



Inventory Planning and Activity Scheduling in The Supply Chain of Reconstruction Projects (Case Study: Sina Drilling Rig 1)

Hossein Ali Hassanpour* 

Hassan Fatahi** 

Jafar Fahimi Sivaki*** 

Abstract

Introduction and objectives: Refurbishing an oil rig is one of the best alternatives to renting this capital-intensive equipment since its rental cost amounts to tens of thousands of dollars per day. This research focuses on the scheduling of activities and inventory planning in the supply chain of the Sina 1 drilling rig reconstruction project. Since no prior record of such an endeavor exists in the country, project scheduling is conducted under conditions of activity uncertainty. In addition, uncertainty in the timing of activities improves project owners' understanding of their schedule and creates a broader view of the project and future activities. In this model, contractor and supplier costs are considered simultaneously, and uncertain activity scheduling and order planning are carried out in a way that minimizes the overall cost of the chain.

Method: Given the large number of variables and constraints in the mathematical model of supply chain activity scheduling, the problem under study is classified as NP-hard. For this reason, meta-heuristic methods are used to solve such problems, which provide near-optimal answers in less time compared to exact methods. In this study, the electromagnetic algorithm has been used to solve this problem. This algorithm has been applied to a real project (the foundation section of the Sina 1 drilling rig).

Received: Nov. 10, 2024; Revised: Dec. 17, 2024; Accepted: Jan. 12, 2025; Published Online: Feb. 01, 2025.

* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Research Institute, Imam Hossein University, Tehran, Iran.
Corresponding Author: hahassan@ihu.ac.ir

** Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Research Institute, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

*** Master of Science, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Research Institute, Imam Hossein University, Tehran, Iran.



Findings: The mathematical model proposed in this research has been coded using the electromagnetic algorithm within the MATLAB software environment. The input parameters include general parameters and control parameters of the electromagnetic meta-heuristic algorithm. General parameters pertain to the specifications of the contractor, suppliers, activities, resources, and consumables. To validate the efficiency and effectiveness of the designed electromagnetic algorithm, three case problems were selected. The first problem consists of five activities; the second problem involves the same five activities but with two suppliers, while the third problem features a larger-scale scenario. First, the exact solution for each problem was obtained using AIMMS software, and then the solutions and computational times of the electromagnetic algorithm were compared with those of AIMMS. Notably, as problem size increases, the solution time in AIMMS grows significantly (exponentially). The proposed electromagnetic algorithm demonstrates acceptable performance in terms of computational time. The meta-heuristic electromagnetic algorithm solves the sample problem in 115 seconds, whereas AIMMS requires approximately 747 seconds to find the exact solution. Additionally, the relative deviation of the electromagnetic meta-heuristic algorithm from AIMMS is approximately one percent. Finally, a sensitivity analysis was conducted to examine the impact of different payment methods on the project's supply chain costs.

Conclusion: This research presents the modeling and solution approach for a two-level project supply chain, encompassing both the contractor and suppliers, with the objective of minimizing project and inventory costs for both entities. By comparing the results obtained from the exact method and the electromagnetic algorithm, it was found that the solution time using the electromagnetic algorithm is significantly less than the solution time in the exact method. In addition, the relative difference in the quality of the results is limited to approximately one percent. These cases clearly indicate the effectiveness and efficiency of the proposed algorithm. The results indicate that the proposed electromagnetic algorithm is a highly effective approach for this problem and converges toward an optimal solution.

Keywords: Activity Scheduling, Project Supply Chain, Inventory Planning, Uncertainty, Reconstruction, Meta-Heuristic Algorithms.

How to Cite: Hassanpour, Hossein Ali; Fatahi, Hassan; Fahimi Sivaki, Jafar (2025). *Inventory Planning and Activity Scheduling in The Supply Chain of Reconstruction Projects (Case Study: Sina Drilling Rig 1)*. *Ind. Manag. Persp.*, 15(1), 9-38 (In Persian).



برنامه‌ریزی موجودی و زمانبندی فعالیت‌ها در زنجیره‌تأمین پروژه‌های بازسازی (مطالعه موردی: دکل حفاری سینا ۱)

حسینعلی حسن پور*

حسن فتاحی**

جعفر فهیمی سیوکی***

چکیده

مقدمه و اهداف: بازسازی دکل حفاری نفت یکی از بهترین گزینه‌های جایگزین برای اجاره این تجهیز سرمایه‌ای است، زیرا هزینه اجاره آن، ده‌ها هزار دلار در روز است. این پژوهش، به زمانبندی فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی موجودی زنجیره‌تأمین پروژه بازسازی دکل حفاری سینا ۱ می‌پردازد. از آنجا که سابقه انجام چنین کاری در کشور وجود ندارد، زمانبندی پروژه در شرایط عدم قطعیت فعالیت‌ها انجام می‌شود. علاوه بر این، عدم قطعیت در زمان اجرای فعالیت‌ها باعث ارتقای شناخت صاحبان پروژه از زمانبندی‌شان شده و دید گسترده‌تری نسبت به پروژه و فعالیت‌های آینده ایجاد می‌کند. در این مدل، هزینه‌های پیمانکار و تأمین‌کنندگان به صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گرفته و زمانبندی نامطمئن فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی سفارشات به شکلی انجام می‌شود که هزینه کلی زنجیره به حداقل برسد.

روش: با توجه به تعداد زیاد متغیرها و محدودیت‌های موجود در مدل ریاضی زمان‌بندی فعالیت‌های زنجیره‌تأمین، مسأله مورد بررسی در دسته مسائل پیچیده NP-hard قرار می‌گیرد. به همین دلیل برای حل چنین مسائلی از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شود که در مقایسه با روش‌های دقیق، در زمان کمتری پاسخ‌های نزدیک به بهینه ارائه می‌دهند. در این پژوهش، از الگوریتم الکترومغناطیس به منظور حل این مسأله استفاده شده است. این الگوریتم بر روی یک پروژه واقعی (بخش پایه‌های دکل حفاری سینا ۱) به کار گرفته شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳.

* استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: hahassan@ihu.ac.ir

** دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

*** کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

یافته‌ها: مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم الکترومغناطیس در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است که پارامترهای ورودی مسئله، شامل پارامترهای عمومی و پارامترهای کنترلی الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس می‌باشد. پارامترهای عمومی مربوط به مشخصات پیمانکار، تأمین‌کننده، فعالیت‌ها، منابع و مواد مصرفی می‌باشند. به منظور اثبات کارایی و کارآمدی الگوریتم الکترومغناطیس طراحی شده، سه مسئله انتخاب گردید. مسئله اول شامل پنج فعالیت است، مسئله دوم در واقع همان پنج فعالیت مسئله اول اما با دو تأمین‌کننده می‌باشد، و مسئله سوم با ابعاد بزرگ‌تر انتخاب شد. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ایزم جواب دقیق برای مسئله به دست آمده، سپس جواب‌ها و زمان حل به دست آمده از الگوریتم الکترومغناطیس با آن مقایسه شد. باید به این نکته توجه کرد که با افزایش ابعاد مسئله، زمان رسیدن به جواب در نرم‌افزار AIMMS به صورت قابل توجهی (به صورت نمایی) افزایش می‌یابد. الگوریتم الکترومغناطیس ارائه شده با توجه به زمان حل، عملکرد قابل قبولی را نشان می‌دهد. زمان جواب الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس برای حل مسئله نمونه ۱۱۵ ثانیه است ولی زمان رسیدن به جواب توسط نرم‌افزار دقیق ایزم حدود ۷۴۷ ثانیه است. همچنین اختلاف نسبی الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس نسبت به نرم‌افزار دقیق ایزم تقریباً یک درصد می‌باشد. در آخر نیز برای تحلیل حساسیت از تاثیر روش‌های مختلف پرداخت بر هزینه زنجیره تأمین پروژه، استفاده شده است.

نتیجه‌گیری: در این پژوهش، مدل‌سازی و حل مسئله زنجیره‌تأمین پروژه دو سطحی شامل پیمانکار و تأمین‌کنندگان ارائه شده است که هزینه‌های مربوط به پروژه و موجودی برای هر دو عضو زنجیره کمینه‌سازی شده است. با مقایسه نتایج حاصل از روش دقیق و الگوریتم الکترومغناطیس، مشخص شد که زمان حل با استفاده از الگوریتم الکترومغناطیس به طور قابل توجهی کمتر از زمان حل در روش دقیق است. علاوه بر این، اختلاف نسبی کیفیت نتایج تقریباً به یک درصد محدود می‌شود. این موارد به‌خوبی نشان‌دهنده اثربخشی و کارآمدی الگوریتم پیشنهادی هستند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم الکترومغناطیس پیشنهادی برای این مساله، الگوریتمی موثر و دارای همگرایی به جواب بهینه می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زمانبندی فعالیت، زنجیره‌تأمین پروژه، برنامه‌ریزی موجودی، عدم قطعیت، بازسازی، الگوریتم‌های فراابتکاری.

استناددهی: حسن‌پور، حسینعلی؛ فتاحی، حسن؛ فهیمی سیوکی، جعفر (۱۴۰۴). برنامه‌ریزی موجودی و زمانبندی فعالیت‌ها در زنجیره‌تأمین پروژه‌های بازسازی (مطالعه موردی: دکل حفاری سینا ۱). چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۵(۱)، ۹-۳۸.



۱. مقدمه

در دنیای رقابتی امروز، ارائه خدمات و محصولات باکیفیت هنگامی دارای ارزش است که چارچوب زمانی و هزینه در آن رعایت شده باشد. در میان اجزای مدیریت پروژه، زمانبندی پروژه به جهت برنامه‌ریزی پروژه‌های واقعی جایگاه ویژه‌ای دارد. برنامه‌ریزی و زمانبندی پروژه وقتی که هم محدودیت منابع و هم عدم‌اطمینان در طول دوره فعالیت‌ها وجود دارد، مسئله مهم و پیچیده‌ای می‌باشد. تاریخچه نسبتاً طولانی در رابطه با کار بر روی مسائل زمانبندی پروژه در شرایط قطعیت در طول دوره فعالیت‌ها و میزان منابع مورد نیاز آن‌ها وجود دارد، اما کار بر روی نوع غیرقطعی مسائل کمتر انجام شده و این مسائل جدیدتر است. با این عدم قطعیت، زمان فعالیت‌ها بیشتر به صورت زمان‌های احتمالی و فازی در نظر گرفته می‌شود که کار بر روی زمان‌های احتمالی بسیار گسترده‌تر بوده و پیشینه کار بر روی زمان انجام فعالیت‌ها با داده‌های فازی کم‌رنگ‌تر می‌باشد [۱۳].

یکی از جنبه‌های کمتر توجه شده مدیریت پروژه، بحث زنجیره تأمین پروژه است که همزمان با پیچیده‌تر شدن فضای رقابتی بازار، روزه‌روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. در این حالت، علاوه بر فاکتورها و پارامترهای پروژه، مسائل مربوط به تأمین‌کنندگان اقلام و مواد مصرفی پروژه نیز در نظر گرفته می‌شود. اکثر کارهای مشابه در زمینه برنامه‌ریزی و زمانبندی پروژه، با فرض وجود اطلاعات کامل و قطعی در مورد مدت زمان انجام فعالیت‌ها و میزان منابع مورد نیاز آن انجام شده است. در صورتی که در دنیای واقعی، عدم قطعیت در زمان اجرای فعالیت‌ها، میزان منابع مورد نیاز هر فعالیت و غیره وجود دارد که به تدریج با اجرای پروژه به وقوع می‌پیوندد. لذا در این تحقیق، عدم قطعیت زمان اجرای فعالیت‌ها که در واقع یکی از خصوصیات پروژه‌های واقعی است، در ساختار مسئله ملاحظه می‌گردد و سپس یک روش کارا برای حل مسئله ارائه خواهد شد [۱۳ و ۲۲].

ضرورت انجام تحقیق را می‌توان در موارد زیر بیان کرد:

۱. هزینه‌های موجودی، خرید و انبار کل مواد مورد نیاز پروژه در ابتدای عملیات، مشکلاتی همچون ناتوانی در ادامه عملیات، افزایش هزینه‌های نگهداری، غیرقابل مصرف شدن مواد در صورت تغییر طرح و نقشه و غیره را به دنبال خواهد داشت. همچنین تهیه مواد درست قبل از زمان مصرف، مشکلاتی همچون عدم وجود نقدینگی لازم در پروژه در زمان مصرف، افزایش قیمت مصالح در دوره‌های بعدی پروژه و امکان عدم تأمین به موقع مواد را به دنبال خواهد داشت. لذا باید به دنبال حالتی بود که هم هزینه‌های موجودی و هم هزینه‌های مربوط به زمانبندی پروژه را بهینه نمود.

۲. ساده‌ترین حالت مسئله زمانبندی، حالتی است که محدودیت منابع در نظر گرفته نمی‌شود و پارامترهای مسئله به صورت قطعی فرض می‌شوند. ولی با توجه به اینکه پروژه‌ها در عمل در محیطی اجرا می‌شوند که عدم قطعیت یکی از مشخصه‌های اصلی این محیط‌ها می‌باشد، به منظور کاربردی کردن هرچه بیشتر و برای نزدیک‌تر کردن مسئله زمانبندی به مسائل دنیای واقعی، در این پژوهش، پارامتر زمان اجرای فعالیت‌ها غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

پس هدف از تحقیق حاضر، برنامه‌ریزی موجودی و زمانبندی فعالیت‌ها در زنجیره‌تأمین پروژه‌های بازسازی دکل حفاری می‌باشد. با این فرض که زمان اجرای فعالیت‌ها غیرقطعی و خود فعالیت نیز دارای عدم قطعیت می‌باشد. همچنین پروژه دکل حفاری سینا ۱ نیز به عنوان موضوع مورد مطالعه انتخاب شده و در ادامه از الگوریتم الکترومغناطیس برای برنامه‌ریزی موجودی و زمانبندی فعالیت‌ها استفاده می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زمانبندی پروژه. زمانبندی پروژه شامل تعیین یک ترتیب زمانی برای اجرای مجموعه‌ای از فعالیت‌های وابسته است که پروژه را تشکیل می‌دهند. به عبارت دیگر، ممکن است اجرای یک فعالیت به اتمام چند فعالیت دیگر وابسته باشد، که در این صورت پروژه با محدودیت‌های تقدمی مواجه است. برنامه‌ریزی زمانبندی با توجه به دستیابی به هدف یا اهداف مشخص انجام می‌شود. در اکثر پروژه‌ها، محدودیت‌های تقدمی میان فعالیت‌ها وجود دارد؛ اما علاوه بر این، ممکن است نوع دیگری از محدودیت‌ها تحت عنوان محدودیت منابع نیز مطرح شود. اجرای فعالیت‌های پروژه معمولاً نیازمند استفاده از منابع مشخصی است که اغلب محدود هستند. مسائل زمانبندی پروژه را می‌توان بر اساس

وجود یا عدم وجود محدودیت منابع طبقه‌بندی کرد. مسائلی که در آن‌ها محدودیت منابع وجود ندارد یا در نظر گرفته نمی‌شود، به مسائل زمان‌بندی پروژه بدون محدودیت منابع^۱ معروف‌اند. در مقابل، مسائلی که در آن‌ها محدودیت منابع وجود دارد و این محدودیت‌ها در فرآیند زمان‌بندی لحاظ می‌شوند، به مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع^۲ مربوط می‌شوند [۲۱].

