Journal of Structural and Construction Engineering, 9(3), 2022, pp. 43-64

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Optimizing Project Selection using Tabu Search Algorithm according to Time, Cost and Quality and Resource Constraints in the Critical Chain Method

M. R. Shahraki[1]*, J. Charvideh[2]

1- Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran
2- M.Sc. Student of Industrial Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

ABSTRACT

Completing the project in the shortest possible time, at the lowest cost, at the highest level of quality, can play a decisive role in profitability and competition. Time, cost and quality are the most important goals of any project, and their optimization is one of the topics in project planning and control. The aim of this study is to find the optimal combination of time, cost and quality in conditions of limited resources. The theory of constraints in project management has led to a new approach to project management and control called the critical chain. In this research, using the critical chain technique and the high ability of the tabu search algorithm (TS) in optimization, the problem of multi-objective optimization of time, cost and quality in conditions of resource constraints is solved. The proposed algorithm was extracted with MATLAB software and the desired results were extracted. To validate the proposed model, two case studies with 7 and 18 activities have been solved. Also, a project with 60 activities in which time, cost and quality optimization was done, was used to validate the proposed algorithm in the research and the results were extracted and compared. The results showed that the tabu search algorithm had a correct and acceptable performance. In such a way that it has the ability to create multiple Pareto answers with different values of the three objective functions of time, cost and quality. This allows project managers to choose the best solution in terms of time, cost and quality according to their needs and policies.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 February 2021
Revise Date: 01 October 2021
Accept Date: 24 October 2021

Keywords: *Critical Chain*
Resource constraints
time-cost-quality optimization
project management
tabu search algorithm

doi: 10.22065/JSCE.2021.274317.2368

*Corresponding author: Mohammad Reza Shahraki
Email address: mr.shahraki@eng.usb.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

بهینه‌سازی انتخاب پروژه با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع با توجه به زمان، هزینه و کیفیت و محدودیت منابع در روش زنجیره بحرانی

جلیل چرویده[۱]، محمد رضا شهرکی*[۲]

۱- دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

انجام پروژه در کوتاه‌ترین زمان ممکن، با کمترین هزینه، در بالاترین سطح از کیفیت، می‌تواند در سوددهی و رقابت نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد. زمان، هزینه و کیفیت مهم‌ترین اهداف هر پروژه به شمار می‌آیند، که بهینه‌سازی آنها از جمله مباحث در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه می‌باشد. هدف این تحقیق یافتن بهینه‌ترین ترکیب زمان، هزینه و کیفیت در شرایط محدودیت منابع می‌باشد. تئوری محدویت‌ها در مدیریت پروژه باعث ایجاد رویکرد نوینی در مدیریت و کنترل پروژه‌ها با عنوان زنجیره بحرانی شده است. در این پژوهش، با استفاده از تکنیک زنجیره بحرانی و توانایی بالای الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) در بهینه‌سازی، به حل مسئله چند هدفه بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت در شرایط محدودیت منابع پرداخته شده است. الگوریتم پیشنهادی با نرم افزار متلب کدنویسی و نتایج مورد نظر استخراج شد. برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی نیز، دو مطالعه موردی با ۷ و ۱۸ فعالیت حل شده است. همچنین از یک پروژه با ۶۰ فعالیت که بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت در آن صورت پذیرفته بود، برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی در تحقیق استفاده شده است و نتایج، استخراج و مقایسه صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که الگوریتم جستجوی ممنوع عملکرد صحیح و قابل قبولی داشته است. به گونه‌ای که قابلیت ایجاد چندین جواب پارتو با مقدارهای متفاوت سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت را دارد. که این امر به مدیران پروژه این اجازه را می‌دهد که با توجه به نیاز و سیاست‌های خود از نظر زمانی، هزینه‌ای و کیفی بهینه‌ترین جواب را انتخاب نمایند.

کلمات کلیدی: زنجیره بحرانی، محدودیت منابع، بهینه‌سازی زمان-هزینه-کیفیت، مدیریت پروژه، الگوریتم جستجوی ممنوع.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۹/۱۲/۰۵	۱۴۰۰/۷/۰۹	۱۴۰۰/۸/۰۲	۱۴۰۰/۸/۰۲	۱۴۰۱/۳/۳۱	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.274317.2368
					doi: 10.22065/JSCE.2021.274317.2368

*نویسنده مسئول: محمد رضا شهرکی
پست الکترونیکی: mr.shahraki@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

در مدیریت پروژه با منابع محدود، توانایی به حداقل رساندن زمان و هزینه اجرا و به حداکثر رساندن کیفیت پروژه می‌تواند در سوددهی نقش بسزایی ایفا نماید [۱]. برنامه‌ریزی پروژه در زمان انجام چند پروژه بصورت همزمان، به دنبال تعیین ترکیب و توالی مناسب برای انجام فعالیت‌های پروژه است، به گونه‌ای که محدودیت‌های تقدم و تاخر شبکه پروژه به طور همزمان ارضا شوند و معیار سنجش معینی نظیر زمان اجرای پروژه، هزینه کل، و کیفیت اجرای پروژه‌ها بهینه شوند [۲]. به طور کلی مدیریت و برنامه‌ریزی اجرای فعالیت‌ها و استفاده از منابع مورد نیاز در یک پروژه، نیازمند تحلیل‌های متنوعی می‌باشد که یکی از آنها مدلسازی جهت انتخاب صحیح هزینه و زمان انجام پروژه می‌باشد. این مسئله کمک شایانی به مدیریت بهینه پروژه و تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی خواهد نمود [۳]. زمان، هزینه و کیفیت سه معیار اصلی برای موفقیت یک پروژه هستند، که همه مدیران و برنامه‌ریزان پروژه‌ها برای کسب موفقیت در اجرای پروژه‌ها، همواره به دنبال اتمام پروژه‌ها در کمترین زمان، با کمترین هزینه، و در بالاترین سطح از کیفیت می‌باشند. انتخاب مدلی مناسب جهت یافتن ترکیب بهینه زمان، هزینه و کیفیت پروژه، از چالش اصلی پیش روی مدیران پروژه می‌باشد [۴]. چگونگی بهینه‌سازی سه هدف زمان، هزینه و کیفیت در پروژه‌ها و اینکه صرف هزینه بیشتر در پروژه‌ها تا چه حد باعث کاهش مدت زمان اجرای پروژه‌ها و همچنین افزایش سطح کیفی آن‌ها خواهد شد، موضوع اصلی این مطالعه می‌باشد. به دلیل تغییرات محیط بیرونی نظیر آب و هوا، کمبود فضا، حوادث طبیعی و غیره، زمان و هزینه اجرای پروژه‌ها همواره با عدم قطعیت همراه هستند که باعث انحراف اجرا از برنامه زمانبندی می‌گردد، که رویکرد زنجیره بحرانی، رویکرد پیشگیرانه‌ی در مواجهه با این عدم قطعیت می‌باشد [۵]. مسئله بهینه‌سازی در شرایط چند پروژه‌ای و محدودیت منابع یک مسئله بهینه‌یابی ترکیبی است که به لحاظ پیچیدگی در رده مسائل *NP-Hard* قرار می‌گیرد [۶ و ۷]. در این تحقیق، مسئله انتخاب یک پروژه از بین چندین پروژه با توجه به محدودیت منابع و بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت در روش زنجیره بحرانی[1] است. سپس برای حل مسئله از روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی ممنوع[2] استفاده می‌گردد.

در ادامه این پژوهش و در بخش ۲، به بررسی پیشینه تحقیق، در بخش ۳ به معرفی الگوریتم جستجوی ممنوع پرداخته شده است. در بخش ۴ نحوه تولید جواب اولیه و محاسبه تابع هدف و نتایج بکارگیری روش در الگوریتم پیشنهادی بررسی شد. در بخش ۵، به بحث و نتیجه گیری پرداخته شده است.

۲- ادبیات و پیشینه تحقیق

یک پروژه مجموعه‌ای از فعالیت‌ها می‌باشد که به منظور دستیابی به اهدافی خاص بر روی مواد اولیه عملیاتی می‌شوند [۸]. مدیریت پروژه با تکنیک زنجیره بحرانی، رویکردی جدید در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه است که در سال ۱۹۹۷ توسط گلدرات در کتاب زنجیره بحرانی ارائه شده است. این روش بسطی از تئوری محدودیت‌ها[3] (*TOC*) است که به طور خاص برای محیط پروژه طراحی شده است. زمان، هزینه و کیفیت از مهم‌ترین جنبه‌های یک پروژه هستند، که در پروژه‌های ساخت‌وساز مورد توجه می‌باشند.

تاکنون مدل‌های زیادی در زمینه برنامه‌ریزی پروژه‌ها جهت بهینه کردن سه فاکتور زمان، هزینه و کیفیت توسعه داده شده است. *Valls* و همکاران در سال ۲۰۰۳ برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع، الگوریتم فراابتکاری جدیدی ارائه نمودند که از الگوریتم جستجوی ممنوع و استراتژی جستجوی جغرافیایی فضای جواب بهره می‌برد [۹]. *Hazir* و همکاران در سال ۲۰۱۰ مسئله موازنه زمان هزینه پایدار که در آن فعالیت‌ها به صورت چند حالته می‌باشد، را مورد بررسی قرار دادند. میزان کارایی رویکرد پیشنهادی، از طریق حل دیگر مسائل پایدار مانند جریمه دیرکرد و پاداش زودکرد بررسی گردید [۱۰]. *Anagnostopoulos* و *Kotsikas* در سال ۲۰۱۰ برای حداقل‌سازی هزینه کل مسئله موازنه زمان-هزینه یک الگوریتم شبیه سازی تبرید ارائه دادند. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده این است که تکنیک ارائه شده برای حل مسائل، در شرایط واقعی می‌باشد [۱۱]. *Golghamat Raad* و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحقیقی با عنوان انتخاب سبدی از پروژه‌ها با در نظر گرفتن بهینه‌سازی و تعادل سبدهای فرعی انجام دادند. آنها در مطالعه خود از ابزارهای داده کاوی برای دسته‌بندی پروژه‌ها در سبدهای فرعی و رتبه‌بندی آنها استفاده نمودند و با الگوریتم *NSG ll* حل نمودند. [۱۲]. حسامی و مولایی در سال

[1] Critical Chain
[2] Tabu Search Algorithm
[3] Theory of Constraints

۱۳۹۴ به بررسی زمان–هزینه در پروژه‌های راه‌سازی براساس تفکر ناب با حذف اتلاف‌ها پرداختند و به منظور حل مدل از روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب و رویکرد فازی بدلیل وجود عدم قطعیت‌ها استفاده نمودند [۱۳]. طاهری و امیری در سال ۲۰۱۸ مسئله موازنه زمان–هزینه–کیفیت در روش زنجیره بحرانی را در شرایط محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب در شرایط چند پروژه‌ای حل نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم ارائه شده عملکرد مناسبی به منظور حل مسئله زمان–هزینه در شرایط محدودیت منابع دارد [۱۴]. مهدوی و همکاران در سال ۱۳۹۸ در پژوهش خود مسئله موازنه زمان و هزینه زمانبندی پروژه در شرایط محدودیت بودجه را بررسی نمودند. برای این کار الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای پیدا کردن بهینه اقدامات اصلاحی استفاده نموده و نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قابلیت حل مسئله به‌طور دقیق را داشته، چرا که فاصله بین جواب مسائل نمونه در سطوح بودجه مختلف صفر بوده است [۳]. طاهری امیری و همکاران در سال ۱۳۹۸ به موازنه زمان–هزینه–کیفیت در روش زنجیره بحرانی با فعالیت‌های چند حالته با استفاده از الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که الگوریتم توسعه داده شده، قابلیت ایجاد چندین جواب پارتو با مقادیر مختلف سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت را دارد [۱۵]. حقیقی و همکاران در سال ۱۳۹۹ در تحقیق خود برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای با منابع محدود در مدل زنجیره بحرانی را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک مدل بهینه سازی چند هدفه برای حل مشکل ارائه نمودند که اهداف تعیین شدهٔ آن، زمان، هزینه وکیفیت فعالیت‌های پروژه بود و از رویکرد زنجیره بحرانی به عنوان روش مدیریت پروژه، جهت برنامه‌ریزی پروژه و از الگوریتم فراابتکاری انبوه ذرات برای حل مدل استفاده شد [۱۶]. طاهری امیری و همکاران در سال ۱۳۹۹ به بررسی معیارها و شاخص‌های مربوط به انتخاب بهترین پروژه‌های ساخت حوزه پرداختند. معیارهایی که آنها شامل سهولت در اجرا، زمان، مالی، موقعیت جغرافیایی، اهمیت سازه و حسن شهرت کارفرما بودند. آنها از روش بهترین-بدترین برای وزن‌دهی گزینه‌ها و از روش ویکور برای حل مسئله ارزیابی و اولویت‌بندی پروژه‌های ساخت استفاده نموده‌اند. پس از حل مدل ریاضی توسعه داده شده مشخص شد که انتخاب پروژه‌ها متناسب با سناریوهای در نظر گرفته شده، انجام گرفته و عملکرد درستی دارد [۱۷].

