

# یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه استوار برای انتخاب پاسخ به ریسک‌های پروژه و تبیین روش‌های حل مدل

ابراهیم رضایی نیک<sup>۱\*</sup>، محمدجواد توسلی اصطهباناتی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد

(تاریخ دریافت ۹۳/۱۰/۷ - تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۹۴/۷/۱۲ - تاریخ تصویب ۹۴/۱۱/۶)

## چکیده

مدیریت ریسک یکی از بخش‌های تأثیرگذار مدیریت پروژه است که ریسک‌های مربوط به پروژه را شناسایی و ارزیابی می‌کند و به آن پاسخ می‌دهد. در چند سال اخیر، با وجود انتشار تحقیقات مختلف در مبحث پاسخ به ریسک پروژه، ابزار و روش‌های معدودی در این زمینه ارائه شده است. از این‌رو، در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی پاسخ به ریسک پروژه پیشنهاد شده است که به دنبال بهینه‌سازی دو معیار کلیدی زمان و هزینه پروژه است. مدل دارای دو هدف است که یک هدف، حداقل‌سازی زمان کل مورد انتظار، شامل هزینه اجرای اقدام‌ها و آثار نامطلوب ریسک بر هزینه پروژه و هدف دیگر کمینه‌سازی اثر زمانی ریسک (بیشینه‌کردن معیار استواری) با توجه به معیار شنواری آزاد فعالیت‌هاست. در این مدل، اقداماتی برای کاهش ریسک انتخاب می‌شود که میزان اثر زمانی آن‌ها بر زمان هر فعالیت بیشتر از شنواری آزاد آن است. در ادامه، سه روش حل دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری پیشنهاد شده است که با ایجاد ده پروژه در سه دسته با مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ و حل مسائل از سه روش پیشنهادی، نتایج مقایسه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم حلقوی، الگوریتم ژنتیک، پاسخ به ریسک پروژه، رویکرد استوار، شنواری فعالیت، مدل بهینه‌سازی.

## مقدمه

کامک شایان توجهی می‌کند. هدف مدیریت ریسک افزایش احتمال موفقیت پروژه است و این کار از طریق شناسایی و ارزیابی سیستماتیک ریسک، ارائه روش‌هایی برای اجتناب یا کاهش آن‌ها و حداکثرسازی فرصت‌ها انجام می‌گیرد [۳].

فرایند مدیریت ریسک مؤثر، با ارزیابی مؤثر ریسک‌ها شروع می‌شود و بدون انجام‌دادن این مرحله، مدیریت ریسک‌ها امکان‌پذیر نیست. همچنین، بسیاری از محققان تأکید کرده‌اند که شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها بدون پاسخگویی به آن‌ها مفید نیست [۴]. طبق نظر محققان مختلف، با وجود انتشار مقالات متعدد در مورد موضوع مدیریت ریسک پروژه، تاکنون ابزارها و تکنیک‌های معدودی در زمینه پاسخگویی به ریسک‌ها توسعه یافته است [۵، ۶].

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی به منظور ارزیابی

در دنیای پیچیده و پر از تغییر امروز، پروژه‌ها و فعالیت‌ها با مخاطرات و ریسک‌های فراوانی روبه‌رو هستند و در صورتی که اقدام و عکس‌العمل پیشگیرانه و واکنشی در برابر ریسک‌های موجود صورت نگیرد، پروژه در روند رو به جلوی خود دچار مشکل می‌شود و در بعضی از موارد حتی موجب شکست آن هم می‌شود. مدیریت ریسک، شرط لازم برای دستیابی به اهداف پروژه است؛ بنابراین، در فرایند مدیریت پروژه لازم است به صورت نظام‌مند به موضوع ریسک و فرایند مدیریت ریسک توجه شود [۱].

بر اساس تعریف راهنمای گسترده دانش مدیریت پروژه، ریسک عبارت است از رخدادی غیرقطعی که در صورت وقوع حداقل بر یکی از اهداف پروژه تأثیر می‌گذارد [۲]. مدیریت ریسک یکی از بخش‌های مدیریت پروژه است که در حوزه ارزیابی و پاسخگویی به ریسک‌ها به مدیران پروژه

مشابه دارند، ولی از نظر گام‌های اجرایی با یکدیگر متفاوت‌اند [۸]. از دیدگاهی کلی، فرایند مدیریت ریسک پروژه شامل دو مرحله‌ی عام ارزیابی و پاسخگویی به ریسک است [۹]. ارزیابی ریسک از دو بخش شناسایی و تحلیل ریسک‌ها تشکیل شده است. تکنیک‌های زیادی برای شناسایی ریسک‌ها وجود دارد؛ مانند توفان مغزی، کارگاه‌ها، چک‌لیست‌ها، پرسشنامه و مرور مستندات، گروه دلفی و رویکردهای نموداری متنوع مانند نمودار علت و معلول، سیستم پویا و نمودار اثر [۱۰]. تحلیل ریسک به دو صورت کیفی و کمی انجام می‌گیرد. تحلیل کیفی ریسک معمولاً شامل ارزیابی احتمال، تأثیر و ماتریس احتمال-تأثیر است. در تحلیل کمی از روش‌هایی مانند تحلیل حساسیت، تحلیل ارزش پولی مورد انتظار، درخت تصمیم با استفاده از نظریه‌ی مطلوبیت، نمودار علت و معلول، نظریه‌ی بازی، نظریه‌ی فازی و تحلیل درخت خطا استفاده می‌شود [۱۲]. مرحله‌ی پاسخگویی ریسک شامل شناسایی، ارزیابی و انتخاب اقدامات پاسخ است. اقدامات پاسخ به ریسک‌ها به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شود. هیلسون برای دسته‌بندی اقدامات پاسخگویی به ریسک دو سطح مطرح کرده است [۴]. سطح اول دسته‌بندی عمومی پاسخ‌هاست که بیانگر راهبرد پاسخ است و سطح دوم شامل لیست کردن مجموعه‌ای از اقدامات خاص برای هر راهبرد است. طبق دیدگاه دسته‌بندی عمومی اقدامات پاسخگویی به تهدیدها، شامل چهار مورد اجتناب، کاهش، انتقال و پذیرش ریسک است. متناظر با آن‌ها راهبردهای بهره‌گیری، شراکت (تسهیم)، ارتقا (تشدید) و پذیرش (چشم‌پوشی) برای فرصت‌ها تعریف می‌شود [۱۱]. رویکردهای موجود در زمینه‌ی پاسخگویی به ریسک به چهار دسته رویکرد منطقه‌ای، مقایسه‌ای، ساختار شکست کار و بهینه‌سازی تقسیم‌بندی می‌شود [۱۳، ۱۴].

در رویکرد منطقه‌ای دو معیار انتخاب‌شده با توجه به ریسک‌ها به دو محور عمودی و افقی اعمال می‌شوند. دو معیار انتخاب‌شده ممکن است احتمال وزنی ریسک‌های داخلی و خارجی پروژه [۱۵]، میزان قابلیت کنترل ریسک و درجه‌ای که ریسک برای پروژه اهمیت دارد [۱۶]، میزان احتمال و تأثیر ریسک [۱۷] و... باشد. براساس مقادیر مختلف مربوط به دو معیار، دستگاه دو محوره به مناطق

و انتخاب اقدامات پاسخ به ریسک در پروژه‌ها ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی دو معیار کلیدی پروژه یعنی زمان و هزینه را با دو تابع هدف بهینه می‌کند، به طوری که یک هدف، حداقل‌سازی هزینه کل است و هدف دیگر کمینه‌کردن اثر زمانی ریسک بر پروژه از طریق اصول بهینه‌سازی استوار و با توجه به معیار شناوری آزاد است. در مدل‌ها و ابزارهای معرفی‌شده در ادبیات موضوع پاسخ به ریسک، بیشتر تلاش می‌شود آثار ریسک‌ها تا حد ممکن کاهش یابد (به حداقل رساندن مجموع اثر ریسک‌ها بر پروژه) و به محل و میزان اثر ریسک توجهی نمی‌شود؛ بنابراین، در مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن شناوری آزاد فعالیت‌ها، پاسخ ریسک‌هایی انتخاب می‌شود که اثر زمانی آن‌ها بر فعالیت (فعالیت‌ها) بیشتر از مقدار شناوری است و بر زمان فعالیت‌های بعدی و در نهایت زمان ختم پروژه تأثیر می‌گذارد. از این رو، با انتخاب‌نکردن پاسخ‌هایی که تأثیری بر رسیدن به اهداف از پیش تعیین‌شده پروژه ندارند، اثربخشی بودجه در دسترس و پاسخ‌های انتخاب‌شده بیشتر می‌شود.

