چشم‌انداز مدیریت صنعتی
سال یازدهم، شماره ۴۱، بهار ۱۴۰۰
شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
ص‌ص: ۱۴۷-۱۷۳

توسعه مدل برنامه‌ریزی پروژه با درنظرگرفتن 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-Hardبودن چنین مسائلی در ابعاد بزرگ، از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده می‌شود. در این پژوهش یک مدل با سه تابع هدف به‌منظور حل مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت در برنامه‌ریزی پروژه ارائه شده است. آنچه این مدل را متمایز می‌کند، این است که علاوه بر درنظرگرفتن روش‌های اجرایی متفاوت برای هر یک از فعالیت‌ها، برای برخی از فعالیت‌ها به‌منظور جلوگیری از کاهش کیفیت، فعالیت جبرانی تعریف می‌شود. از دیگر ویژگی‌های این مدل می‌توان به پوشش‌دادن هزینه‌های مختلف اعم از هزینه تشویقی و جریمه اشاره کرد. درنظرگرفتن فعالیت جبرانی می‌تواند از کاهش کیفیت جلوگیری کند. درنظرگرفتن هزینه جریمه و تشویقی نیز می‌تواند باعث انگیزه‌ای در جهت زودتر خاتمه‌دادن 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 درنظرگرفتن 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 تعریف‌شده، ممکن است به کاهش سود و حتی برخی اوقات به شکست پروژه‌ها منجر شود. پیش‌بینی هزینه و زمان نهایی پروژها، یکی از اقداماتی است که برای کنترل هزینه و زمان پروژه‌ها موردتوجه قرار می‌گیرد [۲۹]. هر پروژه از فعالیت‌هایی مشخص تشکیل شده است که با روش‌ها و حالات مختلفی قابل‌اجرا 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 دورشدن 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؛ ازاین‌رو این اهداف دارای نوعی تعارض با یکدیگر هستند. بنابراین باید روشی طراحی شود که به‌وسیله آن بتوان مدیران پروژه را در زمان‌بندی و انتخاب حالات مناسب برای هر یک از فعالیت‌های پروژه یاری کرد؛ به‌نحوی‌که 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. ازآنجاکه بیشتر پروژه‌ها دارای شرایط و فعالیت‌های منحصربه‌فرد هستند، احتمالاً نمی‌توان استانداردهای مشخص، ازپیش‌تعیین‌شده 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 تعیین‌شده، با هزینه پیش‌بینی‌شده و همین‌طور در سطح کیفیت موردانتظار به پایان نرسیده‌اند. پژوهشگران دلیل این نوع از شکست‌ها در مدیریت پروژه‌ها را در فقدان توجه کافی به مقوله ریسک و عدم‌قطعیت‌ها 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 به‌راحتی 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. درواقع می‌توان گفت که این فعالیت‌ها ریسک اجرایی بالایی دارند. بهتر است مدیر پروژه قبل از شروع پروژه، این قبیل فعالیت‌ها را شناسایی کنند و تمهیدات لازم را در جهت جلوگیری از کاهش کیفیت انجام دهد. در موارد بسیاری لازم است پروژه را زودتر از تاریخ محاسبه‌شده بر روی شبکه تکمیل کرد. در چنین شرایطی یکی از راه‌حل‌های ممکن برای کوتاه‌کردن زمان اجرای پروژه، تسریع انجام فعالیت‌ها است که می‌تواند سبب کاهش کیفیت شود [۳۴]. یکی از راه‌های حفظ کیفیت مطلوب برای چنین فعالیت‌هایی، تعریف‌کردن یک فعالیت جبرانی[۱] است. به این صورت که فعالیت جبرانی بلافاصله بعد از اتمام فعالیت مربوطه شروع می‌شود تا بلکه بتواند کاهش کیفیت اتفاق‌افتاده 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، درنظرگرفتن فعالیت جبرانی و همین‌طور چندهدفه‌بودن 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 به‌وسیله آن بتوان مدیران پروژه را در زمان‌بندی و انتخاب حالت مناسب اجرای هر یم از فعالیت‌های پروژه یاری کرد؛ به‌نحوی‌که بتوانند پروژه را در 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 ذکرشده، یعنی زمان، هزینه و

۱. Rework Activity

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. درصورتی‌که برای اجرای پروژه محدودیت زمانی وجود نداشته باشد، تمامی فعالیت‌ها در زمان نرمال و عادی خود قابل‌انجام 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. درواقع 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 باتوجه 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 باید به‌ازای هر روز دیرتر تحویل‌دادن پروژه به کارفرما بدهد. پوشش‌دادن انواع هزینه‌های

---

۱. Direct Cost
۲. Indirect Cost
۳. Incentive Cost
۴. Tardiness cost

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 دربرآوردن نیازهای صریح یا ضمنی است». به‌عبارتی‌دیگر 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].

