

مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی خاکستری به منظور موازنه زمان، هزینه، ریسک و کیفیت پروژه

حنان عموزاد مهدیرجی*، نیما مختارزاده**، سارا رادمند***

چکیده

مدیریت پروژه، برنامه‌ریزی و هدایت پروژه در چهارچوب زمان، هزینه و کیفیت مشخص به‌سوی ایجاد نتایج مشخص آن است. هدف از این پژوهش، توسعه مدل‌های ریاضی در موازنه زمانی، هزینه‌ای، کیفی و ریسک پروژه‌هایی است که پارامترهای فعالیت‌های آن به‌صورت تصادفی و با اعداد خاکستری تخمین زده شده‌اند. در پروژه‌ها برای انجام یک سری فعالیت‌ها به دنبال ترکیب بهینه برای زمان، هزینه و کیفیت پروژه و لحاظ کردن ریسک هستند؛ درحالی‌که اطلاعات در این زمینه ناکافی و محدود است. استفاده از روش پیشنهادی تحقیق یعنی لحاظ عدم قطعیت در داده‌های برنامه‌ریزی پروژه با اعداد خاکستری، می‌تواند راهنمایی برای مدیریت بهتر پروژه در این‌گونه شرایط باشد. برای حل این مدل، پس از به‌دست آوردن مدل برنامه‌ریزی خطی اعداد خاکستری، نسبت به حل آن اقدام شد. با بررسی پاسخ‌های به‌دست آمده، به نظر می‌رسد که با برنامه‌ریزی آرمانی امکان بهبود آن‌ها وجود دارد؛ از این‌رو مراحل تکمیلی با برنامه‌ریزی آرمانی برای پاسخ‌های رضایت‌بخش بهتری به منظور ارائه به مدیر پروژه صورت پذیرفت. برای مطالعه موردی، یک پروژه انتخابی در «شرکت ایران خودرو»، به‌طور نمونه ارائه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مدیریت پروژه؛ منطق فازی؛ اعداد خاکستری؛ برنامه‌ریزی آرمانی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۵
* عضو هیئت علمی دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول).

E-mail: h.amoozad@ut.ac.ir

** عضو هیئت علمی دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران.
*** کارشناس ارشد MBA، موسسه آموزش عالی مهر البرز.

۱. مقدمه

مدیریت پروژه به یکی از زمینه‌های جذاب برای پژوهشگران و کارشناسان تبدیل شده است؛ باوجود این در یک بررسی آماری توسط SGI در سال ۲۰۰۳ مشخص شد که تنها ۳۴ درصد از پروژه‌ها در زمان مقرر و با بودجه مصوب به اتمام رسیده‌اند. درصد ذکر شده در بالا، بهبود کمی را نسبت به سال ۱۹۹۴ که نرخ موفقیت ۱۹ درصد گزارش شده بوده است، نشان می‌دهد؛ همچنین متوسط تخطی از هزینه‌ها از ۱۸۰ درصد در سال ۱۹۹۴ به ۴۳ درصد در سال ۲۰۰۳ کاهش یافته است که این امر مدیون تحقیقات و کارهای انجام شده در زمینه مدیریت پروژه است [۳].

مدیریت پروژه، برنامه‌ریزی و هدایت پروژه‌ها در چهارچوب زمان، هزینه و کیفیت مشخص به‌سوی ایجاد نتایج مشخص آن است. هر پروژه و مدیر پروژه الزاماً برای رسیدن به اهداف پروژه باید محدودیت‌ها را در نظر بگیرد؛ به همین دلیل یکی از موارد مهمی که مدیر پروژه باید همیشه در تصمیمات و ارزیابی‌های خود در نظر داشته باشد، محدودیت‌های زمانی، هزینه و کیفی پروژه است [۷]. از آنجا که بیشتر پروژه‌ها شرایط و فعالیت‌های منحصر به فردی دارند، احتمالاً می‌توان 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 [۱۲]؛ بنابراین با وجود اینکه معمولاً پیش از اجرای پروژه‌ها، زمان، هزینه و سطح کیفیت آن‌ها تعیین می‌شود، اما برخی مطالعات نشان داده است که بسیاری از پروژه‌ها هرگز در زمان تعیین شده، با هزینه پیش‌بینی شده و همین‌طور در سطح کیفیت مورد انتظار به پایان نرسیده‌اند. طبق نظر ویلیامز (۱۹۹۵)، پژوهشگران دلیل این نوع از شکست‌ها در مدیریت پروژه‌ها را در نبود توجه کافی به مقوله ریسک و عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه‌ها می‌دانند. وجود ریسک و عدم قطعیت در پروژه موجب کاهش دقت در تخمین مناسب اهداف می‌شود و از کارایی پروژه‌ها می‌کاهد؛ بنابراین نیاز به شناخت و مدیریت ریسک در پروژه کاملاً روشن است [۲].

در برخی پروژه‌ها برای انجام یک سری فعالیت‌ها می‌توان با تخصیص بیشتر منابع آن‌ها در زمان خواسته شده به پایان رساند که در نتیجه، هزینه پروژه در آن زمان افزایش می‌یابد. در این‌گونه شرایط مدیران پروژه به دنبال ترکیب بهینه برای زمان، هزینه و کیفیت پروژه هستند؛ درحالی‌که اطلاعات در این زمینه ناکافی و محدود است. استفاده از روش پیشنهادی با اعداد خاکستری، می‌تواند راهنمایی برای مدیریت بهتر پروژه در این‌گونه شرایط باشد [۲۳]؛ همچنین با اضافه شدن موازنه ریسک به ترکیب یادشده، این روش می‌تواند راهنمایی جامع‌تر برای مدیران پروژه تلقی شود.

در ابتدا مدل‌های خطی و برنامه‌ریزی خطی برای موازنه بسیار کاربرد داشت که با پیشرفت برنامه‌ریزی ریاضی، مدل‌های غیرخطی توسعه داده شد و روش‌های ابتکاری و فراابتکاری نسل

جدیدی از مدل‌ها را در مدیریت پروژه ایجاد کرد و بسیاری از پژوهشگران از روش‌های مختلفی برای حل مسائل TCTP، TCQP و غیره، مانند الگوریتم ژنتیک و NHGA استفاده کردند. متفاوت از نتایج مطالعات قبلی، به صورت موازی بر اساس نظریه «زاده» راه‌حل‌های فازی نیز در حل مسائل، به کار رفته است. یکی دیگر از گزینه‌های پیشنهادی برای مواجهه با داده‌های غیرقطعی در پروژه کاربرد نظریه فازی است که به موجب آن زمان و هزینه غیرقطعی فعالیت‌های یک پروژه را می‌توان با اعداد فازی نمایش داد. پژوهشگران زیادی در دو دهه اخیر برای موازنه پارامترهای پروژه از آن استفاده کرده‌اند؛ اما تعداد اندکی از این تحقیقات محیط‌های تصادفی / اعداد خاکستری را مورد توجه قرار داده‌اند؛ از طرف دیگر، کیفیت و ریسک پروژه نیز از مواردی هستند که مدیران پروژه به آن‌ها علاقه‌مندند و در تحقیقات توجه چندانی به آن‌ها نشده است.

با این تفاسیر، باید روشی طراحی شود که به وسیله آن بتوان مدیران پروژه را در زمان‌بندی و انتخاب حالات مناسب اجرای 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؛ بنابراین انجام پژوهشی که در آن با توجه به موازنه موجود میان چهار هدف ذکر شده، یعنی زمان، هزینه، کیفیت و همین‌طور ریسک، رویکرد و ابزاری برای تعیین ترکیب رضایت‌بخش از حالت‌های مختلف فعالیت‌های پروژه توسعه داده شود، ضروری به نظر می‌رسد؛ از این رو در راستای دستیابی به مفاد ذکر شده، طراحی مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای زمان‌بندی پروژه و مسیر بحرانی پروژه با رویکرد تلفیقی برنامه‌ریزی آرمانی فازی و برنامه‌ریزی خطی اعداد خاکستری هدف غایی پژوهش در نظر گرفته شده است و همچنین در این تحقیق به دنبال پاسخ‌دادن به پرسش‌ها و دستیابی به اهداف، یکی از پروژه‌های «شرکت ایران‌خودرو» به عنوان نمونه عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

نظریه سیستم‌های خاکستری^۱ GST. نظریه خاکستری، نخستین بار توسط جولانگ دنگ در سال ۱۹۸۳ ارائه شد [۶]. این نظریه با سیستم‌هایی سروکار دارد که اطلاعات کمی دارند. این مدل می‌تواند با استفاده از داده‌های کم، معمولاً سه تا پنج داده، ساخته شود و برای حل مسائل با عدم قطعیت بالا و برای تحلیل داده‌های کوچک، ناقص، گسسته و با اطلاعات کم به کار برده می‌شود [۲۰]. بر طبق این نظریه یک سیستم می‌تواند به وسیله یک رنگ نشان داده شود که این رنگ شدت وضوح را در مورد سیستم نشان می‌دهد. اگر کاملاً ناشناخته باشد سیستم یک جعبه

1. Grey System theory

سیاه است و اگر کاملاً شناخته شده باشد، یک سیستم سفید است و اگر هم ناشناخته و هم شناخته‌شده باشد، یک سیستم خاکستری نامیده می‌شود. در دنیای واقعی هر سیستمی می‌تواند به‌عنوان یک سیستم خاکستری در نظر گرفته شود؛ زیرا همیشه مقداری از عدم قطعیت‌ها موجود است [۱۱]. تئوری سیستم‌های خاکستری، الگوریتمی است که روابط غیرقطعی اعضای یک سیستم با یک عضو مرجع را تحلیل می‌کند و قابلیت استفاده در حل مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره را داراست [۱۷].

برنامه‌ریزی خطی خاکستری. برنامه‌ریزی خطی خاکستری^۱ شکل کلی از برنامه‌ریزی خطی رتبه‌ای (ترتیبی)^۲ است که پارامترهای آن از جمله ماتریس ضرایب و فناوریانه تابع هدف به‌صورت اعداد خاکستری ظاهر می‌شوند. اگر $\otimes B \in \otimes (R)^{m \times 1}$ و $\otimes C \in \otimes (R)^{1 \times n}$ و $\otimes X \in \otimes (R)^{n \times 1}$ باشد مسئله به‌صورت (۱)، نمایش داده می‌شود: [۲۳]

$$\begin{aligned} \text{Max}(\min) \quad & \otimes f \in \otimes C \cdot \otimes X & (1) \\ \text{Subject to:} \quad & \otimes A \cdot \otimes X \leq (\geq) \otimes B \\ & \otimes X \geq 0 \end{aligned}$$

با توجه به هوانگ (۱۹۹۴) یک تابع هدف با متغیرهای خاکستری موجود است که هدف پیدا کردن مقادیر بهینه $\otimes f \in [\underline{f}, \bar{f}]$ می‌باشد. محدوده بالایی و پایینی $\otimes f$ به‌صورت معادله ۲ و معادله ۳، نمایش داده شده است: [۹]

$$\bar{f} = \sum_{j=1}^{k_1} \bar{c}_j * \bar{x}_j + \sum_{j=k_1+1}^n \bar{c}_j * \underline{x}_j \quad (2)$$

$$\underline{f} = \sum_{j=1}^{k_1} c_j * \underline{x}_j + \sum_{j=k_1+1}^n c_j * \bar{x}_j \quad (3)$$

که $\otimes (c_j) \in [c_j, \bar{c}_j]$ و $\otimes (c_j)$ و $j=1, 2, \dots, k_1$ و $j=k_1+1, \dots, n$ به‌عنوان ضرایب مثبت یا منفی تابع هدف پیدا می‌شوند. به‌ترتیب با استفاده از جایگذاری مقادیر معادل در معادلات بالا، محدودیت‌های \underline{f}, \bar{f} به‌صورت معادله ۴ و معادله ۵، مطابقت داده می‌شوند:

$$\bar{f} = \sum_{j=1}^{k_1} \otimes(|a_{ij}|) * \text{sign}(\underline{a}_{ij}) \bar{x}_j + \sum_{j=k_1+1}^n \otimes(|a_{ij}|) * \text{sign}(\bar{a}_{ij}) \underline{x}_j \leq \otimes(b_i) \quad \forall i \quad (4)$$

$$\underline{f} = \sum_{j=1}^{k_1} \otimes(|a_{ij}|) * \text{sign}(\bar{a}_{ij}) \underline{x}_j + \sum_{j=k_1+1}^n \otimes(|a_{ij}|) * \text{sign}(\underline{a}_{ij}) \bar{x}_j \leq \otimes(b_i) \quad \forall i \quad (5)$$