برای حل مدل، الگوریتم ابتکاری حلقوی پیشنهاد شده و به منظور سنجش کارایی مدل و روش حل پیشنهادی، ده پروژه نمونه ساخته شده است و جواب حاصل از مدل با دو روش حل دقیق (شمارش صریح) و روش فرا ابتکاری (الگوریتم ژنتیک) مقایسه شده است که نتایج، نشان‌دهنده کارایی مدل و روش حل پیشنهادی است.

این پژوهش در پنج بخش تنظیم شده است. پس از مقدمه، در بخش دوم به مرور اجمالی ادبیات موضوع پاسخ به ریسک و مبحث بهینه‌سازی استوار در زمان‌بندی پروژه پرداخته می‌شود. در بخش سوم، چارچوب کلی مدل پیشنهادی و در بخش چهارم روش‌های حل مدل بیان می‌شود و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادها در بخش پنجم ارائه می‌شود.

## مرور ادبیات

علم مدیریت ریسک در دوره‌ی رنسانس در قرن شانزدهم میلادی مطرح شده است. از سال ۱۹۹۰ مدل‌های مختلفی برای مدیریت ریسک پروژه‌ها با هدف افزایش موفقیت آن‌ها ارائه شده است [۷]. در کل، همه‌ی این مدل‌ها چارچوبی

پاسخ مربوط به آن از یک مقدار مشخص [۱۳] و مسائل دیگر است. همچنین، در پژوهش پوپا و مارکوت [۲۷] الگوریتم تکاملی ASM<sup>۱</sup> برای حل مدل ارائه شده در مرجع [۲۳] پیشنهاد شده و کارایی آن از طریق آزمایش‌های عددی بررسی شده است. در مرجع [۱۴] با گسترش مدل پژوهش بن دیوید و همکاران [۲۳] معیارهای زمان و کیفیت پروژه را به مدل اضافه کرده‌اند. در مرجع [۲۸] رویکردی یکپارچه در انتخاب راهبرد پاسخ به ریسک ارائه شده است که در مرحله انتخاب پاسخ به ریسک از دو الگوریتم ابتکاری حلقوی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. همچنین، در [۲۹] فرایند انتخاب اقدام پاسخ از طریق تکنیک فرایند تجزیه و تحلیل شبکه‌ای (ANP) انجام گرفته است.

رویکرد مدل بهینه‌سازی به‌نوعی کم‌نقص‌ترین رویکرد در بین رویکردهای موجود در نظر گرفته می‌شود که سعی می‌کند جوابی بهینه را به‌دست آورد. در مورد روش‌های ارائه شده در این رویکرد نیز نکاتی وجود دارد از جمله اینکه در این روش‌ها فقط به میزان کاهش اثر ریسک توسط پاسخ اهمیت داده می‌شود و به میزان تأثیر ریسک و پاسخ مربوطه بر اهداف کلی پروژه توجهی نمی‌شود، بیشتر مدل‌های پیشنهادی بر پارامتر هزینه تمرکز دارند و کمتر به زمان و کیفیت پروژه اهمیت داده شده است و تعداد کمی از مدل‌ها قابلیت اعمال در پروژه‌های بزرگ را دارند [۱۳].

ادبیات موضوع رویکرد استوار وسعت زیادی دارد و از این روش در مسائل و مباحث مختلفی استفاده شده است، اما تحقیقات رویکرد استوار در زمینه زمان‌بندی به سه بخش سناریومحور، بازه‌ای و الحاق زمان‌های اضافی تقسیم‌بندی می‌شود. در رویکرد سناریومحور، با معرفی سناریوهای مختلف سعی می‌شود میزان استواری زمان‌بندی پروژه افزایش یابد، در صورتی که رویکرد بازه‌ای با توجه به توزیع مربوط به عدم قطعیت‌ها به‌دنبال افزایش استواری است. در روش الحاق زمان‌های اضافی، با توجه به عدم قطعیت‌های موجود، سعی می‌شود معیار استواری افزایش یابد؛ یعنی با اضافه کردن بافر یا شناوری برای فعالیت‌های در معرض عدم قطعیت به‌دنبال رسیدن به زمان‌بندی استوار است تا در برابر وقایع احتمالی دچار تغییرات زیادی نشود.

مختلفی تقسیم‌بندی می‌شود و راهبردهای متفاوت به هر کدام از مناطق به‌دست‌آمده تخصیص می‌یابد. رویکرد منطقه‌ای دوبعدی به‌عنوان ابزاری تخمینی برای انتخاب راهبرد پاسخ انتخاب می‌شود [۶]. این رویکرد نواقصی دارد از جمله اینکه فقط دو معیار را در نظر می‌گیرد و به‌طور تقریبی راهبرد پاسخ را مشخص می‌کند و در انتخاب جزئیات پاسخ‌ها مفید نیست [۱۴]. همچنین، به‌طور عمومی برای هر ناحیه یک راهبرد تعیین می‌شود، در حالی که در دنیای واقعی باید راهبردهای متفاوتی برای ریسک‌های موجود در هر ناحیه مشخص شود [۱۳].

در رویکرد مقایسه‌ای برای به‌دست‌آوردن راهبردهای نامزد پاسخ به ریسک، با توجه به نیاز اهداف پروژه و اولویت‌های ذهنی مدیریت بین معیارهای مربوط به ریسک مثل هزینه، احتمال موفقیت، درصد اتلاف کار، طول زمان، کیفیت، و... مقایسه انجام می‌گیرد. سپس راهبردهای مناسب از بین نامزدهای موجود براساس قاعده مرز کارا [۱۸، ۱۹]، جواب‌های بهینه پارتو [۲۰] و اولویت‌های تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌شوند. در این روش، به‌طور عمده یک مرز کارا تعیین می‌شود، ولی روش مشخصی برای ارزیابی و انتخاب نهایی پاسخ‌ها وجود ندارد و همچنین این رویکرد یا تنها دو عامل را در نظر می‌گیرد یا مقایسه براساس آنالیز کیفی انجام می‌گیرد [۱۳].

در رویکرد ساختار شکست کار، با در نظر گرفتن فعالیت‌های کاری در ساختار شکست کار و مرتبط کردن راهبردهای مربوط به هر فعالیت پاسخ‌های مناسب انتخاب می‌شود [۲۱، ۲۲]. این روش نیز کمبودهایی دارد از جمله تمرکز بر عناصر هزینه‌ای و در نظر گرفتن سایر اهداف پروژه، نداشتن راه‌حل دقیق ریاضی و همچنین مشخص نبودن اینکه روش‌های به‌دست‌آمده، راه‌حل بهینه برای مسئله انتخاب راهبرد هستند یا خیر [۱۴].

