

Developing a Project Planning Model Considering the Executive Methods and the Rework Activity

Javad Ahmadi Moghadam^{*}, Nasser Motahari Farimani^{},
Mostafa Kazemi^{***}**

Abstract

In this research, a model with three objective functions is presented to solve the problem of time, cost and quality trade-off in project planning. What distinguishes this model is that, in addition to considering different executive methods for each activity, rework activity is defined for some activities in order to prevent a decrease in quality. Other features of this model include covering various costs including incentive cost and tardiness cost. Because of the NP-Hardness of such large-scale problems, genetic algorithm is used to solve the proposed model. The results obtained from solving a real problem in screen filter production indicate that considering different executive methods for activities as well as different costs and defining rework activity can lead to better results towards the final goal by presenting a comprehensive model. If more accurate and detailed information is used for time, cost and quality in the model, it can achieve more rational results, similar to those of the real world more confidently. Under such conditions the least time and cost and most quality are achieved for successful implementation of project.

Keywords: Genetic Algorithm; Project Planning; Time-Cost and Quality Trade-off; Incentive Cost; Tardiness Cost.

Received: Jan. 14, 2020; Accepted: Oct. 3, 2020.

^{*} MSc. Student, Ferdowsi University Mashhad.

^{**} Assistant Professor, Ferdowsi University Mashhad (Corresponding Author).

Email: n.motahari@um.ac.ir

^{***} Professor, Ferdowsi University Mashhad.

توسعه مدل برنامه‌ریزی پروژه با در نظر گرفتن توأم روش‌های اجرایی و فعالیت جبرانی

جواد احمدی مقدم*، ناصر مطهری فریمانی**، مصطفی کاظمی***

چکیده

با توجه به اهمیت زمان، هزینه و کیفیت اجرای پروژه و همچنین تعارض این ۳ عنصر با یکدیگر، باید تعیین شود که هر فعالیت با کدام روش اجرایی صورت گیرد تا در نهایت پروژه در کوتاه‌ترین زمان، با کمترین هزینه و بیشترین کیفیت ممکن به پایان برسد. به دلیل NP-Hard بودن چنین مسائلی در ابعاد بزرگ، از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده می‌شود. در این پژوهش یک مدل با سه تابع هدف به منظور حل مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت در برنامه‌ریزی پروژه ارائه شده است. آنچه این مدل را متمایز می‌کند، این است که علاوه بر در نظر گرفتن روش‌های اجرایی متفاوت برای هر یک از فعالیت‌ها، برای برخی از فعالیت‌ها به منظور جلوگیری از کاهش کیفیت، فعالیت جبرانی تعریف می‌شود. از دیگر ویژگی‌های این مدل می‌توان به پوشش دادن هزینه‌های مختلف اعم از هزینه تشویقی و جریمه اشاره کرد. در نظر گرفتن فعالیت جبرانی می‌تواند از کاهش کیفیت جلوگیری کند. در نظر گرفتن هزینه جریمه و تشویقی نیز می‌تواند باعث انگیزه‌ای در جهت زودتر خاتمه دادن پروژه شود. با توجه به وزن بالای عنصر هزینه در بیشتر پروژه‌ها، هر چه بتوان پوشش بهتری از انواع هزینه‌ها داشت با اطمینان بیشتری می‌توان گفت که پروژه با کمترین هزینه ممکن به پایان رسیده است.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک؛ برنامه‌ریزی پروژه؛ موازنه زمان - هزینه و کیفیت؛ هزینه تشویقی؛ هزینه جریمه.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۲.

* دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

** استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول).

Email: n.motahari@um.ac.ir*

*** استاد، دانشگاه فردوسی مشهد.

۱. مقدمه

مسائل زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع از جمله مسائل با مبانی نظری غنی در حوزه تحقیق در عملیات و مدیریت پروژه است [۱۲]. افزایش هزینه و زمان پروژه‌ها از برنامه تعریف شده، ممکن است به کاهش سود و حتی برخی اوقات به شکست پروژه‌ها منجر شود. پیش‌بینی هزینه و زمان نهایی پروژه‌ها، یکی از اقداماتی است که برای کنترل هزینه و زمان پروژه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد [۲۹]. هر پروژه از فعالیت‌هایی مشخص تشکیل شده است که با روش‌ها و حالات مختلفی قابل اجرا هستند. هر کدام از روش‌ها زمان، هزینه و کیفیت اجرای متفاوتی دارند. حال با انتخاب هر یک از روش‌های انجام فعالیت‌ها، زمان، هزینه و کیفیت هر فعالیت و همچنین مقادیر این عوامل سه‌گانه در کل پروژه دست‌خوش تغییر می‌شود [۱۶]. وظیفه‌ای که بر عهده مدیران پروژه گذاشته شده است در قالب انجام پروژه در کوتاه‌ترین زمان ممکن، با کمترین هزینه ممکن و با بیشترین کیفیت عنوان می‌شود. با اندکی تفکر مشخص می‌شود که دستیابی مطلق به این سه هدف بسیار مشکل است؛ چراکه این اهداف با یکدیگر در تضاد هستند و بهبود هر یک از اهداف به دور شدن از حالت بهینه دو هدف دیگر منجر می‌شود [۴]. برای مثال، اگر مدیری بخواهد با انتخاب یکی از حالات اجرایی زمان پروژه را کاهش دهد، به‌ناچار یا باید هزینه بیشتری را متقبل شود و یا اینکه از کیفیت مطلوب پروژه صرف‌نظر کند؛ از این رو این اهداف دارای نوعی تعارض با یکدیگر هستند. بنابراین باید روشی طراحی شود که به وسیله آن بتوان مدیران پروژه را در زمان‌بندی و انتخاب حالات مناسب برای هر یک از فعالیت‌های پروژه یاری کرد؛ به نحوی که بتوانند پروژه را در سریع‌ترین زمان، با کمترین هزینه، در بالاترین سطح کیفیت و با پایین‌ترین سطح ریسک ممکن به پایان برسانند [۵].

مدیریت موفق یک پروژه هنر، علم و کوششی در جهت کنترل منابع موجود در بازه محدودیت‌هایی از جنس زمان، هزینه و کیفیت است. از آنجاکه بیشتر پروژه‌ها دارای شرایط و فعالیت‌های منحصربه‌فرد هستند، احتمالاً نمی‌توان استانداردهای مشخص، از پیش تعیین شده و فراگیر برای برنامه‌ریزی تمام پروژه‌ها ارائه کرد؛ بنابراین مدیر پروژه به‌سختی می‌تواند در انجام فعالیت‌های پروژه، داخل مثلث زمان - هزینه - کیفیت که در استاندارد مدیریت پروژه تصریح شده است، باقی بماند [۱۸]. با وجود اینکه معمولاً پیش از اجرای پروژه‌ها، زمان، هزینه و سطح کیفیت آن‌ها تعیین می‌شود؛ اما برخی مطالعات نشان داده‌اند که تعداد زیادی از پروژه‌ها هرگز در زمان تعیین شده، با هزینه پیش‌بینی شده و همین‌طور در سطح کیفیت مورد انتظار به پایان نرسیده‌اند. پژوهشگران دلیل این نوع از شکست‌ها در مدیریت پروژه‌ها را در فقدان توجه کافی به مقوله ریسک و عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌ها می‌دانند [۳۸].

وجود تعارض بین این اهداف سه‌گانه، از اهمیت هیچ‌کدام نمی‌کاهد و هر سه عامل در بحث مدیریت پروژه نقشی کلیدی را ایفا می‌کنند. این موضوع باعث خواهد شد که مدیران از هیچ‌یک از جواب‌ها به راحتی گذر نکنند و تمایل داشته باشند تا دسته‌ای از جواب‌های معقول و شدنی را هم‌زمان در اختیار داشته باشند تا بتوانند از میان آن‌ها و با توجه به ارجحیت‌ها و محدودیت‌ها جواب بهتر را انتخاب کنند؛ بنابراین می‌توان فهمید که انجام هر فعالیت در حالات و روش‌های مختلف تا چه میزان می‌تواند بر پیچیدگی مسئله بیفزاید و انتخاب جواب بهتر را مشکل سازد.

نکته دیگری که محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های زیادی را به این مسئله می‌افزاید، بحث پیش‌نیازی‌های فعالیت‌ها است. پیش‌نیازی‌ها انواع مختلفی دارند. به عنوان مثال برخی از فعالیت‌ها باید با یکدیگر شروع شده و یا با یکدیگر به اتمام برسند. برخی از فعالیت‌ها باید پس از اتمام برخی دیگر از فعالیت‌ها شروع شوند و یا برعکس؛ همچنین ممکن است بین شروع و پایان فعالیت‌ها نسبت به یکدیگر به ایجاد تأخیر یا فاصله زمانی مشخصی نیاز باشد [۱۴].

در هر پروژه‌ای برخی از فعالیت‌ها به توجه ویژه‌ای نیاز دارند. این دسته از فعالیت‌ها در معرض عواملی هستند که ممکن است به کیفیت اجرای فعالیت لطمه بزنند و باعث شوند تا فعالیت مربوطه با کیفیت موردانتظار انجام نشود. در واقع می‌توان گفت که این فعالیت‌ها ریسک اجرایی بالایی دارند. بهتر است مدیر پروژه قبل از شروع پروژه، این قبیل فعالیت‌ها را شناسایی کند و تمهیدات لازم را در جهت جلوگیری از کاهش کیفیت انجام دهد. در موارد بسیاری لازم است پروژه را زودتر از تاریخ محاسبه شده بر روی شبکه تکمیل کرد. در چنین شرایطی یکی از راه‌حل‌های ممکن برای کوتاه کردن زمان اجرای پروژه، تسریع انجام فعالیت‌ها است که می‌تواند سبب کاهش کیفیت شود [۳۴]. یکی از راه‌های حفظ کیفیت مطلوب برای چنین فعالیت‌هایی، تعریف کردن یک فعالیت جبرانی^۱ است. به این صورت که فعالیت جبرانی بلافاصله بعد از اتمام فعالیت مربوطه شروع می‌شود تا بلکه بتواند کاهش کیفیت اتفاق افتاده را جبران کند. فعالیت‌های جبرانی به فهرست فعالیت‌ها اضافه می‌شوند و با آن‌ها همچون دیگر فعالیت‌ها برخورد می‌شود.