با توجه به مرور پیشینه بیان شده، مدل‌های ارائه شده در تحقیقات گذشته برای مسائل بهینه‌سازی انتخاب پروژه، در شرایط محدودیت منابع به زمان ختم فعالیت‌ها با اعمال تأثیر متقابل فعالیت‌های پروژه بر یکدیگر و همچنین بررسی تأثیر زمان اتمام پروژه نسبت به هزینه و کیفیت پروژه‌ها توجه ننموده که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. در زمینهٔ حل مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت، الگوریتم‌های فراابتکاری مختلفی جهت بهینه‌سازی آن‌ها توسعه داده شده است؛ مانند الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات طاهری امیری و همکاران [۱۵]، الگوریتم ژنتیک توسط مهدوی و همکاران [۳]. اما مقالات اندکی وجود دارد که با استفاده از مدل‌های چند هدفه به حل مسئله بهینه‌سازی انتخاب پروژه با توجه به زمان، هزینه و کیفیت با در نظر گرفتن تاثیر متقابل فعالیت‌های پروژه بر یکدیگر و همچنین تأثیر زمان ختم پروژه نسبت به هزینه و کیفیت پروژه‌ها پرداخته باشد. به این منظور یک مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله بهینه‌سازی انتخاب پروژه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی ممنوعه در سطح توالی و حالت‌های اجرای فعالیت‌ها ارائه شد. در این مطالعه بر خلاف اکثر پژوهش‌های پیشین، با در نظر داشتن پروژه‌ها قابل انقطاع، اجرای همزمان و برنامه‌ریزی در سطح فعالیت‌ها می‌باشند.

۳- الگوریتم جستجوی ممنوع (*TS*)

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی همچون مسائل بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت بطور ذاتی پیچیده بوده و جزء مسائل *NP-Hard* به شمار می‌روند، که حل آنها نیازمند زمان محاسباتی زیادی می‌باشد. با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها و مسائل بهینه‌سازی از یک طرف و پیشرفت کامپیوتر و قابلیت‌های محاسباتی از طرف دیگر، استفاده از روش‌های ابتکاری و جستجوگرهای هوشمند اجتناب ناپذیر شده است [۱۸]. الگوریتم جستجوی بهینه محلی همچون الگوریتم جستجوی ممنوع(*TS*) یکی از الگوریتم‌هایی است که بطور گسترده‌ای برای حل مسائل*NP-Hard* بکار رفته است [۱۹].الگوریتم جستجوی ممنوع اولین بار توسط گلوور برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت [۲۰].در این الگوریتم جستجوگر از یک جواب قابل قبول مسئله شروع به حرکت کرده و پس از تشکیل و ارزیابی جواب‌های قابل قبول در همسایگی جواب فعلی، به سمت بهترین آنها حرکت می‌کند. این حرکت قدم به قدم، جستجوگر را به سمت بهینگی یا نزدیک به بهینه هدایت می‌نماید [۲۱]. بارزترین ویژگی الگوریتم جستجوی ممنوع که آن را از سایر الگوریتم‌های جستجوگر متمایز می‌کند، توانایی آن در گریز از بهینه‌های محلی است که ناشی از این است که در هر حرکت الگوریتم بهترین جواب را در همسایگی جواب فعلی می‌پذیرد و حافظه کوتاه مدت آن می‌باشد، که به لیست ممنوع(*Tabu List*) معروف است. این لیست شامل تعدادی از حرکت‌های اخیر جستجوگر

است، که اجازه رجوع به آنها در حرکت فعلی وجود ندارد. پس از انجام هر حرکت، جواب فعلی در بالای لیست تابو قرار گرفته و چنانچه لیست پر باشد، قدیمی‌ترین جواب از آن خارج می‌شود. این دنباله از جواب‌های ممنوع به همراه قابلیت قبول جواب‌های بدتر، الگوریتم را از حبس شدن در بهینه‌های محلی حفاظت می‌نماید [۱۹]. الگوریتم جستجوی ممنوعه بدلیل بهره‌گیری از شکل‌های انعطاف‌پذیر حافظه برای حل مسئله به صورت کنترل‌شده و هوشمند، منجر به کاهش زمان محاسبات و نیز بهتر شدن جواب نسبت به الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم NSGAII و MOGA می‌شود. بدلیل اینکه برای مسائل بهینه‌سازی انتخاب پروژه با توجه به زمان، هزینه و کیفیت از روش جستجوی ممنوعه استفاده نشده است، بنابراین الگوریتم مذکور انتخاب گردید.

معیارهای مختلفی برای خاتمه الگوریتم مورد استفاده قرار می گیرند. زمان محاسباتی، تعداد حرکت‌های انجام شده و کاهش نرخ بهبود تابع هدف در حرکت‌های متوالی، از متداول‌ترین معیارهای توقف الگوریتم جستجوی ممنوع می‌باشند. در طی جستجو، بهترین جواب‌های بهینه در حافظه نگهداری شده و در انتها به عنوان بهینه‌ترین جواب ارائه می‌گردد. مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگزار در عملکرد الگوریتم جستجوی ممنوع، نقطه شروع الگوریتم، مکانیزم تشکیل همسایگی و اندازه لیست ممنوع می‌باشند [۱۸، ۲۰ و ۲۲].

مراحل استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع (TS) برای حل مسائل بصورت زیر است:

۱) ایجاد پاسخ اولیه و ارزیابی آن

۲) ایجاد فهرستی از عملیات مجاز وابسته به نوع مسئله (روش‌های تولید همسایگی)

۳) تنظیم شمارنده همه عملیات برابر با صفر

۴) انجام عملیات مجاز و غیر تابو (همه یا کسری از عملیات) و انتخاب بهترین پاسخ از بین گزینه‌های موجود

۵) اضافه کردن عملیات انجام شده به فهرست تابو (لیست ممنوع)

۶) کم کردن یک واحد از مقدار شمارنده سایر عملیات

۷) بروز رسانی بهترین پاسخ یافته شده

۸) بازگشت به مرحله ۴ درصورتی که شرایط خاتمه الگوریتم محقق نشده باشد.

۴- محاسبه تابع هدف مدل پیشنهادی، نحوه تولید جواب اولیه و نتایج پژوهش

۴-۱- مدل بهینه‌سازی چند منظوره چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی

در این تحقیق، سه هدف زمان، هزینه و کیفیت، برای ارزیابی یک برنامه چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی در نظر گرفته شده است. در هدف زمان، به حداقل رساندن مدت زمان پروژه است و برای انجام محاسبات زمان پروژه، از روش زنجیره بحرانی استفاده می‌شود. علاوه‌بر این، هدف هزینه، به حداقل رساندن هزینه نهایی پروژه است که از روش هزینه مستقیم در این پروژه استفاده شده است. هزینه‌های مستقیم شامل مجموع هزینه‌های منابع تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید تمامی فعالیت‌های پروژه است. سرانجام، هدف کیفی برای این پروژه شامل به حداکثر رساندن کیفیت انجام وظایف پروژه است. قبل از ارائه تابع هدف پیشنهادی، پارامترهای مورد استفاده در جدول ۱ معرفی می‌شوند.

جدول ۱: علامت اختصاری و شرح پارامتر های مدل پیشنهادی

علامت اختصاری و شرح پارامتر های مدل پیشنهادی	علامت اختصاری و شرح پارامتر های مدل پیشنهادی
N: تعداد کل پروژه‌ها، $i = 1,2,\dots,N$	T: کل زمان پروژه با روش زنجیره بحرانی
J: فعالیت‌های پروژه، $j = 1,2,\dots,J$	C: هزینه کلی پروژه
K: منابع تجدید پذیر، $k = 1,2,\dots,K$	Q: کیفیت کلی پروژه
r_{ijk} : منابع تجدید پذیر، K، مورد نیاز برای فعالیت j در پروژه i	r_k : مقدار منابع غیر قابل استفاده موجود
C_K: هزینه واحد منابع تجدید پذیر	S_i : هزینه بالاسری به ازای هر روز در پروژه i
t_{ij} : مدت زمان فعالیت jدر پروژه i	TTS : کل مدت زمان فعالیت‌های زنجیره بحرانی

P: منابع غیر قابل تجدید $P = 1,2,\dots,p$	$U(T)$: تابع مطلوبیت زمان
nr_{ijp} : منابع غیرقابل تجدید، P، مورد نیاز برای فعالیت j در پروژه i	$U(C)$: تابع مطلوبیت هزینه
C_p : هزینه واحد منابع غیر قابل تجدید	$U(Q)$: تابع مطلوبیت کیفیت
EV_{ij} : ارزش فعالیت j در پروژه i	α_T : ضریب وزنی زمان
q_{ij} : شاخص کیفیت فعالیت j در پروژه i	α_C : ضریب وزنی هزینه
EQV_{ij} : مقدار کیفی فعالیت j در پروژه i	α_Q : ضریب وزنی کیفیت
E_{e0} : زمان پایان یک فعالیت مجازی	D: مدت زمان مطلوب پروژه
PB : بافر پروژه	U: هزینه مطلوب پروژه

۴-۱-۱- تجزیه و تحلیل عملکرد هدف زمانی در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی

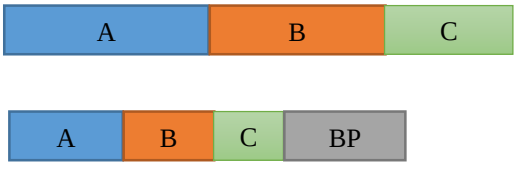
نحوه مدیریت و برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای در زنجیره بحرانی پیچیده است. هدف از برنامه‌ریزی چند هدفه در روش زنجیره بحرانی، به حداقل رساندن زمان است که با استفاده ازرابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\min T = E_{e0} + PB \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، برای محاسبه بافر پروژه از روش برش و چسباندن استفاده می‌شود. برای روشن کردن نحوه محاسبه بافر پروژه و تفاوت بین روش‌های مسیر بحرانی[4] و زنجیره بحرانی، اجازه دهید مثالی را با سه فعالیت A (۱۳ روز)، B (۹ روز) و C (۶ روز) در نظر بگیریم. روابط پیش‌نیاز بین فعالیت‌ها به گونه‌ای است که فعالیت A هیچ پیش شرطی ندارد، فعالیت B به فعالیت A بستگی دارد و فعالیت C به فعالیت B بستگی دارد. اگر پروژه با روش مسیر بحرانی برنامه‌ریزی شده باشد، کل زمان پروژه با مجموع زمان فعالیت‌های A، B و C برابر می‌شود، و در نهایت زمان نهایی پروژه ۲۸ خواهد بود. در روش زنجیره بحرانی، براساس فلسفه این روش که می‌گوید ۵۰ درصد از زمان فعالیت شامل عدم اطمینان است، این زمان از زمان اولیه فعالیت حذف می‌شود و نیمی از زمان حذف شده به بافر پروژه اختصاص می‌یابد (از این روش محاسبه بافر پروژه به روش برش و چسبندگی یاد می‌شود). بنابراین زمان فعالیت‌های A، B و C به ترتیب ۶/۵، ۴/۵ و ۳ و زمان بافر پروژه ۷ فرض شده است (۲ /(۶/۵ + ۴/۵ + ۳)). در شکل ۱ نحوه محاسبه زمان پروژه با استفاده از روش مسیر بحرانی و زنجیره بحرانی نشان داده شده است.

$$FT = ۱۳ + ۹ + ٦ = ۲۸ \qquad CPM$$

$$FT = ٦,٥ + ٤,٥ + ۳ + ۷ = ۲۱ \qquad CCM$$



شکل۱ : محاسبه بافر پروژه

۴-۱-۲- تجزیه و تحلیل عملکرد هدف هزینه در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی

تابع هزینه کل چند هدفه شامل هزینه‌های منابع تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر است؛ لذا تابع هدف هزینه پروژه در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$min\ C = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J}(\sum_{k=1}^{K} r_{ijk}\ C_k\ t_{ij} + \sum_{p=1}^{P} nr_{ijp}\ C_p) \qquad (۲)$$

[4] Critical Path

۴-۱-۳- تجزیه و تحلیل عملکرد هدف کیفیت در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی

انجام تحقیق در مورد برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی، نیازمند ارزیابی پروژه‌ها است. در این مطالعه، برای نشان دادن کیفیت به دست آمده (EQV_{ij}) برای هر فعالیت، از رابطه (۳) استفاده شده است:

$$EQV_{ij} = EV_{ij} + q_{ij} \quad (۳)$$

که q_{ij} شاخص کیفی فعالیت j در طول پروژه i است. برای محاسبه کیفیت واقعی فعالیت‌ها از رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$q_{ij} = \frac{\text{کیفیت واقعی فعالیت } j}{\text{کیفیت از پیش تعیین شده فعالیت } j} \times 100 \quad (۴)$$

بنابراین، سطح کیفی برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای می‌تواند به عنوان میانگین وزن سطح کیفی کلیه فعالیت‌ها بیان شده و از طریق رابطه (۵) محاسبه شود:

$$max\ Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij}} \times \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EQV_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij}} \times \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij} \times q_{ij} \quad (۵)$$

۴-۱-۴- عملکرد کاربردی مدل پیشنهادی

پارامترهای T، C و Q، زمان، هزینه و کیفیت را برای بهینه‌سازی چند هدفه در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی را نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن تجزیه تابع مطلوب چند هدفه، می‌توان آن را به یک چند جمله‌ای وزنی تجزیه کرد که با روابط (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است.

$$u(T, C, Q) = \alpha_T * u(T) + \alpha_C * u(C) + \alpha_Q * u(Q) \quad (۶)$$

$$\alpha_T, \alpha_C, \alpha_Q \geq 0 \quad (۷)$$

$$\alpha_T + \alpha_C + \alpha_Q = 1 \quad (۸)$$

شکل تابع درجه دوم تابع مطلوبیت می‌تواند به عنوان فضای حل استفاده شود و تمام توابع مطلوبیت همگرا می‌باشند. توابع مطلوبیت به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به ازای کمترین مقدار زمان و هزینه و بیشترین کیفیت، مقدار مطلوبیت برابر با یک را تولید کنند.