رویکرد مدل بهینه‌سازی یک مدل ریاضی را برای حل مسئله انتخاب راهبرد پاسخ ارائه می‌دهد. به‌طور عمومی در مدل، تابع هدف حداقل کردن هزینه اعمال راهبردهای پاسخ و حداکثرسازی اثر پاسخ‌ها و محدودیت‌ها شامل ترکیب راهبردها، سطح قابل قبول برای میزان ضرر ریسک، بودجه در دسترس برای اعمال راهبرد [۵، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶] و کمتر بودن میزان اثر اصلاح‌شده ریسک پس از اعمال

مطرح می‌شود؛ یکی مجموع شناوری آزاد فعالیت‌هاست و دیگری یک تابع هدف جدید مبتنی بر شناوری آزاد است. در این زمینه، از تابع مطلوبیت شناوری آزاد برای هر فعالیت با بازده نزولی به‌ازای هر واحد اضافی از شناوری آزاد مختص هر فعالیت استفاده شده است و معیار تابع مطلوبیت به‌نحوی کاستی معیارهای مجموع شناوری و مجموع متغیر باینری را پوشش می‌دهد.

با توجه به مرور ادبیات موضوع می‌توان رویکرد بهینه‌سازی را در زمینه انتخاب پاسخ به ریسک کامل‌ترین رویکرد دانست، اما در روش‌های ارائه‌شده در این زمینه هدف محققان کاهش اثر ریسک تا حد ممکن و با توجه به سقف بودجه در دسترس است. اولویت انتخاب اقدامات پاسخ میزان بزرگی ریسک مرتبط با آن است و به اثر ریسک و اقدام پاسخ نامزد بر اهداف پروژه توجهی نمی‌شود که این موضوع موجب کاهش اثربخشی بودجه مورد نظر و پاسخ‌های انتخابی می‌شود.

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی به‌منظور ارزیابی و انتخاب اقدامات پاسخ به ریسک در پروژه‌ها ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی دو معیار کلیدی پروژه یعنی زمان و هزینه را با دو تابع هدف بهینه می‌کند، به‌طوری‌که یک هدف حداقل‌سازی هزینه کل، شامل هزینه اجرای اقدام‌ها و آثار نامطلوب ریسک بر هزینه پروژه و هدف دیگر بیشینه‌کردن معیار استواری با توجه به شناوری است. در مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن شناوری، پاسخ ریسک‌هایی انتخاب می‌شود که اثر زمانی ریسک بر فعالیت (فعالیت‌ها) بیشتر از مقدار شناوری است که این بیشتر بودن، بر زمان فعالیت‌های بعدی و زمان ختم پروژه تأثیر می‌گذارد. از این‌رو، با انتخاب نکردن پاسخ‌هایی که تأثیری در رسیدن به اهداف از پیش تعیین‌شده پروژه ندارند، اثربخشی بودجه در دسترس و پاسخ‌های انتخاب‌شده بیشتر می‌شود.

به‌منظور حل مدل پیشنهادی یک الگوریتم ابتکاری برای انتخاب پاسخ به ریسک‌های پروژه و با توجه به میزان کاهش اثر ریسک و تأثیر بر اهداف کلی پروژه ارائه شده است و برای مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم و اعتبارسنجی آن دو روش دقیق و فرا ابتکاری نیز ارائه شده است.

در کل، سه معیار استواری با توجه به شناوری آزاد، در تحقیقات ارائه شده است که شامل مجموع مطلق شناوری‌های آزاد، مجموع متغیر باینری نشان‌دهنده شناوری و تابع مطلوبیت نزولی شناوری است. در یکی از اولین تحقیقات، الفاوزن و هائوری [۳۰] یک مدل دو هدفه را برای زمان‌بندی استوار پروژه با محدودیت منابع<sup>۲</sup> ارائه داده‌اند. هدف این پژوهش ارائه زمان‌بندی است تا نه تنها مدت زمان کوتاهی داشته باشد، بلکه تغییرپذیری در برابر اختلال‌ها نیز کاهش یابد؛ بنابراین، دو هدف مطرح‌شده در این پژوهش، بیشینه‌کردن استواری و کمینه‌سازی مدت زمان اجرای پروژه است که معیار استواری بیان‌شده در این پژوهش مجموع مطلق شناوری‌های آزاد است. در پژوهش عباسی و همکاران [۳۱] بیان می‌شود مدل ارائه‌شده در الفاوزن و هائوری [۳۰] از نوع NP-hard است و برای حل آن شبیه‌سازی تبرید را ارائه می‌دهند و در مثالی مدل را از طریق این الگوریتم حل می‌کنند.

در تحقیق دیگری یک الگوریتم دومرحله‌ای برای زمان‌بندی استوار پروژه با محدودیت منابع ارائه شده است [۳۲]. الگوریتم دارای دو هدف حداقل‌کردن زمان نهایی پروژه و حداکثرسازی معیار استواری است. در این پژوهش دوازده معیار استواری براساس شناوری آزاد معرفی و تحلیل شده است که معیار استواری پیشنهادی، مجموع یک متغیر باینری است که در صورت وجود شناوری عدد یک و در غیر این‌صورت عدد صفر را اختیار می‌کند. عیب این معیار در نظر نگرفتن مقدار بزرگی شناوری است و فقط به وجود شناوری اهمیت می‌دهد. همچنین، در این تحقیق بیان می‌شود معیار استواری مجموع شناوری با وارد شدن اعداد بزرگ دچار انحراف و بزرگنمایی می‌شود [۳۳].

در پژوهش دیگری یک رویه جست‌وجوی ممنوعه برای زمان‌بندی پیش‌گویانه استوار پروژه ارائه شده است که هدف آن ایجاد یک زمان‌بندی استوار در برابر اختلال‌های ممکن هنگام انجام‌دادن پروژه است [۳۴]. در این پژوهش معیار استواری از طریق انحراف وزنی میان زمان شروع برنامه‌ریزی‌شده و زمان شروع واقعی بیان شده و به دنبال کمینه‌سازی آن هستند. این معیار توسط هرولن و همکاران [۳۵] مطرح شده است. در ادامه، دو معیار استواری جایگزین

و همچنین هزینه اقدام پاسخ  $z$  با  $C_j$  نمایش داده می‌شود. معیار شناوری نیز با  $FS^w$  نشان داده می‌شود. فرضیات مدل نیز در ادامه بیان می‌شود.

- در این تحقیق با توجه به اینکه زمان فعالیت‌ها قطعی در نظر گرفته شده است، ویژگی اثر ریسک در نظر گرفته می‌شود و معیار احتمال در نظر گرفته نمی‌شود.
- به منظور کنترل کاهش میزان تأثیر ریسک توسط پاسخ‌ها و جلوگیری از بیشتر شدن مقدار کاهش از مقدار تأثیر ریسک فرض می‌شود که حداکثر میزان کاهش پاسخ، برابر با میزان اثر ریسک بر فعالیت است و همچنین یک پاسخ می‌تواند بر چند ریسک تأثیر بگذارد.
- برای رسم شبکه پروژه از شبکه برداری یا سیستم فعالیت روی کمان (AoA)<sup>۳</sup> و برای محاسبات مربوط به شناوری، از قواعد این سیستم استفاده می‌شود.

### تابع هدف

مدل دو هدف دارد که می‌کوشد از طریق انتخاب پاسخ مناسب، میزان تأثیر زمانی و هزینه‌ای ریسک را کنترل کند. این اهداف به صورت زیر بیان می‌شود:

یک هدف مدل شامل حداقل‌سازی هزینه کل (TC)<sup>۴</sup> است. همان‌طور که در مرجع [۵] بیان شده است، این هدف از جمع دو بخش هزینه انتخاب پاسخ (AAC)<sup>۵</sup> و هزینه ضرر ریسک (RL)<sup>۶</sup> به دست می‌آید. مقدار هزینه انتخاب اقدامات از طریق معادله ۱ به دست می‌آید.

$$AAC = \sum_{j=1}^A C_j x_j \quad (1)$$

در اینجا  $x_j$  متغیر انتخاب پاسخ  $z$  و  $C_j$  هزینه انتخاب اقدام پاسخ  $z$  است.