عطار و همکاران (۱۳۹۴) مطالعه‌ای را درباره انتخاب و زمان‌بندی چند پروژه با محدودیت منابع در شرایط مختلف اجرایی، به منظور حداکثرسازی ارزش فعلی خالص، انجام داده‌اند. در این پژوهش، فعالیت‌ها با استفاده از حالت‌های متنوع منابع قابل اجرا هستند و از دو نوع منابع، یعنی تجدیدپذیر مانند نیروی انسانی و ماشین‌آلات و تجدیدنپذیر مانند مواد اولیه و بودجه بهره می‌گیرند. همچنین، در محاسبه هزینه‌ها، مواردی از قبیل هزینه اضافه‌کاری منابع تجدیدپذیر، جریمه تأخیر در اجرا یا پاداش تحویل زودتر از موعد پروژه منظور شده است. [۱۸].

قلی‌زاده و افشار نجفی (۱۳۹۷) در پژوهش خود به بررسی مسئله زمان‌بندی پروژه‌های چندحالتی با دو هدف اصلی و در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع و برنامه‌ریزی پرداخت پرداخته‌اند. در این مطالعه، تلاش شده است تا با هدف افزایش ارزش فعلی خالص (NPV) پروژه و کاهش زمان اتمام آن، روش‌هایی برای زمان‌بندی بهینه ارائه شود. ابتدا، براساس مفروضات موجود در فضای مسئله، مدل ریاضی غیرخطی برای فرموله‌سازی مسئله توسعه داده شده است. پس از آن، جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، تعدادی مسئله نمونه در ابعاد مختلف طراحی شده و با استفاده از نرم‌افزار GAMS و همچنین روش محدودیت اِپسیلون حل گردیده است. علاوه بر این، برای حل مسائل بزرگ‌تر، الگوریتم NSGA-II به کار گرفته شده و عملکرد آن با روش محدودیت اِپسیلون مقایسه شده است تا کارایی و دقت آن ارزیابی شود. [۱۲].

زمان‌بندی زنجیره‌تأمین. زمان‌بندی در زنجیره‌تأمین غالباً با جنبه‌های دیگری نظیر زمان‌بندی تولید، زمان‌بندی حمل‌ونقل و یا به صورت مسائل ترکیبی و در غالب یکپارچه کردن عناوین فوق همراه است. نخعی و همکاران (۲۰۱۰) برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی، بحث یکپارچگی زمان‌بندی و حمل‌ونقل را پیاده‌سازی نمودند. مرحله اول شامل تأمین‌کنندگان، مرحله دوم شامل ناوگان حمل‌ونقل کالا با خودروهایی با سرعت و ظرفیت متفاوت و مرحله سوم شامل چندین شرکت سازنده محصولات نهایی می‌باشد. هدف آنان کمینه نمودن حداکثر زمان تکمیل برای سفارشات مشتریان بوده و با توجه به پیچیدگی مسئله، یک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده است [۱۹].

زنجیره‌تأمین پروژه. زنجیره‌تأمین پروژه، زنجیره‌ای است متشکل از سطوح مختلف (شامل تأمین‌کننده مواد اولیه، تولیدکننده، توزیع‌کننده و غیره) که باهدف تأمین اقلام مورد نیاز فعالیت‌های پروژه با هم در ارتباط هستند. به تعبیر دیگر می‌توان زنجیره‌تأمین پروژه را یک ترکیب از زنجیره‌تأمین و مجموعه فعالیت‌های پروژه دانست. در این زنجیره‌تأمین خاص، مواد مصرفی مورد نیاز فعالیت‌های پروژه از طریق زنجیره‌تأمین مواد^۳ تهیه و یا تولید شده و برای پروژه ارسال می‌شوند. انجام فعالیت‌های پروژه در زمان تعیین شده، منوط به تأمین به‌موقع و به‌اندازه‌ی مواد مصرفی است [۲۵].

در سال‌های اخیر، تئوری مربوط به فعالیت‌های خرید و تدارکات، تحت عناوین مختلف و با هدف‌های متفاوت مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. هر یک از این تحقیقات بر قسمتی از فعالیت‌های سازمان تمرکز می‌کنند، اما در این میان تنها SCM است که با نگرشی گسترده، بر چگونگی استفاده بنگاه‌ها از فرآیندها، فن‌آوری و توانایی تأمین‌کنندگان، برای بهبود مزیت‌های رقابتی خود تأکید می‌کند [۱۷].

بیانی و همکاران (۱۳۹۴) مدلی ریاضی برای مدیریت زنجیره تأمین سبز در پروژه‌های ساخت‌وساز ارائه کرده‌اند که در آن زمان‌بندی پروژه نیز لحاظ شده است. این مطالعه مدلی یکپارچه را معرفی می‌کند که دو هدف اصلی را دنبال می‌کند: نخست، بیشینه‌سازی سود و دوم، کمینه‌سازی انتشار گاز دی‌اکسید کربن. با فرض اینکه شبکه پروژه، مدت زمان فعالیت‌ها و تقاضای روزانه هر فعالیت مشخص باشد، مدل ارائه‌شده برنامه‌ریزی زنجیره تأمین را در دوره‌های زمانی گوناگون انجام می‌دهد. به علت چندهدفه بودن مدل و ماهیت غیرخطی آن، ابتدا مدل خطی‌سازی و سپس با استفاده از روش محدودیت اِپسیلون در نرم‌افزار GAMS حل شد. در نهایت، نتایج مدل با تحلیل دو مثال عددی ارزیابی و بررسی گردید. [۶].

1 Resource-Unconstrained Project Scheduling Problems (RUPSP)

2 Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP)

3. Material Supply Chain

موسوی و همکاران (۱۴۰۰) به بهینه‌سازی زمانبندی پروژه تحت عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. الگوریتم‌های پیشنهادی در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی، الگوریتمی کارا بوده و قادر به بدست آوردن جواب بسیار نزدیک به بهینه سراسری در مسائل بهینه‌سازی می‌باشد [۱۶].

ایمان‌نژاد و آوخ دارستانی (۱۴۰۰) به بهینه‌سازی مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته‌اند. هدف اصلی کمیته‌سازی زمان پروژه می‌باشد. برای حل این مدل از نرم‌افزار گمز و الگوریتم‌های فراابتکاری زنبور عسل، ژنتیک و جستجوی ممنوعه و نرم‌افزار متلب استفاده شده است و نتایج به دست آمده از الگوریتم‌ها و گمز با هم مقایسه شده است. هر چقدر الگوریتم در تعداد تکرارهای کمتر به جواب بهینه برسد، نشان‌دهنده این است که همگرایی بالایی دارد [۱۳].

دانشگری و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش خود یک مدل ریاضی دو مرحله‌ای چندهدفه را طراحی و ارائه کردند که به زمان‌بندی فعالیت‌های همزمان در چندین پروژه می‌پردازد. این مدل با در نظر گرفتن محدودیت منابع در شبکه‌های احتمالی، بر تخصیص و تسطیح منابع به صورت همزمان تأکید دارد. برای حل این مدل، از سه روش فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تیرید شبیه‌سازی شده، به همراه یک روش دقیق استفاده شد. نتایج مقایسه‌شده نشان داد که الگوریتم ژنتیک دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. [۸].

چانگسیو و ژینگ‌فنگ^۱ (۲۰۱۲) در مقاله خود مسئله زمانبندی پروژه تحت عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، زمان فعالیت‌ها به صورت متغیرهای غیرقطعی با تابع توزیع احتمالی در نظر گرفته شد. آن‌ها همچنین چهار مدل زمانبندی پروژه تحت عدم قطعیت زمان فعالیت (با تابع توزیع احتمالی) ارائه نمودند [۷].

وانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۴) مسئله زمانبندی پروژه تحت محدودیت منابع و مدت زمان فعالیت فازی و فرجه فازی را مورد مطالعه قرار دادند. هدف آن‌ها از این مطالعه، یافتن یک برنامه‌ریزی بود که با توجه به فازی بودن مدت زمان انجام فعالیت‌ها و فرجه فازی، پایداری برنامه‌ریزی را بیشینه کند و یک الگوریتم ژنتیک کارا با استفاده از نمایش لیست فعالیت‌ها را برای حل مسئله ارائه کردند و سپس عملکرد الگوریتم ژنتیک مبتنی بر نمایش لیست فعالیت‌ها را با عملکرد ژنتیک عمومی مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که ژنتیک مبتنی بر نمایش لیست فعالیت‌ها دارای عملکرد بهتری می‌باشد [۲۶].

باسکار^۳ و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌ای روی مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع انجام دادند که در آن زمان فعالیت‌ها را به صورت فازی و بقیه پارامترهای مسئله را به صورت قطعی در نظر گرفتند و دو عامل درجه بحران هر فعالیت و عامل سنجش بهره‌مندی منابع را برای هر فعالیت تعریف کردند و سپس با استفاده از این دو عامل، یک عامل جدید بنام شاخص عملکرد زمانبندی تعریف کردند [۴].

ساوسار^۴ (۲۰۱۸) به تجزیه و تحلیل و زمانبندی عملیات تعمیر و نگهداری پرداخته است. در این پژوهش به تحلیل، مدل‌سازی و برنامه‌ریزی عملیات تعمیرات اساسی برای یک شرکت پمپ بنزین با ۴۰ ایستگاه پرداخته شده است. در این تحقیق، به منظور پایین نگه داشتن هزینه‌های عملیاتی در مقابل حفظ کیفیت، نگهداری و تعمیرات اساسی اغلب بر اساس زمانبندی انجام می‌شود. هزینه فعالیت‌های مربوط به نگهداری به عنوان ۴۰-۱۵ درصد از کل هزینه‌های عملیات برآورد شده است [۲۳].

لین^۵ و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیق خود از رویکرد فراابتکاری ژنتیک برای مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع استفاده کرده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از نظر کیفیت راه‌حل و توانایی هم‌گرایی، بهتر از الگوریتم‌های دیگر عمل می‌کند و جواب‌های بهتری ارائه می‌کند [۱۵].

اسدوجمان^۶ (۲۰۲۳) در رساله دکتری خود به موضوع برنامه‌ریزی و زمانبندی پروژه‌های یکپارچه زنجیره تأمین پرداخته است. برنامه‌ریزی و زمانبندی پروژه دو وظیفه اصلی هستند که مستقیماً بر سودآوری سازمان تأثیر می‌گذارند. این رساله شامل سه بخش می‌باشد: بخش اول به

1. Chanxio and Xingfang
2. Wang
3. Bhaskar
4. Savsar
5. Lin
6. Asadujjaman

دو الگوریتم فراابتکاری ترکیبی ژنتیک ایمنی^۱ (IGA) و ژنتیک ایمنی مبتنی بر چند عملگر^۲ برای مشکلات زمانبندی پروژه با محدودیت منابع پیشنهاد می‌شود که نتایج نشان می‌دهد دو الگوریتم پیشنهادی برای حل نمونه مسائل موثر هستند. بخش دوم یک مدل ریاضی و روش‌های حل برای مسائل زمان‌بندی تک پروژه‌ای یکپارچه با منابع محدود را توسعه می‌دهد. یک رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۳ مبتنی بر ارزش خالص فعلی^۴ برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی زنجیره تأمین یکپارچه پیشنهاد شده است که نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم IGA، NPV پروژه را بهتر به حداکثر می‌رساند. بخش پایانی یک مدل ریاضی و روش‌های حل برای مسائل زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع یکپارچه زنجیره تأمین را توسعه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جایگزینی^۵ در حل مسائل زمانبندی چند پروژه‌ای موثرتر است [۲].

اسلامی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به بهینه‌سازی مدل دو هدفه زنجیره‌تأمین سه‌سطحی در برنامه‌ریزی و زمانبندی تولید با در نظر گرفتن تقاضای وابسته به قیمت، پرداختند. هدف اصلی مدل به حداکثر رساندن سود است، در حالی که هدف ثانویه به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای است. آزمایش‌های عددی، کاربرد مدل توسعه‌یافته را نشان می‌دهد و یک مطالعه موردی برای محاسبه مقادیر بهینه تولید و تعیین بهترین قیمت در شرایط افزایش تقاضا ضمن دستیابی به سود، ارائه شده است. در نهایت با انجام تحلیل حساسیت، تصمیمات استراتژیک بهینه و بینش مدیریتی مفید شناسایی شده است. با توجه به نتایج و بررسی آزمایش‌ها، افزایش ظرفیت و میزان تولید به‌ویژه زمانی که پتانسیل بازار برای خرید محصولات بیشتر باشد، اهداف اصلی را برآورده می‌کند. همچنین در زمان رکود بازار، تنوع کیفیت و قیمت محصولات موجب سود بیشتر می‌شود [۱۰].

