت، وظایف را دوباره ترتیب می‌دهد. علاوه‌بر این، ما دو عملگر جهش کارآمد را انتخاب می‌کنیم، یعنی یک عملگر مبادله و یک عملگر سطح‌سازی منابع. اپراتور *swap* توالی تخصیص وظایف را تنظیم می‌کند درحالی‌که اپراتور سطح منابع، وظایف را بر اساس بارهای منابع برنامه جاری به منابع دیگر اختصاص می‌دهد. این اپراتور راه‌حل‌ها را با متعادل‌کردن بارهای منابع بهبود می‌بخشد. ما تمام اجزای جدید پیشنهادی را در چارچوب استراتژی تکامل چندهدفه[1] جاسازی کردیم. ما پیکربندی‌های مختلف *MOES* را از نظر نمایش، سازنده برنامه و عملگرهای جهش تجزیه‌وتحلیل می‌کنیم و بهترین پیکربندی را شناسایی می‌کنیم. ما نتیجه *MOES* را با الگوریتم‌های پیشرفته در طیف گسترده‌ای از نمونه‌های آزمایشی مقایسه می‌کنیم و نتایج نشان می‌دهد که طرح نمایش پیشنهادی ما و سازنده زمان‌بندی می‌تواند هم‌گرایی جبهه پارتو را بهبود بخشد، درحالی‌که سطح منابع را افزایش می‌دهد. اپراتور می‌تواند تا حد زیادی گسترش و تنوع جلو را بهبود بخشد.

کوی و همکاران [19] در تحقیقی به یک رویکرد جست‌وجوی همسایگی متغیر[2] برای مشکل زمان‌بندی مشارکتی چندپروژه‌ای با محدودیت منابع پرداختند. این مقاله مشکل زمان‌بندی پروژه‌های چندگانه با محدودیت منابع را در توسعه تجهیزات پیشرفته مورد مطالعه قرار می‌دهد و یک مدل زمان‌بندی چندحالته و چندمهارتی یکپارچه با توانایی‌های مختلف کارکنان توسعه می‌دهد. بر اساس ویژگی‌های توسعه تجهیزات پیشرفته، ما چندین ویژگی بهینه را پیشنهاد می‌کنیم و یک الگوریتم اکتشافی موثر طراحی می‌کنیم. از آنجایی که مشکل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع *NP-hard* است، سه محله برای این مشکل ساخته می‌شود و یک الگوریتم *VNS* برای حل مشکل در یک زمان معقول توسعه می‌یابد. در نهایت، آزمایش‌های محاسباتی برای تایید عملکرد الگوریتم پیشنهادی انجام می‌شود.

فرناندز و دی سوزا [20] در تحقیقی به یک رویکرد ریاضی به مساله زمان‌بندی پروژه با منابع چندحالته محدود پرداختند. این مقاله به مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالته (*MRCPSP*) پرداخت. این یک مساله‌ی *NP-Hard* است و شامل زمان‌بندی تمام فعالیت‌های یک پروژه با رعایت ترتیب تقدم این فعالیت‌ها است که پس از شروع، نمی‌توان آن‌ها را قطع کرد. مشاغل دارای ترکیبی از حالت‌های اجرا هستند، به شکل ترکیب های مختلف زمان پردازش و مصرف منابع. هدف، به‌حداقل‌رساندن مدت‌زمان پروژه، یافتن زمان شروع برای هر فعالیت پروژه است. این مقاله یک استراتژی ریاضی انشعاب محلی برای حل *MRCPSP* پیشنهاد می‌کند. تاثیر پارامترهای روش جست‌وجوی محلی تایید می‌شود و همچنین توصیف ساختارهای همسایگی که یک مشکل فرعی را در طول شمارش ریاضی تعریف می‌کنند. دو توصیف برای تعریف زیرمشکلات پیشنهاد شده است و یکی از آن‌ها از توصیف مورد بحث در ادبیات فراتر است. تست‌های محاسباتی با استفاده از مجموعه‌هایی از نمونه‌های کتابخانه‌های *PSPLIB* و *MMLIB* انجام شد. شناخته‌شده‌ترین نتایج برای این نمونه‌ها در رابطه با آخرین هنر به‌عنوان مرجعی برای تایید نتایج به‌دست‌آمده با رویکرد پیشنهادی در این مقاله ارایه شده‌اند.

جوی و همکاران [21] در تحقیقی به بهینه‌سازی ازدحام ذرات[3] برای مشکل زمان‌بندی پروژه با چند منبع محدود با سطوح منابع مختلف پرداختند. این مقاله به *PSO* برای مساله زمان‌بندی پروژه با منابع چندگانه با سطوح مختلف منابع پرداخت و این یک نسخه به‌روزرسانی‌شده از *PSO* برای مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با سطوح مختلف منابع است. در یک مشکل زمان‌بندی پروژه، فعالیت‌های زیادی با مدت‌زمان‌ها و

[1] Multi-Objective Evolution Strategy (MOES)
[2] Variable Neighborhood Search (VNS)
[3] Particle Swarm Optimization (PSO)

درخواست‌های منابع مشخص وجود دارد که توسط روابط جانشین و پیشین به هم مرتبط می‌شوند. مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با سطوح مختلف منابع تنها از یک نوع منبع استفاده می‌کند. بااین‌حال، در مسایل زمان‌بندی واقعی پروژه، از انواع مختلفی از منابع برای حل کار استفاده می‌شود. مساله زمان‌بندی پروژه با منابع چندگانه با سطوح مختلف منابع از انواع مختلفی از منابع با دردسترس‌بودن محدود با تغییر سطوح منابع به شیوه‌ای ازپیش‌تعیین‌شده استفاده می‌کند. در مساله زمان‌بندی پروژه با منابع چندگانه با سطوح مختلف منابع، حداکثر زمان مورد نیاز برای تکمیل کار به دوره‌های زمانی مختلف تقسیم می‌شود و منابع در این دوره‌های زمانی مختلف تغییر می‌کنند. هدف این سیستم این است که با استفاده از انواع منابع، تمام فعالیت‌ها را به‌طور موثر برنامه‌ریزی کند. مساله زمان‌بندی پروژه با منابع چندگانه با سطوح مختلف منابع با استفاده از *PSO* روی *MATLAB R2020b* آزمایش شده است.

دومیک و یاکوبوویچ [22] در تحقیقی به مجموعه‌ای از قوانین اولویت برای مشکل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع پرداختند. در این مقاله، مجموعه‌ای از قوانین اولویت برای بهبود عملکرد قوانین اولویت ایجادشده با برنامه‌ریزی ژنتیکی ایجاد شد. برای ایجاد گروه، چهار روش مختلف در نظر گرفته می‌شود: ترکیب ساده گروه، کوله‌پشتی و تکامل مشترک. قوانین اولویت که بخشی از مجموعه است با روش‌های جمع و رای برای رسیدن به تصمیم نهایی ترکیب شد. علاوه‌بر این، روش جست‌وجوی زیرمجموعه مجموعه برای مجموعه‌های ایجادشده برای یافتن زیرمجموعه بهینه قوانین اولویت اعمال شد. نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله نشان داد که مجموعه‌ای از قوانین اولویت می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی به نتایج بهتری نسبت به نتایج به‌دست‌آمده در هنگام استفاده از یک قانون اولویت منفرد دست یابند. مساله *RCPSP* هنگامی‌که مدت‌زمان انجام فعالیت‌ها تصادفی است. در پژوهش انجام‌شده توسط رستمی و همکاران [23] ارایه داده شده است. از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده، مطالعه کریمرز [24] است که در این پژوهش مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، به‌صورت تصادفی و با قابلیت پیش‌گیرانه (قطع و ازسرگیری فعالیت‌ها) ارایه شده است.

