Journal of Structural and Construction Engineering, 7(Special Issue 3), 2020, pp. 87-108

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Optimization of time, cost and quality in critical chain method in multi project scheduling and resource constraints with considering utility function

Mohammad Javad Taheri Amiri[1] , Farshidreza Haghighi[2], Ehsan Eshtehardian[3], Milad Hematian[4], Roham Khalrghnejad[5]

1- Ph.D in Construction Engineering and Management, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2- Assistant professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
3- Assistant Professor, Department of Project and Construction Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
4- Ph.D. Candidate in industrial engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran
5-MSc in Construction Engineering and Management, Tabari University of Babol, Babol, Iran

ABSTRACT

Considering that the mission of the project organization management is to create a commitment to the timetable, which prevents project delays and increases associated costs, and accept the fact that the delay in the completion time of the project results in the non-economization of the project, Therefore, the necessity of using proper planning and control methods seems necessary. One of the new methods used in project planning and control, which today focuses on many researchers, is the critical chain management method. In this research, multi-project scheduling with resource constraint in the critical-chain model has been investigated. In general, RCMPSP seeks to find the right sequence for project activities, so that the constraints of the priority of the project network and the various types of resource constraints in the project are met simultaneously. To this end, a multi-objective optimization model has been developed to solve this problem, with its stated objectives, the completion time of the entire project, the cost of the overall project implementation, and the quality of the implementation of the project activities. Also, the critical chain approach, as a new method of project management, has been used for project scheduling and particle swarm optimization algorithm for solving proposed model of this research.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 March 2018
Revise Date: 24 September 2018
Accept Date: 11 January 2019

Keywords:
Multi project
Resource constraint
Project scheduling
Critical chain

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.122218.1496

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

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

بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت در روش زنجیره بحرانی در شرایط چند پروژه‌ای و محدودیت منابع با در نظرگیری تابع مطلوبیت

محمدجواد طاهری امیری[۱]، فرشیدرضا حقیقی[۲]،احسان اشتهاردیان[۳]، میلاد همتیان[۴]، رهام خالق نژاد[۵]

۱- دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استادیار گروه عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار گروه مدیریت پروژه و ساخت دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴-دانشجوی دکتری صنایع دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

۵-کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت ساخت موسسه آموزش عالی طبری بابل، بابل، ایران

چکیده

با توجه به این که رسالت مدیریت سازمان پروژه، ایجاد تعهد در قبال برنامه زمان‌بندی است، که مانع از به تأخیر افتادن پروژه و افزایش هزینه‌های مرتبط می‌گردد و قبول این واقعیت که تأخیر در اتمام به موقع پروژه موجب غیر اقتصادی شدن پروژه می‌گردد، بنابراین لزوم استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی و کنترل پروژه مناسب، ضروری به نظر می‌رسد. یکی از روش‌های نوین مورد استفاده در زمینه برنامه-ریزی و کنترل پروژه که امروزه توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف کرده است، روش مدیریت زنجیره بحرانی می‌باشد. در این تحقیق برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای با منابع محدود[۱] در مدل زنجیره بحرانی[۲] مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی، RCMPSP در پی یافتن توالی مناسبی برای انجام فعالیت‌های پروژه است، به نحوی که محدودیت‌های تقدم و تأخر شبکه‌ی پروژه و انواع مختلف محدودیت‌های منبعی موجود در پروژه، به طور همزمان ارضا شوند. برای این منظور، یک مدل بهینه‌سازی چند-هدفه برای حل این مشکل ارائه شده است که اهداف تعیین شده‌ی آن، زمان اتمام کل پروژه، هزینه‌ی اجرای کل پروژه و کیفیت اجرای فعالیت‌های پروژه می‌باشند. همچنین از رویکرد زنجیره بحرانی، به عنوان روش جدید مدیریت پروژه، برای برنامه‌ریزی پروژه و از الگوریتم فرا ابتکاری انبوه ذرات[۳] برای حل مدل پیشنهادی این تحقیق، استفاده شده است.

کلمات کلیدی: چند پروژه، منابع محدود، برنامه‌ریزی پروژه، زنجیره بحرانی

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۶/۱۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۷/۰۲	۱۳۹۷/۱۰/۲۱	۱۳۹۷/۱۰/۲۱	۱۳۹۹/۰۹/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2019.122218.1496
					https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.122218.1496

*نویسنده مسئول: **فرشیدرضا حقیقی**

پست الکترونیکی: Haghighi@nit.ac.ir

[1]- Resource-Constrained Multi-Project Scheduling (RCMPSP)
[2]- Critical Chain Method (CCM)
[3]- Particle Swarm Optimization (PSO)

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 زمان‌بندی 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 فعالیت-ها 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[۴] (PMBOK) نیز بر روی آنها تاکید بسیار شده است[۴]، مقالات اندکی به بررسی موازنه بین سه هدف زمان، هزینه و کیفیت پرداخته‌اند. 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.

از سوی دیگر اغلب شرکت‌های پیمانکاری با توجه به اینکه همزمان باید چند پروژه را مدیریت کرده و منابع شرکت در این پروژه-ها درگیر می‌باشد، محدودیت این منابع یکی از مرسوم‌ترین مشکلاتی است که ممکن است در این پروژه‌ها اتفاق بیفتد و پروژه‌ها را با مشکلات زمانی مواجه کند [۱۸]. مسئله محدودیت منابع، مسئله استانداردی است که طی یک دهه گذشته به صورت گسترده در مسائل برنامه‌ریزی پروژه، خصوصا در برنامه‌ریزی چندپروژه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است[۱۹] . با توجه به اینکه مسائل محدودیت منابع از نوع مسائل NP-hard محسوب می‌شوند[۲۰-۲۳]، بنابراین، این مسئله قابلیت حل با استفاده از روشهای بهینه‌سازی به صورت حل دقیق در

[4] -Project Management Body of Knowledge

ابعاد بزرگ را نداشته و به منظور حل آن، از روشهای فراابتکاری بهره گرفته شده است. 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[۲۴]،، رقابت استعماری توسط افروزی و همکاران[۲۵]، الگوریتم تکاملی توسط توانا و همکاران[۲۶]، الگوریتم ژنتیک توسط مونگله و همکاران[۲۷]، منقصمی و همکاران[۲۸]، در این مقاله به بررسی مدل سه هدفه زمان، هزینه و کیفیت با در نظر گرفتن توابع مطلوبیت با استفاده از روش الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات(PSO) پرداخته شده است.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

عبدالرزاق و همکاران (۲۰۱۲) یک شیوه مطمئن برنامه‌ریزی پروژه را با اهداف شیوه برنامه‌ریزی پروژه، تمرکز بر روی برنامه‌ریزی زنجیره بحرانی و مدیریت ریسک ارائه می‌کنند. در شیوه پیشنهادی، خطرات بالقوه پروژه‌ها به صورت اساسی تجزیه و تحلیل شدند. برای غلبه بر این خطرات بالقوه، تجزیه و تحلیل اثرات و حالت شکست فازی (FMEA) معرفی می‌شود. به علاوه، تأثیرات مختلف هر ریسک بر هر فعالیت ارزیابی می‌شوند که در آن از شبیه سازی مونت کارلو استفاده می‌شود که کمک می‌کند تا زمان کلی پروژه محاسبه گردد. این رویکرد به کنترل کاهش ریسک کمک می‌کند که با استفاده از تجزیه و تحلیل درختی و تجزیه و تحلیل درختی خطا، تعیین می‌گردد. همچنین برنامه زنجیره بحرانی توزیعی را به منظور برنامه‌ریزی قابل اطمینان ارائه می‌کند که پروژه را در طرح و برنامه مشخصی اجرا می-کند. در نهایت، روند تطبیقی به همراه تراکم (APD) برای دریافت بافرهای تغذیه منطقی و زمان بافر پروژه گسترش یافتند[۲۹].