1. GLP(Grey Linear Programming)
2. Ordinal Linear Programming

درخصوص سمت راست اعداد^۱، زمانی که خاکستری بوده و صفر هم نباشند، خاصیت خاکستری $\otimes (b_i)$ به سمت چپ به شرح معادله ۶ و معادله ۷، جا داده می‌شود:

$$\bar{f} = \sum_{j=1}^{k_1} \otimes(|a_{ij}|) * \text{sign}(\underline{a}_{ij}) \bar{x}_j / \bar{b}_i + \sum_{j=k_1+1}^n \overline{\otimes}(|a_{ij}|) * \text{sign}(\bar{a}_{ij}) \underline{x}_j / \underline{b}_i \leq 1 \quad \forall i \quad (۶)$$

$$\underline{f} = \sum_{j=1}^{k_1} \overline{\otimes}(|a_{ij}|) * \text{sign}(\bar{a}_{ij}) \underline{x}_j / \underline{b}_i + \sum_{j=k_1+1}^n \otimes(|a_{ij}|) * \text{sign}(\underline{a}_{ij}) \bar{x}_j / \bar{b}_i \leq 1 \quad \forall i \quad (۷)$$

مسئله GLP با دو گام زیر حل می‌شود:

در ابتدا پاسخ به مدل سفید برای \bar{f} (با اهداف بیشینه)؛ از معادله ۲ به عنوان تابع هدف و از معادله ۶ به عنوان محدودیت‌ها حل می‌شود، سپس پاسخ مدل مربوط به \underline{f} فرمول‌نویسی می‌شود (معادله ۳ و معادله ۷). مدل اول مقادیر $\bar{x}_j, j = 1, 2, \dots, k_1$ و $\underline{x}_j, j = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, n$ را مشخص می‌کند؛ درحالی‌که مدل دوم مقادیر $\underline{x}_j, j = 1, 2, \dots, k_1$ و $\bar{x}_j, j = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, n$ را ایجاد می‌کند؛ سپس دو مجموعه از محدودیت‌های الحاقی در مرحله دوم مدل به صورت معادله ۸ و معادله ۹، اضافه می‌شوند [۴]:

$$\underline{x}_j \leq \bar{x}_j^* \quad j = 1, 2, \dots, k_1 \quad (۸)$$

$$\bar{x}_j \leq \underline{x}_j^* \quad j = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, n \quad (۹)$$

برنامه‌ریزی آرمانی. برنامه‌ریزی آرمانی^۲، نسخه‌ای توسعه‌یافته از برنامه‌ریزی خطی و یکی از مهم‌ترین مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه است. برنامه‌ریزی چندشاخصه شامل مجموعه‌ای از روش‌هایی است که در مسائل تصمیم‌گیری با چند مورد هدف استفاده می‌شود. GP رویکردی برای حل مسائل چند هدفه است. [۱۰] نخستین بار توسط چارلز و همکاران (۱۹۵۵) مطرح شد. [۴] تابع هدف در GP، حداقل کردن متغیرهای انحرافی به سمت دستیابی به اهداف (آرمان‌ها) است. برای اهداف از نوع سود، متغیر انحرافی منفی و برای اهداف از نوع هزینه، متغیر انحرافی منفی در تابع هدف حداقل می‌شود [۱۶]. مسائل برنامه‌ریزی آرمانی مانند سایر مسائل می‌توانند به صورت خطی، غیرخطی و یا اعداد صحیح فرموله شوند و انواع مختلفی را از خانواده مدل‌های برنامه‌ریزی آرمانی ارائه کنند [۱۵]. از نظر ریاضی، GP را می‌توان به صورت معادله ۱۰، بیان کرد:

$$\text{minimize } \bar{a} = \{p_1(\bar{n}, \bar{p}), p_2(\bar{n}, \bar{p}), \dots, \{p_k(\bar{n}, \bar{p})\}$$

1. RHS
2. Goal Programming

$$\text{Subject to: } f_i(x) + n_i - p_i = b_i \quad i=1, \dots, m \quad (10)$$

$$\bar{x}, \bar{n}, \bar{p} \geq \bar{0}$$

که در آن:

\bar{a} : تابع دستیابی $f_i(x)$: تابعی از متغیرهای تصمیم در هدف i

\bar{n}, \bar{p} : متغیرهای انحرافی منفی و مثبت b_i : میزان آرمان در هدف i

$p_k(\bar{n}, \bar{p})$: تابعی از متغیرهای منفی و مثبت در اولویت K K : تعداد اولویت‌ها در مدل است.

برنامه‌ریزی آرمانی فازی. از نظر ریاضی، FGP با m آرمان فازی را می‌توان به صورت معادله ۱۱، بیان کرد:

$$\text{Find } x \quad (11)$$

$$\text{To satisfy } f_i(x) \odot b_i \quad i=1, \dots, m$$

$$x \geq 0$$

که علامت " \sim " نشان فازی بودن مقدار آرمان‌ها و علامت \odot برای ($<$ ، $>$ و یا $=$) به کار رفته است. در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی فازی، با طراحی توابع عضویت مناسب و انتخاب یک عملگر سازگار برای یکنواکردن توابع عضویت مسئله به مدل برنامه‌ریزی ریاضی قطعی تبدیل می‌شود تا بتوان آن را با روش‌های کلاسیک (مانند برنامه‌ریزی خطی) حل کرد [۱۶].

اگرچه اصطلاح برنامه‌ریزی آرمانی فازی، برای نخستین بار توسط ناراسیمهان (۱۹۸۰) مطرح شد [۱۴]، ولی مسئله بردار ماکزیمم فازی که توسط زیمرمن (۱۹۷۸) ارائه شده است را نیز می‌توان به عنوان یک مدل FGP در نظر گرفت؛ [۲۶] زیرا در این روش نیز قبل از حل مسئله، مقادیر اهداف (آرمان‌ها) از تصمیم‌گیرنده خواسته می‌شود.

تابع عضویت برای اهداف فازی به صورت معادله ۱۲، تعریف می‌شود:

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & \text{اگر } f_i(x) \geq b_i \\ \frac{f_i(x) - L_i}{b_i - L_i} & \text{اگر } L_i \leq f_i(x) \leq b_i \\ 0 & \text{اگر } f_i(x) \leq L_i \end{cases} \quad (12)$$

که L_i حد پایین تحمل برای هدف فازی $f_i(x)$ و $b_i - L_i$ بازه تحمل است. اگر هدف فازی به‌صورت $f_i(x) \leq b_i$ باشد، آنگاه تابع عضویت به‌صورت معادله ۱۳، خواهد بود:

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & \text{اگر } f_i(x) \leq b_i \\ \frac{u_i - f_i(x)}{u_i - b_i} & \text{اگر } b_i \leq f_i(x) \leq u_i \\ 0 & \text{اگر } f_i(x) \geq u_i \end{cases} \quad (13)$$

که u_i حد بالای تحمل و $u_i - b_i$ بازه تحمل است [۱۶]. برای مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی ابتدا متغیرها و پارامترهای مدل تشریح می‌شود؛ سپس توابع عضویت هر یک از معیارها بر اساس منطق فازی ارائه و سرانجام مدل ریاضی مورد استفاده معرفی می‌شود. به‌منظور حساب اهمیت نسبی از اهداف، تیواری و همکاران (۱۹۸۶)، یک مدل افزودنی وزن پیشنهاد کرده‌اند [۲۵] تا وزن هر یک از اهداف را در تابع هدف وارد کند؛ از این‌رو درحالتی که آرمان‌ها دارای اهمیت یکسان نیستند و به‌صورت ضریب وزنی تعریف می‌شوند، تابع به شرح معادله ۱۴، خواهد بود:

$$F(\mu) = \sum w_k \mu_k \quad (14)$$

که w_k وزن k امین هدف فازی را علامت‌گذاری می‌کند، $\sum w_k = 1$ بوده و μ_k نمایانگر دستیابی به هدف k طبق تابع عضویت خطی تعریف شده است. تسای و چن (۲۰۰۱) نشان داده‌اند که این مدل در صورت تغییر وزن‌ها ممکن است پاسخ‌هایی در سطح پایین‌تر از سطح مطلوب مسئله را ایجاد کند؛ [۵] از سوی دیگر این دو پژوهشگر یک مدل پیشگیرانه برای نمایش درجات مطلوب به‌منظور دستیابی به اهداف برای هر یک از اهداف فازی که برای تابع هدف فازی مهم هستند را پیشنهاد می‌کنند. در این مدل اهدافی که مهم‌تر هستند، بالاترین درجه دستیابی مطلوب را دارند؛ بدین‌وسیله تابع هدف از مسئله FGP که به‌صورت معادله ۱۴، بود، اولویت‌های پیشگیرانه برای اهداف بدین‌صورت $\mu_k \geq \mu_1$ اضافه می‌شود.

هنگامی که k امین هدف به k امین هدف ارجح می‌شود. علاوه بر این تصمیم‌گیرنده شاید یک دسته از درجات مطلوب μ_k^* را انتخاب کند؛ به‌طوری‌که برخی محدودیت‌ها، مانند $\mu_k \geq \mu_k^*$ به سیستم محدودیت‌ها اضافه شود؛ درنهایت مسئله FGP با k هدف متفاوت به‌صورت مسئله‌ای به شکل معادله ۱۵، تبدیل می‌شود:

$$F(\mu) = \sum_{k=1}^n w_k \mu_k \quad (15)$$

Subject to: (a) System Constraints

$$(b) \mu_k \geq \mu_l \quad \forall (k,l) \in \{1,2,\dots,K\}$$

$$(c) \mu_k \geq \mu_k^* \quad \forall (k,l) \in \{1,2,\dots,K\}$$

زمانی (c), (b) توسط تصمیم‌گیرنده تعریف می‌شوند که او ترجیحش این باشد [۲۳]. تحقیق‌های متعددی در راستای موازنه پارامترهای پروژه صورت گرفته و روش‌ها و الگوهای متفاوتی برای حل مدل انتخاب شده است که در اینجا پیشینه پژوهش به صورت خلاصه با توجه به نوع توابع هدف، در جدول ۱، ارائه شده است. در ادامه با بررسی دقیق مبانی نظری موضوع، چندی از پژوهش‌هایی که مشابهت بیشتری با مقاله مذکور داشتند در جدول ۲، مقایسه شد و نوآوری مقاله با دیگر مطالعات مشابه ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه پیشینه تحقیق

هدف	سال	پژوهشگر/پژوهشگران
	۲۰۰۵	تانگ یانگ
کمینه کردن زمان پروژه یا بهبود استفاده از منابع	۲۰۰۷	ربانی
	۲۰۰۸	دریزت و بیلوت
	۲۰۰۵	ژانگ و همکاران
کمینه کردن زمان و هزینه پروژه	۲۰۰۵	هووا کی و بودینگ لیو
	۲۰۱۱	مینگ جوین تسای و شی بین چن
	۲۰۱۴	هووا و جونجی
	۲۰۱۱	عموزاد، رضوی حاجی آقا و پورچم
	۱۳۹۱	اسماعیلیان، فیضی و افسر
	۱۳۹۲	سالاری، باقرپور و تقی زاده
	۲۰۰۲	آیونگ و همکاران
کمینه کردن زمان و پیشینه کردن کیفیت پروژه	۲۰۰۳	لاو و ایرانی
	۲۰۱۰	تانگ، آیونگ، ریموند و احمد
	۲۰۰۵	الرایز و کانديل
کمینه کردن زمان و هزینه با پیشینه کردن کیفیت پروژه	۲۰۰۶	پولاک جانسون و لیبراتور
	۲۰۰۶	طارقیان و طاهری
	۲۰۰۷	افشار و همکاران
	۲۰۰۸	هووانگ و همکاران
	۲۰۰۸	اشتهاردیان و همکاران
	۲۰۱۳	رضوی حاجی آقا و همکاران
۲۰۱۳	اهری و نیایی	