درنظرگرفتن عامل کیفیت، علاوه بر زمان و هزینه در بهینه‌سازی فعالیت‌های اجرایی یک پروژه، با وجود مشکلاتی که در جهت کمّی‌ساختن آن برای فعالیت‌های پروژه وجود دارد از دیگر عوامل تأثیرگذار در انتخاب روش‌های اجرایی است و مدیران گاه راه‌حل‌هایی 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 به‌طورکلی 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 تعیین‌شده را

تضمین می‌کنند؛ ولی با افزایش تعداد متغیرهای طراحی و پیچیدگی آن کارایی خود را از دست می‌دهند؛ بنابراین با افزایش ابعاد و نیز پیچیده‌ترشدن 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؛ به‌بیان‌دیگر 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 تایلند 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 دیگر با استفاده از جست‌وجوی پراکنده الکترومغناطیس با ذکر اهمیت درنظرگرفتن کیفیت در

---

۱. Babu & Suresh
۲. Khang, & Myint
۳. Feng, Lio & Burns
۴. El-Rayes & Kandil
۵. Tareghian & Taheri

مسائل موازنه زمان و هزینه سنتی، یک روش مبتنی بر جست‌وجوی پراکنده تلفیق‌شده با الگوریتم الکترومغناطیس برای حل مسئله موازنه سه‌گانه ارائه کردند [۳۶]. افشار و همکاران (۲۰۰۷)، به شیوه و زمان استفاده از منابع دردسترس فعالیت‌های پروژه توجه ویژه‌ای داشتند. آن‌ها استفاده از منابع را برای برنامه‌ریزان و مدیران پروژه، چالشی مهم در به‌تعادل‌رساندن 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 خنثی‌کردن 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 درنظرگرفتن 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 بکاهند [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 NSGAII[۵] و PESAII[۶]، کارابودن 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 α اختصاص دادند که نشان‌دهنده نرخ ریسک عدم‌انطباق کیفیت فعالیت انجام‌شده با کیفیت مورد

---

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.

نظر پیمانکار است. آن‌ها تلاش کردند تا با حل مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط، تأثیر هزینه بالقوه کیفیت ازدست‌رفته 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 به‌منظور متعادل‌سازی مراحل جست‌وجو و استخراج از فرایند بهینه‌سازی صورت گرفت [۳۷].

منقسمی 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 چندحالته و حل آن با الگوریتم جهش قورباغه سعی کردند تا هزینه‌های ازدست‌رفته 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 عددصحیح مختلط	-
[۲]	✓	✓		✓	-	الگوریتم فراابتکاری چندمنظوره (MOICA)	-
[۱۵]	✓	✓	✓	✓	-	الگوریتم ژنتیک	MATLAB
[۳۷]	✓	✓	✓	-	-	ترکیب الگوریتم کلونی زنبور عسل چندهدفه (ABC)[۱] 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
این پژوهش	✓	✓	✓	✓	✓	الگوریتم ژنتیک	MATLAB

۱. Artificial Bee Colony

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر نوع ماهیت جزو پژوهش‌های توصیفی است. داده‌های این پژوهش از نوع کمّی هستند. از نظر مکان و زمان اجرا، این پژوهش یک پژوهش میدانی محسوب می‌شود و از نظر روش فرآیند نیز یک پژوهش کمّی 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 پیش‌تصفیه سیستم‌های اسمز معکوس به‌شمار می‌روند که موجب کاهش چشم‌گیر هزینه‌های بهره‌برداری سیستم‌های آب‌شیرین کن می‌شوند. امروزه در صنایع مختلف از جمله صنایع پتروشیمی و فولاد استفاده از فیلترهای آب در چرخه آب درگردش 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. نرخ عدم انطباق کیفی مشخص‌کننده حداکثر تعداد فعالیت‌های جبرانی است که می‌توانند برای اجرا انتخاب شوند.