هوانگ و همکاران (۲۰۱۲) با مقایسه‌ی ۲ روشCCPM و PERT در ۳ پروژه‌ی مختلف با هم، بیان شده است که روشCCPM به دلیل استفاده‌ی خوب از زمان‌های ایمنی موجود در فعالیت‌ها با تغییر منطقی و تغییر رفتار انسانی بد، توانسته در محیط‌های چند پروژه‌ای به زمان تحویل به موقع قابل اعتماد و زمان انجام پروژه کوتاه دست پیدا کند. با این حال، اگر فاکتور رفتار انسانی بد را در نظر نگرفته و تنها به تغییر منطقی توجه شود، در رابطه با زمان متوسط انجام پروژهCCPM برتری چندانی نسبت به روش PERT نخواهد داشت، حال اینکه در رابطه با قابلیت اعتماد طرح، CCPMبه نتایج بهتری نسبت به PERT رسیده است[۳۰].

پاوینسکی و ساپیچا (۲۰۱۲)، با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، به دنبال پیدا کردن ارزانترین زمانبندی با توجه به محدودیت‌های زمانی می‌باشند. به طور میانگین ، این بهینه‌سازی ۱۴,۱٪ کاهش هزینه‌ها، با استفاده از منابع یکسان، را در پی داشته است. در این مقاله برای تعیین مقدار بهبود وضعیت زمانبندی، از مفهوم سود استفاده شده است، که نسبتی بین هزینه و زمان کلی پروژه است[۳۱].

گئورگی و همکاران (۲۰۱۳) قابلیت اجرای برنامه‌ریزی زنجیره بحرانی را در پروژه‌های ساخت و ساز خاورمیانه (مصر و عربستان سعودی) مورد بررسی قرار دادند. یکی از یافته‌های بررسی‌های آنان این بود که پروژه‌های خطی از قبیل پروژه‌های ساخت خط لوله، پتانسیل مناسبی برای کاربرد آزمایشی زنجیره بحرانی دارند. مانع شناسایی شده توسط متخصصان ساخت و ساز برای جلوگیری از کاربرد زنجیره بحرانی در زندگی واقعی، برآورد "مدت زمان تهاجمی اما قابل وصول " (ABAD)است[۳۲].

تولاسی و رائو (۲۰۱۴)، به تعیین برنامه زمان‌بندی پروژه برای شبکه با استفاده از کاربرد روش مدیریت پروژه‌ی زنجیره بحرانی در شرایطی که محدودیت‌های متعدد منابع جهت دست‌یابی به دو هدفِ به حداقل رساندن زمان و هزینه وجود دارد، پرداختند. در این مقاله به منظور حل مسئله، از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده شده است. مشاهده شده است که به کار بردن این رویکرد برای شبکه‌های کوچک بسیار مناسب به شمار می‌آید. به کار بردن این روش برای شبکه‌های بزرگ ممکن است با الگوریتم برنامه‌ریزی عدد صحیح، شفاف و مشخص نباشد، چرا که کار نوشتن محدودیت‌ها به خودی خود، کاری بسیار سخت و دشوار است[۳۳].

طاهری امیری و همکاران (b۲۰۱۷)مسئله برنامه‌ریزی پروژه موازنه زمان-هزینه را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک حل نموده است. در این تحقیق، تابع هدف زمان با استفاده از روش زنجیره بحرانی محاسبه شده و بافر پروژه از طریق روش بریدن و چسباندن بدست آمده است. همچنین به منظور محاسبه تابع هدف هزینه، از مجموع هزینه‌های مربوط به منابع مصرفی و غیر مصرفی استفاده شده است. اهداف زمان و هزینه با استفاده از تابع مطلوبیت به یک هدف تبدیل شده و مسئله به صورت تک هدفه حل شده است[۳۴].

طاهری امیری و همکاران (a۲۰۱۷)مسئله برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای موازنه زمان-هزینه-کیفیت را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید حل نموده است. در این تحقیق سه هدف زمان، هزینه و کیفیت با استفاده از توابع مطلوبیت به یک هدف تبدیل کرده و به صورت تک هدفه مسئله حل شده است. تابع هدف زمان با استفاده از روش زنجیره بحرانی محاسبه شده و بافر پروژه از طریق روش بریدن و چسباندن بدست آمده است. همچنین به منظور محاسبه تابع هدف هزینه، از مجموع هزینه‌های مربوط به منابع مصرفی و غیر مصرفی استفاده شده است. تابع هدف کیفیت نیز از طریق مجموع وزنی کیفیت هر یک از فعالیت‌ها بدست می‌آید[۲۴].

طاهری امیری و همکاران(۱۳۹۶) مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت را با فعالیت‌های چندحالته را با استفاده از الگوریتم فراابتکاری چند هدفه ازدحام ذرات حل نموده است. در این تحقیق برای هر یک از فعالیت‌ها چندین مد اجرایی در نظر گرفته شده است و روش زمان‌بندی پروژه، روش زنجیره بحرانی بوده است، بدین شکل که الگوریتم بهینه‌سازی این تحقیق به دنبال شناسایی بهترین توالی و مد اجرایی فعالیت‌ها بوده که در آن زمان و هزینه پروژه حداقل شده و کیفیت آن در بالاترین مقدار خود قرار داشته باشد[۳۵].

طاهری امیری و همکاران(۲۰۱۸) مسئله موازنه زمان-هزینه را در شرایط محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب در شرایط چندپروژه‌ای حل نموده است. در این تحقیق سه پروژه با تعداد فعالیت‌های ۷، ۸ و ۱۰ به طور همزمان مورد برنامه‌ریزی تحت محدودیت منابع قرار گرفته است، همچنین روش زمانبندی پروژه در این تحقیق روش زنجیره بحرانی بوده است.نتایج نشان می‌دهد الگوریتم ارائه شده عملکرد مناسبی به منظور حل مسئله زمان-هزینه در شرایط محدودیت منابع داشته است[۳۶].

روغنیان و همکاران(۲۰۱۸) از یک رویکرد زنجیره بحرانی فازی توسعه داده شده برای مواجهه با عدم قطعیت در برنامه‌ریزی پروژه استفاده کرده‌اند. استفاده از اعداد فازی می‌تواند بدلیل عدم قطعیت طبیعی موجود در پروژه‌ها که با توجه به تخمین‌های مورد نیاز به منظور انجام کارها وجود دارد، عاقلانه باشد. به منظور حداقل‌سازی زمان ختم پروژه شرایط محدودیت منابع نیز لحاظ شده است.همچنین رویکرد جدیدی به منظور تعیین اندازه بافر با روش مجموع ریشه مربعات معرفی شده است که با استفاده از اعمال ضرایبی اصلاح شده شرایط ریسک پروژه را به صورت موثرتری در نظر گرفته است[۳۷].

همانطور که از بررسی تحقیقات مختلف مشخص است در این تحقیق برای اولین بار مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت با روش زنجیره بحرانی با در نظر گرفتن محدودیت منابع مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق بهترین توالی اجرای فعالیت‌های پروژه مدنظر می‌باشد به طوری که در شرایط محدودیت منابع بیشترین مقدار مطلوبیت زمان، هزینه و کیفیت را بدست آورد.

از طرف دیگر با توجه به اینکه مسائل محدودیت منابع از نوع مسائل NP-hard محسوب می‌شوند[۳۸]، این مسئله قابلیت حل با استفاده از روشهای بهینه‌سازی به صورت حل دقیق در ابعاد بزرگ را نداشته و به منظور حل آن، از روشهای فراابتکاری بهره گرفته شده است. در این تحقیق به منظور حل مسئله از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده شده است که در ادامه توضیحاتی در رابطه با آن ارائه خواهد شد.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

روش PSO یک روش بهینه‌سازی سراسری است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n-بعدی می‌باشند، برخورد نمود. در چنین فضایی، فرضیاتی مطرح می‌شود و یک سرعت ابتدایی به ذرات اختصاص داده می‌شود، همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات درنظر گرفته می‌شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند، و نتایج حاصله بر مبنای یک « ملاک شایستگی » پس از هر بازه‌ی زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند. مزیت اصلی این روش بر استراتژی‌های بهینه‌سازی دیگر این است که، تعداد فراوان ذرات ازدحام کننده، باعث انعطاف روش در برابر مشکل پاسخ بهینه‌ی محلی می‌گردد.