تیرکلایی و همکاران [25] یک مفهوم ریسک زمان‌بندی را پیشنهاد کردند و یک الگوریتم ژنتیک با استفاده از قانون اولویت برای حل مساله با هدف حداکثرکردن نیرومندی و استحکام زمان‌بندی ارایه دادند. باسکار و همکاران [26] در مقاله‌ای یک روش ابتکاری برای حل مساله *RCPSP* تحت زمان فازی فعالیت‌ها ارایه کردند. روش مبنی بر قانون اولویت را برای نمایش حل استفاده کردند و روش تولید زمان‌بندی موازی را برای حل مساله به‌کار بردند. کوروتکوف و ماتویف [27] توسعه الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید فازی و الگوریتم ژنتیک برای زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع و عدم‌قطعیت زمان فعالیت‌ها را مطرح نموده‌اند. در این الگوریتم، طول فعالیت‌ها با استفاده از اعداد فازی ذوزنقه‌ای نمایش داده شده است. الگوریتم پیشنهادی، حداقل زمان تکمیل پروژه را با درنظرگرفتن محدودیت منابع اقتصادی و نیروی انسانی تولید می‌کند و این قابلیت را دارد که با اعداد فازی اجراشده و جزئیات پروژه شامل زمان شروع، زمان پایان فعالیت‌ها و زمان تکمیل پروژه را به‌صورت اعداد فازی ارایه کند. پن و یه [28] یک چهارچوب، شامل الگوریتم ژنتیک ترکیب با تابو، برای حل مساله زمان‌بندی تحت محدودیت منابع و رویکرد فازی ارایه کردند که منجر به یک حل بهینه تقریبی می‌شد. تالبوت [29] مدل ریاضی برای مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با وجود چند حالت اجرایی ارایه داد. در مسایل واقعی، زمان‌بندی پروژه مساله چندهدفه است، زیرا نمی‌توان باتوجه‌به یک شاخص به جواب بهینه برای مساله رسید. سیفی و توکلی مقدم [30] یک مدل ریاضی دو معیاره برای مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با چند حالت اجرایی با دو هدف بیشینه‌کردن ارزش خالص فعلی و کمینه‌کردن هزینه نگهداری فعالیت‌های تکمیل‌شده تا زمان تکمیل نهایی پروژه ارایه کردند. هاو و همکاران [31] مساله *MRCPSP* را با درنظرگرفتن زمان غیرقطعی برای طول فعالیت‌ها بررسی کردند. آن‌ها در مساله خود دو هدف حداقل‌کردن مقاومت و همچنین حداقل‌سازی زمان کل پروژه را در نظر گرفتند و مساله خود را با الگوریتم توزیع تخمین موثر حل کردند.

کاظمی‌پور و همکاران [32] از روش تکامل تفاضلی جهت حل مساله زمان‌بندی پورتفولیو پروژه‌ها با نیروی کار چندمهارته استفاده نمودند. این مساله حالت توسعه‌یافته مساله زمان‌بندی پروژه چندهدفه و همچنین چندحالته می‌باشد که در آن نیروی کار، تخصص‌های مختلفی را جهت اجرای فعالیت‌های متفاوت دارا می‌باشند. به‌علاوه برای مساله مذکور، یک روش جدید برنامه‌ریزی آزمانی به‌منظور یافتن حداقل انحراف از متوسط زمان تا تکمیل هر پروژه و همچنین تخصیص منابع ارایه گردید. بیرجندی و موسوی [33] در تحقیقی یک رویکرد جدید برای حل مساله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در شرایط عدم‌قطعیت پرداختند. آن‌ها در این تحقیق، از رویکرد فازی به‌منظور درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در پارامترها استفاده نمودند. تابع هدف این مدل، حداقل‌سازی کل هزینه‌های مورد نیاز برای تکمیل پروژه بود. به‌منظور حل مساله، از یک رویکرد جدید دومرحله‌ای ابتکاری استفاده شد. مسایل عددی متعدد در ابعاد مختلف ارایه و حل شد که نتایج به‌دست‌آمده حکایت از کارکرد مناسب رویکرد ارایه‌شده در حل مسایل عددی در ابعاد مختلف داشت. آرخیپوف و همکاران [34] در تحقیقی به ارایه‌ی یک الگوریتم کارای چندجمله‌ای برای یافتن حد پایین زمان اتمام

فعالیت‌های پروژه در یک مساله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود پرداختند. به این منظور، از یک رویکرد تطابق دامنه استفاده شد که نتایج محاسبات برای داده‌های الگو و همچنین مسایل مختلف عددی حکایت از کارکرد مناسب رویکرد حل در یافتن حد پایین مناسب برای مساله‌ی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود داشت. لاسچیک و میشکوفسکی [35] در تحقیقی به ارایه‌ی مدلی به‌منظور برنامه‌ریزی زمان انجام فعالیت‌ها در یک پروژه‌ی با منابع محدود با درنظرگرفتن منابع چندقابلیته پرداختند. تابع هدف مدل شامل حداقل‌کردن زمان اتمام فعالیت‌ها و همچنین حداقل‌نمودن هزینه‌های پروژه است. از آنجایی که این اهداف در تضاد با یکدیگر می‌باشند، از رویکرد ژنتیک چندهدفه (*NSGA II*) به‌منظور حل مسایل عددی در ابعاد مختلف استفاده شد و کارایی الگوریتم با استفاده از حل مسایل عددی در ابعاد مختلف مورد تایید قرار گرفت.

حبیبی و همکاران [36] در پژوهشی یک مدل زمان‌بندی پروژه و تامین مواد با فرض تخفیف، تجدیدپذیربودن منابع و توسعه‌ی پایدار ارایه نمودند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با اهداف بیشینه‌سازی ارزش خالص جریانات نقدی پروژه، امتیازات پروژه از نظر فاکتورهای محیط‌زیستی و شاخص‌های اجتماعی ارایه کردند. برای حل مسایل عددی در اندازه‌های متنوع از روش‌های فراابتکاری *NSGA II* و *MOPSO* بهره گرفتند. نتایج عددی حکایت از کارکرد مناسب رویکردها در حل مسایل عددی در اندازه‌های مختلف داشت. مسلیس و کاسماکر [37] رویکردی را جهت انتخاب اتوماتیک الگوریتم برای مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع چندحالته ارایه دادند. رویکرد ارایه‌شده مبتنی بر مفاهیم مدل‌هایی است که به‌صورت تجربی دارای سختی است. این مدل‌ها ویژگی‌های مساله را بر روی عملکرد الگوریتم تصویر می‌کنند. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی میزان کارایی الگوریتم‌ها می‌باشند. تبریزی [38] در پژوهش خود به موضوع زمان‌بندی و تهیه‌ی منابع به‌صورت همزمان با فرض تخفیف و محدودیت‌های زیستی پرداخت. در این خصوص، مسایل زیست‌محیطی به‌عنوان بخشی از هزینه‌های پروژه در راستای کمینه‌سازی هزینه‌های پروژه مدنظر قرار گرفت. سپس از رویکرد *NSGA II* به‌عنوان یک رویکرد فراابتکاری برای حل مسایل عددی در ابعاد مختلف استفاده شد. نتایج حاصله حاکی از کارکرد مناسب رویکرد مورد اشاره برای حل مسایل عددی در ابعاد مختلف داشت. برونی و همکاران [39] در پژوهش خود یک رویکرد تاب‌آور برتسیماس و سیم [40] را به‌منظور بهینه‌سازی مساله‌ی زمان‌بندی پروژه با فرض عدم‌قطعیت استفاده کردند. برای حل مساله از روش تجزیه‌ی محدودیت‌ها استفاده شد. مسایل عددی در اندازه‌های مختلف طراحی و با رویکرد طراحی‌شده حل شد. نتایج عددی به‌دست‌آمده حکایت از کارآمدی مناسب رویکرد حل در حل مسایل عددی مختلف داشت. جوزف جیگر [41] در تحقیقی یک رویکرد جست‌وجوی محلی چندرشته‌ای برای مساله‌ی چندحالته با منابع محدود به‌منظور برنامه‌ریزی همزمان برای چند پروژه ارایه نمودند. زمان‌بندی چند پروژه به شکل همزمان به‌ویژه برای شرکت‌های پروژه‌محور که در یک زمان چندین پروژه را اجرایی می‌نمایند واجد اهمیت بسیار زیادی می‌باشد. در این تحقیق این نوع از مسایل مدلسازی و حل شده و مسایلی با چندین دسته داده‌ی استاندارد حل و یافته‌ها حاکی از کارکرد مناسب رویکردهای حل برای حل مسایل عددی در ابعاد مختلف داشت.

