نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ۳، سال ۱۳۹۸، صفحه ۴۱ تا ۵۶

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

ارائه روش حل دقیق و فراابتکاری برای مسئله کمینه سازی زمان تکمیل پروژه با در نظر گرفتن محدودیت بودجه

ایرج مهدوی [۱*]، میلاد همتیان [۲]، محمدجواد طاهری امیری [۳]، امید قناعت [۴]

۱- استاد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
۲- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران ، بابل، ایران
۳- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۴-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در مدیریت پروژه های عمرانی، مدیریت زمان و هزینه است. امروزه دیدگاه های سنتی به تنهایی قادر به پاسخگویی نیازهای این عرصه نیست. بنابراین استفاده از رویکردهای نوین مدیریتی می‌تواند تا حد زیادی راه‌گشا باشد. زمان و هزینه پروژه جزء اهداف مهم هر پروژه می‌باشند. موازنه هزینه و زمان از جمله مباحث مهم در برنامه ریزی و کنترل پروژه ها است و هدف از حل این مساله در واقع تحلیل رفتار متقابل انواع گوناگون هزینه های پروژه و زمان اجرای پروژه می باشد. در این مطالعه مسئله موازنه زمان و هزینه زمانبندی پروژه در شرایط محدودیت بودجه بررسی شده است. بدین منظور یک الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک برای پیدا کردن بهینه اقدامات اصلاحی در نرم افزار MATLAB پیاده سازی و توسعه داده شد. تحلیل حساسیت زمان تکمیل پروژه نسبت به سطوح بودجه مختلف انجام گرفت. همچنین متوسط زمان حل مسئله نمونه بازای سطوح مختلف محاسبه و گزارش گردید. در نهایت برای اعتبارسنجی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی، مسئله بطور دقیق توسط نرم افزار GAMS حل گردیده و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قابلیت حل مسئله بطور دقیق را داشته است چرا که فاصله بین جواب مسائل نمونه در سطوح بودجه مختلف برابر صفر بوده است. علاوه بر این، با ارائه چند مثال نمونه دیگر در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ، میزان توانایی حل مسائل به طور دقیق و صحت الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، مورد بررسی قرار گرفت. خروجی بدست آمده حاکی از یکسان بودن جواب حاصل از دو روش در ابعاد کوچک بود است. همچنین مشاهده شده امکان حل دقیق مسائل در ابعاد بزرگ وجود نداشته و صرفا با استفاده از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی قابل حل می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدیریت پروژه، مدیریت زمان و هزینه، الگوریتم‌های فراابتکاری، محدودیت بودجه

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2018.104864.1377
۱۳۹۶/۰۸/۱۵	۱۳۹۶/۱۲/۰۹	۱۳۹۷/۰۲/۰۸	۱۳۹۷/۰۲/۰۸	۱۳۹۸/۰۹/۰۱	doi: 10.22065/JSCE.2018.104864.1377

*نویسنده مسئول: ایرج مهدوی
پست الکترونیکی: irajarash@rediffmail.com

Presentation of Exact and Metaheurestic Solution Method for Minimization Project Completion Time with Considering Budget Constraint Problem

Iraj Mahdavi [1*], Milad Hematian [2], Mohammad Javad Taheri Amiri [3] ,Omid Ghenaat [4]

1-Proffessor, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

2-Ph.D. Student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

3- Ph.D. Student in Engineering and Construction Management, Department of Civil Engineering, Babol University of technology, Babol, Iran

4-M.Sc. Student in Engineering and Construction Management, Department of Civil Engineering, Sari branch, Islamic Azad University, Sari, Iran

ABSTRACT

Project planning and scheduling are one of the most important issues in construction engineering and management. It is being crucial to progress developed countries. One of the major challenges in construction project management is time and cost management. The traditional view lonely is not able to meet the needs of this field. Therefore, the use of modern management approaches can be greatly helpful. Time and cost are among the important objectives of each project. Cost and time trade-off is among the major important issues in projects planning and control and the main of solving this problem is actually analysis of interaction of different types of project costs and time of the project. In this paper, a time and cost trade off project scheduling problem under budget constraint is studied. For this purpose, a meta-heuristic genetic algorithm is developed to find the optimal solution in MATLAB. Completion time sensitivity analysis is done according to different budget level. In order to validate proposed algorithm, problem is solved by GAMS and the outputs between them are compared. The results show that proposed meta heuristic algorithm is able to solve problem optimally so that differences between samples solution were zero in different budget level. In addition, by providing some other examples of small, medium and large dimensions, the ability to solve problems accurately and the accuracy of the proposed genetic algorithm was examined. The output obtained showed that the solution was the same in two methods in small dimensions. Also, it is not possible to solve the exact problems in large dimensions and can only be solved using the proposed meta heuristic algorithm.

ARTICLE INFO

Received: 06/11/2017
Revised: 28/02/2018
Accepted: 28/04/2018

Keywords:
Project management,
Time and Cost management,
Metaheurestic algorithm,
Budget constraint.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.104864.1377

*Corresponding author: Iraj Mahdavi
Email address: irajarash@rediffmail.com

۱- مقدمه

امروزه با توجه به وسعت و پیچیدگی پروژه‌ها، بدون داشتن برنامه‌ریزی، امکان رسیدن به اهداف پروژه امری بعید به نظر می‌رسد. یکی از بخش‌های مهم مدیریت پروژه، هنر ارزیابی، برنامه‌ریزی و نظارت بر پروژه‌هاست. هدف از مدیریت پروژه، زمانبندی عملکردی و فنی پروژه به منظور کسب بهترین محصول با کمترین هزینه در کوتاهترین زمان است. لذا روند برنامه‌ریزی یکی از مهمترین اصول در موفقیت پروژه‌های ساخت می‌باشد[۱]. بطور کلی مدیریت و برنامه‌ریزی اجرایی فعالیت‌ها و استفاده از منابع مورد نیاز در یک پروژه، نیازمند تحلیل-های متنوعی است که یکی از آنها، مدلسازی جهت انتخاب صحیح هزینه و زمان انجام پروژه است. این مسأله کمک شایانی به مدیریت بهینه پروژه و تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی خواهد نمود. در فضایی که رقابت شرکتها روز به روز نزدیکتر می‌شود و تفاوتهای کوچک در ارائه قیمت در مناقصه‌ها منجر به توفیق یا شکست در مناقصه می‌شود، ارائه برنامه‌ای که منطبق با واقعیت باشد و بتواند تمام واقعیتهای اقتصادی را در مدل یک پروژه منظور کند، حائز اهمیت زیادی است. این اهمیت نه تنها در ارائه قیمت برای یک پروژه پیش از شروع اجراست، بلکه پس از شروع به کار نیز، وجود یک برنامه زمانبندی انعطاف‌پذیر می‌تواند به یک شرکت در مواجهه با انواع مشکلات که بسیاری اوقات، خارج از حیطه اختیار آن است، یاری برساند. یک برنامه انعطافپذیر این قابلیت را دارد که با استفاده از ارتباط بین هزینه و زمان در یک پروژه، تغییرات لازم را در هزینه و زمان در نظر بگیرد و راه‌حلهای مناسب گوناگون را در اختیار کاربران قرار دهد تا بتوانند قبل از اجرای پروژه، برآورد مناسبی از زمان و هزینه اجرایی در پروژه را داشته باشند.

