نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ۱، سال ۱۳۹۸، صفحه ۱۳۴ تا ۱۵۴

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

موازنه زمان-هزینه-کیفیت در روش زنجیره بحرانی با فعالیت‌های چندحالته با استفاده از الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات

محمدجواد طاهری امیری [۱]، فرشیدرضا حقیقی [۲*]، احسان اله اشتهاردیان [۳]، عزیر عابسی [۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۳- استادیار، گروه مدیریت پروژه و ساخت، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل،ایران

چکیده

با اعتقاد به این واقعیت که یک فعالیت می‌تواند از چندین راه یا حالت انجام پذیرد و یا در شرایط واقعی، ممکن است چندین حالت اجرایی برای فعالیت‌ها با میزان منابع مختلف وجود داشته باشد، نیاز به ارزیابی زمانبندی حاصل از روشهای مختلف از ترکیب‌های مختلف زمان-منابع-کیفیت و بهینه‌سازی آنها می‌باشد که از آن به مسائل با عنوان زمانبندی پروژه با منابع چند حالته یاد می‌شود. از طرفی دیگر کاربرد تئوری محدودیت‌ها در مدیریت پروژه منجر به ایجاد رویکرد جدیدی در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌ها با عنوان زنجیره بحرانی شده است که مطالعه حاضر استفاده از تکنیک زنجیره بحرانی و موازنه همزمان زمان-هزینه-کیفیت را مدنظر دارد. در این مطالعه با استفاده از توانایی بالای الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات در بهینه‌سازی، به حل مسئله چند هدفه موازنه زمان-هزینه-کیفیت و با تکنیک زنجیره بحرانی پرداخته شده است تا بتواند مناسب‌ترین توالی و حالت اجرایی فعالیت‌ها به نحوی که در آن زمان، هزینه و کیفیت در بهینه‌ترین حالت ممکن نزدیک به واقعیت و اجرایی خود قرار داشته باشند را بیابد. برنامه‌نویسی الگوریتم بهینه‌سازی با نرم افزار متلب کدنویسی شده و نتایج مورد نظر استخراج شد. به منظور ارزیابی مدل پیشنهاد شده، دو مثال موردی با تعداد ۷ و ۱۸ فعالیت حل شده است. در ضمن از یک پروژه با ۶۰ فعالیت نیز که موازنه زمان هزینه کیفیت در آن صورت گرفته بود، به منظور صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است و نتایج جدیدی استخراج شده و مقایسه صورت گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم توسعه داده شده عملکرد صحیح و خوبی داشته است به طوریکه قابلیت ایجاد چندین جواب پارتو با مقادیر مختلف سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت را دارد که این امر به مدیران پروژه این امکان را می‌دهد تا با توجه به اولویت خود از نظر زمانی، کیفی یا هزینه‌ای جواب بهتر را برگزینند.

کلمات کلیدی: زنجیره بحرانی، موازنه‌ی هزینه، زمان و کیفیت، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه، جواب‌های پارتو

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2017.92752.1265
۱۳۹۶/۰۴/۲۷	۱۳۹۶/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۹/۰۲	۱۳۹۶/۰۹/۰۲	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	doi: 10.22065/JSCE.2017.92752.1265

*نویسنده مسئول: فرشیدرضا حقیقی

پست الکترونیکی: Haghighi@nit.ac.ir

Time-Cost-Quality trade off in Critical Chain Method with multi mode activities by Multi Objective Particle Swarm Optimization

Mohammad Javad Taheri Amiri[1], farshidreza haghighi[2*], Ehsan Eshtehardian[3], ozeair abessi[4]

1-PhD Student in Construction Management, Babol University of Technology, Babol, Iran
2-Assistant Professor,Faculty of Civil Engineering, Babol University of technology, Babol, Iran
3-Assistant Professor, Department of Project and Construction Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
4-Assisstat Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol University of technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Believing in the fact that an activity can be performed through several methods or states, or that there may be several executive states for activities with different numbers of resources in real conditions, the scheduling obtained from different methods with different combinations of time, resources, and quality need to be evaluated and optimized. These are referred to as project scheduling problems with multistate resources. On the other hand, application of the theory of constraints to project management has led to the development of a novel approach in project planning and control known as the critical chain. The present paper seeks to use the critical chain technique and simultaneous time-cost-quality trade off. In this study, the multi-objective problem of time-cost-quality trade off has been solved using the high capability of the multi-objective particle swarm algorithm in optimization and the critical chain technique, so that the most appropriate sequence and executive state of activities is found such that time, cost, and quality are optimized and close to reality. The optimization algorithm programming was coded in the MATLAB software, and the target results were extracted. For evaluation of the proposed model, two case studies with 7 and 18 activities have been solved. Furthermore, a project with 60 activities where the time-cost-quality trade off had been established were used for validation of the proposed algorithm, and new results were extracted. The results demonstrated that the developed algorithm has had correct, proper performance, in such a way that it is capable of generating several Pareto solutions with different time, cost, and quality values. Furthermore, the results have been reported separately based on the best time, cost, and quality, which makes it possible for the project managers to select the better solutions given their priorities in the project.

ARTICLE INFO

Received: 19/07/2017
Revised: 21/11/2017
Accepted: 23/11/2017

Keywords:
project management,
Time-Cost-Quality trade-off,
Multi-Objective Optimization,
Particle Swarm Optimization,
Pareto

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.92752.1265

*Corresponding author: farshidreza haghighi
Email address: Haghighi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

