

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

Hossein Ali Hassanpour^{ID}

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Research Institute, Imam Hossein University, Tehran, Iran.
(Corresponding author), hahassan@ihu.ac.ir

Hassan Fatahi^{ID}

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

Jafar Fahimi Sivaki^{ID}

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

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

Abstract

Introduction and objectives: Refurbishing an oil rig is one of the best alternative options for renting this capital equipment. Because the cost of renting it is tens of thousands of dollars per day. This research deals with the scheduling of activities and inventory planning of the supply chain of the Sina 1 drilling rig reconstruction project. Since there is no record of doing such work in the country, project scheduling is done in the conditions of uncertainty of activities. Also, the uncertainty of the implementation time of the activities itself will increase the understanding of the project owners about the scheduling of the activities and will open a wider view of the project and the upcoming activities. In this model, the costs of the contractor and suppliers are seen at the same time, and the non-deterministic scheduling of activities and planning of orders is done in such a way that the total costs of the entire chain are minimized.

Method: According to the number of variables and limitations of the mathematical model for scheduling the activities of the supply chain of the drilling rig reconstruction project, the investigated problem is a type of complex NP-hard problem. Therefore, meta-heuristic methods are used to solve such problems, which produce near-optimal solutions in a reasonable time compared to exact methods. In this research, electromagnetic algorithm is used to solve this problem. The mentioned algorithm has been used in a real project (Leg section of Sina 1 drilling rig).

Findings: The mathematical model presented in this research has been coded using the electromagnetic algorithm in the MATLAB software environment, and the input parameters of the problem include general parameters and control parameters of the electromagnetic meta-heuristic algorithm. The general parameters are related to the specifications of the contractor, supplier, activities, resources and consumables. In order to prove the efficiency and effectiveness of the designed electromagnetic algorithm, three problems were selected. The first problem has five activities, the second problem is actually the same five activities as the first problem but with two

suppliers. The third problem was selected with large dimensions. First, the exact solution for the problem was obtained using AIMMS software, then the solutions and the solution time obtained from the electromagnetic algorithm were compared with it. It should be noted that as the dimensions of the problem increase, the time to reach the solution in AIMMS software increases significantly (exponentially). The proposed electromagnetic algorithm shows an acceptable performance according to the solution time. The answer time of the electromagnetism meta-heuristic algorithm to solve the sample problem is 115 seconds, but the time to reach the answer by the exact AIMMS software is about 747 seconds. Also, the relative difference of the meta-heuristic algorithm of electromagnetics compared to the exact software of AIMMS is almost one percent. Finally, a sensitivity analysis was used to analyze the impact of different payment methods on the project's supply chain cost.

Conclusion: In this research, the modeling and solution of the two-level project supply chain including the contractor and suppliers are presented, and the costs related to the project and inventory for both members of the chain are minimized. By comparing the solution results of the exact method and the electromagnetic algorithm, it was found that the time of solving with the electromagnetic algorithm is much less than the time of solving the exact method. Meanwhile, the relative difference in the quality of the answer is almost one percent. These cases show the effectiveness and efficiency of the proposed algorithm. The obtained results show that the proposed electromagnetic algorithm for this problem is an effective algorithm and converges to the optimal solution.

Keywords: activity scheduling, project supply chain, inventory planning, uncertainty, reconstruction, meta-heuristic algorithms

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

حسینعلی حسن پور ^{ID}

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.
(نویسنده مسئول)، hahassan@ihu.ac.ir

حسن فتاحی ^{ID}

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

جعفر فهیمی سیوکی ^{ID}

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

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

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. همچنین عدم قطعیت زمان اجرای فعالیت‌ها خود درک صاحبان پروژه را از زمانبندی فعالیت‌ها افزایش داده و دید وسیع‌تری نسبت به پروژه و فعالیت‌های پیش‌رو باز خواهد نمود. در این مدل، هزینه‌های پیمانکار و تأمین‌کنندگان همزمان دیده شده و زمانبندی غیرقطعی فعالیت‌ها و برنامه‌ریزی سفارشات به‌گونه‌ای صورت می‌پذیرد که مجموع هزینه‌های کل زنجیره کمینه گردد.

روش: با توجه به تعداد متغیرها و محدودیت‌های مدل ریاضی زمانبندی فعالیت‌های زنجیره‌تأمین پروژه بازسازی دکل حفاری، مساله مورد بررسی از نوع مسائل پیچیده NP-hard می‌باشد. به همین خاطر برای حل این‌گونه مسائل از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شود که در زمان معقولی نسبت به روش‌های دقیق، جواب‌های نزدیک به بهینه تولید می‌کنند. در این پژوهش، از الگوریتم الکترومغناطیس برای حل این مساله استفاده شده است. الگوریتم مذکور در یک پروژه واقعی (بخش Leg دکل حفاری سینا ۱) به‌کارگیری شده است.

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 با پنج فعالیت، مسئله دوم در واقع همان پنج فعالیت مسئله اول ولی با دو تأمین‌کننده است. مسئله سوم با ابعاد بزرگ انتخاب گردید. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ایمز جواب دقیق برای مسئله به دست آمده، سپس جواب‌ها و زمان حل به‌دست‌آمده 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 به‌صورت قابل توجهی (به‌صورت 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 ایمز حدود ۷۴۷ ثانیه است. همچنین اختلاف نسبی الگوریتم فراابتکاری الکترومغناطیس نسبت به نرم‌افزار دقیق ایمز تقریباً یک درصد می‌باشد. در آخر نیز برای تحلیل حساسیت از تاثیر روش‌های مختلف پرداخت بر هزینه زنجیره تامین پروژه، استفاده شده است.

نتیجه‌گیری: در این پژوهش، مدل‌سازی و حل مسئله زنجیره‌تامین پروژه دو سطحی شامل پیمانکار و تامین کنندگان ارائه شده است که هزینه‌های مربوط به پروژه و موجودی برای هر دو عضو زنجیره کمینه‌سازی شده است. با مقایسه نتایج حل روش دقیق و الگوریتم الکترومغناطیس، مشخص شد زمان حل با الگوریتم الکترومغناطیس به مراتب کمتر از زمان حل روش دقیق است. در ضمن، اختلاف نسبی کیفیت جواب تقریباً یک درصد است. این موارد نشان دهنده کارایی و کارآمدی الگوریتم پیشنهادی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم الکترومغناطیس پیشنهادی برای این مساله، الگوریتمی موثر و دارای همگرایی به جواب بهینه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: زمانبندی فعالیت، زنجیره‌تامین پروژه، برنامه‌ریزی موجودی، عدم قطعیت، بازسازی، الگوریتم‌های فراابتکاری.