مومیوند و همکاران [42] در تحقیقی به انتخاب و زمان‌بندی پروژه چندحالتی با منابع محدود با درنظرگرفتن امکان سرمایه‌گذاری مجدد در افق زمانی انعطاف‌پذیر پرداختند. در این مقاله، مساله انتخاب و زمان‌بندی پروژه چندحالتی با منابع محدود با درنظرگرفتن امکان سرمایه‌گذاری مجدد عواید پروژه در افق زمانی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، سازوکار مساله مذکور به‌گونه‌ای بود که از بین پروژه‌های پیشنهادی، تعدادی انتخاب و فعالیت‌های آن‌ها باتوجه‌به روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع تجدیدپذیر زمان‌بندی می‌شود. در این مساله به مقایسه سود حاصل از انتخاب سبد پروژه و زمان‌بندی و اجرای فعالیت‌های آن‌ها بین دو حالتی که افق زمانی ثابت و یا منعطف باشد، پرداخته شده است. به همین منظور حدود تلرانس بالا و پایینی برای افق زمانی ازپیش‌تعیین‌شده در نظر گرفته شده است. در صورت تجاوز از افق زمانی مذکور، هزینه‌ای به‌عنوان جریمه در نظر گرفته خواهد شد و هدف تعیین افق زمانی مطلوب است. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این مساله پیشنهاد شده است و جهت حل آن در ابعاد کوچک و بزرگ از نرم‌افزار *GAMS* و *Simplex Solver* و ترکیبی از یک الگوریتم ابتکاری پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی محلی استفاده شده است. سپس نتایج حاصل از آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی عملکرد قابل‌قبولی از منظر کیفیت جواب و زمان حل داشته و همچنین درنظرگرفتن افق زمانی انعطاف‌پذیر می‌تواند افزایش عایدی قابل‌توجهی را نسبت به عدم درنظرگرفتن آن داشته باشد.

عظیم زاده و همکاران [43] در تحقیقی به رهیافتی مبتنی بر ارزش کسب‌شده جهت حل مساله کمینه‌سازی هزینه‌های زودکرد و دیرکرد پروژه‌های تحقیق و توسعه پرداختند. هدف مقاله معرفی یک روش مبتنی بر ارزش کسب‌شده به‌گونه‌ای بود که از کارایی بیشتری در حداقل‌نمودن مجموع هزینه‌های مذکور در پروژه‌های تحقیق و توسعه برخوردار باشد. در این راستا، یک مدل ریاضی زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارایه شد و

به‌منظور ارزیابی کارایی آن نسبت به الگوریتم‌های قبلی، اطلاعات ۵۰۰ پروژه تحقیق و توسعه از تعدادی از شرکت‌های دانش‌بنیان جمع‌آوری شد و سرعت و عملکرد الگوریتم‌ها با معیار درصد مجموع زمان دیرکرد و زودکرد به زمان سیکل پروژه (شاخص *TTR*) به‌طور مقایسه‌ای تحلیل گردید. یافته‌های تحقیق حاکی از این است که استفاده از رویکرد ارزش کسب‌شده در زمان‌بندی پروژه ضمن ایجاد تعادل در زمان و هزینه، منجر به بهبود میزان تسطیح منابع در پروژه‌های تحقیق و توسعه مورد مطالعه شده است. همچنین به‌عنوان نتیجه اصلی این مقاله، زمان‌بندی پروژه‌های تحقیق و توسعه با استفاده از رویکرد ارزش کسب‌شده به نسبت مدل‌های ارایه‌شده در تحقیقات قبلی از لحاظ سرعت و عملکرد محاسبات کارایی بیشتری در حل مساله کاهش مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد دارد.

زاده کفاش و ابراهیمی [44] در تحقیقی به ارایه مدل ریاضی کنترل بودجه و هزینه متغیر فعالیت‌های پروژه در شرایط موازنه زمان-هزینه[1] با لحاظ‌نمودن جریمه تاخیر پرداختند. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای بررسی مساله تاثیر بودجه غیرقطعی پروژه بر عملکرد آن ارایه گردید. گرچه در گذشته تحقیقات فراوانی درخصوص بهینه‌سازی مسایل *TCT* انجام شده بود، اما در این مقاله از رویکرد حسابداری پروژه در شرایط عدم‌اطمینان دریافت بودجه تخصیص‌یافته، عدم‌قطعیت در هزینه فعالیت‌های پروژه و مدت‌زمان آن‌ها به‌طور همزمان استفاده شد. از نوآوری‌های دیگر این تحقیق، ترکیب روابط پیش‌نیازی تعمیم‌یافته[2] با مدهای اجرایی متنوع فعالیت‌ها و سناریوهای پیوسته، گسسته و ترکیبی (پیوسته/ گسسته) بود. از برنامه‌ریزی قیود تصادفی[3] برای قطعی‌نمودن بودجه متغیر استفاده شده است. محدودیت بودجه تصادفی در یک سطح اطمینان ازپیش تعیین شده است. برای تخمین زمان‌های غیرقطعی، تکنیک ارزیابی و بازنگری برنامه[4] و برای تخمین هزینه‌های غیرقطعی مدهای اجرایی فعالیت‌ها، از روش سه‌نقطه‌ای بهره گرفته‌شده است. مدل ریاضی که عبارت است از به‌حداقل‌رساندن زمان کل پروژه، با درنظرگرفتن پاداش زود کرد در اتمام پروژه و جریمه تاخیر دیرکرد، توسط نرم‌افزار (*GAMS*) حل و برای اثبات عملکرد مدل، بر روی یک پروژه واقعی پیاده‌سازی گردید. سناریوهای متفاوتی پیشنهادشده که اثر هر یک از آن‌ها در تغییرات بودجه و عدم‌اطمینان زمانی بر هزینه‌های مستقیم، غیرمستقیم، هزینه کل و مدت‌زمان اتمام پروژه موردبررسی قرار گرفت.

کاتبی و همکاران [45] در تحقیقی به زمان‌بندی پروژه‌های ساخت با منابع محدود با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در مدت فعالیت‌ها و تاخیرات پرداختند. در این مقاله، رویکرد مناسب برای انتخاب روش‌های ساخت، نحوه تخصیص منابع اهمیت زیادی در کنترل پروژه ارایه شد. مدل مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در چندین حالت اجرایی برای پروژه‌های ساخت و با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در پارامترها ارایه شد. برای نمایش عدم‌قطعیت مدت‌زمان انجام فعالیت‌ها و تاخیر بین آن‌ها، از منطق فازی استفاده شد. در این مقاله به بررسی این مساله پرداخته و با ارایه یک الگوریتم هوشمند ترکیب‌شده از مجموعه‌های فازی و الگوریتم ژنتیک[5]، زمان‌بندی صورت گرفت.

عالم تبریز و همکاران [46] در تحقیقی به ارایه و حل مدل مساله زمان‌بندی زنجیره بحرانی پروژه با درنظرگرفتن بافر تغذیه پرداختند. در این تحقیق سعی در استفاده از اصول زنجیره بحرانی در زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع است. مهمترین نوآوری صورت‌گرفته در این تحقیق،ارایه مدل مساله زمان‌بندی زنجیره بحرانی پروژه با درنظرگرفتن بافر تغذیه و استفاده از شناوری به‌عنوان مکملی برای بافر تغذیه است. برای این کار ابتدا مدل زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع و با رویکرد زنجیره بحرانی نوشته شده و قابلیت اطمینان آن با استفاده از نرم‌افزار لینگو سنجیده شده است. در گام بعدی الگوریتم حل این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده و در نهایت نمونه مسایل مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق کارایی الگوریتم ژنتیک ارایه‌شده را نشان داده است.