با توجه به پیچیدگی ساختار پروژه‌ها، تعداد زیاد فعالیت‌ها، وجود چندین روش مختلف برای اجرای فعالیت‌ها، رعایت روابط پیش‌نیازی میان فعالیت‌های پروژه، در نظر گرفتن فعالیت جبرانی و همین‌طور چندهدفه بودن مسئله، تصمیم‌گیری مدیران برای انتخاب از میان حالت‌های مختلف انجام فعالیت‌ها بسیار پیچیده است و نیاز به روشی که بتواند برای مسائلی در ابعاد بزرگ و در زمان معقول، راه‌حل‌های قابل‌قبولی را ارائه دهد، احساس می‌شود.

با این تفاسیر، روشی باید طراحی شود که به وسیله آن بتوان مدیران پروژه را در زمان‌بندی و انتخاب حالت مناسب اجرای هر یک از فعالیت‌های پروژه یاری کرد؛ به نحوی که بتوانند پروژه را در

۱. Rework Activity

سریع‌ترین زمان، با کمترین هزینه و در بالاترین سطح کیفیت به پایان برسانند؛ بنابراین انجام پژوهشی که در آن با توجه به موازنه موجود میان سه هدف ذکر شده، یعنی زمان، هزینه و کیفیت، رویکرد و ابزاری برای تعیین بهترین ترکیب از حالت‌های مختلف فعالیت‌های پروژه توسعه داده شود، ضروری به نظر می‌رسد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مدیریت زمان پروژه: مدیریت پروژه عبارت است از: به‌کارگیری دانش، مهارت‌ها، ابزارها و تکنیک‌ها برای فعالیت‌های پروژه به‌منظور تحقق الزامات پروژه [۱۳]. مدیریت زمان پروژه فرآیندهای موردنیاز برای حصول اطمینان از تکمیل به‌موقع پروژه را تشریح می‌کند. در صورتی که برای اجرای پروژه محدودیت زمانی وجود نداشته باشد، تمامی فعالیت‌ها در زمان نرمال و عادی خود قابل انجام هستند و طبیعتاً کل پروژه نیز در زمان عادی خود به اتمام می‌رسد؛ اما اگر محدودیت زمانی وجود داشته باشد، باید برنامه زمان‌بندی جدیدی را تعریف کرد. در واقع باید زمان اجرای پروژه را تا حدی کاهش داد که هیچ محدودیتی نقض نشود. حال روش‌های مختلفی برای کاهش زمان انجام فعالیت‌ها وجود دارد که عمده‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: افزایش منابع در خدمت فعالیت، افزایش ساعات کاری انجام فعالیت و تغییر روش اجرایی فعالیت [۶].

مدیریت هزینه پروژه: فرآیندهای موردنیاز برای حصول اطمینان از تکمیل پروژه با بودجه مصوب را تشریح می‌کند. هزینه‌های یک پروژه را می‌توان به چهار دسته متفاوت اعم از هزینه‌های مستقیم^۱، غیرمستقیم^۲، تشویقی^۳ و جریمه^۴ تقسیم‌بندی کرد. هزینه مستقیم پروژه، مجموع هزینه‌های مستقیم فعالیت‌های پروژه است و هزینه غیرمستقیم پروژه که به «هزینه بالاسری» نیز معروف است، به فعالیت خاصی اختصاص ندارد و با توجه به زمان اجرای کل پروژه افزایش می‌یابد. مانند اجاره کارگاه، هزینه‌های مصرف آب و برق و غیره [۱۷]. هزینه‌های تشویقی زمانی لحاظ می‌شوند که پیمانکار، پروژه را زودتر از زمان مقرر خاتمه دهد. در این صورت پیمانکار علاوه بر اینکه توانسته است با کاهش زمان کل پروژه، از هزینه‌های غیرمستقیم خود بکاهد، بخشی از هزینه‌ها را نیز به‌ازای هر روز زودتر تحویل‌دادن پروژه برگردانده است. بدیهی است مبلغی که بابت هزینه تشویقی در نظر گرفته می‌شود، کاملاً توافقی است و در صورت تمایل کارفرما برای ایجاد انگیزه در پیمانکار برای زودتر خاتمه‌دادن پروژه، در قرارداد آورده می‌شود. دسته چهارم از هزینه‌ها، هزینه جریمه است که عبارت است از: مبلغی که پیمانکار

۱. Direct Cost

۲. Indirect Cost

۳. Incentive Cost

۴. Tardiness cost

باید به‌ازای هر روز دیرتر تحویل‌دادن پروژه به کارفرما بدهد. پوشش‌دادن انواع هزینه‌های احتمالی می‌تواند در اجرای موفقیت‌آمیز پروژه نقشی کلیدی را ایفا کند؛ چراکه هزینه پروژه در کنار زمان و کیفیت اصلی‌ترین اهداف مدیریت پروژه محسوب می‌شوند [۲۳].

مدیریت کیفیت پروژه. فرآیندهای موردنیاز برای حصول اطمینان از برآورده‌شدن نیازهایی که پروژه از بابت آن‌ها متعهد شده است را تشریح می‌کند. در تعریفی از کیفیت آمده است: «مجموع ویژگی‌ها و خصوصیات یک محصول یا خدمت که نمایانگر توانایی آن در برآوردن نیازهای صریح یا ضمنی است». به‌عبارتی دیگر میزان انطباق با الزامات و تناسب برای استفاده است؛ البته نباید از ارتباط میزان کیفیت با میزان رضایت استفاده‌کنندگان نیز غافل شد [۲۴].

پیشینه تجربی. کاهش زمان اجرای پروژه زمانی محقق می‌شود که از زمان اجرای حداقل یکی از فعالیت‌ها کاسته شده باشد. این کاهش زمان اجرا باعث می‌شود تا هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم پروژه دستخوش تغییر شوند. البته هزینه‌های مستقیم به گونه‌ای متفاوت با هزینه‌های غیرمستقیم تغییر می‌یابند. کاهش زمان اجرای پروژه باعث افزایش هزینه‌های مستقیم پروژه و کاهش هزینه‌های غیرمستقیم پروژه می‌شود [۶].

در نظر گرفتن عامل کیفیت، علاوه بر زمان و هزینه در بهینه‌سازی فعالیت‌های اجرایی یک پروژه، با وجود مشکلاتی که در جهت کمی‌ساختن آن برای فعالیت‌های پروژه وجود دارد از دیگر عوامل تأثیرگذار در انتخاب روش‌های اجرایی است و مدیران گاه راه‌حلی را جست‌وجو می‌کنند که در عین کاهش زمان و هزینه پروژه، افزایش کیفیت اجرای آن را در پی داشته باشد [۱۶]. پ ذکر این نکته ضروری است که کاهش زمان اجرای فعالیت‌ها می‌تواند در کیفیت آن‌ها، یعنی میزان نزدیکی کیفیت فعالیت انجام‌شده با سطح انتظارات کارفرما، تأثیرگذار باشد و از آن بکاهد. حال در بحث موازنه زمان، هزینه و کیفیت باید به‌گونه‌ای زمان انجام فعالیت‌ها را کاهش داد که مجموع هزینه‌های پروژه کمینه و کیفیت پروژه بیشینه شود؛ بنابراین مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت یک مسئله بهینه‌سازی است. در یک مسئله بهینه‌سازی ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام «تابع هدف» تعریف می‌شود [۳۲]. عموماً در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه توابع هدف متفاوت نیازمند بهینه‌سازی هم‌زمان با هم با توجه به یک مجموعه از قیدهای برابری و نابرابری است [۲۶].

روش‌های ارائه‌شده در پژوهش‌های مربوط به بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت اجرای پروژه‌ها را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته ریاضی و تقریبی تقسیم‌بندی کرد. از روش‌های ریاضی استفاده‌شده برای نمونه می‌توان به روش‌های برنامه‌ریزی خطی، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح، مدل برنامه‌ریزی پویا و همچنین مدل ترکیبی برنامه‌ریزی خطی و عدد صحیح اشاره کرد [۱۰].

روش‌های ریاضی در صورتی که قادر به حل مسئله‌ای باشند، بهینه‌بودن جواب تعیین شده را تضمین می‌کنند؛ ولی با افزایش تعداد متغیرهای طراحی و پیچیدگی آن کارایی خود را از دست می‌دهند؛ بنابراین با افزایش ابعاد و نیز پیچیده‌تر شدن مسائل، امکان حل آن‌ها با روش‌های ریاضی بهینه‌سازی وجود نخواهد داشت [۱۶].

بابو و سورش^۱ (۱۹۹۶)، نخستین پژوهشگرانی بودند که اظهار داشتند کیفیت یک پروژه ممکن است به‌واسطه فشرده‌سازی (یا تسریع) فعالیت‌ها تحت تأثیر قرار گیرد؛ به‌بیان دیگر وقتی زمان یک فعالیت کاهش می‌یابد، هزینه با یک شیب خطی افزایش و کیفیت با یک شیب خطی کاهش می‌یابد. آن‌ها سه مدل برنامه‌ریزی خطی را برای حل مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت پیشنهاد کردند [۷]. خانگ و مینت^۲ (۱۹۹۹)، به بررسی امکان اجرای فرضیه فشرده‌سازی ارائه‌شده توسط بابو و سورش (۱۹۹۶) در پروژه ساخت کارخانه سیمان در تایلد با ۸۴ فعالیت (با چند حالت اجرایی برای هر فعالیت) پرداختند. آن‌ها بیان کردند که استفاده از مدل بابو و سورش (۱۹۹۶)، می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش هزینه‌ها داشته باشد و برای منحنی هزینه در ۴ سطح مختلف کیفیت، آستانه‌های مختلف بودجه‌ای در نظر گرفتند تا مدیران بتوانند در هر یک از سطوح کیفیتی با اطمینان بیشتری تصمیم‌گیری کنند [۲۰]. فنگ و همکاران^۳ (۱۹۹۷)، نشان دادند که هر چه منابع استفاده‌شده در فعالیت‌های پروژه ساده و ارزان باشند به همان میزان زمان انجام فعالیت‌ها طولانی‌تر خواهد شد و به‌عبارت‌دیگر اگر برای منابع هزینه کمی اختصاص داده شود، زمان پروژه افزایش می‌یابد. آن‌ها برای حل مسئله بهینه‌سازی خود، یعنی حداقل‌سازی زمان و هزینه از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند [۱۰]. الرایس و کاندیل^۴ (۲۰۰۵)، مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت گسسته را از طریق الگوریتم ژنتیک چندهدفه بررسی کردند. در این مطالعه در یک مثال کاربردی، برای هر فعالیت، چندین روش اجرا در نظر گرفته شده است و همچنین از دو منبع نیروی کار و مواد استفاده می‌شود که ترکیب هر یک از این دو منبع و شرایط زمانی مختلف برای هر حالت اجرا می‌تواند به زمان، هزینه و کیفیتی متفاوت برای هر فعالیت منجر شود [۸].