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 اهمیت و تأثیر به‌کارگیری آن در سطح مدیریت کلان، برنامه‌ریزی پروژه‌های واقعی صنعتی و اجرای آن‌ها، جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. برنامه‌ریزی و زمانبندی پروژه وقتی که هم محدودیت منابع و هم عدم اطمینان در طول دوره فعالیت‌ها داریم 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 موردنیاز آن‌ها وجود دارد، اما کار بر روی نوع غیرقطعی مسائل کمتر انجام شده و این مسائل جدیدتر است. این عدم قطعیت زمان فعالیت‌ها بیشتر به‌صورت زمان‌های احتمالی و فازی در نظر گرفته می‌شود که کار بر روی زمان‌های احتمالی بسیار گسترده‌تر بوده و پیشینه‌ی 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، روزبه‌روز 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 موردنیاز 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].

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 به‌موقع 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 عبارت است از تعیین یک توالی زمانی جهت انجام یک سری فعالیت‌های وابسته که تشکیل‌دهنده پروژه هستند. وابستگی فعالیت‌ها از نظر تقدم و تأخر انجامشان است، یعنی ممکن است انجام فعالیت به انجام چند فعالیت دیگر وابسته باشد که در این صورت پروژه دارای محدودیت‌های تقدمی است. تعیین این برنامه زمانبندی با در نظر گرفتن هدف یا اهداف خاصی صورت می‌گیرد.

تقریباً در همه پروژه‌ها محدودیت‌های تقدمی بین فعالیت‌ها وجود دارند اما علاوه بر این محدودیت‌ها، ممکن است نوع دیگری از محدودیت‌ها تحت عنوان محدودیت‌های منابع نیز در پروژه وجود داشته باشند. معمولاً انجام فعالیت‌های پروژه نیازمند استفاده از منبع یا منابعی مشخص است که معمولاً این منابع محدود هستند. آن دسته از مسائل زمانبندی پروژه که محدودیت‌های منابع در آن‌ها وجود ندارد یا در نظر گرفته نمی‌شوند، به مسائل زمانبندی پروژه بدون محدودیت منابع^۱ و آن دسته که دارای محدودیت منابع هستند و این محدودیت‌ها در زمانبندی پروژه ملاحظه می‌شوند به مسائل زمانبندی پروژه با محدودیت منابع^۲ معروف هستند [۲۱].

عطار و همکاران (۱۳۹۴) به انتخاب و زمانبندی چندین پروژه با محدودیت منابع در چندین حالت اجرایی به منظور حداکثر کردن ارزش فعلی خالص پرداخته‌اند. در این پژوهش، فعالیت‌ها با حالت مختلف از منابع، امکان اجرا دارند و از منابع تجدیدپذیر (نیروی انسانی، ماشین آلات) و تجدید ناپذیر (مواد اولیه، بودجه) استفاده می‌کنند. در محاسبه هزینه‌ها، هزینه اضافه کاری منابع تجدید پذیر، جریمه دیرکرد یا پاداش تحویل زودتر از موعد پروژه در نظر گرفته شده است [۱۸].

قلی‌زاده و افشار نجفی (۱۳۹۷) در تحقیق خود به حل مسئله دو هدفه زمانبندی چند حالتی پروژه با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی پرداخت و منابع محدود پرداخته‌اند. در ادامه پژوهش نیز مبحث زمانبندی و برنامه‌ریزی پرداخت پروژه با اهداف افزایش NPV پروژه و کاهش زمان اتمام پروژه در مسئله بررسی می‌شود. به همین دلیل ابتدا بر اساس فرضیه‌های مطرح شده در فضای مسئله، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ریاضی برای فرموله‌سازی مسئله ارائه می‌شود؛ سپس برای اعتبارسنجی مدل، چندین مسئله نمونه در ابعاد مختلف طراحی می‌شود و سپس توسط نرم‌افزار GAMS و روش محدودیت اسیلون حل می‌شود. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ نیز از روش الگوریتم NSGA-II بهره‌گیری شده و کارایی آن از طریق مقایسه با روش محدودیت اسیلون سنجیده می‌شود [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 برای یک زنجیره تأمین سه سطحی، 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 مجد و همکاران (۱۳۹۴) به ارائه مدل ریاضی زنجیره‌تأمین سبز پروژه‌های ساخت و ساز با در نظر گرفتن زمانبندی پروژه پرداخته‌اند. در این پژوهش مدلی یکپارچه ارائه شده که هدف نخست بیشینه سازی سود و هدف دوم کمینه سازی میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید است. با فرض مشخص بودن شبکه پروژه و همچنین مدت زمان و تقاضای روزانه هر یک از فعالیت‌ها، این مدل، برنامه‌ریزی زنجیره را در دوره‌های زمانی مختلف انجام می‌دهد. با توجه به دهدفه و غیرخطی بودن این مدل، ابتدا مدل، خطی و سپس با استفاده از روش

¹ Resource-Unconstrained Project Scheduling Problems (RUPSP)

² Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP)

³ Material Supply Chain

محدودیت اسپلون و کدنویسی در نرم افزار GAMS حل شد و در نهایت نتایج آن با استفاده از دو مثال عددی مورد تحلیل قرار گرفت [۶].

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 کمیینه‌سازی 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 به طراحی و ارائه یک مدل ریاضی دو مرحله‌ای چند هدفه به منظور زمانبندی فعالیت‌های همزمان چندین پروژه با در نظر داشتن محدودیت در منابع موجود در شبکه‌های احتمالی جهت تخصیص و تسطیح همزمان پرداخته‌اند. برای حل مدل از سه روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تبرید شبیه‌سازی شده در کنار روش دقیق استفاده شد که مقایسه نتایج با روش دقیق حاکی از دقت بیشتر الگوریتم ژنتیک به نسبت سایر روش‌ها می‌باشد [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].

¹ Chanxio and Xingfang

² Wang

³ Bhaskar

⁴ Savsar

⁵ Lin

اسدوجمان^۱ (۲۰۲۳) در رساله دکتری خود به موضوع برنامه‌ریزی و زمانبندی پروژه‌های یکپارچه زنجیره تامین 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 دو الگوریتم فراابتکاری ترکیبی ژنتیک ایمنی^۲ (IGA) و ژنتیک ایمنی مبتنی بر چند عملگر^۳ 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^۴ مبتنی بر ارزش خالص فعلی^۵ برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی زنجیره تامین 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 تامین را توسعه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جایگزینی^۶ در حل مسائل زمانبندی چند پروژه‌ای موثرتر است [۲].