مهدی‌زاده و همکاران [47] در تحقیقی به مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با هدف حداکثرنمودن ارزش خالص فعلی پرداختند. در مدل ارایه‌شده در این مقاله پارامترهای زمانی فعالیت‌ها به‌صورت اعداد فازی درنظرگرفته‌شده و مدلسازی صورت‌گرفته که مساله تحت عنوان زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با جریان‌های نقدی تنزیل‌یافته تحت شرایط فازی نامگذاری شد. جهت حل مدل پیشنهادی یک الگوریتم فراابتکاری نوین با الهام از تئوری ارتعاشات به نام الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش ارایه شد. در این راستا، جهت تولید برنامه زمان‌بندی، روش زمان‌بندی دوسویه و ساختار نمایش لیست فعالیت‌ها به‌کار گرفته شد. در نهایت کارایی الگوریتم ارایه‌شده با استفاده از مسایل استاندارد تولیدشده توسط نرم‌افزار *Pro-*

---

[1] Time-Cost Trade-off (TCT)

[2] Generalized Precedence Relationships (GPRs)

[3] Chance-Constrained Programming (CCP)

[4] Program Evaluation and Review Technique (PERT)

[5] Genetic Algorithm (GA)

gen در مقایسه با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارایه و مورد تجزیه‌وتحلیل شده است. تحلیل نتایج بیانگر کارایی الگوریتم ارایه‌شده جهت حل مدل پیشنهادی را با افزایش ابعاد مسایل نشان می‌دهد.

حسینیان و برادران [48] در تحقیقی به ارایه یک مدل ریاضی انرژی‌محور برای مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و حل آن توسط یک الگوریتم تکاملی پرداختند. در این پژوهش، یک مدل ریاضی انرژی‌محور برای مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود ارایه شده است. اهداف این مدل، کمینه‌سازی همزمان زمان تکمیل و مصرف کل انرژی پروژه است. منابع در این پروژه، ماشین‌آلاتی هستند که امکان تنظیم سرعت پردازش آن‌ها وجود دارد. افزایش سرعت آن‌ها، منجر به افزایش مصرف انرژی خواهد شد. مساله مورد بررسی، ازجمله مسایل *NP-hard* است. بنابراین، یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مگس میوه[1] برای حل مساله ارایه شده است. الگوریتم پیشنهادی از روش *VIKOR* که یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است، برای رتبه‌بندی جواب‌ها در روند جست‌وجوی فضای جواب بهره می‌برد. عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای حل مسایل نمونه با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مورد سنجش قرار گرفت. نتایج الگوریتم پیشنهادی، با نتایج سه روش فراابتکاری دیگر از نظر همگرایی، تنوع جواب‌ها و زمان محاسبات مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج، نشان از آن دارد که روش پیشنهادی توانسته است از نظر اکثر معیارهای سنجش عملکرد، نسبت به سایر روش‌ها بهتر عمل نماید. همچنین، نتایج الگوریتم‌ها با خروجی نرم‌افزار *GAMS* در مسایل با ابعاد کوچک مقایسه شد.

حسینیان و همکاران [49] در تحقیقی به توسعه مساله زمان‌بندی پروژه چندمهارته با ظرفیت متغیر از منابع محدود در طول زمان و ارایه الگوریتم جست‌وجوی هارمونی[2] برای حل آن پرداختند. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای مساله زمان‌بندی پروژه چندمهارته پیشنهاد شد که در آن میزان دسترسی به منابع، متغیر و وابسته به زمان است. ارتباط بین فعالیت‌ها در مدل پیشنهادی از نوع تعمیم‌یافته در نظر گرفته شده است. هدف مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی زمان تکمیل پروژه است. به‌منظور حل مدل پیشنهادی که ازجمله مسایل *NP-Hard* است، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر روش جست‌وجوی هارمونی (*HS*) توسعه داده شده است. در جهت افزایش تنوع جواب‌ها و کاهش احتمال گرفتارشدن الگوریتم پیشنهادی در بهینه محلی، دو عملگر تقاطع و جهش جدید برای این الگوریتم طراحی شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل چند مساله نمونه، نسبت به دو الگوریتم *PSO* و *GA* موردمقایسه قرار گرفته است. نتایج، نشان از برتری الگوریتم پیشنهادی ازنظر شاخص‌های کیفیت جواب و زمان حل مساله دارد.

۵- تشریح مساله و مدلسازی ریاضی

شبکه پروژه‌ای فعالیت روی شبکه با گراف $G = (V, A)$ را در نظر بگیرید به‌طوری‌که V نشان‌دهنده‌ی مجموعه فعالیت‌های پروژه است. گره‌های ۱ و n گره‌های موهومی آغاز و پایان فعالیت‌های پروژه می‌باشند. همچنین مجموعه‌ی A نشان‌دهنده‌ی روابط پیش‌نیازی آغاز-پایان، با تاخیر صفر بین فعالیت‌ها می‌باشد. به‌طور خاص، (i, j) که به مجموعه‌ی A تعلق دارند مستلزم این است که فعالیت i فعالیت پیش نیازی فعالیت j باشد. P_j مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیاز فعالیت j می‌باشد. اجرای فعالیت‌های پروژه مستلزم K نوع منبع تجدیدپذیر است. دسترسی‌پذیری منبع k در دوره زمانی t برابر R_{kt} می‌باشد. فعالیت i ممکن است M_j حالت اجرایی داشته باشد. مدت‌زمان لازم برای اجرای فعالیت i در حالت اجرایی m برابر $\tilde{d}_{im}$ می‌باشد که یه پارامتر فازی مثلثی می‌باشد. میزان منبع موردنیاز برای اجرای فعالیت i در حالت اجرایی m برابر r_{imk} می‌باشد و هزینه‌ی آن نیز پارامتری تصادفی است که با c_{im} نشان داده می‌شود. فرض می‌شود c_{im} به‌طور مستقل دارای میانگین μ_{im} و واریانس v_{im} می‌باشد. δ_n مهلت انجام پروژه است و B بودجه‌ی دردسترس برای تکمیل پروژه می‌باشد. زودترین و دیرترین زمان اتمام فعالیت I برابر E_i و L_i می‌باشد. هدف برنامه‌ریزی‌شدنی زمان و منابع پروژه به‌نحوی است که احتمال عدم‌عدول از بودجه پروژه حداکثر شود. مساله‌ی پژوهش حاضر مساله‌ی بهینه‌سازی مدل مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با وجود چند حالت اجرایی و درنظرگرفتن ریسک‌های اجرایی می‌باشد. مفروضات درنظرگرفته‌شده در این مساله به شرح ذیل هستند:

۱. پروژه از چند فعالیت مشخص تشکیل شده است. به‌منظور آغاز یک فعالیت، فعالیت قبلی (پیش‌نیاز) باید خاتمه یافته باشد به‌عبارت‌دیگر رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها از نوع *FS* خواهد بود.
۲. زمانی‌که یک فعالیت انتخاب می‌شود این فعالیت تا مدت‌زمان مشخصی انجام می‌شود و تا اتمام آن فعالیت، مراحل اجرای آن متوقف نمی‌شود، به‌عبارت‌دیگر فعالیت‌ها غیرقابل انقطاع هستند.

[1] Multi-Objective Fruit Fly Optimization Algorithm (MOFOA)

[2] Harmony Search algorithm (HS)

۳. در دوره زمانی موردنظر محدودیت منابع وجود دارد که برای هر یک از منابع به صورت مجزا است.
۴. هر فعالیت پروژه تنها یک‌بار انجام می‌شود.
۵. مساله چندحالته است بنا به عبارتی یک فعالیت j باید در یک‌زمان شروع در یکی از حالت‌های اجرای آن که با M_j حالت اجرا نمایش داده می‌شود، آغاز گردد.
۶. همچنین فعالیت با هر حالت اجرایی که شروع می‌شود با همان حالت اجرایی خاتمه یابد.
۷. فعالیت‌ها به زمان آماده‌سازی احتیاج ندارد.
۸. در هر فعالیت از یک یا چند منبع استفاده می‌شود.
۹. هر حالت اجرایی ریسک مربوط به خود را دارد که تنها هزینه ریسک در فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و درنظرگرفتن چند حالت اجرایی برای انجام فعالیت‌ها و همچنین هزینه مدیریت ریسک حالت‌های مختلف به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی صفر و یک توسعه یافته است. این مدل دارای یک متغیر تصمیم صفر و یک می‌باشد که به‌صورت خطی به‌دنبال بهینه‌کردن مساله زمان‌بندی پروژه با درنظرگرفتن محدودیت منابع، حالات اجرایی مختلف و ریسک انجام هر حالت می‌باشد.