طارقیان و طاهری^۵ (۲۰۰۶)، با ارائه سه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دوتایی، روند حل موازنه زمان، هزینه و کیفیت در مدیریت پروژه را بررسی کردند. سه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مرتبط با یکدیگر به‌گونه‌ای طراحی شدند که در هر مدل با تعیین مرزهای مطلوب برای دو عامل دیگر، تنها یکی از عوامل بهینه می‌شود [۳۵]. طارقیان و طاهری (۲۰۰۷)، در پژوهشی

۱. Babu & Suresh

۲. Khang, & Myint

۳. Feng, Lio & Burns

۴. El-Rayes & Kandil

۵. Tareghian & Taheri

دیگر با استفاده از جست‌وجوی پراکنده الکترومغناطیس با ذکر اهمیت در نظر گرفتن کیفیت در مسائل موازنه زمان و هزینه سنتی، یک روش مبتنی بر جست‌وجوی پراکنده تلفیق شده با الگوریتم الکترومغناطیس برای حل مسئله موازنه سه‌گانه ارائه کردند [۳۶]. افشار و همکاران (۲۰۰۷)، به شیوه و زمان استفاده از منابع در دسترس فعالیت‌های پروژه توجه ویژه‌ای داشتند. آن‌ها استفاده از منابع را برای برنامه‌ریزان و مدیران پروژه، چالشی مهم در به‌تعادل رساندن جنبه‌های مختلف پروژه عنوان کردند. به همین منظور از الگوریتم کلونی مورچگان برای بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت کلی پروژه بهره گرفتند [۳].

رحیمی و ایرانمنش (۲۰۰۸)، برای فعالیت‌های یک پروژه چندین حالت اجرایی مختلف در نظر گرفتند و برای حل مسئله خود و تعیین بهترین گزینه‌های اجرایی هر فعالیت از الگوریتم انبوه ذرات استفاده کردند. آن‌ها همچنین برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی خود دو نوع مسئله با اندازه‌های بزرگ و کوچک در نظر گرفتند [۳۰]. عبدالسلام و گاد^۱ (۲۰۰۹) از مدل پیشگیری-ارزیابی-شکست (PAF)^۲، برای ارزیابی هزینه‌های کیفیت و تعیین مقدار بهینه آن برای پروژه‌های ساخت‌وساز در دبی استفاده کردند [۱]. ژانگ و ژینگ^۳ (۲۰۱۰) از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در شرایط فازی با روش چندشاخصه فازی برای حل مسئله خود کمک گرفتند و برای خنثی کردن اثر داده‌های مبهم و غیردقیق، داده‌های مربوط به زمان، هزینه و کیفیت را با اعداد فازی تعریف کردند [۳۹]. مختاری و همکاران (۲۰۱۰) از الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله گسسته موازنه زمان و هزینه خود به‌عنوان یک مسئله صفر و یک غیرخطی استفاده کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن بودجه محدود برای پروژه مسئله خود سعی کردند تا احتمال اتمام پروژه در کمترین زمان ممکن را به حداکثر برسانند و از این طریق از هزینه‌های اضافی بالاسری بکاهد [۲۷]. افروزی و همکاران (۲۰۱۴)، برای هر فعالیت حالت‌های اجرایی مختلفی را در نظر گرفته و بیان کردند که منابع موردنیاز برای انجام فعالیت‌ها در هر حالت اجرایی با یکدیگر متفاوت است. به‌منظور حل این مسئله از الگوریتم فراابتکاری چندمنظوره (MOICA)^۴ استفاده شد که مقایسه نتایج آن با نتایج الگوریتم‌هایی از قبیل NSGAI^۵ و PESAI^۶، کارآبودن الگوریتم ارائه‌شده را نشان داد [۲].

کیم و همکاران^۷ (۲۰۱۲)، اظهار داشتند که برای تسریع در انجام پروژه و فشرده‌سازی فعالیت‌ها، این احتمال وجود دارد که از کیفیت فعالیت‌ها کاسته شود؛ بنابراین ضریبی تحت عنوان

۱. Abdelsalam & Gad

۲. Preventive Appraisal Failure

۳. Zhang & Xing

۴. Multi-objective imperialist competitive algorithm

۵. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

۶. Pareto Envelope-based Selection Algorithm II

۷. Kim, et al.

α اختصاص دادند که نشان‌دهنده نرخ ریسک عدم‌انطباق کیفیت فعالیت انجام‌شده با کیفیت مورد نظر پیمانکار است. آن‌ها تلاش کردند تا با حل مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط، تأثیر هزینه بالقوه کیفیت از دست‌رفته پروژه را به دلیل فشرده‌سازی بیش‌ازحد فعالیت‌ها کاهش دهند [۲۱]. ونفا هو و ژینوا هی^۱ (۲۰۱۴)، مدلی با رویکرد تخصیص منابع برای موازنه هزینه، کیفیت و زمان در پروژه‌های ساختمانی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک ارائه دادند و فعالیت‌ها را از چهار منظر مواد اولیه، تجهیزات، نیروی کار و مدیریت اجرا بررسی کردند [۱۵]. تران^۲ و همکاران (۲۰۱۵)، برای حل مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت در یک پروژه، الگوریتم کلونی زنبور عسل چندهدفه (ABC)^۳ و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)^۴ را با یکدیگر ترکیب کردند. این ادغام به منظور متعادل‌سازی مراحل جست‌وجو و استخراج از فرایند بهینه‌سازی صورت گرفت [۳۷].

منقسی و همکاران (۲۰۱۵)، برای بهینه‌سازی مسئله موازنه زمان هزینه و کیفیت در پروژه‌های ساخت‌وساز از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره جدیدی استفاده کردند. آن‌ها برای شناسایی تمام راه‌حل‌های بهینه پارتو، الگوریتم ژنتیک چندهدفه را با روش الگوریتم ژنتیک طبقه‌بندی نامغلوب توسعه دادند. این پژوهشگران برای نخستین بار از یک رویکرد استدلال شهودی در زمینه زمان‌بندی پروژه برای شناسایی بهترین راه‌حل پارتو در مسائل موازنه زمان، هزینه و کیفیت گسسته استفاده کردند [۲۸]. فو و ژانگ^۵ (۲۰۱۶)، اظهار کردند که کیفیت ضعیف فعالیت‌ها می‌تواند بر طول عمر پروژه و کل هزینه‌های آن تأثیر منفی داشته باشد؛ اما می‌توان با پیشگیری از کاهش کیفیت در حین انجام فعالیت‌ها، از شدت این تأثیر منفی کاست. آن‌ها با ارائه مدلی غیرخطی مبتنی بر مسئله برنامه‌ریزی پروژه و محدودشده توسط منابع چندحالتی و حل آن با الگوریتم جهش قورباغه سعی کردند تا هزینه‌های از دست‌رفته کیفیت بالقوه را کاهش دهند [۱۱]. عیدی و همکاران (۲۰۱۶)، بعد از طراحی سه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای انتخاب بهترین جواب از بین راه‌حل‌های موجود از روش ترکیبی AHP فازی و VIKOR که به‌عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شناخته می‌شود، استفاده کردند [۹]. خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه به همراه روش و نرم‌افزار حل در جدول ۱، آمده است.

۱. Hu & He

۲. Tran, Cheng & Cao

۳. Artificial Bee Colony

۴. differential evolution

۵. Fu & Zhang

جدول ۱. خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده

منبع	اهداف			محدودیت‌ها و متغیرها		روش حل	نرم‌افزار حل
	زمان	هزینه	کیفیت	حالت‌های اجرایی فعالیت	فعالیت جبرانی		
[۳۶]	✓	✓	✓	-	-	روش حل دقیق و الگوریتم فراابتکاری جستجوی پراکنده الکترومغناطیس	LINGO
[۳۰]	✓	✓	✓	✓	-	روش حل دقیق - الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات - الگوریتم ژنتیک	LINGO Visual Basic
[۳۹]	✓	✓	✓	-	-	الگوریتم فراابتکاری تجمع ذرات	Visual C++
[۲۷]	✓	✓		-	-	الگوریتم سیستم کلونی مورچه و روش حل دقیق (ACS)	MATLAB LINGO
[۲۱]	✓		✓		✓	مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	-
[۲]	✓	✓		✓	-	الگوریتم فراابتکاری چندمنظوره (MOICA)	-
[۱۵]	✓	✓	✓	✓	-	الگوریتم ژنتیک	MATLAB
[۳۷]	✓	✓	✓	-	-	ترکیب الگوریتم کلونی زنبور عسل چندهدفه (ABC) و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)	MATLAB
[۲۸]	✓	✓	✓	✓	-	تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) الگوریتم ژنتیک چندهدفه	MATLAB
[۱۱]	✓	✓	✓	-	✓	الگوریتم جهش قورباغه	Visual C++
[۹]	✓	✓	✓	-	-	روش (دقیق) هیبریدی حاصل از ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) با VIKOR	GAMS

MATLAB	الگوریتم ژنتیک	✓	✓	✓	✓	✓	این پژوهش
--------	----------------	---	---	---	---	---	-----------

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر نوع ماهیت جزو پژوهش‌های توصیفی است. داده‌های این پژوهش از نوع کمی هستند. از نظر مکان و زمان اجرا، این پژوهش یک پژوهش میدانی محسوب می‌شود و از نظر روش فرآیند نیز یک پژوهش کمی با مورد مطالعاتی است. مورد مطالعه در این پژوهش، پروژه ساخت فیلترهای خودشوینده (اسکرین فیلتر^۱) است که در صنعت آب کاربرد دارد. فیلترهای خودشوینده یکی از فرآیندهای تصفیه آب است و پیش تصفیه سیستم‌های اسمز معکوس به‌شمار می‌روند که موجب کاهش چشم‌گیر هزینه‌های بهره‌برداری سیستم‌های آب‌شیرین‌کن می‌شوند. امروزه در صنایع مختلف از جمله صنایع پتروشیمی و فولاد استفاده از فیلترهای آب در چرخه آب در گردش امری اجتناب‌ناپذیر است. کاربری و توانایی‌های ویژه این فیلترها در انجام مأموریت‌های خاص آن‌ها را از دیگر فیلترهای موجود متمایز می‌سازد. در ادامه ابتدا توضیحاتی پیرامون چگونگی شناسایی فعالیت‌های جبرانی ارائه می‌شود و سپس درباره نحوه مدل‌سازی و حل مدل صحبت خواهد شد.