با پیچیده‌تر شدن پروژه‌ها و روابط بین فعالیت‌های آنها، مدیریت منابع پروژه نیز از اهمیت بیشتری برخوردار گردیده و لزوم مطالعات و پژوهش‌های علمی پیرامون نحوه تخصیص منابع در پروژه بیش از پیش آشکار می‌گردد. یکی از منابع بسیار مهم در پروژه‌ها بودجه می‌باشد[۲]. در این تحقیق به بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه‌ها در شرایط محدودیت بودجه پرداخته شده است.

۲- مرور ادبیات

آزارون و همکاران در سال ۲۰۰۵ یک مدل چند هدفه برای موازنه زمان- هزینه در شبکه PERT ارائه دادند. در این مسئله زمان فعالیت‌ها از توزیع ارلنگ پیروی می‌کند. برای حل مسئله، یک الگوریتم ژنتیک ارائه داده شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با نتایج روش تقریبی انجام گرفته در مطالعات قبلی مقایسه گردید که نشان‌دهنده کارایی این روش در حل مسائل موازنه زمان-هزینه در شبکه‌های PERT می‌باشد[۳].

آزارون و توکلی مقدم در سال ۲۰۰۷ یک مدل چندهدفه موازنه زمان-هزینه در شبکه‌های PERT را با استفاده از یک رویکرد تعاملی بررسی نمودند. در این مطالعه زمان فعالیت‌ها از توزیع نمایی پیروی می‌کند. در گام اول شبکه PERT به شبکه تصادفی تبدیل گردیده و سپس توزیع زمان ختم پروژه از طریق زنجیره مارکوف محاسبه می‌شود. در گام دوم، مسئله موازنه زمان-هزینه به صورت یک مسئله چند هدفه که شامل ۴ هدف مختلف می‌باشد، فرمول‌بندی می‌شود. سپس با استفاده از رویکرد تعاملی مسئله را حل نمودند[۴].

هازیر و همکاران در سال ۲۰۱۰ مسئله موازنه زمان-هزینه را با توجه به محدودیت بودجه بررسی نمودند، در این مسئله فعالیت-های پروژه به صورت چند حالته بوده و تابع هدف آن شامل حداقل‌سازی زمان تکمیل پروژه است، طوریکه محدودیت‌های پیش‌نیازی و بودجه برطرف گردد. برای حل مسئله یک الگوریتم دقیق مبتنی بر تجزیه بندرز ارائه شده است. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی و حل مسئله در ابعاد بزرگ می‌باشد[۵].

هازیر و همکاران در سال ۲۰۱۰ مسئله موازنه زمان-هزینه 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 حل مسائل نمونه بررسی گردید. میزان کارایی رویکرد پیشنهادی، از طریق حل دیگر مسائل پایدار مانند جریمه دیرکرد و پاداش زودکرد بررسی گردید[۶].

آناگنوستوپلوس و کورسیکاس در سال ۲۰۱۰ برای حداقل‌سازی هزینه کل مسئله موازنه زمان-هزینه یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه دادند. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، دو فاکتور کیفیت جواب و زمان محاسباتی در نظر گرفته شده است. نتایج محاسباتی

نشان‌دهنده تکنیک ارائه شده برای حل مسائل در شرایط واقعی می‌باشد[۷]. چن و تسای در سال ۲۰۱۱ مسئله موازنه زمان-هزینه شبکه پروژه را در محیط فازی بررسی نمود. برای تعیین حدود بالا و پایین هزینه کل فازی، از برنامه‌ریزی ریاضی دوسطحی استفاده شده است. با تعیین مقادیر مختلف α، تابع عضویت هزینه کل فازی و زمان بهینه هر فعالیت بدست می‌آید. برای اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی، مسئله موازنه زمان-هزینه با چند پارامتر فازی حل گردید[۸].

سونمز و بتمیر در سال ۲۰۱۲ یک الگوریتم زنتیک ترکیبی برای مسئله زمان-هزینه ارائه دادند. این الگوریتم ترکیبی شامل الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم تپه‌نوردی و الگوریتم ژنتیک می‌باشد. مسائل نمونه استاندارد، با تعداد فعالیت‌های بین ۱۸ تا ۶۳۰ به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم، حل گردیدند. نتایج تحلیل عملکرد، نشان‌دهنده، کارایی بالای الگوریتم ژنتیک ترکیبی توسعه داده شده می‌باشد[۹].

کلانشک و سوندر در سال ۲۰۱۲ یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مسئله موازنه زمان-هزینه غیرخطی ارائه دادند. در این مطالعه، روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های مختلف پروژه، محدودیت‌های زمان پروژه و محدودیت بودجه، در نظر گرفته شده است. تابع هدف مسئله، حداقل‌سازی هزینه کل پروژه و یافتن منحنی‌های زمان-هزینه بهینه پروژه می‌باشد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که مدل ریاضی پیشنهادی، قابلیت حل مسئله به صورت دقیق را دارد[۱۰].

که و ما در سال ۲۰۱۴، مسئله موازنه زمان-هزینه را در محیط فازی مدلسازی نمودند. بدین منظور، سه مدل موازنه زمان-هزینه با توجه به تئوری فازی ارائه گردید. همچنین در این مطالعه، برای توسعه روش جستجو، از تکنیک‌های شبیه‌سازی فازی و الگوریتم زنتیک استفاده شده است. در انتها، برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی مثال‌های متعددی حل گردید[۱۱].

حسامی و مولایی در سال ۱۳۹۳ به بررسی مسئله زمان-هزینه در پروژه‌های راهسازی براساس تفکر ناب با حذف اتلاف‌ها پرداختند. در این تحقیق به منظور حل مدل از روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب و همچنین رویکرد فازی بدلیل وجود عدم قطعیت‌های موجود در پروژه استفاده شده است[۱۲].

از آنجایی که تحقیقات انجام شده در مسئله موازنه زمان-هزینه بیشتر در حل مسائل با ابعاد کوچک می‌باشد، امین بخش و سونمز در سال ۲۰۱۶، این مسئله را در ابعاد بزرگ مورد بررسی قرار دادند، بدین منظور یک الگوریتم انبوه ذرات ارائه گردیده است. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده کیفیت بالا و زمان محاسباتی مناسب الگوریتم پیشنهادی برای رسیدن به جواب می‌باشد[۱۳].

طاهری امیری و همکاران در سال ۲۰۱۷ 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[۱۴].

طاهری امیری و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مقاله دیگری به حل مسئله برنامه‌ریزی چند پروژه‌ای موازنه زمان-هزینه-کیفیت با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید پرداخته‌اند. 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[۱۵].

طاهری امیری و همکاران در سال 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[۱۶].

طاهری امیری و همکاران در سال ۲۰۱۸ مسئله موازنه زمان-هزینه را در شرایط محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم بهینه-سازی 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[۱۷].