عطیه علی^۶ و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیق خود به نقش زنجیره تأمین دیجیتال در مدیریت موجودی پرداخته‌اند. این تحقیق در شرکت‌های مهندسی کشور اردن انجام شده است. این تحقیق با به کارگیری تکنیک‌های پیشرفته تحلیل رگرسیون، سه فرضیه را کار کردند و به طور جامع آنها را آزمایش کردند تا تأثیر سازگاری دیجیتال، پویایی و انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین را بر روی دید اطلاعات و اثربخشی مدیریت موجودی بیابند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای مدیریت مؤثر سطوح موجودی از طریق شفافیت اطلاعات در سراسر شبکه، شرکت‌ها باید سیستم‌هایی از زنجیره تأمین را ایجاد کنند که بتوانند با تغییرات سازگار شوند و انعطاف‌پذیری داشته باشند [۸].

ژانگ^۷ و همکاران (۲۰۲۴) به مساله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع با مدت زمان فعالیت تصادفی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی برنامه‌ریزی ژنتیکی یادگیری مشارکتی به کمک مدل‌های جایگزین^۸ عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک دارد، همچنین کارایی الگوریتم با الگوریتم ژنتیک مقایسه و تایید شد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی در محیط‌های مختلف غیرقطعی عملکرد بهتری دارد [۳۹].

در ادامه دسته‌بندی و خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته پیرامون موضوع تحقیق در جدول ۱ ارائه می‌گردد.

1. Immune Genetic Algorithm (IGA)
2. Multi-Operator-Based IGA (MO-IGA)
3. Mixed Integer Programming (MIP)
4. Net Present Value (NPV)
5. Surrogation Based GA (SGA)
6. Atieh Ali
7. Zhang
8. Surrogate-Assisted Cooperative Learning Genetic Programming (SCLGP)

جدول ۱. دسته‌بندی و خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته پیرامون موضوع

ردیف	سال	نویسندگان	جنبه مساله		رویکرد مساله		پارامتر		توابع هدف	رویکرد حل		
			زمانبندی پروژه	زمانبندی تامین پروژه	قطعی	غیرقطعی	فعالیت	مدت زمان		دقیق	اینکاری	فراینکاری
۱	۱۳۹۳	پرویزی و همکاران [۲۰]	✓	✓	✓				کمینه کردن هزینه			(SA و GA)
۲	۱۳۹۴	عطار و همکاران [۱۸]	✓	✓	✓				حداکثر کردن ارزش فعلی خالص	✓		
۳	۱۳۹۴	بیانی مجد و همکاران [۶]	✓	✓	✓				بیشینه کردن سود و کمینه کردن میزان انتشار گاز کربن دی اکسید	✓		
۴	۱۳۹۷	قلی‌زاده و افشارنجفی [۱۲]	✓	✓	✓				افزایش NPV	✓		NSGA-II
۵	۱۴۰۰	موسوی و همکاران [۱۶]	✓	✓	✓				کمینه کردن هزینه			GA
۶	۱۴۰۰	ایمان‌نژاد و آوحدارستانی [۱۳]	✓	✓	✓				کمینه کردن زمان			TS+BA+GA
۷	۱۴۰۱	دانشگری و همکاران [۸]	✓	✓	✓		✓	✓	کمینه کردن متغیرهای کمکی	✓		PSO+ SA+GA
۸	۲۰۱۱	برنی و همکاران [۳]	✓	✓	✓		✓	✓	-	✓	✓	-
۹	۲۰۱۲	لی و وومر [۱۴]	✓	✓	✓				کمینه کردن هزینه			الگوریتم بندرز
۱۰	۲۰۱۲	چانگسیو و ژینگ‌فنگ [۷]	✓	✓	✓		✓	✓	کمینه کردن هزینه			-
۱۱	۲۰۱۳	اولریچ [۲۵]	✓	✓	✓				کمینه کردن زمان			GA
۱۲	۲۰۱۳	الیمم و دودین [۹]	✓	✓	✓				کمینه کردن هزینه	✓		-
۱۳	۲۰۱۴	فو [۱۱]	✓	✓	✓				کمینه کردن هزینه			همبند HS و GA
۱۴	۲۰۱۴	وانگ و همکاران [۲۶]	✓	✓	✓				حداکثر کردن پایداری			GA
۱۵	۲۰۱۵	باسکار و همکاران [۴]	✓	✓	✓				-			-
۱۶	۲۰۱۸	ساوسار [۲۳]	✓	✓	✓				کاهش هزینه			-
۱۷	۲۰۲۰	لین و همکاران [۱۵]	✓	✓	✓				کمینه کردن زمان			GA
۱۸	۲۰۲۳	اسدوجمان [۲]	✓	✓	✓				حداکثر کردن سود			MO-IGA و IGA و SGA
۱۹	۲۰۲۴	ژانگ و همکاران [۲۹]	✓	✓	✓		✓	✓	کمینه کردن زمان			SCLGP
۲۰	۲۰۲۴	اسلامی و همکاران [۱۰]	✓	✓	✓				حداکثر کردن سود			-
۲۱	۲۰۲۴	عطیه‌علی و همکاران [۱]	✓	✓	✓				-			-
۲۲	۱۴۰۲	تحقیق جاری	✓	✓	✓		✓	✓	کمینه کردن هزینه	✓	✓	الکترومغناطیس

مرور تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که فقط سه تحقیق پرویزی و همکاران (۲۰۱۵) [۲۰]، اسلامی و همکاران (۲۰۲۴) [۱۰] و اسدوجمان (۲۰۲۳) [۲] به هر دو جنبه مساله (زمانبندی پروژه و زنجیره‌تأمین پروژه) پرداخته‌اند و تحقیقات دیگر فقط یکی از جنبه‌های مساله را در نظر گرفته‌اند. همچنین بیشتر تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که رویکرد مساله آنان قطعی می‌باشد و فقط چهار تحقیق دانشگری و همکاران (۲۰۲۲) [۸]، برنی و همکاران (۲۰۱۱) [۳]، چانگسیو و ژینگ‌فنگ (۲۰۱۲) [۷] و ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) [۲۹] رویکرد مساله آنان غیرقطعی است. در تحقیق جاری علاوه بر اینکه به هر دو جنبه مساله پرداخته می‌شود، فعالیت و مدت زمان پروژه نیز غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود که می‌توان به عنوان یکی از نوآوری‌های این تحقیق به آن اشاره کرد.

در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن یک زنجیره‌تأمین پروژه دوسطحی شامل پیمانکار و تأمین‌کنندگان، هزینه‌های مربوط به پروژه و موجودی برای هر دو عضو زنجیره کمینه‌سازی خواهد شد. با این فرض که زمان اجرای فعالیت‌ها غیرقطعی و خود فعالیت نیز دارای عدم قطعیت بوده و حالت GERT دارد. همچنین پروژه دکل حفاری سینا ۱ نیز به عنوان موضوع مورد مطالعه انتخاب شد و در ادامه الگوریتم الکترومغناطیس برای زمانبندی فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره‌تأمین پروژه پیاده‌سازی می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

توسعه مدل ریاضی

برای مسئله بیان شده در این پژوهش، مدل ریاضی در نظر گرفته شد که این مدل از مدل زنجیره‌تأمین پروژه پرویزی و همکاران (۲۰۱۵) [۲۰] استفاده شده است. با این تفاوت که به دلیل دوباره‌کاری‌ها، شبکه زمانبندی گرت است و همچنین زمان اجرای فعالیت‌ها فازی است و نیز زمان خروجی زمانبندی فعالیت‌ها با رویکردی فازی به نمایش گذاشته می‌شود. مدل‌سازی این مساله مبتنی بر فرض‌هایی شامل موارد زیر است:

(۱) پروژه به پیمانکار واگذار شده است.

(۲) برای اتمام فعالیت‌های پروژه هم منابع کاری و هم منابع مصرفی نیاز است.

(۳) منابع مصرفی پروژه را تعدادی تأمین‌کننده با سقف تولید مشخص در روز می‌توانند تأمین کنند.

(۴) پیمانکار برای هر روز دیرتر یا زودتر تحویل دادن پروژه، با جریمه یا تشویق از سوی کارفرما همراه خواهد شد.

(۵) انجام پروژه هزینه‌هایی را برای پیمانکار در پی دارد، این هزینه شامل سفارش‌دهی مواد و قطعات، هزینه‌های خرید مواد و قطعات، هزینه به‌کارگیری منابع برای انجام فعالیت‌ها می‌باشد.

(۶) پرداخت‌های کارفرما به صورت مستمر می‌باشد. در روش پرداخت‌های کارفرما به صورت مستمر، بدون توجه به مهلت تحویل پروژه در قرارداد، در بازه‌های مشخص و مساوی، وضعیت پروژه بررسی شده و با توجه میزان پیشرفت پروژه و فعالیت‌های صورت گرفته در هر بازه، کارفرما مبلغی مرتبط با آن را به پیمانکار پرداخت می‌نماید.

(۷) طول دوره فعالیت‌ها غیرقطعی است.

متغیرها و پارامترهای مورد استفاده در مدل، در زیر خلاصه می‌شوند:

الف) مجموعه‌ها و شمارنده‌ها

منابع: $k = 1, 2, \dots, K$ و

مواد مصرفی: $m = 1, 2, \dots, M$ و

فعالیت‌ها: $n = 1, 2, \dots, N$ و

سایر مشتریان: $i = 1, 2, \dots, I$

زمان پیمانکار: $t, tt = 1, 2, \dots, GCHorizon$

زمان تأمین‌کننده: $st, stt = 1, 2, \dots, SupHorizon$

ب) پارامترها و متغیرهای مرتبط با پروژه

Z_j : پارامتر مربوط به زمان فازی فعالیت j .

$PredList$: ماتریس صفر و یک پیش‌نیازی بوده و درایه‌های این پارامتر بدین صورت تعریف می‌گردند.

$$PredList_{j,jz} = \begin{cases} 1 & \text{اگر } j \text{ پیشنیاز } jz \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$ResUse_{j,k}$: پارامتر میزان نیاز فعالیت j به منبع کاری k در هر واحد زمانی.

$ResMax_k$: پارامتر حداکثر سطح موجود از منبع کاری k در واحد زمان.

$ResCost_k$: پارامتر هزینه بکارگیری هر واحد از منبع کاری k در واحد زمان.

$MatUse_{j,m}$: پارامتر میزان مصرف ماده m توسط j در هر واحد زمانی.

$MatCost_m$: پارامتر قیمت هر واحد از ماده m .

h : پارامتر مربوط به درصد هزینه نگهداری سالانه موجودی نزد پیمانکار.

hm_m : پارامتر مربوط به هزینه یک واحد زمانی نگهداری هر واحد از ماده m نزد پیمانکار.

Gm : پارامتر هزینه هر بار سفارش دهی پیمانکار.

\overline{Early} : پارامتر مربوط به زودترین زمان فازی ممکن برای پایان فعالیت j است که این میزان با فرض شروع پروژه در زمان $t=1$ و بدون در نظر گرفتن محدودیت منابع با استفاده از محاسبات رو به جلو بدست می‌آید.

\overline{Late} : پارامتر مربوط به دیرترین زمان فازی ممکن برای پایان فعالیت j است که این میزان با فرض اتمام پروژه در زمان $t=Horizon$ یعنی افق زمانی و بدون در نظر گرفتن محدودیت منابع با استفاده از محاسبات رو به عقب بدست می‌آید.

w_j : پارامتر بیانگر ارزش فعالیت j پس از اتمام آن فعالیت که می‌توان آن را برابر هزینه تمام مواد و منابع کاری درگیر در آن فعالیت در نظر گرفت:

$$w_j = \left(\sum_{k=1}^K ResUse_{j,k} \times ResCost_k + \sum_{m=1}^M MatUse_{j,m} \times MatCost_m \right) \times Z_j \quad \text{رابطه (۲)}$$

s : پارامتر درصد هزینه نگهداری سالیانه فعالیت‌های تمام شده است.

$Deadline$: پارامتر مربوط به زمان مقرر تحویل پروژه بدین معنی که پروژه می‌بایست در ابتدای دوره زمانی $Deadline$ ام آماده شود.

$Penalty$: پارامتر مربوط به میزان جریمه در صورت هر واحد زمانی تأخیر در تحویل پروژه.

$Reward$: پارامتر مربوط به میزان پاداش به ازای هر واحد زمانی تسریع در تحویل پروژه.

$X_{j,t}$: متغیر تصمیم‌باینری بیانگر اتمام فعالیت j در پایان دوره t است:

$$X_{j,t} = \begin{cases} 1 & \text{اگر فعالیت } j \text{ در انتهای دوره } t \text{ پایان یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$\lambda_{m,t}$: متغیر تصمیم‌باینری و بیانگر سفارش دادن ماده m در ابتدای دوره t توسط پیمانکار است:

$$\lambda_{m,t} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ماده } m \text{ در ابتدای دوره } t \text{ سفارش داده شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$q_{m,t}$: متغیر تصمیم عدد صحیح نامنفی و بیانگر میزان ماده m سفارش داده شده در ابتدای دوره t .

$I_{m,t}$: متغیر عدد صحیح نامنفی و بیانگر سطح موجودی ماده m در انتهای دوره t نزد پیمانکار.

WW_t : متغیر نامنفی و بیانگر ارزش پروژه در انتهای دوره t .

ج) پارامترها و متغیرهای مربوط به تأمین‌کنندگان

Cap_m : پارامتر مربوط به ظرفیت تأمین‌کننده m در هر واحد زمانی.

$Oq_{i,m}$: پارامتر بیانگر میزان سفارش i امین مشتری از سایر مشتریان تأمین‌کننده m .

$ODeadline_{i,m}$: پارامتر بیانگر موعد تحویل مقرر سفارش مشتری i ام. بدین معنی که سفارش مشتری i ام تأمین‌کننده m می‌بایست در ابتدای دوره $ODeadline_{i,m}$ ام آماده باشد.

$OPenalty_{i,m}$: پارامتر بیانگر جریمه ناشی از هر واحد زمانی تأخیر در تحویل هر واحد از سفارش مشتری i ام تأمین‌کننده m .

$GCPenalty_m$: پارامتر جریمه ناشی از هر واحد زمانی تأخیر در تحویل هر واحد از سفارش پیمانکار.

hsm_m : پارامتر بیانگر هزینه هر واحد زمانی نگهداری یک واحد موجودی کالای m نزد تأمین‌کننده m .

