Journal of Structural and Construction Engineering, 11(6), 2024, pp. 227-248

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Hybrid model of critical chain method and selection algorithm based on Pareto pattern for project selection

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

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

ABSTRACT

A project is a set of activities that are carried out to achieve a specific goal and must be completed in a specified time, with an estimated cost and a specified quality. The problem of choosing a project among several projects under the conditions of resource limitations is considered a very important problem in the field of project management. Critical chain is one of the new methods used in project planning, which has attracted the attention of many researchers. In the present study, the problem of selecting a project from among several projects has been modeled by considering the goals of completing the project in the least time and cost and at the highest level of quality using the critical chain approach. The proposed model has been implemented for three projects of different sizes using the critical chain technique and PESA-II meta-heuristic algorithm. The results showed that the PESA-II algorithm performed well and in terms of the objective function of time, cost and quality of the solutions of the PESA-II algorithm is superior to other algorithms and therefore it can be concluded that the PESA-II algorithm produces solutions with better Pareto values. In three objective functions, time, cost and quality are compared to other algorithms. Considering that the obtained results include a combination of the values of the three objective functions of time, cost and quality, this enables the project managers to choose the most optimal combination 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: 25 November 2023
Revise Date: 15 September 2024
Accept Date: 18 January 2024

Keywords:
Project Selection,
Critical Chain,
Resource Constraints,
Pareto Model

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.426854.3283

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

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

مدل هیبریدی روش زنجیره بحرانی و الگوریتم انتخاب مبتنی بر الگوی پارتو برای انتخاب پروژه

محمدرضا شهرکی*[۱]، جلیل چرویده[۲]

۱- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دانشجوی کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

پروژه مجموعه‌ای از فعالیت‌ها است که برای رسیدن به هدفی خاص انجام می‌شود و باید در زمان مشخص شده، با هزینه برآورد شده و کیفیت تعیین شده به انجام برسد. مسئله انتخاب یک پروژه از میان چندین پروژه تحت شرایط محدودیت منابع، مسئله‌ای بسیار مهم در حوزهٔ مدیریت پروژه محسوب می‌شود. زنجیره بحرانی از روش‌های نوین مورد استفاده در برنامه‌ریزی پروژه‌ها است، که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف نموده است. در مطالعهٔ حاضر، مسئله انتخاب یک پروژه از میان چندین پروژه با در نظر گرفتن اهدافی شامل انجام پروژه در کمترین زمان و هزینه و در بالاترین سطح کیفیت با استفاده از رویکرد زنجیره بحرانی، مدل‌سازی شده است. مدل پیشنهادی برای سه پروژه در اندازه‌های متفاوت و با استفاده از تکنیک زنجیره بحرانی و الگوریتم فراابتکاری PESA-II اجرا گردیده است. نتایج نشان داد که الگوریتم PESA-II عملکرد مناسبی داشته و از نظر تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت جواب‌های الگوریتم PESA-II نسبت به الگوریتم های دیگر برتری دارد و لذا می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم PESA-II موجب تولید جواب‌هایی با مقادیر پارتو بهتر در سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌گردد. با توجه به اینکه نتایج بدست آمده شامل ترکیبی از مقادیر سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند، این امر مدیران پروژه را قادر می‌سازد که با توجه به نیاز و سیاست‌های خود از نظر زمانی، هزینه‌ای و کیفی بهینه‌ترین ترکیب را انتخاب نمایند.

کلمات کلیدی: انتخاب پروژه، زنجیره بحرانی، محدودیت منابع، الگوی پارتو

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۲/۰۹/۰۴	۱۴۰۲/۱۰/۲۰	۱۴۰۲/۱۰/۲۸	۱۴۰۲/۱۰/۲۸	۱۴۰۳/۰۶/۳۱	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.426854.3283
					10.22065/jsce.2024.426854.3283

*نویسنده مسئول: محمدرضا شهرکی

پست الکترونیکی: mr.shahraki@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

پروژه‌ها مجموعه فعالیت‌هایی می‌باشند که به منظور دستیابی به هدف یا اهداف خاصی صورت می‌پذیرند و باید در زمان از پیش تعیین شده، با حداقل هزینه و بالاترین سطح کیفیت به انجام برسند. موفقیت هر پروژه معمولاً درگرو دستیابی هم‌زمان به هر سه عامل زمان، هزینه و کیفیت تعیین‌شده می‌باشد و خارج شدن هر یک از سه عامل مذکور از حدود وعده داده شده می‌تواند موجب شکست پروژه گردد. انتخاب درست پروژه‌ها از مهمترین اقدامات سازمان‌های پروژه محور در راستای مدیریت راهبردی می‌باشد و محدودیت منابع باعث می‌گردد سازمان‌ها نتوانند برای تمامی پروژه‌ها سرمایه‌گذاری نمایند [۱]. 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 قابل ملاحظه‌ای به مدیریت بهینه پروژه و تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی خواهد نمود [۲]. 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 [۳]. مسئله بهینه‌سازی در شرایط چند پروژه‌ای و محدودیت منابع یک مسئله بهینه‌یابی ترکیبی می‌باشد که به لحاظ پیچیدگی در رده مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد [۴ و ۵]. 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] می‌باشد. سپس جهت حل مسئله از روش بهینه‌سازی الگوریتم فراابتکاری مبتنی‌بر شکل‌دهی پارتو[2] (PESA-II) استفاده می‌گردد.

در ادامه در بخش ۲، پژوهش‌های مربوط به موضوع تحقیق مورد بررسی واقع شدند و در بخش ۳ به معرفی الگوریتم ممتیک پرداخته شده است. در بخش ۴ با تولید جواب اولیه و محاسبه تابع هدف و در نظر گرفتن مثال‌های عددی، کارایی روش های حل پیشنهادی، ارزیابی و مقایسه می‌گردد. نهایتاً در بخش ۵ بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای مطالعات آتی ارائه خواهند شد.

۲- ادبیات و پیشینهٔ پژوهش

مدیریت پروژه با رویکرد زنجیره بحرانی، رویکردی جدید در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه می‌باشد که در سال ۱۹۹۷ توسط گلدرات در کتاب زنجیره بحرانی ارائه شده است. این روش بسطی از تئوری محدودیت‌ها (TOC)[3] می‌باشد که به طور خاص برای محیط پروژه طراحی گردیده است. تحقیقات متعددی در مورد روش زنجیره بحرانی صورت گرفته که با توجه به مطالعات انجام شده، روش زنجیره بحرانی توانسته نسبت به روش‌های قبلی برنامه‌ریزی پروژه عملکرد بهتری داشته باشد [۶، ۷] و با حذف عدم قطعیت‌های موجود در زمان فعالیت‌ها، زمان اتمام فعالیت‌ها را کاهش دهد [۸].