در شرایط رقابتی اقتصاد امروز، توانایی به حداقل رساندن زمان و یا هزینه می‌تواند در سوددهی یا حتی بقای یک شرکت پیمانکاری نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد. به هر حال، از آنجا که زمان ساخت از پیش تعیین شده و در اسناد مناقصه نیز ذکر می‌گردد، شرکت کنندگان در مناقصه معمولا به یک هدف توجه دارند، برای مثال حداقل کردن هزینه پروژه، به منظور اینکه بتوانند قیمتی پایین‌تر از رقبای خود در مناقصه ارائه دهند[۱]. با افزایش مقبولیت روشهای دیگر مناقصه و سیستم واگذاری پروژه مثل طراحی -ساخت، ساخت - بهره برداری -واگذاری و غیره، انعطاف‌پذیری در زمان اتمام پروژه افزایش یافته است. همچنین این امر بدین معنی است که در طی زمان بندی پروژه، هر دو معیار زمان و هزینه توأماً باید محاسبه و مد نظر قرار گیرند. حداقل کردن هزینه همزمان با فشرده کردن زمان پروژه، پیمانکاران را وادار به محاسبه بهینه‌سازی زمان-هزینه قبل از هر تصمیم‌گیری در این راستا می‌نماید[۲]. توجه شود که کاهش زمان اجرای فعالیت از زمان معمولی مورد نیاز برای اجرا به زمانی کوتاه‌تر همواره با صرف هزینه همراه است؛ در مقابل با کاهش زمان تکمیل پروژه، صرفه‌جویی‌هایی برای پیمانکاران و صاحب‌کار عاید می‌شود و سرمایه‌های راکد پروژه زودتر به کار می‌افتد. برای کاهش زمان یک فعالیت باید میزان منابع مورد استفاده در آن فعالیت را افزایش داد، یا در روش‌های فنی اجرای آن فعالیت تغییراتی در جهت تسریع زمان اجرا ایجاد نمود. به عبارت دیگر، برای اجرای یک فعالیت در زمانی کوتاه‌تر از آنچه که در شرایط معمولی قابل اجراست، لازم است به حجم منابعی نظیر نیروی کار و تعداد تجهیزات و ماشین‌آلات افزوده و یا تجهیزات گران‌تر و دارای توان بیشتری را به کار گرفت و یا در روشهای فنی اجرا تغییراتی را به وجود آورد[۳]. از سوی دیگر، تنها کنترل دو معیار زمان و هزینه نمی‌تواند تضمین کننده حصول موفقیت در انجام پروژه باشد. حتی ممکن است کاستن زمان یا هزینه منجر به کاهش کیفیت اجرایی پروژه شود، از اینرو در نظر گرفتن فاکتور دیگری همانند کیفیت اجرای فعالیت‌ها می‌تواند در مدیریت پروژه اثرگذار باشد، اگرچه با توجه به اهمیت بسیار زیاد فاکتورهای مدیریت زمان، هزینه و کیفیت که در استاندارد گستره دانش مدیریت پروژه[1] (PMBOK) نیز بر روی آنها تاکید بسیار شده است[۴]، مقالات اندکی به بررسی موازنه بین سه هدف زمان، هزینه و کیفیت پرداخته‌اند. بدین منظور لازم است در بهینه‌سازی، تکنیک بهینه سازی همزمان آنها مدنظر قرار گیرد که در این راستا، از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌گردد. با توجه به اهمیت فاکتور زمان در برنامه‌ریزی پروژه، روشهای مختلفی به منظور زمانبندی پروژه‌ها به وجود آمده است. یکی از روشهایی که نسل نوین روشهای برنامه‌ریزی پروژه را به وجود آورده است، روش زنجیره بحرانی می‌باشد. روش زنجیره بحرانی توسط گلدرات با توجه به کاربرد تئوری محدودیت‌ها در برنامه‌ریزی پروژه به وجود آمد [۵]. تحقیقات بسیاری در زمینه مزایا و معایب این روش انجام شده است و نقدهای بسیاری بر روی آن انجام شده است[۶-۱۲]. با توجه به مطالعات صورت گرفته، روش زنجیره بحرانی توانست نسبت به روشهای قبلی برنامه‌ریزی پروژه عملکرد بهتری را داشته[۱۳،۱۴] و از طریق حذف عدم قطعیت‌های موجود در زمان فعالیت‌ها زمان اجرای پروژه‌ها را کاهش داده[۱۵] و با توجه به ایجاد انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی پروژه‌ها، با در نظر گرفتن بافرهای زمانی مورد استقبال مدیران پروژه قرار گیرد[۱۶،۱۷]. فاکتور دیگری که در برنامه‌ریزی پروژه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد فاکتور هزینه‌ای پروژه می‌باشد که شامل هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم پروژه می‌باشد. منظور از هزینه‌های مستقیم، شامل مجموع هزینه‌های مربوط به منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر همه فعالیت‌های پروژه بوده و هزینه‌های غیرمستقیم شامل هزینه‌های ثابت شرکت در طول اجرای پروژه می‌باشد. کیفیت کلی پروژه نیز از طریق مجموع وزنی کیفیت هر یک از فعالیت‌ها بدست می‌آید. وزن مشخصه کیفی هر فعالیت، اهمیت و سهم کیفیت آن فعالیت را در کیفیت کل پروژه نشان می‌دهد که باید توسط مدیران پروژه تعیین گردد. بطوریکه مجموع وزن‌های تخصیص داده شده باید برابر یک باشد. با گسترش مسائل زمانبندی پروژه، یک فعالیت می‌تواند از چندین راه یا حالت انجام پذیرد که هر یک از این حالات، منعکس‌کننده ترکیبی از زمان لازم، منابع و کیفیت اجرای مورد نیاز برای انجام فعالیت هستند[۱۸]. این مفهوم جدید سبب توسعه یکی از عمومی‌ترین حالت‌های مسائل زمانبندی با عنوان زمانبندی پروژه با منابع چند حالته شده است که بسیاری از مسائل واقعی را با استفاده از آن می‌توان مدلسازی کرد. به هر حال در شرایط واقعی، ممکن است چندین حالت اجرایی برای فعالیت‌ها با میزان منابع مختلف منطقی باشد، زیرا وجود حالتهای مختلف اجرا برای فعالیت‌ها منجر

1-Project Management Body of Knowledge

به کاهش تاخیر فعالیت‌ها و زمان بیکاری منابع می‌گردد[۱۹]. انتخاب حالت‌های اجرایی مربوط به فعالیت‌ها در زمانبندی پروژه وابسته به اهداف و محدودیت‌های پروژه می‌باشد[۲۰].

با توجه به اینکه مسائل موازنه زمان-هزینه از نوع مسائل np-hard محسوب می‌شوند[۲۱]، مسائل زمان-هزینه-کیفیت نیز بدلیل پیچیدگی بیشتر مسئله از نوع np-hard محسوب می‌شوند. با توجه به این مسئله امکان حل دقیق مسئله وجود نداشته و باید از روشهای فراابتکاری به منظور حل مسئله بهره گرفته شود. در زمینه حل مسائل موازنه زمان-هزینه-کیفیت، الگوریتم‌های فراابتکاری بسیاری به منظور بهینه‌سازی آنها توسعه داده شده است، مانند الگوریتم شبیه سازی تبرید توسط طاهری امیری و همکاران[۲۲]، الگوریتم ژنتیک توسط مونگله و همکاران[۲۳]. مقالات اندکی وجود دارد که با استفاده از مدلهای چند هدفه به حل مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت پرداخته باشد[۲۴-۲۶]. با توجه به اینکه در مدلهای چند هدفه به مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو رسیده می‌شود که هیچ یک از این جواب‌ها بر هم برتری ندارند، این قابلیت را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد که از بین جواب‌های پارتو یکی را با توجه به شرایط پروژه انتخاب کند، بنابراین می‌توان گفت که مدلهای چند هدفه نسبت به مدلهای تک هدفه برتری دارند، بنابراین با توجه به توضیحات ارائه شده، در این مقاله به بررسی مدل سه هدفه زمان، هزینه و کیفیت با استفاده از روش الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چند هدفه (MOPSO) پرداخته شده است.

۲- بهینه‌سازی چند هدفه گروه ذرات (MOPSO)

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه گروه ذرات توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید و در واقع این الگوریتم تعمیمی است از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) که برای حل مسائل چند هدفه بکار می‌رود. در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام آرشیو یا مخزن[۲] نسبت به الگوریتمPSO اضافه شده است که به تالار مشاهیر[۳] نیز معروف است. انتخاب بهترین جواب کلی و بهترین خاطره شخصی برای هر ذره، گام مهم و اساسی در الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه گروه ذرات است. هنگامی که ذرات می‌خواهند حرکتی انجام دهند، یک عضو از مخزن را به عنوان لیدر یا رهبر انتخاب می‌کنند. این لیدر حتما باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. اعضای مخزن بیانگر جبهه پارتو و شامل ذرات نامغلوب هستند. پس به جای Gbest یکی از اعضای مخزن انتخاب می‌شود. به این دلیل در PSO مخزن وجود ندارد زیرا در آن تنها یک هدف وجود دارد و یک ذره است که بهترین است. اما در MOPSO چند ذره وجود دارد که نامغلوب هستند و در مجموعه جواب جای دارند. برای مقایسه بهترین بردار خرد فردی به شکل زیر عمل می‌کنیم[۲۷]:

۱) اگر موقعیت جدید بهترین خاطره را مغلوب کند، آنگاه موقعیت جدید جای بهترین خرد را می‌گیرد. به بیان ریاضی:

$$Pbest_i^{n+1} = X_i^{n+1} \quad (۱)$$

۲) اگر موقعیت جدید توسط بهترین خاطره مغلوب شد، کاری انجام نمی‌گیرد. به بیان ریاضی:

$$Pbest_i^{n} = Pbest_i^{n+1} \quad (۲)$$

۳) اگر هیچ کدام یکدیگر را مغلوب نکنند، به تصادف یکی را به عنوان بردار بهترین موقعیت در نظر گرفته می‌شود. ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

۱) تعیین پارامترهای مورد نیاز برای اجرای الگوریتم چندهدفه گروه ذرات MOPSO: حداکثر تکرار برای اجرای الگوریتم، اندازه جمعیت، مقادیرC0, C1, C2 و میزان اعضای مخزن.

۲) جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.

۳) بهترین خرد فردی هر ذره تعیین می‌شود.

۴) اعضای نامغلوب جمعیت جداسازی و در مخزن ذخیره می‌شوند.