	۲۰۱۵	اوانجلین جباسیلی و پول جایباران
	۲۰۱۲	سلماس‌نیا، مختاری و نخعی کمال آباد
	۲۰۱۰	هونگ و فنگ
	۲۰۱۰	رازک، دیاب، حافظ و عزیز
	۲۰۱۲	شهسواری‌پور، مدرس و توکلی مقدم
	۱۳۹۱	فارغ، قندهاری و کتابی
	۱۳۹۲	موحدی سبحانی و عاشور
	۱۳۹۲	ابراهیم نژاد، جوانشیر و احمدی
	۱۳۸۹	مهدی زاده و محسنیان
موازنه زمان و هزینه با اضافه کردن پارامتر ریسک به توابع	۲۰۰۷	دیکمن و همکاران
	۲۰۰۷	جانادی و المیشاری
	۲۰۱۰	لاکشیمیینیاران و همکاران
	۲۰۱۲	ابطحی
	۲۰۱۱	رضاییان
	۲۰۱۴	ژانگ، انگوس، چیا فنگ
	۲۰۱۶	محمدی‌پور و سجادی
موازنه احتمالی زمان و هزینه با رویکرد پرت	۲۰۰۵	کراجوسکی و ریتزمن
موازنه غیرقطعی با شبیه‌ساز مونت کارلو - بر پایه احتمال	۲۰۰۲	کوربهارا و نیشیوچی
شناسایی مسیر بحرانی	۲۰۰۱	چاناس و زیلینسکی
	۲۰۰۳	اسلیپتوسف و تیشچانک
	۲۰۰۵	زیلینسکی
	۲۰۰۷	چن و هوانگ
	۲۰۰۷	چن
تعیین مسیر بحرانی یک پروژه در حالت فازی	۲۰۱۰	راوی شانکر و همکاران
تعیین مسیر بحرانی یک پروژه با تابع رتبه‌بندی اعداد فازی	۲۰۰۴	لیانگ و هن
	۲۰۱۰	راوی شانکر و همکاران
تعیین مسیر بحرانی یک پروژه با مدل ریاضی	۲۰۱۰	شهسواری‌پور و همکاران
تعیین مسیر بحرانی یک پروژه در حالت قطعی با موازنه زمان، ریسک و هزینه	۲۰۰۸	بحران و سوخکیان
موازنه زمان، ریسک، هزینه و منابع مشترک در حالت فازی در تعیین مسیر بحرانی	۲۰۰۹	زاموری و همکاران
تعیین مسیر بحرانی یک پروژه با موازنه زمان، کیفیت، ریسک و هزینه	۲۰۱۲	گلذاری و امیری

جدول ۲. جدول مقایسه‌ای مقاله با برخی مطالعات مشابه پیشین

تفاوت عمده مقالات پیشین با پژوهش حاضر	توضیحات مدل، روش حل و مطالعه موردی	سال	پژوهشگر/ پژوهشگران	نوع توابع هدف
مقاله حاضر	مسئله چندهدفه و چندحالتی یک شبکه پیش‌نیازی موازنه زمان، هزینه و کیفیت ارائه یک مدل برنامه‌ریزی فازی آرمانی مطالعه موردی در شرکت کیمیا بنا گستر یزد [۱۳]	۱۳۹۱	فارغ، قندهاری و کتابی	کمینه‌کردن زمان و هزینه با بیشینه‌کردن کیفیت پروژه
	مدل ریاضی فازی شبکه‌ای موازنه معیارهای زمان و هزینه استفاده از الگوریتم ژنتیک مطالعه موردی در صنعت نفت [۷]	۱۳۹۲	ابراهیم‌نژاد، جوانشیر و احمدی	کمینه‌کردن زمان و هزینه با بیشینه‌کردن کیفیت پروژه
	استفاده از الگوریتم ژنتیک سیستم بهینه‌سازی چندهدفه بهینه‌سازی سه‌بعدی زمان، هزینه و کیفیت	۲۰۱۰	Razek, Diab, Hafez, & Aziz.	کمینه‌کردن زمان و هزینه با بیشینه‌کردن کیفیت پروژه
	بهینه‌سازی اجتماع ذرات فازی چندهدفه ^۱ حل مشکل TCQT فازی مطالعه موردی پروژه‌های ساختمانی	۲۰۱۰	Hong & Feng	کمینه‌کردن زمان و هزینه با بیشینه‌کردن کیفیت پروژه
	توسعه مدل ریاضی موازنه هزینه، زمان و کیفیت استفاده از مدل فازی برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی [۸]	۲۰۱۵	Evangeline Jebaseeli & Paul Dhayabaran	کمینه‌کردن زمان و هزینه با بیشینه‌کردن کیفیت پروژه
	موازنه زمان، هزینه و کیفیت پروژه استفاده از یک الگوریتم فوق‌ابتکاری جدید [۲۴]	۲۰۱۲	Shahsavari Pour, Modarres, Tavakkoli-Moghaddam	کمینه‌کردن زمان و هزینه با بیشینه‌کردن کیفیت پروژه
	موازنه هزینه، کیفیت و ریسک استفاده از برنامه‌ریزی خطی یکپارچه مختلط ^۲ چندهدفه [۱۸]	۲۰۱۶	Mohammadipour & Sadjadi	Project cost-quality-risk tradeoff analysis in a time-constrained problem.
	موازنه زمان، هزینه، کیفیت و ریسک استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه استفاده از روش دقیق اپسیلون - محدودیت کارا و دوروش فراالبتکاری الگوریتم ژنتیک چندهدفه و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات [۱]	۱۳۹۱	ابطحی	موازنه زمان و هزینه و ریسک با بیشینه‌کردن کیفیت پروژه

1. Fuzzy-Multi-Objective Particle Swarm Optimization
2. Mixed integer linear programming

اضافه‌شدن متغیر ریسک، مطالعه موردی یک پروژه واقعی با ۷۰ فعالیت	موازنه هزینه، زمان و کیفیت در عدم اطمینان و با اعداد خاکستری ترکیبی از برنامه‌ریزی آرمانی فازی و برنامه‌ریزی خطی خاکستری آزمون مدل در مثال عددی در یک پروژه با ۱۰ فعالیت	۲۰۱۳	Razavi Hajiagha, Amoozad Mahdizaj, Hashemi,	A hybrid model of fuzzy goal programming and grey numbers in continuous project time, cost, and quality tradeoff.
---	--	------	---	---

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق به دلیل این که تمرکز بر روی مدل‌سازی ریاضی می‌باشد و در ادامه نیز مطالعه موردی جهت تکمیل مدل‌سازی ارائه گردیده است، کار آماری صورت نپذیرفته است؛ از این رو مطالعه موردی از پروژه‌های صنعتی شرکت ایران خودرو و براساس روابط پیش‌نیازی عمومی در خصوص موازنه زمان، هزینه، کیفیت و به‌کاربردن ریسک انتخاب شده است. پیرو بند فوق و نبود نمونه آماری با توجه به محدود بودن تعداد پروژه‌های صنعتی شرکت ایران خودرو، به‌صورت وضعی و غیر احتمالی یک پروژه مهم توسط کارشناسان و خبرگان مرتبط انتخاب می‌شود. (به‌واسطه مهم بودن پروژه‌های محصول جدید در ایران خودرو یکی از پروژه‌های طراحی و تولید محصول جدید، پیشنهاد می‌شود). چارچوب فرایند پژوهش به‌صورت فلوچارت گام‌به‌گام در شکل ۱، ارائه شده است.



شکل ۱. فرایند گام‌به‌گام پژوهش

مدل‌سازی^۱

شبکهٔ پروژه. هدف اصلی از ترسیم گراف پروژه، نمایش روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها است. روابط پیش‌نیازی متفاوتی در پروژه قابل‌تعریف است؛ ولی در این پژوهش فرض می‌شود که روابط پیش‌نیازی به‌صورت پایان - شروع و با زمان تأخیر صفر خواهد بود. شبکه یا گراف پروژه یک

1. GMOLP: Grey Multiobjective Linear Programming
 2. FGGP: Fuzzy Grey Goal Programming
 3. GLP: Grey Linear Programming

نمایش گرافیکی از وقایع، فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی پروژه است. به‌طور کلی یک پروژه با یک شبکه گراف مستقیم $G=(V,E)$ نمایش داده می‌شود که شامل m گره و مجموعه n کمان بوده که در آن $V=\{1,2,\dots,m\}$ یک گروه از گره‌ها و $E=\{(i,j),\dots,(l,m)\}$ مجموعه‌ای از کمان‌های مستقیم هستند. هر یک از فعالیت‌های پروژه به‌صورت $(i,j) \in E$ معرفی شده است و به دو صورت نمایش داده می‌شود: ۱. حالت عادی^۱ و ۲. حالت فشرده^۲.

تعریف متغیرها و پارامترها. در جدول ۳، متغیرها و پارامترهای مدل ارائه‌شده، مشخص شده است.

جدول ۳. جدول تعریف متغیرها و پارامترهای مدل ارائه‌شده

نماد	عنوان	نوع	توضیحات
N	تعداد فعالیت‌ها	پارامتر	-
$\otimes D_{ij}$	مدت زمان فعالیت ij در حالت عادی	پارامتر	-
$\otimes d_{ij}$	مدت زمان فعالیت ij در حالت فشرده	پارامتر	-
$\otimes C_{ij}$	هزینه مستقیم فعالیت ij در حالت عادی	پارامتر	-
$\otimes c_{ij}$	هزینه مستقیم فعالیت ij در حالت فشرده	پارامتر	-
$\otimes Q_{ij}$	کیفیت فعالیت ij در حالت عادی	پارامتر	-
$\otimes q_{ij}$	کیفیت فعالیت ij در حالت فشرده	پارامتر	-
$\otimes R_{ij}$	ریسک فعالیت ij در حالت عادی	پارامتر	-
$\otimes r_{ij}$	ریسک فعالیت ij در حالت فشرده	پارامتر	-
$\otimes x_{ij}$	مدت زمان واقعی فعالیت ij	متغیر	-
$\otimes t_{ij}$	زمان شروع فعالیت ij	متغیر	-
d^+_k	متغیرهای انحرافی اضافی k در خصوص روش تکمیلی (برنامه‌ریزی آرمانی)	متغیرهای تکمیلی	به‌ازای k ‌های فرد متغیر انحرافی مثبت
d^-_k	متغیرهای انحرافی کمبود k در خصوص روش تکمیلی (برنامه‌ریزی آرمانی)	متغیرهای تکمیلی	به‌ازای k ‌های زوج متغیر انحرافی کمبود
$\otimes cs_{ij}$	شیب هزینه فعالیت ij	پارامترهای ترکیبی اضافه‌شده	$\otimes cs_{ij}^3 = \frac{\otimes C_{ij} - \otimes c_{ij}}{\otimes d_{ij} - \otimes D_{ij}}$
$\otimes qs_{ij}$	شیب کیفیت فعالیت ij	پارامترهای ترکیبی اضافه‌شده	$\otimes qs_{ij}^4 = \frac{\otimes Q_{ij} - \otimes q_{ij}}{\otimes d_{ij} - \otimes D_{ij}}$
$\otimes rs_{ij}$	شیب ریسک فعالیت ij	پارامترهای ترکیبی اضافه‌شده	$\otimes rs_{ij}^5 = \frac{\otimes r_{ij} - \otimes R_{ij}}{\otimes d_{ij} - \otimes D_{ij}}$

1. Normal Form
2. Crashed Form
3. Cost Slope of Activity [20]
4. Quality Slope Of Activity [20]
5. Risk Slope of Activity

توابع هدف. در مسائل اگر یک تابع هدف وجود داشته باشد می‌توان گفت جواب بهینه^۱ وجود دارد؛ ولی وقتی چندتابع هدف موجود است، بهینه‌سازی معنا ندارد. در اینجا تصمیم‌گیرنده به‌جای بهینه‌سازی، رضایتمندی را جایگزین می‌کند. در این صورت تصمیم تعاملی اتخاذ می‌شود؛ به‌طوری‌که تمام اهداف تا حدی رضایت‌بخش باشد.