با توجه به بررسی مطالعات پیشین، علیرغم اینکه محدودیت بودجه یکی از عوامل تأثیرگذار در مسائل زمانبندی پروژه است، کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از اینرو در این مطالعه سعی می‌شود مسئله موازنه زمان - هزینه با در نظر گرفتن محدودیت بودجه در سطوح مختلف بررسی شده و اثر سطح بودجه بر نحوه عملکرد پروژه ارزیابی گردد. همچنین حل دقیق چنین مسائلی در مرور ادبیات گذشته مشاهده نشده است. بنابراین مطالعه حاضر یک روش حل دقیق برای مسئله پیشنهادی توسعه داده است.

۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یکی از روش‌های ابتکاری در مسأله بهینه‌سازی است که ریشه آن از قانون بقای اصلح[1] نشأت می‌گیرد و در واقع این الگوریتم، یک شبیه‌سازی مجازی از نظریه تکامل تدریجی داروین می‌باشد که می‌گوید: موجودات ضعیف‌تر از بین می‌روند و موجودات قویتر باقی می‌مانند. الگوریتم‌های ژنتیک، که بر مبنای ایده تکامل در طبیعت عمل می‌نمایند، بر روی جمعیتی از راه‌حل‌های بالقوه به جستجوی راه‌حل نهایی می‌پردازند. در هر نسل، بهترین‌های آن نسل انتخاب می‌شوند و پس از زاد و ولد، مجموعه جدیدی از فرزندان را تولید می‌کنند. در این فرآیند، افراد مناسب‌تر، با احتمال بیشتری در نسل‌های بعدی باقی خواهند ماند. در آغاز الگوریتم، تعدادی از افراد (جمعیت اولیه) به صورت تصادفی ساخته شده و تابع هدف برای تک تک آنها ارزیابی می‌شود. اگر شرط رسیدن به جواب برقرار نباشد، نسل بعدی با انتخاب والدین براساس میزان برازندگی‌شان تولید می‌شود و فرزندان با احتمال ثابتی دچار جهش می‌شوند. سپس میزان برازندگی فرزندان جدید، محاسبه شده و جمعیت جدید از جایگزینی فرزندان با والدین ایجاد می‌شود و این فرآیند تا برقرار شدن شرط خاتمه تکرار می‌شود. عمده‌ترین مزایای این روش در مقایسه با روش‌های متداول عبارتند از: جستجوی موازی در عوض جستجوی ترتیبی، عدم نیاز به هرگونه اطلاعات، کمکی نظیر روش حل مسأله، قطعی نبودن الگوریتم، پیاده‌سازی آسان و رسیدن به چند گزینه مطلوب [۱۸]. این الگوریتم در مسائل متنوعی نظیر بهینه‌سازی، شناسایی و کنترل سیستم، انتخاب سبد سهام[۱۹]، تعیین توپولوژی و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های مبتنی بر تصمیم و قاعده به کار می‌رود. در این تحقیق، از این الگوریتم به منظور بهینه‌سازی زمان و هزینه با در نظرگیری محدودیت بودجه پرداخته شده است.

۴- تعریف مسئله

در این تحقیق، مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت بودجه با هدف حداقل سازی زمان ختم پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. در دنیای واقعی فعالیت‌ها می‌توانند به گونه‌های مختلفی اجرا شوند اما امکان اجرای تمام حالات وجود ندارد. یکی از شرایط محدود کننده، محدودیت بودجه می‌باشد. در این مطالعه نیز به منظور واقعی سازی مدل پیشنهادی و کاربردی‌تر کردن آن، محدودیت بودجه اعمال شده است.

یک پروژه شامل فعالیت‌ها (کارها) می‌باشد که به وسیله محدودیت تقدم- تأخر با یکدیگر در ارتباط هستند. برای هر فعالیت مدت، میزان منابع لازم و فعالیت‌های تقدم-تأخر با سایر فعالیت‌ها به عنوان داده‌های مسئله در دسترس هستند. یک پروژه شامل J فعالیت که بصورت $j=1,\ldots,J$ نامگذاری شده‌اند، می باشد. زمان انجام فعالیت j با p_j نمایش داده می‌شود. پس از شروع هر فعالیت، امکان انقطاع فعالیت وجود ندارد.

[1] Survival of the Fittest

به علت الزامات تکنیکی، روابط پیش‌نیازی بین بعضی از فعالیت‌ها وجود دارد. به عنوان مثال پروژه ساخت را در نظر بگیرید. کاملاً مشخص است که کاشی کاری فقط در زمانی قابل اجراست که فعالیت دیوار چینی انجام شده باشد (به اتمام رسیده باشد). روابط پیشنیازی نیز با استفاده از مجموعه فعالیت‌ها مقدم Pr_j ارائه می‌شود. Pr_j بدین معناست که فعالیت j مادامیکه فعالیت‌ها که عضو مجموعه Pr_j انجام نشوند، قابلیت شروع شدن ندارند. دو فعالیت دیگر با نام‌های $j = 0$ و $j = N + 1$ به عنوان فعالیت شروع و پایان نیز در نظر می‌گیریم که هر دوی آنها به عنوان فعالیت‌های مجازی هستند و زمان پردازش هر دوی آنها صفر می‌باشد. با توجه به مفاهیم ارائه شده، در ادامه مدل ریاضی مربوط به مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت بودجه با هدف حداقل سازی زمان تکمیل پروژه معرفی می‌شود.

۴-۱-نمادگذاری

نمادگذاری انجام شده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

J: تعداد فعالیت‌های پروژه $j=1,2,3,\ldots,J$

۴-۲- پارامترها و متغیر مسئله

پارامترها و متغیر مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

C_j: زمان تکمیل هر فعالیت $j=1,2,3,\ldots,J$

P_j: مدت زمان انجام هر فعالیت $j=1,2,3,\ldots,J$

c_j: هزینه انجام هر فعالیت $j=1,2,3,\ldots,J$

B: بودجه در دسترس

x_j: اگر فعالیت j اجرا شود ۱ و در غیراینصورت ۰

۴-۳- مدل پیشنهادی

همانطور که اشاره گردید در این تحقیق مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت بودجه با هدف حداقل سازی زمان تکمیل پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ریاضی مسئله پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد.

$Minimize \quad C_{n+1}$	۱
$Subject\ to$	
$x_j = 1 \quad \forall j \in N$	۲
$C_j - C_i - p_j x_j \geq 0$	۳
$\sum_{j \in N} c_j x_j \leq B$	۴
$C_j \geq 0 \quad \forall j \in N \cup \{0, n+1\}$	۵
$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in N$	۶

رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد. همانطور که اشاره شد، هدف حداقل سازی زمان تکمیل پروژه می‌باشد. رابطه (۲) تضمین می‌کند که هر فعالیت تنهای یکبار انجام شده و امکان انقطاع برای آن وجود ندارد. رابطه (۳) رابطه پیش‌نیازی را نشان می‌دهد بدین شکل که یک فعالیت تنها زمانی می‌تواند آغاز شود که فعالیت‌ها پیش‌نیاز آن خاتمه یافته باشند. رابطه (۴) محدودیت بودجه را اعمال می‌کند. بدین ترتیب که هزینه اجرای هر فعالیت و در نتیجه هزینه اجرای کل پروژه تحت کنترل می‌باشد. رابطه (۵) نشان می‌دهد که

زمان ختم هر فعالیت نمی‌تواند مقدار منفی به خود بگیرد و در نهایت رابطه (۶) بیانگر متغیر صفر و یکی مسئله می‌باشد. متغیر زمانی ۱ است که فعالیت انجام شده باشد.