تاکنون مدل‌های متعددی در حوزهٔ برنامه‌ریزی پروژه‌ها به منظور بهینه نمودن سه فاکتور زمان، هزینه و کیفیت توسعه داده شده است. هازیر و همکاران در سال ۲۰۱۰، مسئله موازنه زمان هزینهٔ پایدار که در آن فعالیت‌ها به صورت چند حالته می‌باشد، را مورد بررسی قرار دادند. به منظور تخمین دقیق پایداری زمان‌بندی ایجاد شده، چند معیار جانشین ارائه گردیده است. میزان کارایی هر یک از این معیارها، با استفاده از مسائل نمونه بررسی شد. میزان کارایی رویکرد پیشنهادی، از طریق حل دیگر مسائل پایدار مانند جریمه دیرکرد و پاداش زودکرد بررسی گردید [۹]. وولینگ و همکاران در سال ۲۰۱۳، مسئلهٔ مدیریت پروژه زنجیره بحرانی چندحالته را مورد مطالعه قرار دادند که به منظور بهینه‌سازی از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده شده است. مسئله مورد بررسی در پژوهش آن‌ها ترکیبی از مسئله

[1] Critical Chain
[2] Pareto Envelope-Based Selection Algorithm II
[3] Theory of Constraints

مدیریت پروژه چندحالته و روش زنجیره بحرانی می‌باشد که این مسئله شامل منابع تجدیدپذیر و منابع تجدیدناپذیر، فعالیت‌ها به صورت چندحالته و دارای عدم قطعیت در زمان فعالیت‌ها می‌باشد. نتایج حاصل شده از این مطالعه نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک ارائه شده در این مطالعه نسبت به روش‌های پیشین به کار رفته به منظور حل این مدل از برتری نسبی برخوردار می‌باشد [۱۰]. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، یک روش مؤثر با تجزیهٔ زیرساختار زمان فعالیت‌ها جهت مقابله با مسئله زمان‌بندی پروژه تحت شرایط محدودیت منابع مطرح نموده‌اند. در این روش یک فعالیت جهت تجزیه انتخاب می‌گردد و به عنوان بخشی از فضای عملی از مسئله اصلی در زیر فضاها تقسیم می‌گردد، که با استفاده از دو پروژه ساخت و ساز واقعی به اعتبارسنجی اثر از OPDA [۴] برای RCPSP پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که رویکرد مبتنی‌بر تجزیه، مؤثر و رقابتی می‌باشد [۱۱]. 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 [۱۲]. همتیان 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 [۲]. 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 [۱۳].

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 [۱۴]. 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 [۱۵]. شهرکی و چرویده در سال ۱۴۰۱ به ارائه یک روش بهینه‌سازی انتخاب پروژه با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع پرداختند و برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی از یک پروژه با ۶۰ فعالیت که بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت در آن صورت پذیرفته بود، برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که الگوریتم جستجوی ممنوع عملکرد قابل قبولی داشته به گونه‌ای که قابلیت ایجاد چندین جواب پارتو با مقدارهای متفاوت سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت را دارد [۱۶].

با توجه به مرور پیشینه تحقیق، مدل‌های ارائه شده در تحقیقات پیشین 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 اند. در زمینهٔ حل مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت، الگوریتم‌های فراابتکاری مختلفی جهت بهینه‌سازی آن‌ها مانند الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات در تحقیق طاهری امیری و همکاران [۱۳]، الگوریتم ژنتیک در تحقیق مهدوی و همکاران [۲] توسعه داده شده است. در این تحقیق یک مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله بهینه‌سازی انتخاب پروژه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری PESA-II در سطح توالی و حالت‌های اجرای فعالیت‌ها با در نظر گرفتن تأثیر متقابل فعالیت‌های پروژه بر یکدیگر و همچنین تأثیر زمان اتمام پروژه نسبت به هزینه و کیفیت پروژه‌ها، ارائه شده است. در این مطالعه، با در نظر داشتن پروژه‌ها قابل انقطاع، اجرای همزمان و برنامه‌ریزی در سطح فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است.

[4] One Point Decomposition Based Approach

۳- الگوریتم فراابتکاری *PESA-II*

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی نظیر مسائل بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت بطور ذاتی پیچیده بوده و جزء مسائل NP-Hard محسوب می‌شوند 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 فراابتکاری را اجتناب ناپذیر نموده است [۱۷]. از میان روش‌های فرا ابتکاری برای حل مسائل بهینه سازی، یکی از شناخته‌شده‌ترین الگوریتم‌های چند هدفه، الگوریتم چند هدفه انتخاب بر مبانی ناحیه پارتو (PESA-II) می‌باشد که به صورت گسترده در علوم و مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸-۲۱]. الگوریتم PESA-II نسخهٔ تجدیدنظر شده از روش PESA می باشد؛ این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی تکاملی چند هدفه با عملگرهای ژنتیک و براساس شکل‌دهی پارتو (جواب‌های مطلوب) می‌باشد که در سال ۲۰۰۱ توسط کُرن و همکارانش معرفی گردید [۲۱]. در این روش، به جای اختصاص یک تناسب انتخابی به یک فرد که در الگوریتم PESA وجود دارد، این تناسب به هایپرباکس‌هایی در فضای واقعی اختصاص داده می‌شود که در حال حاضر توسط حداقل یک فرد در فضای کنونی از مرز پارتو اشغال شده‌اند؛ از این رو، یک هایپرباکس انتخاب گردیده و فردی که در نتیجه این کار انتخاب شده است، به صورت تصادفی از هایپرباکس انتخاب می‌گردد. این روش انتخاب در مقایسه با روش‌های انتخابی فردمحور، به حصول اطمینان از یک پراکندگی خوب از توسعه در طول مرز پارتو حساس‌تر می‌باشد. فضای پارتو در این الگوریتم نشان می‌دهد که جواب‌ها تا چه اندازه به مطلوب بودن نزدیک می‌باشند. هدف الگوریتم مشخص نمودن و حفظ مجموعه جواب‌های نامغلوب یا مطلوب می‌باشد که مجموعه این جواب‌های مطلوب تشکیل‌دهندهٔ جبهه پارتو می‌باشند. اساساً، در الگوریتم پیشنهادی معیاری که برای کنترل نظم پاسخ‌ها وجود دارد استفاده از جدول‌هایی در فضای توابع هدف می‌باشد. انتخاب والدها یا حذف پاسخ‌های اضافی در فضای بایگانی در این الگوریتم براساس ناحیه و جدول‌بندی در فضای پاسخ‌ها می‌باشد [۲۱]. مراحل الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

۱- ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن‌ها و ایجاد یک بایگانی خالی: در این مرحله جمعیت اولیه ایجاد می‌گردد؛ منظور از جمعیت اولیه، توالی انجام فعالیت‌های پروژه می‌باشد. از آنجایی که در مسائل زمان‌بندی پروژه توالی انجام فعالیت‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای را ایفا می‌نمایند، اساس تولید جمعیت اولیه می‌تواند ترتیب انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته شود [۱۳]. پس از تشکیل توالی انجام فعالیت‌ها و مشخص شدن نحوهٔ 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 ۱ به صورت شبه کد نشان داده شده است.

```
function z = CostFunction2(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=round(position_p(i,j)-r1*10)+1;
        if r2>size(Data{1},2)-1
            r2=1;
        end
            if r1>size(Data{1},1)
            r1=1;
            end
        f_cost(i,1)=round((f_cost(i,1)+ceil(Data{r1}(r2,3)*0.75))/2.2);
        f_cost(i,2)=(f_cost(i,2)+Data{r1}(r2,2)+2*f_cost(i,1)/15)/7*4.7;
        f_cost(i,3)=f_cost(i,3)-Data{r1}(r2,1)/60;
    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)/50;
end

z=sum((f_cost))';
```

شکل ۱: شبه کد محاسبه تابع هدف

۲- انتقال اعضای نامغلوب جمعیت به بایگانی و به‌روزرسانی تقسیم‌بندی‌ها

۳- حذف اعضای اضافی با توجه به تقسیم بندی‌ها، موقعیت پاسخ‌ها و احتمال حذف (کنترل اعضای بایگانی): در این مرحله به سه صورت عمل می‌نماییم؛ الف) اگر یک جواب جدید توسط حداقل یکی از جواب‌های موجود در بایگانی مغلوب گردد، جواب جدید باید کنار گذاشته شود، ب) اگر یک جواب جدید بر چند جواب موجود در بایگانی غلبه نماید، جواب‌های مغلوب شده از بایگانی حذف شوند و جواب جدید به بایگانی اضافه گردد و اعضا به‌روزرسانی گردند و پ) اگر جواب جدید، هیچ عضو از بایگانی رو مغلوب نکند، یا خودش توسط عضوی مغلوب نگردد، این جواب به بایگانی اضافه می‌گردد. اگر اعضای بایگانی از ظرفیت بایگانی فراتر رود، می‌توان یکی از اعضا را حذف نمود. از چرخه رولت[5] برای حذف انتخابی استفاده می‌گردد. سازوکار چرخه مورد نظر بدین صورت است که هر چه جواب بهتر باشد، احتمال انتخاب شدن آن بیشتر می‌یابد [۲۲-۱۸].