با توجه به نیاز به موازنه هم‌زمان ۴ عامل ذکر شده؛ از این‌رو برای حل مدل موازنه‌ای هزینه، زمان، ریسک و کیفیت از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندهدفه استفاده شده است. تابع هدف مدل دارای ۴ بخش شامل حداقل کردن هزینه، زمان و ریسک و حداکثرسازی کیفیت است. هدف اول) طبق معادله ۱۶، برای حداقل کردن هزینه فعالیت‌ها لحاظ شده است.

$$Z_1 = \min \text{ هزینه} \quad (16)$$

نخستین هدف از مدل ارائه‌شده این پروژه، کل هزینه اضافی را به حداقل رسانده است. فعالیت‌ها با حالت مختلف از منابع، امکان اجرا دارند و از منابع تجدیدپذیر(نیروی انسانی، ماشین آلات) و تجدید ناپذیر(مواد اولیه، بودجه) استفاده می‌کنند. در محاسبه هزینه‌ها اضافه‌کاری منابع تجدیدپذیر، جریمه دیرکرد یا پاداش تحویل زودتر از موعد پروژه در نظر گرفته شده است. [۱۹] فشرده‌کردن زمان تکمیل برخی از فعالیت‌ها باید به‌منظور کاهش کل مدت زمان پروژه اجرا شود. این عمل می‌تواند هزینه اضافی در این فعالیت‌ها را تحمیل کند؛ بنابراین در هدف اول، به‌حداقل رساندن هزینه کل اضافی از این فعالیت‌ها مدنظر است. اگر دو نقطه وضعیت زمان و هزینه برای هر فعالیت i, j ($\otimes D_{ij}, \otimes C_{ij}$) در حالت عادی و ($\otimes d_{ij}, \otimes c_{ij}$) در حالت فشرده نمایش داده شود، در این حالت، تابع هدف برای کل هزینه فعالیت i, j به‌صورت معادله ۱۷، محاسبه می‌شود:

$$\otimes C_{ij} + \otimes cs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij}) \quad (17)$$

بنابراین برای هزینه پروژه که مجموع هزینه‌های فعالیت‌های مربوطه است، به‌صورت معادله ۱۸، می‌توان نوشت:

$$\min Z_1 \cong \sum_{i,j \in E} \sum \otimes C_{ij} + \otimes cs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij}) \quad (18)$$

1. Optimize

جمله دسته ۲: برای حداقل کردن زمان موردنیاز پروژه، لحاظ شده است. یکی از اهداف مهم در اجرای پروژه پیش‌بینی و پیش‌برنامه‌ریزی زمانی پروژه است. روش‌های کاهش مدت زمان فعالیت را می‌توان به چند دسته تقسیم کرد: ۱. افزایش منابع؛ ۲. افزایش ساعات کاری؛ ۳. تغییر روش اجرا و ۴. افزایش بهره‌وری که اتخاذ این روش‌ها ممکن است بر سه پارامتر بالا مؤثر واقع شود. در این مدل اگر T_n زمان گره آخرین پروژه و T_1 زمان گره نخستین باشد، می‌توان زمان کلی پروژه را به صورت معادله ۱۹، تعریف کرد:

$$Z_2 = \min \text{ زمان‌ها} \quad (19)$$

$$\min Z_2 \cong \otimes t_n - \otimes t_1$$

جمله دسته ۳: برای موازنه کیفیت پروژه لحاظ شده‌اند. هدف به حداقل رساندن کاهش کیفیت در کل فعالیت‌های پروژه به دلیل فشردگی زمانی آن‌ها است. کاهش زمان فعالیت می‌تواند بر کاهش کیفیت فعالیت‌هایی که زمان تکمیل آن‌ها کم شده است، تأثیر بگذارد. به نظر می‌رسد اگر هر فعالیت با زمان تکمیل اولیه اجرا شود، کیفیت آن ۱۰۰ درصد خواهد بود؛ ولی اگر زمان تکمیل فعالیت کوتاه شود، کیفیت آن کاهش خواهد یافت و در نتیجه الزامات کیفی کلان پروژه در نظر گرفته نخواهد شد [۱۸]. باید توجه داشت که هر یک از فعالیت به‌تنهایی در اثر فشردگی تأثیر متفاوتی بر الزامات کیفی کل پروژه دارد؛ از این رو ضریب و شیب کیفیت آن فعالیت برای محاسبه کاهش / افزایش کیفیت پروژه باید در نظر گرفته شود. همان‌طور که در جمله دسته ۲ برای هزینه ارائه شد، مشابه آن برای کیفیت به شرح معادله ۲۰ و معادله ۲۱، است:

$$Z_3 = \max \text{ کیفیت} \quad (20)$$

$$\max Z_3 \cong \sum_{ij \in E} \sum \otimes Q_{ij} + \otimes qs_{ij} (\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij}) \quad (21)$$

درواقع در بخش کیفیت، منظور انتخاب فعالیت‌هایی برای کاهش زمان است که حداقل کاهش کیفیت را به پروژه تحمیل کنند. به تعبیر دیگر انتخاب فعالیت‌های مناسبی برای کاهش زمان، که کمترین تأثیر را بر الزامات کیفی پروژه ایجاد نمایند.

جمله دسته ۴: برای موازنه ریسک پروژه لحاظ شده‌اند. هدف از آن به حداقل رساندن ریسک در کل فعالیت‌های پروژه به دلیل فشردگی زمانی آن‌ها است. ریسک رویداد یا شرایطی نامشخص است که در صورت وقوع، اثر مثبت یا منفی بر پروژه خواهد گذاشت. ریسک ممکن است به یک یا چند علت اتفاق بیفتد و یک یا چند اثر بر پروژه داشته باشد [۲۱]. ریسک یک پروژه متشکل از

تهدیدها و فرصت‌هایی است که در این پژوهش تنها به تهدیدهای آن پرداخته شده است. با توجه به استاندارد PMBOK هر ریسک در صورت وقوع، حداقل بر یکی از اهداف پروژه اثر خواهد گذاشت که در متن نیز به اهداف زمان، کیفیت و زمان اشاره شده است و در این راستا تأثیر بر دامنه پروژه را نیز می‌توان لحاظ کرد. به‌طور کلی، هدف از دسته چهارم اهداف کاهش این ارزش ریسک‌ها در کل پروژه است که به‌صورت معادله ۲۲، لحاظ می‌شود.

$$\min Z_4 \cong \sum_{ij \in E} \sum \otimes R_{ij} + \otimes r_{S_{ij}} (\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij}) \quad (22)$$

از معادله ۱۸ تا معادله ۲۲، تنها برای ارتباط بین زمان و هزینه یا زمان کیفیت یا زمان و ریسک مدل استفاده شده است که هر تابع خطی را به‌صورت مشابه می‌توان در معادله‌ای مشابه لحاظ کرد.

در فضای اجرایی، پس از آماده‌سازی فهرست فعالیت‌های پروژه، برنامه زمان‌بندی اولیه پروژه برای بررسی در دسترس است. مجری پروژه به بررسی برنامه‌های اولیه و به اخذ نظر از پیمانکاران برای فشرده‌سازی برنامه می‌پردازد؛ بنابراین پیمانکار برای فشرده‌سازی و کاهش زمان برخی از اطلاعات فعالیت‌های پروژه را تکمیل می‌کند. از آنجاکه کوتاه‌شدن زمان یک فعالیت می‌تواند به افزایش هزینه، افزایش ریسک و ویرایش در کیفیت منجر شود. در اینجا چند هدف مخلوط برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای تعیین فعالیت‌های پیشنهادی که باید به لحاظ زمانی کوتاه شوند و هم‌زمان آن‌ها باید حداقل هزینه، ریسک و کاهش کیفیت را تحمل کنند، ارائه شده است.

تابع هدف تکمیلی. طبق معادله ۲۳، در آن حداقل کردن مجموع انحراف‌های نامطلوب مدنظر است.

$$\min Z_5 = \sum_h d_h \quad (23)$$

محدودیت‌ها. علاوه بر محدودیت‌های پیش‌نیازی سه خوشه محدودیت زیر را می‌توان برای فعالیت‌ها در مدل نمایش داد:

خوشه اول محدودیت در شروع و پایان زمان فعالیت. با فرض اینکه فعالیت i_j در زمان $\otimes t_i$ شروع شده و با مدت زمان $\otimes x_{ij}$ اجرا شود، زمان اختتام فعالیت $\otimes t_j$ است؛ بنابراین برای هر فعالیت باید معادله ۲۴، برقرار باشد.

$$\otimes t_i + \otimes x_{ij} \leq \otimes t_j \quad \forall ij \in E, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

خوشه دوم و سوم محدودیت‌ها در مدت زمان واقعی فعالیت. اگر مدت زمان واقعی فعالیت z_j با $\otimes x_{ij}$ نمایش داده شود، باید معادله‌های ۲۵ و ۲۶ برای فعالیت‌ها برقرار باشند:

$$\otimes x_{ij} \leq \otimes D_{ij} \quad \forall ij \in E \quad (25)$$

$$\otimes x_{ij} \geq \otimes d_{ij} \quad \forall ij \in E \quad (26)$$

محدودیت‌های تکمیلی. این محدودیت‌ها مخصوص برنامه‌ریزی آرمانی است (در این نوع محدودیت، آرمان مقدار معینی است؛ اما انحراف از آن مجاز نیست و به آن «محدویت نرم» نیز گفته می‌شود که در معادله ۲۷، نشان داده شده است).

$$\begin{aligned} \mu_k + d_h &= 1 & k = 1, 2, 3, 4, h = 1, 3, 5, 7 \\ \mu_k - d_h &= 0 & k = 1, 2, 3, 4, h = 2, 4, 6, 8 \end{aligned} \quad (27)$$

(در مدل عددی در نرم‌افزار لینگو به‌جای متغیر μ_k از متغیر Y_k استفاده شده است).

جمع‌آوری داده‌ها. مورد مطالعه در این پژوهش، یکی از پروژه‌های تولید محصول جدید در «شرکت ایران خودرو» است. این خودروی جدید با نام مختصر X709 در کلاس C^۱ خودرو بوده و با تغییرات محدود بر روی بدنه، موتور و تریم داخلی تعریف شده است که پلتفرم خودرو^۲ نیز مشترک است.

در این پروژه به‌طورکلی باید چهار دسته فعالیت کلان شامل پیش‌توسعه و امکان‌سنجی، طراحی، تأمین و صنعتی‌سازی اجرا شود که هر یک از این سرفصل‌ها تقریباً شامل بیست زیر فعالیت است. در ابتدا برای هر فعالیت به‌صورت عادی زمان با مقیاس روز پیشنهاد شده است و هزینه به میلیون ریال، ریسک به صورت اعداد فاصله‌ای و کیفیت به صورت درصد پذیرش کیفی

۱. کارشناسان، خودروها را بر اساس اندازه و کاربرد به دسته‌های مجزایی تقسیم‌بندی می‌کنند که کلاس C یا سایز متوسط، منظور خودروهایی است که از نظر اندازه متوسط و مناسب برای استفاده خانوادگی هستند. طول بدنه این خودروها بین ۴۰۰۰ mm تا ۴۴۰۰ mm است و حجم موتور این خودروها عموماً بین ۱۳۰۰ تا ۲۰۰۰ سی‌سی است. این نوع خودروها از پرفروش‌ترین خودروها در دنیا محسوب می‌شوند.

۲. به مجموعه‌ای از سیستم شاسی، موتور، انتقال قدرت و کنترل حرکت، پلتفرم گفته می‌شود.

تخمین زده شده است که در جدول ۴، مشخصات برخی از فعالیت‌های پروژه به صورت نمونه در حالت عادی ارائه شده است؛ اما به واسطه اقتضای زمان بازار، لازم به سرعت بیشتری در تولید محصول جدید در این بخش بازار است که مسلماً بررسی مجدد زمان، هزینه، کیفیت و ریسک موجود در فشرده‌سازی فعالیت‌ها ضروری است و در ادامه جدول، مشخصات فعالیت‌های ذیربط در حالت فشرده نیز ارائه شده است.

اطلاعات تکمیل شده جدول ۴، با استناد بر نظر خبرگان و گروه پروژه در جلسه‌های برنامه‌ریزی پروژه و همچنین دانش‌آموخته‌های^۱ پروژه‌های محصولی مشابه در «شرکت ایران خودرو» لحاظ شده است. کلیه اعداد خاکستری زمان بر حسب روز، هزینه با مقیاس میلیون ریال و کیفیت بر اساس درصد کیفیت مورد قبول برای هر فعالیت منظور شده است.