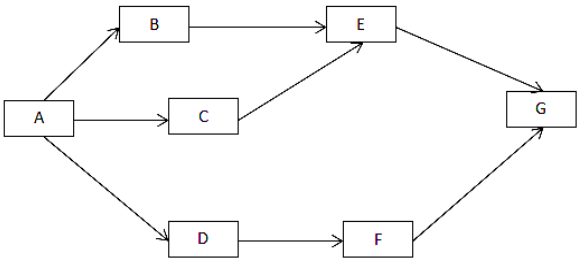
۴-۴- طراحی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

همانطورکه اشاره گردید برای حل مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت بودجه و با هدف حداقل سازی زمان تکمیل پروژه، یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک توسعه داده شده است. پارامترهای ورودی الگوریتم بصورت زیر مقداردهی و تنظیم شده‌اند:

تعداد جمعیت اولیه	۱۰۰
تعداد نسل‌ها	۱۰۰
نرخ عملگر تقاطع	۷۰ درصد
نرخ عملگر جهش	۳۰ درصد

۴-۵- معرفی مسئله نمونه

به منظور حل مدل پیشنهادی، یک مثال نمونه ارائه می‌گردد. در این مثال یک پروژه با تعداد ۷ فعالیت ارائه شده است. اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی هر یک از این پروژه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: شبکه گرهی مربوط به پروژه

به منظور حل مدل بهینه‌سازی در این تحقیق، زمان پردازش فعالیت‌ها بطور تصادفی با توزیع یکنواخت بین بازه‌های گوناگون تولید شده است که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: بازه زمانی فعالیت‌ها

فعالیت	بازه زمانی
۱	[14 – 24]
۲	[15 – 25]
۳	[15 – 33]
۴	[12 – 20]
۵	[22 – 30]
۶	[14 – 24]
۷	[9 – 18]

همچنین برای محاسبه هزینه انجام هر فعالیت، ابتدا میزان منبع مورد نیاز برای هر فعالیت تعیین شده، سپس هزینه انجام آن محاسبه گردید. در این مطالعه دو نوع منبع تجدیدپذیر (مانند نیروی انسانی و تجهیزات) و تجدید ناپذیر (مانند مواد و مصالح) مدنظر قرار

گرفته است. بدین ترتیب به منظور تولید مسئله پیشنهادی، از چهار نوع منبع تجدیدپذیر و دو منبع تجدیدناپذیر استفاده شده است که بازه تغییرات این منابع در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: بازه هزینه منابع مختلف

منبع	نوع	بازه هزینه
تجدیدپذیر	۱	[5000 – 7000]
	۲	[3000 – 5000]
تجدیدناپذیر	۱	[2000 – 4000]
	۲	[3000 – 6000]
	۳	[4000 – 8000]
	۴	[2500 – 5000]

در نهایت بودجه دردسترس برای انجام پروژه با سطوح مختلف در نظر گرفته شده که در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: سطوح مختلف بودجه

سطح	۱	۲	۳	۴	۵
میزان بودجه (هزار)	۱۰۵	۱۱۰	۱۱۵	۱۲۰	۱۲۵

۴-۶- حل مسئله نمونه با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسئله نمونه در نرم افزار MATLAB2014b بر روی یک رایانه با مشخصات Intel Core i5-2430M CPU, 2.40GH, 4GB RAM پیاده سازی و حل گردید. همانطورکه اشاره گردید مسئله نمونه بازای سطح بودجه‌های مختلف ارائه شده در جدول ۳ حل گردیدند. خروجی‌های نرم افزار به ترتیب در ادامه ارائه شده‌اند. جدول ۴ خروجی‌های مسئله نمونه بازای سطح اول بودجه را نشان می‌دهد. ستون اول سطح بودجه، ستون دوم و سوم به ترتیب بهترین (کمترین) زمان تکمیل پروژه و بهترین (کمترین) هزینه کل را نشان می‌دهد. ستون چهارم نیز متوسط زمان حل مسئله را نشان می‌دهد.

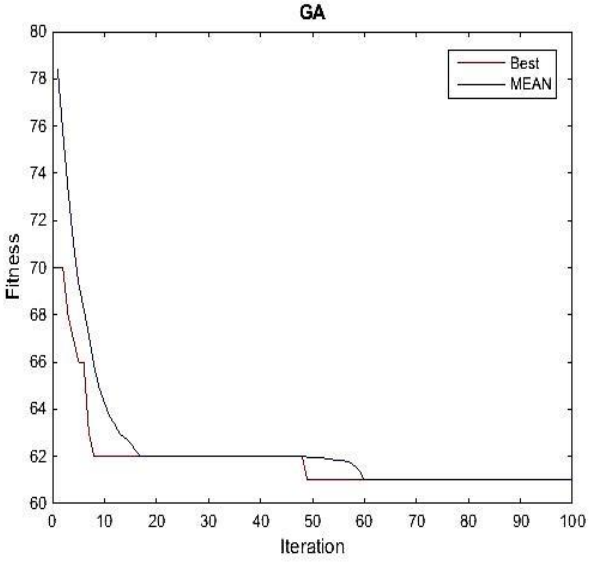
جدول ۴: حل مسئله نمونه بازای سطح اول بودجه

سطح بودجه	زمان تکمیل پروژه (روز)	هزینه کل پروژه	زمان حل (ثانیه)
۱۰۵	۶۱	۱۰۴۸۶۰	۱۸/۶۳

همچنین مدت زمان انجام و هزینه مربوط به هر یک از فعالیت‌ها بطور جداگانه محاسبه شده و در جدول ۵ نشان داده شده است. پس از تعیین مدت زمان انجام و هزینه مربوط به هریک از فعالیت‌ها و همچنین محاسبه زمان تکمیل پروژه و هزینه کل آن، روند تغییرات جواب‌های بدست آمده از حل مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۵: مدت زمان و هزینه انجام هر فعالیت با محدودیت بودجه سطح اول

شماره فعالیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مدت زمان انجام	۱۴	۱۵	۱۵	۱۶	۲۲	۱۶	۱۰
هزینه	۱۲۴۲۷	۲۱۷۳	۴۴۷۸	۳۰۱۱۵	۱۲۴۵۴	۲۰۹۸۳	۲۲۲۳۰



شکل ۲: روند تغییرات جواب در هر تکرار

همانطورکه در شکل ۲ نشان داده شده، میزان جواب متوسط و بهترین جواب بدست آمده در هر تکرار الگوریتم به ترتیب با خطوط آبی و قرمز مشخص شده است. مطابق شکل ۲ مشاهده می‌شود که در ابتدای حل الگوریتم متوسط جواب‌ها و همچنین بهترین جواب از نظر مقداری زیاد بوده اما با افزایش تعداد تکرارها این مقادیر کاهش می‌یابد که نشان دهنده عملکرد صحیح و خوب الگوریتم ژنتیک پیشنهادی می‌باشد چراکه با افزایش تعداد تکرار، هر نسلی که بوجود می‌آید دارای کیفیت بهتری می‌باشند یعنی جواب‌هایی با مقدار تابع هدف کمتر نسبت به نسل‌های قبلی تولید می‌کنند.