برخلاف الگوریتم ژنتیک[5] PSO هیچ عملگر تکاملی همانند جهش و ترویج ندارد. از این جهت می‌شود گفت که PSO شباهت بیشتری الگوریتم رقابت استعماری[6] دارد تا به GA. هر عنصر جمعیت، یک ذره نامیده می‌شود (که همان معادل کروموزوم در GA و یا کشور در الگوریتم رقابت استعماری) است. در واقع الگوریتم PSO از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل می‌شود که به طور تصادفی، مقدار اولیه می‌گیرند. برای هر ذره، دو مقدار وضعیت و سرعت، تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل می‌شوند. این ذرات، به صورت تکرارشونده‌ای در فضای n-بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبه‌ی مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. بُعد فضای مسئله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع مورد نظر برای بهینه‌سازی می‌باشد. یک حافظه به ذخیره‌ی بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره‌ی بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه‌ی ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربه‌ی حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه‌ی ذرات در فضای n-بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه‌ی بهینه‌ی عام، پیدا شود. ذرات، سرعت‌هایشان و موقعیت‌شان را بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی به‌روز می‌کنند. یعنی:

$$v_{m,n}^{new} = v_{m,n}^{old} + \Gamma_1 \times r_1 \times \left(p_{m,n}^{local\ best} - p_{m,n}^{old}\right) + \Gamma_2 \times r_2 \times \left(p_{m,n}^{global\ best} - p_{m,n}^{old}\right)$$

$$p_{m,n}^{new} = p_{m,n}^{old} + v_{m,n}^{new}$$

(۱)

که در آن

$v_{m,n}$ = سرعت ذره

$p_{m,n}$ = متغیرهای ذره

r_1, r_2 = اعداد تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت

Γ_1, Γ_2 = فاکتورهای یادگیری

$p_{m,n}^{local\ best}$ = بهترین جواب محلی

$p_{m,n}^{global\ best}$ = بهترین جواب مطلق

می‌باشند. الگوریتم PSO، بردار سرعت هر ذره را به روز کرده و سپس مقدار سرعت جدید را به موقعیت و یا مقدار ذره می‌افزاید. به روز کردن‌های سرعت، تحت تأثیر هر دو مقدار بهترین جواب محلی و بهترین جواب مطلق قرار می‌گیرند. بهترین جواب محلی و بهترین جواب

[5]- Genetic Algorithm (GA)
[6]- Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

مطلق، بهترین جواب‌هایی هستند که تا لحظه‌ی جاری اجرای الگوریتم، به ترتیب توسط یک ذره و در کل جمعیت به دست آمده‌اند. ثابت‌های Γ_1 و Γ_2 به ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند. مزیت اصلی PSO این است که پیاده‌سازی این الگوریتم ساده بوده و نیاز به تعیین پارامترهای کمی دارد. همچنین PSO قادر به بهینه‌سازی توابع هزینه‌ی پیچیده با تعداد زیاد مینیمم محلی است[۳۹].

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

در این مطالعه سه هدف زمان، هزینه و کیفیت به منظور ارزیابی زمانبدی چندپروژه‌ای زنجیره بحرانی در نظر گرفته شده است. هدف زمانی پروژه، حداقل‌سازی زمان پایان پروژه بوده که به منظور محاسبات زمان پروژه، از روش زنجیره بحرانی استفاده شده است. همچنین هدف هزینه‌ای پروژه، حداقل‌سازی هزینه نهایی پروژه می‌باشد که شامل هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد. 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 و در نهایت هدف کیفیت در نظر گرفته شده برای این پروژه، حداکثرسازی کیفیت نحوه انجام فعالیت‌ها در پروژه می‌باشد. به منظور ارائه تابع هدف مسئله پیشنهادی ابتدا نمادگذاری مرتبط با آن ارائه می‌شود.

۴-۱- نمادگذاری

N : تعداد کل پروژه‌ها	**i= 1, 2, 3,…, N**
J : تعداد فعالیت‌های هر پروژه	j= 1, 2, 3,…, J
tij : زمان فعالیت j در پروژه i	j= 1, 2, 3,…, J , i= 1, 2, 3,…, N
K : منابع تجدید پذیر	k= 1, 2, 3,…, K
rijk : میزان منبع مورد نیاز k برای انجام فعالیت j در پروژه i	1, 2, 3,…, J , i= 1, 2, 3,…, N , j = k= 1, 2, 3,…, K
Ck : هزینه هر واحد منبع تجدید پذیر K	k = 1, 2, 3,…, K
P : منابع تجدید ناپذیر	p = 1, 2, 3,…, P
nrijp : میزان منبع مورد نیاز p برای انجام فعالیت j در پروژه i	p = 1, 2, 3,…, P, i = 1, 2, 3,…, N , j = 1, 2, 3,…, J
Cp : هزینه هر واحد منبع تجدید ناپذیر P	p = 1, 2, 3,…, P
Si : هزینه بالاسری به ازای هر روز در پروژه I	i = 1, 2, 3,…, N
EVij : ارزش فعالیت j در پروژه i	i = 1, 2, 3,…, N , j = 1, 2, 3,…, J
qij : شاخص کیفیت فعالیت j در پروژه i	i = 1, 2, 3,…, N , j = 1, 2, 3,…, J
EQVij : ارزش کیفی فعالیت j در پروژه i	i = 1, 2, 3,…, N , j = 1, 2, 3,…, J
Ee0 : زمان پایانی فعالیت مجازی پایانی	
PB : بافر پروژه	
T : زمان کلی پروژه از روش زنجیره بحرانی	
Rk : میزان منبع مصرف نشدنی در دسترس	k = 1, 2, 3,…, K
Tts : مجموع زمان فعالیت‌های زنجیره بحرانی	
U(T) : تابع مطلوبیت زمان	

U(C) : تابع مطلوبیت هزینه

U(Q) : تابع مطلوبیت کیفیت

αT : ضریب وزنی زمان

αC : ضریب وزنی هزینه

αQ : ضریب وزنی کیفیت

D : زمان مطلوب کل پروژه

Z : هزینه مطلوب کل پروژه

با توجه به تعریف نمادهای لازم، توابع هدف در نظر گرفته شده در ادامه نشان داده شده است:

$$\min T = E_{e_0} + PB \quad (۲)$$

$$\min C = \sum_{i=1}^{N}(\sum_{j=1}^{J}(\sum_{k=1}^{K} r_{ijk}C_k t_{ij} + \sum_{p=1}^{P} nr_{ijp}C_p)) + (S_i t_i)) \quad (۳)$$

$$\max Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij}} \times \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EQV_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij}} \times \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} EV_{ij} \times q_{ij} \quad (۴)$$

$$EQV_{ij} = EV_{ij} \times q_{ij} \quad (۵)$$

$$q_{ij} = \frac{\text{کیفیت واقعی فعالیت j}}{\text{کیفیت از پیش تعیین شده‌ی فعالیت j}} \times 100 \quad (۶)$$

ساختار شکست کار به سازمان‌دهی و برنامه‌ریزی کلیه مراحل پروژه کمک می‌کند. مدیریت پروژه و کلیه افرادی که در اجرای عملیات و مدیریت و کنترل هستند، در مراحل مختلف اجرای کار به اطلاعات دقیق و مفید نیاز دارند. یک ساختار شکست کار خوب طراحی‌شده، مبنایی برای تنظیم مناسب سیستم اطلاعاتی برای کنترل پروژه در اجرای عملیات را فراهم می‌کند.