۴- بررسی شرایط خاتمه و ادامه دادن در صورت نیاز: اگر معیار اتمام حلقه برقرار شود، محاسبات خاتمه پیدا می‌کند و اعضای بایگانی نشان داده می‌شوند. در غیر این صورت، محاسبات ادامه می‌یابد.

۵- انتخاب والدین از بایگانی براساس نواحی و با توجه به تقسیم بندی‌ها و احتمال انتخاب: این انتخاب نیز بر پایهٔ چرخهٔ رولت صورت می‌گیرد.

۶- ایجاد جمعیت فرزندان (تقاطع و جهش[6])

۷- ارزیابی جمعیت جدید

۸- تکرار از مرحله ۲

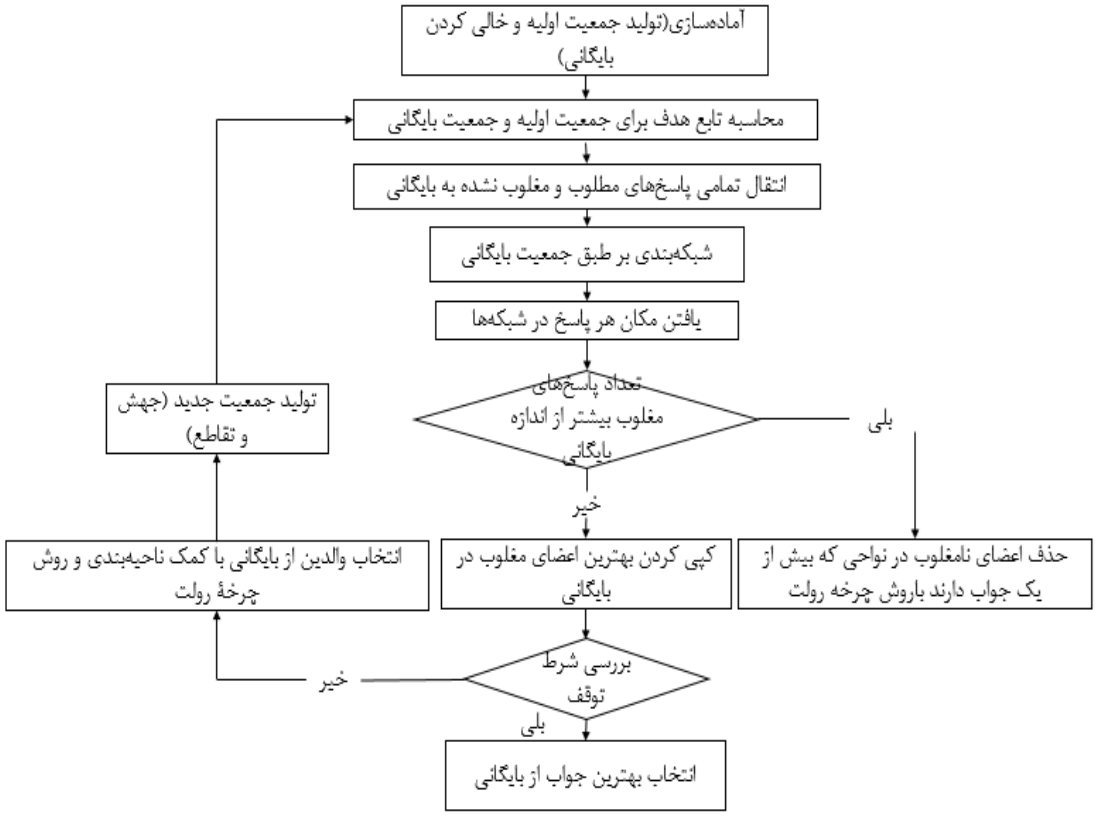
در این مطالعه، به منظور بهینه‌سازی زمان‌بندی چند پروژه‌ای با روش زنجیره بحرانی تحت محدودیت منابع، الگوریتم فراابتکاری PESA-II مورد استفاده قرار گرفته است. در این مسئله با به کارگیری الگوریتم پیشنهادی، به دنبال یافتن بهترین توالی از فعالیت‌ها بوده، به طوری که بهترین مقادیر مطلوبیت حاصل گردد. در ادامه پارامترهای استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی در جدول ۱ ارائه شده است.

[5] Roulette Wheel
[6] Cross Over and Mutation

این پارمترها در حین مطالعات به صورت تجربی به‌دست آمده‌اند. همچنین فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر جواب پارتو (PESA-II) نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت	۱۰۰
جمعیت بایگانی (مخزن)	۵۰
تعداد تکرار	۱۰۰
نرخ تقاطع	۰/۷
نرخ جهش	۰/۳
نوع انتخاب	چرخ رولت



شکل ۲: فلوچارت الگوریتم PESA-II

۴- تجزیه و تحلیل تابع هدف در زمان‌بندی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی و نتایج پژوهش

در مطالعه حاضر، سه هدف زمان، هزینه و کیفیت اجرای پروژه‌ها، به منظور ارزیابی یک برنامه چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی در نظر گرفته شده است. هدف زمانی پروژه، به حداقل رساندن مدت زمان اتمام پروژه می‌باشد و جهت انجام محاسبات پروژه، از روش زنجیره بحرانی استفاده شد. همینطور هدف هزینه‌ای پروژه، حداقل نمودن هزینه نهایی پروژه می‌باشد که در این پژوهش، شامل هزینه مستقیم می‌باشد. هزینه‌های مستقیم شامل مجموع هزینه‌های منابع تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید تمامی فعالیت‌های پروژه می‌باشد. در نهایت هدف

کیفی پروژه، شامل به حداکثر رساندن کیفیت انجام فعالیت‌ها و سرانجام کیفیت نهایی پروژه می‌باشد. در ادامه، قبل از ارائه تابع هدف پیشنهادی، پارامترهای مورد استفاده در مدل پیشنهادی این پژوهش، در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

جدول ۲: علامت اختصاری و شرح پارامترهای 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 jدر پروژه i	$U(C)$: تابع مطلوبیت هزینه
C_p : هزینه واحد منابع غیر قابل تجدید	$U(Q)$: تابع مطلوبیت کیفیت
EV_{ij} : ارزش فعالیت jدر پروژه i	α_T : ضریب وزنی زمان
q_{ij} : شاخص کیفیت فعالیت jدر پروژه i	α_C : ضریب وزنی هزینه
EQV_{ij} : مقدار کیفی فعالیت jدر پروژه i	α_Q : ضریب وزنی کیفیت
E_{e0} : زمان پایان یک فعالیت مجازی	D: مدت زمان مطلوب پروژه
rq_j: کیفیت واقعی فعالیت j	dq_j: کیفیت از پیش تعیین شده فعالیت j
PB : بافر پروژه	U: هزینه مطلوب پروژه