[2] - Repository
[3] - Hall of Fame

۵) هر ذره از میان اعضای مخزن یک لیدر(رهبر) انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد(سرعت و موقعیت آن به‌روز می‌شود).
۶) بهترین خرد فردی هر کدام از ذرات به روز می‌شوند.
۷) اعضای نامغلوب جدید به مخزن افزوده می‌شوند.
۸) اعضای مغلوب مخزن حذف می‌شوند.
در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است، از شماره ۱ به بعد الگوریتم تکرار می‌شود.

۳- تجزیه و تحلیل تابع هدف مدل پیشنهادی

در انتخاب راه‌حل یا راه‌حل‌های بهینه، محاسبه مقادیر زمان و هزینه به شرح زیر انجام می‌شود:

- **زمان:** این تابع هدف، عبارت است از مجموعه زمان‌های تکمیل یک پروژه که هدف کمینه کردن این تابع می‌باشد. محققین روش‌های مختلفی را برای محاسبه زمان کل پروژه‌ها در نظر گرفته‌اند که در این پژوهش از روش زنجیره بحرانی استفاده شده است که با توجه به بررسی ادبیات گذشته تحقیق، تا به حال از این روش زمانبندی در مسائل چند هدفه با در نظر گرفتن اهداف زمان، هزینه و کیفیت استفاده نشده است.

$$\min T = E_{e0} + PB \qquad (۳)$$

در این فرمول E_{e0} نشان‌دهنده زمان اتمام آخرین فعالیت پروژه بوده و PB همان بافر پروژه است.

- **هزینه:** برای دستیابی به بهترین (کمینه‌ترین) هزینه، بایستی تمام هزینه‌های پروژه را در نظر گرفت. هزینه پروژه‌ها شامل دو قسمت هزینه مستقیم و هزینه غیرمستقیم می‌باشد هزینه‌های مستقیم پروژه، مجموع هزینه‌های مستقیم کلیه فعالیت‌های پروژه است. در حالیکه هزینه‌های غیرمستقیم از مخارج بالاسری و مدیریتی پروژه تشکیل شده است و به زمان پروژه وابسته است. یعنی هرچه پروژه طولانی‌تر شود، هزینه‌های غیرمستقیم بیشتر خواهد شد. برای محاسبه هزینه کل پروژه می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$C = \sum_{i \in A} dc_i^{(k)} + T \times i\, c_i^{(k)} \qquad (۴)$$

که در آن $dc_i^{(k)}$، نشان دهنده هزینه مستقیم فعالیت i در حالت اجرا با k امین شیوه اجرا و $i\, c_i^{(k)}$ هزینه غیرمستقیم در واحد زمان فعالیت i در حالت اجرا با k امین شیوه اجرا و A تعداد فعالیت‌های موجود در شبکه پروژه می‌باشد. همچنین، T نیز زمان کل پروژه می‌باشد.

- **کیفیت:** تابع کیفیت در این مسئله به صورت فرمول زیر محاسبه شده است:

$$Q = \sum_{i \in A} Wt_i \sum_{i=1} Wt_{i,l} \times Q_{i,l}^K \qquad (۵)$$

که $Q_{i,l}^K$ مقدار کیفیت شاخص l در فعالیت i با مصرف منابع k می‌باشد. $Wt_{i,l}$ وزن شاخص کیفیتی l در فعالیت i در مقایسه با سایر شاخص‌ها و Wt_i وزن عملکرد کیفیت فعالیت i در مقایسه با عملکرد کیفیتی سایر فعالیت‌ها می‌باشد.

۴-نحوه تولید جواب اولیه و محاسبه توابع هدف در الگوریتم پیشنهادی

همانطورکه اشاره گردید به منظور حل مسئله توسط روش بهینه سازی انبوه ذرات چندهدهفه نیاز است تعدادی جمعیت اولیه تولید شده و سپس با اجرای الگوریتم این جواب‌ها بهبود یابند. در این بخش نحوه تولید جواب ارائه خواهد شد. بدین منظور ابتدا یک ذره به تعداد فعالیت‌ها ایجاد می‌گردد. از آنجایی که در مسائل زمابندی پروژه توالی انجام فعالیت‌ها نقش تعیین کننده ای در میزان زمان ختم ایفا می کنند، اساس تولید جواب می‌تواند ترتیب انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته شود. بدین منظور ابتدا بازای هر یک از خانه‌های خالی مربوط به هر ذره یک عدد تصادفی بین ۰ تا ۱ تولید می‌شود.

۰,۴۱	۰,۳۳	۰,۲۰	۰,۶۳	۰,۵۴	۰,۷۱	۰,۱۲

شکل ۱: تولید عدد تصادفی برای هر فعالیت

سپس با توجه به عدد تصادفی ایجاد شده، مطابق شکل ۲ یک عدد صحیح به هر خانه تخصیص می‌یابد.

۴	۳	۲	۶	۵	۷	۱

شکل ۲: توالی فعالیت‌ها

پس از تشکیل ترتیب انجام کارها و مشخص شدن حالت اجرایی آنها، مقدار تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت مربوط به هر یک از ذرات محاسبه می شود. روند اجرای محاسبه توابع هدف در شکل ۳ بصورت شبه کد نشان داده شده است.

```
function sol=fitness(sol,data,nobj)
Precedence=data.Precedence;
T=data.T;
N=data.n;

valA=sol.x;
[~,x]=sort(valA);
x=PrecedenceCheck(x,Precedence);
valA=valA(x);
valB=1./data.M;
valB=valB(x);
val=ceil(valA./valB);

ST=zeros(N,1);
FT=zeros(N,1);
for i=1: N

   Ti=T{x(i)}(val(i));
   ST(i)=FT(i);
   if i==1
      FT(i)=Ti;
   else
      FT(i)=FT(i-1)+Ti;
      ST(i)=FT(i-1);
   end
end

C=calCost(FT,data,x,val);
[T,FT,PB]=calUT(ST,FT);
Q=calQuality(data,x,val);
Z=[C -Q T]';

sol.cost=Z;
```

```
sol.Position=x;
sol.value=val;
sol.valueA=valA;
sol.info.ST=ST;
sol.info.FT=FT;
sol.info.PB=PB;
end
```

شکل ۳: شبه کد محاسبه تابع هدف

همانطورکه مشاهده می گردد پس از تولید یک ذره که حاوی توالی انجام فعالیت ها می باشد، ابتدا رابطه پیش نیازی بررسی می-گردد. اگر رابطه پیش نیازی برقرار باشد برای هر یک از فعالیت‌ها یک حالت اجرایی به تصادف انتخاب می‌نماید، در غیراینصورت نیاز است که ترتیب انجام فعالیت‌ها براساس رابطه پیش نیازی اصلاح گردد که در شکل ۴ بصورت شبه کد نشان داده شده است.

```
function newX=PrecedenceCheck(x,Precedence)
newX=[];
while true
   for i=x
      if all(ismember(cell2mat(Precedence(i)),newX));
         break;
      end
   end
   [newX]=[newX i];
   [j]=find(x==i);
   x(j)=[];
   if isempty(x)
      break;
   end

end

end
```

شکل ۴: شبه کد بررسی رابطه پیش نیازی

پس از ایجاد پاسخ اولیه، نیاز به اصلاح این پاسخ براساس روابط پیش نیازی که در بخش قبل توضیح داده شده، می‌باشد. شبه کد نشان داده شده در شکل ۴ برای اصلاح روابط پیش نیازی تعریف شده است. خروجی این کد، برای شکل ۲، به صورت شکل ۵ می باشد.

۱	۳	۲	۴	۶	۵	۷

شکل ۵: اصلاح پاسخ نمونه براساس روابط پیش نیازی

پس از مشخص شدن توالی فعالیت‌ها، برای هر فعالیت یک حالت اجرایی تخصیص داده می‌شود.