---

۱. Screen Filter

۲. Rework Activity

طراحی مدل ریاضی. در این پژوهش، مدلی با سه تابع هدف براب بهینه‌سازی و موازنه زمان، هزینه و کیفیت پیشنهاد می‌شود که ضمن درنظرگرفتن 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 اسکرین 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 قابل‌انجام 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 به‌ازای 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 به‌ازای 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 این‌صورت صفر است.
S_i	زمان شروع فعالیت iام پروژه
D(l)	در صورت منفی‌شدن l برایر یک و در غیر این‌صورت 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.

رابطه (۱)
$$min\, f1 = S_n + \sum_{k=1}^{m} (X_{nk} T_{nk})$$

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 دردسترس 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 مقررشده و یا دیرتر از آن پایان پذیرد، هزینه تشویقی وجود نخواهد داشت. به همین دلیل برای مشخص‌شدن میزان تأثیر هزینه تشویقی بر روی هزینه کل پروژه، سقف زمان تعیین‌شده 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.

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

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.

$$max\, f3 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m} (X_{ik}W_iQ_{ik}) \qquad \text{رابطه (۳)}$$

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.

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

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

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

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

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

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

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

محدودیت ۵: مجموع وزن فعالیت‌ها باید برابر یک شود.

$$\sum_{i=1}^{n} W_i = 1$$ رابطه (۸)

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

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

محدودیت ۷: باینری‌بودن (دودویی‌بودن) متغیرهای X_ik و D(l) در این رابطه نشان داده می‌شود.

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

محدودیت ۸: زمان شروع فعالیت‌ها نمی‌تواند عددی منفی باشد.

$$S_i \geq 0 \qquad ; \quad \forall\, i$$ رابطه (۱۱)

محدودیت ۹: متغیری باینری را تعریف می‌کند که در صورت منفی‌بودن l برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

$$D(l) = 1 \qquad ; \quad \forall\, l < 0$$ رابطه ۱۲)

مدل نهایی برنامه‌ریزی پروژه در این مطالعه به صورت مدل ۱، به‌دست آمد. در مورد مرحله گردآوری داده‌ها نیز به‌طورکلی 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.

مدل (۱)

$$
\begin{cases}
min\, f1 = S_n + \sum_{k=1}^{m} (X_{nk} T_{nk}) \\
min\, f2 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} X_{ik} C_{ik} + (IC.f_1) + \big(D(f_1 - T_{max})\big)(f_1 - T_{max}) ITC \\
max\, f3 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} (X_{ik} W_i Q_{ik}) \\
\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} S_n + (X_{ik} T_{ik}) \le T_{max} \\
\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} X_{ik} C_{ik} + (IC.f_1) + \big(D(f_1 - T_{max})\big)(f_1 - T_{max}) ITC \le C_{max} \\
\sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} (X_{ik} W_i Q_{ik}) \ge Q_{min} \\
S_i + \sum_{k=1}^{m} X_{ik} T_{ik} \le S_j \;\; ; \qquad \forall (i,j) \in FS \\
\sum_{i=1}^{n} W_i = 1 \\
\sum_{k=1}^{m} X_{ik} = 1 \qquad ; \quad \forall\, i \\
X_{ik}\, , D(l) \in \{0,1\} \\
S_i \ge 0 \qquad ; \quad \forall\, i \\
D(l) = 1 \qquad ; \quad \forall\, l < 0
\end{cases}
$$

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-Hard[۱] 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 به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که هر فعالیت به m روش مختلف قابل‌انجام 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-Hard دانست. از میان روش‌های مختلف پیشنهادشده 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.