مقدار مطلوبیت زمان کل پروژه (D)، ۱ در نظر گرفته شد، بنابراین:

$$U(T) = \begin{cases} \varphi_T - \beta_T (T - D), & T \epsilon [0, 2\ D]^2 \\ 0, & T \notin [0.2\ D] \end{cases} \quad (۹)$$

کل هزینه مدیریت چند پروژه شامل هزینه‌های منابع تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر است و سودمندی آن برابر با ۱ است، از این رو داریم:

$$U(C) = \begin{cases} \varphi_C - \beta_C (C - (1-\eta).U)^2, & C \epsilon [0, 2(1-\eta).U] \\ 0, & C \notin [0, 2(1-\eta).U] \end{cases} \quad (۱۰)$$

اگر سودمندی کیفیت با ۱ برابر باشد، پس:

$$U(Q) = \begin{cases} \varphi_Q - \beta_Q (Q-1)^2 & , Q \epsilon [0,1] \\ 0, & Q \notin [0, 1] \end{cases} \quad (۱۱)$$

۴-۱-۵- مدل بهینه‌سازی چند هدفه

برای حل مسئله پیشنهادی که یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه است با توجه به سه معیار زمان، هزینه و کیفیت، که معمولا به عنوان هدف اصلی سازمان‌ها و پیمانکاران در نظر گرفته می‌شوند، یک تابع ابزار برای این اهداف ایجاد شد. بنابراین، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت زیر تعریف شده است:

$$O.F. = max\ u(T, C, Q) \quad (۱۲)$$

$$st: E_{ij} - E_{i(j-1)} \geq t_{ij} \qquad \forall i.j \qquad i = 1.2 \ldots . N \qquad j = 1.2 \ldots . J \quad (۱۳)$$

$$PB = \frac{TTs}{2} \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} r_{ijk} \le R_k \qquad \forall\, t \in T\,,\quad \forall\, k \qquad (۱۵)$$

رابطه (۱۲) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که متمرکز بر به حداکثر رساندن ابزار بهینه‌سازی چند هدفه در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی است. رابطه (۱۳) نشان‌دهنده‌ی رابطه پیش‌نیازی و پس‌نیازی در این پروژه است، که بیانگر آن است که فعالیت پس نیاز تا اتمام فعالیت پیش‌نیاز جاری، نمی‌تواند اجرا شود و زمانی که یک فعالیت آغاز شود، به دلیل تدوام فعالیت، نمی‌تواند متوقف شود. در این رابطه، i شمارنده پروژه‌ها می‌باشد و براساس شماره پروژه مقدار می‌گیرد و j، تعداد فعالیت‌های پروژه می‌باشد و براساس شماره فعالیت مقدار می‌گیرد. رابطه (۱۴) محاسبه بافر پروژه را نشان می‌دهد. در این رابطه T_{ts} نماد مجموع زمان فعالیت‌های زنجیره بحرانی می‌باشد. رابطه (۱۵) که نشان‌دهنده محدودیت منابع در این مدل می‌باشد، بیان می‌کند که مصرف یک منبع (مثلا منبع r_k) در فعالیت‌های اجرا شده در یک روز، نمی‌تواند از مقدار در دسترس آن منبع (مثلا منبع R_k) در آن روز تجاوز کند.

۴-۲- طراحی الگوریتم پیشنهادی

در این پژوهش، برای بهینه‌سازی زمان‌بندی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی با محدودیت منابع از روش جستجوی ممنوعه (TS) استفاده شده است. در این مسئله با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، به دنبال پیدا کردن بهترین توالی از فعالیت‌ها بوده، به گونه‌ای که بهترین مقدار مطلوبیت برآورده شود.

۴-۲-۱- ایجاد جواب اولیه

بیشتر الگوریتم‌های فرابتکاری برای بهینه‌سازی مسئله به یک جواب اولیه نیازمند می‌باشند. بنابراین، در این تحقیق نیز به منظور حل مسئله توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ممنوعه نیاز است تعدادی جواب اولیه تولید شده و سپس با اجرای الگوریتم پیشنهادی این جواب‌ها بهبود یابند. در این بخش نحوه تولید جواب اولیه ارائه شده است. برای تولید جواب اولیه، ابتدا یک توالی به صورت تصادفی، به تعداد فعالیت تشکیل می‌شود. از آنجایی که در مسائل زمان‌بندی پروژه توالی انجام فعالیت‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در زمان اتمام ایفا می‌کنند، اساس تولید جواب اولیه می‌تواند ترتیب انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته شود [۱۵]. بدین منظور ابتدا برای هر یک از خانه‌های خالی مربوط به هر توالی مانند شکل ۲، یک عدد تصادفی تولید می‌شود.

۴	۳	۲	۶	۵	۷	۱

شکل۲ : توالی فعالیت‌ها

پس از تشکیل توالی انجام فعالیت‌ها و مشخص شدن نحوه اجرای آنها، مقدار تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت مربوط به هر یک از فعالیت‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه روند محاسبه توابع هدف در الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳ بصورت شبه کد نشان داده شده است.

```
function f_cost=Fitness7(position_p,Data,alfa)
f_cost=zeros(size(position_p,1),4);
for i=1:size(position_p,1)
    for j=1:size(position_p,2)
        r1=floor(position_p(i,j)/10);
        r2=position_p(i,j)-r1*10;
        f_cost(i,1)=f_cost(i,1)+ceil(Data{r1}(r2,1)*0.75);
        f_cost(i,2)=f_cost(i,2)+Data{r1}(r2,2)+2*f_cost(i,1)/15;
        f_cost(i,3)=f_cost(i,3)-Data{r1}(r2,3)*Data{r1}(r2,4)/100;
    end
    f_cost(i,4)=f_cost(i,4)+alfa(1)*f_cost(i,1)+alfa(2)*f_cost(i,2)+...
        alfa(3)*f_cost(i,3);
    f_cost(i,3)=-f_cost(i,3);
end
end
```

شکل۳ : شبه کد محاسبه تابع هدف

۴-۲-۲- ساز و کار ایجاد همسایگی

مشهورترین و ساده‌ترین روش‌هایی که برای ایجاد همسایگی در روش‌های متاهیوریستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت از جابجایی و تعویض می‌باشند [۲۳]. در ساز و کار جابجایی، یک فعالیت از محل فعلی خود به محل دیگری منتقل می‌شود؛ در حالی که در تعویض، محل دو فعالیت با یکدیگر تعویض می‌شود. اخیراً اپراتورهای متنوعی برای ایجاد همسایگی توسط پژوهشگران ارائه شده است [۲۴، ۲۵، ۲۶]. در الگوریتم پیشنهادی، ترکیبی از جابجایی و تعویض برای ایجاد همسایگی در فرآیند جستجو به کار گرفته شده است. استفاده از اپراتور جابجایی، امکان جابجایی محل قرار گرفتن یک فعالیت در یک توالی یا قرار گرفتن فعالیت در محلی در توالی دیگر امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین با اپراتور تعویض، امکان تعویض دو فعالیت در یک یا دو توالی به وجود می‌آید. پس از تولید جواب اولیه که حاوی توالی انجام فعالیت‌ها می‌باشد، ابتدا رابطه پیش‌نیازی بررسی می‌گردد. اگر رابطه پیش‌نیازی برقرار باشد توالی بدون تغییر باقی می‌ماند؛ در غیر این صورت ضروری است که ترتیب انجام فعالیت‌ها براساس رابطه پیش‌نیازی اصلاح گردد، که در شکل ۴ بصورت شبه کد نشان داده شده است.

```
function [newX,index]=ControlPrecedence43(x,Precedence)
index=repmat([],1,1);
oldX=x;
newX=[];
while ~isempty(x)
    r0=cell2mat(Precedence(x(1)));
    r1=ismember(r0,newX);
    r0(r1)=[];
    [newX]=[newX;r0;x(1)];
    r2=ismember(x,newX);
    x(r2)=[];
end
r3=1:length(oldX);
for i=1:length(oldX)
    r4=newX(i)==oldX;
    index(i)=sum(r4.*r3);
end
end
```

شکل۴ : شبه کد بررسی رابطه پیش‌نیازی

پس از ایجاد پاسخ اولیه، نیاز به اصلاح این پاسخ براساس روابط پیش‌نیازی که در بالا ذکر شد، می‌باشد. شبه کد نشان داده شده در شکل ۴ برای اصلاح روابط پیش‌نیازی تعریف شده است. خروجی این کد برای شکل ۲، به صورت شکل ۵ می‌باشد.

۱	۳	۲	۴	۶	۵	۷

شکل۵ : اصلاح جواب اولیه براساس روابط پیش‌نیازی

۴-۲-۳- ارزیابی جواب‌های همسایه و انتخاب جواب مناسب

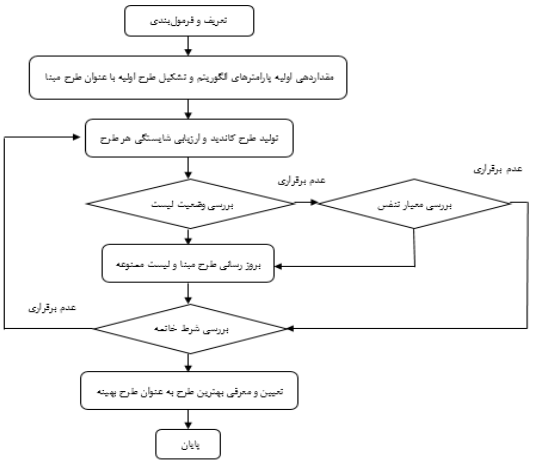
ارزیابی جواب‌های همسایه و انتخاب جواب مناسب در ساختار جواب‌های به کار گرفته شده برای پیاده سازی الگوریتم، هزینه‌ها، زمان و کیفیت مرتبط با هر یک از فعالیت‌ها، به صورت جداگانه نگهداری می‌شوند. انتخاب فعالیت‌ها برای تعویض و جابجایی براساس زمان، هزینه و کیفیت هر یک در جواب صورت می‌گیرد. یعنی احتمال انتخاب توالی‌ها و فعالیت‌ها برای تعویض متناسب با هزینه‌ها، زمان و کیفیت مرتبط با آن‌ها در جواب افزایش می‌یابد. با استفاده از این روش ابتکاری، میزان کیفیت و سرعت حل مسئله به میزان قابل توجهی بیشتر می‌شود. این انتخاب به شکل ساده و تاثیرگذار استراتژی لیست کاندیدا را که توسط دیگر محققین به فرم‌های دیگری صورت گرفته، پیاده سازی می‌کند [۲۶]. در واقع این استراتژی یک ساز و کار تشدید است که به شکل ابتکاری در الگوریتم پیشنهادی به کار گرفته شده است. در صورتی که جواب همسایه تولید شده در لیست ممنوع (Tabu List) نباشد، در مجموعه جواب‌های همسایه تولید شده در تکرار مورد نظر قرار می‌گیرد. بهترین جواب همسایه بین جواب‌های همسایه به عنوان جواب فعلی در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲-۴- بررسی وضعیت لیست ممنوعه و معیار تنفس

پس از مشخص شدن بهترین جواب، بین جواب‌های کاندید، ابتدا لیست ممنوعه بررسی می‌شود. لیست مربوطه حاوی حرکت‌های مختلف در فضای کاوش (جستجو) می‌باشد، که در تکرارهای قبلی در تولید بهترین جواب همسایه صورت گرفته است. اگر حرکتی موجب تولید بهترین جواب در همسایگی جواب اولیه بین سایر جواب‌های کاندید شده در لیست ممنوعه نباشد، جواب مورد نظر جایگزین جواب قبلی می‌شود. حتی اگر میزان تابع هدف اصلاح شده برای آن کمتر از مقدار تابع هدف اصلاح شده جواب تکرار قبل باشد. به عبارتی، در الگوریتم جستجوی ممنوعه، بدون در نظر گرفتن مقدار شایستگی بهترین جواب همسایه، در صورتی که حرکت مورد نظر در فضای جستجو در لیست ممنوعه نباشد، جواب مورد نظر جایگزین جواب قبلی می‌شود. سپس حرکتی که موجب تولید جواب جدید شده در لیست تابو با احتمال خروج صفر، ذخیره می‌گردد. اما در صورتی‌که حرکت مورد نظر در لیست ممنوع باشد، الگوریتم معیار تنفس را بررسی می‌کند. براساس معیار تنفس، در صورتی بهترین جواب در میان جواب‌های کاندید، جایگزین جواب پیشین خواهد شد، که میزان تابع هدف اصلاح شده برای آن بیشتر از مقدار تابع هدف اصلاح شده جواب قبلی باشد. در غیر این صورت جواب قبلی بدون تغییر باقی می‌ماند. یعنی در بررسی معیار تنفس به گونه‌ای که شایستگی جواب کاندید کمتر از جواب قبلی باشد، در جواب فعلی تغییر ایجاد نمی‌شود. اما اگر شایستگی آن بیشتر از جواب فعلی باشد، جایگزین جواب فعلی می‌گردد [۲۷].