اسلامی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به بهینه‌سازی مدل دو هدفه زنجیره‌تأمین سه سطحی 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^۷ و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیق خود به نقش زنجیره تامین 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 تامین 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 تامین را ایجاد کنند که بتوانند با تغییرات سازگار شوند و انعطاف‌پذیری داشته باشند [۱].

ژانگ^۸ 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^۹ 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 غیر قطعی عملکرد بهتری دارد [۲۹].

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

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

ردیف	سال	نویسندگان	جنبه مساله	رویکرد مساله	پارامتر	روش - الگوریتم	رویکرد حل
------	-----	-----------	------------	--------------	---------	----------------	-----------

¹ Asadujjaman

² immune genetic algorithm (IGA)

³ multi-operator-based IGA (MO-IGA)

⁴ mixed integer programming (MIP)

⁵ Net present value (NPV)

⁶ Surrogate based GA (SGA)

⁷ Atieh Ali

⁸ Zhang

⁹ surrogate-assisted cooperative learning genetic programming (SCLGP)

فرا ابتکاری	ابتکاری	دقیق		غیر قطعی		غیر قطعی	قطعی	زنجیره تامین پروژه	زمان بندی پروژه			
				مدت زمان	فایده							
(SA و GA)			کمینه کردن هزینه				✓	✓	✓	۱۳۹۳	۱	پرویزی و همکاران [۲۰]
		✓	حداکثر کردن ارزش فعلی خالص				✓		✓	۱۳۹۴	۲	عطار و همکاران [۱۸]
		✓	بیشینه کردن سود و کمینه کردن میزان انتشار گاز کربن دی اکسید				✓	✓	✓	۱۳۹۴	۳	بیانی مجد و همکاران [۶]
NSGA- II		✓	افزایش NPV				✓		✓	۱۳۹۷	۴	قلی زاده و افشار نجفی [۱۲]
GA			کمینه کردن هزینه				✓		✓	۱۴۰۰	۵	موسوی و همکاران [۱۶]
TS·BA·GA			کمینه کردن زمان				✓		✓	۱۴۰۰	۶	ایمان نژاد و آوخ دارستانی [۱۳]
GA، PSO·SA		✓	کمینه کردن متغیرهای کمکی	✓		✓			✓	۱۴۰۱	۷	دانشگری و همکاران [۸]
-	✓		-	✓		✓			✓	۲۰۱۱	۸	برنی و همکاران [۳]
الگوریتم بندرز			کمینه کردن هزینه				✓			۲۰۱۲	۹	لی و ومرا [۱۴]
-			کمینه کردن هزینه		✓	✓			✓	۲۰۱۲	۱۰	چانگسیو و ژینگ فنگ [۷]
GA			کمینه کردن زمان				✓			۲۰۱۳	۱۱	اولریچ [۲۵]
-	✓		کمینه کردن هزینه				✓		✓	۲۰۱۳	۱۲	الیمم و دودین [۹]
هیبرید GA و HS			کمینه کردن هزینه				✓		✓	۲۰۱۴	۱۳	فو [۱۱]
GA			حداکثر کردن پایداری				✓		✓	۲۰۱۴	۱۴	وانگ و همکاران [۲۶]
-			-				✓		✓	۲۰۱۵	۱۵	باسکار و همکاران [۴]
-			کاهش هزینه							۲۰۱۸	۱۶	ساوسار [۲۳]
GA			کمینه کردن زمان				✓		✓	۲۰۲۰	۱۷	لین و همکاران [۱۵]
MO- و IGA SGA و IGA			حداکثر کردن سود				✓	✓	✓	۲۰۲۳	۱۸	اسدوجمان [۲]
SCLGP			کمینه کردن زمان		✓	✓			✓	۲۰۲۴	۱۹	ژانگ و همکاران [۲۹]
-			حداکثر کردن سود					✓	✓	۲۰۲۴	۲۰	اسلامی و همکاران [۱۰]
-			-					✓		۲۰۲۴	۲۱	عطیه علی و همکاران [۱]
الکترومغناطیس			کمینه کردن هزینه	✓	✓	✓		✓	✓	۱۴۰۲	۲۲	تحقیق جاری

مرور تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که فقط سه تحقیق پرویزی و همکاران [۲۰]، اسلامی و همکاران [۱۰] و اسدوجمان [۲] به هر دو جنبه مساله (زمان بندی پروژه و زنجیره تامین پروژه) پرداخته‌اند و دیگر تحقیقات 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 [۸]، برنی و همکاران [۳]، چانگسیو و ژینگ فنگ [۷] و ژانگ و همکاران [۲۹] رویکرد مساله آنان غیر قطعی است. در تحقیق جاری علاوه بر اینکه به هر دو جنبه مساله

پرداخته می‌شود، فعالیت و مدت زمان پروژه نیز غیز قطعی 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 [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 و $1, 2, \dots, K$

مواد مصرفی: M و $1, 2, \dots, M$

فعالیت‌ها: N و $1, 2, \dots, N$

سایر مشتریان: I و $1, 2, \dots, I$

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

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

ب) پارامترها و متغیرهای مرتبط با پروژه

\bar{z}_j = پارامتر مربوط به زمان فازی فعالیت j .

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

$$PredList_{j,jj} = \begin{cases} 1 & \text{اگر } j \text{ پیشنیاز } jj \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

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 سالیانه 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{Earl}_j = 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}_j = 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 فعالیت های 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 تصمیم باینری 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 تصمیم باینری 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 تأمین کنندگان

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

$Oq_{i,m}$: پارامتر بیانگر میزان سفارش آمین مشتری از سایر مشتریان تأمین کننده m .

$ODeadline_{i,m}$: پارامتر بیانگر موعد تحویل مقرر سفارش مشتری i ام. بدین معنی که سفارش مشتری i ام تأمین کننده 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 تأمین کننده m .

$GCPenalty_m$: پارامتر جریمه ناشی از هر واحد زمانی تاخیر در تحویل هر واحد از سفارش پیمانکار.
 hsm_m : پارامتر بیانگر هزینه هر واحد زمانی نگهداری یک واحد موجودی کالای m نزد تامین کننده m .
 $TransCost_m$: هزینه حمل و نقل تامین کننده m است که فرض می شود اگر تامین کننده سفارشات را به موقع آماده نماید، هزینه حمل بر عهده ی خریدار است، اما در صورت وجود تاخیر، حمل بر عهده ی تامین کننده خواهد بود.
 $Alloc_{m,t,st}$: متغیر تصمیم عدد صحیح نامنفی و بیانگر میزان اختصاص یافته از ظرفیت تامین کننده m در زمان st به سفارش مورد نیاز در زمان t . این مقدار در انتهای دوره st آماده ارسال می شود.
 $OAlloc_{m,i,st}$: متغیر تصمیم عدد صحیح نامنفی و بیانگر میزان اختصاص یافته از ظرفیت تامین کننده m در زمان st به سفارش مشتری i . این مقدار در انتهای دوره st آماده می شود.