جدول ۴. مشخصات برخی فعالیت‌های پروژه نمونه در حالت فشرده و عادی

Activity Code	Predecessors	Normal mode				Crash mode			
		Time (Day)	Cost (Mil.Irr)	Quality (%)	Risk (Variables Linguistic)	Time (Day)	Cost (Mil.Irr)	Quality (%)	Risk (Variables Linguistic)
Act 2	0	[1,5,2]	[20/4,24/3]	[70,75]	[1,2]	[0/5,1]	[45/5,56]	[60,65]	[3,4]
Act 4	Act 2	[8,10]	[76/8,83/2]	[90,95]	[5,6]	[5,7]	[119/5,142/4]	[80,85]	[5,6]
Act 5	Act 4	[42,45]	[69/5,86/4]	[80,85]	[5,6]	[30,35]	[169/5,189/9]	[70,75]	[6,7]
Act 6	Act 5	[27,30]	[111/5,136]	[85,90]	[4,5]	[15,18]	[282/5,350/5]	[70,75]	[5,6]
Act 7	Act 6	[4,5]	[22,25]	[75,80]	[6,7]	[2,3]	[40,45]	[70,75]	[6,7]
Act 8	Act 7	[17,20]	[153/5,180]	[85,90]	[5,6]	[12,15]	[325,395/5]	[85,90]	[5,6]
Act 9	Act 8	[19,20]	[169/1,198/5]	[80,85]	[5,6]	[10,12]	[347/5,414/2]	[85,90]	[5,6]
Act 10	Act 9	[6,7]	[90,109/5]	[85,90]	[6,7]	[4,5]	[235,304/5]	[75,80]	[8,9]
Act 11	Act 10	[9,10]	[58/5,72]	[75,80]	[5,6]	[5,6]	[152/5,194/5]	[70,75]	[6,7]
Act 12	Act 11	[6,8]	[128/8,160/5]	[90,95]	[8,9]	[4,5]	[325/5,371/4]	[85,90]	[9,10]
Act 14	Act 4	[40,45]	[498/9,544]	[75,80]	[8,9]	[30,32]	[752,834/5]	[80,85]	[6,7]

پارامتر ریسک در این پژوهش نیز برای تجسم کمی نظرهای کیفی ایراد شده به صورت اعداد فاصله‌ای در نظر گرفته می‌شود که جدول ۵، مقیاس قابل استفاده برای بیان امتیاز هر گزینه نسبت به هر شاخص را نشان می‌دهد [۲۲].

جدول ۵. امتیاز فاصله‌ای متناظر با مقیاس ریسک انتخابی

مقیاس	⊗R
بسیار ضعیف	[1, 2]
ضعیف	[3, 4]
متوسط ضعیف	[4, 5]
متوسط	[5, 6]
متوسط قوی	[6, 7]
قوی	[8, 9]
بسیار قوی	[9, 10]

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

نمونه‌های زیادی در مبانی نظری پژوهش موجود است که در آن‌ها ابتدا مدل‌های قطعی حل شده و سپس مقادیر پاسخ به‌دست‌آمده برای هدف، به‌عنوان الگو برای توسعه تابع عضویت استفاده شده است. در کنار این پژوهش‌ها نمونه‌های دیگری به چشم می‌خورد که قضاوت تصمیم‌گیرنده را پیشنهاد کرده است. در این پژوهش روش اول برگزیده شده و ادامه مراحل نیز پیرو این انتخاب ارائه شده است.

سه هدف حداقل‌سازی (زمان، هزینه و ریسک) و یک هدف حداکثرسازی (کیفیت) برای به-دست‌آوردن تابع عضویت با روش برنامه‌ریزی خطی به‌صورت معادله ۲۸، مدل‌سازی و حل شده است:

$$\min Z_1 (Z_2 \& Z_4 \text{ or } \max Z_3) \quad (28)$$

Subject to:

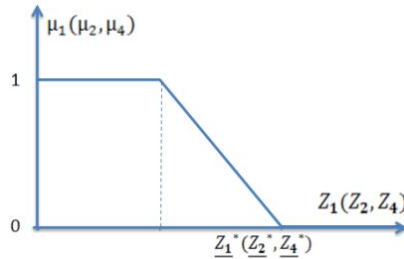
FS (Eq 24 to 26)

هر یک از اهداف دارای مقادیر خاکستری بهینه است که از روش هوانگ (۱۹۹۴) مشتق شده است [۹]. فرض شود که $Z_1^* \otimes$ یک مقدار بهینه خاکستری از هدف اول است که از طریق تابع حداقل‌کردن حد پایین (معادله ۳ و معادله ۷) و حداقل‌کردن حد بالا (معادله ۲ و معادله ۶) به‌دست آمده است. این روش حل، ایده‌ای برای توسعه توابع عضویت با توجه معادله ۱۳، ارائه می‌کند و در معادله ۲۹، نشان داده شده است:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1 & \text{اگر } Z_1 \leq \underline{Z}_1^* \\ \frac{\overline{Z}_1^* - Z_1}{\overline{Z}_1^* - \underline{Z}_1^*} & \text{اگر } \underline{Z}_1^* \leq f_i(x) \leq \overline{Z}_1^* \\ 0 & \text{اگر } Z_1 \geq \overline{Z}_1^* \end{cases} \quad (29)$$

که \overline{Z}_1^* حد بالایی تحمل و $\underline{Z}_1^* - \overline{Z}_1^*$ بازه تحمل است. تابع عضویت برای اهداف دوم و چهارم (زمان و ریسک) که مربوطه به کمینه‌سازی هست نیز به همین روش انجام می‌شود. در شکل ۲، توابع عضویت اهداف یک، دو، چهار نمایش داده شده است.

۱. شامل سه خوشه محدودیت برگرفته از معادله‌های ۲۴ الی ۲۶ است، که تحت عنوان محدودیت‌های تعیین‌کننده/امکان‌پذیر (Feasible Solution) در نظر گرفته شده‌اند. این اقدام به‌منظور جلوگیری از تکرار نگارش محدودیت‌های مذکور است. در سایر مدل‌ها نیز از همین نمادگذاری جهت کاهش تکرار استفاده شده است.

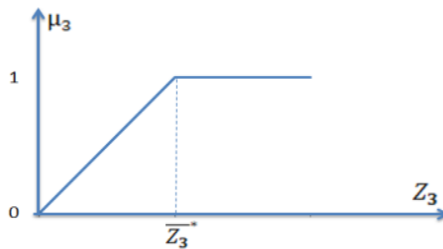


شکل ۱. نمودار شماتیک توابع عضویت اهداف یک و دو و چهارم

برای تابع هدف سوم (کیفیت) که مدل ماکزیمم‌سازی است، برای بیشینه‌کردن در ابتدا مقدار حد بالایی (معادله ۲ و معادله ۶) و سپس مقدار حد پایینی (معادله ۳ و معادله ۷) مشخص می‌شود و مقادیر بهینه خاکستری به دست می‌آیند؛ همچنین تابع عضویت به صورت معادله ۳۰، می‌شود:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{اگر } Z_3 \geq \overline{Z_3}^* \\ \frac{Z_3 - \underline{Z_3}^*}{\overline{Z_3}^* - \underline{Z_3}^*} & \text{اگر } \underline{Z_3}^* \leq Z_3 \leq \overline{Z_3}^* \\ 0 & \text{اگر } Z_3 \leq \underline{Z_3}^* \end{cases} \quad (30)$$

که $\underline{Z_3}^*$ حد پایین تحمل برای هدف فازی Z_3 و $\overline{Z_3}^* - \underline{Z_3}^*$ بازه تحمل است. در شکل ۳، تابع عضویت هدف سوم نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمودار شماتیک تابع عضویت هدف سوم

در ادامه تصمیم‌گیرنده چندساختار پیشگیرانه که برای اهداف بالا مهم هستند را در دسترس دارد. بر اساس تسای و چن (۲۰۰۱) مدل GLP می‌تواند با دستیابی به بهترین ترکیب معادله ۳۱، حل شود [۵]:

$$\max \sum_{i=1}^3 \mu_k$$

$$\mu_k \leq \frac{\overline{Z_k} - Z_k}{\overline{Z_k} - \underline{Z_k}^*} \quad k = 1, 2, 4 \quad (31)$$

$$\mu_3 \leq \frac{Z_3 - \underline{Z_3}^*}{\overline{Z_3}^* - \underline{Z_3}^*}$$

محدودیت‌های زیر که جزو محدودیت‌های ساختاری این تحقیق هستند باید در حل مدل نیز لحاظ شود:

FS (Eq 24 to 26)

$$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \otimes x_{ij}, t_i \geq 0$$

GLP بالا می‌تواند با روش هوانگ (۱۹۹۴) در دو فاز حل شود [۹]. در فاز اول، مسئله محدودده بالایی بر اساس معادله ۲ و معادله ۶ حل شده و حد پایین بر اساس معادله ۳ و معادله ۷، حل می‌شود. پاسخ‌های این دو مسئله پاسخ خاکستری برای مسئله TCQRT را مشخص می‌کنند که مرحله مرتبط در الگوریتم حل مسئله در شکل ۱، نمایش داده شده است. در این گام از الگوریتم، چند محدودیت به مدل اضافه خواهد شد. در ابتدا مدل محدودده پایین حل شده است تا مقادیر محدودده پایینی از متغیرهای تصمیم را مشخص کنند؛ از این رو در این فاز مدل برنامه‌ریزی خطی از عوامل معادله ۳۲، تشکیل شده است:

$$\max \sum_{k=1}^3 \mu_k$$

$$\mu_k \leq \frac{\overline{Z_k} - Z_k}{\overline{Z_k} - \underline{Z_k}^*} \quad k = 1, 2, 4 \quad (32)$$

$$\mu_3 \leq \frac{Z_3 - \underline{Z_3}^*}{\overline{Z_3}^* - \underline{Z_3}^*}$$

محدودیت‌های زیر که طبق معادله ۲۵ و معادله ۲۶، جزو خوشه دوم و سوم محدودیت‌های ساختاری است و بر حد پایین آن‌ها دلالت دارد بدین شکل در محدودیت‌ها لحاظ می‌شوند:

$$\otimes \underline{x}_{ij} \leq \otimes \underline{D}_{ij} \quad \forall ij \in E$$

$$\otimes \underline{x}_{ij} \geq \otimes \underline{d}_{ij} \quad \forall ij \in E$$

FS (Eq 24 to 26)

$$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \otimes \bar{x}_{ij}, t_i \geq 0$$

با داشتن پاسخ‌های مدل بالا، فاز دو آغاز می‌شود که مبتنی بر مدل حد بالایی است. مدل مربوطه با جابه‌جایی متغیرهای محدوده پایینی در مدل با متغیرهای حد بالایی و اضافه کردن محدودیت‌های مربوط به حد بالایی معادله ۳۳، تشکیل خواهد شد:

$$\max \sum_{k=1}^3 \mu_k$$

$$\mu_k \leq \frac{\bar{Z}_k^* - Z_k}{\bar{Z}_k^* - \underline{Z}_k^*} \quad k = 1, 2, 4 \quad (33)$$

$$\mu_3 \leq \frac{Z_3 - Z_3^*}{\bar{Z}_3^* - \underline{Z}_3^*}$$

که در توابع هدف با استفاده از معادله‌های ۱۸ تا ۲۲، برای Z_k جایگذاری صورت می‌پذیرد. محدودیت‌های زیر که جزو خوشه دوم و سوم از محدودیت‌های ساختاری است و بر حد بالای آن‌ها دلالت دارد، بدین شکل در محدودیت‌ها ارائه می‌شود:

$$\otimes \bar{x}_{ij} \leq \otimes \bar{D}_{ij} \quad \forall ij \in E$$

$$\otimes \bar{x}_{ij} \geq \otimes \bar{d}_{ij} \quad \forall ij \in E$$

FS (Eq 24)

$$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \otimes \bar{x}_{ij}, t_i \geq 0$$

در ادامه برای ساخت مدل نهایی GLP برای FGPP-TCQRT همان‌طور که حل مدل عددی به تشریح منظور خواهد شد، محدودیت‌های ترجیحی و عضویت نیز اضافه می‌شوند: محدودیت‌های ترجیحی مدل: بر اساس رویه حرکت رو به جلو و تسای و چن (۲۰۰۱) می‌توان ارجحیت بین اهداف را با لحاظ کردن شروط مربوطه در μ_k در مدل اعمال کرد [۵]. در این پژوهش بر اساس نظرهای استادان محترم و خبرگان گروه پروژه تصمیم مبنی بر نبود ارجحیت نسبی بین زمان و هزینه و همچنین بین کیفیت و ریسک در نظر گرفته شد؛ اما ارجحیت نسبی زمان و هزینه بر کیفیت و ریسک پذیرفته شد؛ بنابراین چهار محدودیت معادله ۳۴، در مدل اضافه می‌شود.