$TransCost_m$: هزینه حمل و نقل تأمین‌کننده m است که فرض می‌شود اگر تأمین‌کننده سفارشات را به‌موقع آماده نماید، هزینه حمل بر عهده‌ی خریدار است، اما در صورت وجود تأخیر، حمل بر عهده‌ی تأمین‌کننده خواهد بود.

$Alloc_{m,t,st}$: متغیر تصمیم عدد صحیح نامنفی و بیانگر میزان اختصاص یافته از ظرفیت تأمین‌کننده m در زمان st به سفارش مورد نیاز در زمان t . این مقدار در انتهای دوره st ام آماده ارسال می‌شود.

$OAlloc_{m,i,st}$: متغیر تصمیم عدد صحیح نامنفی و بیانگر میزان اختصاص یافته از ظرفیت تامین‌کننده m در زمان st به سفارش مشتری نام. این مقدار در انتهای دوره st آماده می‌شود.

(د) پارامترها و متغیرهای مالی

$PrePayment$: پارامتر مربوط به میزان پیش‌پرداختی که قبل از شروع پروژه، کارفرما به پیمانکار پرداخت می‌نماید.

اگر پرداخت در حالت PP باشد، پیمانکار و کارفرما در طی مذاکراتی دوره زمانی (پارامتر Step) را مشخص می‌نمایند و بدون توجه به زمان مقرر تحویل پروژه، در طول اجرای پروژه در بعد از گذشت این دوره زمانی، وضعیت پروژه را بررسی و با توجه به پیشرفت پروژه در آن دوره، پرداخت‌هایی صورت می‌پذیرد. این روند تا پایان پروژه ادامه می‌یابد که بعد از اتمام پروژه بدون در نظر گرفتن Step، وضعیت پروژه را بررسی و آخرین پرداخت را انجام می‌دهند.

$$Set f = \{t \in GCTime | t = n \times Step; n = 1, 2, \dots\}$$

CF_j : پارامتر بیانگر میزان پرداخت به ازای اتمام فعالیت j است که این پارامتر در حالت PP کاربرد دارد.

O_f : متغیر صحیح نامنفی میزان پرداختی در انتهای دوره زمانی f از مجموعه زمان‌های پرداخت است که این متغیر بدین ترتیب محاسبه می‌شود:

در حالت PP، O_f برابر است با مجموع جریان مالی مثبت مرتبط با فعالیت‌هایی که از زمان پرداخت قبلی تا این دوره پرداخت، به اتمام می‌رسند. این متغیر این‌گونه محاسبه می‌شود:

$$O_f = \sum_{t=(f-1)}^f \sum_{j=1}^N X_{j,t} \times CF_j \quad \text{رابطه (۵)}$$

WF : پارامتر مربوط به حداکثر وامی است که پیمانکار می‌تواند دریافت نماید.

$Rate$: هزینه‌ای که هر واحد وام گرفتن به پیمانکار تحمیل می‌کند.

U_t : متغیر تصمیم عدد صحیح نامنفی و بیانگر میزان وام دریافتی در ابتدای دوره t .

B_t : متغیر عدد صحیح نامنفی بیانگر نقدینگی پیمانکار در انتهای زمان t است.

(و) متغیرهای مربوط به تابع هدف

$pANDr$: هزینه پیمانکار ناشی از جریمه تأخیر در اتمام به موقع پروژه و یا تسریع در انجام آن که بدین ترتیب محاسبه می‌گردد:

$$pANDr = Penalty \times \left(\sum_{t=Deadline}^{GCHorizon} X_{N,t} \times (t - Deadline + 1) \right) - Reward \times \left(\sum_{t=1}^{Deadline-2} X_{N,t} \right) \times (Deadline - t - 1) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$CompActHolding$: هزینه نگهداری فعالیت‌های تمام شده و به عبارتی هزینه نگهداری ارزش قسمت‌های انجام شده پروژه برای پیمانکار. داریم:

$$CompActHolding = \sum_t^{GCHorizon-1} s \times WW_t \quad \text{رابطه (۷)}$$

$OrderingCost$: هزینه سفارش‌دهی پیمانکار داریم:

$$OrderingCost = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{GCHorizon-L_m} \lambda_{m,t} \times G_m \quad \text{رابطه (۸)}$$

$GC_HoldingCost$: هزینه نگهداری موجودی پیمانکار، داریم:

$$GC_{\text{HoldingCost}} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{GCHorizon-1} hm_m \times I_{m,t} \quad \text{رابطه (۹)}$$

FinCost: هزینه پیمانکار ناشی از وام‌های دریافتی، داریم:

$$FinCost = \sum_{t=1}^{GChorizon} Rate \times U_t \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

Sup_HoldingCost: هزینه نگهداری موجودی تأمین‌کننده. هزینه نگهداری موجودی تأمین‌کننده در صورتی ایجاد می‌گردد که برای سفارشی که در روز مشخص مورد نیاز است، زودتر موجودی تولید و نگهداری شود، داریم:

$$Sup_IHoldingCost = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{st=1}^{ODeadline_{i,m}-L_m-1} (OAlloc_{m,i,st} \times hsm_m \times (ODeadline_{i,m} - st - 1)) + \sum_{m=1}^M \sum_{stt=1}^{GCHorizon-L_m} \left(\lambda_{stt,m} \times \sum_{st=1}^{stt-L_m-1} [Alloc_{m,stt,st} \times hsm_m \times (stt - st - 1)] \right) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

Sup_DelayCost: هزینه پیمانکار ناشی از جریمه تأخیر در برآورده‌سازی بموقع سفارشات است. این هزینه زمانی ایجاد می‌شود که برای سفارشی که در روز مشخصی مورد نیاز است، در زمان دیرتری تولید صورت بپذیرد. لذا داریم:

$$Sup_DelayCost = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{st=Odeadline_{i,m}-L_m}^{SupHorizon-L_m} (OAlloc_{m,i,st} \times OPenalty_{i,m} \times (st + L_m - ODeadLine_{i,m} + 1) + TransCost_m) + \sum_{m=1}^M \sum_{tt=1}^{GCHorizon-L_m} (\lambda_{m,tt} \times \sum_{st=tt-L_m}^{SupHorizon-L_m} (Alloc_{m,tt,st} \times GCpenalty \times (st + L_m - tt + 1) + TransCost_m)) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در رابطه بالا، جمله اول مربوط به تأخیر/تعمیل در سفارشات سایر مشتریان و جمله دوم مربوط به تأخیر در سفارشات پیمانکار است.

مدل ریاضی پیشنهادی

تابع هدف

$$Min TC = pANDr + CompActHolding + OrderingCost + GC_IHoldingCost + FinCost + Sup_IHoldingCost + Sup_DelayCost$$

رابطه (۱۳)

محدودیت‌ها

S.T:

$$\sum_{t=Earl_j}^{\overline{Late}_j} t \times X_{j,t} + \overline{Z}_{jj} - \sum_{t=Earl_{jj}}^{\overline{Late}_{jj}} t \times X_{jj,t} \leq 0 \quad \forall (j, jj) | PredList_{j,jj} = 1 \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\overline{Z}_{Act1} - \sum_{t=Earl_{Act1}}^{\overline{Late}_{Act1}} t \times X_{Act1,t} \leq 0 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_{t=Earl_j}^{\overline{Late}_j} X_{j,t} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{tt \geq t}^{tt < t + Z_j} ResUse_{j,k} \times X_{j,tt} \leq ResMax_k \quad \forall t, k \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$WW_t \geq WW_{t-1} + \sum_{j=1}^J w_j \times X_{j,t} \quad t = 1, 2, \dots, Horizon \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$WW_t \geq WW_{t-1} + \sum_{j=1}^J w_j \times X_{j,t} - \sum_{j=1}^J \left(w_j \times \sum_{tt=Earl_j}^t X_{j,tt} \right) \quad t = Earl_j + 1, \dots, GCHorizon \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$I_t \geq I_{t-1} + \sum_{stt=1}^{L_m-1} \lambda_{m,t} \times Alloc_{m,t,stt} + \sum_{tt=1}^{t-1} \lambda_{m,tt} \times Alloc_{m,tt,t-L_m-1} - \sum_{j=1}^J \left(Muse_{j,m} \times \sum_{tt \geq t}^{tt \leq t + Z_j - 1} X_{j,tt} \right) \quad \forall t, m \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$Big \times \lambda_{m,t} - q_{m,t} \geq 0 \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$B_t = B_{t-1} + O_t + U_t - \sum_{m=1}^M \lambda_{m,t} * Gm - \sum_{m=1}^M MatCost(m) \times q(m, t) - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \left(ResCost(k) \times ResUse(j, k) \times \sum_{tt \geq t}^{tt \leq t + Z_j - 1} X_{j,tt} \right) \quad \forall t \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$B_{t=1} = Prepayment + O_{t=1} + U_{t=1} - \sum_{m=1}^M \lambda_{m,t=1} * Gm - \sum_{m=1}^M MatCost(m) \times q(m, t=1) - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \left(ResCost(k) \times ResUse(j, k) \times \sum_{tt \geq t=1}^{tt \leq t=1 + Z_j - 1} X_{j,tt} \right) \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\sum_{t=1}^{GCHorizon} U_t \leq WF \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\sum_{st=1}^{SupHorizon} OAlloc_{m,i,st} = Oq_{i,m} \quad \forall i, m \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\sum_{st=1}^{SupHorizon} Alloc_{m,t,st} = q_{m,t} \quad \forall t, m \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$\sum_{tt=1}^{GCHorizon} Alloc_{m,tt,st} + \sum_{i=1}^I OAlloc_{m,i,st} = Cap_m \quad \forall st, m \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\lambda_{m,t}, X_{j,t} = \{0,1\} \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

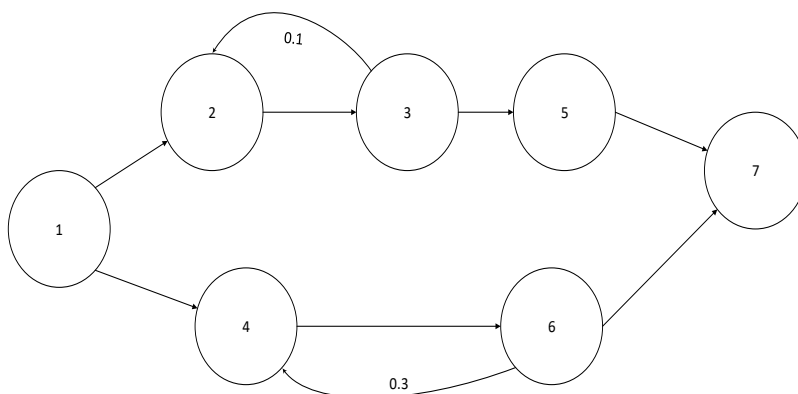
$$OAlloc_{m,i,st}, Alloc_{m,tt,st}, q_{m,t}, U_t = \{0,1,2, \dots\} \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

رابطه (۱۳) بیانگر تابع هدف بوده و اجزای آن به ترتیب عبارت‌اند از هزینه تأخیر در تحویل پروژه، هزینه نگهداری فعالیت‌های تمام‌شده، هزینه سفارش‌دهی، هزینه نگهداری موجودی و هزینه تأمین مالی برای پیمانکار و هزینه نگهداری موجودی و تأخیر در سفارشات برای تأمین‌کننده که مقادیر آن‌ها در روابط (۶) تا (۱۲) محاسبه می‌شود. محدودیت (۱۴) بیانگر محدودیت روابط پیش‌نیازی است. برای فعالیت‌های بدون پیش‌نیاز که با توجه به مفروضات، تنها فعالیت بدون پیش‌نیاز فعالیت اول است، محدودیت (۱۵) طرح شده است. محدودیت رابطه (۱۶) تضمین‌کننده این است که هر فعالیت یک بار و فقط یک بار به اتمام رسد. محدودیت (۱۷) بیانگر رعایت محدودیت منابع کاری است. برای محاسبه ارزش پروژه در هر دوره زمانی محدودیت (۱۸) و برای جلوگیری از محاسبه چند باره ارزش پروژه بعد از اتمام پروژه، رابطه (۱۹) تعریف شده است. محدودیت (۲۰) بیانگر محدودیت مربوط به تعادل موجودی نزد پیمانکار است. محدودیت تعادل موجودی نزد پیمانکار بدین صورت تعریف می‌شود که موجودی دوره t برابر است با موجودی دوره قبل بعلاوه آنچه در این دوره به دست پیمانکار می‌رسد، منهای میزان مصرف روزانه‌ی فعالیت‌هایی که در این دوره جریان دارند. آنچه به دست پیمانکار می‌رسد برابر است با میزان تولید تأمین‌کننده اختصاص یافته به سفارش برای همین دوره و میزان تولید تأمین‌کننده اختصاص یافته به سفارشات برای دوره‌های قبل از این دوره که برای دوره مورد نظر آماده نشده‌اند و با تأخیر در این دوره به دست پیمانکار می‌رسند. محدودیت (۲۱) بیانگر این مطلب است که $q_{m,t}$ زمانی می‌تواند مقدار بزرگ‌تر از صفر بگیرد که $\lambda_{m,t}$ برابر یک باشد، به عبارت دیگر $q_{m,t}$ زمانی مقدار می‌گیرد که در زمان t سفارشی داده شود. محدودیت (۲۲) بیانگر محدودیت‌های مالی پیمانکار است، بدین ترتیب که نقدینگی پیمانکار در انتهای دوره t برابر است با نقدینگی در دوره قبل بعلاوه میزان دریافتی از کارفرما و وام منهای خرید و سفارش مواد و هزینه منابع کاری فعالیت‌های جاری در دوره t . برای اولین دوره با توجه به پیش پرداختی که کارفرما به پیمانکار می‌دهد محدودیت بودجه به صورت (۲۳) بازنویسی می‌شود. محدودیت (۲۴) محدودیت میزان وام دریافتی پیمانکار را در طی دوره اجرای پروژه بیان می‌کند. برای اطمینان از اینکه تأمین‌کننده سفارشات سایر مشتریان خود را تأمین نماید، محدودیت (۲۵) ایجاد گردیده است. همین امر برای سفارشات پیمانکار در قالب محدودیت (۲۶) بیان شده است. میزان تولید اختصاص یافته به سفارشات پیمانکار و سایر مشتریان تأمین‌کننده نباید از ظرفیت تأمین‌کننده تجاوز نماید. این موضوع به وسیله محدودیت (۲۷) تضمین شده است.