جدول ۱- نمادهای مدل.
Table 1– Model symbols.

P_j	**مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیاز فعالیت j .**
M_i	**تعداد حالات اجرایی فعالیت i .**
T	**مجموعه نقاط زمانی در کل افق برنامه زمانی که با t نمایش داده می شوند.**
COR_{im}	**هزینه مدیریت ریسک انجام فعالیت i در حالت m.**
C_{im}	**هزینه مستقیم انجام فعالیت i در حالت m.**
C^P	**جریمه هر واحد زمانی دیرکرد نسبت به موعد تحویل تعیین‌شده.**
$T^{deadline}$	**موعد تحویل پروژه.**
d_{im}	**مدت زمان انجام فعالیت i در حالت m.**
R_{imr}	**مقدار مورد نیاز منبع تجدیدپذیر r زمانی‌که فعالیت i در حالت m انجام شود.**
x_{imt}	**متغیر تصمیم صفر و یک: اگر فعالیت i در حالت m در نقطه زمانی t تمام شود، مقدار یک در غیر این صورت صفر می‌باشد.**
D	**موعد تحویل پروژه.**

$$MIN\ F = \sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M_i}\left\{(C_{im}+COR_{im})*\left(\sum_{t=1}^{T}x_{imt}\right)\right\}+C^P.\left\{\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M_i}t.x_{nmt}\right)-T^{deadline}\right\}, \quad (۱)$$

$$s.t.$$

$$\sum_{m=1}^{M_i}\sum_{t=1}^{T}x_{imt}=1,\quad i=1,2,\dots,n. \quad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M_i}t.x_{imt}\le\sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M_i}(t-d_{im}).x_{jmt}\,,j=1,2,\dots,n\,,i\in P_j. \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{M_i}\left\{\sum_{\tau=1}^{t+d_{im}-1}r_{imr}.x_{imr}\right\}\le R\,,\qquad \forall\, r\in R\,,t\in T. \quad (۴)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M_n} t.x_{nmt} \le D. \quad (۵)$$

$$x_{imt} \in \{0,1\}. \quad (۶)$$

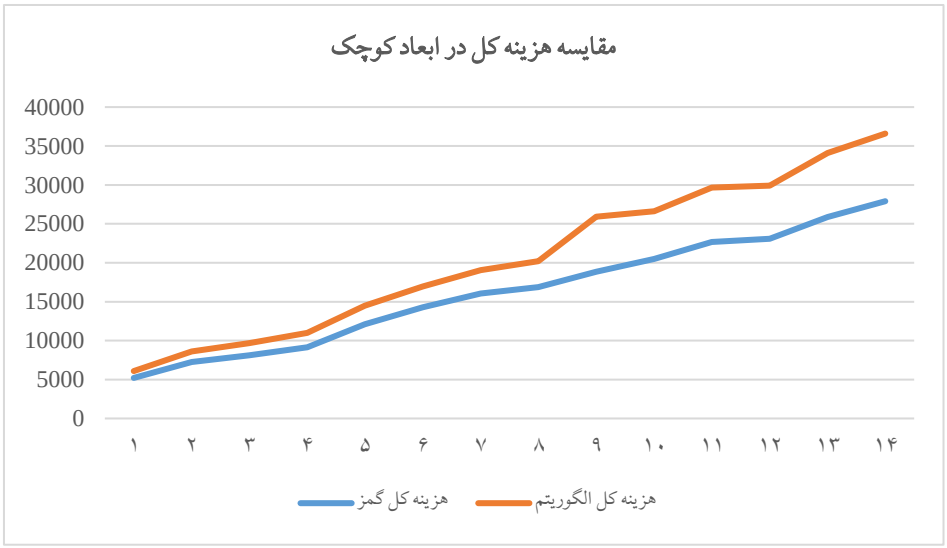
$$i = 1,2,\dots,n. \quad (۷)$$

$$m = 1,2,\dots,M_i. \quad (۸)$$

رابطه (۱) که عبارت است از مینیمم‌کردن هزینه انجام پروژه که خود شامل هزینه‌های مستقیم انجام فعالیت‌ها و همچنین هزینه مدیریت ریسک حالت اجرایی انتخاب‌شده برای انجام هر فعالیت به‌علاوه هزینه جریمه تاخیر نسبت به موعد تحویل تعیین شده است که به‌عنوان تابع هدف مساله ارایه شده است. **رابطه (۲)** تضمین می‌کند هر فعالیت باید با یک روش و در یک زمان خاصی خاتمه یابد. **رابطه (۳)** روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها را تضمین می کند. **رابطه (۴)** محدودیت منابع تجدیدپذیر در هر واحد زمانی را تضمین می‌کند. **رابطه (۵)** انجام پروژه در موعد تحویل تعیین‌شده را گارنتی خواهد کرد. **رابطه (۶)** تا **رابطه (۸)** هم به‌ترتیب متغیر تصمیم صفر و یک، تعداد فعالیت‌های پروژه و تعداد حالات اجرایی درنظرگرفته‌شده برای انجام هر فعالیت را مشخص می‌کند.