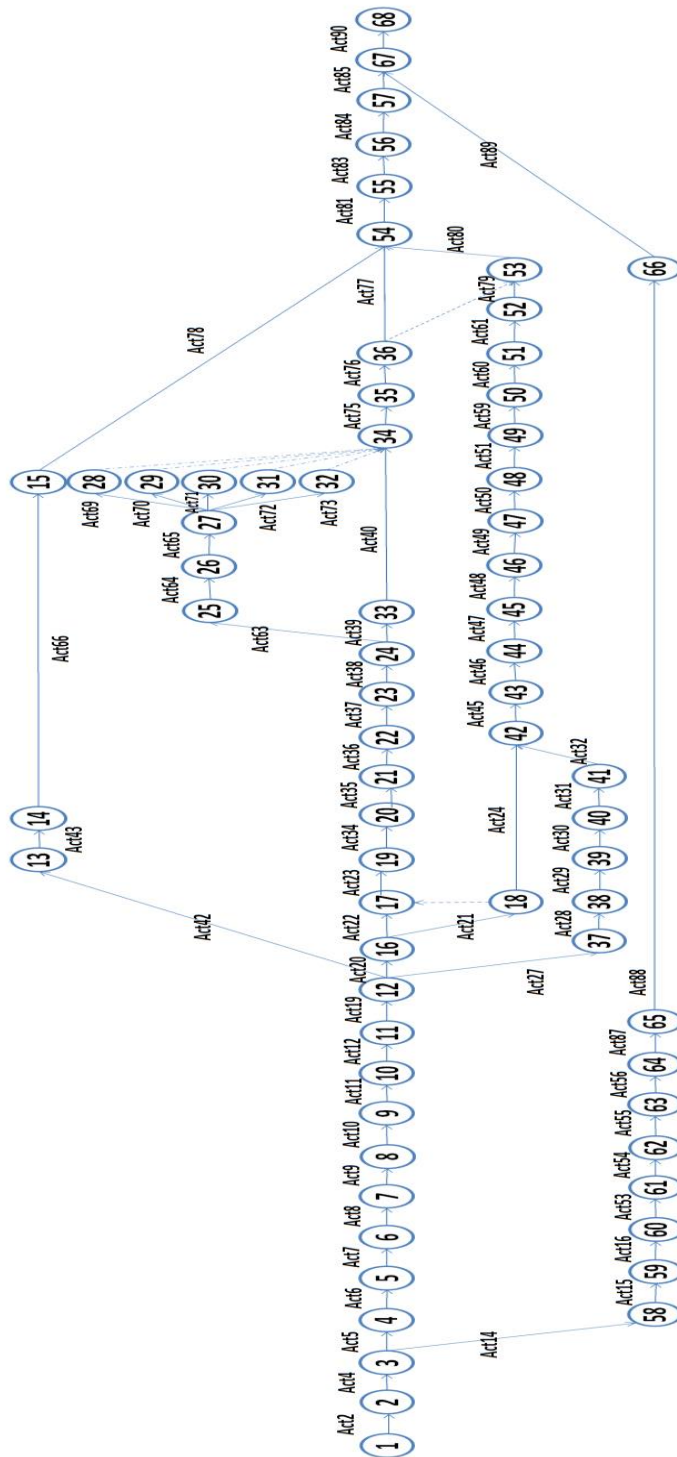
$$\begin{aligned} \mu_{T2}(\mu_2) > \mu_{Q3}(\mu_3) & \quad \mu_{c1}(\mu_1) > \mu_Q(\mu_3) \\ \mu_T(\mu_2) > \mu_{R4}(\mu_4) & \quad \mu_c(\mu_1) > \mu_R(\mu_4) \end{aligned} \quad (34)$$

و همچنین باید محدودیت‌های تابع عضویت معادله ۳۵، نیز به مدل اضافه شود:

$$\begin{aligned} \mu_1 \leq 1 & \quad \mu_3 \leq 1 \\ \mu_2 \leq 1 & \quad \mu_4 \leq 1 \end{aligned} \quad (35)$$

سپس مدل نهایی شده بالا، بر اساس روش هوانگ (۱۹۹۴) در دو فاز محدودده پایینی و محدودده بالایی، حل می‌شود و متغیرها بر اساس اعداد خاکستری به دست آورده می‌شود [۹]. در این راستا با به دست آمدن $\otimes \mu_i$ در نتیجه $\otimes Z_i$ نیز برای پروژه مشخص می‌شود که در ادامه مدیر پروژه امکان انتخاب نهایی هر یک از متغیرهای خاکستری پروژه برای زمان فعالیت‌ها را به عهده دارد. کلیه مراحل یادشده در نمونه عددی که شبکه آن در شکل ۴، ارائه شده است، به تکمیل، ارائه می‌شود.

-
1. Cost
 2. Time
 3. Quality
 4. Risk



شکل ۲. شبکه پروژه نمونه

فعالیت‌های x_{1817} ، x_{2834} ، x_{2934} ، x_{3034} ، x_{3134} ، x_{3234} و x_{3653} در شبکه بالا فعالیت‌های مجازی با زمان صفر هستند.

برای حل مسئله عددی پیرو مراحل پیشنهادی GMOLP-TCQRT طبق گام‌های زیر عمل می‌شود:

گام ۱: فرمول نویسی GMOLP-TCQRT پیرو معادله ۱۷ تا معادله ۲۶ (به غیر از معادله ۲۳) گام ۲: توسعه تابع عضویت اهداف. توابع عضویت برای اهداف با حل جداگانه هر یک از چهار مسئله بهینه‌سازی از اهداف مذکور به دست آمده است (مطابق معادله ۲۸).

مقدار بهینه برای هر یک از اهداف به ترتیب این‌گونه هستند: $Z_1^* \in (199938, 208277)$ ، $Z_2^* \in (511, 579)$ ، $Z_3^* \in (5682, 6711)$ و $Z_4^* \in (355, 436)$

بر اساس پاسخ‌های بهینه مذکور، توابع عضویت پیرو معادله ۲۹ و معادله ۳۰، به صورت معادله‌های ۳۶، ۳۷، ۳۸ و ۳۹ خواهند بود:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1 & \text{اگر } Z_1 \leq 199938 \\ \frac{208277 - Z_1}{208277 - 199938} & \text{اگر } 199938 \leq f_i(x) \leq 208277 \\ 0 & \text{اگر } Z_1 \geq 208277 \end{cases} \quad (36)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 1 & \text{اگر } Z_2 \leq 511 \\ \frac{579 - Z_2}{579 - 511} & \text{اگر } 511 \leq f_i(x) \leq 579 \\ 0 & \text{اگر } Z_2 \geq 579 \end{cases} \quad (37)$$

$$\mu_4 = \begin{cases} 1 & \text{اگر } Z_4 \leq 355 \\ \frac{436 - Z_4}{436 - 355} & \text{اگر } 355 \leq f_i(x) \leq 436 \\ 0 & \text{اگر } Z_4 \geq 436 \end{cases} \quad (38)$$

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{اگر } Z_3 \geq 5682 \\ \frac{Z_3 - 5682}{6711 - 5682^*} & \text{اگر } 5982 \leq Z_3 \leq 6711 \\ 0 & \text{اگر } Z_3 \leq 6711 \end{cases} \quad (39)$$

معادله ۳۷، نشان می‌دهد که اگر مدت زمان پروژه کمتر از ۵۱۱ روز باشد برای مدیر پروژه منفعت ۱۰۰ درصد دارد و اگر از ۵۷۹ روز بیشتر باشد، منفعت آن صفر است؛ همچنین مقدار سودمندی پروژه برای مدیر پروژه با توجه به تکمیل پروژه بین این دو مقدار، طبق معادله ۳۷ محاسبه می‌شود. با همین روش توابع عضویت دیگر قابل توضیح هستند.

گام ۳: انتقال به یک مدل معادل FGGP-TCQRT. با توجه به لحاظ کردن مقادیر حد پایین و حد بالایی از اهداف، اعداد خاکستری مدل چندهدفه می‌تواند به مدل FGGP منتقل شود.
گام ۴: انتقال به معادل مدل GLP. مدل معادل GLP برای FGGP-TCQRT به صورت زیر ساختار یافته است:

همان‌طور که در معادله ۳۴، نیز اشاره شد مدیر پروژه می‌تواند بین اهداف اولویت‌هایی را قائل شود؛ از این رو برای نمونه عددی شروط $\mu_1 \geq \mu_3$, $\mu_1 \geq \mu_4$, $\mu_2 \geq \mu_3$ و $\mu_2 \geq \mu_4$ اعمال می‌شود (در مدل عددی در نرم‌افزار لینگو به جای متغیر μ_k از متغیر Y_k استفاده شده است)؛ در نهایت مدل نمونه عددی به شرح معادله ۴۰، ارائه می‌شود:

$$\min f(\mu) = \sum_{k=1}^3 \otimes \mu_k \quad (40)$$

Subject to:

$$\mu_1 \leq 24.9763 - 0.00011992 * [\sum_{ij \in E} \sum \otimes C_{ij} + \otimes cs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij})]$$

$$\mu_2 \leq 8.5147 - 0.01470588 * [\otimes t_n - \otimes t_1]$$

$$\mu_3 \leq 0.00097182 * [\sum_{ij \in E} \sum \otimes Q_{ij} + \otimes qs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij})] - 5.5219$$

$$\mu_4 \leq 5.3827 - 0.01234568 * [\sum_{ij \in E} \sum \otimes R_{ij} + \otimes rs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij})]$$

$$\otimes t_i + \otimes x_{ij} \leq \otimes t_j \quad \forall ij \in E, i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\otimes x_{ij} \leq \otimes D_{ij} \quad \forall ij \in E$$

$$\otimes x_{ij} \geq \otimes d_{ij} \quad \forall ij \in E$$

$$\mu_2 > \mu_3$$

$$\mu_1 > \mu_3$$

$$\mu_1 \leq 1$$

$$\mu_3 \leq 1$$

$$\mu_2 > \mu_4$$

$$\mu_1 > \mu_4$$

$$\mu_2 \leq 1$$

$$\mu_4 \leq 1$$

$$\otimes x_{ij}, \otimes t_i \geq 0, \quad \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4 \geq 0, \quad \forall ij \in E, i, j = 1, 2, \dots, n$$

گام ۵: حل مدل GLP. بر اساس رویکرد هوانگ (۱۹۹۴) مدل به روش دوفازه حل شده است. [۲۳] در فاز اول مقادیر محدوده پایینی تابع هدف بر اساس معادله ۳، پیدا شده و در جدول ۷، پاسخ فاز ۱ این مدل ارائه شده است. در فاز دوم، مقادیر محدوده بالایی تابع هدف بر اساس معادله ۲ پیدا شده و پاسخها برگرفته از نرم‌افزار لینگو در جدول ۷، ارائه شده است. درجات تابع عضویت برای فاز یک بدین صورت است: $\mu_1, \mu_2, \mu_4 = 1, \mu_3 = 1$ و اگر پروژه در این حالت اجرا شود زمان اتمام آن، ۵۷۹ روز، هزینه آن معادل ۲۰۸۳۰۱ میلیون ریال، کیفیت ۵۶۵۹ و

ریسک ۳۶۲ است. در صورت اجرای پروژه در فاز دوم درجات تابع عضویت نیز بدین صورت است؛ $\mu_1, \mu_2, \mu_4, \mu_3 = 0$ و اگر پروژه در این حالت اجرا شود زمان اتمام آن: ۵۷۹ روز، هزینه آن معادل ۲۳۳۱۱۹ میلیون ریال، کیفیت ۶۷۵۹ و ریسک ۴۹۲ است.