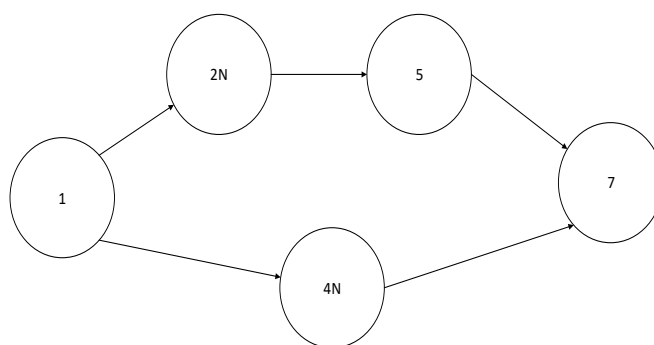
۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

حل مسئله در ابعاد کوچک

برای آزمون صحت و درستی مدل پیشنهادی، یک مسئله با ابعاد کوچک طراحی شده است که توسط نرم‌افزار ایمز تحلیل می‌گردد. شکل ۱ شبکه مسئله نمونه و شکل ۲ شبکه مسئله نمونه پس از حذف دوباره کاری‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شبکه پروژه مسئله نمونه



شکل ۲. شبکه پروژه مسئله نمونه پس از حذف دوباره کاری

در جدول ۲ تا ۴ اطلاعات کلی مسئله، اطلاعات فعالیت‌ها و میزان استفاده از منابع کاری در هر واحد زمانی منطبق بر دو حالت زمانی فازی و قطعی و اطلاعات سایر مشتریان تامین کنندگان بیان شده است.

جدول ۲. اطلاعات فعالیت‌ها و منابع مسئله

میزان نیاز به ماده اولیه در واحد زمانی	میزان استفاده از منابع کاری در هر واحد زمانی			زمان		Σ _t Σ _s
	منبع کاری ۳	منبع کاری ۲	منبع کاری ۱	قطعی	فازی	
۷۰	۶	۴	۳	۳	(۱۲ و ۳ و ۴)	۱
۱۰۰	۲	۵	۲	۸	(۷ و ۹ و ۱۲)	۲.N
۵۰	۰	۶	۰	۹	(۹ و ۱۱ و ۱۴)	۴.N
۹۰	۰	۴	۵	۴	(۳ و ۴ و ۵)	۵
۸۰	۸	۵	۳	۳	(۳ و ۴ و ۵)	۷
۲۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	هزینه هر واحد		

جدول ۳. اطلاعات کلی مسئله

حداکثر میزان در دسترس منابع کاری در واحد زمانی	rate	GM	h	S	پاداش تسریع	جریمه تاخیر	زمان تحویل	افق زمانی تأمین کننده	افق زمانی پیمانکار
۱۱	۲	۱۵۰۰۰	۱	۱	۱۵۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۲۸	۳۰	۳۰

جدول ۴. اطلاعات مربوط به سایر مشتریان تأمین‌کننده

مشتری	۱	۲	۳
میزان سفارش	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
موعد تحویل	۳۰	۳۰	۳۰

در مسئله بالا نیز کارفرما ۴۰۱۷۰ واحد پولی را به‌عنوان پیش‌پرداخت به پیمانکار می‌دهد. در ادامه نتایج حل مسئله نمونه، زمانبندی تولید تأمین‌کننده برای سفارشات سایر مشتریان و سفارشات پیمانکار به دو صورت روش یکپارچه و حالت PP آورده شده است که در جدول ۵ تا ۷ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۵. نتایج حل مسئله نمونه

برنامه‌ریزی سفارشات										زمان شروع فعالیت‌ها					
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	زمان سفارش	۷	۵	۴.N	۲.N	۱	کد فعالیت
۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۰	۷۰	۷۰	زمان سفارش	۱۹	۱۵	۱۰	۷	۴	کد فعالیت
۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	زمان سفارش	۱۹	۱۵	۱۰	۷	۴	کد فعالیت
۸۰	۸۰	۸۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۵۰	زمان سفارش	۱۹	۱۵	۱۰	۷	۴	کد فعالیت

جدول ۶. زمان‌بندی تولید تأمین‌کننده برای سفارشات سایر مشتریان در روش یکپارچه و حالت PP

زمان شروع مشتری	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷
مشتری ۱	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰							
مشتری ۲	۵۰	۱۵۰								
مشتری ۳			۱۵۰	۱۵۰						

جدول ۷. زمان‌بندی تولید تأمین‌کننده برای سفارشات پیمانکار در روش یکپارچه و حالت PP

St	t	q	St	t	q	St	t	q	St	t	q
۰.۱	۰.۴	۷۰	۰.۶	۰.۹	۱۰۰	۱۱	۱۴	۱۵۰	۱۶	۱۹	۸۰
۰.۲	۰.۵	۷۰	۰.۷	۱.۰	۱۵۰	۱۲	۱۵	۱۴۰	۱۶	۲۰	۱۰
۰.۳	۰.۶	۷۰	۰.۸	۱.۱	۱۵۰	۱۳	۱۶	۱۴۰	۱۷	۲۰	۷۰
۰.۴	۰.۷	۱۰۰	۰.۹	۱.۲	۱۵۰	۱۴	۱۷	۱۴۰	۱۷	۲۱	۸۰
۰.۵	۰.۸	۱۰۰	۱.۰	۱.۳	۱۵۰	۱۵	۱۸	۱۴۰			

پس از حل مسئله نمونه با نرم‌افزار ایمز، مقدار هزینه نهایی (مقدار تابع هدف) برابر با ۸۲۶۴۸۸۰- می‌باشد. منفی بودن مقادیر هزینه به این معناست که با توجه به زمان‌بندی فعالیت‌ها و سفارش مواد و نیز نوع پرداخت PP، پاداشی که پیمانکار به خاطر تحویل زودتر از موعد پروژه دریافت می‌نماید از سایر هزینه بیشتر می‌شود.

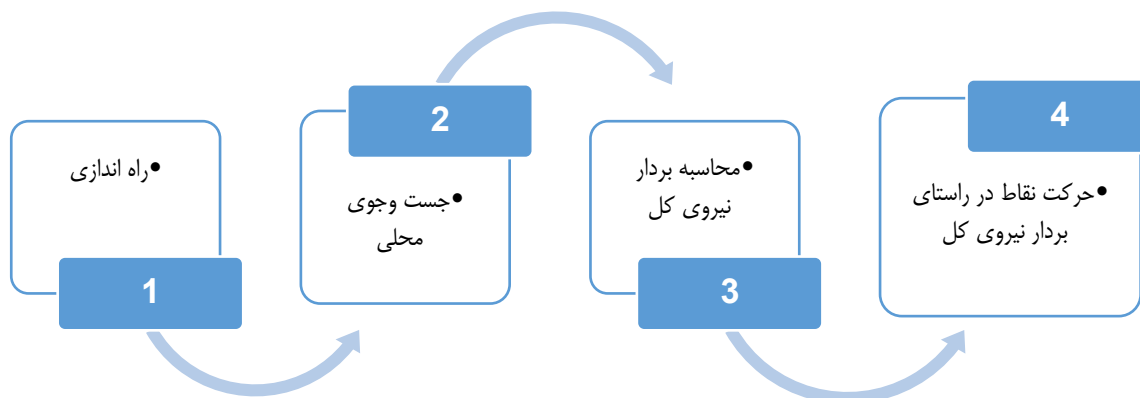
روش حل مسئله در ابعاد بزرگ

از آنجایی که مدل پایه مسئله زمانبندی پروژه با منابع محدود^۱ از دسته مسائل NP-Hard بوده و مدل ارائه شده در این تحقیق گسترشی از مدل پایه است، لذا نتیجه گرفته می‌شود که این مدل نیز جزء مسائل NP-Hard محسوب می‌شود. حل این گونه مسائل در ابعاد بزرگ، از طریق برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزارهای موجود امکان‌پذیر نبوده و یا به مدت زمان و حافظه بالایی نیاز دارند. به همین دلیل برای حل این مدل، از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شود.

ساختار پیشنهادی روش بهینه‌سازی الگوریتم الکترومغناطیس. این روش نخستین بار توسط بیربیل و فنگ^۲ (۲۰۰۳) پیشنهاد شده است [۵]، این الگوریتم همانند الگوریتم ژنتیک، مبتنی بر جمعیت است. در این روش، هر نقطه به‌عنوان یک ذره‌ی باردار در فضا تعریف می‌شود و مقدار بار آن بر اساس مقدار تابع هدف مربوط به آن تعیین می‌گردد. پس از مشخص شدن بار هر نقطه در جمعیت، برآیند نیروی وارد بر نقاط تعیین می‌شود تا حرکت آن‌ها در هر تکرار تنظیم شود. مشابه نیروهای الکترومغناطیسی، برآیند نیروهای وارد بر هر نقطه از جمع برداری تمام نیروهای وارد بر آن به دست می‌آید. این الگوریتم الکترومغناطیس برای حل مسائلی طراحی شده است که شامل متغیرهای حقیقی و دارای محدودیت می‌باشند. شکل کلی این گونه مسائل در زیر آورده شده است.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ x \in S \\ S = \{x \in R^n - \infty < l_k \leq x_k \leq u_k < \infty, k = 1, \dots, n\} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

که در آن n بعد مسئله، u_k حد بالا l_k حد پایین بعد k ام بوده است و $f(x)$ تابعی است که باید حداقل شود. مراحل اصلی الگوریتم الکترومغناطیس. این الگوریتم از چهار مرحله اصلی تشکیل شده است: مرحله راه‌اندازی، جستجوی محلی، محاسبه بردار نیروی کل و حرکت مطابق با جهت بردار نیرو. در ادامه، هر یک از این مراحل به‌طور جامع بررسی خواهند شد [۲۷]. این مراحل در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳. مراحل اصلی الگوریتم الکترومغناطیس

الف) راه‌اندازی. در مرحله آغازین الگوریتم الکترومغناطیس، همانند دیگر روش‌های مبتنی بر جمعیت، ابتدا m نقطه به‌صورت تصادفی از فضای شدنی مسئله انتخاب می‌شود. برای تولید هر نقطه تصادفی فرض می‌گردد که هر مؤلفه نقطه، متغیری تصادفی با توزیع یکنواخت بین حداقل و حداکثر مقدار خود است. سپس برای هر مؤلفه، یک مقدار تصادفی انتخاب می‌شود. پس از تشکیل این مجموعه، مقدار تابع هدف برای هر یک از نقاط محاسبه شده و بهترین نقطه به‌عنوان x^{best} معرفی می‌گردد.

1. Resource Constraint Project Scheduling Problem
2. Birbil.S & Fang. S

ب) جستجوی محلی. این بخش با هدف بررسی فضای پیرامون هر یک از نقاط تشکیل شده انجام می‌شود. در این زمینه، بیربیل و فنگ (۲۰۰۳) یک الگوریتم ساده برای جستجوی محلی ارائه کردند. طبق روش آن‌ها، برای هر بُعد از نقاط ایجادشده، یک گام تصادفی برای افزایش یا کاهش مقدار آن بُعد برداشته می‌شود. جهت این گام به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. اگر پس از اجرای این مرحله، نقطه جدید تولیدشده بهتر از نقطه قبلی باشد (بر اساس مقدار تابع هدف)، جایگزینی انجام گرفته و جستجو برای بُعد بعدی ادامه می‌یابد. در غیر این صورت، نقطه اولیه حفظ شده و جستجو برای همان بُعد تکرار خواهد شد.

ج) محاسبه بردار نیروی کل. بر اساس اصول نظریه الکترومغناطیس، نیرویی که میان دو ذره باردار اعمال می‌شود، رابطه معکوسی با مجذور فاصله بین آن‌ها داشته و مستقیماً متناسب با بار هر یک از ذرات است. در این الگوریتم، بار نقاط در هر دور بر اساس یک رابطه مشخص محاسبه می‌گردد.

$$q^i = \exp\left(-n \frac{f(x^i) - f(x^{best})}{\sum_{k=1}^m (f(x^k) - f(x^{best}))}\right), i = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

که در آن q^i میزان بار نقطه i ام، n تعداد ابعاد مسئله، $f(x^i)$ مقدار تابع هدف نقطه i ام و $f(x^{best})$ بهترین مقدار تابع هدف در تکرار مربوطه است. بار هر نقطه مشخص‌کننده میزان جذب یا دفع آن نقطه است. نقاطی که مقدار بهتری در تابع هدف دارند، بار بیشتری دریافت می‌کنند. بدین ترتیب، در هر تکرار، بیشترین بار به x^{best} اختصاص خواهد یافت. با توجه به فرمول ارائه‌شده، بار هر نقطه ممکن است در دو تکرار مختلف تغییر کند. نکته مهم این است که برخلاف بارهای الکتریکی، بار نقاط در این روش بدون علامت است و نیروی وارد بر هر جفت نقطه پس از مقایسه مقادیر تابع هدف آن‌ها مشخص می‌شود. در مقایسه بین دو نقطه، نقطه‌ای که تابع هدف بهتری دارد، نقطه دیگر را جذب می‌کند و نقطه‌ای با تابع هدف ضعیف‌تر، نقطه مقابل را دفع می‌کند. اگر مقادیر تابع هدف یکسان باشند، هیچ نیرویی میان نقاط اعمال نخواهد شد. بنابراین، در هر تکرار، نقطه‌ای با بهترین مقدار هدف سایر نقاط را جذب کرده و نقطه‌ای با بدترین مقدار هدف، دیگر نقاط را دفع می‌کند. میزان نیرویی که توسط نقطه j به نقطه i وارد می‌شود، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$F^{i,j} = \begin{cases} (x^j - x^i) \frac{q^i q^j}{\|x^i - x^j\|^2} & f(x^j) < f(x^i) \\ (x^i - x^j) \frac{q^i q^j}{\|x^i - x^j\|^2} & f(x^i) < f(x^j) \end{cases} \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, m \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

در نهایت، بردار نیروی کل وارد بر هر نقطه، از جمع برداری نیروهای وارد بر آن نقطه از طرف سایر نقاط، حاصل می‌شود.

$$F^i = \sum_{j \neq i}^m F^{i,j}, \quad i = 1, \dots, m \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

د) حرکت نقاط در راستای بردار نیروی کل. پس از مشخص کردن بردار نیروی کل برای تمامی نقاط، هر نقطه به میزان مشخصی که به صورت تصادفی تعیین می‌شود، در راستای نیروی واردشده حرکت می‌کند. مختصات جدید نقاط از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$x^i = x^i + \alpha(RNG) \frac{F^i}{\|F^i\|}, \quad i = 1, \dots, m \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

در رابطه فوق، با تقسیم بردار نیروی کل اعمال‌شده بر هر نقطه به اندازه آن، برداری به دست می‌آید که راستای حرکت آن نقطه را نشان می‌دهد و دارای مقداری برابر با یک است. اندازه تصادفی بردار حرکت نیز از ضرب α و RNG حاصل می‌شود. α متغیری تصادفی با تابع توزیع یکنواخت بین صفر و یک بوده و RNG نیز از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$RNG_k = \begin{cases} u_k - x_k^i & F_k^i > 0 \\ x_k^i - l_k & F_k^i < 0 \end{cases} \quad k = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

هر یک از مؤلفه‌های بردار RNG حداکثر حرکت مجاز به سمت u_k یا l_k را برای بعد مربوطه به منظور جلوگیری از تجاوز نقاط از حدود بالا و پایین تعیین می‌کنند. در صورتی که $F_k^i = 0$ باشد، حرکتی در بعد موردنظر نخواهم داشت. حاصل ضرب α و RNG برداری است تصادفی که حرکت نقطه با آن، شدنی بودن نقطه جدید را تضمین می‌کند. جایجایی نقاط در راستای نیرو به صورت تصادفی انتخاب می‌شود تا تمامی نقاط در این راستا فرصت بررسی داشته باشند. در هر مرحله، x^{best} تنها نقطه‌ای است که بدون جایجایی مستقیماً به مرحله بعد منتقل می‌شود. از این رو، می‌توان از محاسبه نیروهای وارد بر این نقطه صرف نظر کرد.