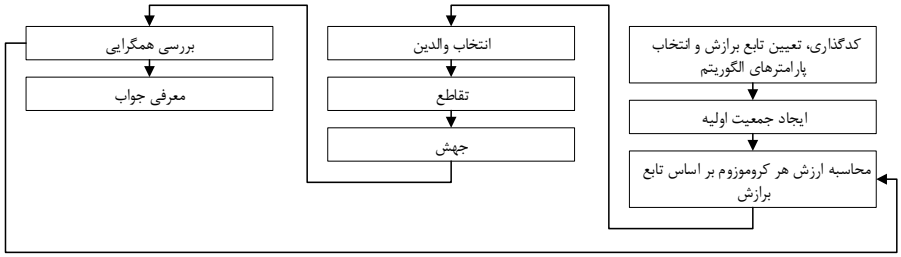
الگوریتم‌های ژنتیک یکی از اعضای خانواده مدل‌های محاسباتی الهام‌گرفته‌شده از روند تکامل است. این الگوریتم‌ها راه‌حل‌های بالقوه یک مسئله را در قالب کروموزوم‌های ساده‌ای کد کرده و سپس عملگرهای ترکیبی را بر روی این ساختارها اعمال می‌کنند. الگوریتم‌های ژنتیک اغلب به‌عنوان روشی برای بهینه‌سازی توابع شناخته 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 الزاما بهینه صورت می‌پذیرد [۲۲].

الگوریتم ژنتیک با تولید جمعیت اولیه و افزایش این جمعیت به‌وسیله 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،

۱. Non-deterministic Polynomial-time Hard

میزان تابع برازندگی برای هر کروموزوم جمعیت اولیه محاسبه شد. پس از آن مراحل نمـایش‌داده 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 بیـت یکی از دو مقدار صفر و یا 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 بـه‌دسـت آمد.

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

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 ۰/۸ 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، عملگرهـای تقـاطع[۱] و جهـش[۲] بوده‌اند. در عملگر تقاطع، هدف تولید فرزند جدید از والدین انتخاب‌شده در مرحله قبل بوده است. به امید اینکه ویژگی‌هـای مثبـت هـر دو والـد در فرزنـد ایجـاد شـود، بخـش یـا بخش‌هـایی از

۱. Crossover
۲. Mutation

کروموزوم‌های والدین با یکدیگر تعویض شده‌اند. این سبب شد فرزند جدید که ترکیبی از خصوصیات والدین را دارد از شایستگی بالاتری برخوردار شود. تقاطع به‌صورت چندنقطه‌ای انجام شد. در تقاطع چندنقطه‌ای برخلاف تک‌نقطه‌ای، قسمت‌های مشابه در کروموزوم‌های والد به‌صورت یکی‌درمیان با یکدیگر تعویض شدند.

هدف از به‌کارگیری عملگر جهش نیز جلوگیری از به‌دام‌افتادن در بهینه‌های محلی و همچنین حفظ تنوع جمعیت ژنتیکی است [۳۳]. در روش‌های هوشمند، به‌ویژه الگوریتم ژنتیک، به‌دلیل خصلت تصادفی عملگر جهش حتی اگر هم از نقطه‌ای چون B شروع کنیم، باز ممکن است در میان راه نقطه A به‌صورت تصادفی انتخاب شود که در این صورت شانس رسیدن به نقطه ماکزیمم سراسری و عبور از ماکزیمم محلی افزایش می‌یابد. در جریان به‌کارگیری عملگر جهش، تعدادی از کروموزوم‌های فرزند به‌صورت تصادفی انتخاب شدند و به‌صورت تصادفی مقادیر یک یا چند ژن آن تغییرکرد. در صورتی که عدد تصادفی تولید شده از احتمال جهش (۰/۸) کمتر بود، جهش صورت گرفت و در غیر این‌صورت از جهش‌دادن صرف‌نظر شد.

با توجه به اینکه مجموعه جواب‌های شدنی مسئله بسیار گسترده بودند در هیچ‌یک از تلاش‌ها، هیچ‌کدام از محدودیت‌های مسئله نقض نشدند. در گام محاسبه همگرایی، وضعیت شدنی‌بودن تک‌تک 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 منحصربه‌فرد 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

گروه فعالیت	تعداد فعالیت‌ها
خرید مواد اولیه	۹
آنالیز مواد اولیه	۹
برشکاری	۶
نوردکاری	۶
قالب‌سازی	۴
ریخته‌گری و قالب‌گیری	۴
آنالیز ریخته‌گری	۴
تراشکاری	۵
جوشکاری	۱۷

گروه فعالیت	تعداد فعالیت‌ها
تست جوشکاری	۱۷
خم‌کاری	۲
قلاویزکاری	۴
تست هیدرواستاتیک	۱
آماده‌سازی سطح نهایی	۱
بسته‌بندی	۱