ضرر هزینه‌ای ریسک در اینجا از طریق محاسبه خالص هزینه متأثر از ریسک‌ها بعد از اعمال پاسخ مربوط به آن‌ها قابل اندازه‌گیری است (معادله ۲). در مرجع [۱۳] از چنین عبارتی برای کنترل اثر زمانی و کیفی ریسک استفاده شده است.

$$RL = \sum_{w=1}^W \left( \sum_{i=1}^R c_i^w - \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^A c_{ij}^w x_j \right) \quad (2)$$

به طوری که  $c_i^w$  نشان‌دهنده تأثیر ریسک  $i$  بر فعالیت  $w$

### مدل پیشنهادی

در ادامه، مدل ریاضی برای ارزیابی و انتخاب پاسخ‌های ریسک پروژه پیشنهاد می‌شود که ساختار شکست کار، رخدادهای ریسک، اقدامات کاهش ریسک و تأثیرات آن‌ها را به طور روشن با یکدیگر مرتبط می‌کند. برای برقراری ارتباط بین مدل انتخاب پاسخ به ریسک‌ها با کل سیستم پروژه، در نظر گرفتن ساختار شکست کار به عنوان محور ارتباط ضروری است.

مسئله مورد نظر انتخاب پاسخ مناسب برای ریسک‌های تأثیرگذار بر فعالیت‌ها و در نهایت اهداف کلی پروژه است که موجب دور شدن پروژه از اهداف از پیش تعیین شده می‌شود. هدف مدل پیشنهادی حداقل‌سازی زیان کل مورد انتظار است و شامل هزینه اجرای اقدام‌ها و آثار نامطلوب بر هزینه پروژه و همچنین کمینه‌سازی اثر (ضرر) زمانی ریسک بر فعالیت‌ها (بیشینه‌سازی معیار استواری) و در نهایت بر کل پروژه می‌شود. در چارچوب کلی مدل، دو معیار کلیدی پروژه یعنی زمان و هزینه، اثر ریسک در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه معیار و روش قابل‌سنجشی برای اندازه‌گیری تأثیر کیفی ریسک و پاسخ وجود ندارد، از در نظر گرفتن این معیار صرف نظر شده است.

به منظور فرمول‌بندی مدل از یک متغیر تصمیم صفر و یک استفاده شده است که نشان‌دهنده انتخاب کردن و انتخاب نکردن پاسخ است [۵ و ۱۴]. اگر پاسخ به ریسک انتخاب شود، متغیر، مقدار یک و در غیر این صورت، مقدار صفر را اختیار می‌کند. عناصر کاری همان اجزای ساختار شکست کار هستند و با  $w=1, 2, \dots, W$  نمایش داده می‌شوند. برخی از رویدادهای ریسک (یا پاسخ‌ها) ممکن است بر پایین‌ترین سطح ساختار شکست کار (بسته‌های کاری) تأثیرگذار باشند، در حالی که برخی رویدادها ممکن است بر سطوح بالاتر ساختار شکست کار یا کل پروژه مؤثر باشند. رویدادهای ریسک با  $i=1, 2, \dots, R$  مشخص می‌شوند و ریسک‌ها مستقل از یکدیگر فرض شده‌اند. در صورت وابستگی بین رویدادها، همه رویدادهای وابسته به صورت یک مجموعه ترکیب می‌شوند و به صورت یک رویداد عمل می‌کنند. اقدام پاسخ به ریسک میزان اثر ریسک را اصلاح می‌کند و اجرای آن اثر مثبت یا منفی بر عناصر کاری دارد. مجموعه اقدامات پاسخ با  $j=1, 2, \dots, A$

نمی‌شوند، یا اینکه انتخاب یک اقدام مستلزم انتخاب اقدام دیگری است. در مدل پیشنهادی مطابق با بن دیوید و رز و همچنین ذگردی و همکاران [۵ و ۱۴] دو نوع محدودیت زوجی تعریف شده است. اگر انتخاب هم‌زمان اقدام  $i$  و  $j$  امکان‌پذیر نباشد، آن‌گاه  $q_{i,j}=1$  تعریف می‌گردد (رابطه ۸) و اگر انتخاب  $i$  نیازمند انتخاب اقدام  $j$  باشد آن‌گاه  $b_{i,j}=1$  تعریف می‌شود (رابطه ۹). در صورت وجود محدودیت بودجه برای اقدامات، می‌توان این محدودیت را نیز به مدل اضافه کرد. در مدل، رابطه ۷ نشان‌دهنده محدودیت بودجه است. در نهایت، مدل کلی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\text{Minimize } TC(x) = AAC(x) + RL(x) \quad (۵)$$

$$\max STA = \sum_{w=1}^W \left[ \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^A e^{-((t_i^w - t_{i,j}^w)x_j) - FS^w} \right] \quad (۶)$$

s.t

$$\sum_{j=1}^A c_j x_{i,j} \leq B \quad (۷)$$

$$X_{i,i} + X_{j,j} \leq 1 \quad \forall q_{i,j} = 1, i, j \in A \quad (۸)$$

$$X_{i,i} \leq X_{j,j} \quad \forall b_{i,j} = 1, i, j \in A \quad (۹)$$

$$X_{i,i} \in \{0,1\} \quad \forall i \in A \quad (۱۰)$$

### روش حل مدل

شاید مقیاس سنجش برای هر هدف با مقیاس سنجش برای بقیه اهداف متفاوت باشد و برای مثال به‌سادگی نتوان آن‌ها را با یکدیگر جمع کرد. در این‌گونه مدل‌های طراحی، منظور از عبارت بهینه‌کردن، تابع کلی مطلوبیت برای تصمیم‌گیرنده است [۳۶]. از این‌رو، برای حل مدل توابع هدف بی‌مقیاس و با تخصیص وزن به اهداف به یک هدف تبدیل می‌شوند. مراحل کار در قسمت الگوریتم حلقوی توضیح داده می‌شود.

در مدل ارائه‌شده به دلیل وجود آثار متقابل ریسک‌ها و پاسخ‌ها و همچنین برای کنترل کاهش اثر ریسک و تحقق این فرض که حداکثر کاهش اثر هر ریسک توسط پاسخ‌های متفاوت برابر با مقدار آن باشد، از تابع حداقل  $(\min(0, t_i^w - t_{i,j}^w))$  استفاده می‌شود که موجب پیچیدگی حل مدل می‌شود و حل مدل پیشنهادی از طریق

و  $c_{ij}^w$  میزان کاهش اثر ریسک  $i$  بر فعالیت  $w$  توسط پاسخ  $j$  است.

در نهایت، هدف هزینه‌ای مدل به صورت معادله ۳ بیان می‌شود:

$$\text{Minimize } TC(x) = AAC(x) + RL(x) \quad (۳)$$

هدف دیگر مدل کنترل اثر زمانی ریسک است. طبق تعریف، مقدار زمانی که شروع (یا پایان) یک فعالیت به تأخیر می‌افتد، بدون اینکه بر زمان فعالیت یا فعالیت‌های شروع شده بلافاصله بعد از آن تأثیر بگذارد شناوری آزاد می‌نامند. در پژوهش‌های مربوط به زمان‌بندی پروژه که از شناوری استفاده شده است بیان می‌شود مفهوم شناوری آزاد به استواری پاسخ (زمان‌بندی) مربوط است [۳۰ و ۳۳]. در نتیجه، مدل با در نظر گرفتن شناوری هر فعالیت در صورتی که میزان اثر ریسک بر فعالیت بیش از شناوری باشد، با انتخاب پاسخ مناسب اثر ریسک را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، ریسک‌هایی که اثر آن‌ها کمتر از شناوری فعالیت است و بر زمان فعالیت‌های بعدی و در نهایت زمان ختم پروژه تأثیر نمی‌گذارد، پاسخ داده نمی‌شوند، در صورتی که در مدل‌های [۵، ۱۳، ۱۴] و دیگر مدل‌های از این دست، بر کاهش اثر ریسک تا حد ممکن تلاش می‌شود و معیاری برای در نظر گرفتن اثر ریسک بر اهداف کلی پروژه مطرح نیست. با توجه به توضیحات ارائه‌شده در مورد معیارهای استواری موجود در ادبیات موضوع و بیان ایرادات، در این پژوهش از معیار پیشنهادی لامبرچتس و همکاران [۳۴] استفاده می‌شود که حداکثرسازی تابع مطلوبیت نزولی برای تخصیص شناوری به فعالیت است و با ایجاد تغییر به منظور اعمال در مدل به صورت معادله ۴ بیان می‌شود.