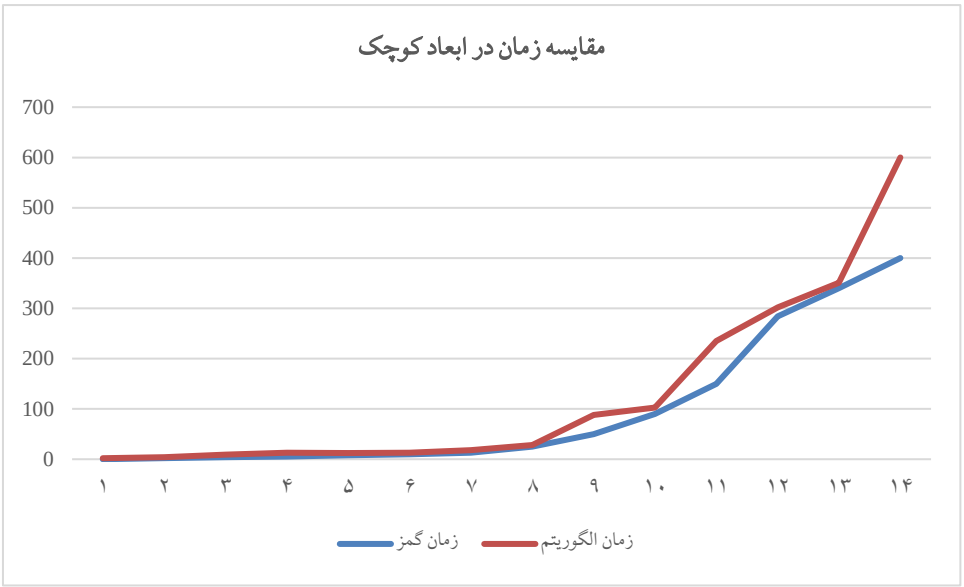
۶- رویکرد حل مدل

رویکرد حل مقاله حاضر، الگوریتم ابتکاری می‌باشد. دلیل استفاده از روش ابتکاری اهمیت توسعه روش‌های جدید در بین محققان حل این‌گونه مسایل است. چراکه توسعه روش‌های ابتکاری دارای مزیت‌های مربوط به خود می‌باشد. از مزایای روش‌های ابتکاری می‌توان به فهم ساده، زمان حل کمتر حتی نسبت به روش‌های فرابتکاری، تنظیم پارامتر راحت‌تر، توسعه رویکرد سفارشی برای حل یک مساله به‌خصوص، عدم‌نیاز به کدینگ پیچیده جواب مساله و ... نام برد. باتوجه‌به اینکه پیشتر اشاره شد و مدل برنامه‌ریزی ریاضی مذکور در دسته‌بندی مسایل *NP-hard* قرار داشته و برای مسایل با اندازه بزرگ حل بهینه آن‌ها زمان‌بر بوده و حداقل در دنیای واقعی توجیه اقتصادی ندارد، سعی شده است یه مدل ابتکاری ارایه شود. ارزش مدل‌های ابتکاری سادگی به‌کارگیری می‌باشد. هر چند این الگوریتم‌ها در خصوص ارایه جواب بهینه سراسری تضمینی نمی‌دهند ولی پیداکردن جواب بهینه محلی آن هم در زمان کم و فهم ساده ارزش مربوط به خود را دارد. صاحب‌نظران عقیده دارند ارایه یک الگوریتم ابتکاری که بتواند جواب بهینه محلی مناسبی بر اساس جست‌وجوی در محدوده کوچکی از فضای جواب ارایه دهد، اهمیت خاص خود را دارد. برای این منظور در این قسمت یک بار دیگر ابعاد مساله به‌صورت مختصر بیان می‌شود. مساله مورد نظر عبارت است از زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تجدیدپذیر و درنظرگرفتن قابلیت انجام فعالیت با حالات مختلف به‌طوری‌که هر حالت مشخصات مربوط به خود را دارا است. این مشخصات عبارت هستند از زمان انجام متفاوت، هزینه مستقیم متفاوت، هزینه مدیریت ریسک متفاوت و تعداد منبع تجدیدپذیر متفاوت با درنظرگرفتن هدف مساله که عبارت است از ارایه زمان‌بندی انجام فعالیت‌ها به‌طوری‌که هزینه انجام پروژه کمینه شود. از طرفی دیگر محدودیت‌هایی ازجمله پیش‌نیازی و پس‌نیازی بین فعالیت‌ها، تعداد منبع تجدیدپذیر دردسترس و موعد تحویل پروژه نیز باید در نظر گرفته شوند. همچنین به‌ازای هر واحد دیرکرد در انجام پروژه جریمه تعیین‌شده اعمال می‌شود. شایان ذکر است الگوریتم ارایه‌شده در دو مرحله جست‌وجوی جواب را انجام می‌دهد به‌طوری‌که در مرحله اصلی اول، باتوجه‌به خوش‌بینانه‌ترین حالت انجام فعالیت‌ها (خوش‌بینانه باتوجه‌به تابع هدف که کمینه‌سازی هزینه انجام پروژه است تعریف می‌شود) باتوجه‌به رعایت محدودیت‌های مساله جواب اولیه ارایه می‌شود. در این مرحله همه محدودیت‌ها به‌غیر از محدودیت موعد تحویل پروژه در نظر گرفته می‌شوند. با این توضیح که شاید جواب به‌دست‌آمده در این مرحله جواب‌شدنی نهایی نباشد چراکه موعد تحویل پروژه را نقص کند. در مرحله بعدی (بازگشت الگوریتم) که در صورت نقص موعد تحویل پروژه اجرا می‌شود، درخصوص تغییر حالت‌های اجرایی هر فعالیت با رویکردهای بدبینانه‌تر اقدام می‌شود به‌طوری‌که تعادل و موازنه‌ای بین جریمه دیرکرد و حالت خوشبینانه‌تر انجام فعالیت انجام می‌شود به‌طوری‌که کل هزینه پروژه کمینه شود.



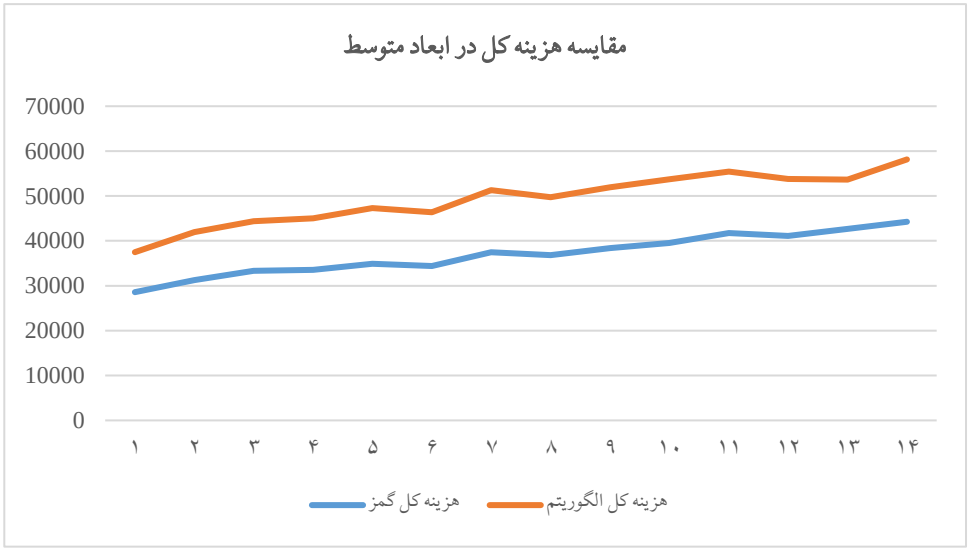
شکل ۱- مقایسه هزینه کل در ابعاد کوچک.

Figure 1– Comparison of total cost at a small scale.



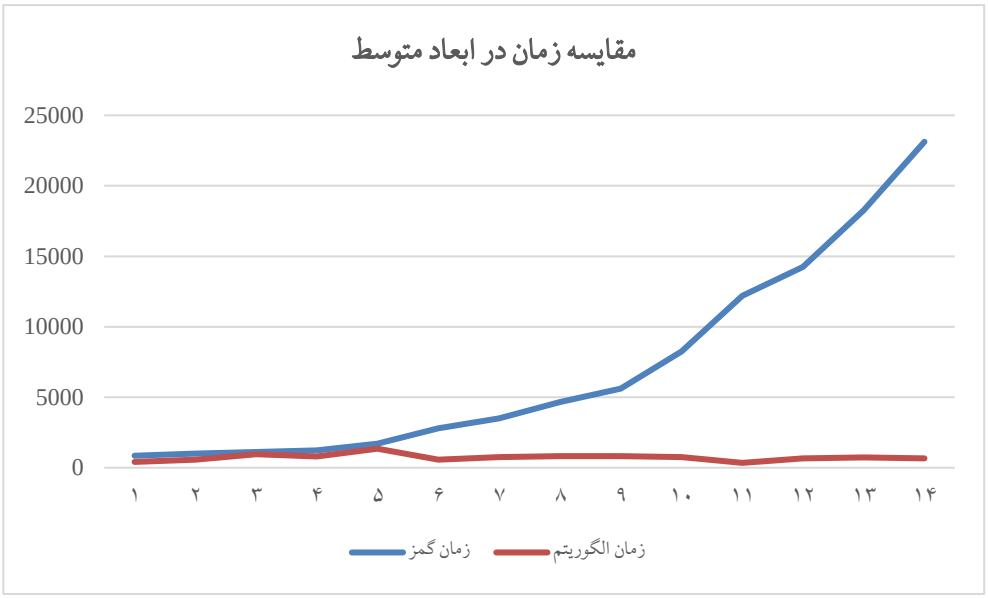
شکل ۲- مقایسه هزینه کل در ابعاد کوچک.

Figure 2- Comparison of total cost at a small scale.