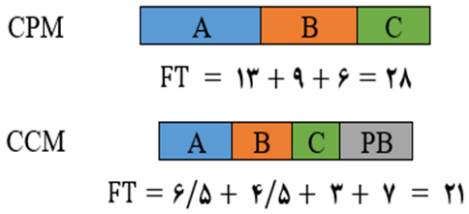
۱-۳- تجزیه و تحلیل توابع هدف مدل پیشنهادی در زنجیره بحرانی

۱-۱-۴- تابع هدف زمان: این تابع هدف، عبارت است از مجموعه زمان‌های تکمیل یک پروژه که هدف کمینه‌سازی تابع مورد نظر می‌باشد. محققین روش‌های مختلفی را به منظور محاسبه زمان کل پروژه‌ها در نظر گرفته‌اند که در این مطالعه از روش زنجیره بحرانی استفاده شده است. که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$\min T = E_{e0} + PB \qquad (1)$$

در رابطه (۱)، به منظور محاسبه بافر پروژه از روش برش و چسباندن استفاده شده است. برای روشن نمودن نحوه محاسبه بافر پروژه و تفاوت بین روش‌های مسیر بحرانی[7] 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 ۳ نحوه محاسبه زمان پروژه با استفاده از روش مسیر بحرانی و زنجیره بحرانی نشان داده شده است.

[7] Critical Path



شکل۳ : نحوه محاسبهٔ بافر پروژه

۲-۱-۴- تابع هدف هزینه: تابع هزینه کل چند هدفه شامل هزینه‌های منابع تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید می‌باشد. بنابراین، تابع هدف هزینه پروژه در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\min C = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J}(\sum_{k=1}^{K} r_{ijk}c_k t_{ij} + \sum_{p=1}^{P} nr_{ijp}c_p) \quad (2)$$

۲-۱-۴- تابع هدف کیفیت: انجام تحقیق در مورد برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی نیازمند ارزیابی پروژه‌ها می‌باشد. در این پژوهش جهت نشان دادن کیفیت بدست آمده (EQV_{ij}) برای هر فعالیت، از رابطه (۳) استفاده گردیده است:

$$EQV_{ij} = EV_{ij} + q_{ij} \quad (3)$$

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

$$q_{ij} = \frac{rq_j}{dq_j} \times 100 \quad (4)$$

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

$$\max Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij}} \times \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EQV_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij}} \times \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij} \times q_{ij} \quad (5)$$

۲-۴- تابع مطلوبیت مدل پیشنهادی

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

$$u(T,C,Q) = \alpha_T u(T) + \alpha_c u(C) + \alpha_Q u(Q) \quad (6)$$

$$\alpha_T, \alpha_C, \alpha_Q \geq 0 \quad (7)$$

$$\alpha_T + \alpha_C + \alpha_Q = 1 \quad (8)$$

شکل تابع درجه دوم تابع مطلوبیت می‌تواند به عنوان فضای حل استفاده گردد 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 نمایند. مقدار مطلوبیت زمان کل پروژه (D)، یک در نظر گرفته شد و تابع مطلوبیت زمان به صورت رابطه (۹) ارائه شده است:

$$U(T)=\begin{cases}\varphi_T-\beta_T(T-D), T\in[0,2D]^2\\ 0, T\notin[0,2D]^2\end{cases} \quad (9)$$

کل هزینه مدیریت چند پروژه شامل هزینه‌های منابع تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر می‌باشد و مقدار مطلوبیت آن برابر با یک می‌باشد، از این رو به صورت رابطه (۱۰) داریم:

$$U(C)=\begin{cases}\varphi_C-\beta_C(C-(1-\eta),U)^2, C\in[0,2(1-\eta),U]^2\\ 0, C\notin[0,2(1-\eta),U]\end{cases} \quad (10)$$

مقدار مطلوبیت تابع کیفیت نیز یک می‌باشد و تابع مطلوبیت کیفیت به صورت رابطه (۱۱) ارائه شده است:

$$U(Q)\begin{cases}\varphi_Q-\beta_Q(Q-1)^2, Q\in[0,1]\\ 0, Q\notin[0,1]\end{cases} \quad (11)$$

۳-۴- مدل بهینه‌سازی چند هدفه

به منظور حل مسئله پیشنهادی که یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد، با توجه به سه معیار زمان، هزینه و کیفیت، که معمولا به عنوان اهداف اصلی سازمان‌ها و پیمانکاران در نظر گرفته می‌شوند، یک تابع ابزار برای این اهداف ایجاد شد. بنابراین، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت روابط (۱۲)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) تعریف شده است:

$$O, F=\max u(T,C,Q) \quad (12)$$

$$st: E_{ij}-E_{i(j-1)}\geq t_{ij}, \forall i, j, i=1,2,...,N, j=1,2,...J \quad (13)$$

$$PB=\frac{T_{ts}}{2} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} r_{ijk}\leq R_k, \forall t\in T, \forall k \quad (15)$$

رابطه (۱۲) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که متمرکز بر به حداکثرسازی ابزار بهینه‌سازی چند هدفه در برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی می‌باشد. رابطه (۱۳) نشان‌دهندهٔ رابطه پیش‌نیازی و پس‌نیازی در این پروژه می‌باشد، که بیانگر آن است که فعالیت پس‌نیاز 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 نشان‌دهندهٔ 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 نماید.

۴-۴- اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

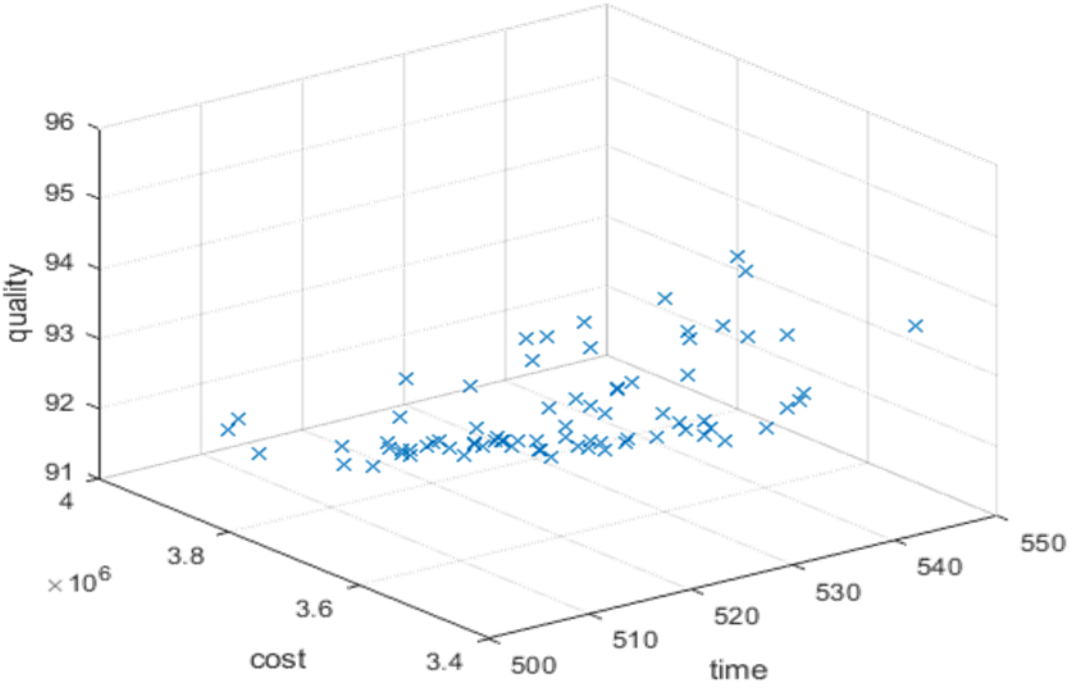
در این بخش یک مثال با ۶۰ فعالیت که اصل مثال توسط تران و همکاران [۲۳] می‌باشد، و بعدها توسط طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] توسعه داده شد، به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش و مقایسه نتایج از نظر زمان، هزینه و کیفیت ارائه گردیده است. مثال ارائه شده در مطالعه طاهری‌امیری و همکاران در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: مثال ارائه شده در مطالعه طاهری‌امیری و همکاران [۱۳]