$$\max STA = \sum_{w=1}^W \left[ \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^A e^{-((t_i^w - t_{i,j}^w)x_j) - FS^w} \right] \quad (۴)$$

به طوری که  $t_i^w$  میزان اثر زمانی ریسک  $i$  بر فعالیت  $w$  و  $t_{i,j}^w$  میزان کاهش اثر زمانی ریسک  $i$  بر فعالیت  $w$  توسط پاسخ  $j$  و  $FS^w$  شناوری آزاد فعالیت  $w$  است.

### محدودیت‌های مدل

بیشتر اوقات محدودیت‌های عملی برای انتخاب اقدامات وجود دارد؛ برای نمونه، برخی اقدامات با هم انتخاب

## روش‌های فرا ابتکاری

روش‌های فرا ابتکاری با بهره‌گیری از یک رویه جست‌وجوی تصادفی در فضای حل مسئله به دنبال رسیدن به بهترین جواب هستند. از جمله الگوریتم‌های موجود در این روش، الگوریتم ژنتیک است. الگوریتم ژنتیک روش مبتنی بر جست‌وجوی تصادفی فراگیر است و از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین گرفته شده است. این الگوریتم براساس بقای بهترین‌ها با انتخاب طبیعی استوار است. در یک الگوریتم ژنتیک تعدادی از افراد براساس میزان مطلوبیت در محیط باقی می‌مانند. افراد با قابلیت‌های برتر، شانس ازدواج و تولیدمثل بیشتری دارند؛ بنابراین، بعد از چند نسل، فرزندان با کارایی بهتر به وجود می‌آیند.

به دلیل اینکه نوآوری پژوهش فقط توسعه روش‌های حل مدل نیست، هدف استفاده از الگوریتم ژنتیک در پژوهش مقایسه جواب روش‌های حل و اعتبارسنجی آنهاست.

اولین گام در به کارگیری و پیاده‌سازی یک الگوریتم ژنتیک، نمایش جواب‌های مسئله به صورت یک کروموزوم است. کروموزوم مورد استفاده برای مسئله مورد نظر، یک رشته بیت باینری به اندازه تعداد اقدام‌هاست که هر خانه (بیت) آن متناظر با یک متغیر تصمیم مسئله است. شکل ۱ ساختار یک کروموزوم را برای یک مسئله با ۱۰ متغیر (اقدام) نشان می‌دهد.

۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۱. ساختار یک کروموزوم در الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک مورد استفاده که در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است، ابتدا جمعیت اولیه (کروموزوم‌ها) را به صورت تصادفی ایجاد می‌کند و با محاسبه برازش هریک از افراد جمعیت اولیه و تعیین جواب‌های برتر، در هر دوره، فرزندان را با انتخاب والدین از طریق فرایند انتخاب چرخ رولت و اعمال عملگرهای ترکیب و جهش به وجود می‌آورد و با انجام دادن این رویه به سمت جواب مسئله پیش می‌رود. در الگوریتم، پارامترها با توجه به جواب الگوریتم در مقادیر مختلف آنها و مقایسه با روش دقیق (در مقیاس کوچک) در حل ۲۰ مسئله فرضی انتخاب

روش‌های معمول امکان‌پذیر نیست. همچنین، در تابع هدف استواری (زمانی) مدل مقدار شناوری هر فعالیت باید از میزان اثر ریسک مؤثر بر آن فعالیت کم شود و بر اثر ریسک‌های دیگر فعالیت‌ها تأثیر نگذارد که این موضوع نیز بر پیچیدگی حل مدل می‌افزاید. مدل پیشنهادی یک متغیر صفر و یک دارد؛ بنابراین، روش‌های حل مدل با در نظر گرفتن این متغیر مشخص می‌شوند که در ادامه به سه روش اشاره می‌شود.

## روش‌های دقیق حل

### الف) روش شمارش صریح

همان‌طور که گفته شد، متغیر تصمیم مسئله باینری است؛ بنابراین، کل حالت‌های ممکن  $2^A$  است که A تعداد اقدامات نامزد است. برای انتخاب جواب بهینه در روش شمارش صریح، تمام حالت‌های قابل قبول بررسی می‌شود و با توجه به تابع هدف، بهترین جواب انتخاب می‌شود. این روش در عین سادگی از نظر حجم محاسبات غیرکاراست و با اضافه شدن یک اقدام تعداد حالت‌های ممکن دو برابر می‌شود و در نتیجه زمان حل یک مسئله در چنین شرایطی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ برای مثال، در حالتی که تعداد اقدام‌ها ۲۰ است، تعداد حالت‌های ممکن  $1048576$  می‌شود و در صورت اضافه شدن یک اقدام دیگر، تعداد حالت‌های ممکن به بیش از دو میلیون حالت می‌رسد که در این شرایط زمان حل مسئله چندین روز است. در نتیجه، این مشکل بزرگ‌ترین عیب روش شمارش صریح به حساب می‌آید و لزوم استفاده از روش‌های دیگر را نمایان می‌سازد. با وجود این، به منظور حل مدل با روشی دقیق و مقایسه با دیگر روش‌ها، الگوریتم شمارش صریح از طریق نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است.

### ب) روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی صفر و یک

این‌گونه روش‌ها بیشتر بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح است که معروف‌ترین آنها الگوریتم شاخه و حد است. انشعاب در این مسئله روشن است و در هر مرحله متغیر انشعاب باید به دو شاخه صفر و یک تقسیم شود، اما محاسبه حد پایین هر زیرشاخه با توجه به اینکه مدل پیشنهادی دارای دو هدف است، پیچیدگی محاسباتی دارد که استفاده از این روش را نیز سخت می‌کند.

کاهش اثر ریسک توسط پاسخ‌های نامزد، پاسخ دارای بیشترین تأثیر در نظر گرفته می‌شود. در صورت تحقق محدودیت بودجه و بیشتر بودن اثر ریسک‌هایی که پاسخ مورد نظر بر آن‌ها تأثیر می‌گذارد، از مقدار شناوری فعالیت‌ها، پاسخ مورد نظر به لیست پاسخ‌های انتخاب شده اضافه شده و تغییرات مربوط به آن اعمال می‌شود. اگر اثر زمانی همه ریسک‌های متأثر از پاسخ کمتر از شناوری آزاد فعالیت‌ها باشد، پاسخ انتخاب نشده و اثر زمانی از مقدار شناوری کم می‌شود و در محاسبات دوره‌های بعد در نظر گرفته نمی‌شود. با منظور کردن اجرای قطعی اقدام انتخاب شده، گام تکراری برای پاسخ‌های اجراننده تکرار می‌شود.

شرط توقف: در صورتی که پاسخی در لیست پاسخ‌های نامزد نباشد و هزینه اقدامات انتخاب شده بیشتر از بودجه مورد نظر باشد، الگوریتم خاتمه می‌یابد.