۲	۱	۳	۴	۳	۲	۱

شکل ۶: حالت اجرای هر فعالیت

پس از اصلاح نقاط و تعیین حالت اجرایی برای تمام فعالیت‌ها زمان شروع و پایان هر یک از فعالیت‌ها محاسبه می‌گردد. در نهایت با استفاده از سه تابع هدف ارائه شده، زمان ختم پروژه، هزینه اجرای پروژه و کیفیت اجرای پروژه بدست می‌آید. زمان ختم پروژه شامل

زمان اجرای فعالیت‌ها و زمان بافر پروژه می‌باشد. کیفیت اجرای پروژه از میانگین کیفیت فعالیت‌های انجام شده بدست می‌آید. هزینه اجرای پروژه نیز از جمع هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های غیرمستقیم محاسبه می‌شود. شبه کد مربوط به محاسبه توابع هدف در شکل ۷ نشان داده شده است.

```
function [T,FT,PB]=calUT(ST,FT)
t=max(FT)-min(ST);
PB=ceil(t/2);
Ee0=max(FT);
T=Ee0+PB;
T=max(T);
End
```

```
function Q=calQuality(data,x,val)
Qk=data.Qk;
Wt=data.Wt;
n=data.n;
Qki=zeros(1,n);
for i=1:n
   Qki(i)=Qk{x(i)}(val(i));
end
Q=sum(Qki.*Wt(x))/n;
End
```

```
function C=calCost(FT,data,x,val)
dc=data.dc;
n=data.n;
sumdci=0;
for i=1:n
   dci=dc{x(i)}(val(i));
   sumdci=sumdci+dci;
end
C=sumdci+max(FT)*data.ic;
End
```

شکل ۷: شبه کد مربوط به محاسبه توابع هدف

فلوچارت شکل ۸ روند اجرای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه پیشنهادی این تحقیق را نشان می‌دهد.

شکل ۸: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

۵-صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی

به منظور صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی، از مثال ارائه شده توسط تران و همکاران(۲۰۱۵)[۲۸] که یک مسئله سه هدف با مدهای اجرایی مختلف می‌باشد و با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل به حل این مثال پرداخته‌اند، استفاده شده است و در نهایت جوابهای بدست آمده از دو الگوریتم با هم مورد مقایسه قرار گرفته است. در ادامه مثال ارائه شده در مقاله تران و همکاران در جدول ۱ نشان داده شده است.

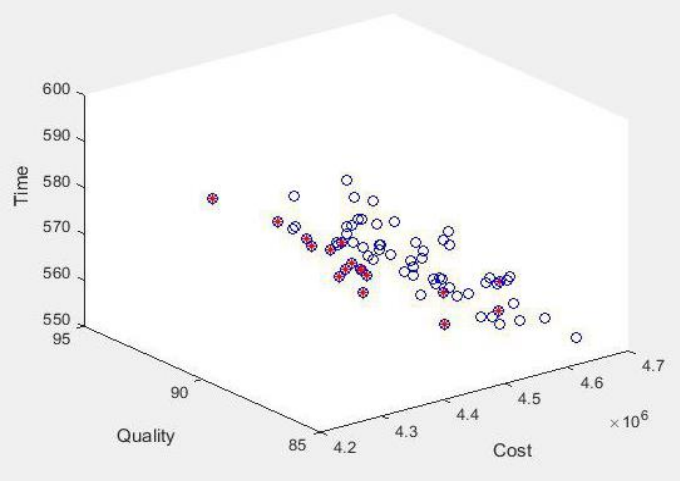
جدول ۱: مثال ارائه شده در مقاله تران و همکاران[۲۸]

فعالیت	حالت ۱			حالت ۲			حالت ۳			حالت ۴			حالت ۵		
	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت
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	۲۲۴۵۰	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	۸۹۷۵۰	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	۳۷	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

ادامه جدول ۱:

فعالیت	حالت ۱			حالت ۲			حالت ۳			حالت ۴			حالت ۵		
	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت
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	۳۷	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	۱۰۱۳۰۰	۹۹,۳۷	۴۷	۱۲۶۵۰۰	۹۰,۲۳	۴۳	۱۴۲۷۵۰	۷۰,۱۹
۴۶	۶۶	۹۴۲۵۰	۸۵	۶۳	۹۹۵۰۰	۹۵,۴۹	۵۹	۱۰۸۲۵۰	۹۹,۹۶	۵۵	۱۱۸۵۰۰	۹۳,۵۳	۵۰	۱۳۶۰۰۰	۷۰,۱۹
۴۷	۵۴	۷۳۵۰۰	۸۵	۵۱	۷۸۵۰۰	۹۷,۰۴	۴۷	۸۳۶۰۰	۹۸,۶۷	۴۴	۸۸۷۰۰	۸۹,۰۷	۴۱	۹۳۴۰۰	۷۰,۱۹
۴۸	۴۱	۳۶۷۵۰	۸۵	۳۹	۳۹۸۰۰	۹۵,۹۷	۳۷	۴۳۸۰۰	۹۹,۹۸	۳۴	۴۸۵۰۰	۹۲,۹۳	۳۱	۵۳۹۵۰	۷۰,۱۹
۴۹	۱۷۳	۲۶۷۵۰۰	۸۵	۱۵۹	۲۸۹۷۰۰	۹۸,۱۵	۱۴۷	۳۱۲۰۰۰	۹۹,۳۷	۱۳۸	۳۵۲۵۰۰	۹۴,۲	۱۲۱	۳۹۷۷۵۰	۷۰,۱۹
۵۰	۱۰۱	۴۷۸۰۰	۸۵	۷۴	۶۱۳۰۰	۹۹,۰۵	۶۳	۷۶۸۰۰	۹۱,۳۲	۴۹	۹۱۵۰۰	۷۰,۱۹	-	-	-
۵۱	۸۳	۸۴۶۰۰	۸۵	۷۷	۹۳۶۵۰	۹۸,۲۴	۷۲	۹۸۵۰۰	۹۹,۳۷	۶۵	۱۰۴۶۰۰	۸۵,۸۴	۶۱	۱۱۳۲۰۰	۷۰,۱۹
۵۲	۳۱	۲۳۱۵۰	۸۵	۲۸	۲۷۶۰۰	۹۸,۸۵	۲۶	۲۹۸۰۰	۹۹,۳۷	۲۴	۳۲۷۵۰	۹۲,۹۳	۲۱	۳۵۲۰۰	۷۰,۱۹
۵۳	۳۹	۳۱۵۰۰	۸۵	۳۶	۳۴۲۵۰	۹۷,۰۴	۳۳	۳۷۸۰۰	۹۹,۸۱	۲۹	۴۱۲۵۰	۸۹,۰۷	۲۶	۴۴۶۰۰	۷۰,۱۹
۵۴	۲۳	۱۶۵۰۰	۸۵	۲۲	۱۷۸۰۰	۹۵,۹۷	۲۱	۱۹۷۵۰	۹۹,۹۸	۲۰	۲۱۲۰۰	۹۷,۰۲	۱۸	۲۴۳۰۰	۷۰,۱۹
۵۵	۲۹	۲۳۴۰۰	۸۵	۲۷	۲۵۲۵۰	۹۸,۵۴	۲۶	۲۶۹۰۰	۹۹,۹۸	۲۴	۲۹۴۰۰	۹۲,۲	۲۲	۳۲۵۰۰	۷۰,۱۹
۵۶	۳۸	۴۱۲۵۰	۸۵	۳۵	۴۴۶۵۰	۹۹,۴۲	۳۳	۴۷۸۰۰	۹۸,۲۸	۳۱	۵۱۴۰۰	۸۸,۵۴	۲۹	۵۵۴۵۰	۷۰,۱۹
۵۷	۴۱	۳۷۸۰۰	۸۵	۳۸	۴۱۲۵۰	۹۸,۲۴	۳۵	۴۵۶۰۰	۹۸,۵۲	۳۲	۴۹۷۵۰	۸۵,۸۴	۳۰	۵۳۴۰۰	۷۰,۱۹
۵۸	۲۴	۱۲۵۰۰	۸۵	۲۲	۱۳۶۰۰	۹۷,۶۳	۲۰	۱۵۲۵۰	۹۹,۳۷	۱۸	۱۶۸۰۰	۹۰,۲۳	۱۶	۱۹۴۵۰	۷۰,۱۹
۵۹	۲۷	۳۴۶۰۰	۸۵	۲۴	۳۷۵۰۰	۹۸,۸۵	۲۲	۴۱۲۵۰	۹۹,۳۷	۱۹	۴۶۷۵۰	۸۷,۰۹	۱۷	۵۰۷۵۰	۷۰,۱۹
۶۰	۳۱	۲۸۵۰۰	۸۵	۲۹	۳۰۵۰۰	۹۵,۹۷	۲۷	۳۳۲۵۰	۹۹,۹۸	۲۵	۳۸۰۰۰	۹۷,۰۲	۲۱	۴۳۸۰۰	۷۰,۱۹