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	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 *PESA-II*، نتایج بدست آمده از جواب‌های پارتو در شکل ۴ نشان داده شده است. همین‌طور نتایج حاصل از حل این مثال با الگوریتم پیشنهادی این مطالعه و مقایسه آن با نتایج الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات که توسط طاهری‌امیری و همکاران حل شده است، در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: جواب‌های پارتو حاصل از الگوریتم PESA-II جهت بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت

جهت محاسبه مقادیر زمان، هزینه و کیفیت تمامی فعالیت‌های پروژه، مسئله مطالعه طاهری‌امیری و همکاران، به ازای مقادیر مختلف α، با الگوریتم *PESA-II* اجرا گردید و تعدادی جواب پارتو حاصل از الگوریتم پیشنهادی این تحقیق و جواب‌های مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج الگوریتم PESA-II و الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران

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	۵۴۹	۳۶۳۵۶۸۲/۱۵	۹۲/۰۴	۵۸۱	۴۲۹۶۰۷۷	**۹۲/۰۵**
۲	۵۱۶	۳۸۷۵۲۰۶/۱۳	۹۱/۵۹	۵۸۴	۴۲۷۷۲۵۲	**۸۸/۸۳**
۳	۵۲۴	۳۷۹۹۱۲۱/۰۲	۹۱/۵۵	۵۵۲	۴۶۳۷۷۳۳	**۸۸/۸۹**

همان‌طور که از جدول ۴ می‌توان مشاهده نمود که برای مسئله مورد نظر سه پاسخ بهینه، تحت عنوان پارتو از مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران و سه پاسخ از نتایج الگوریتم پیشنهادی تحقیق ارائه شده است. همچنین با توجه به اطلاعات جدول ۴ می‌توان ملاحظه نمود که جواب‌های شمارهٔ ۱، ۲ و ۳ حاصل از الگوریتم PESA-II از نظر تابع هدف زمان و هزینه نسبت به جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ مطالعه طاهری‌امیری و همکاران بهتر بوده است و همچنین از نظر تابع هدف کیفیت جواب‌های شماره ۲ و ۳ الگوریتم پیشنهادی نسبت به جواب‌های ۲ و ۳ مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. بنابراین، در مجموع می‌توان گفت که الگوریتم PESA-II موجب تولید جواب‌های پارتو با مقادیر بهتر در سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت نسبت به الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران گشته است؛ و این موضوع بیانگر عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی این تحقیق می‌باشد.

۴-۵- مطالعه موردی

پروژه‌های اول و دوم به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی در پژوهش در نظر گرفته شده‌اند. عملکرد خوب الگوریتم در بخش قبلی با مقایسه نتایج آن با نتایج الگوریتم طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] اثبات شد. به منظور بررسی صحت مدل پیشنهادی، دو مطالعه موردی با ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده و با استفاده الگوریتم *PESA-II* حل شده‌اند که در ادامه به بررسی هر کدام از آنها پرداخته شده است.

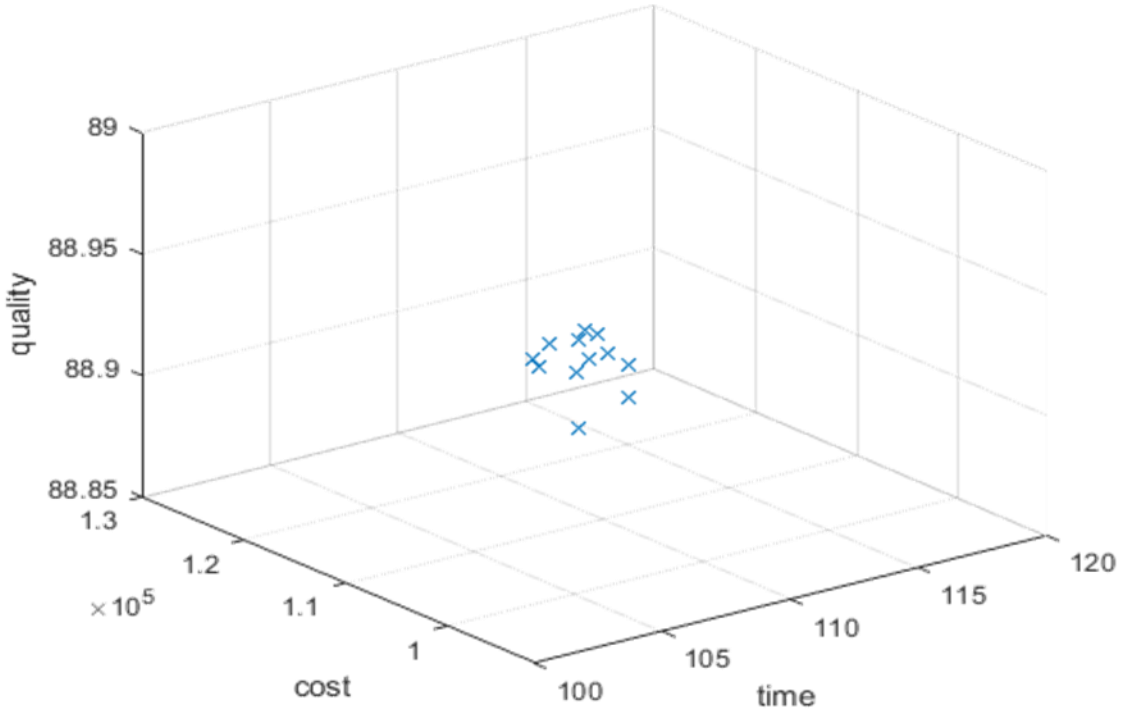
۴-۵-۱- پروژه اول

یک مسئله در قالب یک پروژه عمرانی با ۷ فعالیت که توسط پژوهشگران مختلفی از جمله طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] مورد استفاده واقع شده است، به منظور بررسی مدل ارائه شده در این پژوهش و مقایسه نتایج از نظر زمان، هزینه و کیفیت ارزیابی گردید. در ادامه اطلاعات مورد نیاز و روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها در پروژه عمرانی با ۷ فعالیت در جدول۵ 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	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 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 به منظور بهینه‌سازی سه هدف زمان هزینه و کیفیت با استفاده از الگوریتم *PESA-II*، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده جهت بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت مربوط به پروژه اول، که شامل ترکیب‌های مختلفی از زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نتایج حاصل از الگوریتم PESA-II جهت بهینه‌سازی زمان هزینه و کیفیت در پروژه اول