۴-۲-۵- بررسی شرط توقف

روش‌های مختلفی برای بررسی شرط خاتمه در الگوریتم‌های فراابتکاری وجود دارد. در این پژوهش، شرط خاتمه الگوریتم پیشنهادی با تکمیل تعداد مراحل تکرار مورد بررسی قرار می‌گیرد. به بیان دیگر الگوریتم TS از مرحله ایجاد جواب اولیه آغاز و تا تکمیل تعداد دفعات پیش بینی شده تکرار می‌کند. هنگامی که شرط خاتمه تحقق یابد، الگوریتم، بهترین جواب را به عنوان جواب بهینه معرفی می‌کند. لازم به ذکر است که در این مطالعه، مفهوم نخبه‌گرایی نیز لحاظ شده و بهترین جواب‌ها در عملیات بهینه‌یابی ذخیره و معرفی می‌گردند. در ادامه فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ممنوعه در شکل ۶ آورده شده است.



شکل۶ : فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ممنوعه (TS)

۴-۳- مجوز دادن به جواب‌های نشدنی

توجه به تمام محدودیت‌های مسئله در تعریف فضای جستجو، اغلب فرآیند جستجو را محدود می‌نماید و می‌تواند منجر به جواب‌های نامطلوب شود؛ در این چنین حالت‌هایی، "آزادسازی محدودیت‌ها"[5]یک استراتژی مناسب است، زیرا فضای جستجوی بزرگتری را ایجاد می‌نماید که می‌تواند به وسیله ساختارهای همسایگی به‌طور ساده‌تر مورد اکتشاف قرار گیرد. سست کردن محدودیت‌ها به راحتی انجام می‌شود، به این صورت که محدودیت مورد نظر را از تعریف فضای جستجو حذف کرده و یک مقدار جریمه به تابع هدف می‌افزاییم.

[5] Constraint Relaxation

یکی از راه‌های پیاده‌سازی این روش استفاده از "جریمه‌های خود تنظیم"[6]می‌باشد. بدین معنا که وزن‌ها به‌طور دینامیکی براساس سابقهٔ اخیر جستجو تنظیم می‌شود. اگر در چند تکرار قبلی فقط جواب‌های نشدنی دیده شود، وزن‌ها افزوده و در صورتی‌که جواب‌های اخیر همگی شدنی باشند، وزن‌ها کاهش داده می‌شوند. وزن‌های جریمه همچنین می‌توانند به‌طور سیستماتیک تغییر کنند تا جستجو از مرزهای فضای جستجو عبور کند و در نتیجه، تنوع‌بخشی ایجاد شود. این تکنیک "نوسان استراتژیک"[7]نام دارد [۲۸].

۴-۴- تنظیم پارامترها

کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری و بخصوص الگوریتم جستجوی ممنوعه تا حد زیادی بستگی به تنظیم پارامترها دارد [۲۹]. در الگوریتم جستجوی ممنوعه باید مقادیر سه پارامتر تنظیم شود، این پارامترها عبارت‌اند از: طول لیست ممنوعه، تعداد اعضای یک مجموعه همسایگی و تعداد مراحل تکرار الگوریتم (شرط توقف). ما برای هر یک از این عوامل مقادیر مختلفی در نظر گرفته‌ایم، که این مقادیر در جدول ۲ ذکر شده است. در این جدول J نشان‌دهندهٔ تعداد فعالیت‌های پروژه و علامت [] جزء صحیح مقادیر می‌باشد.

جدول۲ : مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

ارزش / پارامتر	کم	متوسط	زیاد
طول لیست تابو	$[\sqrt{J}]$	$\left[\frac{J}{2}\right]$	J
تعداد اعضای یک مجموعه همسایگی	$[\sqrt{J}]$	$\left[\frac{J}{2}\right]$	J
تعداد مراحل تکرار (شرط توقف)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

ما برای تعیین مقادیر مناسب این پارامترها دو مسئله را با همه ترکیب‌های جدول۱ حل نموده‌ایم. براساس نتایج حاصل شده، مقادیر مناسب این پارامترها به این گونه است: (قابل ذکر است که هر یک از این نتایج با ثابت نگه‌داشتن مقادیر سایر پارامترها بدست آمده است).

افزایش لیست ممنوعه از $[\sqrt{J}]$ به $\left[\frac{J}{2}\right]$ باعث بهبود جواب‌ها شده، ولی با افزایش آن به مقدار J، بهبود قابل توجهی حاصل نشده است. لذا، طول لیست ممنوعه برابر $\left[\frac{J}{2}\right]$ در نظر گرفته شد.

افزایش تعداد اعضای مجموعه همسایگی‌ها همواره باعث بهبود جواب‌ها شده است. بنابراین تعداد اعضای مجموعه همسایگی J در نظر گرفته شده که این مقدار بیان‌گر حداکثر تعداد همسایگی ممکن برای هر لیست می باشد.

در مورد تعداد تکرارهای الگوریتم (شرط توقف) همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر شده، شرط توقف تکمیل تعداد مراحل تکرار که برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده، می‌باشد.

۴-۵- صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی

برای صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی، از مثال ارائه شده توسط تران و همکاران [۳۰] که یک مسئله سه هدفه با حالت‌های اجرایی متفاوت می‌باشد، و با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل به حل این مثال پرداخته‌اند، استفاده شده است. این مثال دارای ۶۰ فعالیت می‌باشد که برای انجام فعالیت‌های آن پنج حالت در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از این مثال مقایسه روش ارائه شده در پژوهش حاضر با روش محققان مذکور و اثبات مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق برای این‌گونه مسائل می‌باشد. این مثال با رویکرد قطعی حل شده منتها برای رفع غیر قطعیت‌ها از روش زنجیره بحرانی بهره گرفته شده است. همچنین همه فعالیت‌های این پروژه

[6] Self-adjusting Penalty
[7] Strategic Oscillation

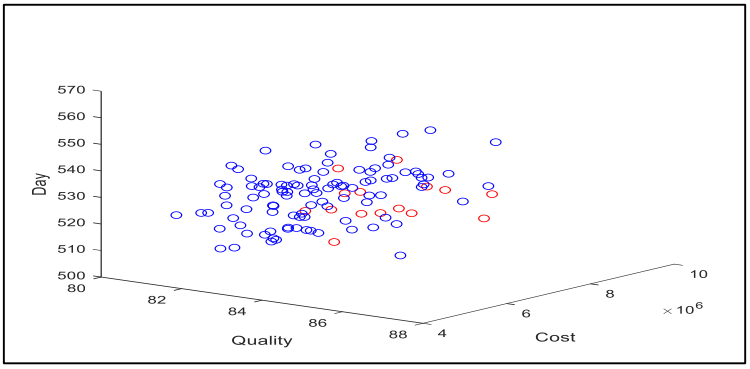
قابل انقطاع می‌باشند. زمان، هزینه و کیفیت اجرای فعالیت‌ها برای هر پنج حالت مشخص شده است. در نهایت جواب‌های بدست آمده از دو الگوریتم با هم مورد مقایسه قرار گرفته است. مثال ارائه شده در مقاله تران و همکاران در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ : مثال ارائه شده در مقاله تران و همکاران[۲۴]