گام ۶: برای تکمیل روش استفاده‌شده در پژوهش، طبق ساختار شکست کار مطرح شده در مقاله شکل ۱، از برنامه‌ریزی آرمانی و اعمال متغیرهای انحرافی اضافی / کمبود به‌عنوان روش تکمیلی استفاده شده است و با تغییر مدل، جواب‌های مناسب‌تری ارائه شده است (معادله ۲۳ و معادله ۲۷) مدل تکمیلی به شرح زیر هستند:

$$\text{ming}(d) = \sum_{h=1}^6 d_h$$

Subject to:

$$\mu_1 = 24.9763 - 0.00011992 * [\sum_{ij \in E} \sum \otimes C_{ij} + \otimes cs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij})]$$

$$\mu_2 = 8.5147 - 0.01470588 * [\otimes t_n - \otimes t_1]$$

$$\mu_3 = 0.00097182 * [\sum_{ij \in E} \sum \otimes Q_{ij} + \otimes qs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij})] - 5.5219$$

$$\mu_4 = 5.3827 - 0.01234568 * [\sum_{ij \in E} \sum \otimes R_{ij} + \otimes rs_{ij}(\otimes x_{ij} - \otimes D_{ij})]$$

$$\otimes t_i + \otimes x_{ij} \leq \otimes t_j \quad \forall ij \in E, i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\otimes x_{ij} \leq \otimes D_{ij} \quad \forall ij \in E$$

$$\otimes x_{ij} \geq \otimes d_{ij} \quad \forall ij \in E$$

$$\mu_2 > \mu_3 \quad \mu_1 > \mu_3 \quad \mu_1 \leq 1 \quad \mu_3 \leq 1$$

$$\mu_2 > \mu_4 \quad \mu_1 > \mu_4 \quad \mu_2 \leq 1 \quad \mu_4 \leq 1$$

$$\mu_1 + d_1 = 1 \quad \mu_2 + d_3 = 1 \quad \mu_3 + d_5 = 1 \quad \mu_4 + d_7 = 1$$

$$\mu_1 - d_2 = 1 \quad \mu_2 - d_4 = 1 \quad \mu_3 - d_6 = 1 \quad \mu_4 - d_8 = 1$$

$$\otimes x_{ij}, \otimes t_i \geq 0, \quad \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4 \geq 0, \quad \forall ij \in E, i, j = 1, 2, \dots, n$$

فاز اول مقادیر محدوده پایینی تابع هدف تکمیلی بر اساس معادله ۳، پیدا شده و در جدول ۶، پاسخ فاز یک این مدل ارائه شده است. مقادیر محدوده بالایی در فاز دوم تابع هدف تکمیلی، برگرفته از پاسخ‌های نرم‌افزار لینگو نیز در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. پاسخ‌های فاز اول و دوم مقادیر محدوده پایینی و بالایی تابع هدف تکمیلی

متغیر	مقادیر فاز ۱- تکمیلی	متغیر	مقادیر فاز ۱- تکمیلی	متغیر	مقادیر فاز ۲- تکمیلی	متغیر	مقادیر فاز ۲- تکمیلی
X12	۰/۵	T1	۰	X12	۲	T1	۰
X23	۸	T2	۰/۵	X23	۷	T2	۲
X34	۳۰	T3	۸/۵	X34	۳۵	T3	۹
X45	۱۵	T4	۳۸/۵	X45	۱۸	T4	۴۴
X56	۴	T5	۵۳/۵	X56	۳	T5	۶۲
X67	۱۲	T6	۵۷/۵	X67	۱۵	T6	۶۵
X78	۱۰	T7	۶۹/۵	X78	۱۲	T7	۸۰
X89	۴	T8	۷۹/۵	X89	۷	T8	۹۲
X910	۵	T9	۸۳/۵	X910	۶	T9	۹۹
X1011	۶	T10	۸۸/۵	X101	۸	T10	۱۰۵
X358	۴۰	T11	۹۴/۴	X358	۴۰	T11	۱۱۳
X5859	۵	T58	۴۸/۵	X585	۱۰	T58	۴۹/۵
X5960	۵	T59	۵۳/۵	X596	۵	T59	۴۷۴
X1112	۲۰	T60	۵۸/۵	X111	۲۱	T60	۴۷۹
X1216	۱۷	T12	۱۱۴/۵	X121	۲۰	T12	۱۳۴
X1618	۳۲	T16	۱۵۲/۵	X161	۳۵	T16	۱۶۴
X1617	۵	T18	۱۸۴/۵	X161	۱۰	T18	۲۰۱
X1719	۱۲	T17	۱۵۷/۵	X171	۱۵	T17	۱۷۴
X1842	۲۲	T19	۱۶۹/۵	X184	۳۵	T19	۱۸۹
X1237	۴۲	T42	۲۰۶/۵	X123	۴۵	T42	۲۳۸
X3738	۱۰	T37	۱۵۶/۵	X373	۱۵	T37	۱۷۹
X3839	۱۲	T38	۱۶۶/۵	X383	۱۴	T38	۱۹۴
X3940	۵	T39	۱۷۸/۵	X394	۶	T39	۲۰۸
X4041	۵	T40	۱۸۳/۵	X404	۹/۵	T40	۲۱۴
X4142	۱۸	T41	۱۸۸/۵	X414	۱۴	T41	۲۲۳/۵
X1920	۵۰	T20	۳۰۵	X192	۵۵	T20	۲۴۵/۵
X2021	۹	T21	۳۱۴	X202	۱۰	T21	۳۲۶/۵
X2122	۲۴	T22	۳۳۸	X212	۲۵	T22	۳۵۱/۵
X2223	۲۵	T23	۳۶۳	X222	۲۵	T23	۳۷۷
X2324	۱۷	T24	۳۸۰	X232	۲۰	T24	۳۹۷
X2433	۲۵	T33	۴۰۵	X243	۳۰	T33	۴۲۷
X3334	۷	T34	۴۱۲	X333	۱۰	T34	۴۳۷
X1213	۵	T13	۳۸۲	X121	۸	T13	۱۴۴/۵
X1314	۳۵	T14	۴۲-/۵	X131	۴۰	T14	۱۸۷
X4243	۳۳	T43	۲۴۰	X424	۳۵	T43	۲۷۲/۵
X4344	۵۰	T44	۲۸۹	X434	۴۵	T44	۳۱۷/۵
X4445	۱۴	T45	۳۰۳	X444	۱۵	T45	۳۳۲/۵
X4546	۵	T46	۳۰۸	X454	۱۰	T46	۳۴۲/۵
X4647	۱۲	T47	۳۲۰	X464	۱۷	T47	۳۵۹/۵
X4748	۱۵	T48	۳۳۵	X474	۱۶	T48	۳۷۵/۵
X4849	۶	T49	۳۴۱	X484	۷	T49	۳۸۲/۵
X6061	۱۵	T61	۷۴	X606	۲۰	T61	۴۹۹/۵
X6162	۱۵	T62	۸۹	X616	۱۶	T62	۵۱۶

X6263	۱۷	T63	۱۰۶	X626	۲۰	T63	۵۳۶/۵
X6364	۴	T64	۱۱۰	X636	۱۰	T64	۵۴۶/۵
X4950	۳۲	T50	۳۷۳	X495	۳۵	T50	۴۱۷/۵
X5051	۶۰	T51	۴۳۳	X505	۳۳/۵	T51	۴۵۱
X5152	۲۵	T52	۴۵۸	X515	۲۸	T52	۴۷۹
X2425	۲۵	T25	۴۰۵	X242	۳۰	T25	۴۲۷
X2526	۹۵	T26	۵۰۰	X252	۱۰۰	T26	۵۳۷
X2627	۲۸	T27	۵۲۸	X262	۳۰	T27	۵۵۷
X1415	۳۵	T15	۴۶۰	X141	۴۰	T15	۴۹۰
X2728	۵۰	T28	۵۷۸	X272	۵۵	T28	۶۱۲
X2729	۳۵	T29	۵۶۳	X272	۴۰	T29	۵۹۷
X2730	۱۸	T30	۵۴۶	X273	۲۰	T30	۵۷۷
X2731	۲۷	T31	۵۵۵	X273	۳۰	T31	۵۸۷
X2732	۶۵	T32	۵۹۳	X273	۷۰	T32	۶۳۷
X3435	۱۴	T35	۴۲۶	X343	۱۵	T35	۴۵۲
X3536	۳۷	T36	۴۶۳	X353	۴۰	T36	۴۹۲
X3654	۱۴	T54	۴۷۷	X365	۱۵	T54	۵۰۷
X1554	۱۴	T53	۴۶۳	X155	۱۵	T53	۴۸۹
X5253	۵	T55	۴۹۱	X525	۱۰	T55	۵۲۵
X5354	۱۴	T56	۵۱۲	X535	۱۸	T56	۵۵۱
X5455	۱۴	T57	۵۳۲	X545	۱۸	T57	۵۷۳
X5556	۲۱	T67	۵۳۳/۵	X555	۵/۲۶	T67	۵۷۸
X5657	۲۰	T65	۱۱۴	X565	۲۲	T65	۵۵۲
X5767	۱/۵	T66	۵۳۹/۵	X576	۵	T66	۵۷۲/۵
X6465	۴	T68	۵۳۴	X646	۵	T68	۵۷۹
X6566	۱۸			X656	۲۰		
X6667	۴			X666	۵		
X6768	۰/۵			X676	۱		

درجات تابع عضویت برای فاز یک به روش تکمیلی بدین صورت می‌باشد:

$\mu_1 = 0.662, \mu_2 = 0.662, \mu_3 = 0.662, \mu_4 = 0.662, \mu_5 = 0.662, \mu_6 = 0.662, \mu_7 = 0.338, \mu_8 = 0.662$ و مقادیر متغیرهای انحرافی اضافی / کمبود، $d_1 = 0.338, d_2 = 0.662, d_3 = 0.338, d_4 = 0.662, d_5 = 1, d_6 = 0, d_7 = 0.338, d_8 = 0.662$ به دست آمده است. اگر پروژه در این حالت اجرا شود، زمان اتمام آن، ۵۳۴ روز، هزینه آن معادل ۲۰۶۱۸۸ میلیون ریال، کیفیت ۵۳۸۰ و ریسک ۳۸۲ است (مطابق جدول ۶). در صورت اجرا در فاز دوم پروژه به روش تکمیلی درجات تابع عضویت نیز بدین صورت است؛ $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4 = 0$ و مقادیر متغیرهای انحرافی اضافی / کمبود $d_1 = 1, d_2 = 0, d_3 = 1, d_4 = 0, d_5 = 1, d_6 = 0, d_7 = 1, d_8 = 0$ با توجه به اجرای پروژه در این حالت، زمان اتمام آن ۵۷۹ روز، هزینه آن معادل ۲۳۱۶۰۶ میلیون ریال، کیفیت ۶۷۳۲ و ریسک ۴۹۳ است (مطابق جدول ۶).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مباحث قبل گام‌های مدل‌سازی و حل آن به تفصیل ارائه شده و در کنار آن به حل یک نمونه عددی واقعی از پروژه‌های «شرکت ایران‌خودرو» پرداخته شد. پس از حل نمونه عددی برای ارتقای پاسخ‌های جستجو شده در نرم‌افزار، روش برنامه‌ریزی آرمانی نیز به مراحل الگوریتم تحت عنوان گام‌ها/ روش‌های تکمیلی اضافه شد. با ارائه پاسخ‌های نمونه عددی پس از استفاده از روش تکمیلی لزوم کاربرد این روش نیز نمایان شد.