تعریف فعالیت‌های جبرانی^۲. با توجه به محدودیت‌های زمانی و بودجه‌ای در هر پروژه، امکان اینکه برای همه فعالیت‌ها، فعالیت جبرانی تعریف شود، وجود ندارد. از طرفی برای برخی از فعالیت‌ها با توجه به ماهیت فعالیت نمی‌توان فعالیت جبرانی مجزایی به‌منظور بالابردن یا حفظ کیفیت مطلوب تعریف کرد؛ بنابراین تنها می‌توان برای برخی از فعالیت‌هایی که در معرض خطر کاهش کیفیت هستند، فعالیت‌های پیشگیرانه را تعریف کرد. نکته قابل‌ذکر این است که لزومی ندارد همه فعالیت‌های جبرانی به مرحله اجرا درآیند. فقط برخی از آن‌ها انتخاب و اجرا می‌شوند. نحوه انتخاب فعالیت‌های جبرانی برای اجرا، به این صورت است که برای هر فعالیتی که در معرض خطر کاهش کیفیت است، دو رفتار یا ریسکی که موجب عدم‌انطباق کیفی فعالیت می‌شود، معرفی شده و سپس احتمال وقوع هر یک از آن‌ها توسط خبرگان تعیین می‌شود. تأثیر هر یک از این دو نوع ریسک بر روی کاهش کیفیت فعالیت نیز با توجه به تجربه‌های پیشین به صورت درصد تعیین می‌شود؛ سپس برای رتبه‌بندی تمامی ریسک‌ها، احتمال وقوع در میزان تأثیر بر کیفیت ضرب می‌شود و رتبه‌بندی صورت می‌گیرد. حال با توجه به نرخ عدم‌انطباق کیفی که توسط مدیر پروژه انتخاب می‌شود، تعداد فعالیت‌هایی که نیاز به اصلاح دارند، مشخص شده و به همان تعداد از بالای جدول فعالیت‌ها که بر اساس ریسک‌ها رتبه‌بندی شده‌اند، انتخاب می‌شوند.

۱. Screen Filter

۲. Rework Activity

نرخ عدم انطباق کیفی مشخص کننده حداکثر تعداد فعالیت‌های جبرانی است که می‌توانند برای اجرا انتخاب شوند.

طراحی مدل ریاضی. در این پژوهش، مدلی با سه تابع هدف براب بهینه‌سازی و موازنه زمان، هزینه و کیفیت پیشنهاد می‌شود که ضمن در نظر گرفتن حالت‌های اجرایی مختلف فعالیت، به فعالیت‌های جبرانی برای بهبود کیفیت پروژه نیز توجه دارد. در طراحی مدل سعی بر آن است تا در پروژه ساخت محصول اسکریپت فیلتر، فعالیت‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن، با کمترین هزینه و بیشترین کیفیت به پایان برسند. با توجه به اینکه هر فعالیت به چندین روش مختلف قابل انجام است، انتخاب روش‌های اجرایی فعالیت‌ها به مدل واگذار می‌شود. نمادها، پارامترها و متغیرهای مدل به صورت جدول ۲، تعریف شده‌اند. در ادامه، هر یک از اهداف و محدودیت‌های مدل به طور جداگانه تبیین شده و نحوه ساخت آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترها و متغیرهای مدل

نماد	تعریف
N	تعداد فعالیت‌ها
K	شماره شیوه اجرایی هر فعالیت
IC	هزینه غیرمستقیم به ازای واحد زمان
TC	هزینه جریمه
T_{ik}	زمان انجام فعالیت i در حالت اجرایی k
C_{ik}	هزینه انجام فعالیت i در حالت اجرایی k
Q_{ik}	کیفیت انجام فعالیت i در حالت اجرایی k
ITC	هزینه تشویقی به ازای واحد زمان
T_{max}	مهلت اتمام پروژه
C_{max}	سقف هزینه مجاز
Q_{min}	حداقل کیفیت مجاز
W_i	وزن فعالیت i
X_{ik}	در صورت انتخاب فعالیت i در شیوه اجرایی k برابر یک و در غیر این صورت صفر است.
S_i	زمان شروع فعالیت i ام پروژه
$D(I)$	در صورت منفی شدن I برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است

تابع هدف اول: در تابع هدف اول زمان کمینه می‌شود. زمان کل پروژه برابر با مجموع زمان شروع آخرین فعالیت با زمان انجام آخرین فعالیت (در یکی از روش‌های اجرایی) خواهد بود.

$$\min f_1 = S_n + \sum_{k=1}^m (X_{nk} T_{nk}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

تابع هدف دوم: در تابع هدف دوم سعی بر این است تا هزینه به کمترین مقدار خود برسد. این تابع، هزینه‌های مستقیم، غیرمستقیم و تشویقی را در نظر می‌گیرد. هزینه غیرمستقیم پروژه مانند هزینه اجاره، هزینه مصرف برق و گاز و غیره به‌ازای واحد زمان در دسترس است و با توجه به مدت زمان انجام پروژه که از تابع هدف اول به‌دست می‌آید، هزینه غیرمستقیم کل پروژه محاسبه می‌شود. هزینه تشویقی نیز بر اساس واحد زمان است. زمانی که پروژه زودتر از زمان مقرر خاتمه یابد، به‌ازای هر روز زودتر تمام‌شدن پروژه، هزینه تشویقی لحاظ می‌شود. بدیهی است در صورتی که پروژه در زمان مقرر شده و یا دیرتر از آن پایان پذیرد، هزینه تشویقی وجود نخواهد داشت. به همین دلیل برای مشخص شدن میزان تأثیر هزینه تشویقی بر روی هزینه کل پروژه، سقف زمان تعیین شده برای اتمام پروژه، دو عدد مختلف در نظر گرفته می‌شود و برنامه با هر دو عدد اجرا می‌شود. در این صورت در یکی از اجراها هزینه تشویقی لحاظ شده است.

$$\min f2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ik} C_{ik} + (IC \cdot f_1) + (D(f_1 - T_{max}))(f_1 - T_{max})ITC \quad \text{رابطه (۲)}$$

تابع هدف سوم: در تابع هدف سوم، هدف بیشینه‌کردن کیفیت کل پروژه است. ابتدا به نقش هر یک از فعالیت‌ها در کیفیت کل پروژه وزن داده می‌شود؛ سپس با استفاده از مجموع موزون کیفیت فعالیت‌ها، کیفیت کل پروژه مشخص خواهد شد.

$$\max f3 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (X_{ik} W_i Q_{ik}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

محدودیت ۱: مجموع زمان فعالیت‌ها در مسیر بحرانی پروژه از زمان کل پروژه کمتر شود. این محدودیت، زمان کل پروژه را کنترل می‌کند تا از بیشینه زمان مقرر شده توسط مدیر پروژه بیشتر نشود.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m S_n + (X_{ik} T_{ik}) \leq T_{max} \quad \text{رابطه (۴)}$$

محدودیت ۲: مجموع هزینه‌های مستقیم، غیرمستقیم و تشویقی پروژه نباید از سقف بودجه تعریف شده برای اتمام پروژه بیشتر شود.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ik} C_{ik} + (IC \cdot f_1) + (D(f_1 - T_{max}))(f_1 - T_{max})ITC \leq C_{max} \quad \text{رابطه (۵)}$$

محدودیت ۳: این رابطه نشان می‌دهد که کیفیت نهایی پروژه نباید از حداقل کیفیت موردانتظار مدیر پروژه کمتر شود.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (X_{ik} W_i Q_{ik}) \geq Q_{min} \quad \text{رابطه (۶)}$$

محدودیت ۴: این محدودیت رعایت روابط پیش‌نیازی پایان - شروع را الزامی می‌کند. FS مجموعه‌ای متشکل از فعالیت‌های دوتایی است که رابطه پایان - شروع با یکدیگر دارند.

$$S_i + \sum_{k=1}^m X_{ik} T_{ik} \leq S_j ; \quad \forall (i, j) \in FS \quad \text{رابطه (۷)}$$

محدودیت ۵: مجموع وزن فعالیت‌ها باید برابر یک شود.