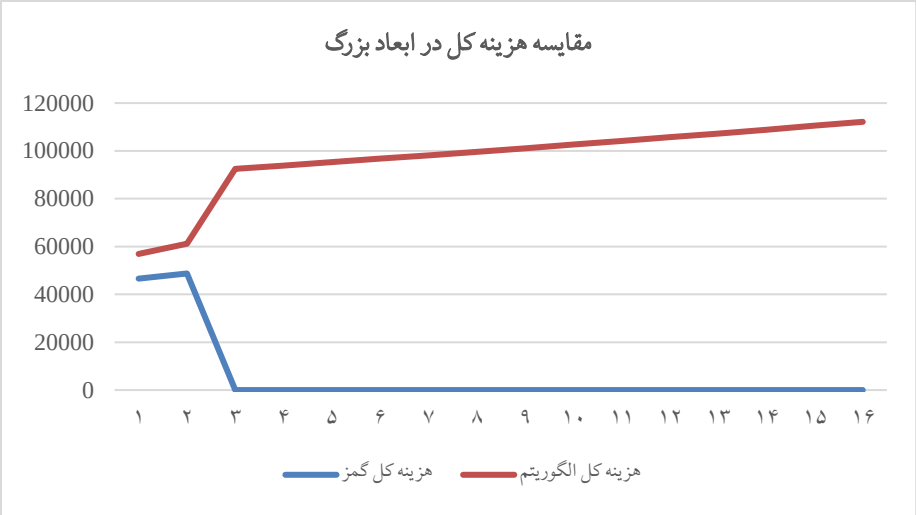
شکل ۳- مقایسه هزینه کل در ابعاد متوسط.

Figure 3- Comparison of total cost for medium-sized dimensions.



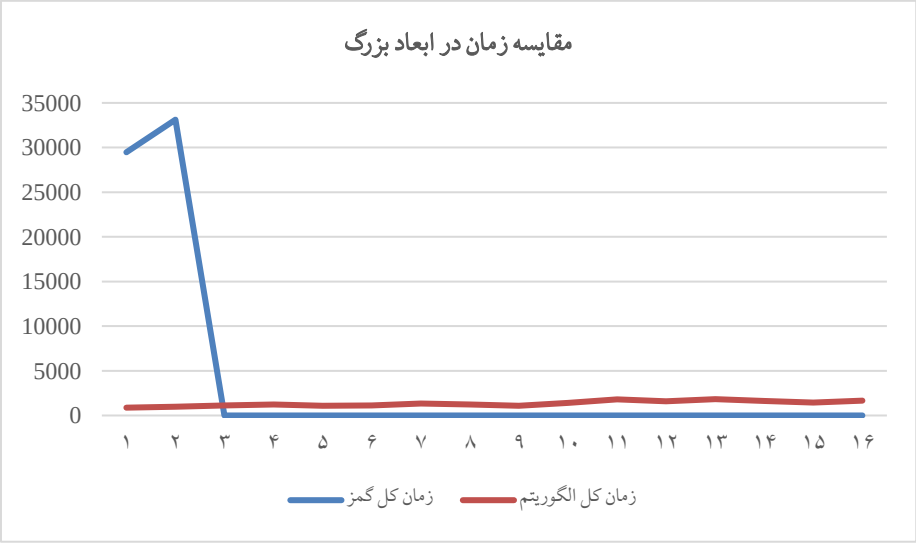
شکل ۴- مقایسه زمان در ابعاد متوسط.

Figure 4- Comparison of time for medium dimensions.



شکل ۵- مقایسه هزینه در ابعاد بزرگ.

Figure 5- Cost comparison at a large scale.



شکل ۶- مقایسه زمان در ابعاد بزرگ.

Figure 6– Comparison of time at large scales.

۷-نتیجه و جمع‌بندی

این تحقیق نشان داد که زمان‌بندی پروژه‌ها با محدودیت‌های منابع یک مساله پیچیده و چندبعدی است که نیازمند توجه به جنبه‌های مختلفی از جمله خصوصیات منابع، فعالیت‌ها و معیارهای عملکرد است. با استفاده از الگوریتم‌های مناسب و مدلسازی دقیق، می‌توان به بهینه‌سازی زمان‌بندی پروژه‌ها و افزایش کارایی در مدیریت منابع دست یافت. این نتایج می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده در این حوزه مورد استفاده قرار گیرد. در این فصل بعد از مرور مراحل پژوهش به ارایه پیشنهادهایی در راستای نتایج حاصل از انجام پژوهش پرداختیم. امید است نتایج حاصل و پیشنهادهای ارایه‌شده مورد استفاده مدیران پروژه قرار گیرد.

محدودیت هایی که در این تحقیق برای محقق وجود داشته به شرح ذیل می‌باشند:

۱. محدودیت در دسترسی به داده‌های پروژه‌های واقعی و لزوم استفاده از مسایل عددی غیرواقعی.
۲. وجود محدودیت‌ها و مسایل متعدد و پیچیده در شرایط دنیای واقعی نظیر آب‌وهوا و عدم‌امکان درنظرگرفتن همه آن‌ها به دلیل پیچیده‌شدن بسیار زیاد مدل.
۳. ضرورت درنظرگرفتن مفروضات ساده‌کننده برای قابل مدلسازی و حل شدن مدل.

هر تحقیقی می‌تواند زمینه‌ی انجام تحقیقاتی غنی‌تر را فراهم نماید. این پژوهش نیز از این مقوله مستثنی نبوده و توسعه‌های زیر را می‌توان برای آن در نظر گرفت:

۱. بررسی امکان قطع‌شدن فعالیت‌ها به علل مختلف.
۲. توجه به شرایط متنوع شامل آب‌وهوا، تحریم، تورم و ... به شکل جامع از طریق مولفه‌ها و پارامترهای معین برای هر کدام.
۳. استفاده از سایر رویکردهای فراابتکاری و یا روش‌های حل دقیق مانند الگوریتم مورچگان و جست‌وجوی ممنوعه، رویکردهای حل برنامه‌ریزی غیرخطی و حل‌کننده‌های مختلف و مقایسه با رویکرد حاضر.
۴. بررسی سایر رویکردهای برنامه‌ریزی غیرقطعی مانند بهینه‌سازی استوار و برنامه‌ریزی تصادفی و مقایسه آن با روش حاضر.

منابع

[1] Rouhani, A. (2014). Preparing project managers to manage complexity. *The first national conference on industrial engineering research*. Hamedan, Iran, Civilica. (**In Persian**). https://civilica.com/doc/306909

[2] Dasović, B., Galić, M., & Klanšek, U. (2020). A survey on integration of optimization and project management tools for sustainable construction scheduling. *Sustainability*, *12*(8), 1–18. https://doi.org/10.3390/su12083405

[3] Rosłon, J. (2017). The multi-mode, resource-constrained project scheduling problem in construction: State of art review and research challenges. *Technical transactions*, *114*(5), 67–74. https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.070.6427

[4] Sprecher, A., & Drexl, A. (1998). Multi-mode resource-constrained project scheduling by a simple, general and powerful sequencing algorithm1Supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft.1. *European journal of operational research*, *107*(2), 431–450. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00348-2

[5] Torabi Yeganeh, F., & Zegordi, S. H. (2020). A multi-objective optimization approach to project scheduling with resiliency criteria under uncertain activity duration. *Annals of operations research*, *285*(1–2), 161–196. https://doi.org/10.1007/s10479-019-03375-z

[6] 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. https://doi.org/10.5267/j.jpm.2018.1.005

[7] Lin, J., Zhu, L., & Gao, K. (2020). A genetic programming hyper-heuristic approach for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Expert systems with applications*, *140*, 112915. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112915

[8] Kerzner, H. (2019). *Using the project management maturity model: Strategic planning for project management*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119559078

[9] Hartmann, S., & Briskorn, D. (2022). An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European journal of operational research*, *297*(1), 1–14. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004

[10] Goudarzi, E., Esmaeeli, H., Parsa, K., & Asadzadeh, S. (2025). Proposing new clustering-based algorithms for the multi-skilled resource-constrained multi-project scheduling problem with resource leveling adjustments. *Kybernetes*, *54*(2), 1049–1081. https://doi.org/10.1108/K-06-2023-1044

[11] Jiang, S., Yang, B., & Liu, B. (2025). Precast components on-site construction planning and scheduling method based on a novel deep learning integrated multi-agent system. *Journal of building engineering*, *102*, 111907. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111907

[12] Yuan, Z., Man, Q., Guan, Z., Yi, C., Zheng, M., Chang, Y., & Li, H. X. (2024). Simulation and optimization of prefabricated building construction considering multiple objectives and uncertain factors. *Journal of building engineering*, *86*, 108830. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108830

[13] Hanafi, M. R., Rahimpour, H., Zinatloo-Ajabshir, S., Moodi, F., & Fahmi, A. (2024). Performance enhancement, life cycle assessment, and feature analysis of wheat starch-based NaCl-binder as a sustainable alternative to OPC mortar. *Results in engineering*, *24*, 103281. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103281