به منظور رتبه‌بندی پاسخ‌ها، همانند بن دیوید و رز و همچنین ذگردی و همکاران [۵ و ۱۴] از میزان کاهش توابع هدف توسط پاسخ و در نهایت ترکیب مقدار کاهش دو تابع هدف استفاده می‌شود و به دلیل اینکه واحد اندازه‌گیری دو تابع هدف با یکدیگر متفاوت است، از نسبت میزان کاهش پاسخ به اثر ریسک‌ها استفاده می‌شود؛ بنابراین، روابط ۱۱ و ۱۲ در الگوریتم به کار برده شده است.

$$z_{1,j} = \frac{\sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^R \frac{C_{ij}^w - C_j}{C_i^w}}{\sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^R C_i^w}, \quad j = 1, 2, \dots, A \quad (11)$$

$$z_{2,j} = \frac{\sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^R \frac{f_{ij}^w}{f_i^w}}{\sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^R f_i^w}, \quad j = 1, 2, \dots, A \quad (12)$$

با جمع همه مقادیر مربوط به  $Z_1$  و  $Z_2$  برای هر پاسخ میزان درصد کاهش به دست می‌آید و با توجه به مقدار  $Z_j$  در رابطه ۱۳ می‌توان پاسخ‌ها را در هر دور الگوریتم رتبه‌بندی کرد.

$$Z_j = (\alpha)z_{1,j} + (1-\alpha)z_{2,j} \quad (13)$$

در اینجا مقدار  $\alpha$  اولویت هزینه را نسبت به زمان تعیین می‌کند و تصمیم‌گیرنده آن را مشخص می‌کند.

شده‌اند، به طوری که میزان ترکیب ۰/۸ درصد و میزان جهش نیز ۰/۰۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای عملگر ترکیب از سه عملگر ترکیب نقطه‌ای، دونقطه‌ای و یکنواخت استفاده شده است که الگوریتم در هر دور به تصادف یکی را انتخاب می‌کند. همچنین، تعداد جمعیت اولیه ۲۰ و شرط توقف نیز رسیدن به حداکثر تعداد تکرار است.

## روش‌های ابتکاری

با توجه به حجم بالای محاسبات در روش‌های دقیق به‌ازای افزایش تعداد اقدامات، به‌کارگیری روش‌های ابتکاری راهکار مناسبی برای پیدا کردن جواب مسئله است. روش‌های ابتکاری با توجه به محاسبات ساده‌تر نسبت به روش‌های دقیق، اغلب جواب بهینه (نزدیک به بهینه) را پیدا می‌کنند؛ بنابراین، در این قسمت دو الگوریتم ابتکاری به‌منظور حل مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

### الف) الگوریتم ابتکاری ساده

الگوریتم ابتکاری ساده هر اقدام پاسخ را به‌صورت جداگانه بررسی می‌کند و در صورتی که اجرای اقدام سبب بهبود در توابع هدف شود و در محدودیت‌های مدل صدق کند، این اقدام انتخاب می‌شود. اولویت انتخاب اقدام براساس بهبود در توابع هدف است؛ یعنی ابتدا اقدامی بررسی می‌شود که بیشترین بهبود را دارد. این روش در عین سادگی یک عیب مهم دارد و آن هم در نظر نگرفتن تأثیرات متقابل اقدام‌هاست، در حالی که در مسائل دنیای واقعی معمولاً اقدامات بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند.

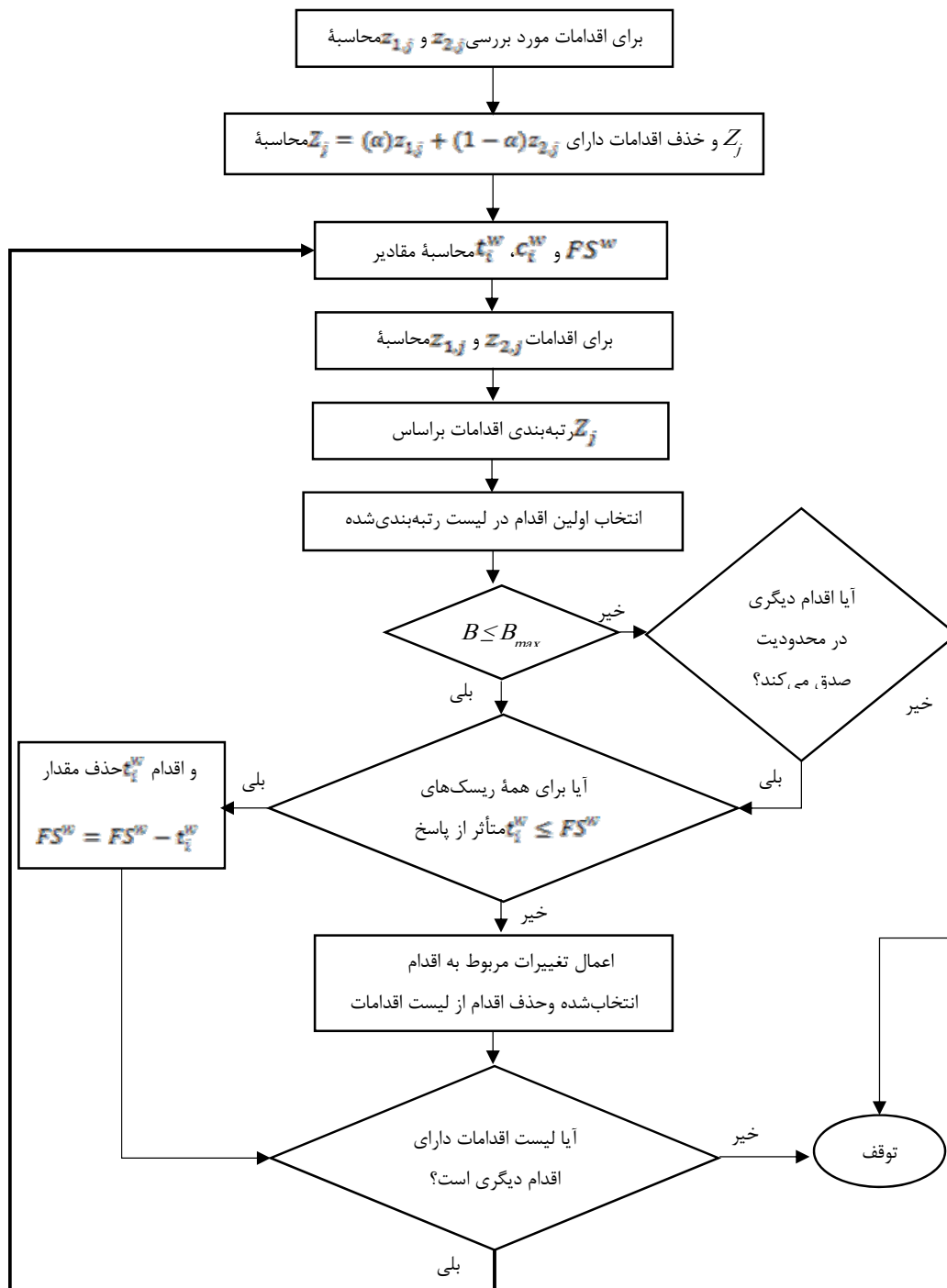
### ب) الگوریتم ابتکاری حلقوی

شکل ۲ نمای کلی این الگوریتم را نشان می‌دهد. مبنای انتخاب اقدام میزان بهبود توابع هدف با در نظر گرفتن معیار شناوری است. گام‌های این الگوریتم به ترتیب شکل ۲ است.

گام صفر: در اولین تکرار هیچ اقدامی اجرا نمی‌شود ( $AAC=0$ ) و ضرر ریسک ( $RL$ ) برابر مجموع ضرر ریسک‌های شناسایی شده است.