i	حالت ۱			حالت ۲			حالت ۳			حالت ۴			حالت ۵		
۱	۱۴	۳۷۵۰	۸۵	۱۲	۴۲۵۰	۹۹/۹۸	۱۰	۵۴۰۰	۸۷/۰۹	۹	۶۲۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۲	۲۱	۱۱۲۵۰	۸۵	۱۸	۱۴۸۰۰	۹۹/۳۷	۱۷	۱۶۲۰۰	۹۴/۴۸	۱۵	۱۹۶۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۳	۲۴	۲۲۴۵	۸۵	۲۲	۲۴۹۰۰	۹۸/۵۴	۱۹	۲۷۹۵۰	۹۲/۲	۱۷	۳۱۶۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۴	۱۹	۱۷۸۰۰	۸۵	۱۷	۱۹۴۰۰	۹۹/۳۷	۱۵	۲۱۶۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-	-	-	-
۵	۲۸	۳۱۱۸۰	۸۵	۲۶	۳۴۲۰۰	۹۸/۵۴	۲۳	۳۸۲۵۰	۹۲/۲	۲۱	۴۱۴۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۶	۴۴	۵۴۲۶۰	۸۵	۴۲	۵۸۴۵۰	۹۶/۷۶	۳۸	۶۳۲۲۵	۹۴/۴۸	۳۵	۶۸۱۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۷	۳۹	۴۷۶۰۰	۸۵	۳۶	۵۰۷۵۰	۹۹/۴۲	۳۳	۵۴۸۰۰	۹۴/۴۸	۳۰	۵۹۷۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۸	۵۲	۶۲۱۴۰	۸۵	۴۷	۶۹۷۰۰	۹۹/۹۲	۴۴	۷۲۶۰۰	۹۶/۵	۳۹	۸۱۷۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۹	۶۳	۷۲۷۵۰	۸۵	۵۹	۷۹۴۵۰	۹۸/۵۴	۵۵	۸۶۲۵۰	۹۷/۸۷	۵۱	۹۱۵۰۰	۸۲/۹۷	۴۹	۹۹۵۰۰	۷۰/۱۹
۱۰	۵۷	۶۶۵۰۰	۸۵	۵۳	۷۰۲۵۰	۹۷/۶۳	۵۰	۷۵۸۰۰	۹۹/۹۶	۴۶	۸۰۷۵۰	۹۳/۵۳	۴۱	۸۶۴۵۰	۷۰/۱۹
۱۱	۶۳	۸۳۱۰۰	۸۵	۵۹	۸۹۴۵۰	۹۶/۷۶	۵۵	۹۷۸۰۰	۹۹/۹۲	۵۰	۱۰۴۲۵۰	۹۱/۷۸	۴۵	۱۱۲۴۰۰	۷۰/۱۹
۱۲	۶۸	۷۵۵۰۰	۸۵	۶۲	۸۲۰۰۰	۹۹/۱۴	۵۸	۸۷۵۰۰	۹۸/۹۲	۵۳	۹۱۸۰۰	۸۷/۷۹	۴۹	۹۶۵۵۰	۷۰/۱۹
۱۳	۴۰	۳۴۲۵۰	۸۵	۳۷	۳۸۵۰۰	۹۹/۴۲	۳۳	۴۳۹۵۰	۸۸/۵۴	۳۱	۴۸۷۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۱۴	۳۳	۵۲۷۵۰	۸۵	۳۰	۵۸۴۵۰	۹۹/۸۶	۲۷	۶۳۴۰۰	۹۰/۲۳	۲۵	۶۶۲۵۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۱۵	۴۷	۳۸۱۴۰	۸۵	۴۰	۴۱۵۰۰	۹۹/۷۷	۳۵	۴۷۶۵۰	۸۷/۰۹	۳۲	۵۴۱۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۱۶	۷۵	۹۴۶۰۰	۸۵	۷۰	۱۰۱۲۵۰	۹۸/۳۶	۶۶	۱۱۲۷۵۰	۹۹/۳۷	۶۱	۱۲۴۵۰۰	۸۸/۵۴	۵۷	۱۳۲۸۵۰	۷۰/۱۹
۱۷	۶۰	۷۸۴۵۰	۸۵	۵۵	۸۴۵۰۰	۹۹/۹۲	۴۹	۹۱۲۵۰	۸۳/۸۱	۴۷	۹۴۶۴۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۱۸	۸۱	۱۲۷۱۵۰	۸۵	۷۳	۱۴۳۲۵۰	۹۹/۹۸	۶۶	۱۵۴۶۰۰	۹۰/۲۳	۶۱	۱۶۱۹۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۱۹	۳۶	۸۲۵۰۰	۸۵	۳۴	۹۴۸۰۰	۹۹/۴۲	۳۰	۱۰۱۷۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-	-	-	-
۲۰	۴۱	۴۸۳۵۰	۸۵	۳۷	۵۳۲۵۰	۹۹/۹۲	۳۴	۵۹۴۵۰	۸۸/۵۴	۳۲	۶۶۸۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۲۱	۶۴	۸۵۲۵۰	۸۵	۶۰	۹۲۶۰۰	۹۸/۰۸	۵۷	۹۹۸۰۰	۹۹/۷۷	۵۳	۱۰۷۵۰۰	۹۱/۱۷	۴۹	۱۱۳۷۵۰	۷۰/۱۹
۲۲	۵۸	۷۴۲۵۰	۸۵	۵۳	۷۹۱۰۰	۹۹/۰۹	۵۰	۸۶۷۰۰	۹۹/۳۷	۴۷	۹۱۵۰۰	۹۳/۵۳	۴۲	۹۷۴۰۰	۷۰/۱۹
۲۳	۴۳	۶۶۴۵۰	۸۵	۴۱	۶۹۸۰۰	۹۴/۰۶	۳۷	۷۵۸۰۰	۹۹/۸۱	۳۳	۸۱۴۰۰	۸۹/۰۷	۳۰	۸۸۴۵۰	۷۰/۱۹
۲۴	۶۶	۷۲۵۰۰	۸۵	۶۲	۷۸۵۰۰	۹۷/۱۹	۵۸	۸۳۷۰۰	۹۹/۷۳	۵۳	۸۹۳۵۰	۸۹/۳۵	۴۹	۹۶۴۰۰	۷۰/۱۹
۲۵	۵۴	۶۶۶۵۰	۸۵	۵۰	۷۰۱۰۰	۹۸/۵۴	۴۷	۷۴۸۰۰	۹۹/۳۷	۴۳	۷۹۵۰۰	۸۸/۰۳	۴۰	۸۶۸۰۰	۷۰/۱۹
۲۶	۸۴	۹۳۵۰۰	۸۵	۷۹	۱۰۲۵۰۰	۹۶/۹۳	۷۳	۱۱۱۲۵۰	۹۹/۳۷	۶۸	۱۱۹۷۵۰	۹۱/۵۱	۶۲	۱۲۸۵۰۰	۷۰/۱۹
۲۷	۶۷	۷۸۵۰۰	۸۵	۶۰	۸۶۴۵۰	۹۹/۳۷	۵۷	۸۹۱۰۰	۹۲/۲	۵۶	۹۱۵۰۰	۸۸/۰۳	۵۳	۹۴۷۵۰	۷۰/۱۹
۲۸	۶۶	۸۵۰۰۰	۸۵	۶۳	۷۹۷۵۰	۹۷/۶۳	۶۰	۹۲۵۰۰	۹۹/۳۷	۵۸	۹۶۸۰۰	۹۴/۴۸	۵۴	۱۰۰۵۰۰	۷۰/۱۹
۲۹	۷۶	۹۲۷۰۰	۸۵	۷۱	۹۸۵۰۰	۹۹/۰۹	۶۷	۱۰۴۶۰۰	۹۸/۱۱	۶۴	۱۰۹۹۰۰	۹۰/۲۳	۶۰	۱۱۵۶۰۰	۷۰/۱۹
۳۰	۳۴	۲۷۵۰۰	۸۵	۳۲	۲۹۸۰۰	۹۷/۶۳	۲۹	۳۱۷۵۰	۹۶/۱۶	۲۷	۳۳۸۰۰	۸۱/۵۷	۲۶	۳۶۲۰۰	۷۰/۱۹
۳۱	۹۶	۱۴۵۰۰۰	۸۵	۸۹	۱۵۴۸۰۰	۹۸/۶۸	۸۳	۱۶۸۶۵۰	۹۸/۶	۷۷	۱۷۹۵۰۰	۸۷/۶۴	۷۲	۱۸۹۱۰۰	۷۰/۱۹
۳۲	۴۳	۴۳۱۵۰	۸۵	۴۰	۴۸۳۰۰	۹۸/۸۵	۲۷	۵۱۴۵۰	۹۷/۰۲	۳۵	۵۴۶۰۰	۸۷/۰۹	۳۳	۶۱۴۵۰	۷۰/۱۹
۳۳	۵۲	۶۱۲۵۰	۸۵	۴۹	۶۴۳۵۰	۹۶/۴۹	۴۴	۶۸۷۵۰	۹۷/۸۷	۴۱	۷۴۵۰۰	۸۸/۰۳	۳۸	۷۹۵۰۰	۷۰/۱۹
۳۴	۷۴	۸۹۲۵۰	۸۵	۷۱	۹۳۸۰۰	۹۵/۰۴	۶۶	۹۹۷۵۰	۹۹/۷۳	۶۲	۱۰۵۱۰۰	۹۲/۶۳	۵۷	۱۱۴۲۵۰	۷۰/۱۹
۳۵	۱۳۸	۱۸۳۰۰۰	۸۵	۱۲۶	۲۰۱۵۰۰	۹۸/۸۵	۱۱۵	۲۳۸۰۰۰	۹۷/۷۷	۱۰۳	۲۸۳۷۵۰	۸۱/۵۷	۹۸	۲۹۷۵۰۰	۷۰/۱۹
۳۶	۵۴	۴۷۵۰۰	۸۵	۴۹	۵۰۷۵۰	۹۷/۲۷	۴۲	۵۶۸۰۰	۹۷/۸۷	۳۸	۶۲۷۵۰	۸۹/۵۲	۳۳	۶۸۲۵۰	۷۰/۱۹
۳۷	۳۴	۲۲۵۰۰	۸۵	۳۲	۲۴۱۰۰	۹۵/۹۷	۲۹	۲۶۷۵۰	۹۹/۳۷	۲۷	۲۹۸۰۰	۹۲/۹۳	۲۴	۳۱۶۰۰	۷۰/۱۹
۳۸	۵۱	۶۱۲۵۰	۸۵	۴۷	۶۵۸۰۰	۹۹	۴۴	۷۱۲۵۰	۹۸/۶۷	۴۱	۷۶۵۰۰	۸۹/۰۷	۳۸	۸۰۴۰۰	۷۰/۱۹
۳۹	۶۷	۸۱۱۵۰	۸۵	۶۱	۸۷۶۰۰	۹۹/۴۲	۵۷	۹۲۱۰۰	۹۸/۲۸	۵۲	۹۷۴۵۰	۸۴/۷۶	۴۹	۱۰۲۸۰۰	۷۰/۱۹
۴۰	۴۱	۴۵۲۵۰	۸۵	۳۹	۴۸۴۰۰	۹۵/۹۷	۳۶	۵۱۲۰۰	۹۹/۳۷	۳۳	۵۴۷۰۰	۸۷/۰۹	۳۱	۵۸۲۰۰	۷۰/۱۹
۴۱	۲۷	۱۷۵۰۰	۸۵	۳۱	۲۱۲۰۰	۹۹/۹۸	۲۷	۲۶۸۵۰	۹۲/۲	۲۳	۳۲۳۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۴۲	۴۴	۳۶۴۰۰	۸۵	۴۱	۳۹۷۵۰	۹۶/۴۹	۳۸	۴۲۸۰۰	۹۹/۹۸	۳۲	۴۸۳۰۰	۸۲/۹۷	۳۰	۵۰۲۵۰	۷۰/۱۹
۴۳	۷۵	۶۶۸۰۰	۸۵	۶۹	۷۱۲۰۰	۹۸/۵۴	۶۳	۷۶۴۰۰	۹۷/۸۷	۵۹	۸۱۳۰۰	۸۹/۵۲	۵۴	۸۶۲۰۰	۷۰/۱۹

۴۴	۸۲	۱۰۲۷۵۰	۸۵	۷۶	۱۰۹۵۰۰	۹۹,۱۴	۷۰	۱۲۷۰۰۰	۹۵,۹۱	۶۶	۱۳۶۸۰۰	۸۴,۱۱	۶۳	۱۴۶۰۰۰	۷۰,۱۹
۴۵	۵۹	۸۴۷۵۰	۸۵	۵۵	۹۱۴۰۰	۹۷/۶۳	۵۱	۱۰۱۳۰	۹۹/۳	۴۷	۱۲۶۵۰	۹۲/۲۳	۴۳	۱۴۲۷۵۰	۷۰/۱۹
۴۶	۶۶	۹۴۲۵۰	۸۵	۶۳	۹۹۵۰۰	۹۵/۴۹	۵۹	۱۰۸۲۵	۹۹/۹	۵۵	۱۱۸۵۰	۹۳/۵۳	۵۰	۱۳۶۰۰۰	۷۰/۱۹
۴۷	۵۴	۷۳۵۰۰	۸۵	۵۱	۷۸۵۰۰	۹۷/۰۴	۴۷	۸۳۶۰۰	۹۹/۶	۴۴	۸۸۷۰۰	۸۹/۰۷	۴۱	۹۳۴۰۰	۷۰/۱۹
۴۸	۴۱	۳۶۷۵۰	۸۵	۳۹	۳۹۸۰۰	۹۵/۹۷	۳۷	۴۳۸۰۰	۹۹/۹	۳۴	۴۸۵۰۰	۹۲/۹۳	۳۱	۵۳۹۵۰	۷۰/۱۹
۴۹	۱۷۳	۲۶۷۵۰۰	۸۵	۱۵۹	۲۸۹۷۰۰	۹۸/۱۵	۱۴	۳۱۲۰۰	۹۹/۳	۱۳	۳۵۲۵۰	۹۴/۲	۱۲۱	۳۹۷۷۵۰	۷۰/۱۹
۵۰	۱۰۱	۴۷۸۰۰	۸۵	۷۴	۶۱۳۰۰	۹۹/۰۵	۶۳	۷۶۸۰۰	۹۱/۳	۴۹	۹۱۵۰۰	۷۰/۱۹	-	-	-
۵۱	۸۳	۸۴۶۰۰	۸۵	۷۷	۹۳۶۵۰	۹۸/۲۴	۷۲	۹۸۵۰۰	۹۹/۳	۶۵	۱۰۴۶۰	۸۵/۸۴	۶۱	۱۱۳۲۰۰	۷۰/۱۹
۵۲	۳۱	۲۳۱۵۰	۸۵	۲۸	۲۷۶۰۰	۹۸/۸۵	۲۶	۲۹۸۰۰	۹۹/۳	۲۴	۳۲۷۵۰	۹۲/۹۳	۲۱	۳۵۲۰۰	۷۰/۱۹
۵۳	۳۹	۳۱۵۰۰	۸۵	۳۶	۳۴۲۵۰	۹۷/۰۴	۳۳	۳۷۸۰۰	۹۹/۸	۲۹	۴۱۲۵۰	۸۹/۰۷	۲۶	۴۴۶۰۰	۷۰/۱۹
۵۴	۲۳	۱۶۵۰۰	۸۵	۲۲	۱۷۸۰۰	۹۵/۹۷	۲۱	۱۹۷۵۰	۹۹/۹	۲۰	۲۱۲۰۰	۹۷/۰۲	۱۸	۲۴۳۰۰	۷۰/۱۹
۵۵	۲۹	۲۳۴۰۰	۸۵	۲۷	۲۵۲۵۰	۹۸/۵۴	۲۶	۲۶۹۰۰	۹۹/۹	۲۴	۲۹۴۰۰	۹۲/۲	۲۲	۳۲۵۰۰	۷۰/۱۹
۵۶	۳۸	۴۱۲۵۰	۸۵	۳۵	۴۴۶۵۰	۹۹/۴۲	۳۳	۴۷۸۰۰	۹۸/۲	۳۱	۵۱۴۰۰	۸۸/۵۴	۲۹	۵۵۴۵۰	۷۰/۱۹
۵۷	۴۱	۳۷۸۰۰	۸۵	۳۸	۴۱۲۵۰	۹۸/۲۴	۳۵	۴۵۶۰۰	۹۸/۵	۳۲	۴۹۷۵۰	۸۵/۸۴	۳۰	۵۳۴۰۰	۷۰/۱۹
۵۸	۲۴	۱۲۵۰۰	۸۵	۲۲	۱۳۶۰۰	۹۷/۶۳	۲۰	۱۵۲۵۰	۹۹/۳	۱۸	۱۶۸۰۰	۹۰/۲۳	۱۶	۱۹۴۵۰	۷۰/۱۹
۵۹	۲۷	۳۴۶۰۰	۸۵	۲۴	۳۷۵۰۰	۹۸/۸۵	۲۲	۴۱۲۵۰	۹۹/۳	۱۹	۴۶۷۵۰	۸۷/۰۹	۱۷	۵۰۷۵۰	۷۰/۱۹
۶۰	۳۱	۲۸۵۰۰	۸۵	۲۹	۳۰۵۰۰	۹۵/۹۷	۲۷	۳۳۲۵۰	۹۹/۹	۲۵	۳۸۰۰۰	۹۷/۰۲	۲۱	۴۳۸۰۰	۷۰/۱۹