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

محدودیت ۶: این رابطه نشان می‌دهد که هر فعالیت باید فقط از طریق یکی از روش‌های اجرایی تعریف شده انجام شود.

$$\sum_{k=1}^m X_{ik} = 1 ; \quad \forall i \quad \text{رابطه (۹)}$$

محدودیت ۷: باینری بودن (دودویی بودن) متغیرهای X_{ik} و $D(l)$ در این رابطه نشان داده می‌شود.

$$X_{ik}, D(l) \in \{0,1\} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

محدودیت ۸: زمان شروع فعالیت‌ها نمی‌تواند عددی منفی باشد.

$$S_i \geq 0 ; \quad \forall i \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

محدودیت ۹: متغیری باینری را تعریف می‌کند که در صورت منفی بودن 1 برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

$$D(l) = 1 ; \quad \forall l < 0 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

مدل نهایی برنامه‌ریزی پروژه در این مطالعه به صورت مدل ۱، به‌دست آمد. در مورد مرحله گردآوری داده‌ها نیز به‌طور کلی داده‌ها را با چهار روش می‌توان از جامعه یا نمونه آماری استخراج کرد. این ابزارها عبارت‌اند از: پرسشنامه؛ مصاحبه؛ مشاهده و بررسی اسناد و مدارک [۳]. در این پژوهش برای گردآوری داده‌ها از مصاحبه، پرسشنامه و مطالعه اسناد و مدارک استفاده شده است. برای انجام این پژوهش دو پرسشنامه طراحی شده است. پرسشنامه نخست مربوط به تعیین فعالیت‌ها و شیوه‌های اجرایی هر فعالیت است. پرسشنامه دوم مربوط به جمع‌آوری اطلاعات زمان، هزینه و کیفیت هر یک از شیوه‌های اجرایی است. به‌منظور اندازه‌گیری کیفیت به‌صورت کیفی از مقیاس پنج‌تایی لیکرت استفاده شده است.

$$\left(\begin{array}{l}
 \min f1 = S_n + \sum_{k=1}^m (X_{nk} T_{nk}) \\
 \min f2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ik} C_{ik} + (IC \cdot f_1) + (D(f_1 - T_{max}))(f_1 - T_{max}) ITC \\
 \max f3 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (X_{ik} W_i Q_{ik}) \\
 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m S_n + (X_{ik} T_{ik}) \leq T_{max} \\
 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ik} C_{ik} + (IC \cdot f_1) + (D(f_1 - T_{max}))(f_1 - T_{max}) ITC \leq C_{max} \\
 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (X_{ik} W_i Q_{ik}) \geq Q_{min} \\
 S_i + \sum_{k=1}^m X_{ik} T_{ik} \leq S_j ; \quad \forall (i, j) \in FS \\
 \sum_{i=1}^n W_i = 1 \\
 \sum_{k=1}^m X_{ik} = 1 \quad ; \quad \forall i \\
 X_{ik}, D(l) \in \{0,1\} \\
 S_i \geq 0 \quad ; \quad \forall i \\
 D(l) = 1 \quad ; \quad \forall l < 0
 \end{array} \right) \quad \text{مدل (۱)}$$

حل مدل ریاضی با الگوریتم ژنتیک. از انواع الگوریتم‌های تقریبی بهینه‌سازی می‌توان به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری و فوق‌ابتکاری اشاره کرد. الگوریتم‌های ابتکاری علاوه بر

اینکه در حل مسائل گوناگون ناتوان هستند، در دام بهینه‌های محلی نیز می‌افتند و برای رفع این مشکل از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توان در حل انواع مسائل پیچیده و بدون ترس از توقف در بهینه‌های محلی بهره گرفت [۳۱]. این الگوریتم‌ها یک روند تکراری همراه با تکامل و بهبود تدریجی را تا رسیدن به جواب طی می‌کنند و در هر تکرار جواب بهتری تولید می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک، انبوه ذرات، کلونی زنبور عسل و الگوریتم مورچگان اشاره کرد.

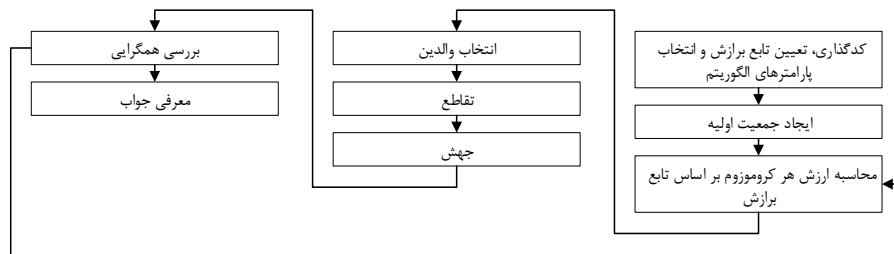
تحقیقات مختلفی که در موضوع موازنه زمان، هزینه و کیفیت انجام شده‌اند نشان داده‌اند که مدل‌های ریاضی ساخته شده در این نوع مسائل از نوع $NP\text{-Hard}$ تلقی می‌شوند [۲، ۹، ۱۱، ۲۱، ۲۷، ۳۰، ۳۶، ۳۷، ۳۹]. به همین دلیل به سراغ استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری رفته‌اند. اگر مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت به گونه‌ای در نظر گرفته شود که هر فعالیت به m روش مختلف قابل انجام باشد، مدل بسیار پیچیده‌تری خواهد بود. چون m^n روش مختلف برای اتمام پروژه وجود دارد. مدل پیشنهادی این مطالعه در پی یافتن بهترین روش اجرایی هر یک از فعالیت‌ها است تا در نهایت هر سه تابع هدف، یعنی کمینه‌شدن زمان و هزینه و بیشینه شدن کیفیت، محقق شوند. قطعاً چنین مدلی را به روش اولی باید یک مدل $NP\text{-Hard}$ دانست. از میان روش‌های مختلف پیشنهاد شده برای حل این مدل‌ها، پیشنهاد شده است [۱۵، ۲۸، ۳۰]، برای روش الگوریتم ژنتیک نتایج مطلوبی از حیث کیفیت پاسخ‌ها گزارش شده است. به این منظور در مطالعه حاضر نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است.

الگوریتم‌های ژنتیک یکی از اعضای خانواده مدل‌های محاسباتی الهام‌گرفته‌شده از روند تکامل است. این الگوریتم‌ها راه‌حل‌های بالقوه یک مسئله را در قالب کروموزوم‌های ساده‌ای کد کرده و سپس عملگرهای ترکیبی را بر روی این ساختارها اعمال می‌کنند. الگوریتم‌های ژنتیک اغلب به‌عنوان روشی برای بهینه‌سازی توابع شناخته می‌شوند. این الگوریتم ابزاری است که توسط آن ماشین می‌تواند مکانیسم انتخاب طبیعی را شبیه‌سازی کند. این عمل با جست‌وجو در فضای مسئله برای یافتن جواب برتر و نه الزاماً بهینه صورت می‌پذیرد [۲۲].

الگوریتم ژنتیک با تولید جمعیت اولیه و افزایش این جمعیت به وسیله عملگرهای گوناگون و با تکیه بر مقدار تابع هدف، شرایطی را مهیا می‌سازد تا بتوان از میان جواب‌های متنوع تولیدشده، در کمترین زمان ممکن، بهترین جواب را نسبت به سایر جواب‌ها انتخاب کرد. این الگوریتم دارای ۳ عملگر کلی انتخاب، تقاطع و جهش است [۲۵].

با توجه به صورت مسئله، متغیر اصلی مدل برنامه‌ریزی که زمان شروع فعالیت (S_i) است، انتخاب شد تا از طریق تولید نسل مقداردهی شود؛ سپس این متغیر کدگذاری شده و به شکل

کروموزومی مرکب از ۸ ژن نمایش داده شد. بر اساس تابع هدف، یک تابع برازندگی برای کروموزوم‌ها تعریف و یک جمعیت اولیه دلخواه نیز به‌طور تصادفی انتخاب شد. به دنبال آن، میزان تابع برازندگی برای هر کروموزوم جمعیت اولیه محاسبه شد. پس از آن مراحل نمایش داده شده در شکل ۱، به‌ترتیب انجام شدند.



شکل ۱. مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک در مطالعه حاضر

با توجه به مباحث بنیادی الگوریتم ژنتیک، نرخ‌های مربوط به هریک از پارامترهای الگوریتم مطابق با جدول ۳، در نظر گرفته شد. کدگذاری کروموزوم نیز به‌صورت دودویی (برای هر بیت یکی از دو مقدار صفر و یک) صورت گرفت. جمعیت کروموزوم‌ها به‌صورت واحد مطابق با نرخ جدول ۳، تعیین شد. برازندگی با توجه به رابطه ۱۳ که معرف تابع برازش پاسخ‌ها است به‌دست آمد.

$$f(X_i) = 2 - SP + \frac{2(SP - 1)(i - 1)}{N_{pop} - 1} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در این رابطه، f تابع برازندگی، X_i فردی دارای مرتبه i در جمعیت که در بهترین فرد $i=1$ و در بدترین فرد $i = N_{pop}$ است. N_{pop} معرف تعداد افراد یا همان جمعیت است. مقدار SP نیز به‌صورت تجربی برابر $0/8$ در نظر گرفته شد.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	تعداد جمعیت اولیه	تعداد تکرار	احتمال تقاطع	احتمال جهش
مقادیر	۱۰۰	۱۰۰	۰/۸	۰/۸

با توجه به شکل ۱، عملگرهای مورداستفاده در این مطالعه، عملگرهای تقاطع و جهش بوده‌اند. در عملگر تقاطع، هدف تولید فرزند جدید از والدین انتخاب‌شده در مرحله قبل بوده است.

به امید اینکه ویژگی‌های مثبت هر دو والد در فرزند ایجاد شود، بخش یا بخش‌هایی از کروموزوم‌های والدین با یکدیگر تعویض شده‌اند. این سبب شد فرزند جدید که ترکیبی از خصوصیات والدین را دارد از شایستگی بالاتری برخوردار شود. تقاطع به صورت چند نقطه‌ای انجام شد. در تقاطع چند نقطه‌ای برخلاف تک نقطه‌ای، قسمت‌های مشابه در کروموزوم‌های والد به صورت یکی در میان با یکدیگر تعویض شدند.