همچنین مسئله نمونه بازای سطوح مختلف بودجه توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی حل گردیده و در ادامه تابع هدف (زمان تکمیل پروژه)، هزینه کل انجام پروژه و متوسط زمان حل مسئله بازای سطوح مختلف بودجه در جدول ۶ ارائه شده است.

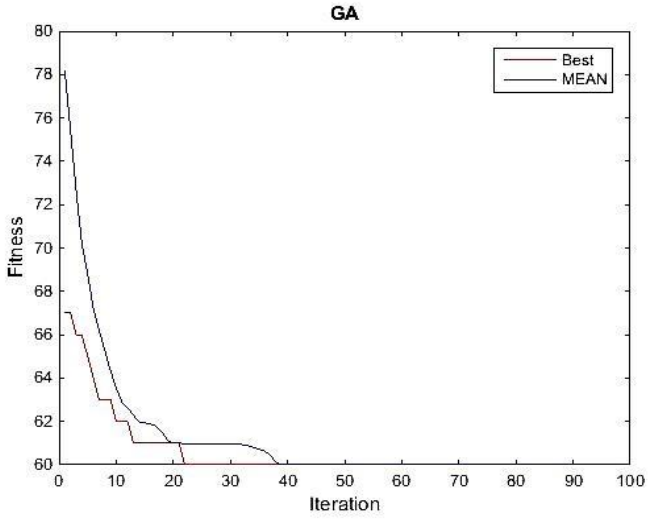
جدول ۶: حل مسئله نمونه بازای سطح اول بودجه

سطح بودجه	زمان تکمیل پروژه (روز)	هزینه کل پروژه	زمان حل (ثانیه)
۱۱۰	۶۰	۱۰۷۹۶۰	۳/۵
۱۱۵	۶۰	۱۱۳۰۹۶	۲/۶۲
۱۲۰	۶۰	۱۱۷۷۴۹	۲/۰۷
۱۲۵	۶۰	۱۲۱۵۱۲	۱/۸۷

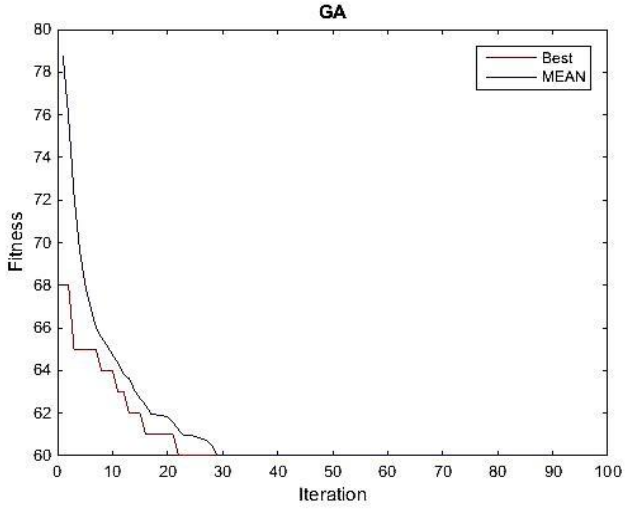
با توجه به خروجی نشان داده شده در جدول ۶ می‌توان دریافت که با افزایش سطح بودجه، زمان تکمیل پروژه کاهش می‌یابد اما از سطحی به بعد افزایش سطح بودجه تاثیری بر زمان تکمیل پروژه ندارد بلکه باعث افزایش هزینه می‌شود که این افزایش هزینه خود را در کیفیت انجام فعالیت نشان می‌دهد که در این تحقیق مدنظر نبوده است. بنابراین می‌توان بیان نمود که افزایش سطح بودجه تا جایی بر کاهش زمان تکمیل پروژه و از جایی به بعد بر کیفیت انجام تاثیر می‌گذارد. جدول ۷ مدت زمان انجام و هزینه مربوط به هر یک از فعالیت-ها را بازای سطوح بودجه مختلف نشان می‌دهد. همچنین نمودار مربوط به روند تغییر جواب‌ها در تکرارهای مختلف بازای سطوح مختلف بودجه در شکل ۳ الی شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۷: مدت زمان و هزینه انجام هر فعالیت با محدودیت بودجه سطح اول

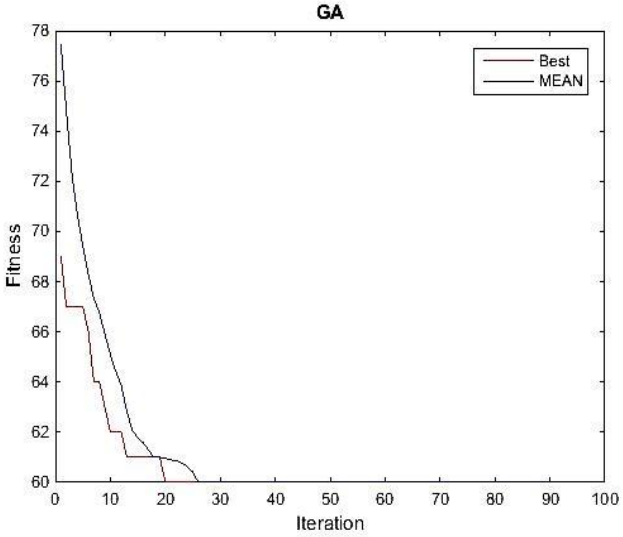
سطوح	شماره فعالیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱۱۰	مدت زمان انجام	۱۴	۱۵	۱۵	۱۶	۲۲	۱۷	۹
	هزینه	۱۹۳۰۵	۱۶۳۲	۳۲۹۹	۳۰۴۰۳	۱۲۶۰۸	۱۸۳۸۴	۲۲۳۲۹
۱۱۵	مدت زمان انجام	۱۴	۱۵	۱۵	۱۸	۲۲	۱۸	۹
	هزینه	۱۵۱۸۲	۲۲۳۰	۳۹۰۰	۳۰۵۵۸	۱۷۶۷۳	۱۹۳۳۸	۲۴۲۱۵
۱۲۰	مدت زمان انجام	۱۴	۱۵	۱۵	۱۸	۲۲	۱۴	۹
	هزینه	۱۸۱۷۴	۲۷۲۸	۳۲۶۸	۳۳۵۴۶	۱۱۷۰۰	۲۲۹۹۳	۲۵۳۴۰
۱۲۵	مدت زمان انجام	۱۴	۱۵	۱۵	۱۲	۲۲	۱۸	۹
	هزینه	۱۵۷۲۲	۱۸۶۰	۳۶۹۵	۳۴۵۱۱	۱۵۷۱۸	۲۳۶۰۶	۲۶۴۰۰