پس از حل مثال جدول ۱ با الگوریتم پیشنهادی این تحقیق، نتایج بدست آمده از جوابهای پارتو در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی این تحقیق و الگوریتم کلونی زنبور عسل که توسط تران و همکاران حل شده است در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۹: جوابهای پارتو بدست آمده از حل مثال مطالعه تران و همکاران با الگوریتم پیشنهادی

جدول ۲: مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی و مطالعه تران و همکاران

شماره جواب	جواب بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی			جواب بدست آمده از مطالعه تران و همکاران		
	زمان	هزینه	کیفیت	زمان	هزینه	کیفیت
۱	۵۸۱	۴۲۹۶۰۷۷	۹۲،۰۵	۴۹۵	۴۷۵۷۲۴۰	۸۶،۱۷
۲	۵۸۴	۴۲۷۷۲۵۲	۸۸،۸۳	۵۳۲	۴۴۰۹۶۷۵	۹۰،۰۸
۳	۵۵۲	۴۶۳۷۷۳۳	۸۸،۸۹	۵۷۸	۴۲۲۹۶۰۰	۹۴،۸۲

۶- مطالعه موردی

برای بررسی صحت مدل پیشنهادی، دو مطالعه موردی با ابعاد مختلف در نظر گرفته شده و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شده‌اند که در ادامه به بررسی هر یک از آنها پرداخته شده است.

۶-۱-مطالعه موردی اول

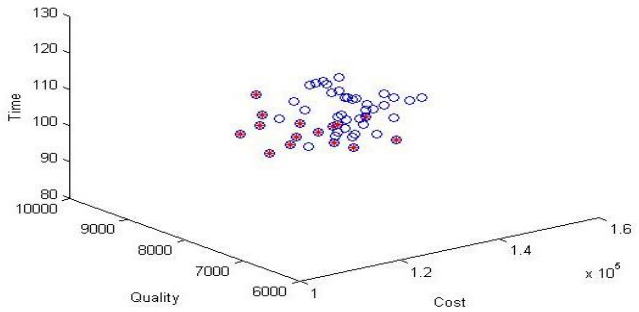
به منظور بررسی مدل و صحت نتایج، یک پروژه عمرانی با ۷ فعالیت که اصل مثال توسط برن و همکاران (۱۹۹۶) معرفی شده و سپس محققینی چون فنگ [۲۸و۲۹]، ژانگ [۳۰]، اکسیونگ و کانگ[۳۱] و اشتهاردیان و همکاران[۳۲] به ارائه روش‌های جدیدتر و کاراتر برای حل مسئله پرداختند. در جدول ۳ و شکل ۱۰ اطلاعات و شبکه زمان‌بندی این مسأله آمده است.

همانطوری که در شکل ۱۰ و جدول ۳ نشان داده شده است، این پروژه از ۷ فعالیت (تجهیز کارگاه، خاکبرداری، قالب‌بندی و آرماتورگذاری، بتن‌ریزی، آماده‌سازی فونداسیون و قرارگیری شمع‌ها، قرارگیری شاه‌تیرها، تنظیم شاه‌تیرها) تشکیل شده است. نحوه ارتباط این فعالیت‌ها هم در شکل ۱۰ به صورت شبکه نشان داده می‌شود که کار را برای یافتن مسیر بحرانی و شناخت نحوه ارتباط میان فعالیت‌ها آسان‌تر می‌کند. همچنین در جدول ۳ تمامی فعالیت‌ها با ذکر هزینه و زمان مطرح گردیده است. در این جدول برای هر کدام از فعالیت‌ها چندین روش اجرا در نظر گرفته شده است. درصد تأثیر فعالیت‌ها در کیفیت کل متغیر، اما برای هر کدام از روش‌های اجرای آن فعالیت ثابت می‌باشد و برای محاسبه هر کدام از پارامترهای زمان و هزینه نیز از فرمول‌های مطرح شده در بخش قبل، استفاده گردیده است.

جدول۳: فعالیت‌ها، پیش‌نیازها و گزینه‌های انتخابی برای اجرای هر فعالیت مثال۱

شرح فعالیت	شماره فعالیت	پیش‌نیازها	گزینه‌های اجرا	زمان (روز)	هزینه مستقیم(دلار)	درصد تأثیر در کیفیت کل	کیفیت
تجهیز کارگاه	۱	-	۱	۱۴	۲۳۰۰۰	۸	۹۸
			۲	۲۰	۱۸۰۰۰		۸۹
			۳	۲۴	۱۲۰۰۰		۸۴
خاکبرداری	۲	۱	۱	۱۵	۳۰۰۰	۶	۹۹
			۲	۱۸	۲۴۰۰		۹۵
			۳	۲۰	۱۸۰۰		۸۵
			۴	۲۳	۱۵۰۰		۷۰
			۵	۲۵	۱۰۰۰		۵۹
قالب‌بندی و آرماتورگذاری	۳	۱	۱	۱۵	۴۵۰۰	۱۴	۹۸
			۲	۲۲	۴۰۰۰		۸۱
			۳	۳۳	۳۲۰۰		۶۳
بتن‌ریزی	۴	۱	۱	۱۲	۴۵۰۰۰	۱۹	۹۴
			۲	۱۶	۳۵۰۰۰		۷۶
			۳	۲۰	۳۰۰۰۰		۶۴
آماده‌سازی فونداسیون و قرار دادن شمع ها	۵	۲و۳	۱	۲۲	۲۰۰۰۰	۱۷	۹۹
			۲	۲۴	۱۷۵۰۰		۸۹
			۳	۲۸	۱۵۰۰۰		۷۲
			۴	۳۰	۱۰۰۰۰		۶۱
قرارگیری شاه‌تیرها	۶	۴	۱	۱۴	۴۰۰۰۰	۱۹	۱۰۰
			۲	۱۸	۳۲۰۰۰		۷۹
			۳	۲۴	۱۸۰۰۰		۶۸
تنظیم شاه‌تیرها	۷	۵و۶	۱	۹	۳۰۰۰۰	۱۷	۹۳
			۲	۱۵	۲۴۰۰۰		۷۱
			۳	۱۸	۲۲۰۰۰		۶۷

مطالعه موردی اول برای موازنه سه هدف زمان-هزینه-کیفیت با استفاده از الگوریتم MOPSO، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت مربوط به مطالعه موردی اول، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازیMOPSO در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد جواب‌های شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان، هزینه و کیفیت بدست آمده که با دایره نشان داده شده است. در این میان نقاطی که با رنگ قرمز نشان داده شده، به عنوان جواب‌های نامغلوب شناخته شده‌اند. همچنین در جدول ۲ نتایج بدست آمده از اجرای مدل پیشنهادی برای موازنه سه هدف زمان-هزینه-کیفیت ارائه شده است.