پس از حل مثال جدول ۳ با الگوریتم پیشنهادی این مطالعه، نتایج بدست آمده از جواب‌های پارتو در شکل ۷ نشان داده شده است. همین‌طور نتایج حاصل از حل این مثال با الگوریتم جستجوی ممنوع و مقایسه آن با نتایج الگوریتم کلونی زنبور عسل که توسط تران و همکاران حل شده است در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل۷ : مقایسه جواب‌های پارتو بدست آمده مطالعه تران و همکاران با الگوریتم پیشنهادی

برای محاسبه مقادیر زمان، هزینه و کیفیت فعالیت‌های کل پروژه، مسئله مطالعه تران و همکاران، به ازای مقادیر مختلف α، با الگوریتم پیشنهادی اجرا گردید و تعدادی جواب پارتو حاصل از الگوریتم پیشنهادی و جواب‌های مطالعه تران و همکاران در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ : مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم تران و همکاران

شماره جواب	جواب بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی			جواب بدست آمده از الگوریتم مطالعه تران و همکاران		
	زمان(روز)	هزینه(دلار)	کیفیت	زمان(روز)	هزینه(دلار)	کیفیت
۱	۵۳۲	۳۹۲۳۸۰۱	۸۶/۲۳	۴۹۵	۴۷۵۷۲۴۰	۸۶/۱۷
۲	۵۶۹	۳۹۲۲۰۴۰	۹۰/۷۵	۵۳۲	۴۴۰۹۶۷۵	۹۰/۰۸
۳	۵۸۷	۴۰۲۳۳۴۸	۹۱/۶۲	۵۷۸	۴۲۲۹۶۰۰	۹۴/۸۲

براساس نتایج جدول ۳، همان‌طور که مشاهده می‌شود برای مسئله مورد نظر سه پاسخ بهینه، تحت عنوان جواب پارتو از مطالعه تران و همکاران، و سه پاسخ بهینه از الگوریتم پیشنهادی تحقیق ارائه شده است. همچنین مطابق جدول ۳ می‌توان ملاحظه کرد که

جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ حاصل از الگوریتم پیشنهادی از نظر تابع هدف هزینه نسبت به جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ مطالعه تران و همکاران بهتر بوده است و همچنین جواب‌های شماره ۱ و ۲ از نظر تابع هدف کیفیت نسبت به جواب‌های ۱ و ۲ مطالعه تران و همکاران بهتر بوده است. بنابراین، در مجموع می‌توان گفت که الگوریتم جستجوی ممنوعه موجب تولید جواب‌های پارتو با مقادیر بهتر در دو تابع هدف هزینه و کیفیت نسبت به الگوریتم مطالعه تران و همکاران شده است. اما از آنجاییکه در مطالعه تران و همکاران از روش محاسبات زمانی مسیر بحرانی استفاده شده است، نمی‌توان گفت که الگوریتم پیشنهادی تحقیق از نظر زمانی نیز بهتر عمل خواهد کرد.

۴-۶- مطالعه موردی

پروژه‌های اول و دوم به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی در تحقیق در نظر گرفته شده‌اند. عملکرد خوب الگوریتم در بخش صحت‌سنجی الگوریتم با مقایسه نتایج آن با نتایج الگوریتم تران و همکاران اثبات شد. برای بررسی صحت مدل پیشنهادی، دو مطالعه موردی با ابعاد مختلف در نظر گرفته شده و با استفاده الگوریتم جستجوی ممنوع حل شده‌اند که در ادامه به بررسی هر کدام از آنها پرداخته شده است.

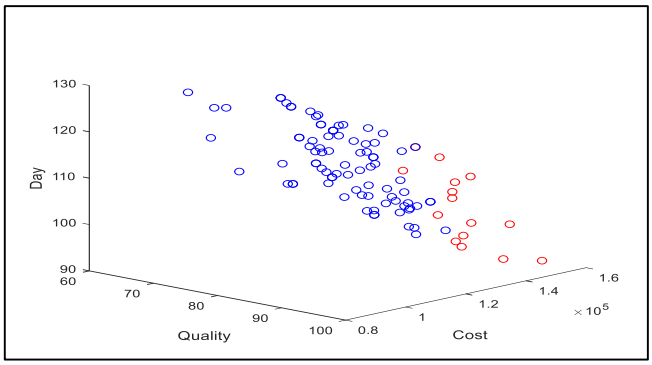
۴-۶-۱- پروژه اول

یک مسئله در قالب یک پروژه عمرانی با ۷ فعالیت که توسط تعدادی از محققین از جمله طاهری‌امیری و همکاران [۱۵] مورد استفاده قرار گرفته است، برای بررسی مدل ارائه شده در این تحقیق و مقایسه نتایج از لحاظ زمان، هزینه و کیفیت ارزیابی گردید. در ادامه اطلاعات مورد نیاز و روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها در پروژه عمرانی با ۷ فعالیت در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵ : اطلاعات و روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها برای پروژه اول

شرح فعالیت	شماره فعالیت	پیش‌نیازها	گزینه‌های اجرا	زمان (روز)	هزینه (دلار)	درصد تاثیر در کیفیت کل	کیفیت
تجهیز کارگاه	۱	-	۱	۱۴	۲۳۰۰۰	۸	۹۸
			۲	۲۰	۱۸۰۰۰		۸۹
			۳	۲۴	۱۲۰۰۰		۸۴
خاک‌برداری	۳	۱	۱	۱۵	۳۰۰۰	۶	۹۹
			۲	۱۸	۲۴۰۰		۹۵
			۳	۲۰	۱۸۰۰		۸۵
			۴	۲۳	۱۵۰۰		۷۰
			۵	۲۵	۱۰۰۰		۵۹
قالب‌بندی و آرماتور گذاری	۳	۱	۱	۱۵	۴۵۰۰	۱۴	۹۸
			۲	۲۲	۴۰۰۰		۸۱
			۳	۳۳	۳۲۰۰		۶۳
بتن ریزی	۴	۱	۱	۱۲	۴۵۰۰۰	۱۹	۹۴
			۲	۱۶	۳۵۰۰۰		۷۶
			۳	۲۰	۳۰۰۰۰		۶۴
آماده سازی فونداسیون و قرار دادن شمع‌ها	۵	۲ و ۳	۱	۲۲	۲۰۰۰۰	۱۷	۹۹
			۲	۲۴	۱۷۵۰۰		۸۹
			۳	۲۸	۱۵۰۰۰		۷۲
			۴	۳۰	۱۰۰۰۰		۶۱
قرارگیری شاه تیرها	۶	۴	۱	۱۴	۴۰۰۰۰	۱۹	۱۰۰
			۲	۱۸	۳۲۰۰۰		۷۹
			۳	۲۴	۱۸۰۰۰		۶۸
تنظیم شاه تیرها	۷	۵ و ۶	۱	۹	۳۰۰۰۰	۱۷	۹۳
			۲	۱۵	۲۴۰۰۰		۷۱
			۳	۱۸	۲۲۰۰۰		۶۷

پروژه اول برای بهینه‌سازی سه هدف زمان، هزینه و کیفیت با استفاده از الگوریتم TS، مورد بررسی واقع شد. نتایج حاصل شده برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت مربوط به پروژه اول، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. جواب‌ها شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان، هزینه و کیفیت بدست آمده که در شکل ۸ با دایره نشان داده شده است. دایره‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده است، به عنوان بهینه‌ترین جواب‌ها شناخته شده‌اند.



شکل۸ : نتایج حاصل از الگوریتم TS برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت در پروژه اول

در جدول ۶، ۱۵ جواب پارتو حاصل از اجرای مدل پیشنهادی برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده توالی و حالت‌های اجرایی فعالیت‌ها می‌باشد. جواب‌های بدست آمده شامل مقادیر مختلفی از سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند.

جدول۶ : نتایج اجرای مدل پیشنهادی برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت پروژه اول

نوع مدل	الگوریتم	داده های مسئله	زمان‌کل(روز)	هزینه(دلار)	کیفیت	توالی وحالت‌های اجرای هر فعالیت							
زمان، هزینه و کیفیت	TS	جدول ۳	۸۹	۱۳۳۵۴۷	۸۷/۵	توالی	۱	۳	۲	۴	۵	۶	۷
						حالت	۱	۱	۱	۲	۱	۳	۱
			۷۹	۱۶۵۵۴۳	۹۷	توالی	۱	۴	۳	۲	۵	۶	۷
						حالت	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
			۹۵	۱۴۰۵۵۲	۸۴/۹۱	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۳	۴	۴	۱	۳	۱
			۹۱	۱۳۷۵۵۰	۸۳/۱۳	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۵	۳	۳	۱	۳	۱
			۹۵	۱۳۲۳۵۲	۸۳/۶۲	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۵	۳	۳	۱	۳	۱
			۹۲	۱۵۱۹۴۹	۸۷/۷۵	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۲	۳	۴	۳	۱	۳	۱
			۹۴	۱۵۸۵۵۵	۸۸/۲۹	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۱	۳	۵	۴	۳	۱	۱
			۸۷	۱۴۹۹۴۸	۹۱/۰۶	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۳	۱	۱	۱	۳	۳
			۹۶	۱۵۱۰۵۳	۹۰/۱۲	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۱	۵	۲	۴	۳	۱	۳
			۸۷	۱۶۱۶۵۰	۹۲/۶۸	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷

							حالت	۳	۵	۳	۱	۳	۱
						۸۷/۹۶	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۲	۳	۵	۴	۱	۱
						۷۶/۷۰	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۱	۳	۳	۱	۳	۳
						۷۷/۸۰	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۳	۱	۲	۴	۳	۱
						۸۸/۵۸	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۱	۳	۲	۲	۱	۳
						۸۲/۳۸	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۱	۲	۲	۴	۳	۱

							حالت	۳	۵	۳	۱	۳	۱
						۸۷/۹۶	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۲	۳	۵	۴	۱	۱
						۷۶/۷۰	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۱	۳	۳	۱	۳	۳
						۷۷/۸۰	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۳	۱	۲	۴	۳	۱
						۸۸/۵۸	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۱	۳	۲	۲	۱	۳
						۸۲/۳۸	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶
							حالت	۱	۲	۲	۴	۳	۱

مطابق نتایج جدول ۶، مدیران پروژه می‌توانند براساس شرایط موجود و اولویت‌های مد نظرشان، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب نمایند. به عنوان مثال اگر برای مدیر، تحویل به موقع یا زودتر ملاک باشد، جوابی با تابع هدف زمانی کمتر را انتخاب می‌نماید، و یا در صورتی که کیفیت اجرای پروژه مد نظر باشد، جوابی که دارای تابع هدف کیفیت بیشتری است را برمی‌گزینند، و اگر هزینه اجرای پروژه ملاک باشد، جوابی که دارای تابع هدف هزینه کمتری می‌باشد، انتخاب می‌شود. در ادامه به منظور مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم مورد نظر با نتایج مطالعه طاهری‌امیری و همکاران [۱۵] جواب ها در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷ : مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم طاهری امیری و همکاران[۱۵]

شماره جواب	جواب بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی			جواب بدست آمده از الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران		
	زمان(روز)	هزینه(دلار)	کیفیت	زمان(روز)	هزینه(دلار)	کیفیت
۱	۷۹	۱۶۵۵۴۳	۹۷	۸۴	۱۵۶۳۱۱/۲	۹۲/۱۷
۲	۸۹	۱۳۳۵۴۷	۸۷/۵	۸۹	۱۴۱۹۱۱/۸	۸۷/۰۷
۳	۹۵	۱۴۰۵۵۲	۸۴/۹۱	۱۰۴	۱۱۰۵۱۳/۸	۷۴/۳۴

مطابق جدول ۷ می‌توان ملاحظه کرد که جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ حاصل از الگوریتم پیشنهادی این تحقیق از نظر تابع کیفیت نسبت به جواب‌های ۱، ۲ و ۳ الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران برتری دارد. در مورد جواب‌های ۱ و ۳ نیز از نظر تابع هدف زمان نسبت به جواب ۱ و ۳ مطالعه طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. از نظر تابع هدف هزینه نیز جواب شماره ۲ الگوریتم مورد نظر نسبت به جواب شماره ۲ طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. لذا، در مجموع می‌توان گفت که الگوریتم جستجوی ممنوع موجب تولید جواب‌هایی با مقادیر بهتر در توابع هدف زمان و کیفیت و در برخی موارد در تابع هزینه نسبت به الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران می‌گردد.