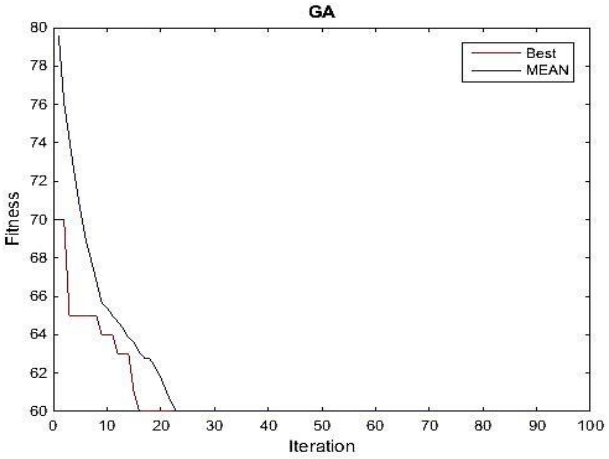
شکل ۳: روند تغییرات جواب در هر تکرار با بودجه سطح دوم



شکل ۴: روند تغییرات جواب در هر تکرار با بودجه سطح سوم

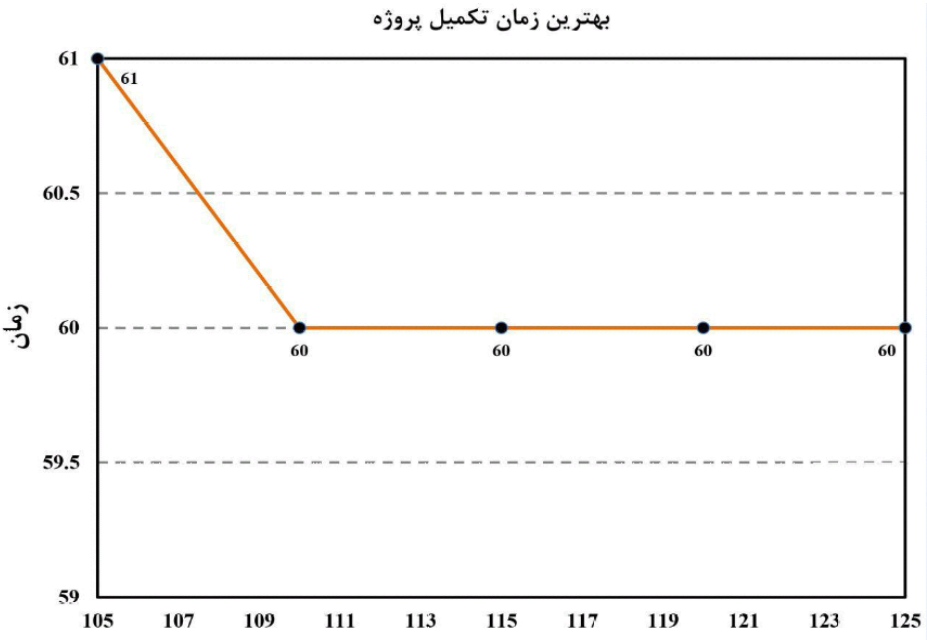


شکل ۵: روند تغییرات جواب در هر تکرار با بودجه سطح چهارم



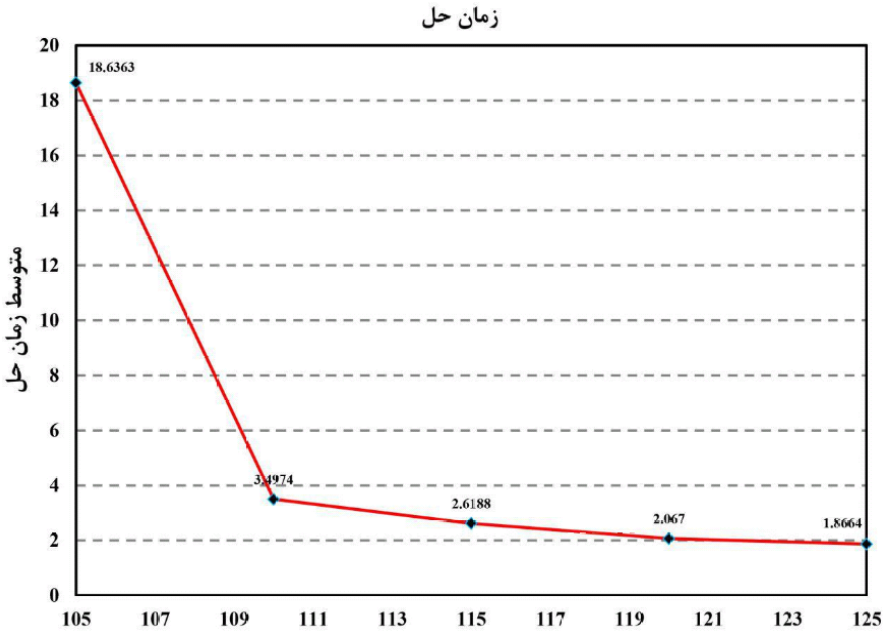
شکل ۶: روند تغییرات جواب در هر تکرار با بودجه سطح پنجم

در تمام شکل‌های ارائه شده مشاهده می‌گردد که روند عملکرد الگوریتم صحیح بوده و با افزایش تعداد تکرارها مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد. بطور کلی با افزایش سطح بودجه، زمان بیشتری نیاز است تا به بهینگی برسد چراکه با افزایش سطح بودجه، فضای جستجوی بیشتری ایجاد می‌شود یعنی می‌توان با فراغ بال بیشتری حالت‌های مختلفی از انجام فعالیت‌ها را مورد بررسی قرار داده و بهترین ترکیب از آنها را انتخاب نمود.