نحوه نمایش جواب. اولین گام در به کارگیری و پیاده‌سازی هر الگوریتم فرآینکاری، نمایش جواب‌های مسئله است. در هر الگوریتم و برای هر مسئله، نحوه نمایش جواب می‌تواند منحصر به آن الگوریتم یا مسئله باشد و این برنامه‌نویس است که باید جواب مسئله را به یک روشی کدنویسی کرده و به الگوریتم بفهماند. پس از آن نیز بتواند آن جواب را رمزگشایی کرده و به جواب مسئله تبدیل کند. در این تحقیق برای الگوریتم الکترومغناطیس، نحوه نمایش جواب به صورت جدول ۸ در نظر گرفته شده است. در مسائلی که به دنبال تعیین ترتیب و توالی یک سری از اشیاء یا رویدادها باشند، طبیعی‌ترین نمایش برای این قبیل مسائل، یک جایگشت از مجموعه‌ای از اعداد صحیح است.

جدول ۸. نمونه‌ای از نحوه نمایش جواب در الگوریتم الکترومغناطیس

۱	۳	۴	۲	۵
---	---	---	---	---

این جدول بیانگر آن است که ابتدا فعالیت ۱ انتخاب و با توجه به منابع کاری موجود اجرا می‌شود، پس از آن به ترتیب فعالیت‌های ۳، ۴، ۲ و ۵ انتخاب و زمانبندی می‌گردند. جدول ۹ تبدیل شده آرایه به ماتریس را نشان می‌دهد. در نرم‌افزار متلب از تابع Reshape بدین منظور استفاده می‌شود.

جدول ۹. آرایه تبدیل شده به ماتریس

۰	۱	۰	۱	۰
۱	۰	۱	۱	۰

رمزگشایی این نمایش بدین صورت است که برای ماده ۱ در زمان‌های ۲ و ۴ و برای ماده ۲ در زمان‌های ۱، ۳ و ۴ سفارش داده می‌شود. **شرط توقف الگوریتم.** مراحل تکرار الگوریتم‌ها و تولید نسل جدید تا زمان برقرار نشدن شرط توقف ادامه می‌یابد. شرط توقف در الگوریتم‌ها می‌تواند یکی از موارد زیر باشد:

- رسیدن به حداقل قابل قبولی از پاسخ goal
- تعداد تکرار
- زمان
- همگرایی

در این تحقیق شرط توقف الگوریتم، تعداد تکرار تولید نسل جدید در نظر گرفته شده است. شبه کد الگوریتم الکترومغناطیس طراحی شده مطابق شکل ۴ است.

قبل از شروع، پارامترهای کنترلی اندازه جمعیت، حداکثر تکرار و شعاع حرکتی برای الگوریتم الکترومغناطیس تنظیم گردد. شروع به تعداد m ذره n بعدی (به تعداد بعد فضای حل) جواب اولیه تولید کن. تابع هدف هر ذره محاسبه شود. ذره با بهترین تابع هدف انتخاب شود. جستجوی محلی در اطراف هریک از ذرات باهدف یافتن بهترین ذره هم‌جوار انجام گیرد. بار هر ذره محاسبه شود. بردار نیروی کل وارد بر هر ذره محاسبه گردد. حرکت ذرات در جهت بردار نیروی وارده به‌اندازه طول گام تصادفی ادامه الگوریتم تا رسیدن به شرط توقف پایان بهترین جواب را چاپ کن

شکل ۴. الگوریتم الکترومغناطیس طراحی شده

تشریح مسئله مورد مطالعه. پروژه بازسازی دکل حفاری سینا ۱ پروژه‌ای عظیم بود و بنابر عظیم بودن کل پروژه و فعالیت‌های بسیار زیاد و بنابر تأکید پیمانکار بر اهمیت بخش پایه پروژه، این بخش انتخاب گردید. وضعیت تأمین در این پروژه از نوع زنجیره‌تأمین ساخت و ساز می‌باشد. بخش بازسازی پایه دکل حفاری، شامل ۳۹ فعالیت است. منابع این مسئله را نیروی انسانی تشکیل می‌دهد که حداکثر میزان در دسترس آن ۱۰۰ واحد می‌باشد. داده‌ها و اطلاعات مربوط به مطالعه موردی در جداول ۱۰ تا ۱۲ داده شده است.

جدول ۱۰. داده‌ها و اطلاعات مالی مطالعه موردی

زمان تحویل	جریمه تأخیر	پاداش تسریع	s	H	Gm	rate	پیش پرداخت
۵۵۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۰.۱	۰.۱	۲۰۰	۰.۲۳	۵۰۰۰۰۰

جدول ۱۱. داده‌ها و اطلاعات مواد مربوط به مطالعه موردی

ظرفیت	جریمه تأخیر	hsm	هزینه هر حمل	زمان تدارکات
۲۵	۱۰۰	۱	۱۰۰	۲
۲۵۰	۱۰۰	۱	۱۰	۲

جدول ۱۲. داده‌ها و اطلاعات سفارش مشتریان مربوط به مطالعه موردی

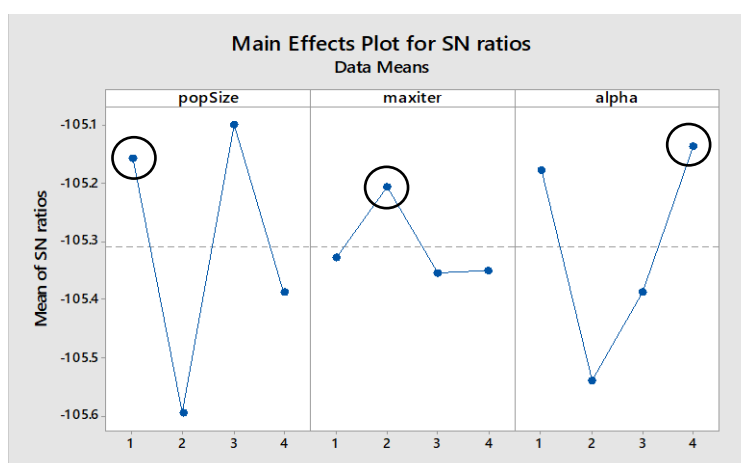
مشتری	۱		۲		۳	
	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲
میزان سفارش	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰
موعد تحویل	۴۰۰	۴۰۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰

پارامترهای کنترلی الگوریتم الکترومغناطیس. برای تنظیم پارامترهای کنترلی الگوریتم الکترومغناطیس، با مراجعه به تحقیقات پیشین و نیز بر اساس سعی و خطا، سطوح مختلفی برای پارامترهای الگوریتم الکترومغناطیس شناسایی شد که در جدول ۱۳ آمده است.

جدول ۱۳. پارامترهای احصا شده برای الگوریتم الکترومغناطیس

پارامترهای کنترلی الگوریتم الکترومغناطیس			سطوح
شعاع حرکتی	حداکثر تکرار	اندازه جمعیت	
۰.۸	۱۰۰	۵۰	۱
۰.۵	۵۰	۲۰	۲
۰.۱	۲۰	۱۰۰	۳
Rand(1)	۱۰۰	۱۰	۴

سپس با استفاده از طراحی آزمایشات و روش تاگوچی، طرح آزمایش مناسبی برای بررسی تأثیر پارامترها بر جواب الگوریتم‌ها ایجاد گردید. پس از چندین بار اجرای الگوریتم با سطوح پارامتر مختلف، برای تحلیل نتایج و جهت تعیین ترکیبی که بهترین نتیجه را می‌دهند، از نسبت S/N و روش بی‌مقیاس سازی درصد انحراف نسبی^۱ (RPD) استفاده گردید [۲۴]. برای اجرای این روش، ابزار طراحی آزمایشات تاگوچی نرم‌افزار مینی‌تب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایشات تاگوچی مطابق شکل ۵ و جدول ۱۴ می‌باشد.



شکل ۵. نتایج نرم‌افزار مینی‌تب برای پارامترهای الگوریتم الکترومغناطیس

پارامترهای کنترلی الگوریتم الکترومغناطیس بر اساس آزمون تاگوچی مطابق جدول ۱۴ می‌باشد.

جدول ۱۴. پارامترهای کنترلی نهایی الگوریتم الکترومغناطیس

۱۰۰	اندازه جمعیت
۵۰	حداکثر تکرار
Rand(1)	شعاع حرکتی

زمانبندی فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی سفارشات به‌دست آمده توسط الگوریتم الکترومغناطیس، مطابق جداول ۱۵ تا ۱۷ می‌باشد.

1. Relative percentage deviation

جدول ۱۵. نتایج زمان‌بندی فعالیت‌های مطالعه موردی توسط الگوریتم الکترومغناطیس

فعالیت	زمان شروع	فعالیت	زمان شروع	فعالیت	زمان شروع
۱	[۴و۴و۴و۴]	۱۴	[۶۵و۱۰۱و۱۳۶و۱۷۵]	۲۷	[۱۱۹و۱۸۶و۲۶۱و۳۳۱]
۲	[۲۵و۳۵و۴۰و۵۰]	۱۵	[۷۵و۱۲۰و۱۶۴و۲۱۲]	۲۸	[۱۲۱و۱۸۹و۲۶۵و۳۳۶]
۳	[۲۸و۴۰و۴۶و۵۸]	۱۶	[۷۷و۱۲۳و۱۶۸و۲۱۷]	۲۹	[۱۲۷و۲۰۰و۲۸۱و۳۵۷]
۴	[۲۵و۳۵و۴۰و۵۰]	۱۷	[۸۰و۱۲۷و۱۷۴و۲۲۴]	۳۰	[۱۲۹و۲۰۳و۲۸۵و۳۶۲]
۵	[۲۵و۳۵و۴۰و۵۰]	۱۸	[۸۳و۱۳۰و۱۷۹و۲۳۰]	۳۱	[۱۳۱و۲۰۵و۲۸۸و۳۶۵]
۶	[۲۷و۳۸و۴۴و۵۵]	۱۹	[۸۶و۱۳۳و۱۸۴و۲۳۶]	۳۲	[۱۳۳و۲۰۷و۲۹۰و۳۶۸]
۷	[۳۵و۵۳و۶۵و۸۱]	۲۰	[۹۴و۱۴۶و۲۰۴و۲۶۱]	۳۳	[۱۳۵و۲۰۹و۲۹۲و۳۷۱]
۸	[۴۳و۶۶و۸۶و۱۱۲]	۲۱	[۹۶و۱۴۹و۲۰۸و۲۶۶]	۳۴	[۱۳۹و۲۱۵و۳۰۰و۳۸۱]
۹	[۴۵و۶۹و۹۰و۱۱۷]	۲۲	[۱۰۵و۱۶۴و۲۳۱و۲۹۵]	۳۵	[۱۴۱و۲۱۸و۳۰۴و۳۸۶]
۱۰	[۴۸و۷۴و۹۷و۱۲۶]	۲۳	[۱۰۷و۱۶۷و۲۳۵و۳۰۰]	۳۶	[۱۴۵و۲۲۴و۳۱۳و۳۹۸]
۱۱	[۵۱و۷۸و۱۰۳و۱۳۳]	۲۴	[۱۰۹و۱۷۰و۲۳۹و۳۰۵]	۳۷	[۱۴۱و۲۲۴و۳۱۳و۳۹۹]
۱۲	[۵۴و۸۲و۱۰۹و۱۴۰]	۲۵	[۱۱۱و۱۷۳و۲۴۳و۳۰۹]	۳۸	[۱۷۸و۲۶۶و۳۶۳و۴۶۲]
۱۳	[۶۳و۹۸و۱۳۲و۱۷۰]	۲۶	[۱۱۹و۱۸۶و۲۶۱و۳۱۳]	۳۹	[۱۹۶و۲۸۸و۳۹۰و۴۹۷]

در جدول شماره ۱۵، نتایج برنامه‌ریزی سفارشات و زمانبندی ۳۹ فعالیت مطالعه موردی، توسط الگوریتم الکترومغناطیس آورده شده است.