۴-۶-۲- پروژه دوم

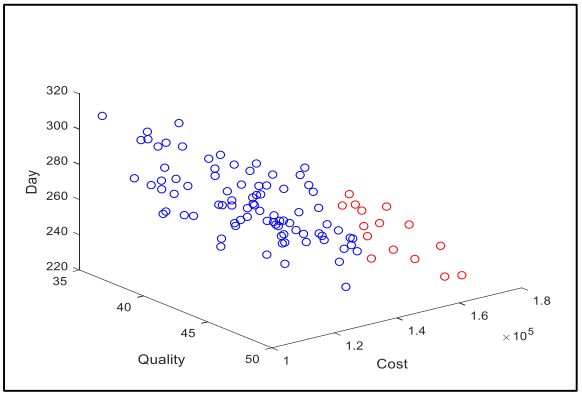
در این بخش به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، به حل مثالی با ابعاد بزرگتر پرداخته شده است. در این مثال یک پروژه عمرانی با ۱۸ فعالیت که برگرفته از مطالعه فنگ [۳۳] که توسط پژوهشگرانی همچون تارک هجازی [۳۴]، ژانگ و همکاران [۳۵]، در حل مسئله موازنه زمان – هزینه استفاده شده است. ال-رایز و کاندیل [۳۶]، نیز با اختصاص مقادیری برای کیفیت اجرای هر فعالیت از این مثال برای مسئله سه هدفه زمان – هزینه – کیفیت و همچنین طاهری‌امیری و همکاران [۱۵] برای موازنه زمان، هزینه و کیفیت بهره گرفته است. اطلاعات مورد نیاز و روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸ : اطلاعات و روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها برای پروژه دوم

شماره فعالیت	گزینه‌های اجرا	زمان (روز)	هزینه (دلار)	درصد تاثیر در کیفیت کل	شاخص کیفی ۱	کیفیت
۱	۱	۱۴	۲۴۰۰	۳	۵۰	۱۰۰
	۲	۱۵	۲۱۵۰			۹۰
	۳	۱۶	۱۹۰۰			۸۶
	۴	۲۱	۱۵۰۰			۷۵
	۵	۲۴	۱۲۰۰			۶۳
۲	۱	۱۵	۳۰۰۰	۵	۴۰	۹۸
	۲	۱۸	۲۴۰۰			۸۷
	۳	۲۰	۱۸۰۰			۸۱
	۴	۲۳	۱۵۰۰			۷۷
	۵	۲۵	۱۰۰۰			۶۰
۳	۱	۱۵	۴۵۰۰	۷۰	۷۰	۱۰۰
	۲	۲۲	۴۰۰۰			۸۰
	۳	۳۳	۳۲۰۰			۶۲
۴	۱	۱۲	۴۵۰۰۰	۱۱	۵۰	۹۹
	۲	۱۶	۳۵۰۰۰			۷۴
	۳	۲۰	۳۰۰۰۰			۵۹
۵	۱	۲۲	۲۰۰۰۰	۱۰	۶۰	۱۰۰
	۲	۲۴	۱۷۵۰۰			۹۳
	۳	۲۸	۱۵۰۰۰			۷۷
	۴	۳۰	۱۰۰۰۰			۶۱
۶	۱	۱۴	۴۰۰۰۰	۱۱	۵۰	۹۵
	۲	۱۸	۳۲۰۰۰			۷۶
	۳	۲۴	۱۸۰۰۰			۵۹
۷	۱	۹	۳۰۰۰۰	۱۰	۳۰	۹۷
	۲	۱۵	۲۴۰۰۰			۷۰
	۳	۱۸	۲۲۰۰۰			۶۱
۸	۱	۱۴	۲۲۰	۱	۱۰۰	۹۵
	۲	۱۵	۲۱۵			۸۳
	۳	۱۶	۲۰۰			۷۵
	۴	۲۱	۲۰۸			۶۸
	۵	۲۴	۱۲۰			۶۱
۹	۱	۱۵	۳۰۰	۱	۵۰	۱۰۰
	۲	۱۸	۲۴۰			۹۷
	۳	۲۰	۱۸۰			۸۱
	۴	۲۳	۱۵۰			۷۱
	۵	۲۵	۱۰۰			۶۳
۱۰	۱	۱۵	۴۵۰	۱	۶۰	۹۴
	۲	۲۲	۴۰۰			۷۹
	۳	۳۳	۳۲۰			۶۳
۱۱	۱	۱۲	۴۵۰	۲	۷۰	۹۶
	۲	۱۶	۳۵۰			۷۲
	۳	۲۰	۳۰۰			۶۱
۱۲	۱	۲۲	۲۰۰۰	۳	۵۰	۹۹
	۲	۲۴	۱۷۵۰			۸۹
	۳	۲۸	۱۵۰۰			۷۰
	۴	۳۰	۱۰۰۰			۶۲
۱۳	۱	۱۴	۴۰۰۰	۷	۴۰	۹۹
	۲	۱۸	۳۲۰۰۰			۷۳
	۳	۲۴	۱۸۰۰			۶۲
۱۴	۱	۹	۳۰۰۰	۶	۸۰	۱۰۰
	۲	۱۵	۲۴۰۰			۷۹

	۳	۱۸	۲۲۰۰			۶۳
۱۵	۱	۱۶	۳۵۰۰	۷	۷۰	۱۰۰
۱۶	۱	۱۶	۳۰۰۰	۳	۳۰	۹۷
	۲	۲۰	۲۰۰۰			۸۹
	۳	۲۲	۱۷۵۰			۸۱
	۴	۲۴	۱۵۰۰			۷۲
	۵	۲۸	۱۰۰۰			۶۰
۱۷	۱	۱۴	۴۰۰۰	۶	۷۰	۹۸
	۲	۱۸	۳۲۰۰			۷۳
	۳	۲۴	۱۸۰۰			۶۲
۱۸	۱	۹	۳۰۰۰	۵	۳۰	۹۸
	۲	۱۵	۲۴۰۰			۷۵
	۳	۱۸	۲۲۰۰			۶۳

پروژه دوم برای بهینه‌سازی سه هدف زمان، هزینه و کیفیت با استفاده از الگوریتم TS، مورد بررسی واقع شد. نتایج حاصل شده برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت مربوط به پروژه دوم، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است جواب‌هایی شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان، هزینه و کیفیت بدست آمده که در شکل ۹ با دایره نشان داده شده است. در این میان دایره‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده است، به عنوان بهینه‌ترین جواب‌ها شناخته شده‌اند.



شکل۹ : نتایج الگوریتم TS برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت در پروژه دوم

در جدول ۹، ۱۲ جواب پارتو حاصل از اجرای مدل پیشنهادی برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده توالی و حالت‌های اجرایی فعالیت‌ها می‌باشد. جواب‌های بدست آمده شامل مقادیر مختلفی از سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند. با توجه به نتایج جدول ۹، مدیران پروژه می‌توانند براساس شرایط موجود و اولویت‌های مورد نظرشان، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب نمایند. به عنوان مثال اگر برای مدیر، تحویل به موقع یا زودتر از موعد ملاک باشد، جوابی با تابع هدف زمانی کمتر را انتخاب می‌نماید، و یا در صورتی که کیفیت اجرای پروژه مدنظر باشد، جوابی که دارای تابع هدف کیفیت بیشتری است را برمی‌گزینند، و اگر هزینه اجرای پروژه ملاک باشد، جوابی که دارای تابع هدف هزینه کمتری می‌باشد، انتخاب می‌شود.

جدول ۹ : نتایج مدل پیشنهادی بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت پروژه دوم

نوع مدل	الگوریتم	داده های مسئله	زمان کل(روز)	کیفیت	هزینه(دلار)	توالی و حالت‌های اجرای هر فعالیت																		
زمان،	TS	جدول ۵	۲۰۳	۵۱،۷۱	۱۶۹۰۷۱	توالی	۳	۷	۵	۴	۱۱	۱۴	۶	۲	۱	۸	۱۶	۹	۱۲	۱۰	۱۳	۱۵	۱۷	۱۸

۲۱۷	۲۲۵		۲۲۱		۲۲۴		۲۲۵		۲۱۷		۲۱۴		۲۲۰		۲۲۳		۲۱۹		۳۳۰		
۴۸,۹	۴۷,۲۳		۴۸,۲۰		۴۸,۳۰		۴۷,۷۷		۴۸,۴۵		۴۸,۷۲		۵۰,۱۰		۴۷,۵۹		۴۷,۳۶		۳۳,۵۵		
۱۵۷ ۴۴۰	۱۵۸۶۳۱		۱۵۵۰۶۶		۱۳۱۰۶۳		۱۵۶۸۹۶		۱۵۸۷۹۳		۱۴۹۵۷۳		۱۶۷۰۵۵		۱۴۸۴۹۵		۱۴۷۹۸۶		۱۰۰۲۱۳		
توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت	توالی	حالت
۳	۱	۳	۱	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۱	۳	۲	۳	–	–	۳	۷	۱
۱	۱	۱	۳	۱	۲	۱	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۳	۱	۲	۱	۲	۱	۵	۵	۱
۶	۱	۱۳	۱	۱۳	۲	۱۳	۱	۱۳	۱	۱۳	۲	۱۳	۱	۱۳	۱	۱۳	۱	۱۳	۴	۲	۱
۵	۱	۵	۲	۵	۱	۵	۲	۵	۲	۵	۲	۵	۲	۵	۲	۵	۱	۵	۵	۹	۱
۷	۲	۷	۲	۷	۲	۷	۱	۷	۱	۷	۲	۷	۲	۷	۱	۷	۲	۷	۳	۱۳	۱
۲	۲	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۱	۲	۵	۱	۱
۴	۱	۴	۱	۴	۱	۴	۱	۴	۲	۴	۲	۴	۲	۴	۱	۴	۲	۴	۳	۱۱	۱
۶	۱	۶	۱	۶	۲	۶	۲	۶	۱	۶	۱	۶	۲	۶	۲	۶	۱	۶	۳	۳	۱
۹	۲	۹	۱	۹	۲	۹	۱	۹	۱	۹	۱	۹	۱	۹	۱	۹	۱	۹	۵	۸	۱
۸	۳	۸	۴	۸	۴	۸	۲	۸	۴	۸	۴	۸	۳	۸	۴	۸	۲	۸	۳	۴	۱
۱۰	۲	۱۰	۲	۱۰	۲	۱۰	۲	۱۰	۲	۱۰	۱	۱۰	۱	۱۰	۱	۱۰	۲	۱۰	۳	۶	۱
۱۱	۲	۱۱	۲	۱۱	۲	۱۱	۱	۱۱	۲	۱۱	۱	۱۱	۲	۱۱	۲	۱۱	۲	۱۱	۳	۱۰	۱
۱۴	۱	۱۴	۱	۱۴	۲	۱۴	۱	۱۴	۱	۱۴	۱	۱۴	۱	۱۴	۱	۱۴	۲	۱۴	۴	۱۲	۱
۱۲	۱	۱۲	۱	۱۲	۱	۱۲	۱	۱۲	۱	۱۲	۲	۱۲	۱	۱۲	۲	۱۲	۲	۱۲	۳	۱۴	۱
۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۱	۱۵	۵	۱۶	۱
۱۶	۳	۱۶	۲	۱۶	۱	۱۶	۳	۱۶	۲	۱۶	۲	۱۶	۳	۱۶	۱	۱۶	۲	۱۶	۳	۱۸	۱
۱۷	۱	۱۷	۱	۱۷	۱	۱۷	۲	۱۷	۲	۱۷	۲	۱۷	۳	۱۷	۲	۱۷	۱	۱۷	۱	۱۵	۱
۱۸	۲	۱۸	۲	۱۸	۱	۱۸	۲	۱۸	۱	۱۸	۱	۱۸	۱	۱۸	۳	۱۸	۲	۱۸	۳	۱۷	۱

به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی ممنوع با نتایج مطالعه طاهری‌امیری و همکاران [۱۵] با مثالی در ابعاد بزرگ‌تر مقایسه شد، که تعدادی از جواب‌ها در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰ : مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم طاهری امیری و همکاران[۱۵]