[14] Rahimpour, H., Fahmi, A., & Zinatloo-Ajabshir, S. (2024). Toward sustainable soda ash production: A critical review on eco-impacts, modifications, and innovative approaches. *Results in engineering*, *23*, 102399. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102399

[15] Morin, P. A., Artigues, C., Haït, A., Kis, T., & Spieksma, F. C. R. (2022). A project scheduling problem with periodically aggregated resource-constraints. *Computers & operations research*, *141*, 105688. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105688

[16] Morin, P. A., Artigues, C., & Haït, A. (2017). Periodically aggregated resource-constrained project scheduling problem. *European journal of industrial engineering*, *11*(6), 792–817. https://doi.org/10.1504/EJIE.2017.089108

[17] Chen, H., Ding, G., Zhang, J., Li, R., Jiang, L., & Qin, S. (2022). A filtering genetic programming framework for stochastic resource constrained multi-project scheduling problem under new project insertions. *Expert systems with applications*, *198*, 116911. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116911

[18] Tian, Y., Xiong, T., Liu, Z., Mei, Y., & Wan, L. (2022). Multi-objective multi-skill resource-constrained project scheduling problem with skill switches: Model and evolutionary approaches. *Computers & industrial engineering*, *167*, 107897. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107897

[19] Cui, L., Liu, X., Lu, S., & Jia, Z. (2021). A variable neighborhood search approach for the resource-constrained multi-project collaborative scheduling problem. *Applied soft computing*, *107*, 107480. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107480

[20] Fernandes, G. A., & de Souza, S. R. (2021). A matheuristic approach to the multi-mode resource constrained project scheduling problem. *Computers & industrial engineering*, *162*, 107592. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107592

[21] 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*, *47*, 5125–5129. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.307

[22] Đumić, M., & Jakobović, D. (2021). Ensembles of priority rules for resource constrained project scheduling problem. *Applied soft computing*, *110*, 107606. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107606

[23] Rostami, S., Creemers, S., & Leus, R. (2018). New strategies for stochastic resource-constrained project scheduling. *Journal of scheduling*, *21*(3), 349–365. https://doi.org/10.1007/s10951-016-0505-x

[24] Creemers, S. (2019). The preemptive stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European journal of operational research*, *277*(1), 238–247. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.030

[25] Tirkolaee, E. B., Goli, A., Hematian, M., Sangaiah, A. K., & Han, T. (2019). Multi-objective multi-mode resource constrained project scheduling problem using Pareto-based algorithms. *Computing*, *101*(6), 547–570. https://doi.org/10.1007/s00607-018-00693-1

[26] Bhaskar, T., Pal, M. N., & Pal, A. K. (2011). A heuristic method for RCPSP with fuzzy activity times. *European journal of operational research*, *208*(1), 57–66. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.07.021

[27] Korotkov, V., & Matveev, M. (2020). Individual scheduling for the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem. *Proceedings of the 1st international conference of information systems and design* (Vol. 2570). CEUR Workshop Proceedings. https://ceur-ws.org/Vol-2570/paper5.pdf

[28] Pan, H., & Yeh, C. H. (2003). Fuzzy project scheduling. *The 12th IEEE international conference on fuzzy systems, 2003. fuzz '03.* (Vol. 1, pp. 755–760). IEEE. https://doi.org/10.1109/FUZZ.2003.1209458

[29] Talbot, F. B. (1982). Resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs: The nonpreemptive case. *Management science*, *28*(10), 1197–1210. https://doi.org/10.1287/mnsc.28.10.1197

[30] Seyfi, M., & Tavakoli, M. R. (2008). A new bi-objective model for a multi-mode resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows and four payment models. *International journal of engineering, transactions a: Basics*, *21*(4), 347–360. https://www.ije.ir/&url=http:/www.ijeir.info/article_71740_fe0721c45af802b4981d5801e47e0ca4.pdf

[31] Hao, X., Lin, L., & Gen, M. (2014). An effective multi-objective EDA for robust resource constrained project scheduling with uncertain durations. *Procedia computer science*, *36*, 571–578. https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.056

[32] Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., Shahnazari-Shahrezaei, P., & Azaron, A. (2013). A differential evolution algorithm to solve multi-skilled project portfolio scheduling problems. *The international journal of advanced manufacturing technology*, *64*(5), 1099–1111. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4045-z

[33] Birjandi, A., & Mousavi, S. M. (2019). Fuzzy resource-constrained project scheduling with multiple routes: A heuristic solution. *Automation in construction*, *100*, 84–102. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.029

[34] 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. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.005

[35] 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. https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.01.002

[36] 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. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.007

[37] Messelis, T., & De Causmaecker, P. (2014). An automatic algorithm selection approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *European journal of operational research*, *233*(3), 511–528. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.021

[38] Tabrizi, B. H. (2018). Integrated planning of project scheduling and material procurement considering the environmental impacts. *Computers & industrial engineering*, *120*, 103–115. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.031

[39] Bruni, M. E., Di Puglia Pugliese, L., Beraldi, P., & Guerriero, F. (2017). An adjustable robust optimization model for the resource-constrained project scheduling problem with uncertain activity durations. *Omega*, *71*, 66–84. https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.09.009

[40] Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations research*, *52*(1), 35–53. https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065

[41] Geiger, M. J. (2017). A multi-threaded local search algorithm and computer implementation for the multi-mode, resource-constrained multi-project scheduling problem. *European journal of operational research*, *256*(3), 729–741. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.024

[42] Moomivand, S., Davari-Ardakani, H., Mosadegh, H., & Abouei Ardakan, M. (2022). Multi-mode resource constrained project selection and scheduling considering the reinvestment strategy in a flexible time horizon. *Journal of computational methods in engineering*, *40*(1), 17-42. (**In Persian**). https://doi.org/10.47176/jcme.40.1.7002

[43] Azimzadeh, M., Khademi, H., & Ershadi, M. (2019). An earned value-based approach for solving the problem of minimizing the earliness and tardiness costs of research and development projects. *San'ate technology development*, *17*(36), 5-16. (**In Persian**). https://www.ensani.ir/fa/article/552187

[44] Zadehkafash, M., & Ebrahimi, A. (2019). Development of a mathematical model for controlling budgets and variable activity costs in project scheduling under time-cost trade-off conditions, incorporating delay penalties. *Management accounting*, *12*(43), 49-65. (**In Persian**). https://sanad.iau.ir/Journal/jma/Article/816533

[45] Katebi, A., Almassian, F., & Homami, P. (2019). Multi mode resource constraint construction project scheduling problem (MRCPSP) considering the uncertainty in the activities duration and delays. *Journal of structural and construction engineering*, *6*(4), 176-198. (**In Persian**). https://doi.org/10.22065/jsce.2018.108681.1396

[46] Alemtabriz, A., Ayough, A., & Baniasadi, M. (2016). Presentation and solution of critical chain project scheduling problem (CCPSP) model with consideration of feeding buffer. *Industrial management studies*, *14*(42), 31-59. (**In Persian**). https://doi.org/10.22054/jims.2016.5707

[47] Mehdizadeh, E., Moalemian, A., & Hajipour, V. (2015). A vibration damping optimization TO maximize net present value for resource constrained project scheduling problem. *International journal of industrial engineering and production management*, *25*(4), 389-401 (**In Persian**). http://ijiepm.iust.ac.ir/article-1-1369-fa.html

[48] Hosseinian, A. H., & Baradaran, V. (2019). An energy-efficient mathematical model for the resource-constrained project scheduling problem: An evolutionary algorithm. *Interdisciplinary journal of management studies*, *12*(1), 91–119. https://doi.org/10.22059/ijms.2018.261960.673213

[49] Hosseinian, A. H., Baradaran, V., & Bashiri, M. (2018). A harmony search algorithm for multi-skilled RCPSP with time-dependent resource capacities. *Modern research in decision making*, *3*(3), 27-53. (**In Persian**). https://journal.saim.ir/article_33468.html?lang=fa