شکل ۱۰: نتایج حاصل از الگوریتم MOPSO برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت در مطالعه موردی ۱

جدول ۴: نتایج بدست آمده از الگوریتم MOPSO برای حالت موازنه زمان-هزینه-کیفیت مثال ۱

نوع مدل	الگوریتم	داده‌های مسئله	زمان کل	هزینه	کیفیت	توالی و حالت‌های اجرای هر فعالیت							
زمان-هزینه-کیفیت	MOPSO	جدول ۱	۸۴	۱۵۶۳۱۱,۲	۹۲,۱۷	توالی	۱	۴	۳	۲	۵	۶	۷
						حالت	۱	۱	۱	۳	۱	۲	۱
			۱۰۴	۱۱۰۵۱۳,۸	۷۴,۳۴	توالی	۱	۲	۳	۴	۶	۵	۷
						حالت	۱	۱	۱	۳	۳	۴	۳
			۸۹	۱۴۱۹۱۱,۸	۸۷,۰۷	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۱
			۱۰۵	۱۱۸۳۱,۴	۷۶,۵۶	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۱	۳	۲	۲	۳	۳	۲
			۹۲	۱۳۷۵۱۲,۲	۸۶,۵۹	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۲	۱	۱	۱	۳	۲	۱
			۹۸	۱۲۳۵۱۳	۸۲,۱۹	توالی	۱	۳	۲	۴	۵	۶	۷
						حالت	۲	۱	۱	۲	۳	۳	۱
			۱۰۷	۱۲۱۰۱۴,۲	۷۸,۲۶	توالی	۱	۴	۳	۶	۲	۵	۷
						حالت	۲	۱	۱	۳	۴	۴	۲
			۹۹	۱۳۵۵۱۳,۲	۸۴,۱۹	توالی	۱	۳	۴	۶	۲	۵	۷
						حالت	۲	۱	۳	۲	۵	۱	۱
			۹۶	۱۴۵۵۱۲,۸	۸۸,۰۶÷	توالی	۱	۲	۴	۶	۳	۵	۷
						حالت	۳	۱	۱	۱	۲	۲	۲
			۹۶	۱۳۷۹۱۲,۸	۸۷,۲۳	توالی	۱	۴	۳	۲	۵	۶	۷
						حالت	۳	۱	۱	۲	۱	۲	۳
			۱۱۰	۱۰۵۹۱۴,۶	۷۵,۵۳	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۱	۲	۳	۳	۳	۲
			۹۹	۱۳۰۳۱۳,۲	۸۳,۰۴	توالی	۱	۳	۲	۴	۵	۶	۷
						حالت	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۱
			۱۱۰	۱۱۱۴۱۴,۶	۷۶,۸۹	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۱
			۱۲۵	۱۰۲۶۱۶,۶	۶۹,۹۵	توالی	۱	۲	۴	۳	۵	۶	۷
						حالت	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳
			۱۱۰	۱۱۵۵۱۴,۶	۷۹,۹۸	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۲	۴	۱	۳	۳	۱

۶-۲- مطالعه موردی دوم

در این بخش به حل مثالی در ابعاد بزرگ‌تر پرداخته شده است. در این مثال یک پروژه عمرانی با ۱۸ فعالیت که برگرفته از مطالعه فنگ[۲۹] و توسط محققینی همچون تارک هجازی [۳۴] ، ژانگ و همکاران[۳۰]، البلتاجی و همکاران[۳۵] در حل مسأله موازنه زمان-هزینه استفاده شده است. ال-رایز و کاندیل[۳۶] نیز با اختصاص مقادیری برای کیفیت اجرای هر فعالیت از این مثال برای مسأله سه هدف زمان-هزینه-کیفیت بهره جسته است. در جدول ۵ اطلاعات و شبکه این مسأله ارائه شده است.

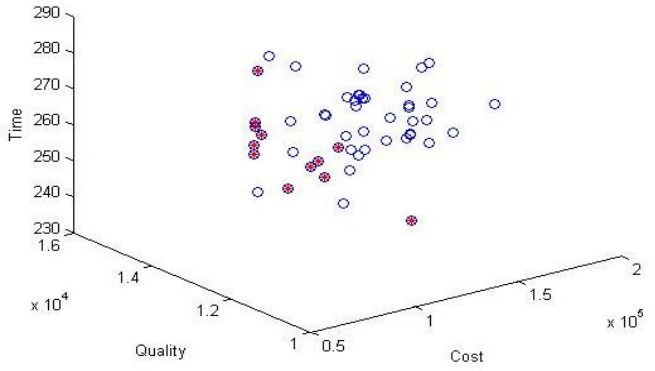
جدول ۵: فعالیت‌ها، پیش‌نیازها و گزینه‌های انتخابی برای اجرای هر فعالیت مثال ۲

شماره فعالیت	گزینه‌های اجرا	زمان (روز)	هزینه مستقیم(دلار)	درصد تأثیر در کیفیت کل	شاخص کیفی۱	میزان 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	۴۰۰۰	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

ادامه جدول ۵:

شماره فعالیت	گزینه‌های اجرا	زمان (روز)	هزینه مستقیم(دلار)	درصد تأثیر در کیفیت کل	شاخص کیفی۱	میزان کیفیت
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	۲۰	۳۰۰۰	۳	۳۰	۹۷
	۲	۲۲	۲۰۰۰			۸۹
	۳	۲۴	۱۷۵۰			۸۱
	۴	۲۸	۱۵۰۰			۷۲
	۵	۳۰	۱۰۰۰			۶
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

مطالعه موردی دوم برای موازنه سه هدف زمان-هزینه-کیفیت با استفاده از الگوریتم MOPSO، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت مربوط به مطالعه موردی دوم، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازیMOPSO در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد جواب‌های شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان، هزینه و کیفیت بدست آمده که با دایره نشان داده شده است. در این میان نقاطی که با رنگ قرمز نشان داده شده، به عنوان جواب‌های نامغلوب شناخته شده‌اند. در جدول ۶ نتایج بدست آمده از اجرای مدل پیشنهادی برای موازنه سه هدف زمان-هزینه-کیفیت ارائه شده است.



شکل ۱۱: نتایج حاصل از الگوریتم MOPSO برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت در مطالعه موردی

جدول ۶: نتایج بدست آمده از الگوریتم MOPSO برای حالت موازنه زمان-هزینه-کیفیت مثال ۲

نوع مدل	الگوریتم	داده های مسئله	زمان کل	کیفیت	هزینه	توالی و حالت‌های اجرای هر فعالیت																	
زمان-هزینه	MOPSO	جدول ۴-۱	۲۳۴	۵۰,۷۶	۱۵۷۰۸۱,۲	توالی	۱	۵	۳	۱۳	۴	۲	۷	۱۱	۶	۱۰	۱۴	۸	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۶	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۳	۴	۲	۱	۱	۵	۱
			۲۳۴	۴۲,۵۸	۱۵۱۵۰۱,۲	توالی	۴	۱	۶	۸	۲	۱۰	۱۴	۵	۷	۱۱	۳	۱۳	۱۶	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۵	۲	۱	۱	۱
			۲۴۹	۴۳,۵۷	۹۷۵۸۳,۲	توالی	۲	۱	۶	۹	۱۰	۸	۳	۱۳	۴	۱۴	۱۶	۵	۷	۱۱	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۲	۱	۳	۲	۴	۴	۲	۱	۴	۱	۱	۲
			۲۵۸	۴۸,۹۳	۱۱۲۷۰۴,۴	توالی	۳	۴	۱۳	۱	۶	۸	۲	۱۰	۱۴	۵	۱۶	۷	۱۱	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۳	۴	۳	۳	۵	۴	۱	۳	۱
			۲۴۸	۴۹,۵۱	۱۱۵۵۰۳	توالی	۳	۱	۶	۵	۷	۲	۱۰	۴	۹	۱۴	۱۳	۱۶	۸	۱۲	۱۵	۱۱	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۴	۳	۳	۳	۵	۱	۱	۳	۲	۱
			۲۴۹	۵۰,۲۳	۱۱۹۷۵۳,۲	توالی	۳	۱۳	۴	۲	۱	۶	۵	۸	۷	۱۱	۹	۱۲	۱۵	۱۰	۱۴	۱۷	۱۶	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۲	۲	۴	۱	۱	۳	۱	۲	۴	۳
			۲۵۷	۴۸,۸۶	۱۱۲۱۷۴,۲	توالی	۳	۱۳	۴	۲	۱	۶	۸	۱۰	۱۴	۱۶	۵	۷	۱۱	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۳	۵	۱	۱	۳	۳	۱	۴	۲	۲	۵	۲	۱	۲	۱
			۲۵۵	۴۸,۴۹	۱۱۳۲۰۴	توالی	۳	۴	۱	۶	۲	۱۰	۵	۹	۷	۱۱	۱۴	۱۳	۱۶	۸	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۳	۴	۳	۲	۳	۳	۲	۵	۱	۱	۲	۱
			۲۵۱	۴۴,۶۷	۱۱۵۲۷۸,۴	توالی	۴	۱	۶	۸	۳	۱۳	۹	۲	۱۰	۵	۱۲	۱۵	۷	۱۱	۱۴	۱۶	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۳	۴	۱	۴	۱	۱	۱	۲	۳	۴	۳	۲
			۲۵۴	۴۳,۸۷	۱۱۴۲۰۳,۸	توالی	۴	۳	۱	۶	۸	۹	۲	۱۰	۱۴	۱۳	۱۶	۵	۱۲	۷	۱۱	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۴	۲	۳	۳	۱	۴	۱	۱	۲	۱	۳	۳
			۲۷۶	۴۷,۱۸	۱۰۳۹۰۶,۸	توالی	۳	۱	۶	۸	۵	۷	۱۱	۲	۴	۱۳	۹	۱۰	۱۴	۱۶	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۵	۱	۳	۳	۱	۱	۵	۳	۳	۵	۳	۲	۱	۴	۱	۲	۳
			۲۶۷	۳۸,۹۹	۹۶۰۵۰,۶	توالی	۲	۳	۱۳	۱	۶	۸	۱۰	۹	۵	۷	۱۲	۱۵	۱۱	۴	۱۴	۱۶	۱۷	۱۸
						حالت	۲	۳	۱	۴	۱	۲	۲	۴	۴	۲	۲	۱	۳	۳	۱	۲	۲	۲