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

جدول ۶: نتایج اجرای مدل پیشنهادی جهت 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	PESA-II	جدول ۵	۱۰۳	۹۴۶۱۹/۴۳	۸۸/۹۳	توالی	۱	۴	۳	۲	۵	۶	۷
						حالت	۱	۱	۱	۳	۱	۲	۱
			۱۱۷	۱۳۰۰۱۹/۶۳	۸۸/۸۵	توالی	۱	۲	۳	۴	۶	۵	۷
						حالت	۱	۱	۱	۳	۳	۴	۳
			۱۰۶	۱۰۱۸۸۴/۴۱	۸۸/۹۶	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۱
			۱۰۸	۱۰۰۹۲۷/۹۵	۸۸/۹۶	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۱	۳	۲	۲	۳	۳	۲
			۱۰۴	۹۵۴۴۳/۶۵	۸۹/۰۴	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۲	۱	۱	۱	۳	۲	۱
			۱۱۳	۱۱۹۴۳۳/۳۱	۸۸/۸۹	توالی	۱	۳	۲	۴	۵	۶	۷
						حالت	۲	۱	۱	۲	۳	۳	۱
			۱۱۰	۱۱۵۱۷۴/۸۵	۸۸/۹۳	توالی	۱	۴	۳	۶	۲	۵	۷
						حالت	۲	۱	۱	۳	۴	۴	۲
			۱۰۶	۱۰۴۶۹۶/۱۰	۸۸/۹۸	توالی	۱	۳	۴	۶	۲	۵	۷
						حالت	۲	۱	۳	۲	۵	۱	۱
			۱۰۹	۱۰۶۰۲۷/۷۱	۸۸/۹۷	توالی	۱	۲	۴	۶	۳	۵	۷
						حالت	۳	۱	۱	۱	۲	۲	۲

			۱۰۸	۱۱۲۸۸۰/۰۲	۸۸/۹۶	توالی	۱	۴	۳	۲	۵	۶	۷
						حالت	۳	۱	۱	۲	۱	۲	۳
			۱۲۳	۱۵۲۱۳۲/۸۳	۸۹/۴۷	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۱	۲	۳	۳	۳	۲
			۱۱۹	۱۳۵۱۶۱/۷۹	۸۹/۰۸	توالی	۱	۳	۲	۴	۵	۶	۷
						حالت	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۱
			۱۱۴	۱۲۲۲۲۵/۷۰	۸۸/۹۱	توالی	۱	۲	۳	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۱
			۱۰۷	۱۰۹۱۶۵/۰۶	۸۸/۹۴	توالی	۱	۲	۴	۳	۵	۶	۷
						حالت	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳
			۱۰۲	۹۱۳۲۷/۱۸	۸۸/۹۸	توالی	۱	۳	۲	۵	۴	۶	۷
						حالت	۳	۲	۴	۱	۳	۳	۱

با توجه به نتایج جدول ۶، مدیران پروژه می‌توانند براساس شرایط موجود و اولویت‌های مدنظرشان، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب نمایند. به عنوان مثال اگر برای مدیر تحویل به موقع یا زودتر ملاک باشد، جواب با تابع هدف زمانی کمتر را انتخاب خواهد نمود، و یا در صورتی‌که هزینه اجرای پروژه مد نظر باشد، جوابی که دارای تابع هدف هزینه کمتری می‌باشد، انتخاب می‌شود، و اگر کیفیت اجرای پروژه ملاک باشد، جوابی که دارای تابع هدف کیفیت بیشتری می‌باشد را برمی‌گزینند. در ادامه جهت مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم *PESA-II* با نتایج بدست آمده در مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷: مقایسه نتایج الگوریتم PESA-II با الگوریتم طاهری‌امیری و همکاران[۱۳]

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	۱۰۳	۹۴۶۱۹/۴۳	۸۸/۹۳	۸۴	۱۵۶۳۱۱/۲	**۹۲/۱۷**
۲	۱۱۷	۱۳۰۰۱۹/۶۳	۸۸/۸۵	۸۹	۱۴۱۹۱۱/۸	**۸۷/۰۷**
۳	۱۰۶	۱۰۱۸۸۴/۴۱	۸۸/۹۶	۱۰۴	۱۱۰۵۱۳/۸	**۷۴/۳۴**

مطابق جدول ۷ می‌توان مشاهده نمود که جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی این تحقیق از نظر تابع هدف هزینه نسبت به جواب‌های ۱، ۲ و ۳ الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران برتری دارد. در مورد جواب‌های ۲ و ۳ نیز از نظر تابع هدف کیفیت نسبت به جواب‌های ۲ و ۳ مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. از نظر تابع هدف زمان نیز جواب شماره ۱ الگوریتم پیشنهادی نسبت به جواب شماره ۳ مطالعه طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. بنابراین، در مجموع می‌توان گفت که الگوریتم PESA-II موجب تولید جواب‌هایی با مقادیر بهتر در توابع هدف هزینه و کیفیت و در برخی موارد در تابع زمان، نسبت به الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران می‌گردد.

۲-۵-۴- پروژه دوم

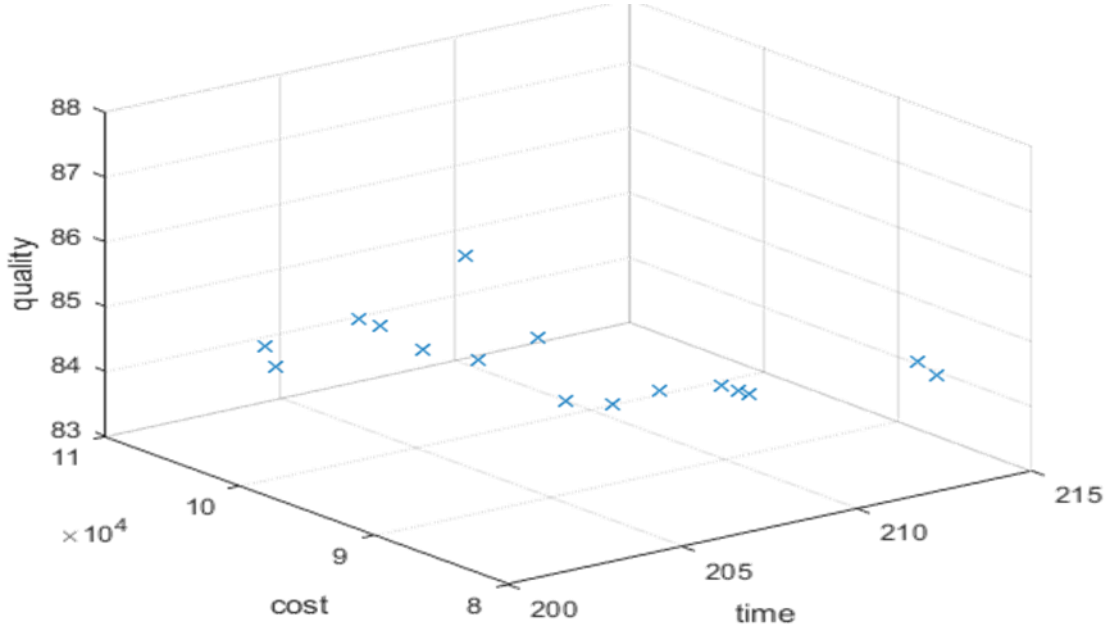
در این قسمت برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، به حل مثالی با ابعاد بزرگ‌تر پرداخته شده است. در این مثال یک پروژه عمرانی با ۱۸ فعالیت که برگرفته از مطالعه فنگ و همکاران [۲۳] که توسط محققینی از جمله تارک‌هجازی [۲۴]، ژانگ و همکاران [۲۵]، در حل مسئله موازنه زمان-هزینه استفاده شده است. ال-رایز و کاندیل [۲۶]، نیز با اختصاص مقادیری برای کیفیت اجرای هر فعالیت از این مثال برای مسئله سه هدفه زمان- هزینه کیفیت و همین‌طور طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] برای موازنه زمان، هزینه و کیفیت بهره گرفته‌اند. اطلاعات مورد نیاز مربوط به مثال در جدول ۸ ارائه 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 به منظور بهینه‌سازی سه هدف زمان، هزینه و کیفیت با استفاده از الگوریتم *PESA-II*، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده جهت بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت مربوط به پروژه دوم، که شامل ترکیبهای مختلفی از زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند، در شکل ۶ نشان داده شده است.