۴-۲- تابع مطلوبیت مدل پیشنهادی

روشهای مختلفی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه وجود دارد. یکی از این روشها، استفاده از تابع مطلوبیت و حداکثرسازی مقدار مطلوبیت هر یک از توابع هدف به طور جداگانه می‌باشد و ترکیب آنها با استاده از یک ضریب وزنی می‌باشد.

$$u(T, C, Q) = \alpha_T . u(T) + \alpha_C . u(C) + \alpha_Q . u(Q) \quad (۷)$$

$$\alpha_T, \alpha_C, \alpha_Q \geq 0 \quad (۸)$$

$$\alpha_T + \alpha_C + \alpha_Q = 1 \quad (۹)$$

مقدار مطلوبیت زمان کل پروژه (D)، ۱ در نظر گرفته شد و تابع مطلوبیت زمان به صورت زیر ارائه شده است:

$$U(T) = \begin{cases} \varphi_T - \beta_T(T - D)^2 & T \epsilon [0.2D]^2 \\ 0 & T \notin [0.2D] \end{cases} \quad (۱۰)$$

مقدار مطلوبیت تابع هزینه نیز ۱ می‌باشد و تابع مطلوبیت هزینه به صورت زیر ارائه شده است:

$$U(C) = \begin{cases} \varphi_C - \beta_C(C - (1 - \eta).Z)^2 & C \epsilon [0.2(1 - \eta).Z]^2 \\ 0 & C \notin [0.2(1 - \eta).Z] \end{cases} \quad (۱۱)$$

مقدار مطلوبیت تابع کیفیت نیز ۱ می‌باشد و تابع مطلوبیت کیفیت به صورت زیر ارائه شده است:

$$U(Q) = \begin{cases} \varphi_Q - \beta_Q(Q-1)^2 & Q\epsilon(0,1) \\ 0 & Q \notin (0,1) \end{cases} \quad (۱۲)$$

۴-۳- مدل بهینه‌سازی چند هدفه

برای حل مسئله پیشنهادی، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شده است. با توجه به سه ویژگی زمان، هزینه و کیفیت که عمدتاً توسط سازمان‌ها و پیمانکاران مورد توجه قرار می‌گیرد، تابع مطلوبیتی برای این سه هدف ارائه شده است. بنابراین، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

$$O.F. = \max u(T, C, Q) \quad (۱۳)$$

s.t.

$$E_{ij} - E_{i(j-1)} \geq t_{ij} \quad (۱۴)$$

$$PB = \frac{T_{ts}}{2} \quad (۱۵)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} r_{ijk} \leq R_k \qquad \forall t \in T \quad (۱۶)$$

رابطه ۱۳، تابع هدف مسئله، که همان به حداکثر رساندن مطلوبیت بهینه‌سازی چند هدفه در زمانبندی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی با محدودیت منابع را نشان می‌دهد. رابطه ۱۴ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی پیش‌نیازی و پس‌نیازی در این پروژه است، که بیانگر آن است که فعالیت پس‌نیاز تا اتمام فعالیت‌های پیش‌نیاز جاری، نمی‌تواند اجرا شود و زمانی که یک فعالیت آغاز شود، به دلیل تداوم فعالیت، نمی‌تواند متوقف شود. رابطه ۱۵، نحوه‌ی محاسبه‌ی بافر پروژه را نشان می‌دهد و رابطه ۱۶ که نشان‌دهنده‌ی محدودیت منابع در این مدل می‌باشد، بیان می‌کند که مصرف یک منبع در فعالیت‌های اجرا شده در یک روز، نمی‌تواند از مقدار دردسترس آن منبع در آن روز تجاوز کند.

۵- طراحی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

۵-۱- نحوه تولید مسئله

در این تحقیق از روش بهینه‌سازی گروه ذرات به منظور بهینه‌سازی زمان‌بندی چند پروژه‌ای زنجیره بحرانی با محدودیت منابع استفاده شده است. در این مسئله با استفاده از این الگوریتم، به دنبال پیدا کردن بهترین توالی از فعالیت‌ها بوده، به طوری که بهترین مقدار مطلوبیت برآورده شود. همچنین با استفاده از این روش سعی شده از وقوع بهینه محلی خودداری گردد. به منظور حل مدل با استفاده از روش شبیه‌سازی گروه ذرات، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

تعداد کل تکرارها	maxit = 100
تعداد ذرات اولیه	npop = 100
فاکتورهای یادگیری	$\Gamma1$, $\Gamma2 = 2$

بازه‌ی تغییرات سرعت $0 < V < 1$

الگوریتم شبیه‌سازی گروه ذرات، ابتدا ذرات اولیه را که همان توالی انجام فعالیت‌ها می‌باشند، با توجه به روابط پیش‌نیازی تشکیل داده و سپس با توجه به محدودیت منابع، زمانبندی می‌کند. در انتها، زمانبندی‌ای از توالی فعالیت‌ها که بالاترین مطلوبیت را فراهم می‌کند، به عنوان برنامه‌ی زمانبندی مطلوب انتخاب می‌شود.

۵-۲- مثال نمونه

به منظور صحت و اعتبارسنجی مدل، یک مثال نمونه ارائه می‌گردد. در این مثال، سه پروژه به صورت همزمان برنامه‌ریزی شده‌اند که تعداد فعالیت‌های این ۳ پروژه به ترتیب برابر ۷، ۱۰ و ۸ می‌باشد. اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی هر یک از پروژه‌ها در زیر ارائه شده است:

پروژه ۱ : این پروژه شامل ۷ فعالیت بوده که روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها به صورت جدول شماره ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- روابط پیش‌نیازی پروژه ۱

نام فعالیت	زمان اجرای فعالیت	روابط پیش‌نیازی	منابع مصرفی					
			k1	k2	k3	k4	p1	p2
A1	۵	-	۰	۳	۱	۳	۹۰	۴۰
B1	۸	A1	۰	۶	۰	۵	۹۰	۱۰۰
C1	۹	A1	۱	۰	۶	۰	۱۰۰	۱۰
D1	۸	A1	۳	۱	۲	۳	۹۰	۰
E1	۶	B1-C1	۲	۲	۰	۳	۵۰	۱۰
F1	۱۲	D1	۰	۲	۲	۱	۹۰	۹۰
G1	۸	E1-F1	۵	۵	۰	۰	۲۰	۱۰

پروژه ۲ : این پروژه شامل ۱۰ فعالیت بوده که روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها به صورت جدول شماره ۲ ارائه شده است:

جدول ۲- روابط پیش‌نیازی پروژه ۲

نام فعالیت	زمان اجرای فعالیت	روابط پیش‌نیازی	منابع مصرفی					
			k1	k2	k3	k4	p1	p2
A1	۹	-	۲	۰	۴	۱	۴۰	۴۰
B1	۶	-	۲	۴	۲	۰	۸۰	۸۰
C1	۱۱	-	۱	۰	۵	۴	۳۰	۸۰
D1	۷	A2	۴	۶	۰	۱	۷۰	۲۰
E1	۸	B2	۲	۶	۱	۰	۹۰	۸۰
F1	۵	B2	۰	۳	۵	۰	۶۰	۱۰
G1	۸	C2	۱	۳	۶	۵	۹۰	۴۰
H1	۷	D2-E2	۰	۳	۳	۳	۳۰	۸۰
I1	۶	F2	۱	۱	۱	۶	۱۰۰	۹۰
J1	۷	G2	۳	۱	۳	۱	۱۰	۸۰

پروژه ۳ : این پروژه شامل ۸ فعالیت بوده که روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها به صورت جدول شماره ۳ ارائه شده است:

جدول ۳- روابط پیش‌نیازی پروژه ۳

نام فعالیت	زمان اجرای فعالیت	روابط پیش‌نیازی	منابع مصرفی					
			k1	k2	k3	k4	p1	p2
A1	۵	-	۴	۴	۵	۳	۶۰	۴۰
B1	۷	-	۲	۲	۲	۰	۸۰	۶۰
C1	۸	-	۱	۴	۰	۳	۵۰	۷۰
D1	۸	B3	۳	۰	۰	۲	۱۰۰	۷۰
E1	۷	B3	۰	۳	۴	۱	۷۰	۱۰
F1	۴	A3-D3	۳	۱	۰	۶	۱۲۰	۹۰
G1	۸	B3	۳	۳	۰	۲	۹۰	۷۰
H1	۶	C3-E3	۰	۳	۶	۲	۸۰	۸۰