۶- تحلیل نتایج

با توجه به تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر حاصل شده است:

۱- پس از حل مثال تران و همکاران با الگوریتم پیشنهادی این تحقیق، نتایج بدست آمده از جدول ۲ حاکی از عملکرد خوب و صحیح الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. جدول ۲ حاوی ۳ جواب پارتو مطالعه تران و همکاران و ۳ جواب پارتو الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. مطابق جدول ۲ می‌توان مشاهده نمود که جواب شماره ۱ از نظر دو تابع هدف هزینه و کیفیت نسبت به دو جواب شماره ۱ و ۲ مطالعه تران و همکاران بهتر بوده است. همچنین جواب شماره ۲ و ۳ هر یک نسبت به حواب شماره ۱ مطالعه تران و همکاران دارای هزینه کمتر و کیفیت بیشتر بوده است. اما از نظر تابع هدف زمان حواب شماره ۳ الگوریتم پیشنهادی جواب بهتری نسبت به جواب شماره ۳ مطالعه تران و همکاران داشته است. در مجموع الگوریتم پیشنهادی منجر به 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 گفت که از نظر زمانی بهتر عمل کرده است. از آنجاییکه در مطالعه تران و همکاران از روش محاسبات زمانی مسیر بحرانی استفاده شده است و با توجه به اینکه نتایج بدست آمده از این روش با استفاده از الگوریتم پیشنهادی این تحقیق مطلوب نبوده است، بهتر است از روش مناسب‌تری به منظور محاسبات زمان اجرای پروژه بهره گرفته شود.

۲- همانطور که در بخش مقدمه نیز توضیح داده شد، روش زنجیره بحرانی جواب بهتری نسبت به روش محاسبات زمانی مسیر بحرانی داشته و با توجه به صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی، از آنجاییکه تابع هدف زمان عملکرد مناسبی نداشته، الگوریتم پیشنهادی این مطالعه براساس روش زنجیره بحرانی مجددا طراحی شده است.

۳- جدول ۴، ۱۵ جواب پارتو بدست آمده از حل مسئله مربوط به مطالعه موردی ۱ را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده توالی و حالت اجرای فعالیت‌ها می‌باشد. جواب‌های بدست آمده شامل مقادیر گوناگونی از سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند طوریکه به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد بر حسب اولویت و نیاز خود یکی از آنها را برگزیند.. به عنوان مثال اگر برای تصمیم‌گیرنده تحویل به موقع یا زودتر ملاک باشد، جوابی با تابع هدف زمانی کمتر را برمی‌گزیند یا در صورتی که کیفیت انجام کار ملاک باشد حوابی که دارای تابع هدف کیفیت بیشتری هست انتخاب می‌شود. در ادامه ۳ جوابی که منجر به بهترین زمان، هزینه و کیفیت شده‌اند گزارش شده است. بهترین زمان برای اجرای فعالیت‌ها، ۸۴ روز با هزینه اجرایی ۱۵۶۳۱۱,۲ و کیفیت ۹۲,۱۷ می‌باشد و بهترین هزینه اجرای فعالیت‌ها، ۱۰۲۶۱۶,۶ و زمان اجرای ۱۲۵ روز و کیفیت ۶۹,۹۵ درصد می‌باشد. همچنین بهترین کیفیت اجرای فعالیت‌ها، ۹۲,۱۷ درصد با هزینه اجرایی ۱۵۶۳۱۱,۲ و زمان اجرای ۸۴ روز می‌باشد.

۴- پس از حل مسئله مطالعه موردی ۲، ۱۲ جواب پارتو بدست آمده در جدول ۶ گزارش شده است. مطابق جدول شماره ۲، جواب-های پارتو شامل مقادیر مختلف سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت که در جدول ۶ نشان داده شده است و جوابهای با بهترین زمان، هزینه و کیفیت در ادامه ارائه شده است. بهترین زمان برای اجرای فعالیت‌ها، ۲۳۴ روز با هزینه‌های اجرایی ۱۵۱۵۰۱,۲ و ۱۵۷۰۸۱,۲ می‌باشد که هر کدام از آنها به ترتیب دارای کیفیت‌های ۴۲,۵۸ و ۵۰,۷۶ می‌باشد. بهترین هزینه اجرای فعالیت-ها،۹۶۰۵۰,۶ و زمان اجرای ۲۶۷ روز با کیفیت ۳۸,۹۹ می‌باشد. همچنین بهترین کیفیت اجرای پروژه، ۵۰,۷۶ با زمان ۲۳۴ و هزینه اجرایی ۱۵۷۰۸۱,۲ می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این مطالعه، ارائه مدل‌های موازنه سه هدفه زمان-هزینه-کیفیت برای کشف جواب‌های بهینه می‌باشد. در این راستا از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات چندهدفه استفاده شده تا مجموعه جواب‌های پارتو مختلف در اختیار مدیر پروژه قرار دهد. هر چقدر بتوان تعریف درستی از مسئله برای رسیدن به جواب بهینه داشت و پارامترهای موثر موحود در پروژه را بدرستی اعمال کرد، جواب‌های بهتری نیز در اختیار مجریان طرح قرار خواهد گرفت. بدین منظور اقدامات زیر به منظور رسیدن به این هدف انجام گرفته است:

بررسی مبانی روش الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات چندهدفه

بررسی ساختار مدل‌های حل مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی

توسعه مدل موازنه زمان-هزینه-کیفیت با بکارگیری الگوریتم پیشنهادی در تعیین جواب‌های پارتو