گام تکراری: در این مرحله، در هر دور با توجه به میزان





شکل ۲. نمای کلی الگوریتم ابتکاری حلقوی برای انتخاب پاسخ به ریسک

## اعتبارسنجی مدل و روش حل

به منظور سنجش کارایی مدل و روش حل پیشنهادی ده نمونه پروژه ایجاد شده است، به طوری که پروژه اول و دوم با توجه به پروژه انتشار یک کتاب متشکل از ۲۰ فعالیت کاری به وجود آمده‌اند و ریسک‌ها و پاسخ‌ها برای آن‌ها تولید شده است. همچنین، در چهار پروژه بعدی (۳ تا ۶) از یک پروژه احداث بلوار شهری به عنوان مرجع استفاده شده است که ۴۵ فعالیت کاری دارد و تعدادی از آن‌ها تکراری است. ریسک‌ها و پاسخ‌ها با توجه به این خاصیت ایجاد شده‌اند و چهار پروژه بعد (۷ تا ۱۰) با استفاده از پروژه ایجاد جایگاه سوخت CNG (دارای ۳۶ فعالیت) به وجود آمده‌اند. در این پروژه، انجام دادن چند فعالیت زمان زیادی را به خود اختصاص می‌دهد و برخی از فعالیت‌ها که تقریباً زمان کمتری برای آن‌ها صرف می‌شود زمان شناوری زیادی دارند که این ویژگی پروژه در ایجاد پروژه‌های موردی مد نظر قرار گرفته است. در کل، سه پروژه با تعداد کم پاسخ و ریسک (۱، ۳ و ۷)، سه پروژه با تعداد متوسط (۲، ۴ و ۸) و چهار پروژه با تعداد زیاد (۵، ۶، ۹ و ۱۰) ایجاد شده است و حل مسائل مورد نظر از سه روش دقیق (شمارش صریح)، فراابتکاری (الگوریتم ژنتیک) و ابتکاری (الگوریتم حلقوی) انجام پذیرفته است. همچنین، نتایج بررسی و مقایسه شده است که بررسی‌ها نشان می‌دهد الگوریتم حلقوی (روش پیشنهادی) در بیشتر موارد (نه پروژه) از لحاظ زمان بهترین جواب و از لحاظ هزینه جوابی بدتر یا برابر به دست آورده است و با انتخاب نکردن پاسخ ریسک‌هایی که تأثیر زمانی آن‌ها کمتر از مقدار شناوری است (تعداد پاسخ انتخابی کمتر) جوابی برابر (از لحاظ زمان) با دو روش دقیق و فراابتکاری دارد که این خصوصیت در زمان وجود محدودیت بودجه کاملاً مؤثر است و در چنین شرایطی جواب بهینه مسئله - از لحاظ زمان و هزینه - انتخاب می‌شود. جدول ۱ جواب‌های به دست آمده از سه روش را در پروژه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد و به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ جواب‌ها از نظر زمان و هزینه مقایسه شده‌اند. شایان ذکر است روش صریح به دلیل زمان زیاد حل (بیش از پنج روز) در چهار پروژه ۵، ۶، ۹ و ۱۰ استفاده نشده و

جواب الگوریتم حلقوی فقط با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است.

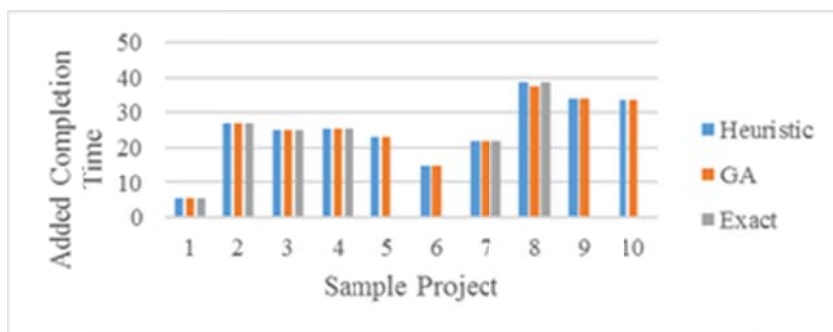
در مدل ارائه شده، پارامترهای مهم تعداد ریسک‌ها و پاسخ‌ها و میزان شناوری فعالیت‌های تحت تأثیر ریسک و پاسخ‌های مرتبط با آن‌هاست. همان‌طور که گفته شد، هر چه تعداد ریسک و پاسخ‌ها بیشتر شوند جواب روش ابتکاری مطمئن‌تر است. همچنین، در صورتی که ریسک‌های موجود اثری بیش از مقدار شناوری فعالیت‌ها داشته باشند، جواب سه روش ارائه شده مطابق هم است، اما در صورتی که اثر برخی ریسک‌ها از مقدار شناوری فعالیت کمتر باشد، تفاوت در جواب روش‌ها ایجاد می‌شود و الگوریتم ابتکاری در صورت امکان به سمت در نظر نگرفتن چنین ریسک‌هایی می‌رود.

در مورد انتخاب جواب روش‌های مختلف می‌توان با توجه به نظر مدیریت بهترین جواب را انتخاب کرد؛ برای مثال، اگر ضروری باشد پروژه‌ای در زمان مقرر پایان یابد و تأخیر در آن نتایج نامطلوبی در پی داشته باشد، جواب الگوریتم ابتکاری جواب قابل‌اتکایی است، زیرا در آن جواب به سمت زودترین زمان ختم پروژه حرکت می‌کند، اما در صورتی که ترجیح مدیریت انتخاب جواب با کمترین هزینه باشد، جواب روش دقیق (در مقیاس کوچک) و روش ژنتیک جوابی منطبق با نظر مدیریت است.

همچنین، هزینه نیز شامل هزینه انتخاب پاسخ‌ها و هزینه ناشی از ریسک است که هزینه انتخاب پاسخ‌ها قطعی است و در صورت انتخاب اقدام، باید پرداخت شود، ولی هزینه‌های ناشی از ریسک غیرقطعی است و در صورت وقوع ریسک، این هزینه‌ها به سیستم تحمیل می‌شود. در نتیجه، جمع کردن این هزینه‌ها با هم از دیدگاه افراد مختلف متفاوت است؛ برای مثال، فرد ریسک‌پذیر ترجیح می‌دهد هزینه قطعی کمتری برای اقدامات کاهش ریسک بپردازد و در عوض هزینه‌های بزرگ ناشی از ریسک را به صورت غیرقطعی بپذیرد، در صورتی که فرد ریسک‌گریز به دنبال حاشیه امنیت بیشتر با پرداختن هزینه لازم است. در نتیجه، جواب الگوریتم ابتکاری از لحاظ هزینه جوابی مناسب برای افراد ریسک‌پذیر است و جواب روش‌های دقیق و فرا ابتکاری جوابی متناسب با افکار افراد ریسک‌گریز است.