در این تحقیق به منظور حل مدل بهینه‌سازی، از ۴ نوع منبع تجدیدپذیر و ۲ منبع تجدیدناپذیر استفاده شده است که هزینه‌ی هر واحد از این منابع به صورت زیر می‌باشد:

$C_k^1 = 30 \qquad C_k^2 = 50 \qquad C_k^3 = 45 \qquad C_k^4 = 40$

$C_p^1 = 5 \qquad C_p^2 = 3$

همچنین هزینه‌ی بالاسری به ازای هر روز از اجرای پروژه به صورت زیر می‌باشد :

$S_1 = S_2 = S_3 = 200$

همچنین مقدار محدودیت منابع برای منابع تجدیدپذیر، به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10$

از طرفی برای محاسبه‌ی تابع مطلوبیت، لازم است زمان، هزینه و کیفیت مطلوب از طرف متخصصین ارائه شود. بنابراین مقادیر مطلوب پیشنهادی برای سه ویژگی ذکر شده عبارتست از:

$D = 35\,,\ Z = 30000\,,\ Q = 1$

همچنین با توجه به مشخصه‌های هر هدف، ضریب وزنی برای هر کدام در نظر گرفته شده است که این ضرایب عبارتند از:

$\alpha_T = 0.6,\ \alpha_C = 0.3,\ \alpha_Q = 0.1$

پس از حل مثال نمونه با الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB نسخه‌ی R2014b، جواب مثال نمونه به صورت جدول ۴ بدست آمده است:

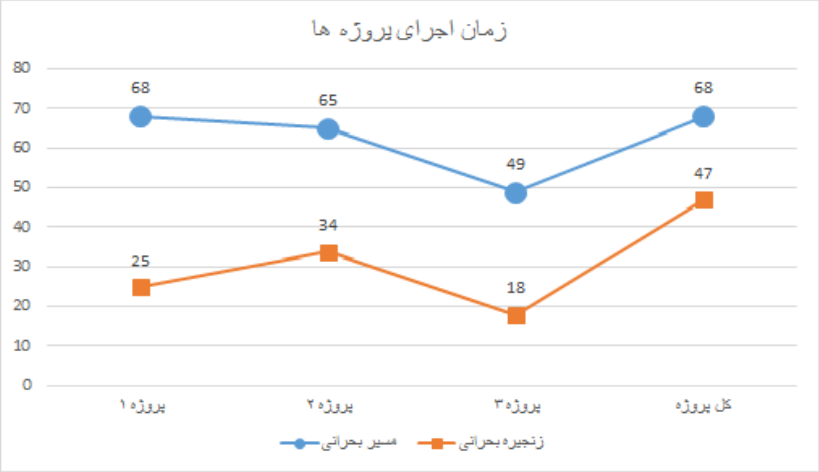
جدول ۴- میزان زمان، هزینه و کیفیت هر پروژه

	پروژه ۱	پروژه ۲	پروژه ۳	کل پروژه
زمان	۲۵	۳۴	۱۸	۴۷
هزینه	۱۸۰۹۵	۲۷۷۰۰	۱۷۹۱۵	۶۳۷۱۰
کیفیت	۰,۶۵۲	۰,۷۸۵۸	۰,۳۸۰۸	۰,۵۷۶۴
مطلوبیت	-	-	-	۰,۸۲۴۸۷

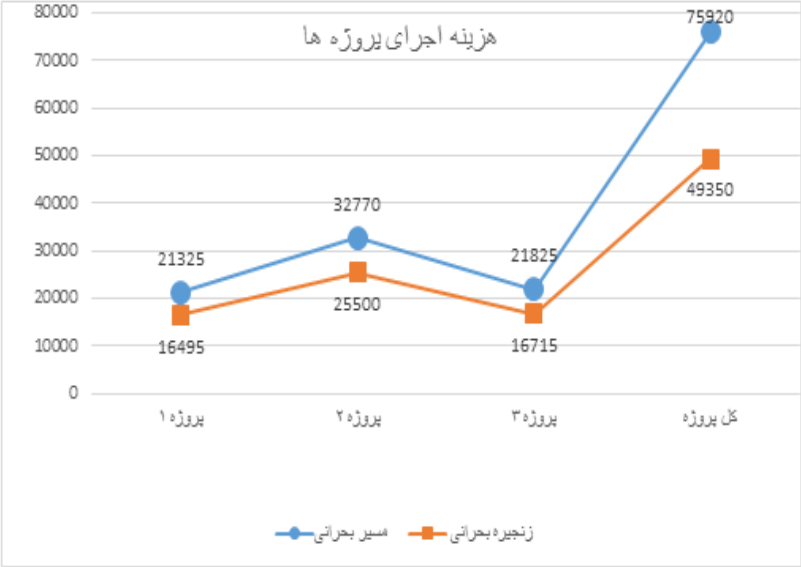
۶- نتایج محاسباتی

۶-۱- مقایسه با روش مسیر بحرانی[۷] و نرم‌افزار MSP

زمان ختمی که از زمانبندی با روش زنجیره بحرانی در اختیار مدیران پروژه قرار می‌گیرد، نسبت به زمانبندی به روش مسیر بحرانی، کوتاهتر می‌باشد. به منظور اثبات این گفته، مثال نمونه در نرم‌افزار MSP با روش مسیر بحرانی پیاده‌سازی شده و نتایج مقایسه آن با روش پیشنهادی این مطالعه در ادامه نشان داده شده است.



شکل ۱-مقایسه زمان اتمام پروژه‌ها در دو مدل زنجیره بحرانی و مسیر بحرانی



شکل ۲-مقایسه هزینه‌ی اتمام پروژه‌ها در دو مدل زنجیره بحرانی و مسیر بحرانی

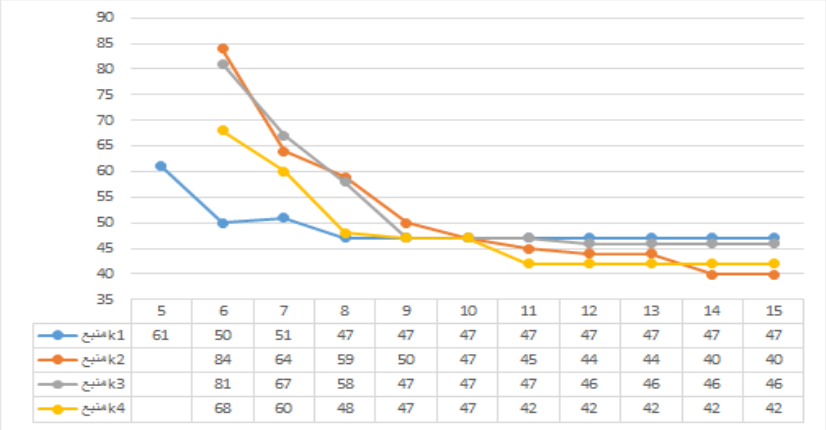
[7]- Critical Path Method (CPM)

با توجه به شکل‌های ۱ و ۲، مشخص است که مجموع اختلاف هزینه‌ی اجرای زیر پروژه‌ها، برابر با اختلاف هزینه‌ی کل اجرای پروژه در دو مدل زنجیره بحرانی و مسیر بحرانی است، ولی در مورد زمان اجرای پروژه، این مطلب صادق نیست. دلیل آن هم تفاوت رویکردهای زمانبندی (زمانبندی در زودترین زمان ممکن و زمانبندی در دیرترین زمان ممکن) بین این دو مدل است.