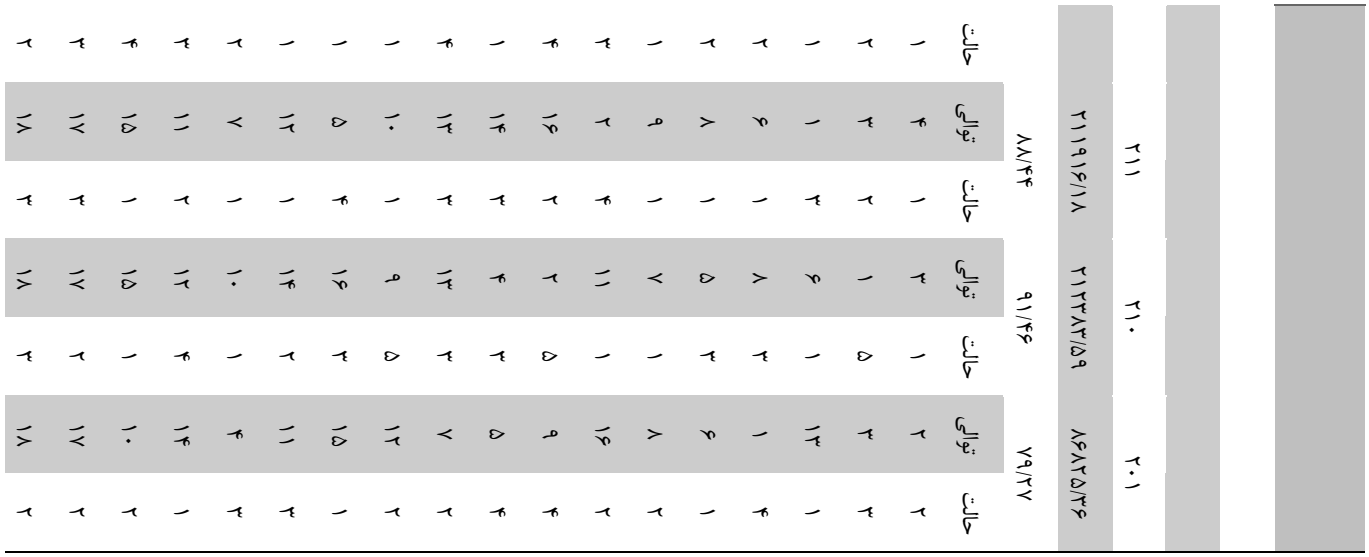
شکل ۶: نتایج الگوریتم PESA-II به منظور بهینه‌سازی زمان هزینه و کیفیت پروژه دوم

در جدول ۹، ۱۲ جواب پارتو بدست آمده از اجرای مدل تحقیق جهت بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت ارائه شده است. نتایج حاصل‌شده بیان‌گر 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 با توجه به شرایط موجود و اولویت‌های کارفرمایان، مناسب‌ترین گزینه

را انتخاب نمایند. به عنوان مثال اگر برای مدیر یا کارفرما، 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 برمی‌گزیند، و اگر هزینه اجرای پروژه ملاک باشد، جوابی که دارای تابع هدف هزینه کمتری می‌باشد، انتخاب می‌گردد.

جدول ۹: نتایج بدست آمده از الگوریتم PESA-II جهت بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت پروژه دوم

نوع مدل	الگوریتم	داده‌های مسئله	زمان کل(روز)	هزینه (ذلار)	کیفیت	توالی و حالت‌های اجرای هر فعالیت																		
زمان، هزینه و کیفیت	PESA-II	جدول ۸	۲۰۱	۹۶۰۶۴/۶۶	۸۲/۰۱	توالی	۱	۵	۳	۱۳	۴	۲	۷	۱۱	۶	۱۶	۱۴	۸	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۰	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۳	۴	۲	۱	۱	۵	۱
			۲۰۴	۱۱۲۱۱۲/۶۳	۸۴/۶۹	توالی	۴	۱	۶	۸	۲	۱۶	۱۴	۵	۷	۱۱	۳	۱۳	۱۰	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۵	۲	۱	۱	۱
			۲۱۱	۱۲۴۰۰۰/۹۹	۸۶/۹۳	توالی	۲	۱	۶	۸	۱۶	۹	۳	۱۳	۴	۱۴	۱۰	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
			۲۰۵	۸۶۹۴۰/۳۴	۸۳/۵۷	توالی	۳	۴	۱۳	۱	۶	۸	۲	۱۶	۱۴	۵	۱۰	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
			۲۰۵	۱۰۶۲۶۰/۴۹	۸۵/۰۸	توالی	۳	۱	۶	۵	۷	۲	۱۶	۴	۸	۱۴	۱۳	۱۰	۹	۱۲	۱۵	۱۱	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۴	۳	۳	۱	۵	۱	۱	۳	۲	۱
			۲۰۶	۱۲۰۶۰۵/۶۶	۸۴/۶۱	توالی	۳	۱۳	۴	۲	۱	۶	۵	۸	۷	۱۱	۹	۱۲	۱۵	۱۶	۱۴	۱۷	۱۰	۱۸
						حالت	۱	۱	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۲	۲	۴	۱	۱	۳	۱	۲	۴	۳
			۲۰۲	۱۶۶۳۹۷/۶۶	۹۰/۷۸	توالی	۳	۱۳	۴	۲	۱	۶	۸	۱۶	۱۴	۱۰	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
			۲۰۸	۱۲۹۸۹۲/۳۹	۸۵/۸۸	توالی	۳	۴	۱	۶	۲	۱۶	۵	۸	۷	۱۱	۱۴	۱۳	۱۰	۹	۱۲	۱۵	۱۷	۱۸
						حالت	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۳	۴	۳	۲	۳	۳	۲	۵	۱	۱	۲	۱
			۲۰۳	/۵۰	/۵۳	توالی	۴	۱	۶	۸	۳	۱۳	۹	۲	۱۶	۵	۱۲	۱۵	۷	۱۱	۱۴	۱۰	۱۷	۱۸



به منظور صحت‌سنجی مدل تحقیق، نتایج بدست آمده از الگوریتم *PESA-II* با نتایج الگوریتم مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] با مثالی در ابعاد بزرگتر مورد مقایسه قرار گرفت، که تعدادی از جواب‌های بدست آمده در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰: مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران [۱۳]