(د) پارامترها و متغیرهای مالی

PrePayment: پارامتر مربوط به میزان پیش پرداختی که قبل از شروع پروژه، کارفرما به پیمانکار پرداخت می نماید.

اگر پرداخت در حالت PP باشد، پیمانکار و کارفرما در طی مذاکراتی دوره زمانی (پارامتر Step) را مشخص می نمایند 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، پرداخت هایی صورت می پذیرد. این روند تا پایان پروژه ادامه می یابد که بعد از اتمام پروژه بدون در نظر گرفتن Step، وضعیت پروژه را بررسی و آخرین پرداخت را انجام می دهند.

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

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 زمان های پرداخت است که این متغیر بدین ترتیب محاسبه می شود:

در حالت PP، O_f برابر است با مجموع جریان مالی مثبت مرتبط با فعالیت هایی که از زمان پرداخت قبلی تا این دوره پرداخت، به اتمام می رسند. این متغیر این گونه محاسبه می شود:

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

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

Rate: هزینه ای که هر واحد وام گرفتن به پیمانکار تحمیل می کند.

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 می گردد:

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

CompActHolding = هزینه نگهداری فعالیت های تمام شده و به عبارتی هزینه نگهداری ارزش قسمت های انجام شده پروژه برای پیمانکار. داریم:

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

OrderingCost = هزینه سفارش دهی 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:

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

FinCost = هزینه پیمانکار ناشی از وام های دریافتی، داریم:

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

Sup_HoldingCost = هزینه نگهداری موجودی تأمین کننده. هزینه نگهداری موجودی تأمین کننده در صورتی ایجاد می گردد 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 تاخیر در برآورده سازی بموقع سفارشات است. این هزینه زمانی ایجاد می شود 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/ تعجیل در سفارشات سایر مشتریان و جمله دوم مربوط به تأخیر در سفارشات پیمانکار است.

مدل ریاضی پیشنهادی

تابع هدف

+ Sup_IHoldingCost + Sup_DelayCost

رابطه (۱۳)

محدودیت‌ها

S.T:

$$\sum_{t=Earl_j}^{\overline{Late}_j} t \times X_{j,t} + \overline{Z}_{jj} - \sum_{t=Earl_{jj}}^{\overline{Late}_{jj}} t \times X_{jj,t} \leq 0 \quad \forall (j, jj) | PredList_{j,jj} = 1 \quad (14) \text{ رابطه}$$

$$\overline{Z}_{Act 1} - \sum_{t=Earl_{Act 1}}^{\overline{Late}_{Act 1}} t \times X_{Act 1,t} \leq 0 \quad (15) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{t=Earl_j}^{Late_j} X_{j,t} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (16) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{tt \geq t}^{tt < t+Z_j} ResUse_{j,k} \times X_{j,tt} \leq ResMax_k \quad \forall t, k \quad (17) \text{ رابطه}$$

$$WW_t \geq WW_{t-1} + \sum_{j=1}^J w_j \times X_{j,t} \quad t = 1, 2, \dots, Horizon \quad (18) \text{ رابطه}$$

$$WW_t \geq WW_{t-1} + \sum_{j=1}^J w_j \times X_{j,t} - \sum_{j=1}^J \left(w_j \times \sum_{tt=Earl_j}^t X_{j,tt} \right) \quad t = Earl_j + 1, \dots, GCHorizon \quad (19) \text{ رابطه}$$

$$I_t \geq I_{t-1} + \sum_{stt=1}^{L_m-1} \lambda_{m,t} \times Alloc_{m,t,stt} + \sum_{\substack{tt=1 \\ tt \leq t+Z_j-1}}^{t-1} \lambda_{m,tt} \times Alloc_{m,tt,t-L_m-1} - \sum_{j=1}^J \left(Muse_{j,m} \times \sum_{tt \geq t} X_{j,tt} \right) \quad \forall t, m \quad (20) \text{ رابطه}$$

$$Big \times \lambda_{m,t} - q_{m,t} \geq 0 \quad (21) \text{ رابطه}$$

$$B_t = B_{t-1} + O_t + U_t - \sum_{m=1}^M \lambda_{m,t} * Gm - \sum_{m=1}^M MatCost(m) \times q(m, t) - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \left(ResCost(k) \times ResUse(j, k) \times \sum_{tt \geq t}^{tt \leq t+Z_j-1} X_{j,tt} \right) \quad \forall t \quad (22) \text{ رابطه}$$

$$- \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \left(ResCost(k) \times ResUse(j, k) \times \sum_{\substack{tt \leq t_1 + Z_j - 1 \\ tt \geq t_1}} X_{j, tt} \right) \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

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

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

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

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

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

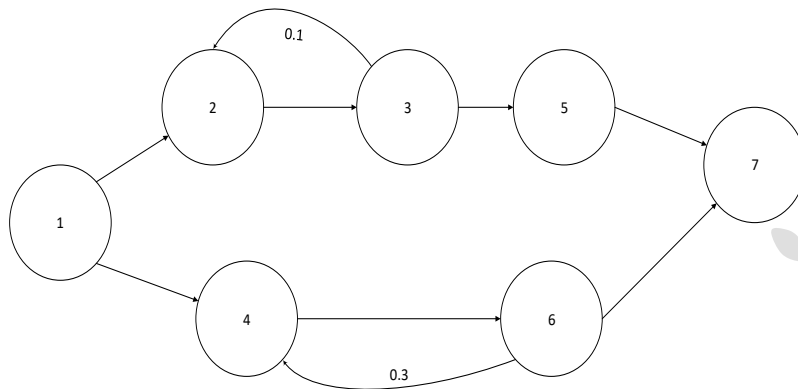
$$OAlloc_{m, i, st}, Alloc_{m, tt, st}, q_{m, t}, U_t = \{0, 1, 2, \dots\} \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

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 پیش‌پرداختی 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.