۶-۲- تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات محدودیت منابع

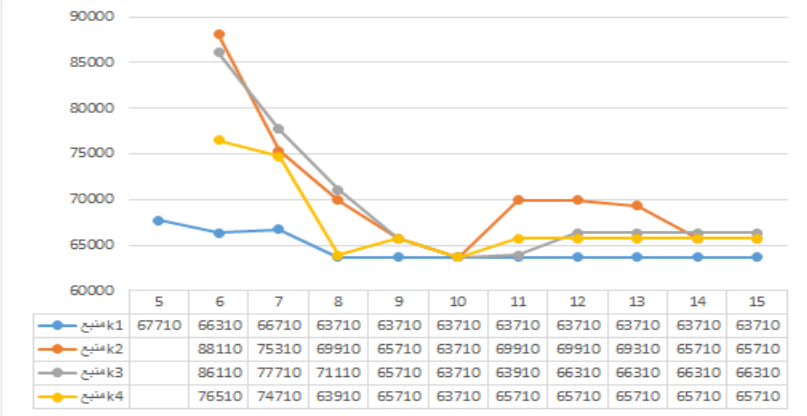
برای ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، حساسیت عملکرد این الگوریتم نسبت به مقادیر مختلف محدودیت، برای منابع تجدیدپذیر مثال نمونه، ارزیابی شده است. در این بخش، ابتدا محدودیت ۳ نوع از منابع را ثابت در نظر گرفته و اثر تغییرات محدودیت یکی از منابع بر روی پارامترهای خروجی، تحلیل می‌شود. باید توجه داشت که به دلیل عدم تاثیرگذاری تغییرات محدودیت منابع بر روی تابع کیفیت، مقدار این تابع برای تمام پروژه‌ها، ثابت و برابر در نظر گرفته می‌شود.

نمودارهای مربوط به هزینه‌ی نهایی پروژه و زمان اتمام پروژه براساس تغییر میزان در دسترس بودن منابع، در ادامه نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، شیب زیاد تغییرات نمودار منابع k2 و k3، نشان می‌دهد که این منابع بیشترین تاثیر را در زمان اجرای پروژه و هزینه‌ی اجرای پروژه داشته‌اند و دسترسی کمتر به این منابع در طول زمان اجرای پروژه، باعث ایجاد دیرکرد و هزینه‌ی بیشتر می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اجرای پروژه در زمان‌های کمتر، ممکن است باعث افزایش هزینه‌ی اجرای پروژه شود، چون ممکن است باعث شود زمان اجرای زیر پروژه‌ها، به دلیل زمانبندی موازی آن‌ها به منظور کاهش زمان کل پروژه، طولانی‌تر شود.



	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
منبعk1	61	50	51	47	47	47	47	47	47	47	47
منبعk2		84	64	59	50	47	45	44	44	40	40
منبعk3		81	67	58	47	47	47	46	46	46	46
منبعk4		68	60	48	47	47	42	42	42	42	42

شکل ۳- زمان اتمام پروژه با توجه به میزان در دسترس بودن منابع



	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
منبعk1	67710	66310	66710	63710	63710	63710	63710	63710	63710	63710	63710
منبعk2		88110	75310	69910	65710	63710	69910	69910	69310	65710	65710
منبعk3		86110	77710	71110	65710	63710	63910	66310	66310	66310	66310
منبعk4		76510	74710	63910	65710	63710	65710	65710	65710	65710	65710

شکل ۴ هزینه اتمام پروژه با توجه به میزان در دسترس بودن منابع

۶-۳- اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل پیشنهادی، مسئله نمونه اول که توسط الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات حل شده بود، بطور دقیق حل شده است. بدین منظور مدل ریاضی پیشنهادی در نرم افزار GAMS، پیاده‌سازی و حل مسئله نمونه انجام گرفته است. با توجه به مسئله نمونه اول، ۷ فعالیت وجود دارد که روابط پیش‌نیازی، زمان اجرا و میزان منبع مصرفی هر یک از آنها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین میزان زمان، هزینه و کیفیت مطلوب به شرح جدول ۵ می‌باشد. هزینه غیر مستقیم بازای هر روز نیز ۲۰۰ واحد پولی در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- مقدار مطلوب توابع هدف

تابع هدف	مقدار مطلوب
زمان	۳۵
هزینه	۱۰۰۰۰
کیفیت	۱

این مسئله در نرم افزار GAMS در مدت زمان کمتر از یک ثانیه حل شده است. جوابی که منجربه بیشترین مطلوبیت شده است در جدول ۶ گزارش شده است.

جدول ۶- خروجی بدست آمده از حل دقیق

تابع	مقدار
زمان	۳۵
هزینه	۱۶۴۹۵
کیفیت	۰,۹۱
مطلوبیت	۰,۸۱

همچنین خروجی بدست آمده از حل این مسئله توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در جدول ۷ گزارش شده است.

جدول ۷-خروجی بدست آمده از الگوریتم PSO

تابع	مقدار
زمان	۳۵
هزینه	۱۶۴۹۵
کیفیت	۰,۸۸
مطلوبیت	۰,۸۰

از مقایسه خروجی‌های بدست آمده دو جدول ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی، عملکرد صحیح و مناسبی داشته است چراکه مقادیر مشابهی نسبت به حل دقیق داشته است.

۶-۴-حل مثال در زمینه پروژه‌های ساخت

در این بخش به حل یک مثال در زمینه پروژه‌های ساخت پرداخته شده است. بدین منظور یک شرکت عمرانی را در نظر گرفته که شامل سه پروژه شامل یک پل رودخانه‌ای و پل روگذر و یک پروژه راهسازی می‌باشد که اطلاعات مربوط به هر یک از پروژه‌ها در ادامه آمده است:

پروژه اول: پروژه اول شامل پلی به دهانه ۵۹ متر می‌باشد که بر روی رودخانه احداث می‌گردد. این پل شامل ۱۸ شمع با ارتفاع ۲۰ متر می‌باشد. این پل شامل ۳ فونداسیون، ۳ کوله و ۳ دیوار برگشتی می‌باشد. ابعاد فونداسیون این پل ۲*۱۱*۱۱ و ابعاد دیوارهای برگشتی ۱۱*۴*۲ می‌باشد.

پروژه دوم: پروژه دوم شامل یک پل روگذر بوده که طول پل ۱۰۰ متر و طول رمپ مربوط به آن نیز ۱۰۰ متر می‌باشد. این پل شامل ۷ فونداسیون به ابعاد ۲*۱۰*۲۰، ۴ دیوار برگشتی، ۲ رمپ خاکی، ۴۲ شمع به ارتفاع ۲۵ متر و ۷ دهانه که در هر دهانه دو ستون قرار گرفته است.

پروژه سوم: پروژه سوم شامل یک پروژه راهسازی به طول ۳ کیلومتر و عرض راه ۳۰ متر و تعداد ۳۰ آبرو می‌باشد.

در این مثال از ۶ منبع تجدید پذیر و ۳ منبع تجدید ناپذیر استفاده شده است که نام هر یک از این منابع و هزینه در نظر گرفته شده برای این منابع در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸-منابع در نظر گرفته شده و هزینه این منابع(میلیون تومان)

پارامتر ورودی	منابع	شماره منبع	نوع منبع	هزینه منابع
C_K	ماشین آلات معمولی(کامیون، بیل مکانیکی، میکسر، غلطک، گریدر، بولدوزر، لودر)	۱	تجدیدپذیر	۰,۴
	دستگاه بتن‌ساز	۲	تجدیدپذیر	۲,۵
	جرثقیل	۳	تجدیدپذیر	۰,۶
	دستگاه حفار	۴	تجدیدپذیر	۶
	کارگر ساده	۵	تجدیدپذیر	۰,۱۲
	کارگر ماهر	۶	تجدیدپذیر	۰,۲۶
C_P	سیمان و شن و ماسه(هر تن)	۷	تجدیدناپذیر	۰,۰۵
	آهن آلات(هر تن)	۸	تجدیدناپذیر	۳,۵
	مواد افزودنی(هر لیتر)	۹	تجدیدناپذیر	۰,۰۰۸

اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها، روابط پیش‌نیازی و مقدار زمان و منابع مورد نیاز هر فعالیت در هر یک از پروژه‌ها نیز در ادامه در جداول ۹ تا ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۹-اطلاعات مربوط به زمان و منابع مربوط به فعالیت‌های پروژه ۱

	فعالیت‌ها	رابطه پیش-نیازی	زمان	منابع							
				۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	بسترسازی	-	۱۲	۲	-	-	-	۸	۲	۲۰	-	-
۲	سبدبافی	-	۲۵	-	-	۱	-	۱۰	۵	-	۷۲	-
۳	حفاری	۱ و ۲	۵	۶	-	-	۳	۶	-	-	-	-
۴	جایگذاری شمع	۳	۵	-	-	۳	-	۶	۳	-	-	-
۵	بتن‌ریزی شمع	۴	۵	۶	۳	۶	-	۶	۳	۹۹۳	-	۳۶۰
۶	تخریب سرشمع	۵	۷	۱	-	-	-	۱	۱	-	-	-
۷	اجرای سرشمع	۶	۱۲	۴	۲	۲	-	۱۰	۶	۱۲۹۶	۷۵	۱۹۰
۸	اجرای کوله	۷	۲۰	۴	۲	۲	-	۱۰	۶	۶۹۱	۵۰	۲۵۰
۹	سنگ‌ریزی پشت کوله	۸	۶	۸	-	-	-	۴	۲	-	-	-
۱۰	ساخت و نصب عرشه	۸	۴۰	-	-	۶	-	۶	۳۰	-	۸۰۰	-
۱۱	قالب‌بندی عرشه	۱۰	۷	-	-	۱	-	۳	۱۰	-	-	-
۱۲	بتن‌ریزی عرشه	۱۱	۳	۳	۱	۱	-	۵	۲	۱۹۸	۱۰	۲۰۰
۱۳	قالب‌برداری	۱۲	۵	-	-	۱	-	۵	۲	-	-	-
۱۴	آسفالت	۱۳	۱۱	-	-	۱	-	۳	۱	-	-	-
۱۵	کارهای متفرقه	۱۴	۱۲	-	-	۲	-	۱۰	۲۰	-	۱۴	-

جدول ۱۰-اطلاعات مربوط به زمان و منابع مربوط به فعالیت‌های پروژه ۲

	فعالیت	رابطه پیش‌نیازی	زمان	منابع								
				۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	تجهیز کارگاه	-	۱۲	۶	-	-	-	۲۰	۶	۵۰	۲	-
۲	سبدبافی	-	۳۵	-	-	۱	-	۵	۱۰	-	۱۶۸	-
۳	حفاری شمع	۱ و ۲	۱۵	۶	-	-	۳	۶	۳	-	-	-
۴	بتن‌ریزی شمع	۳	۴۲	۲	۱	۲	-	۲	۱	۲۹۲۳	۲۱۰	۳۳۶۰
۵	تخریب سرشمع	۴	۶	۲	-	-	-	۲	۲	-	-	-
۶	اجرای فونداسیون	۵	۷۰	۳	۱	۱	-	۵	۱۰	۴۶۷	۲۴۵	۸۱۲۰
۷	اجرای ستون	۶	۱۲	-	۳	۳	-	۱۵	۳۰	۲۴۰	۷۰	۲۸۰
۸	اجرای دیواره	۷	۳۸	۶	۲	۲	-	۲۰	۲۰	۵۰۰	۱۸۰	۵۰۰
۹	اجرای سرستون	۸	۱۲	۴	۲	۲	-	۱۰	۲۰	۸۰	۴۰	۱۵۰
۱۰	خاکریزی رمپ	۷	۳۵	۱۵	-	-	-	-	۶	-	-	-
۱۱	اجرای تابلیه	۷	۱۲۰	۵	۱	۲	-	۱۰	۲۰	۷۲۰۰	۵۰۰	۸۰۰۰
۱۲	اجرای آسفالت	۹ و ۱۱	۴	۱۰	-	-	-	۴	۴	-	-	-
۱۳	کارهای متفرقه	۱۲	۱۴	۲	-	۲	-	۱۲	۱۰	-	۴۵	-

جدول ۱۱-اطلاعات مربوط به زمان و منابع مربوط به فعالیت‌های پروژه ۳

	فعالیت	رابطه پیش‌نیازی	زمان	منابع								
				۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	تجهیز کارگاه	-	۲۵	۲۰	-	۲	-	۲۰	۱۰	۱۰۰	۲۰	-
۲	بسترسازی	-	۶۰	۱۰	-	۲	-	۴	۴	-	-	-
۳	اجرای آبرو	۱ و ۲	۱۲۰	۳	۱	۱	-	۱۰	۱۰	۷۵۰	۴۰۰	-
۴	اجرای راکفیلد	۳	۴۰	۳۳	-	-	-	۷	۱۷	-	-	-
۵	اجرای زیر اساس	۴	۶۰	۲۰	-	-	-	۱۰	۱۰	-	-	-
۶	اجرای اساس	۵	۷۰	۲۰	-	-	-	۱۰	۱۰	-	-	-
۷	اجرای آسفالت	۶	۲۰	۲۰	-	-	-	۱۰	۱۰	-	-	-
۸	کارهای متفرقه	۷	۳۰	۲	۱	۱	-	۱۰	۱۰	۳۰	۲۰	-

همچنین میزان زمان، هزینه و کیفیت مطلوب در نظر گرفته شده به شرح جدول ۱۲ می‌باشد. هزینه غیر مستقیم بازای هر روز نیز ۲۰۰ واحد پولی در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب وزنی سه تابع مطلوبیت زمان، هزینه و کیفیت به ترتیب معادل ۰,۳، ۰,۴ و ۰,۳ می‌باشد.

جدول۱۲- مقدار مطلوب توابع هدف

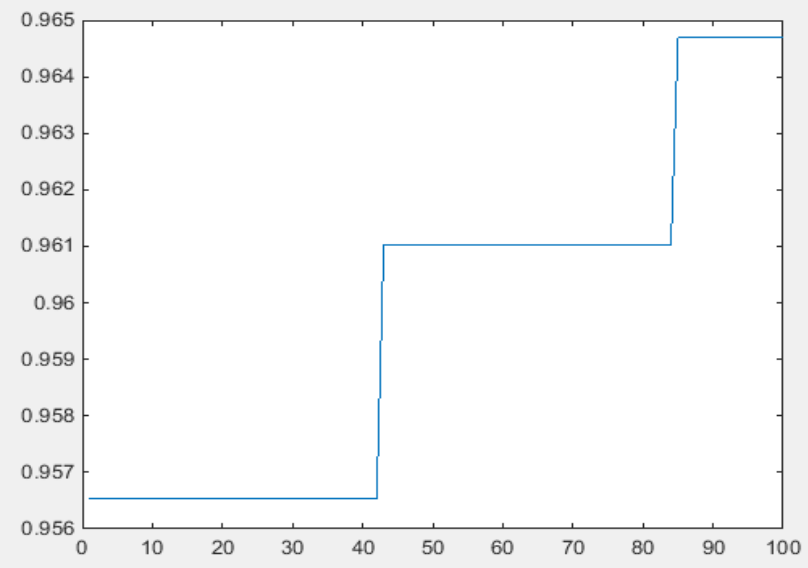
تابع هدف	مقدار مطلوب
زمان	۱۵۰
هزینه	۴۰۰۰۰
کیفیت	۱

مطالعه موردی فوق در نرم افزار MATLAB پیاده‌سازی شده و توسط الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات پیشنهادی حل شده است. خروجی‌های بدست آمده از حل مدل در مطالعه موردی مطابق جدول ۱۳ می‌باشد.

جدول ۱۳- خروجی بدست آمده از حل مطالعه موردی

تابع	مقدار
زمان	۱۳۸
هزینه	۳۴۵۱۰
کیفیت	۰,۷۰
مطلوبیت	۰,۹۶

روند تغییرات مقدار مطلبویت بازای تعداد تکرار در الگوریتم فراابتکاری در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود با افزایش تعداد تکرار، مقدار مطلوبیت افزایش یافته است که این امر عملکرد خوب الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات را بیان می‌نماید.