هدف از به کارگیری عملگر جهش نیز جلوگیری از به دام افتادن در بهینه‌های محلی و همچنین حفظ تنوع جمعیت ژنتیکی است [۳۳]. در روش‌های هوشمند، به ویژه الگوریتم ژنتیک، به دلیل خصلت تصادفی عملگر جهش حتی اگر هم از نقطه‌ای چون B شروع کنیم، باز ممکن است در میان راه نقطه A به صورت تصادفی انتخاب شود که در این صورت شانس رسیدن به نقطه ماکزیمم سراسری و عبور از ماکزیمم محلی افزایش می‌یابد. در جریان به کارگیری عملگر جهش، تعدادی از کروموزوم‌های فرزند به صورت تصادفی انتخاب شدند و به صورت تصادفی مقادیر یک یا چند ژن آن تغییر کرد. در صورتی که عدد تصادفی تولید شده از احتمال جهش ($0/8$) کمتر بود، جهش صورت گرفت و در غیر این صورت از جهش دادن صرف نظر شد.

با توجه به اینکه مجموعه جواب‌های شدنی مسئله بسیار گسترده بودند در هیچ‌یک از تلاش‌ها، هیچ کدام از محدودیت‌های مسئله نقض نشدند. در گام محاسبه همگرایی، وضعیت شدنی بودن تک تک جواب‌ها برای تمام محدودیت‌ها بررسی شد.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در پروژه ساخت یک عدد اسکرین فیلتر طبق نظر کارشناسان ۱۵ گروه فعالیت باید صورت گیرد. این ۱۵ گروه فعالیت شامل ۹۰ فعالیت منحصر به فرد است. هر فعالیت بین یک تا چهار روش مختلف برای انجام داشته و هر روش اجرایی زمان، هزینه و کیفیت مختص به خود را دارد. ۱۵ گروه فعالیت به شرح جدول ۴، است.

جدول ۴. فعالیت‌های اصلی پروژه

تعداد فعالیت‌ها	گروه فعالیت
۹	خرید مواد اولیه
۹	آنالیز مواد اولیه
۶	برشکاری
۶	نوردکاری
۴	قالب‌سازی
۴	ریخته‌گری و قالب‌گیری

تعداد فعالیت‌ها	گروه فعالیت
۴	آنالیز ریخته‌گری
۵	تراشکاری
۱۷	جوشکاری
۱۷	تست جوشکاری
۲	خم کاری
۴	قلاویز کاری
۱	تست هیدرواستاتیک
۱	آماده‌سازی سطح نهایی
۱	بسته‌بندی

نمونه‌ای از برآوردهای خبرگان برای زمان، هزینه و کیفیت هر یک از روش‌های اجرایی فعالیت‌ها در جدول ۵، آمده است.

جدول ۵. بخشی از داده‌های مربوط به فعالیت‌ها

گروه فعالیت	فعالیت	شیوه اجرایی	زمان	هزینه	کیفیت
تراشکاری	رینگ	تراشکاری دستی	۲۴	۱۷۰۰۰۰۰۰	۰/۵
		تراشکاری فرز CNC	۱۷	۲۲۰۰۰۰۰۰	۰/۷۵
		استفاده از هر دو روش	۱۶	۲۰۰۰۰۰۰۰	۰/۷۵
جوشکاری	جوش خطی بدنه اصلی ۱ و ۲	تیگ (جوشکاری آرگون)	۱۶	۲۰۰۰۰۰۰۰	۰/۹۲
		مگ (جوشکاری دی‌اکسید کربن)	۱۲	۱۵۰۰۰۰۰۰	۰/۷۵
		الکتروود	۱۲	۱۲۰۰۰۰۰۰	۰/۵

در این پژوهش از کارشناسان خواسته شد تا برای برخی از فعالیت‌هایی که بنا به تجربه ممکن است دچار کاهش کیفیت شوند، فعالیت جبرانی تعریف کنند؛ بنابراین برای فعالیت‌های ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۴، ۶۳ و ۶۴، فعالیت جبرانی تعریف شد. شرح کامل فعالیت‌های جبرانی در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. فعالیت‌های جبرانی

شماره فعالیت	فعالیت	فعالیت جبرانی
۴۸	جوش خطی بدنه اصلی ۱ و ۲	تحکیم جوش خطی بدنه اصلی ۱ و ۲
۴۹	جوش قطعات نیم‌دایره و لوله ۱ و ۱/۲	تحکیم جوش قطعات نیم‌دایره و لوله ۱ و ۱/۲
۵۰	جوش بدنه اصلی ۱ و ۲	تحکیم جوش بدنه اصلی ۱ و ۲
۵۴	جوش بدنه اصلی ۱ و ۲ و صفحه داخلی ۲، داخلی ۲، فیلتر و دو عدد ساپورت و صفحه داخلی ۱	تحکیم جوش بدنه اصلی ۱ و ۲ و صفحه داخلی ۲، فیلتر و دو عدد ساپورت و صفحه داخلی ۱
۶۳	جوش ۱ (شامل: داخل بدنه اصلی، نگه دارنده فیلتر، پلاک، لوله ۱۰ و فلنج ۱۰، لوله ۱۸ و فلنج ۱۸، دو عدد رینگ، گرد ۱۱۰، بلبرینگ، لوله و زانو)	تحکیم جوش ۱ (شامل: داخل بدنه اصلی، نگه دارنده فیلتر، پلاک، لوله ۱۰ و فلنج ۱۰، لوله ۱۸ و فلنج ۱۸، دو عدد رینگ، گرد ۱۱۰، بلبرینگ، لوله و زانو)
۶۴	جوش ۲ (شامل: جوش ۱، بدنه موتور و درب بدنه موتور و صفحه اتصال بدنه اصلی به موتور و کپ)	تحکیم جوش ۲ (شامل: جوش ۱، بدنه موتور و درب بدنه موتور و صفحه اتصال بدنه اصلی به موتور و کپ)

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، امکان اینکه همه فعالیت‌های جبرانی برای اجرا انتخاب شوند وجود ندارد؛ بنابراین با تعریف دو نوع ریسک برای این فعالیت‌ها تلاش می‌شود تا فقط برخی از فعالیت‌های جبرانی اجرایی شوند. نرخ عدم انطباق کیفی از سوی مدیر پروژه برابر با ۴ درصد تعداد کل فعالیت‌ها عنوان شده است؛ از این رو با توجه به تعداد کل فعالیت‌ها که ۹۳ مورد است، حداکثر باید ۳ فعالیت جبرانی انتخاب شود. حال با توجه به احتمال وقوع ریسک‌ها و میزان تأثیر آن‌ها بر روی کاهش کیفیت، این ۳ فعالیت مشخص می‌شوند. با توجه به اینکه ۶ فعالیت انتخاب شده همگی از دسته فعالیت اصلی جوشکاری هستند و فعالیت جبرانی آن‌ها نیز از نوع تحکیم جوشکاری است، برای همگی آن‌ها دو نوع ریسک تعریف می‌شود؛ اما احتمال وقوع و میزان تأثیر بر کاهش کیفیت برای هر یک از ۶ فعالیت متفاوت است.

ریسک نخست، خطر اکسیدشدن است که باعث خردگی جوش می‌شود و ممکن است عمر جوش را پایین بیاورد؛ بنابراین با انجام عملیات جبرانی تحکیم جوشکاری سعی می‌شود تا اکسیدزدایی به موقع صورت بگیرد. ریسک دوم مورد قبول واقع نشدن جوش انجام گرفته در زمان بازدید ناظر است. بعد از برخی از فعالیت‌های جوشکاری، ناظر باید جوش انجام شده را تأیید کند و یکی از عواملی که می‌تواند احتمال تأیید ناظر را بالا ببرد، تمیز بودن محل جوش است؛ بنابراین با

انجام عملیات جبرانی تحکیم جوش که باعث تمیزشدن و بهتر دیده‌شدن محل جوش می‌شود، می‌توان با اطمینان بیشتری انتظار تأیید ناظر را داشت.

جدول ۷. مقیاس احتمال‌ها

احتمال وقوع کم	متوسط رو به پایین	متوسط	متوسط رو به بالا	زیاد
۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹

جدول ۸. مقیاس تأثیر بر کاهش کیفیت

تأثیر بر کاهش کیفیت کم	متوسط رو به پایین	متوسط	متوسط رو به بالا	زیاد
۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹

جدول ۹. ریسک‌های هر فعالیت

فعالیت	ریسک	احتمال وقوع ریسک	میزان تأثیر ریسک بر کاهش کیفیت	نمره ریسک عدم انطباق کیفی
۴۸	۱	۰/۳	۰/۷	۰/۲۱
	۲	۰/۳	۰/۱	۰/۰۳
۴۹	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۲۵
	۲	۰/۵	۰/۱	۰/۰۵
۵۰	۱	۰/۷	۰/۷	۰/۴۹
	۲	۰/۵	۰/۱	۰/۰۵
۵۴	۱	۰/۷	۰/۵	۰/۳۵
	۲	۰/۵	۰/۱	۰/۰۵
۶۳	۱	۰/۹	۰/۷	۰/۶۳
	۲	۰/۷	۰/۳	۰/۲۱
۶۴	۱	۰/۷	۰/۷	۰/۴۹
	۲	۰/۷	۰/۳	۰/۲۱

هر چه نمره ریسک عدم انطباق کیفی فعالیتی بیشتر باشد به این معنی است که ریسک‌ها با احتمال بیشتری بر کیفیت فعالیت تأثیرگذار هستند و احتمالاً فعالیت با کیفیتی پایین‌تر از حد انتظار انجام می‌شود؛ بنابراین با انجام فعالیت جبرانی امید است که کاهش کیفیت مزبور جبران شود. حال با توجه به نمره ریسک عدم انطباق کیفی هر یک از ریسک‌ها برای هر یک از ۶ فعالیت، مشخص می‌شود که به ترتیب فقط برای فعالیت‌های ۶۳، ۶۴ و ۵۰ باید فعالیت جبرانی انجام گیرد. در واقع با اضافه‌شدن ۳ فعالیت جبرانی، اکنون تعداد فعالیت‌های کل پروژه ۹۳ فعالیت

است. مسلماً برای هر یک از این ۳ فعالیت جبرانی اضافه‌شده، زمان، هزینه و کیفیت جداگانه‌ای را باید در نظر داشت.