جدول ۱۶. نتایج برنامه‌ریزی سفارشات ماده ۱ در مطالعه موردی توسط الگوریتم الکترومغناطیس

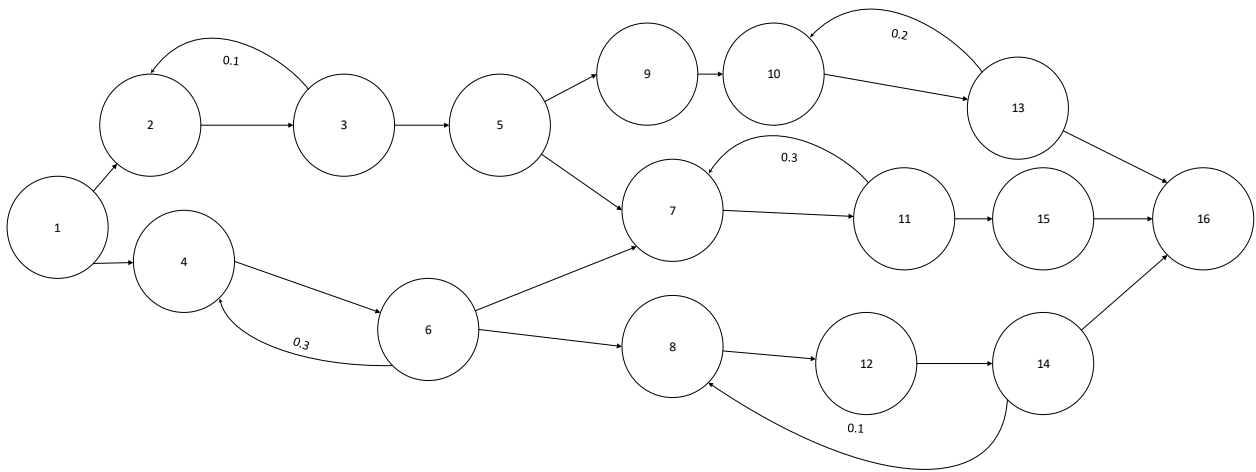
ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش	ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش
۱	۷۹	۲۰	۴	۲۰۴	۷
۲	۱۴۶	۱۵	۵	۲۴۵	۳
۳	۲۰۲	۳	۶	۲۴۷	۲

جدول ۱۷. نتایج برنامه‌ریزی سفارشات ماده ۲ در مطالعه موردی توسط الگوریتم الکترومغناطیس

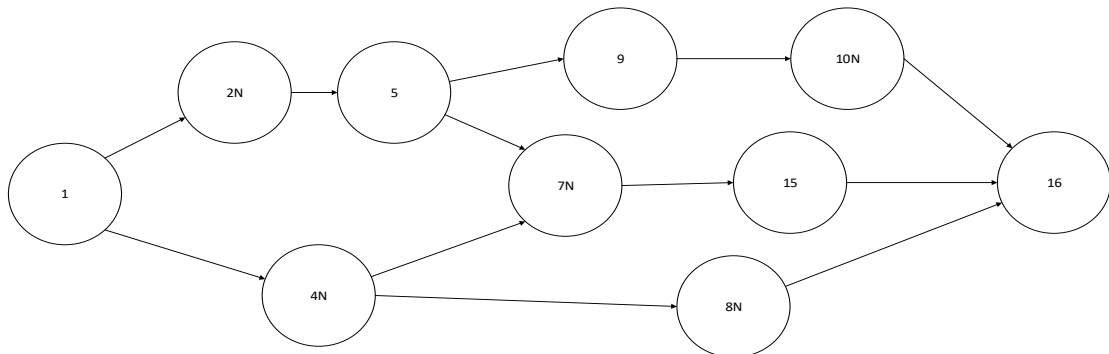
ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش	ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش	ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش
۱	۲۷۰	۱۰	۱۱	۳۰۳	۶	۲۱	۳۲۱	۷
۲	۲۷۳	۱۰	۱۲	۳۰۴	۶	۲۲	۳۲۲	۱۴
۳	۲۷۵	۴۰	۱۳	۳۰۵	۶	۲۳	۳۲۴	۲۱
۴	۲۸۳	۲۰	۱۴	۳۰۶	۱۲	۲۴	۳۲۷	۴۲
۵	۲۸۷	۵	۱۵	۳۰۸	۱۲	۲۵	۳۳۳	۷
۶	۲۸۸	۵	۱۶	۳۱۰	۱۲	۲۶	۳۳۴	۷
۷	۲۸۹	۲۰	۱۷	۳۱۲	۱۸	۲۷	۳۳۵	۲۱
۸	۲۹۴	۲۴	۱۸	۳۱۵	۱۲	۲۸	۳۳۸	۱۴
۹	۲۹۸	۱۲	۱۹	۳۱۷	۶	۲۹	۳۴۰	۲۳۶
۱۰	۳۰۰	۱۸	۲۰	۳۱۸	۱۴			

در جدول شماره ۱۶ و ۱۷، نتایج برنامه‌ریزی سفارشات برای ماده ۱ و ۲ که توسط الگوریتم الکترومغناطیس حل شده، آورده شده است. در این جداول به زمان سفارش و مقدار سفارش پرداخته شده است. میزان تابع هدف به دست آمده توسط الگوریتم الکترومغناطیس در مدت حدود ۲۳۱۰ ثانیه برابر ۱۷۹۵۰۶ واحد پولی می‌باشد.

اعتبارسنجی الگوریتم الکترومغناطیس. به منظور اثبات کارایی و کارآمدی الگوریتم الکترومغناطیس طراحی شده، سه مسئله با ابعاد کوچک انتخاب گردید. مسئله اول با پنج فعالیت (که در بخش ۴ و جدول ۲ معرفی و سپس حل شد)، مسئله دوم در واقع همان پنج فعالیت مسئله اول ولی با دو تأمین‌کننده است. مسئله سوم که در ادامه تشریح می‌شود. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ایمز، جواب دقیق برای مسئله به دست آمده است، سپس جواب‌ها و زمان حل به دست آمده از الگوریتم الکترومغناطیس با آن مقایسه شد. شبکه مسئله سوم در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. اطلاعات مالی، مشتریان و داده‌های تکمیلی فعالیت‌های این مسئله نیز در جداول ۱۸ تا ۲۱ آورده شده است.



شکل ۶. شبکه پروژه مسئله سوم برای اعتبارسنجی الگوریتم فرا ابتکاری



شکل ۷. شبکه پروژه اعتبارسنجی الگوریتم فرا ابتکاری پس از حذف دوباره کاری

جدول ۱۸. اطلاعات مالی مسئله سوم اعتبارسنجی

حداکثر میزان در دسترس منابع کاری در واحد زمانی	rate	GM	h	S	پاداش تسریع	جریمه تاخیر	زمان تحویل	افق زمانی تأمین‌کننده	افق زمانی پیمانکار
۱۶	۲	۵۰۰	۱	۱	۱۵۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۴۵	۵۰	۴۰

جدول ۱۹. اطلاعات فعالیت‌ها و منابع مسئله سوم اعتبارسنجی

فعالیت	زمان		میزان استفاده از منابع کاری در هر واحد زمانی			ماده اولیه
	فازی	قطعی	منبع کاری ۱	منبع کاری ۲	منبع کاری ۳	
۱	(۱۲ و ۳ و ۴)	۳	۳	۴	۶	۷۰
۲.N	(۱۲ و ۹ و ۷ و ۴)	۸	۲	۵	۲	۱۰۰
۴.N	(۱۴ و ۱۱ و ۹ و ۴)	۹	۰	۶	۰	۵۰
۵	(۵ و ۴ و ۳ و ۲)	۴	۵	۴	۰	۹۰
۷.N	(۱۳ و ۱۰ و ۷ و ۳)	۳	۳	۵	۸	۸۰
۸.N	(۱۶ و ۱۲ و ۹ و ۴)	۱۰	۳	۴	۶	۷۰
۹	(۵ و ۳ و ۲ و ۱)	۳	۲	۵	۲	۱۰۰
۱۰.N	(۱۵ و ۱۳ و ۱۰ و ۶)	۱۱	۰	۶	۰	۵۰
۱۵	(۴ و ۳ و ۲ و ۱)	۳	۵	۴	۰	۹۰
۱۶	(۵ و ۳ و ۲ و ۱)	۳	۳	۵	۸	۸۰
هزینه هر واحد			۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۲۰

جدول ۲۰. اطلاعات مربوط به سایر مشتریان تأمین‌کننده

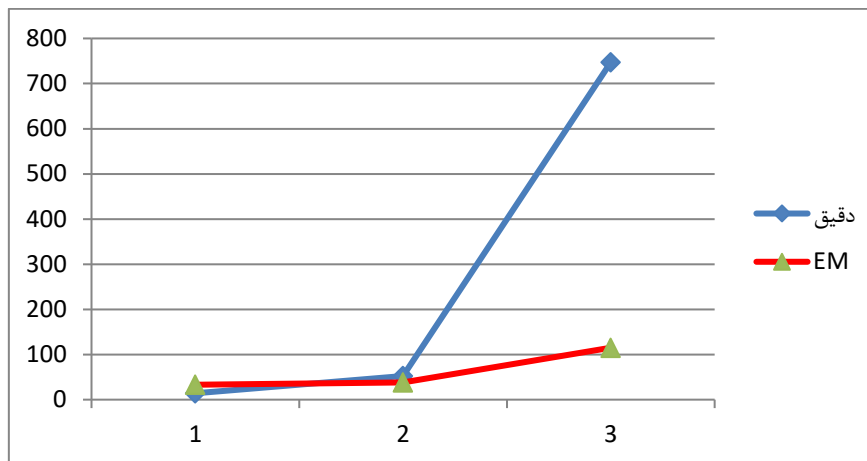
مشتری	۱		۲		۳	
	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲
میزان سفارش	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
موعد تحویل	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰

میانگین نتایج حل مساله با نرم‌افزار ایمز و الگوریتم الکترومغناطیس در جدول ۲۱ آورده شده است.

جدول ۲۱. مقایسه عملکرد الگوریتم الکترومغناطیس و حل دقیق در سه مسئله

مسئله	AIMMS		میانگین الگوریتم الکترومغناطیس		اختلاف نسبی
	مقادیر تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقادیر تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	
مسئله اول	-۸۲۵۶۱۲۰	۱۴.۱۳	-۸۲۰۴۸۷۰	۳۳	۰.۰۰۶
	-۷۹۱۱۲۰۰	۵۲.۲۶	-۷۹۹۶۸۸۰	۳۸	۰.۰۱
مسئله سوم	-۲۴۶۸۸۱۳۴	۷۴۷.۳۷	-۲۴۳۸۲۶۸۴	۱۱۵	۰.۰۱۲

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، الگوریتم ارائه شده با توجه به زمان حل، عملکرد قابل قبولی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۲۱، زمان جواب الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس برای حل سه مسئله نمونه بین ۳۳ تا ۱۱۵ ثانیه است ولی زمان رسیدن به جواب توسط نرم‌افزار دقیق ایمز به ترتیب برابر ۱۴.۱۳ ثانیه، ۵۲.۲۶ ثانیه و ۷۴۷.۳۷ ثانیه است. یعنی با افزایش ابعاد مسئله، زمان رسیدن به جواب توسط این نرم‌افزار به‌طور نمایی افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج جدول ۲۱ نشان می‌دهد که اختلاف نسبی الگوریتم فراابتکاری نسبت به نرم‌افزار دقیق ایمز بین ۰.۰۰۶ تا ۰.۰۱۲ (یعنی بین ۰.۶ درصد تا ۱.۲ درصد) می‌باشد.



شکل ۸. مقایسه زمان حل EM و حل دقیق در سه مسئله

بررسی مطالعه موردی با در نظر گرفتن شیوه‌های پرداخت. در این قسمت به بررسی تاثیر روش‌های مختلف پرداخت بر هزینه زنجیره تامین پروژه پرداخته می‌شود.

الف) پرداخت به قیمت مجموع^۱ (LSP). در این روش، کل هزینه اجرای پروژه تنها پس از تکمیل موفقیت‌آمیز آن از سوی کارفرما به پیمانکار پرداخت می‌گردد. این شیوه ایده‌آل‌ترین روش پرداخت از دید کارفرما است. اما بدلیل اینکه تمام بار مالی پروژه در حین اجرا را به سمت پیمانکار هدایت می‌کند از دید پیمانکار نامطلوب بوده و معمولاً در بیشتر محیط‌های کاری، اجرایی نیست [۲۷].

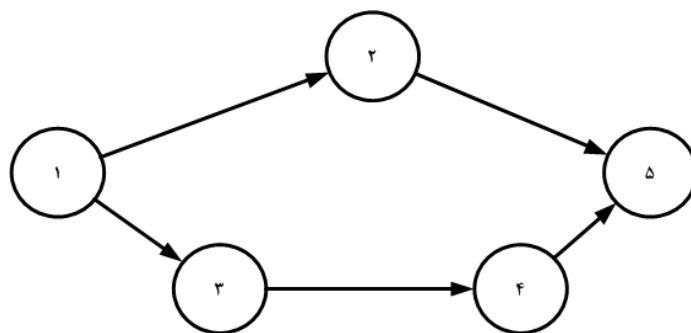
ب) پرداخت در زمان وقوع رویدادها^۲ (PEO). در این شیوه، کارفرما و پیمانکار توافق می‌کنند که در زمان وقوع رویدادهای مشخصی در طی اجرای پروژه (مانند اتمام فازهای مشخص و غیره) کارفرما پرداخت‌هایی را به پیمانکار داشته باشد. یکی از متداول‌ترین روش‌ها در این حالت، پرداخت در زمان اتمام هر فعالیت^۳ (PAC) است. در این حالت که به اختصار PAC نامیده می‌شود، کارفرما پس از اتمام هر فعالیت، مبلغ مرتبط با آن فعالیت را به پیمانکار پرداخت می‌کند [۲۷].

پ) پرداخت در فواصل زمانی مساوی^۴ (ETI). در این شیوه پرداخت، مجموع مبلغ قرارداد در تعداد H مرحله پرداخت، از سوی کارفرما به پیمانکار پرداخت می‌شود. این پرداخت‌ها طوری برنامه‌ریزی می‌شوند که تعداد H-1 مرحله با فاصله‌های زمانی مساوی از شروع قرارداد پرداخت شوند و آخرین مرحله در زمان اتمام پروژه پرداخت خواهد شد. مبالغ این پرداخت‌ها ممکن است مساوی نباشند و ممکن است میزان آن بستگی به فعالیت‌های انجام شده در هر مرحله داشته باشد [۲۷ و ۲۸].