در مدل زمان‌بندی موردنظر، چهار متغیر زمان، هزینه، ریسک و کیفیت مدنظر است. به دلیل پایه‌ای و جامع بودن این چهار عنصر در زمان‌بندی، این پژوهش کامل است و نیازی به در نظر گرفتن متغیر اضافه‌تری نیست. یادآوری این نکته لازم است که متغیرها در شرایط عدم قطعیت و از نوع اعداد خاکستری انتخاب شده‌اند و بهینه‌سازی هر یک از آن‌ها در مدل نهایی ضروری است؛ به طوری که در الگوی پیشنهادی تلاش می‌شود کل زمان انجام کار در کمترین مدت و با کمینه ریسک و هزینه و بالاترین کیفیت به‌طور هم‌زمان، زمان‌بندی پیشنهادی را ارائه کند؛ ولی وقتی چندتابع هدف وجود دارد، بهینه‌سازی معنا ندارد. در اینجا تصمیم‌گیرنده به‌جای بهینه‌سازی، رضایتمندی را جایگزین می‌کند؛ در این صورت تصمیم‌گیری تعاملی اتخاذ می‌شود، به طوری که تمام اهداف تا حدی راضی‌کننده باشد.

همان‌طور ذکر شد برای حل مسئله پژوهش، دانش تحقیق در عملیات لازم است؛ از این رو برای حل TCQRTP از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندهدفه از MCDM در تحقیق در عملیات اتخاذ شده است. تابع هدف در این مدل دارای ۴ دسته جمله کلان است (حداقل کردن هزینه، زمان و ریسک و حداکثرسازی کیفیت). برای هر یک از ۴ دسته توابع هدف به تفکیک معادله ریاضی مربوطه نوشته می‌شود. برای هر تابع هدف دو حالت در نظر گرفته می‌شود: حالت اول به نام «تابع هدف حد پایینی» و حالت دوم با عنوان «تابع هدف حد بالایی» است؛ در نهایت برای یافتن پاسخ‌های مناسب‌تر، روش برنامه‌ریزی آرمانی نیز به آن الحاق شده است. در نتیجه نرم‌افزار پاسخ‌های حد پایین و حد بالای زمان را به تفکیک هر فعالیت ارائه می‌کند. با انتخاب مدیر پروژه از این گروه پاسخ‌ها می‌تواند تحقق حالت رضایت‌بخش برای موازنه پارامترهای زمان، هزینه، کیفیت و ریسک پروژه باشد.

در «شرکت ایران‌خودرو» همواره پروژه‌های متنوعی تعریف می‌شود که زمان‌ها، مکان‌ها، شرایط و استانداردهای متفاوتی را شامل می‌شود. از آنجاکه اغلب متغیرهای پروژه ذاتاً تصادفی و پویا هستند و باگذشت زمان درجات مختلفی از عدم قطعیت را نشان می‌دهند، طبیعی است که تابع هدف پروژه نیز دارای ماهیت تصادفی و در معرض عدم قطعیت ناشی از منابع مختلف مانند زمان، هزینه، کیفیت و غیره باشد. در اجرای پروژه‌های شرکت، عناصر زمان، هزینه و کیفیت پروژه از مهمترین عناصر قابل‌رصد هستند و چون ریسک‌های موجود در حین اجرا تأثیر بسزایی

بر این سه پارامتر دارد؛ از این رو چهار پارامتر مورد تحقیق از شاخصه‌ای مهم و قابل‌تصمیم‌گیری در پروژه‌ها هستند؛ بنابراین لحاظ کردن این چهار پارامتر و نمایش آن با اعداد خاکستری برای ایجاد یک محدوده محتمل برای پارامترهای مهم در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌ها، می‌تواند در برنامه زمان‌بندی پروژه‌ها بسیار کاراً باشد؛ در واقع ماهیت برنامه‌ریزی به‌طوری است که در پیوستاری از قطعیت و عدم قطعیت صورت می‌گیرد و به‌هنگام برنامه‌ریزی برای هر فعالیت یا بسته کاری، سطحی از عدم قطعیت وجود دارد و این امر سبب می‌شود که کلیت برنامه نیز با عدم قطعیت همراه باشد و فقط بخشی از فعالیت‌ها مطابق برنامه محقق شوند که میزان آن نیز غیرقطعی است؛ در نتیجه استفاده از این مدل می‌تواند به‌طور عمومی پیشنهاد شود؛ ولی به لحاظ زمان و دقت کارشناسی فراوانی که این روش در مدل‌سازی و حل آن نیاز دارد، پیشنهاد می‌شود برای برنامه‌ریزی پروژه‌هایی که به لحاظ ابعاد زمانی و دامنه شمول اجرایی در واحدهای شرکت، گستردگی بیشتری دارد، استفاده شود؛ بنابراین برنامه‌ریزی و مدل‌سازی زمان‌بندی به روش یادشده درخصوص پروژه‌های طراحی و توسعه محصول / موتور جدید و راه‌اندازی خطوط جدید توصیه می‌شود. در این راستا موارد کاربردی زیر پیشنهاد می‌شود:

- برگزاری سمینارها/ کارگاه‌های آموزشی برای افزایش و ارتقای دانش برنامه‌ریزی آرمانی فازی خاکستری برای مدیران پروژه‌ها، PMO ها و واحدهای اجرایی پروژه‌ها؛
- تشکیل گروه برنامه‌ریزی ویژه در مرکز پروژه‌های شرکت به همراه معرفی نماینده از واحدهای اجرایی شرکت؛
- برگزاری دوره‌های آموزشی برای آشنایی با مبانی اجرایی مدل‌سازی و برنامه‌ریزی آرمانی فازی، الزامات و نیازمندی‌های مربوطه برای گروه برنامه‌ریزی ویژه؛
- به‌کارگیری مشاور و متخصص این مهم در گروه برنامه‌ریزی ویژه؛
- اجرای مدل‌سازی و برنامه‌ریزی آرمانی فازی پروژه‌های طراحی و توسعه محصول / موتور جدید و راه‌اندازی خطوط جدید؛
- ارائه نمونه برنامه‌های ارائه‌شده گروه ویژه و مقایسه تحلیلی با برنامه پایه ارائه‌شده اولیه توسط مدیر پروژه؛
- ایجاد و ثبت دانش آموخته‌های مدل‌سازی و برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای به‌کارگیری در پروژه‌های آتی؛
- مستندسازی و تحلیل نتایج اجرایی به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی آرمانی فازی و برنامه پایه پروژه (در زمان اختتام پروژه).

استفاده از این مدل می‌تواند به‌طور عمومی در کلیه پروژه‌ها پیشنهاد شود؛ ولی به لحاظ زمان و دقت کارشناسی فراوانی که این روش در مدل‌سازی و حل آن نیاز دارد، پیشنهاد می‌شود برای برنامه‌ریزی پروژه‌هایی که به لحاظ ابعاد زمانی و دامنه شمول اجرایی در واحدهای شرکت، گستردگی بیشتری دارد، استفاده شود؛ بنابراین برنامه‌ریزی و مدل‌سازی زمان‌بندی به روش یادشده درخصوص پروژه‌های طراحی و توسعه محصول / موتور جدید و راه‌اندازی خطوط جدید توصیه می‌شود.

می‌توان در تحقیقات آتی از موارد زیر استفاده کرد:

- رویکردهای عدم قطعیت دیگری، مانند رویکردهای اعداد خاکستری با توابع عضویت فازی، IFPR؛ HFTLS و غیره را به کار برد.

- از سایر رویکردهای حل به غیر از روش‌های پژوهشگران مانند هوانگ (۱۹۹۴) و برنامه‌ریزی آرمانی، از روش‌های دیگر پژوهشگران، استفاده شود.

- بررسی و تحلیل حساسیت با تمرکز بر پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر برنامه‌ریزی و نتیجه‌گیری از آن‌ها.

- برای بازطراحی و بهبود می‌توان رویکردهای جدید مانند گرت، گرافیکال یا نظریه‌های محدودیت^۱ را مبنای حل قرار داد.

منابع

1. Abtahi, S. (1391). Project Scheduling Model with Multi Obejective Integrated Approach: Time-Cost-Quality-Risk- Trade off Multimode Activity Based on a metaheuristic approach. Retrieved from <http://idochp2.irandoc.ac.ir/FulltextManager/fulltext15/th/258/258954.pdf>.
2. Amiri, M. (1392) Provides a method for ranking the activities of the project using the CPM network and the TOPSIS method in fuzzy mode. *Journal of Industrial Management Perspective*, (10): 169-183.
3. Ashtiani, B., & gholi Arianezhad, m. (1388). Preventive Methods - Response to Scheduling. Tehran: Iran University of Science and Technology.
4. Charnes, A., Cooper, W., & Ferguson, R. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Manag Sci*, 1(2): 138-151.
5. Chen, L., & Tsai, F. (2001). Fuzzy goal programming with different importance and priorities. *Eur J Oper Res*, 133(3): 548-556.
6. Deng, J. (1989). Introduction to grey system theory. *J. Grey System*, 1: 1-24.
7. Ebrahimnezhad, S., Ahmadi, V., & Javanshir, H. (2013). Time-Cost-Quality Trade-off in a CPM Network Using Fuzzy Logic and Genetic Algorithm. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, (24): 362-376.
8. Evangeline Jebaseeli, M., & Paul Dhayabaran, D. (2015). Integer Programming Model for Fuzzy Time Cost and Quality Trade off Problem. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 4(3): 97-106.
9. Huang, G. (1994). *Grey Mathematical Programming and Its Application to Municipal*. McMaster University USA: Department of civil Engineering.
10. Ignizio, J. (1976). *Goal programming and extension*. London: Heath Lexington Books.
11. Kayacan, E., Ulutas, B., & Kaynak, O. (2010). Grey system theory-based models in time series prediction. *Expert Systems with Applications*, 37(2): 1784-1789.
12. Kerzner, H. (2009). *Project management: A system approach to planning, scheduling & controlling*. Newjersey: John wiley&Son Inc.
13. Ketabi, S., Faregh, N., & Ghandehari, M. (1391). Project Scheduling with Time-Cost-Quality Trade off in Fuzzy Conditions- Case Study in Kimia Bona Gostar Yazd Co. Retrieved from Center for Advanced Science and Technology Development: <https://ganj.irandoc.ac.ir/articles/571064>
14. Marasinlan, R. (1980). Goal Programming in Fuzzy Enilironment. *Decision Science*, (11): 325-336.
15. Mehregan, M. (1386). Decision making models with several objectives. Tehran: Tehran University-management Deprtement
16. Memariani, A. (1378). Fuzzy Goal Planning Techniques. *Management Knowledge*, (46): 23-34.
17. Mohammadi, A., Hosseinzadeh, M., & Bagherzadeh Azar, M. (1390). Introducing a fuzzy hierarchy Hubrid model, gray relationship analysis, and multi-objective planning in order to select a business partner. *Journal of Industrial Management Perspective*, (1): 17-37.
18. Mohammadipour, F., & Sadjadi, S. (2016). Project cost-quality-risk tradeoff analysis in a time-constrained problem. *Computer and Industrial engineering*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.025>

19. Movahedian Atar, O., Esmaeelian, M., & Mohammadi Zanjirani, D. (1394, winter). Selection and scheduling of several projects with limited resources in several executive modes in order to maximize net present value. *Journal of Industrial Management Perspective*, (20): 79-100.
20. Papageorgiou, E., & Salmeron, J. (2012). Learning Fuzzy Grey Cognitive Maps using Nonlinear Hebbian-based approach. *International Journal of Approximate Reasoning*, 53: 54-65.
21. Project Management Institute. (2013). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (5th ed.). Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.
22. Razavi Hajiagha, S., Amoozad Mehdiraji, H., & Hashemi, S. (1393). Multi-criteria decision making under conditions of confidence and uncertainty. Tehran: Termeh.
23. Razavi Hajiagha, S.; Amoozad Mahdiraji, H.; Hashemi, Sh. (2013). A hybrid model of fuzzy goal programming and grey numbers in continuous project time, cost, and quality tradeoff. *Int J Adv Manuf Technol*. 22-32. DOI 10.1007/s00170-013-5463-2
24. Shahsavari Pour, N., Modarres, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). Time-Cost-Quality Trade-off in Project Scheduling with Linguistic Variables. *World Applied Sciences Journal*, 18(3): 404-413.
25. Tiwari, R., Dharmar, S., & Rao, J. (1986). Priority structure in fuzzy goal programming. *Fuzzy Sets Syst*, 19(3): 251-259.
26. Zimmermann, H. (1978). Fuzzy Programming and Linear Programming with several objective functions. *Fuzzy sets and Systems*, 1(1): 45-55