تحلیل نتایج پاسخ‌های بدست آمده

مزیت مدل سه هدفه پیشنهادی، وارد کردن متغیر کیفیت به عنوان یکی ازاهداف پروژه می‌باشد. بدین ترتیب مدیر پروژه و افراد خبره‌ای که برای گزینه‌های مختلف پروزه، برآورد هزینه و قیمت می‌کند به ارائه میزانی برای کیفیت اجرای پروژه می‌پردازد. همچنین استفاده از الگوریتم پیشنهادی در این مدل، سرعت رسیدن به مجموعه جواب مسئله را بالا برده، بطوریکه برای حل دو مطالعه موردی ذکر شده، زمانی کمتر از یک دقیقه صرف شده است. سرعت بالای این مدل و همگرا شدن سریع جواب‌ها، می‌تواند در توانمندی و کارایی مدل برای پروژه-های بزرگتر و با مقیاس کلان‌تر موثر باشد. در مجموع مدل پیشنهادی می‌تواند به مدیران، تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان ساخت، در ارزیابی اثرات برنامه‌های مختلف مصرف منابع بر روی عملکرد پروژه کمک شایانی نماید. با توجه به پیچیدگی مبحث برنامه‌ریزی پروژه، مدل پیشنهادی با چالش‌هایی روبرو می‌باشد. از جمله این موارد می‌توان به در نظر گرفتن اهداف دیگری علاوه بر زمان، هزینه و کیفیت اشاره نمود. از سوی دیگر، در این تحقیق پارامترهای ورودی مسئله مانند زمان، هزینه و کیفیت هر فعالیت، ثابت و از پیش مشخص شده می-باشد، در حالیکه در دنیای واقعی می‌تواند غیر قطعی باشد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان توسعه‌های گوناگونی به منظور انجام تحقیقات آتی بر روی مدل پیشنهادی این تحقیق در نظر گرفت. از جمله دیگر اهدافی که در این گونه مسائل در نظر گرفته می‌شود، می-توان به اهداف انحراف از منابع در دسترس و ارزش فعلی جریانات نقدی اشاره نمود. همچنین رویکردهای گوناگونی را همانند رویکرد تئوری فازی و مدل‌های تصادفی می‌توان برای اعمال عدم قطعیت مسئله استفاده نمود. در نهایت می‌توان مدل ارائه شده در این تحقیق را در شرایط مدیریت همزمان چند پروژه و در شرایط محدودیت منابع توسعه داد که می‌توان در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

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

[2] Alkass, S., Mazerolle, M., Harris, F., (1996) ''Construction delay analysis techniques'' ,*Construction Management Economics*., Vol. 14, No. 5, pp. 375–394, Doi: 10.1080/014461996373250.

[3] Sonmez, R, Bettemir, O. H, (2012) "A hybrid genetic algorithm for the discrete time–cost trade-off problem", *Expert Systems with Applications*, Vol 39, No 13, 11428–11434, Doi: 10.1016/j.eswa.2012.04.019.

[4] PMI. (2013), "A guide to the project management body of knowledge: PMBOK Guide.", 5th ed. USA: Project Management Institute Inc.

[5] Goldratt, E. M. , (1997). "*Critical Chain*", The North River Press Publishing Corporation, Great Barrington

[6] Rand , K. , (2000), "Critical chain: the Theory of constraints applied to project management" ,*International Journal of Project Management*, Vol 18, No 3, 173-177, Doi: 10.1016/S0263-7863(99)00019-8.

[7] Raz, T, Barnes, R, Dvir, D, (2003), "A critical look at critical chain project management", *Project management journal*, Vol 34, No 4, 24-32, Doi: 10.1109/EMR.2004.25048.

[8] Kuchta, D ," The critical chain method in project management-A formal description", *Badania Operacyjneide I Decyzje*, Vol 1, 37-51, 2004.

[9] Leach, L, (2000), "*Critical chain project management improves project performance*", Advanced Project Institute.

[10] Herroelen, W, Leus, R, Demeulemeester, E, (2002), "Critical chain project scheduling do not oversimplify", *Project Management Journal*, Vol 33, No 4, 48-60.

[11] Juring, J, (2004), "Benefits of a critical chain – a System Dynamics based study", *Second World Conference on POM and 15th Annual POM Conference*, Cancun, Mexico.

[12] Trietsch Dan, (2005), "Why a Critical Path by Any Other Name Would Smell Less Sweet", *Project Management Institute*, Vol 36, No1, 27-36
[13] Shen, L, Chua, D, (2008), "An Investigation of Critical Chain and Lean Project Scheduling",*16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, United States.
[14] startton, R, (2009), "Critical Chain Project Management Theory and Practice", *POMS 20th Annual Conference*, USA.
[15] Wei-Xin, W, Xu,W, Xian-Long, G, Lei, D, (2014) "Multi-objective optimization model for multi-project scheduling on critical chain", *Advances in Engineering Software*, Vol 68, 33–39, Doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.11.004.
[16] Ghoddousi, P., Ansari, R. & Makui, A., (2016), "A risk-oriented buffer allocation model based on critical chain project management", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-13, Doi:10.1007/s12205-016-0039-y.
[17] Vanhoucke, M. (2016). "*Buffer management*" Integrated Project Management Sourcebook. Springer International Publishing, pp. 155-193.
[18] Hartmann, S. and Briskorn, D. (2010). "A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem." *European Journal of operational research* , Vol. 207, No. 1, PP. 1-14.
[19] Li, H. Zhang, H.(2013) "Ant colony optimization-based multi-mode scheduling under renewable and nonrenewable resource constraint", *Automation in construction*, Volume 35, 431-438.
[20] Li, H. Zhang, H.(2013) " Ant colony optimization-based multi-mode scheduling under renewable and nonrenewable resource constraint",*Automation in construction*, Volume 35, 431-438.
[21] De, P., Dunne, E., Ghosh, J., & Wells, C. (1997). "Complexity of the discrete time/cost trade-off problem for project networks" ,*Operations Research*, 45, 302–306.
[22] Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2017), "Optimization of Time, Cost, and Quality in Critical Chain Method Using Simulated Annealing", *International Journal of Engineering*, Vol 30, No 5, pp. 705-713, Doi: 10.5829/idosi.ije.2017.30.05b.00.
[23] Mungle, S, Benyoucef, L, Son, Y.J, Tiwari, M.K, (2013) "A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time–cost–quality trade-off problems:A case study of highway construction project", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol 26, 1953–1966.
[24] Afruzi, E.N., Najafi, A.A., Roghanian, E., Mazinani, M. (2014) "A Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm for solving discrete time, cost and quality trade-off problems with mode-identity and resourceconstrained situations", *Computers & Operations Research*, No. 50, pp. 80 – 96.
[25] Tavana, M, Abtahi, A.R, Khalili-Damghani, K, (2014) "A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project scheduling problems", *Expert System with Applications*, Vol 41, Issue 4, 1830-1846.
[26] Monghasemi, S, Nikoo, M.R, Khaksar, M.A, Adamowski, F,J, (2015) "A Novel Multi Criteria Decision Making Model for Optimizing Time-Cost-Quality Trade-off Problems in Construction Projects", *Expert System with Applications*, Vol 42, Issue 6, 3089-3104.
[۲۷] موشخیان، سیامک و نجفی، امیرعباس، " بهینه‌سازی سبد سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات برای مدل احتمالی چند دوره‌ای میانگین- نیم واریانس- چولگی"، مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، شماره‌ی بیست و سوم، تابستان ۱۳۹۴، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی.
[28] Tran, D. H., Cheng, M. Y., Cao, M. T., "Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time-cost-quality trade off problem", *Knowledge-Based Systems*, Vol 74, 176-186.
[29] Feng, C., Liu, L., and Burns, S. (2000) "Stochastic Construction Time Cost Trade-off Analysis", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol 14, Issue 2, 117-126.
[30] 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* , Vol 11, Issue 3, 184-189.
[31] Zhang, L., Du, J., and Zhang, S (2013) "A Solution to Time-Cost-Quality Trade-off Problem in Construction Projects Based on Immune Genetic Particle Swarm Optimization", *Journal of Management in Engineering*., Vol 30, Issue 2,1943-5479.
[32] Xiong, Y. and Kuang, Y, (2008) "Applying an Ant Colony Optimization Algorithm –Based Multi Objective Approach for Time-Cost Trade-Off.", *Journal of construction Engineering and management*, Vol 134, Issue 2, 153-156.
[۳۳] اشتهاردیان، احسان اله، موازنه زمان- هزینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و منطق فازی در بیان عدم قطعیت‌ها، رساله برای دریافت درجه دکترا، عمران-مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۷).
[34] Hegazy T., (1999) "Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms", *Canidian Journal of Civil Engineering*, Vol.26, PP. 685-697.

[35] Elbeltagi, E, Hegazy, T, Grierson, D, (2005) "Among Five Evolutionary-Based Optimization Algorithms", *Advanced Engineering Informatics*, Vol 19,Issue 1, 43-53.
[36] El-Rayes K, Amr Kandil A. . (2005). "Time-Cos-Quality Trade-off Analysis for Highway Constructions". *Construction Engineering Management*., ASCE, 131(4):447-486.