شماره جواب	جواب بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی			جواب بدست آمده از الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران[۱۵]		
	زمان(روز)	هزینه(دلار)	کیفیت	زمان(روز)	هزینه(دلار)	کیفیت
۱	۲۰۳	۱۶۹۰۷۱	۵۱/۷۱	۲۳۴	۱۵۷۰۸۱/۲	۵۰/۷۶
۲	۲۱۹	۱۴۷۹۸۶	۴۷/۳۶	۲۳۴	۱۵۱۵۰۱/۲	۴۲/۵۸
۳	۳۳۰	۱۰۰۲۱۳	۳۳/۵۵	۲۴۹	۹۷۵۸۳/۲	۴۳/۵۷

مطابق جدول ۱۰ می‌توان مشاهده نمود که جواب‌های شماره ۱ و ۲ الگوریتم پیشنهادی از نظر تابع هدف زمان و کیفیت نسبت به جواب‌های شماره ۱ و ۲ الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. از نظر تابع هدف هزینه نیز جواب شماره ۲ الگوریتم پیشنهادی مطالعه حاضر نسبت به جواب شماره ۲ الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. بنابراین، در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی مطالعه حاضر موجب تولید جواب‌هایی با مقادیر بهتر در دو تابع هدف زمان و کیفیت و در برخی موارد در تابع هزینه نسبت به الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران می‌گردد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل و حل مثال تران و همکاران با الگوریتم پیشنهادی این پژوهش، نتایج بدست آمده از جدول ۴ بیانگر عملکرد صحیح و قابل قبول الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. جدول ۴ دارای سه جواب پارتو الگوریتم پیشنهادی و سه جواب پارتو از مطالعه تران و همکاران می‌باشد. مطابق جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که جواب‌های شماره ۱ و ۲ از نظر دو تابع هدف هزینه و کیفیت نسبت به جواب‌های شماره ۱ و ۲ مطالعه تران و همکاران بهتر بوده است. در مجموع می‌توان گفت که الگوریتم جستجوی ممنوعه موجب تولید جواب‌های پارتو با مقادیر بهتر در دو تابع هدف هزینه و کیفیت نسبت به مطالعه تران و همکاران شده است. اما نمی‌توان به قطع ادعا کرد که از نظر زمانی بهتر عمل کرده است. به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی دو مطالعه موردی با ۷ و ۱۸ فعالیت در نظر گرفته شد، که نتایج مطالعه موردی اول در جدول ۵ با ۱۵ جواب پارتو و نتایج مربوط به مطالعه موردی دوم در جدول ۹ با ۱۲ جواب پارتو ارائه شده است. نتایج بدست آمده شامل مقادیر مختلف از سه تابع زمان، هزینه و کیفت می‌باشند. این نتایج به گونه‌ای هستند که به مدیران و تصمیم‌گیران اجازه می‌دهد که با توجه توجه به سیاست‌های مدنظرشان از نظر زمانی، هزینه‌ای و کیفی، جوابی که دارای تابع هدف بهتری می‌باشد را برگزینند. در این مقاله، یک مدل سه هدفه در روش زنجیره بحرانی برای حل مسئله زمانبندی پروژه تحت محدودیت منابع در نظر گرفته شد. زمان اتمام پروژه، هزینه کل و کیفیت اجرای فعالیت‌ها به عنوان سه هدف مدل پیشنهادی مطرح شد. در این راستا، از الگوریتم جستجوی ممنوعه برای ارائه پاسخ‌های مختلف پارتو به مدیران پروژه استفاده شد. در صورت وجود تعریف صحیح از مسئله برای دستیابی به راه حل بهینه و اعمال صحیح پارامترهای پروژه، پاسخ‌های بهتری به دست خواهد آمد. بدین منظور ابتدا مبنای الگوریتم جستجوی ممنوعه بررسی شد. سپس مسئله بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت با الگوریتم پیشنهادی برای حالت و توالی‌های مختلف انجام گرفت. و سرانجام نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

واضح است که صرفاً کیفیت خوب جواب‌های بدست آمده به وسیلهٔ یک الگوریتم نمی‌تواند برای ارزیابی مناسب بودن الگوریتم کافی باشد. به همین جهت زمان حل مثال‌های ارائه شده به وسیلهٔ الگوریتم پیشنهادی نیز به عنوان یک معیار مهم جهت مناسب بودن

الگوریتم در نظر گرفته شد. به گونه‌ای که با حل مطالعه‌های موردی پژوهش با الگوریتم مورد نظر، مشخص شد که سرعت رسیدن به مجموعه جواب مسئله بسیار بالا بوده، به طوری که برای حل دو مطالعه موردی ذکر شده در بخش ۴، زمانی حدود ۳۰ تا ۴۰ ثانیه صرف شده است، و پس بررسی تحقیقات مشابه آشکار شد که این زمان، در مقایسه با زمان حل الگوریتم تحقیق طاهری امیری و همکاران [۱۵] کمتر می‌باشد. به دلیل سرعت بالای این مدل و همگرا شدن سریع جواب‌ها، این مدل می‌تواند برای پروژه‌های بزرگ‌تر و با مقیاس کلان‌تر موثر واقع شود. در واقع مدل پیشنهادی، می‌تواند مدیران، تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان پروژه‌های عمرانی را در ارزیابی اثرات برنامه‌های مختلف مصرف منابع بر روی عملکرد پروژه کمک قابل توجهی نماید.

با توجه به پیچیدگی مبحث برنامه ریزی پروژه، مدل پیشنهادی با چالش‌هایی روبه‌رو می‌باشد. از جمله این موارد می‌توان به در نظر گرفتن اهداف دیگری علاوه‌بر زمان، هزینه و کیفیت اشاره کرد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان توسعه‌های مختلفی جهت انجام تحقیقات آتی بر روی مدل پیشنهادی در این تحقیق در نظر گرفت. همچنین می‌توان رویکردهای متفاوتی از رویکرد زنجیره بحرانی، همانند رویکرد تئوری فازی و مدل‌های تصادفی جهت اعمال عدم قطعیت‌ها استفاده نمود. همینطور می‌توان روشی غیر از روش ارائه شده در پژوهش حاضر جهت محاسبه بافر پروژه مورد استفاده قرار داد.

منابع

[1] Park, W. R., and Chapin, W. B. (1992). *Construction bidding*. Wiley, New York: Strategic pricing for profit.

[2] Yang, B., Geunes, J. and O'Brien, W. (2006). *Resource constrained project scheduling: past work and new directions*. Gainesville: Research Report, Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, FL.

[3] Iraj, M., Hemmatian, M., Taheri Amiri, M. J., and ghenaat, O. (2019). Presentation of exact and metaheurestic solution method for minimization project completion time with considering budget constraint problem. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6 (3), 41-56.

[4] Yadollahi, M. and Rahimizade, A. (2018). Optimizing the implementation of development projects with limited resources using genetic algorithms. *Third International Conference on Composition, Cryptography and Computing.* Tehran: Iran University of Science and Technology, Narmak, 374-400.

[5] Alemtabriz, A., Ayough, A. and Baniasadi, M. (2016). Presentation and Solution of Critical Chain Project Scheduling Problem (CCPSP) model with consideration of feeding buffer. *Journal of Industrial Management Studies*, 14(42), 31-59.

[6] Soltani, R., Jolai, F., and Zandieh, M. (2010). Two Robust Meta-Heuristics for Scheduling Multiple Job Classes on a Single Machine with Multiple Criteria. *Expert Systems with Applications,* 37(8), 5951-5959.

[7] Peteghem, V.V. and Vanhoucke, M. (2010). "A Genetic Algorithm for the Preemptive and Non-Preemptive Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 201(2), 409–418.

[8] Alikhanzadeh, W., Kazemi, M. and Laghziyan, M. (2014). Optimizing the balance of cost, time and quality in construction projects with the approach of examining the impact of material selection and labor. *International Conference on Industrial Management and Engineering.*Tehran: International Conference on Industrial Management and Engineering.

[9] Vicente, V. Sacramento, Q., and Francisco B., (2003). Resource-Constrained Project Scheduling: A critical Activity Reordering Heuristic. *European Journal of Operational Research*, 149(2003), 282–301.

[10] Hazir, O., Houari, M., and Erel, E., (2010). Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost tradeoff problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 633-643.

[11] Anagnostopoulos, K.P., and Kotsikas, L., (2010). Experimental evaluation of simulated annealing algorithms for the time– cost trade-off problem. *Applied Mathematics and Computation*, 217(1), 260-270.

[12] Raad, N., Shirazi, M and Ghodsypour, S. (2020). Selecting a portfolio of projects considering both optimization and balance of sub-portfolios. *Journal of Project Management*, 5(1), 1-16.

[13] Hesami, S. and Molaie, Z. (2015). Scheduling optimization of highway construction projects based on Lean thinking. *Journal of Modeling in Engineering*, 13(40), 33-42.

[14] Taheri Amiri, M.J., Haghighi, F., Eshtehardian, E., and Abessi, O., (2018). Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(10), 3738-3752.

[15] Taheri Amiri, M.J., Haghighi, F., Eshtehardian, E., and Abessi, O., (2019). Time-Cost-Quality trade off in Critical Chain Method with multi-mode activities by Multi Objective Particle Swarm Optimization. *Journal of Structural Engineering and Construction.* 6(1). 134-154.

[16] Taheri Amiri, M. J., Haghighi, F. R., Eshtehardian, E., Hemmatian, M., and Khaleqnejad, R., (2020). Optimization of time, cost and quality in critical chain method in multi-project Scheduling and resource constraints with considering utility function. *Journal of Structural and Construction Engineering,* 7 (3), doi: 10.22065 / jsce.2019.122218.1496.

[17] Taheri Amiri, M. J., Hemmatian, M., and Asghari, A. (2020). Prioritize and Optimal Selection of Projects with Best to Worth method VIKOR and Mathematical Programming. *Journal of Structural and Construction Engineering*, doi: 10.22065 / jsce.2020.209215.2000.
[18] Jones, D.F., Mirrazavi, S.K. and Tamiz, M. (2002). Multi-objective meta- heuristic: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 137(1), 1-9.
[19] Sharifinya, A. and Kolahan, F. (2005). Application of Tabu Search Algorithm in Multipurpose Planning of Flexible Production Systems. *First International Conference and Seventh National Conference on Construction Engineering*. Tehran: First International Conference and Seventh National Conference on Construction Engineering.
[20] Glover, F. (1989). Tabu search — Part I. *ORSA Journal of computing*, 1 (3), 190–206.
[21] Kolahan, F. and Liang, M., (1998). An adaptive TS approach to JIT sequencing with variable processing times and sequence-dependent setups. *European Journal of Operational Research*, 109(1), 142-159.
[22] Kolahan, F. (1999). *Modeling and analysis of integrated Machine-level planning problems for automated manufacturing*. PhD thesis. Mechanical and aeronautical engineering university of Ottawa.
[23] Bräysy, O. and Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics. *Transportation Science*, 39(1), 119–139.
[24] Laporte, G. Gendreau, M. Potvin, J. and Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing. *International Transactions in Operational Research*, 7(4-5), 285-300.
[25] Toth, P. and Vigo, D. (2003). The granular tabu search and its application to the vehicle routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 15(4), 333–346.
[26] Paraskevopoulos, D.C. Repoussis, P. P., Trantilis, C. D., Loannou, G., and Prastacos, G. P. (2008). "A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *Journal of Heuristics*, 14(5), 425–455.
[27] Hasançebi, O., Çarbaş, S., Doğan, E., Erdal, F., and Saka, M. P. (2009). Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures. *Computers and Structures*, 87(5-6), 284-302.
[28] Gendreau, M., (2003). *An Introduction to Tabu Search, in handbook of Metaheuristics*, Glover, F., Kochenberger, G.A., (Eds.), Kluwer Academic publishers: Norwell.
[29] Glover, F. and Laguna, M. (1993). *Tabu search in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. C. R.* Reeves Ed London: Blackwell Sciatic.
[30] Tran, D. H., Cheng, M. Y., Cao, M. T., (2015). Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time-cost-quality trade off problem. *Knowledge-Based Systems*, 74(1), 176-186.
[31] Feng, C., Liu, L., and Burns, S. (1997). Using Genetic Algorithm to Solve Construction Time-Cost Trade-off Problems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11(3), 184-189.
[32] Eshtehardiyan, E. (2008). Time-Cost Balance Using Genetic Algorithm and Fuzzy Logic in Expressing Uncertainties. PhD Thesis. Iran University of Science and Technology.
[33] Feng, C., Liu, L., and Burns, S., (2000). Stochastic Construction Time Cost Trade-off Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(2), 117-126.
[34] Hegazy T., (1999). Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms. *Canidian Journal of Civil Engineering*, 26(6), 685-697.
[35] Zhang, L., Du, J., and Zhang, S. (2014). Solution to Time-Cost-Quality Trade-off Problem in Construction Projects Based on Immune Genetic Particle Swarm Optimization. *Journal of Management in Engineering*, 30(2), 163- 172.
[36] El-Rayes K, and Amr Kandil A. (2005). Time-Cos-Quality Trade-off Analysis for Highway Constructions. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(4), 447-486.