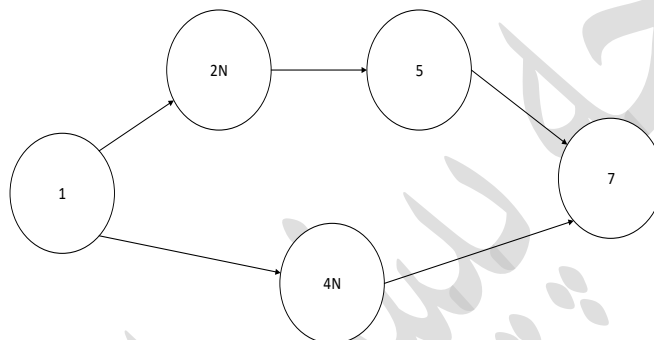
۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

حل مسئله در ابعاد کوچک

برای آزمون صحت و درستی مدل پیشنهادی، یک مسئله با ابعاد کوچک طراحی شده است که توسط نرم‌افزار اِیْمِز تحلیل می‌گردد.



شکل ۱. شبکه پروژه مسئله نمونه



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

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		فعالیت
	منبع کاری ۲	منبع کاری ۲	منبع کاری ۱	قطعی	فازی	
۷۰	۶	۴	۳	۳	(۳ و ۴ و ۱)	۱
۱۰۰	۲	۵	۲	۸	(۴ و ۷ و ۹ و ۱۲)	۲.N
۵۰	۰	۶	۰	۹	(۴ و ۹ و ۱۱ و ۱۴)	۴.N
۹۰	۰	۴	۵	۴	(۲ و ۳ و ۴ و ۵)	۵
۸۰	۸	۵	۳	۳	(۱ و ۳ و ۴ و ۵)	۷
۲۰	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	هزینه هر واحد		

جدول ۳. اطلاعات کلی مسئله

حد اکثر 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 تأمین کننده

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

در مسئله بالا نیز کارفرما ۴۰۱۷۰ واحد پولی را به عنوان پیش پرداخت به پیمانکار می دهد.

جدول ۵. نتایج حل مسئله نمونه

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

جدول ۶. زمان بندی تولید تأمین کننده برای سفارشات سایر مشتریان در روش یکپارچه و حالت PP

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

جدول ۷. زمان بندی تولید تأمین کننده برای سفارشات پیمانکار در روش یکپارچه و حالت PP

St	t	q	St	t	q	St	t	q	St	t	q
۰۱	۰۴	۷۰	۰۶	۰۹	۱۰۰	۱۱	۱۴	۱۵۰	۱۶	۱۹	۸۰
۰۲	۰۵	۷۰	۰۷	۱۰	۱۵۰	۱۲	۱۵	۱۴۰	۱۶	۲۰	۱۰
۰۳	۰۶	۷۰	۰۸	۱۱	۱۵۰	۱۳	۱۶	۱۴۰	۱۷	۲۰	۷۰
۰۴	۰۷	۱۰۰	۰۹	۱۲	۱۵۰	۱۴	۱۷	۱۴۰	۱۷	۲۱	۸۰
۰۵	۰۸	۱۰۰	۱۰	۱۳	۱۵۰	۱۵	۱۸	۱۴۰			

مقدار هزینه نهایی برابر با ۸۲۶۴۸۸۰- می باشد. منفی بودن مقادیر هزینه به این معناست که با توجه به زمان بندی فعالیت ها و سفارش مواد و نیز نوع پرداخت PP، پاداشی که پیمانکار به خاطر تحویل زودتر از موعد پروژه دریافت می نماید از سایر هزینه بیشتر می شود.

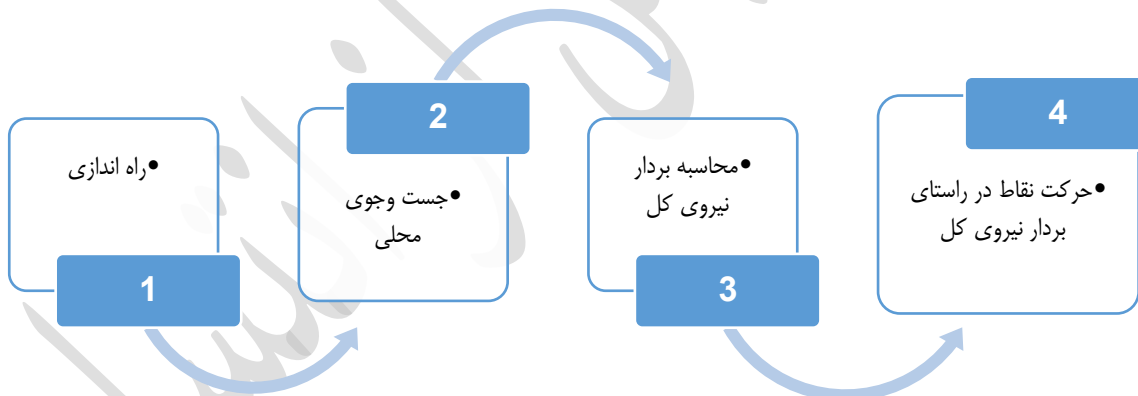
روش حل مسئله در ابعاد بزرگ

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]، همانند الگوریتم ژنتیک یک روش مبتنی بر جمعیت است. در این روش هر نقطه یک ذره باردار در فضا فرض شده است، مقدار بار آن نیز بر اساس مقدار تابع هدف آن تعیین می‌گردد. پس از تعیین بار هر نقطه از جمعیت، برآیند نیروی وارد بر نقاط و برای حرکت آن‌ها در هر تکرار مشخص می‌گردد. همانند نیروهای الکترومغناطیس، برآیند نیروی وارد بر هر نقطه، از جمع برداری تمام نیروهای وارد بر آن به دست می‌آید. الگوریتم الکترومغناطیس به منظور حل مسائلی با متغیرهای حقیقی و محدود طراحی شده است. 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 شامل چهار فاز اصلی راه‌اندازی، جستجوی محلی، محاسبه نیروی وارد بر ذره و حرکت در بردار نیرو است که در ادامه به بررسی کامل هر یک می‌پردازیم [۲۷].



شکل ۳: مراحل اصلی الگوریتم الکترومغناطیس

الف) راه‌اندازی. در آغاز الگوریتم الکترومغناطیس، مشابه سایر روش‌های مبتنی بر جمعیت، m نقطه تصادفی از فضای شدنی مسئله انتخاب می‌شود. به منظور تولید یک نقطه تصادفی فرض می‌شود هر مؤلفه نقطه، یک متغیر تصادفی با تابع توزیع یکنواخت بین حد پایین و بالای خود بوده، سپس برای هر مؤلفه یک مقدار تصادفی انتخاب می‌گردد. پس از ایجاد این مجموعه، مقدار تابع هدف برای هر نقطه محاسبه و بهترین نقطه به عنوان x^{best} نشان داده می‌شود.