شکل ۷: تحلیل حساسیت زمان تکمیل پروژه نسبت به سطح بودجه

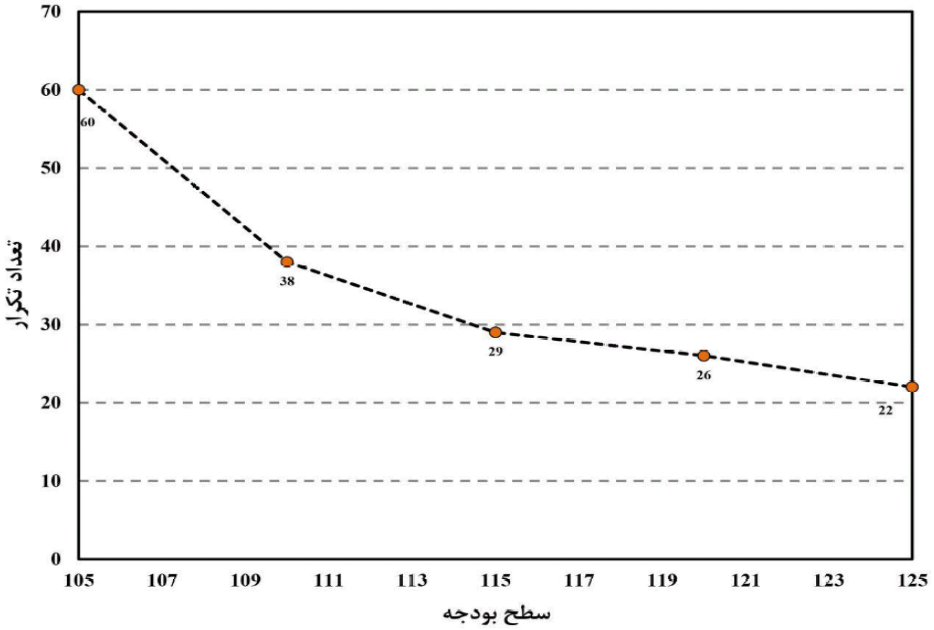
همانطورکه قبلا نیز اشاره شد با افزایش سطح بودجه تا یک سطح زمان تکمیل پروژه کاهش می‌یابد که در شکل ۷ قابل مشاهده است. همچنین پس از عبور از یک سطح، با افزایش میزان بودجه زمان تکمیل تغییر نکرده بلکه این میزان افزایش در هزینه خود را در کیفیت انجام فعالیت‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۸: متوسط زمان حل مسئله نمونه بازای سطوح مختلف بودجه

شکل ۸ متوسط زمان حل مسئله نمونه بازای سطح بودجه مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۸ بیان کننده این مطلب است که با افزایش سطح بودجه پیچیدگی حل مسئله و ایجاد جواب‌های گوناگون در تکرارهای مختلف کاهش می‌یابد بنابراین زمان کمتری برای حل نیاز می‌باشد.

در نهایت شکل ۹ تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به بهینگی مسئله نمونه بازای هر سطح بودجه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح بودجه هر چند فضای جستجوی بیشتری ایجاد می‌شود و زمان حل مسئله افزایش می‌یابد اما از طرف دیگر پیچیدگی مسئله برای پیدا کردن جواب کاهش می‌یابد بنابراین الگوریتم در تعداد تکرار کمتری قابلیت پیدا کردن جواب بهینه را دارد. از اینرو با افزایس سطح بودجه، تعداد تکرار لازم برای رسیدن به بهینگی کاهش می‌یابد.



شکل ۹: تعداد تکرارها برای حل مسئله نمونه بازای سطوح مختلف بودجه

۴-۷- حل مسئله نمونه با سطوح بودجه مختلف

به منظور حل دقیق مسئله نمونه، مدل ریاضی پیشنهادی در نرم افزار GAMS پیاده سازی گردیده است. بدین منظور مسئله نمونه با بودجه سطح اول در نظر گرفته شده است که در آن مدت زمان انجام و هزینه هر فعالیت در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸: تولید مسئله نمونه برای حل دقیق

فعالیت	مدت زمان اجرا (روز)	هزینه انجام فعالیت
A	۱۴	۱۲۴۲۷
B	۱۵	۲۱۷۳
C	۱۵	۴۴۷۸
D	۱۶	۳۰۱۱۵
E	۲۲	۱۲۴۵۴
F	۱۶	۲۰۹۸۳
G	۱۰	۲۲۲۳۰

مسئله نمونه فوق در نرم افزار GAMS پیاده سازی گردیده و نتایج زیر بدست آمد. همانطورکه در جدول ۹ نشان داده شده زمان تکمیل پروژه معادل ۶۱ روز بوده که برابر با جواب بدست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی می‌باشد.

جدول ۹: زمان تکمیل هر یک از فعالیت‌ها

فعالیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
زمان تکمیل فعالیت	۱۴	۲۹	۲۹	۳۰	۵۱	۴۶	۶۱

به همین ترتیب مسئله نمونه با سطوح بودجه مختلف توسط نرم افزار GAMS حل شده و نتایج آن با نتایج الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مقایسه گردید. نتایج مقایسه جواب‌های دو روش در جدول ۱۰ نشان داده شده است. همانطورکه در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از حل دقیق مسئله نمونه توسط نرم افزار GAMS مشابه نتایج حاصل از حل فراابتکاری توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد. این تحلیل نشان دهنده عملکرد صحیح الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در پیدا کردن جواب بهینه می‌باشد.

جدول ۱۰: مقایسه جواب‌های دو روش

سطح بودجه	زمان تکمیل پروژه حاصل از حل دقیق توسط نرم افزار GAMS	زمان تکمیل پروژه حاصل از حل فراابتکاری توسط نرم افزار MATLAB	فاصله بین جواب‌ها
۱۰۵	۶۱	۶۱	۰
۱۱۰	۶۰	۶۰	۰
۱۱۵	۶۰	۶۰	۰
۱۲۰	۶۰	۶۰	۰
۱۲۵	۶۰	۶۰	۰

۴-۸- اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

به منظور اعتبارسنجی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، مسئله نمونه بطور دقیق حل شده و نتیجه آن با نتایج بدست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مقایسه می‌گردد. بدین منظور ۱۰ مسئله نمونه در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تولید شده و توسط نرم‌افزار GAMS به صورت دقیق و الگوریتم ژنتیک به صورت فراابتکاری حل شده‌اند.

جدول ۱۱: حل مسائل نمونه در ابعاد مختلف با دو روش پیشنهادی

ابعاد مسئله	تعداد فعالیت	سطح بودجه	حل دقیق توسط GAMS		حل فراابتکاری توسط MATLAB	
			زمان تکمیل پروژه (روز)	هزینه کل پروژه	زمان تکمیل پروژه (روز)	هزینه کل پروژه
کوچک	۵	۱۱۰	۵۱	۸۹,۷۴۰	۵۱	۸۹,۷۳۹
	۶	۱۱۰	۵۲	۹۹,۶۳۵	۵۲	۹۹,۶۳۵
	۷	۱۱۰	۶۰	۱۰۷,۹۶۰	۶۰	۱۰۷,۹۶۰
	۸	۱۲۰	۷۰	۱۱۸,۹۰۵	۷۰	۱۱۸,۹۰۴
متوسط	۱۲	۱۸۰	۱۲۳	۱۷۷,۷۲۵	۱۲۳	۱۷۷,۷۲۶
	۱۴	۱۹۰	۱۳۹	۱۸۷,۶۸۰	۱۳۹	۱۸۷,۶۷۹
	۱۶	۲۴۰	-	-	۱۷۴	۲۳۶,۸۹۰
بزرگ	۲۱	۳۰۰	-	-	۲۲۱	۲۸۶,۲۴۰
	۲۳	۳۲۰	-	-	۲۳۸	۳۱۱,۳۷۹
	۲۵	۳۵۰	-	-	۲۵۳	۳۴۸,۶۵۲

نتایج بدست آمده از جدول ۱۱ نشان می‌دهد که هر دو روش، قابلیت حل مسئله با ابعاد کوچک را داشته و خروجی مشابهی داشته‌اند. همچنین از سه مسئله تولید شده در ابعاد متوسط، دو مسئله به طور دقیق حل شده است که خروجی یکسانی با نتیجه بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی داشته است. در نهایت، درحالیکه الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مسائل نمونه در ابعاد بزرگ را به طور کامل حل کرده، جوابی به طور دقیق برای این مسائل توسط نرم افزار GAMS بدست نیامده است.