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 Tig (جوشکاری آرگون)	۱۶	۲۰۰۰۰۰۰۰	۰/۹۲
		مگ Mag (جوشکاری دی‌اکسید کربن)	۱۲	۱۵۰۰۰۰۰۰	۰/۷۵
		الکترود	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، 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 رینگ و کپ)	تحکیم جوش ۲(شامل: جوش ۱، بدنه موتور و درب بدنه موتور و صفحه اتصال بدنه اصلی به موتور و رینگ و کپ)

همان‌طور که قبلا نیز گفته شد، امکان اینکه همه فعالیت‌های جبرانی برای اجرا انتخاب شوند وجود ندارد؛ بنابراین با تعریف دو نوع ریسک برای این فعالیت‌ها تلاش‌می‌شود تا فقط برخی از فعالیت‌های جبرانی اجرایی شوند. نرخ عدم‌انطباق کیفی از سوی مدیر پروژه برابر با ۴ درصد تعداد کل فعالیت‌ها عنوان شده است؛ ازاین‌رو 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 انتخاب‌شده 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 به‌موقع صورت بگیرد. ریسک دوم موردقبول واقع‌نشدن جوش انجام‌گرفته در زمان بازدید ناظر است. بعد از برخی از فعالیت‌های جوشکاری، ناظر باید جوش انجام‌شده را تأیید کند و یکی از عواملی که می‌تواند احتمال تأیید ناظر را بالا ببرد، تمیزبودن 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
مقیاس احتمال	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹

جدول ۸. مقیاس تأثیر بر کاهش کیفیت

تأثیر بر کاهش کیفیت	کم	متوسط روبه‌پایین	متوسط	متوسط روبه‌بالا	زیاد
مقیاس تأثیر بر کاهش کیفیت	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 عدم‌انطباق 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 عدم‌انطباق 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 عدم‌انطباق کیفی هر یک از ریسک‌ها برای هر یک از ۶ فعالیت، مشخص می‌شود که به‌ترتیب فقط برای فعالیت‌های ۶۳، ۶۴ و ۵۰ باید فعالیت جبرانی انجام گیرد. درواقع 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 هم‌مقیاس‌نبودن این ۳ تابع هدف، تمامی داده‌ها با استفاده از روش بی‌مقیاس‌سازی خطی، مطابق با رابطه ۱۴، نرمال‌سازی می‌شوند.

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

در این مطالعه روابط پیش‌نیازی از نوع پایان ـ 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

درنهایت 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
وزن	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 مورداستفاده 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 به‌دست آمد که از حداکثر زمان درنظرگرفته‌شده توسط مدیر پروژه، یعنی ۴۲۹ ساعت، به‌مراتب کمتر است. هزینه تمام‌شده 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 تعیین‌شده 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 پشنهادها

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 وکیفیت در پی این است که هر فعالیت در ضمن رعایت روابط پیش‌نیازی با کدام روش اجرایی انجام شود. در این پژوهش با درنظرگرفتن روابط پیش‌نیازی پایان ـ شروع برای فعالیت‌ها، فعالیت جبرانی برای جلوگیری از کاهش کیفیت احتمالی و همچنین منظورکردن هزینه تشویقی و جریمه، سعی شده است تا مسئله به دنیای واقعی شباهت بیشتری داشته باشد. نتایج به دست‌آمده از حل این مسئله در قالب مدل ارائه‌شده و با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک، نشان‌دهنده کارابودن 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 ارائه‌شده در این پژوهش چند خصوصیت کاربردی ویژه دارد. نحستین خصوصیت درنظرداشتن روش‌های اجرایی متفاوت است که باعث می‌شود تا تمامی راه‌های ممکن برای اتمام پروژه بررسی شوند و دومیین خصوصیت، درنظرداشتن 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 تحویل‌دادن پروژه مبلغی از هزینه‌های صورت‌گرفته را برگرداند. درحقیقت در این مورد، به‌خصوص با کاهش زمان پروژه، بخشی از هزینه کل هم کاهش می یابد. 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 درنظرداشتن هزینه جریمه عنوان کرد. هزینه‌ای که باعث می‌شود تا پیمانکار در صورت دیرتر به‌اتمام‌رساندن پروژه از مهلت مقررشده 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 درنظرگرفتن 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.

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.