ب) جست‌وجوی محلی. این مرحله به منظور بررسی فضای اطراف هر یک از نقاط ایجادشده صورت می‌پذیرد. بیربیل و فنگ (۲۰۰۳) به ارائه یک الگوریتم ساده به‌منظور جستجوی محلی پرداختند. در روش ارائه‌شده از سوی آن‌ها، برای هر یک از ابعاد نقاط ایجادشده، قدمی

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

تصادفی برای افزایش یا کاهش بعد موردنظر برداشته می‌شود. این قدم به شکل تصادفی انتخاب می‌شود. پس از اجرای این مرحله، اگر نقطه جدید ایجاد شده، تابع هدف بهتری را فراهم آورد با نقطه قبلی جایگزین شده و برای بعد بعدی، فرایند جستجو انجام می‌شود. در غیر این صورت، نقطه اولیه حفظ و جستجو برای همین بعد تکرار می‌گردد.

ج) محاسبه بردار نیروی کل. بر اساس تئوری الکترومغناطیس، نیرویی که دو ذره باردار بر هم وارد می‌کنند، با مجذور فاصله آن‌ها نسبت عکس و با مقدار بار هریک از آن‌ها نسبت مستقیم دارد. در این الگوریتم، در هر تکرار، بار نقاط بر اساس رابطه زیر تعیین 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، قدرت جذب یا دفع آن نقطه را تعیین می‌کند. نقاطی که دارای مقدار تابع هدف بهتری هستند، بار بیشتری خواهند داشت. بنابراین، در هر تکرار بیشترین بار متعلق به x^{best} خواهد بود. با توجه به فرمول مورداستفاده، بار یک نقطه ممکن است در دو تکرار مختلف متفاوت باشد. نکته قابل توجه اینکه برخلاف بارهای الکتریکی، بار نقاط در این روش هیچ علامتی نداشته، برای نیروی وارد بر هر جفت نقطه پس از مقایسه مقدار تابع هدف آن‌ها تعیین می‌شود. بین هر جفت نقطه، نقطه‌ای که تابع هدف بهتری دارد، نقطه دیگر را جذب و نقطه‌ای که تابع هدف بدتری دارد، نقطه دیگر را دفع می‌کند و در صورتی که توابع هدف برابر باشند، نقاط نیرویی به هم وارد نخواهند کرد. لذا در هر تکرار نقطه‌ای که بهترین مقدار هدف را دارد، سایر نقاط را جذب و نقطه‌ای که بدترین مقدار هدف را دارد، سایر نقاط را دفع می‌کند. مقدار نیروی وارده از طرف نقطه j به نقطه i به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

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

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 تعیین بردار نیروی کل برای تمام نقاط، هر یک از نقاط در راستای نیروی وارده (به‌اندازه‌ای که به صورت تصادفی انتخاب می‌شود)، حرکت می‌کند. مختصات نقاط جدید از رابطه زیر حاصل می‌شود.

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

در رابطه بالا، از تقسیم بردار نیروی کل وارد بر هر نقطه به اندازه آن، بردار راستای حرکت آن نقطه حاصل می‌شود که اندازه‌ای برابر با یک دارد. 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 مورد نظر نخواهم داشت. حاصل ضرب α و RNG برداری است تصادفی که حرکت نقطه با آن، شدنی بودن نقطه جدید را تضمین می‌کند. میزان جابجایی نقاط در راستای نیرو، به این علت به شکل تصادفی انتخاب می‌شود که تمامی نقاط در راستای نیرو شانس بررسی را داشته باشند. در هر تکرار، x^{best} تنها نقطه‌ای است که جابجا نشده و عیناً به تکرار بعد منتقل می‌شود. بنابراین می‌توان از محاسبه نیروهای وارد بر این نقطه چشم‌پوشی کرد.

نحوه نمایش جواب. اولین گام در به کارگیری و پیاده‌سازی هر الگوریتم فرابتنکاری، 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	بیش 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

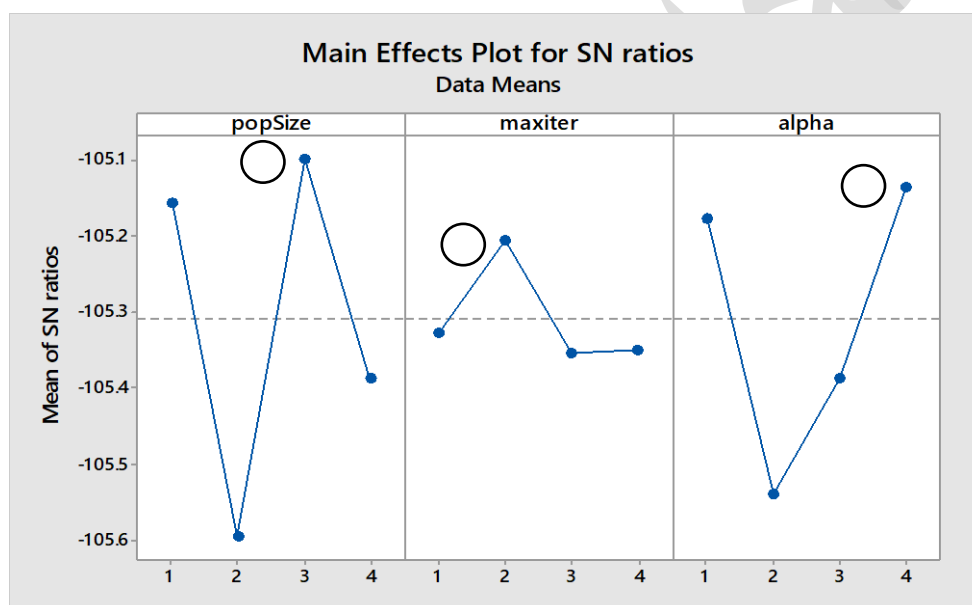
مشتری	۱		۲		۳	
	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲
میزان سفارش	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰
موعد تحویل	۴۰۰	۴۰۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۴۰۰

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

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

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

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

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

جدول ۱۵. نتایج زمان‌بندی فعالیت‌های مطالعه موردی توسط الگوریتم الکترومغناطیس

¹ Relative percentage deviation

فعالیت	زمان شروع	فعالیت	زمان شروع	فعالیت	زمان شروع
۱	[۴و۴و۴]	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	[۴۳و۶۰و۶۶و۱۱۲]	۲۱	[۹۶و۱۴۹و۲۰۸و۲۶۶]	۳۴	[۱۳۹و۲۱۵و۳۰۰و۳۸۱]
۹	[۴۵و۶۹و۹۰و۱۱۷]	۲۲	[۱۰۵و۱۶۴و۲۳۱و۲۹۵]	۳۵	[۱۴۱و۲۱۸و۳۰۴و۳۸۶]
۱۰	[۴۸و۷۴و۹۷و۱۲۶]	۲۳	[۱۰۷و۱۶۷و۲۳۵و۳۰۰]	۳۶	[۱۴۵و۲۲۴و۳۱۱و۳۹۸]
۱۱	[۵۱و۷۸و۱۰۳و۱۳۳]	۲۴	[۱۰۹و۱۷۰و۲۳۹و۳۰۵]	۳۷	[۱۴۹و۲۲۴و۳۱۷و۴۰۹]
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