۵- نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به وسعت و پیچیدگی پروژه‌ها، بدون داشتن برنامه‌ریزی، امکان رسیدن به اهداف پروژه امری بعید به نظر می‌رسد. یکی از بخشهای مهم مدیریت پروژه، هنر ارزیابی، برنامه‌ریزی و نظارت بر پروژه‌هاست. هدف از مدیریت پروژه، زمانبندی عملکردی و فنی پروژه به منظور کسب بهترین محصول با کمترین هزینه در کوتاهترین زمان است. لذا روند برنامه‌ریزی یکی از مهمترین اصول در موفقیت پروژه‌های ساخت می‌باشد.

هدف این تحقیق، توسعه مدلی برای مسئله موازنه زمان-هزینه بوده که بتواند با لحاظ نمودن عدم قطعیت موجود در هزینه فعالیت‌ها به ارائه جواب‌های پارتو بپردازد. همچنین با توجه به اهمیت کاهش زمان و هزینه در پروژه‌های عمرانی، می‌توان از این رویکرد در شرکت‌های پیمانکاری که با پروژه‌های مختلفی به طور همزمان درگیر می‌باشند، مفید بوده و در سوددهی این شرکت‌ها تاثیرگذار می‌باشد. در این مطالعه از روش مسیر بحرانی (CPM) استفاده شده که از پرکاربردترین روش‌ها در حوزه مدیریت و زمانبندی پروژه می‌باشد. بدین منظور، ابتدا تعریف مسئله مربوط به این تحقیق بیان شده، سپس برای ارائه مدل ریاضی پیشنهادی، نمادگذاری مسئله، پارامترها و متغیرهای مورد استفاده، معرفی گردیدند. در نهایت برای حل مسئله پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و تجزیه و تحلیل نتایج انجام گرفته است. الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسئله نمونه در نرم افزار MATLAB2014b پیاده سازی و حل گردید. به منظور اعتبارسنجی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، مسائل نمونه بطور دقیق در ابعاد مختلف با استفاده از نرم افزار GAMS حل شده و نتیجه آن با نتایج بدست آمده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی مقایسه گردیده است. از تحلیل نتایج بدست آمده چنین بر می‌آید که خروجی دو روش در ابعاد کوچک یکسان بوده که بدین ترتیب صحت الگوریتم پیشنهادی تایید می‌شود. همچنین حل دقیق برخی از مسائل نمونه در ابعاد متوسط و همه مسائل ابعاد بزرگ بدلیل افزایش پیچیدگی امکان‌پذیر نبوده است، حال آنکه الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی این دسته مسائل را حل کرده است که نشان از قدرت الگوریتم پیشنهادی در حل چنین مسائلی می‌باشد. علاوه بر این مسئله بازای سطوح بودجه مختلف حل شده و نتایج یکسانی از دو روش به ازای سطوح مختلف بودجه بدست آمده است. از جمله تحلیل‌هایی که انجام گرفته، می‌توان به تحلیل حساسیت سطح بودجه نسبت به زمان ختم پروژه، زمان حل مسئله و تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب بهینه اشاره نمود. مشاهده شده است که با افزایش سطح بودجه، زمان تکمیل پروژه کاهش یافته است.

مراجع

[1]. Nazarpour, H., Taheri Amiri M.J., Hemmatian, M., (2014) "Prioritizing Delay Causes in Construction Projects in Mazandaran Province (Iran) and Presenting Solutions for Improving it". Applied Mathematics in engineering, management and technology, The special issue in management and technology, 242-251

[۲]. نادرپور، ع؛ مفید، م؛ (۱۳۸۸) "بهینه‌سازی تخصیص منابع به فعالیت‌های پروژه با استفاده از مدل دیاگرام منابع بحرانی"، مجله مدلسازی در مهندسی، سال هفتم، شماره نوزدهم، ۳۷-۴۶

[3]. Azaron, A., Perkgoz, C., Sakawa, M., (2005), A genetic algorithm approach for the time-cost trade-off in PERT networks, Applied Mathematics and Computation, 1317–1339.

[4]. Azaron, A., Tavakkoli-Moghaddam, R, (2007), Multi-objective time–cost trade-off in dynamic PERT

[5]. Hazir, O., Houari, M., Erel, Erdel., (2010), Discrete time/cost trade-off problem: A decomposition-based solution algorithm for the budget version, Computers & Operations Research, 649-655.

[6]. Hazir, O., Houari, M., Erel, Erdel., (2010), Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem, European Journal of Operational Research, 633-643.

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

[8]. Chen, S.P., Tsai, M.J, (2011), Time–cost trade-off analysis of project networks in fuzzy environments, European Journal of Operational Research, 386-397.
[9]. Sonmez, R.., Bettimer, O.H., (2012), A hybrid genetic algorithm for the discrete time–cost trade-off problem, Expert Systems with Applications, 11428-11434.
[10]. Klansek, U., Psunder, M., (2012), MINLP optimization model for the nonlinear discrete time–cost trade-off problem, Advances in Engineering Software, 6-16.
[11]. Ke, H., Ma, J., (2014), Modeling project time–cost trade-off in fuzzy random environment, Applied Soft Computing, 80-85.

[۱۲]. حسامی، س؛ مولایی، ز؛ (۱۳۹۴) "بهینه‌سازی زمانبندی در پروژه‌های راهسازی براساس تفکر ناب"، مجله مدلسازی در مهندسی، سال سیزدهم، شماره چهلم، ۳۳-۴۲

[13]. Aminbakhsh, S., Sonmez, R., (2016), Discrete Particle Swarm Optimization Method for the Large-Scale Discrete Time-Cost Trade-Off Problem, Expert Systems with Application.
[14]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Hematian, M, Kordi, H, (2017), "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.
[15]. Taheri Amiri, M.J, Haghighi, F, Eshtehardian, E, Abessi, O, (2017), "Optimization of Time, Cost, and Quality in Critical Chain Method Using Simulated Annealing", International Journal of Engineering, Vol 30, No 5, pp. 705-713, Doi: 10.5829/idosi.ije.2017.30.05b.00.

[۱۶]. طاهری امیری،م، ج.، حقیقی، ف، ر.، اشتهاردیان، ا.، عابسی، ع، (۱۳۹۶)،" موازنه زمان-هزینه-کیفیت در روش زنجیره بحرانی با فعالیت‌های چندحالته با استفاده از الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات"، انجمن مهندسی سازه ایران(مجله علمی-پژوهشی سازه و ساخت)،

[17]. 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)

[18]. S.N. Sivanandam, S.N. Deepa,(2008), Introduction to Genetic Algorithms, Springer.

[۱۹]. نعیمی صدیق، ع؛ وفادوست سبزوار، پ؛ (۱۳۹۳) "انتخاب بهینه سبد سهام با محدودیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک تنظیم شده"، مجله مدلسازی در مهندسی، سال دوازدهم، شماره سی و هشتم، ۱-۱۳