در این مطالعه زمان بر حسب ساعت، هزینه بر حسب ریال و کیفیت بر حسب درصد نشان داده می‌شود. با توجه به هم‌مقیاس نبودن این ۳ تابع هدف، تمامی داده‌ها با استفاده از روش بی‌مقیاس‌سازی خطی، مطابق با رابطه ۱۴، نرمال‌سازی می‌شوند.

$$n_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_1^b X_{ij}} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در این مطالعه روابط پیش‌نیازی از نوع پایان - شروع برای فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است. به این صورت که حتماً باید فعالیت اولی به اتمام برسد تا فعالیت بعدی شروع شود. تمامی روابط پیش‌نیازی در جدول ۱۰، به صورت زوجی نمایش داده شده است. برای هر زوج فعالیت، در ستون P فعالیت پیش‌نیاز و در ستون S فعالیت پس‌نیاز معرفی شده است.

جدول ۱۰. روابط پیش‌نیازی

S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P
۶۰	۲۴	۹۲	۹۱	۷۶	۵۷	۶۴	۸۲	۵۵	۷۰	۴۲	۳۸
۷۹	۶۰	۵۹	۲۹	۹۳	۹۲	۸۳	۶۴	۵۵	۱۹	۶۵	۸۰
۵۶	۴۵	۵۹	۳۰	۵۸	۸۶	۴۱	۳۷	۵۵	۷۳	۶۳	۸۱
۶۲	۴۷	۵۹	۷۷	۵۸	۹۰	۶۶	۸۳	۷۴	۵۵	۸۲	۶۳
۶۲	۱۷	۵۹	۶۹	۷۷	۵۸	۶۶	۷۸	۶۱	۱۵	۸۰	۶۱
۸۱	۶۲	۵۹	۴۴	۵۷	۲۸	۶۶	۷۹	۶۴	۸۵	۵۴	۸۸
۶۵	۶۴	۷۸	۵۹	۴۹	۸۹	۸۴	۶۶	۶۴	۷۴	۵۴	۷۲
۴۶	۴۲	۶۱	۲۰	۴۹	۲۱	۶۷	۶۶	۶۴	۷۵	۷۳	۵۳
۱۸	۹	۶۰	۴۳	۶۹	۴۹	۵۷	۴۶	۶۴	۷۶	۳۸	۳۴
۴۳	۳۹	۲۹	۲۰	۲۵	۱۹	۵۳	۸۷	۴۸	۲۵	۲۴	۱۸
۳۶	۳۲	۳۰	۲۰	۲۶	۱۹	۵۳	۷۱	۴۸	۲۶	۱۳	۴
۴۰	۳۶	۸۶	۲۰	۸۸	۱۹	۷۲	۵۳	۶۸	۴۸	۲۲	۱۳
۴۴	۴۰	۹۰	۲۰	۸۷	۱۹	۳۷	۳۳	۴۵	۴۱	۱۴	۵
		۸۹	۲۰	۵۲	۱۹	۵۶	۲۷	۵۰	۶۸	۲۳	۱۴
		۱۲	۳	۲۷	۱۹	۵۱	۵۰	۷۰	۵۰	۱۵	۶
		۲۱	۱۲	۲۸	۱۹	۱۰	۱	۹۱	۸۴	۱۶	۷
		۳۵	۳۱	۱۱	۲	۱۹	۱۰	۷۱	۵۲	۴۷	۱۶

۳۹	۳۵	۲۰	۱۱	۸۵	۱۹	۷۵	۵۶	۱۷	۸
----	----	----	----	----	----	----	----	----	---

در نهایت برای تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله تک‌هدفه از روش مجموع وزن‌دار استفاده می‌شود. به این منظور وزن‌های مربوط به هر یک از توابع که در جدول ۱۱، نشان داده شده است از خبرگان امر تهیه می‌شود. مقادیر برخی از پارامترهای مدل در جدول ۱۲، آمده است.

جدول ۱۱. وزن توابع هدف

زمان	هزینه	کیفیت
۰/۲	۰/۴۵	۰/۳۵

جدول ۱۲. مقادیر پارامترهای مدل

نماد	مقادیر
N	۹۳
T _{max}	۴۲۹ ساعت
C _{max}	۹۰۰۰۰۰۰۰ ریال
Q _{min}	۷۳ درصد
IC	۶۸۰۰۰۰ ریال
ITC	۳۴۰۰۰۰ ریال
TC	۲۴۰۰۰۰۰ ریال

مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، در محیط نرم‌افزاری متلب ۲۰۱۴ در مدت ۶ دقیقه و ۳۵ ثانیه حل شد. مشخصات سیستم مورد استفاده در این پژوهش با عملکرد سیستم عامل Windows، چهار گیگابایت حافظه داخلی و پردازنده پنج‌هسته‌ای است. نتایج نهایی حل مدل در جدول ۱۳، مشاهده می‌شود.

جدول ۱۳. نتایج حل مدل به روش الگوریتم ژنتیک

زمان (ساعت)	هزینه (ریال)	کیفیت (درصد)
۲۰۶	۶۸۱۰۰۰۰۰۰	۷۴

زمان پروژه ۲۰۶ ساعت به دست آمد که از حداکثر زمان در نظر گرفته شده توسط مدیر پروژه، یعنی ۴۲۹ ساعت، به مراتب کمتر است. هزینه تمام شده پروژه برابر با ۶۸۱۰۰۰۰۰۰ ریال محاسبه شد که از سقف هزینه مجاز، یعنی ۹۰۰۰۰۰۰۰ ریال، کمتر است. کیفیتی برابر با ۷۴ درصد تعیین شد که از حداقل کیفیت تعیین شده بیشتر است.

دو متغیر این مدل، انتخاب حالت اجرایی هر یک از فعالیت‌ها و زمان شروع فعالیت‌ها است. در جدول ۱۴، بهترین حالت اجرایی هر فعالیت برای رسیدن به بهینه‌ترین حالت از توابع زمان، هزینه و کیفیت و همچنین زمان شروع فعالیت‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱۴. حالت اجرایی و زمان شروع فعالیت‌ها

فعالیت	حالت اجرا	زمان شروع	فعالیت	حالت اجرا	زمان شروع	فعالیت	حالت اجرا	زمان شروع	فعالیت	حالت اجرا	زمان شروع
۱	۱	۰	۲۵	۲	۸۸	۴۹	۱	۱۰۰	۷۳	۳	۱۲۱
۲	۱	۰	۲۶	۲	۸۸	۵۰	۱	۱۱۶	۷۴	۳	۱۳۴
۳	۱	۰	۲۷	۲	۸۸	۵۱	۲	۱۲۴	۷۵	۴	۱۰۰
۴	۱	۰	۲۸	۲	۸۸	۵۲	۲	۸۸	۷۶	۳	۹۹
۵	۱	۰	۲۹	۲	۸۸	۵۳	۱	۱۰۰	۷۷	۴	۱۰۸
۶	۱	۰	۳۰	۲	۸۸	۵۴	۱	۱۱۸	۷۸	۴	۱۲۷
۷	۱	۰	۳۱	۳	۰	۵۵	۱	۱۳۲	۷۹	۳	۹۶
۸	۱	۰	۳۲	۲	۰	۵۶	۱	۹۶	۸۰	۳	۹۶
۹	۱	۰	۳۳	۲	۰	۵۷	۲	۹۶	۸۱	۴	۸۲
۱۰	۱	۵۶	۳۴	۳	۰	۵۸	۱	۱۰۰	۸۲	۴	۱۱۲
۱۱	۱	۵۶	۳۵	۱	۵	۵۹	۱	۱۲۴	۸۳	۳	۱۵۴
۱۲	۱	۵۶	۳۶	۱	۱۰	۶۰	۱	۸۸	۸۴	۲	۱۶۶
۱۳	۱	۵۶	۳۷	۱	۳	۶۱	۲	۸۸	۸۵	۱	۸۸
۱۴	۱	۵۶	۳۸	۱	۳	۶۲	۱	۸۰	۸۶	۱	۸۸
۱۵	۱	۵۶	۳۹	۲	۱۰	۶۳	۱	۱۰۴	۸۷	۲	۸۸
۱۶	۱	۵۶	۴۰	۱	۱۷	۶۴	۳	۱۴۲	۸۸	۱	۸۸
۱۷	۲	۵۶	۴۱	۲	۱۰	۶۵	۱	۱۵۴	۸۹	۲	۸۸
۱۸	۱	۵۶	۴۲	۱	۱۰	۶۶	۲	۱۶۲	۹۰	۲	۸۸
۱۹	۳	۶۴	۴۳	۱	۳۴	۶۷	۱	۱۶۶	۹۱	۱	۱۷۴
۲۰	۳	۶۴	۴۴	۱	۲۴	۶۸	۱	۱۰۸	۹۲	۱	۱۹۰
۲۱	۱	۶۴	۴۵	۱	۳۴	۶۹	۴	۱۰۴	۹۳	۳	۱۹۸
۲۲	۱	۶۴	۴۶	۱	۱۷	۷۰	۲	۱۲۴			
۲۳	۱	۶۴	۴۷	۱	۶۴	۷۱	۳	۹۲			
۲۴	۱	۶۴	۴۸	۲	۹۶	۷۲	۴	۱۰۲			

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

اتمام یک پروژه در کوتاه‌ترین زمان و با کمترین هزینه و همچنین با بیشترین کیفیت ممکن یکی از مسائلی است که برای مدیران پروژه دارای اهمیت بسزایی است. موازنه این ۳ عامل در

حالی که در تضاد با یکدیگر هستند و افزایش یک عامل باعث کاهش عامل دیگر می‌شود، می‌تواند باعث موفقیت یک پروژه شود. هر فعالیت می‌تواند چندین روش اجرا داشته باشد و طبیعتاً هر روش اجرایی نیز با زمان، هزینه و کیفیت متفاوتی انجام‌پذیر است. مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت در پی این است که هر فعالیت در ضمن رعایت روابط پیش‌نیازی با کدام روش اجرایی انجام شود. در این پژوهش با در نظر گرفتن روابط پیش‌نیازی پایان - شروع برای فعالیت‌ها، فعالیت جبرانی برای جلوگیری از کاهش کیفیت احتمالی و همچنین منظور کردن هزینه تشویقی و جریمه، سعی شده است تا مسئله به دنیای واقعی شباهت بیشتری داشته باشد. نتایج به دست آمده از حل این مسئله در قالب مدل ارائه شده و با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک، نشان‌دهنده کارآبودن این الگوریتم در حل سریع مسئله است. برای مطالعات آتی می‌توان در چند شاخه متنوع مدل را توسعه داد. در شاخه محتوایی علاوه بر اهداف سه‌گانه که به‌طور خاص منافع پروژه را در نظر دارد به اهداف زیست‌محیطی که بر منافع جامعه تأکید دارد نیز توجه کرد. در شاخه کیفیت‌افزایی به فرآیند برنامه‌ریزی می‌توان عوامل دیگر همچون هزینه تشویقی و هزینه جریمه را در قالب محدودیت‌های تصادفی به مسئله افزود. در رابطه با داده‌ها نیز می‌توان داده‌های مربوط به زمان هزینه و کیفیت را با اعداد فازی تعریف کرد.