ت) پرداخت‌های مستمر^۵ (PP). در این روش، بدون توجه به زمان اتمام پروژه، کارفرما و پیمانکار یک فاصله زمانی را (هفتگی، ماهانه و ...) مشخص می‌نمایند تا در حین انجام پروژه، پرداخت‌هایی از سوی کارفرما به پیمانکار انجام گردد. میزان پرداختی نیز مانند روش ETI محاسبه می‌شود. تفاوت روش PP با روش ETI در این است که تعداد پرداخت‌ها در روش PP از قبل مشخص نیست؛ چرا که در این روش، فواصل بین پرداخت‌ها بدون توجه به زمان اتمام پروژه مشخص می‌شود.

برای بررسی تفاوت دو حالت سنتی و یکپارچه، با استفاده از یک مثال ساده، هزینه‌های ناشی از این دو نگاه به مسئله بررسی می‌شود. شبکه پروژه ساده شکل ۹ و جدول ۲۲ و ۲۳ که اطلاعات فعالیت‌ها و منابع مسئله نمونه آورده شده است را در نظر گرفته و با اطلاعات مربوط به آن، در دو حالت سنتی و یکپارچه، هزینه‌های پیمانکار و تامین‌کننده در هر ۴ روش پرداخت، تحلیل می‌گردد.

1. Lump-Sum Payment (LSP)
 2. Payments at Event Occurrence (PEO)
 3. Payments At Activity Completion Times (PAC)
 4. Payment at Equal Time Intervals (ETI)
 5. Progress Payments (PP)



شکل ۹. شبکه پروژه مساله نمونه

جدول ۲۲. اطلاعات فعالیت‌ها و منابع مساله نمونه

فعالیت	زمان	میزان استفاده از منابع کاری در هر واحد زمانی			میزان نیاز به ماده اولیه در واحد زمانی	ارزش فعالیت پس از اتمام (W_i)	جریان نقدی متناظر (CF_j)
		منبع کاری ۱	منبع کاری ۲	منبع کاری ۳			
۱	۱	۳	۴	۶	۷۰	۵۵۰۰	۷۰۰۰
۲	۱	۲	۵	۲	۱۰۰	۴۲۰۰	۵۰۰۰
۳	۲	۰	۶	۰	۵۰	۴۴۰۰	۵۰۰۰
۴	۱	۵	۴	۰	۹۰	۳۱۰۰	۳۰۰۰
۵	۱	۳	۵	۸	۸۰	۶۹۰۰	۱۲۰۰۰
هزینه هر واحد		۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۲۰		

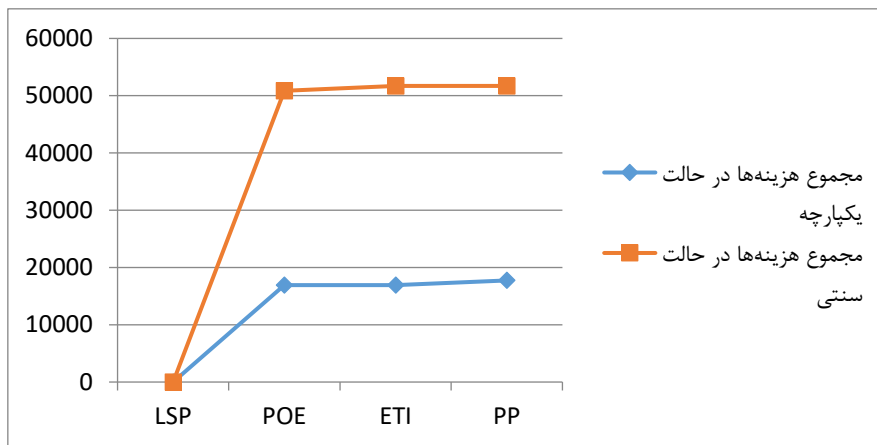
جدول ۲۳. اطلاعات کلی مساله نمونه

افق زمانی پیمانکار	زمان تحویل	جریمه تاخیر	پاداش تسریع	S	h	GM	WF	rate	حداکثر میزان در دسترس منابع کاری در واحد زمانی
۲۰	۸	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۰.۱	۰.۱	۳۰۰	۵۰۰۰	۰.۲۳	۸

فرض شده‌است کارفرما ۲۰۰۰ واحد پولی را در ابتدای پروژه به عنوان پیش‌پرداخت به پیمانکار پرداخت می‌نماید. در ادامه و با توجه به اطلاعات فوق هزینه پیمانکار در ۴ حالت مختلف پرداخت، بررسی می‌شود. در حالات پرداخت POE و ETI فرض می‌شود فاصله زمانی بین هر بار بررسی وضعیت پروژه، دو واحد زمانی است. با توجه به مهلت تحویل پروژه، پارامتر CFF برای حالت ETI به صورت جدول ۲۴ می‌باشد.

جدول ۲۴. جریان نقدی مرتبط با حالت پرداخت ETI برای مساله نمونه

f	۲	۴	۶	پایان پروژه
$CFF(f)$	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۵۰۰۰	۲۰۰۰



شکل ۱۰. مقایسه هزینه کل در روش سنتی و روش یکپارچه در حالات مختلف پرداخت

در شکل ۱۰ مجموع هزینه‌ها در حالت سنتی و یکپارچه در چهار حالت مختلف پرداخت، مشاهده می‌شود. در حالت سنتی، هزینه زنجیره تامین بیشتر از حالت یکپارچه می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، به زمانبندی فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی موجودی زنجیره‌تأمین پروژه بازسازی دکل حفاری سینا ۱ پرداخته شده است. با این فرض که زمان اجرای فعالیت‌ها غیرقطعی است و همچنین انجام خود فعالیت نیز دارای عدم قطعیت می‌باشد. لذا از رویکرد فازی برای مقابله با این عدم قطعیت استفاده شده است. با توجه به NP-hard بودن مساله زمانبندی پروژه، از الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس برای حل مساله استفاده شده است. برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، یک مساله در ابعاد بزرگ حل شده است و نتایج آن با نتایج حل نرم‌افزار AIMMS، مقایسه شده است. زمان حل مساله توسط الگوریتم فراابتکاری در مقایسه با حل دقیق به مراتب کمتر است و درصد اختلاف جواب الگوریتم فراابتکاری با حل دقیق بیانگر این است که یافته‌های الگوریتم فراابتکاری و روش دقیق دارای اختلاف تقریباً یک درصد و نزدیک به هم می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم الکترومغناطیس پیشنهادی برای این مساله، الگوریتمی کارا بوده و همگرا به جواب بهینه است.

پیشنهادهایی که می‌تواند در جهت ادامه این پژوهش انجام شود عبارت است از:

- علاوه بر زمان اجرای فعالیت‌ها، پارامترهای دیگر مسئله نیز غیرقطعی در نظر گرفته شوند مانند میزان مصرف منابع.
- در نظر گرفتن سیستم حمل‌ونقل و ارائه مدلی که با برنامه‌ریزی و زمانبندی حمل‌ونقل بتواند تأثیر هزینه‌های حمل‌ونقل را نیز بر عملکرد زنجیره بررسی نماید.
- استفاده از رویکردهای حل فراابتکاری یا الگوریتم‌های هوشمند چند هدفه با بکارگیری معیارهای مرسوم چند هدفه نظیر یکنواختی، گسترش و پوشش مجموعه
- در نظر گرفتن موضوع انتخاب تأمین‌کننده در حالت وجود بیش از یک تأمین‌کننده برای هر ماده.
- اعتبارسنجی نتایج ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از اجرای واقعی پروژه.
- در نظر گرفتن اهداف دیگری همچون استواری پروژه و تسطیح منابع و کیفیت پروژه در تابع هدف مسئله.
- در نظر گرفتن ارزش زمانی پول و نیز نرخ تورم در تابع هدف مدل.
- افزایش سطوح زنجیره تأمین پروژه از دو سطح.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدهی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

1. Atieh Ali. A., Fayad. A., Alomair. A., Al Naim. A. (2024). The Role of Digital Supply Chain on Inventory Management Effectiveness within Engineering Companies in Jordan. *Sustainability*, 16(18). 1-25
2. Asadujjaman. Md. (2023). Planning and Scheduling Supply Chain Integrated Projects. *A thesis in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of Engineering and Information Technology University of New South Wales, Australia.*
3. Bruni, M, Beradli, P, Guerriero, F, Pinto, E. (2011). A heuristic approach for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations. *Computers & Operations Research*. 38(9), 1305-1318.
4. Bhaskar, T, Manabendra, N., Asim, K. (2015). A heuristic Method for RCPSP with Fuzzy activity times. *European Journal of Operational Research*. 208(1), 57-66.
5. Birbil. S, Fang. S. (2003). An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization. *Journal of Global Optimization*. 25(8). 263–282.
6. Bayani, M., Noori. S., Yaghoubi.S., Mohamadi. A. (2016). A Mathematic Model for Green Supply Chain of Project Construction considering Project Scheduling. *Industrial Management Perspective*. 5(4). 123-156. (in Persian).
7. Chanxio, D, Xingfang, Z. (2012). Project Scheduling Problem with Uncertain Activity Duration Times. *Applied Mathematics*. 3(1)
8. Daneshgari, N., Imani, D.M., Nouri, S. (2022). The project scheduling model for allocating and leveling limited resources in the conditions of uncertainty in the performance of meta-heuristic algorithms. *Industrial Management and Engineering Quarterly*, 4(12). 105-87. (in Persian).
9. Elimam.E., Dodin. B. (2013). Project scheduling in optimizing integrated supply chain operations. *European Journal of Operational Research*. 224(3). 530–541.
10. Eslami, R., Abedini, M., Zokaei, M., Rabbani, M., Aghsami, A. (2024). Bi-objective optimization modeling of a three-level supply chain in production planning and scheduling considering price-dependent demand: a case study of a soap factory. *Operations Research*. 58(6), 4997-5028
11. Fu, F. (2014). Integrated scheduling and batch ordering for construction project. *Appl. Math. Model* 38(2), pp. 784-797.
12. Gholizadeh. E., Afshar Najafi. B. (2018). Solving a Bi-Objective Multi-Mode Project Scheduling Problem with Regard to Payment Planning and Constrained Resources using NSGA-II Algorithm. *Industrial Management Perspective*. 8(4). 165-187. (in Persian).
13. Imannejad, R., Avakh Darestani, S. (2021). Optimization of resource-constrained project scheduling problem using meta-heuristic algorithms. *International Conference on Applied Research in Science and Engineering*. (in Persian).
14. Li, H., Womer, K. (2012). Optimizing the supply chain configuration for make-to-order manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 221(1). 118–128.
15. 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.
16. Mousavi, S.M., Hassanpour, H.A., Nabizadeh, M.H. (2021). Optimizing project scheduling with resource constraints under resource uncertainty and solving using genetic algorithm. *The first national conference on applied research in engineering sciences and information technology*. (in Persian).
17. Mousavi F. A, Timuri, A., Barzinpour, F. (2011). Presentation of the inventory planning model in the supply chain of the project and its solution by genetic algorithm. *Master thesis of Iran University of Science and Technology*. (in Persian).
18. Movahedian Attar. O, Esmaelian. M, Mohammadi Zanjirani. D. (2015). Multi-Mode Resource Constrained Multi-Project Selecting and Scheduling Problem to Maximize Net Present Value. *Industrial Management Perspective*, 4(4). 79-100. (in Persian)
19. Nakhaei Kamal Abadi, A, Javadian, N, Goran, M., Noorzadeh, B. (2010). Presentation of a mathematical model for the integration of scheduling and transportation in a multi-factory supply chain, *Industrial Management*. 2(3). 13-24. (in Persian).

20. Parvizi, M, Hasanpour, H. A., Norang, A. (2015). Inventory planning and scheduling of activities in the supply chain of the project and solving it with an efficient method (case study: a limited part of the Bandar Abbas Gas Condensate Refinery construction project). *Master's Thesis of Industrial Engineering, Logistics and Supply Chain Engineering, Imam Hossein University*. (in Persian).
21. Roungangar Ranjbar, M. (2015). New meta-heuristic algorithms based on the propagation search method for resource-constrained project scheduling problems. *PhD Thesis, Sharif University of Technology, Faculty of Industrial Engineering*. (in Persian).
22. Sharifzadegan, M, Sohrabi, T., Jafaranjad, A. (2021). Presenting a dual-objective hybrid model of production scheduling, with limited resources, with a preventive maintenance and repairs approach. *Decision making and research in operations*. 6, 1-17. (in Persian).
23. Savsar, M. (2018). Analysis and Scheduling of Maintenance Operations for a Chain of Gas Stations. *Journal of Industrial Engineering*. 20(1).
24. Tavakoli Moghadam R., Yazdani M., Mola Alizadeh S. (2015). Scheduling of production and air transportation in the supply chain considering sequence-dependent preparation times. *International Journal of Industrial Engineering and Production Management*. 23(3).352-362. (in Persian).
25. Ullrich, C. A. (2013). Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows. *European Journal of Operational Research*. 227(1),152-165.
26. Wang, H, Dan, L., Minqiang, L. (2014). A Genetic Algorithm for Solving Fuzzy Resource-Constrained Project Scheduling. *Advances in Natural Computation, Volume 3612 of the series Lecture Notes in Computer Science*. 171-180.
27. Zarei, M, Hasanpour, H., Mosaddekkhah, M. (2013). Presenting a mathematical model of project scheduling with multiple objectives based on cost payment patterns and considering resource limitations and solving it using a meta-initiative method (case study: a limited part of the Bandar Abbas Gas Condensate Refinery construction project). *Imam Hossein University*. (in Persian).
28. Zoraghi, N, Najafi, A., Niaki, A. (2012). An Integrated Model of Project Scheduling and Material Ordering: A Hibryd Simulated Annealing and Genetic Algorithm. *Optim. Ind. Eng*, 5(10), 19-27.
29. Zhang, H, Demeulemeester, E, Li, L., Bai, S. (2024). Surrogate-assisted cooperative learning genetic programming for the resource-constrained project scheduling problem with stochastic activity durations and transfer times. *Computers and Operations Research*. 173.