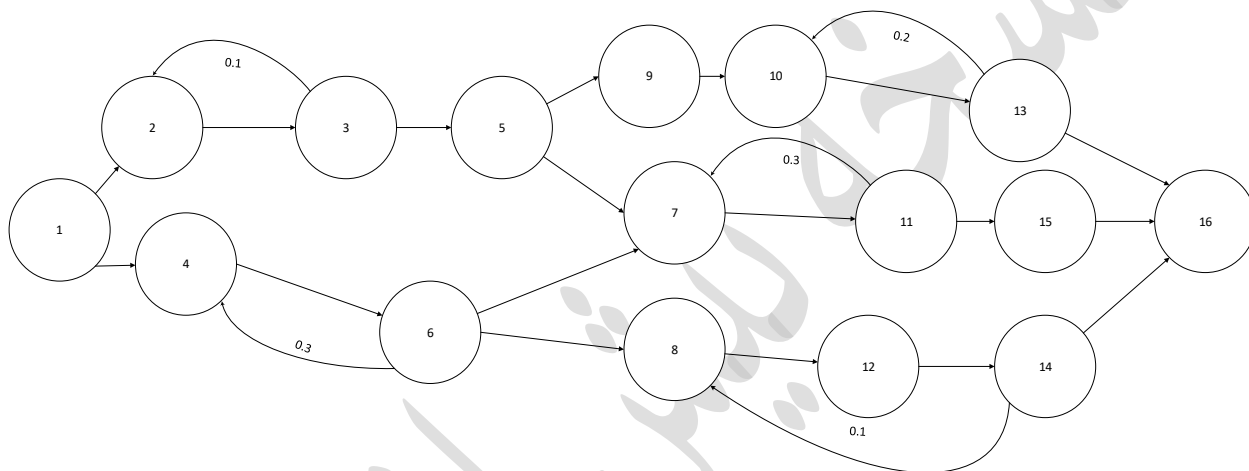
ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش	ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش
۱	۷۹	۲۰	۴	۲۰۴	۷
۲	۱۴۶	۱۵	۵	۲۴۵	۳
۳	۲۰۲	۳	۶	۲۴۷	۲

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

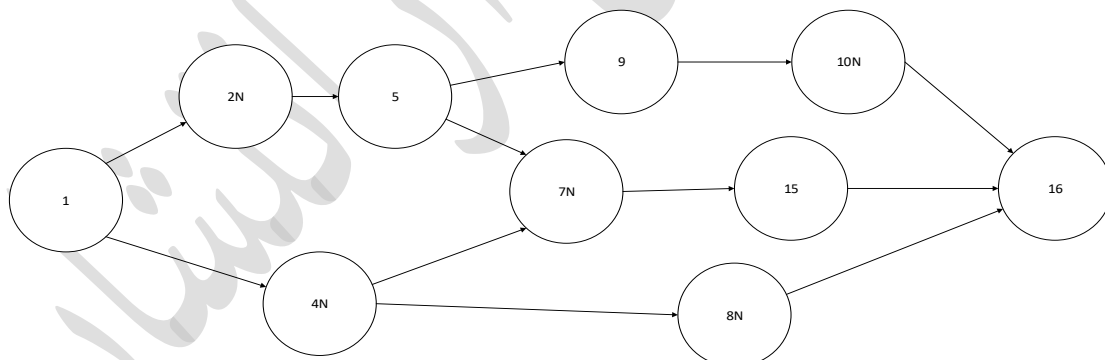
ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش	ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش	ردیف	زمان سفارش	مقدار سفارش
۱	۲۷۰	۱۰	۱۱	۳۰۳	۶	۲۱	۳۳۱	۷
۲	۲۷۳	۱۰	۱۲	۳۰۴	۶	۲۲	۳۳۲	۱۴
۳	۲۷۵	۴۰	۱۳	۳۰۵	۶	۲۳	۳۳۴	۲۱
۴	۲۸۳	۲۰	۱۴	۳۰۶	۱۲	۲۴	۳۳۷	۴۲
۵	۲۸۷	۵	۱۵	۳۰۸	۱۲	۲۵	۳۳۳	۷
۶	۲۸۸	۵	۱۶	۳۱۰	۱۲	۲۶	۳۳۴	۷
۷	۲۸۹	۲۰	۱۷	۳۱۲	۱۸	۲۷	۳۳۵	۲۱
۸	۲۹۴	۲۴	۱۸	۳۱۵	۱۲	۲۸	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

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

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	ماده ۱	ماده ۲
۱	(۱و۳و۴)	۳	۳	۴	۶	۷۰	۷۰
۲.N	(۱و۹و۱۲و۴)	۸	۲	۵	۲	۱۰۰	۱۰۰
۴.N	(۱و۱۱و۱۴و۴)	۹	۰	۶	۰	۵۰	۵۰
۵	(۲و۳و۴و۵)	۴	۵	۴	۰	۹۰	۹۰
۷.N	(۳و۷و۱۰و۱۳و۳)	۳	۳	۵	۸	۸۰	۸۰
۸.N	(۴و۹و۱۲و۱۶و۴)	۱۰	۳	۴	۶	۷۰	۷۰
۹	(۱و۲و۳و۵و۱)	۳	۲	۵	۲	۱۰۰	۱۰۰
۱۰.N	(۶و۱۰و۱۳و۱۵و۶)	۱۱	۰	۶	۰	۵۰	۵۰
۱۵	(۱و۲و۳و۴و۱)	۳	۵	۴	۰	۹۰	۹۰
۱۶	(۱و۲و۳و۵و۱)	۳	۳	۵	۸	۸۰	۸۰
هزینه هر واحد			۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۲۰	۲۰