پیشنهاد‌های کاربردی. مدل ارائه شده در این پژوهش چند خصوصیت کاربردی ویژه دارد. نخستین خصوصیت در نظر داشتن روش‌های اجرایی متفاوت است که باعث می‌شود تا تمامی راه‌های ممکن برای اتمام پروژه بررسی شوند و دومین خصوصیت، در نظر داشتن هزینه تشویقی است که باعث می‌شود پیمانکار پروژه تمام سعی کند تا با رعایت حفظ کیفیت کل، پروژه را در سریع‌ترین زمان ممکن خاتمه دهد. در این صورت است که موفق شده است به‌ازای هر روز زودتر تحویل دادن پروژه مبلغی از هزینه‌های صورت گرفته را برگرداند. درحقیقت در این مورد، به‌خصوص با کاهش زمان پروژه، بخشی از هزینه کل هم کاهش می‌یابد. با توجه به وزن بالای تابع هزینه در این مورد مطالعاتی، طبیعتاً وجود بندی در قرارداد مابین پیمانکار و کارفرما به نام «هزینه تشویقی»، می‌تواند از طرفی با کاهش هزینه‌ها، سود بیشتری را عاید پیمانکار کند و از طرفی باعث می‌شود تا کارفرما در سریع‌ترین زمان ممکن پروژه را از پیمانکار تحویل بگیرد.

سومین خصوصیت مدل را می‌توان در نظر داشتن هزینه جریمه عنوان کرد. هزینه‌ای که باعث می‌شود تا پیمانکار در صورت دیرتر به اتمام رساندن پروژه از مهلت مقرر شده در قرارداد، به‌ازای هر روز مبلغی جریمه شود. در این صورت پیمانکار به‌طور مضاعف ملزم می‌شود تا در موعد تحویل، پروژه را خاتمه دهد. چهارمین خصوصیت نیز در نظر گرفتن فعالیت جبرانی است که به‌منظور جلوگیری از کاهش کیفیت احتمالی برخی از فعالیت‌ها تعریف می‌شود.

منابع

1. Abdelsalam, H. M., & Gad, M. M. (2009). Cost of quality in Dubai: An analytical case study of residential construction projects. *International journal of project management*, 27(5), 501-511.
2. 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 resource-constrained situations. *Computers & Operations Research*, 50, 80-96.
3. Afshar, A., Kaveh, A., & Shoghli, O. R. (2007). Multi-objective optimization of time-cost-quality using multi-colony ant algorithm. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 8(2), 854-1563.
4. Akhundy, A. M.; Keshavarz, T. (2017). Provide a multi-objective genetic algorithm to solve the multi-objective problem of cost-time-quality balance of the project, taking into account the predictive relationships and failure of activities in case of lack of resources. Second International Conference on Management and Accounting, Tehran, Salehan Higher Education Institute (In Persian).
5. Amouzad Mahdirji, H., Mokhtarzadeh, N., & Radmand, S. (2017). Model gray fuzzy ideal planning to balance time, cost, risk and project quality. *Journal of Industrial Management Perspective*, 7(3), 47-80(In Persian).
6. Ataei, Y., & Shirviehzad, H. (2012). Time-cost balance in the project of constructing a gas network in Sadra city of Shiraz with the assumption of minimum cost. First National Conference on Industrial Engineering and Systems. Najafabad, Islamic Azad University (In Persian).
7. Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). Project management with time, cost, and quality considerations. *European Journal of Operational Research*, 88(2), 320-327.
8. El-Rayes, K., & Kandil, A. (2005). Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction. *Journal of construction Engineering and Management*, 131(4), 477-486.
9. Eydi, A., Farughi, H., & Abdi, F. (2016). A hybrid method based on fuzzy AHP and VIKOR for the discrete time-cost-quality trade-off problem. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 19(2), 105-116.
10. Feng, C. W., Liu, L., & Burns, S. A. (1997). Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems. *Journal of computing in civil engineering*, 11(3), 184-189.
11. Fu, F., & Zhang, T. (2016). A new model for solving time-cost-quality trade-off problems in construction. *PloS one*, 11(12), e0167142
12. Gholizadeh, E., Afshar Najafi, B. (2018). Solve the two-problem multi-tasking problem of the project by considering programming and limited resources using the NSGA-II algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(2), 165-187(In Persian).

13. Guide, A. (2000). Project management body of knowledge (pmbok® guide). In Project Management Institute.
14. Hashemzadeh Zargar, M., GhaleNoei, M., & Rezaei Nik, I. (2015). Modeling and problem solving cost-time balance in case of certainty (case study). *Twelfth International Conference on Industrial Engineering*. Tehran, Iranian Industrial Engineering Association, Kharazmi University (In Persian).
15. Hu, W., & He, X. (2014). An innovative time-cost-quality tradeoff modeling of building construction project based on resource allocation. *The Scientific World Journal*, 2014 .
16. Jafarnejad, A., Sahab, M. Q., & Akbarpour, A. (2010). Optimize time-cost-quality optimization using a direct matching search algorithm. *5th National Congress of Civil Engineering*. Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian).
17. Karimirad, M., Najafi, S. I., Khazli, M., & Meftahi, H. (2015). Balance of project cost and time in fuzzy network with linear programming. 6th International Conference on Economics, Management and Engineering Sciences, Belgium, *International Center for Academic Communication* (In Persian).
18. Kerzner, H., & Kerzner, H. R. (2017). Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons.
19. Khaki, G. (2003). *Research Method with Thesis Approach*. Bazetab Publishing, First Edition (In Persian).
20. Khang, D. B., & Myint, Y. M. (1999). Time, cost and quality trade-off in project management: a case study. *International journal of project management*, 17(4), 249-256.
21. Kim, J., Kang, C., & Hwang, I. (2012). A practical approach to project scheduling: considering the potential quality loss cost in the time-cost tradeoff problem. *International Journal of Project Management*, 30(2), 264-272.
22. Laguna, M. and Marti, R. (2000). *Experimental Testing of Advanced Scatter Search Designs for Global Optimization of Multimodal Functions*. University of Colorado, Boulder.
23. Lazarević, D., & Prlinčević, B. (2014). *Project Management: Cost, Time and Quality*. 8th International Quality Conference, Center for Quality. Quality, Faculty of Engineering, University of Kragujevac.
24. Martínez-Costa, M., Choi, T. Y., Martínez, J. A., & Martínez-Lorente, A. R. (2009). ISO 9000/1994, ISO 9001/2000 and TQM: The performance debate revisited. *Journal of Operations Management*, 27(6), 495-511.
25. Mehdi, A. (2006). *An Introduction to Genetic Algorithms and Its Applications*. Naghus Andisheh Publications (In Persian).
26. Moghaddam, A. A., Seifi, A., Niknam, T., & Pahlavani, M. R. A. (2011). Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source. *Energy*, 36(11), 6490-6507.
27. Mokhtari, H., Kazemzadeh, R. B., & Salmasnia, A. (2010). Time-cost tradeoff analysis in project management: An ant system approach. *IEEE Transactions on engineering management*, 58(1), 36-43.

28. Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., & Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects. *Expert systems with applications*, 42(6), 3089-3104.
29. Alam Tabriz, Akbar, Farrokh, Mojtaba, Ahmadi, Ehsan. (2014). Provide a model for predicting the cost and final time of projects with a cross-cutting approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(1), 51-65. (In Persian).
30. Rahimi, M., & Iranmanesh, H. (2008). Multi objective particle swarm optimization for a discrete time, cost and quality trade-off problem. *World Applied Sciences Journal*, 4(2), 270-276.
31. Rajabioun, R. (2011). Cuckoo optimization algorithm. *Applied soft computing*, 11(8), 5508-5518.
32. Razani, F., Asadi, A., & Hosseini, M. (2014). Application of genetic algorithms and ant community in optimal location of viscose dampers, 2nd International Congress of Structures, Architecture and Urban Development, Tabriz, Permanent Secretariat of the International Congress of Structures, Architecture and Urban Development (In Persian).
33. Selajgeh, I., & Nobahari, M. (2003). Optimization of Mutation Operator in Genetic Algorithm, 5th National Conference on Smart Systems, Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad, https://www.civilica.com/Paper-ICS05-ICS05_008.html(In Persian).
34. Taghizadeh Yazdi, M. R., Ghafouri, S. (2016). Provide a mathematical model for the problem of cost-time balance - environmental effects and solve it with meta-algorithms of particle density and night cream. *Journal of Industrial Management Perspective*, 6(4), 97-121 (In Persian).
35. Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2006). On the discrete time, cost and quality trade-off problem. *Applied mathematics and computation*, 181(2), 1305-1312.
36. Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2007). A solution procedure for the discrete time, cost and quality tradeoff problem using electromagnetic scatter search. *Applied mathematics and computation*, 190(2), 1136-1145.
37. Tran, D. H., Cheng, M. Y., & Cao, M. T. (2015). Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time–cost–quality tradeoff problem. *Knowledge-Based Systems*, 74, 176-186.
38. Williams, T. (2005). Assessing and moving on from the dominant project management discourse in the light of project overruns. *IEEE Transactions on engineering management*, 52(4), 497-508.
39. Zhang, H., & Xing, F. (2010). Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time–cost–quality tradeoff in construction. *Automation in Construction*, 19(8), 1067-1075.