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	۲۰۱	۹۶۰۶۴/۶۶	۸۲/۰۱	۲۳۴	۱۵۷۰۸۱/۲	**۵۰/۷۶**
۲	۲۰۴	۱۱۲۱۱۲/۶۳	۸۴/۶۹	۲۳۴	۱۵۱۵۰۱/۲	**۴۲/۵۸**
۳	۲۱۱	۱۲۴۰۰۰/۹۹	۸۶/۹۳	۲۴۹	۹۷۵۸۳/۲	**۴۳/۵۷**

با توجه به جدول ۱۰ می‌توان مشاهده نمود که جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ الگوریتم این تحقیق از نظر تابع هدف زمان و کیفیت نسبت به جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ الگوریتم مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] بهتر می‌باشد. از نظر تابع هدف هزینه نیز جواب‌های شماره ۱ و ۲ الگوریتم PESA-II نسبت به جواب‌های شماره ۱ و ۲ الگوریتم طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] برتری دارد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم PESA-II موجب تولید جواب‌هایی با مقادیر پارتو بهتر در سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت نسبت به الگوریتم طراحی شده در مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران [۱۳] می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- به منظور اعتبارسنجی الگوریتم طراحی‌شدهٔ مطالعهٔ حاضر، یک مثال با ۶۰ فعالیت که در مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران[۱۳] نیز مورد استفاده قرار گرفته است؛ با الگوریتم مطالعهٔ حاضر اجرا، و نتایج حاصل از آن با نتایج مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران در جدول ۴ مقایسه گردید. جدول ۴ دارای سه جواب پارتو از الگوریتم پیشنهادی مطالعهٔ حاضر و سه جواب پارتو از الگوریتم طاهری‌امیری و همکاران می‌باشد. با توجه به اطلاعات جدول ۴ می‌توان ملاحظه نمود که جواب‌های شمارهٔ ۱، ۲ و ۳ حاصل از الگوریتم PESA-II از نظر تابع هدف زمان و هزینه نسبت به جواب‌های شماره ۱، ۲ و ۳ مطالعه طاهری‌امیری و همکاران بهتر بوده است و همچنین از نظر تابع هدف کیفیت جواب‌های شماره ۲ و ۳ الگوریتم پیشنهادی نسبت به جواب‌های ۲ و ۳ مطالعهٔ طاهری‌امیری و همکاران بهتر می‌باشد. بنابراین، در مجموع می‌توان گفت که الگوریتم PESA-II موجب تولید جواب‌های پارتو با مقادیر بهتر در سه تابع هدف زمان،

هزینه و کیفیت نسبت به الگوریتم مطالعه طاهری‌امیری و همکاران گشته است؛ و این موضوع عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی این تحقیق را اثبات می‌کند.

۲- جهت صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، دو مثال با ۷ و ۱۸ فعالیت در نظر گرفته شد. نتایج پروژه اول در جدول ۶ با ۱۵ جواب پارتو و نتایج مربوط به پروژهٔ دوم در جدول ۹ با ۱۲ جواب پارتو ارائه شده است. نتایج بدست آمده شامل مقادیر مختلف از سه تابع هدف زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند. این نتایج به گونه‌ای می‌باشند که مدیران و تصمیم‌گیران را قادر می‌سازد که با توجه به سیاست‌های مدنظرشان از نظر زمانی، هزینه‌ای و کیفی، جوابی که دارای تابع هدف بهتری می‌باشد را انتخاب نمایند.

۳- در این پژوهش، یک مدل سه هدفه در روش زنجیره بحرانی جهت 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 گردید. در این راستا، از الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر شکل‌دهی پارتو (PESA-II) 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 PESA-II بررسی شد. سپس مسئله بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت با الگوریتم پیشنهادی برای حالت و توالی‌های مختلف صورت گرفت. و در نهایت نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل واقع شد.

۴- با توجه به پیچیدگی حوزهٔ 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 نمود. 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] Bineshian, M., Safari, S., Abbasi, R., and Momeni, M. (2018). "Optimization of organization portfolio; clustering approach and fuzzy multi-criteria decision making", *Modern Researches in decision making*, 3(2), pp. 81-106.

[2] Mahdavi, I., 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), pp. 41-56.

[3] 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), pp. 31-59.

[4] 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), pp. 5951-5959.

[5] 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), pp. 409–418.

[6] 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.

[7] startton, R. (2009). "Critical Chain Project Management Theory and Practice", *POMS 20th Annual Conference*, USA.

[8] Wei-Xin, W., Xu, W., Xian-Long, G., and Lei, D. (2014). "Multi-objective optimization model for multi-project scheduling on critical chain", *Advances in Engineering Software*, Vol 68, pp. 33–39.

[9] 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), pp. 633-643.

[10] Wuliang, P, Xueying, L, Yong ping, H. (2013). "A Genetic Algorithm for Solving Multi-Mode Critical Chain Project Scheduling Problem", *Journal of Convergence Information Technology*, 8(3), pp. 666-673.

[11] Liu, zh., Yang, L., Deng, R., and Tian, J. (2017). "An effective approach with feasible space decomposition to solve resource-constrained project scheduling problems", *Automation in Construction*, Vol 75, pp. 1-9.
[12] 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), pp. 3738-3752.
[13] 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), pp. 134-154.
[14] 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), pp. 87-108.
[15] Taheri Amiri, M. J., Hemmatian, M., and Asghari, A. (2021). "Prioritize and Optimal Selection of Projects with Best to Worth method VIKOR and Mathematical Programming", *Journal of Structural and Construction Engineering,* (In Persian) (2020) doi: 10.22065 / jsce.2020.209215.2000.
[16] Shahraki, M. R., & charvideh, J. (2022). Optimizing project selection using Tabu Search algorithm according to time, cost and quality and resource constraints in the critical chain method. *Journal of Structural and Construction Engineering*, *9*(3), 43-64. doi: 10.22065/jsce.2021.274317.2368.
[17] 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), pp. 1-9.
[18] Chen, G., and Junhua, L., (2019). "a diversity ranking based evolutionary algorithm for multi objective and many objective optimization", Swarm and Evolution. Computation, Vol. 48, pp. 274-287.
[19] Lv, L., Zhao, J., Wang, J., and Fan, T., (2019). "Multi objective firefly algorithm based on compensation factor and elite learning", *Future. Gener. Comput. Syst.* Vol.91, pp. 37-47.
[20] Laio, Y., Silva, T. V., Herthel, A. B., and Subramanian, A., (2019). "A multi objective evolutionary algorithm for a class of mean-variance portfolio selection problems", *Expert Systems with Applications*, Vol. 133, pp. 225-241.
[21] Corne, D., Jerram, N. R., Knowles, J. D., and Oates, M., (2001). "PESA-II: Region-based selection in evolutionary multi objective optimization", *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, University of Reading, UK, pp. 283-290.
[22] Poursalehi, N., Zolfaghari, A., and Minuchehr, A. (2012). "Performance comparison of zeroes order nodal expansion methods in 3D rectangular geometry", *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 252, pp. 248-266.
[23] Tran, D. H., Cheng, M. Y., and 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), pp. 176-186.
[24] Feng, C., Liu, L., and Burns, S. (2000). "Stochastic Construction Time Cost Trade-off Analysis", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(2), pp. 117-126.
[25] Hegazi, T., (2011). "Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(6), pp. 685-697.
[26] 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), pp. 163- 172.
[27] El-Rayes, K., and Kandil, A. A. (2005). "Time-Cost-Quality Trade-off Analysis for Highway Constructions", *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(4), pp. 447-486 (2005).