جدول ۲۰. اطلاعات مربوط به سایر مشتریان تأمین کننده

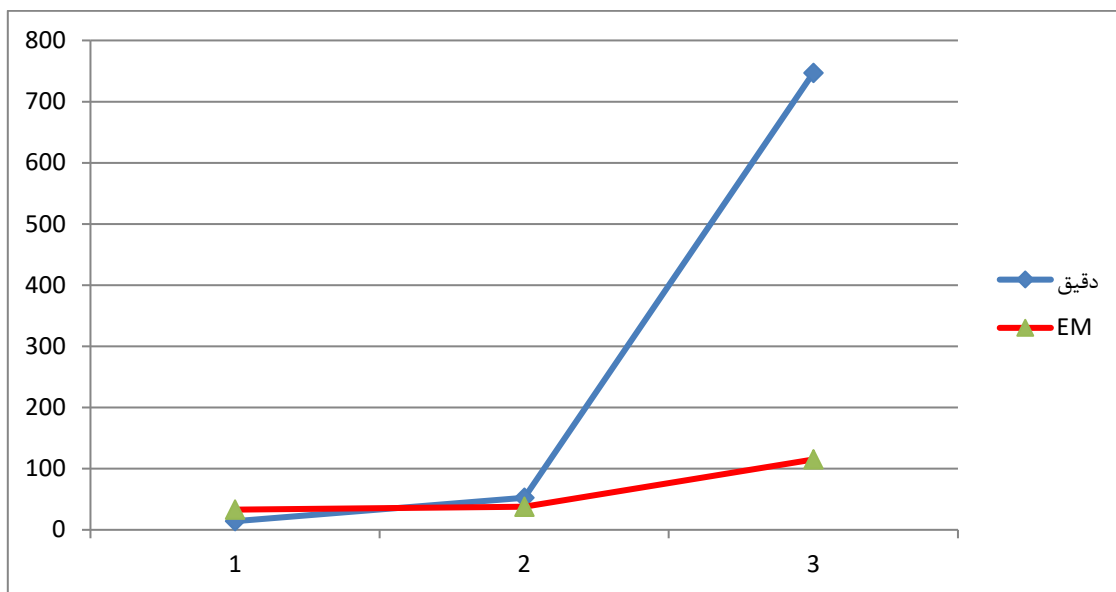
مشتری		۱		۲		۳	
ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲	ماده ۱	ماده ۲
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰

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

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

میانگین الگوریتم الکترومغناطیس	AIMMS	مقادیر تابع هدف	اختلاف نسبی
-۸۲۰۴۸۷۰	-۸۲۵۶۱۲۰	زمان حل (ثانیه)	۰.۰۰۶
۳۳	۱۴.۱۳	مقادیر تابع هدف	
-۷۹۹۶۸۸۰	-۷۹۱۱۲۰۰	زمان حل (ثانیه)	۰.۰۰۱
۳۸	۵۲.۲۶	مقادیر تابع هدف	
-۲۴۳۸۲۶۸۴	-۲۴۶۸۸۱۳۴	زمان حل (ثانیه)	۰.۰۱۲
۱۱۵	۷۴۷.۳۷	مقادیر تابع هدف	

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود الگوریتم ارائه شده با توجه به زمان حل، عملکرد قابل قبولی را نشان می دهد. 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 نرم افزار 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 نرم افزار به طور نمایی افزایش پیدا می کند. همچنین نتایج جدول ۲۱ نشان می دهد که اختلاف نسبی الگوریتم فراابتکاری نسبت به نرم افزار دقیق ایمز بین ۰.۰۰۰۶ تا ۰.۰۰۱۲ (یعنی بین ۰.۶ درصد تا ۱.۲ درصد) می باشد.



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 انجام پروژه در زمان تکمیل موفقیت‌آمیز پروژه از طرف کارفرما به پیمانکار پرداخت می‌شود. 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].

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.

1 Lump-Sum Payment (LSP)

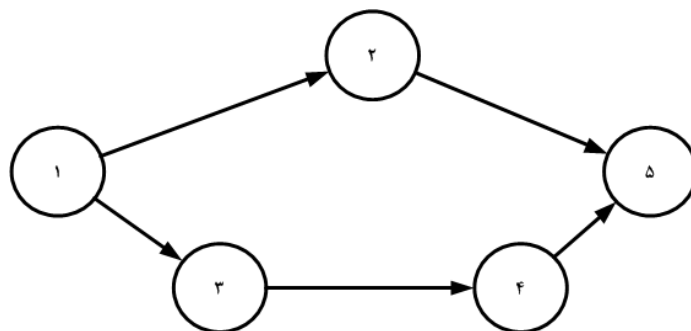
2 Payments at Event Occurrence (PEO)

3 payments at activity completion times (PAC)

4 Payment at Equal Time Intervals (ETI)

5 Progress Payments (PP)

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 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.



شکل ۹. شبکه پروژه مساله نمونه

جدول ۲۲. اطلاعات فعالیت‌ها و منابع مساله نمونه

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

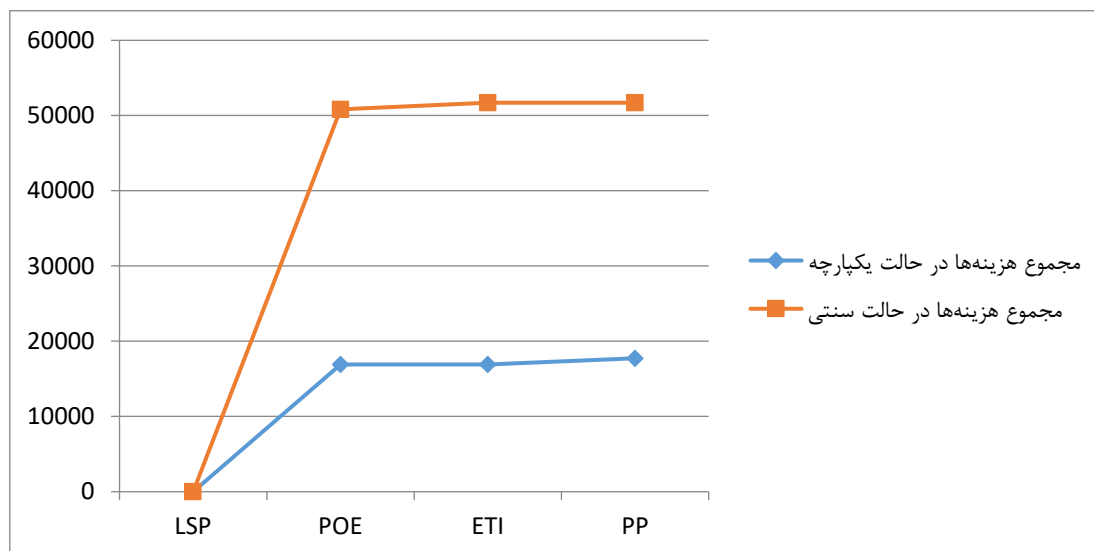
جدول ۲۳. اطلاعات کلی مساله نمونه

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

فرض شده است 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 بدین صورت است:

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 زنجیره‌تامین 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. and 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.

نسخه پیش از انتشار