شکل ۵- روند تغییرات مقدار مطلوبیت به ازای تکرارهای مختلف

۷- نتیجه‌گیری

پس از بررسی و آنالیز مقادیر بدست آمده، خلاصه نتایج به شرح زیر حاصل شده است:

۱- بعد از انجام آنالیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، بعد از انجام ۳۰۰ تکرار، بهترین هزینه‌ی اجرای کل پروژه معادل ۶۳۷۱۰ واحد، بهترین زمان اجرای این پروژه ۴۷ روز و بهترین شاخص کیفی در کل پروژه معادل ۰,۵۷۶۴ می‌باشد.

۲- زمان اجرای کل پروژه در روش مسیر بحرانی به میزان ۲۱ روز طولانی‌تر و هزینه‌ی اجرای کل پروژه نیز ۲۵۹۷۰ واحد (۵۲,۵۶ ٪) بیشتر از روش زنجیره بحرانی می‌باشد.

۳- زمان اجرای کل پروژه با توجه به تغییرات میزان دسترسی منبع k1، زمان اجرای کل پروژه بین ۴۷ تا ۶۱ روز و هزینه‌ی اجرای کل پروژه بین ۶۳۷۱۰ تا ۶۷۷۱۰ (تغییر ۶,۱ درصدی) تغییر می‌کنند.

۴- زمان اجرای کل پروژه با توجه به تغییرات میزان دسترسی منبع k2، زمان اجرای کل پروژه بین ۴۰ تا ۸۴ روز و هزینه‌ی اجرای کل پروژه بین ۶۵۷۱۰ تا ۸۸۱۱۰ (تغییر ۲۵,۴۳ درصدی) تغییر می‌کنند.

۵- زمان اجرای کل پروژه با توجه به تغییرات میزان دسترسی منبع k3، زمان اجرای کل پروژه بین ۴۶ تا ۸۱ روز و هزینه‌ی اجرای کل پروژه بین ۶۶۳۱۰ تا ۸۶۱۱۰ (تغییر ۲۳ درصدی) تغییر می‌کنند.

۶- زمان اجرای کل پروژه با توجه به تغییرات میزان دسترسی منبع k4، زمان اجرای کل پروژه بین ۴۲ تا ۶۸ روز و هزینه‌ی اجرای کل پروژه بین ۶۵۷۱۰ تا ۷۶۵۱۰ (تغییر ۱۴,۱درصدی) تغییر می‌کنند.

۷- با توجه به نتایج بدست آمده، منبع k2، بیشترین تغییرات را در زمان و هزینه‌ی اجرای پروژه، با توجه به دسترسی منبع در طول اجرا، داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که این منبع، تاثیرگذارترین منبع بر زمان‌بندی اجرای پروژه است. میزان دسترسی بیشتر این منبع، می‌تواند بیشترین تاثیر را از نظر زمانی و مالی بر روی اجرای پروژه بگذارد.

با توجه به پیچیدگی مبحث برنامه‌ریزی پروژه با محدودیت منابع، 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، پروژه‌های تعریف شده، دارای اهمیت یکسانی می‌باشند، در حالیکه می‌تواند اینچنین نباشند. از سوی دیگر، در این تحقیق پارامترهای ورودی مسئله مانند زمان، هزینه و کیفیت هر فعالیت، ثابت و از پیش مشخص شده می‌باشد، در حالیکه در دنیای واقعی می‌تواند غیر قطعی باشد. همچنین این تحقیق به حل مدل با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری پرداخته است. 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، می‌توان به تابع هدف انحراف از منابع در دسترس و ارزش فعلی جریانات نقدی اشاره نمود. همچنین به منظور واقعی‌تر کردن مدل پیشنهادی، می‌توان ضرایب اهمیت گوناگونی را برای پروژه‌ها در نظر گرفت. در نهایت رویکردهای گوناگونی را همانند رویکرد تئوری فازی و مدل‌های تصادفی می‌توان برای اعمال عدم قطعیت مسئله استفاده نمود و به منظور استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری رقابت استعماری، کلونی زنبور عسل، کلونی مورچه و الگوریتم‌های دیگر استفاده کرد.

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]. Singh, A, (2013), "Resource Constrained Multi-Project Scheduling with Priority Rules & Analytic Hierarchy Process", 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Zadar, Crotia.

[19]. Shou, Y, Xiang, W, Li, Y, Yao, W, (2013), "A multi-agent evolutionary algorithm for the resource-constrained project portfolio selection and scheduling problem", Conference: Proceedings of the 15th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation, Amesterdam, Netherland.

[20]. Blazewicz, J, Lenstra, J, Rinnooy Kan, A. (1983), "Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity", Discrete Applied Mathematics, Vol 5, No 1, 11–24, Doi: 10.1016/0166-218X(83)90012-4.

[21]. Chen, T. and Zhou, G., (2013), "Research on project scheduling problem with resource constraints.", Journal of Software, Vol. 8, No. 8, pp. 2058-2063, Doi: 10.4304/jsw.8.8.2058-2063.

[22].Gonzalez-Pardo, A. and Camacho, D. (2014). "A new CSP graph-based representation to resource-constrained project scheduling problem." 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, pp. 344-351, DOI: 10.1109/CEC.2014.6900543.

[23].Giran, O, Temur, R, Bekdas, G, (2017), "Resource Constrained Project Scheduling by Harmony Search Algorithm", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 21, No 2, pp. 479-487, Doi: 10.1007/s12205-017-1363-6.

[24]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2017a), "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.

[25]. 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.

[26]. 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.

[27]. 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.
[28]. 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.
[29]. Abdul Razaque, Bach,C, Salama, N, Alotaibi, A, (2012) " Fostering Project Scheduling and Controlling Risk Managemen", International Journal of Business and Social Science, Vol. 3, No. 14, 118-127.
[30]. Huang, C,L, Chen, H,C, Li, R,K, Tsai, C,H, (2012) " A Comparative Study of the Critical Chain and PERT Planning Methods: No Bad Human Behaviors Involved", International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, Vol. 2, No. 8, 379-394.
[31]. Pawiński, G, Sapiecha, K, (2012), "Resource Allocation Optimization in Critical Chain Method",Annales UMCS Informatica, AI XII, 1 ,17–29.
[32]. Georgy, M,E, Marzook, A,A, Ibrahim, M,E, (2013) "Applicability of Critical Chain Scheduling in Construction Projects: An Investigation in the Middle East", The 19th Cib World Building Congress, Queensland University of Technology, 1-13.
[33]. Tulasi, CH, Rao,A.R, (2014) "Multi-Objective Resource Constrained Project Scheduling Using Critical Chain Project Management Approach", International Journal of Innovative Research in Science,Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 7, 14345-14352
[34]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Hematian, M, Kordi, H, (2017b), "Optimization of Time and Costs in Critical Chain Method Using Genetic Algorithm ", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol 12, No 4, 871-876, Doi: 10.3923/jeasci.2017.871.876.
[35]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2018), "Time-Cost-Quality trade off in critical chain with multi-mode activities by using multio objective particle swarm optimization", Journal of Structural and Construction Engineering, Doi**:** 10.22065/JSCE.2017.92752.1265 (in Persian)
[36]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2018), "Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints", *KSCE Journal of Civil Engineering* (in press)
[37]. Roghanian, E, Alipour, M, Rezaei, M., (2018), "An improved fuzzy critical chain approach in order to face uncertainty in project scheduling", *International Journal of Construction Management*, Vol. 18, No. 1, 1-13.
[38]. Blazewicz, J., Lenstra, J., Rinnooy Kan, A., (1983), "Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity", *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 5, 11–24.
[39]. K.E. Parsopoulos, and M.N. Vrahatis, (2002), "Recent Approach to Global Optimization Problems through Particle Swarm Optimization", *Neural Copmuting*, Vol. 1, No. 2-3, 235-306.