جدول ۱. جواب روش‌های حل مسئله برای پروژه‌های موردی

مجموع هزینه	هزینه ناشی از ریسک	هزینه انتخاب پاسخ	زمان اضافه شده به زمان ختم (روز)	پاسخ‌های انتخاب نشده	روش حل	پروژه	
۱۸۳۱۶۰	۱۰۰۵۶۰	۸۲۶۰۰	۵,۴	۳	حلقوی	۵ ریسک ۷ پاسخ	۱
۱۷۳۸۶۰	۸۶۷۶۰	۸۷۱۰۰	۵,۴	-	دقیق		
۱۷۳۸۶۰	۸۶۷۶۰	۸۷۱۰۰	۵,۴	-	ژنتیک		
۷۴۲۲۰۰	۴۶۹۲۰۰	۲۷۳۰۰۰	۲۷,۱	۱۳-۷-۴	حلقوی	۱۰ ریسک ۱۳ پاسخ	۲
۷۳۵۲۰۰	۴۱۹۲۰۰	۳۱۶۰۰۰	۲۷,۱	۱۳	دقیق		
۷۳۵۲۰۰	۴۱۹۲۰۰	۳۱۶۰۰۰	۲۷,۱	۱۳	ژنتیک		
۳۶۶۸۰۰	۲۴۹۸۰۰	۱۱۷۰۰۰	۲۵,۱	۴	حلقوی	۶ ریسک ۸ پاسخ	۳
۳۴۷۸۰۰	۲۲۶۸۰۰	۱۲۱۰۰۰	۲۵,۱	-	دقیق		
۳۴۷۸۰۰	۲۲۶۸۰۰	۱۲۱۰۰۰	۲۵,۱	-	ژنتیک		
۵۹۰۲۰۰	۳۴۳۲۰۰	۲۴۷۰۰۰	۲۵,۵	۱۴-۱۰-۵	حلقوی	۱۰ ریسک ۱۴ پاسخ	۴
۵۵۲۲۰۰	۳۷۳۲۰۰	۲۷۹۰۰۰	۲۵,۵	۱۴	دقیق		
۵۵۲۲۰۰	۳۷۳۲۰۰	۲۷۹۰۰۰	۲۵,۵	۱۴	ژنتیک		
۳۲۳۰۰۰	۱۳۲۹۰۰	۱۹۰۱۰۰	۲۳	۸	حلقوی	۱۲ ریسک ۱۷ پاسخ	۵
۳۰۷۵۰۰	۱۰۹۴۰۰	۱۹۸۱۰۰	۲۳	-	ژنتیک		
۱۲۸۱۰۰	۵۱۱۰۰	۷۷۰۰۰	۱۵	۱۹	حلقوی	۱۴ ریسک ۱۹ پاسخ	۶
۱۳۲۵۰۰	۴۵۵۰۰	۸۷۰۰۰	۱۵	-	ژنتیک		
۹۳۱۰۰	۵۳۹۰۰	۳۹۲۰۰	۲۲	۵	حلقوی	۶ ریسک ۸ پاسخ	۷
۸۵۴۰۰	۴۲۲۰۰	۴۳۲۰۰	۲۲	-	دقیق		
۸۵۴۰۰	۴۲۲۰۰	۴۳۲۰۰	۲۲	-	ژنتیک		
۱۲۶۰۰۰	۵۵۰۰۰	۷۱۰۰۰	۳۸,۶	۱۳-۸	حلقوی	۱۰ ریسک ۱۵ پاسخ	۸
۱۲۶۰۰۰	۵۵۰۰۰	۷۱۰۰۰	۳۸,۶	۱۳-۸	دقیق		
۱۳۲۱۰۰	۵۱۱۰۰	۸۱۰۰۰	۳۷,۶	۸	ژنتیک		
۲۴۱۷۰۰	۱۲۶۳۰۰	۱۱۵۴۰۰	۳۴	۲۱-۱۸-۱۵-۱۱-۹	حلقوی	۱۵ ریسک ۲۱ پاسخ	۹
۲۲۴۶۰۰	۱۰۳۹۰۰	۱۲۰۷۰۰	۳۴	۲۱-۱۱	ژنتیک		
۱۳۴۶۰۰	۷۵۱۰۰	۵۹۵۰۰	۳۳,۵	۸	حلقوی	۱۴ ریسک ۱۷ پاسخ	۱۰
۱۲۱۵۰۰	۶۰۱۰۰	۶۱۴۰۰	۳۳,۵	-	ژنتیک		



شکل ۳. مقایسهٔ جواب روش‌های حل (زمان)



شکل ۴. مقایسهٔ جواب روش‌های حل (مجموع هزینه)

### نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این پژوهش، بخش پاسخ به ریسک پروژه بررسی شده است که از نظر بیشتر کارشناسان، بخش مهجور مدیریت ریسک به حساب می‌آید و تاکنون مدل‌ها و ابزارهای معدودی در این حوزه معرفی شده است. در پژوهش حاضر مدلی ارائه شده است تا علاوه بر کاهش سطح ریسک پروژه از طریق انتخاب پاسخ‌های مناسب، اثربخشی بودجهٔ مورد نظر و پاسخ‌های انتخاب‌شده را افزایش دهد. بدین‌منظور، یک مدل دو هدفه پیشنهاد شده است که هدف اول در پی کاهش و کنترل هزینهٔ ناشی از اثر ریسک‌ها و هزینهٔ اجرای پاسخ‌ها و هدف دوم به‌دنبال بهینه‌سازی زمان پروژه توسط معیار استواری و با در نظر گرفتن معیار شناوری آزاد است. ایدهٔ اصلی مدل، انتخاب پاسخ ریسکی است که بر اهداف

کلی پروژه تأثیر دارد و در صورت انتخاب پاسخ مربوط به آن به اهداف از پیش تعیین‌شده نزدیک‌تر می‌شویم. براین‌اساس، مدل با توجه به معیار شناوری سعی در انتخاب پاسخ ریسک‌هایی دارد که اثر زمانی آن‌ها بر یک فعالیت، بیشتر از معیار شناوری باشد و موجب تأخیر در زمان فعالیت‌های بعدی و حتی زمان اتمام پروژه شود. در مدل، محدودیت‌هایی مثل محدودیت بودجه و محدودیت‌های مربوط به اجرای پاسخ‌ها نیز در نظر گرفته شده است که در صورت لزوم قابل‌اعمال است.

روش‌های حل مدل به سه دستهٔ دقیق، ابتکاری و فرا ابتکاری تقسیم شده‌اند؛ بنابراین، سه الگوریتم حل شمارش صریح، حلقوی و ژنتیک به‌ترتیب برای روش‌های حل پیشنهاد شده است. مدل و روش‌های حل پیشنهادی در ده

در صورت وجود محدودیت بودجه جواب این روش جوابی قابل‌اتکاست.

در تحقیقات آتی، برای نزدیک‌تر شدن مدل به دنیای واقعی می‌توان با احتمالی کردن زمان فعالیت‌ها و در نتیجه شناوری از شبکه‌های احتمالی (PERT) استفاده کرد. در نتیجه، پیشنهاد می‌شود از ویژگی احتمال ریسک نیز در مدل استفاده کرد. همچنین، معرفی و اعمال معیارهای استواری دیگر در مدل به کامل‌تر شدن مدل کمک می‌کند و استفاده از دیگر الگوریتم‌های ارائه‌شده در روش‌های فرا ابتکاری در این مسیر راهگشاست.

نمونه پروژه در سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ استفاده شد که بررسی نتایج نشان می‌دهد روش شمارش صریح به دلیل حجم بالای محاسبات و مدت زیاد زمان حل قابلیت اجرا در پروژه‌های بزرگ و حتی متوسط را ندارد، اما الگوریتم ژنتیک در زمان بسیار کمتر از روش شمارش صریح جواب را به دست آورده است، ولی به دلیل ماهیت جست‌وجوی تصادفی امکان رسیدن به جواب بهینه محلی به جای بهینه کل وجود دارد. همچنین، جواب حاصل از الگوریتم حلقوی در شرایطی که محدودیت بودجه وجود نداشته باشد، از لحاظ هزینه بهینه نیست، ولی حجم محاسبات و زمان حل آن کم و منطقی به نظر می‌رسد و

## مراجع

1. Arish, A. Akbarpour, M. And Seyedesfahani, M, M. (2010). "Model-based decision support in planning risk responses", *International Journal of Industrial Engineering and Production Management*, Vol. 20, No.3
2. PMI. (2013). Project Management Body of Knowledge (PMBOK). 5<sup>th</sup>Ed. Project Management Institute (PMI) Pub., USA.
3. Chapman, Chris, & Ward, Stephen. (2011). *How to manage project opportunity and risk: Why uncertainty management can be a much better approach than risk management*. John Wiley & Sons.
4. Hillson, David. (1999). *Developing effective risk responses*. Paper presented at the Proceedings of the 30th Annual Project Management Institute Seminars & Symposium.
5. Ben-David, I, & Raz, T. (2001). "An integrated approach for risk response development in project planning". *Journal of the Operational Research Society* 52, 14-25
6. Seyedhoseini, Seyed Mohammad, Noori, Siamak, & Hatefi, Mohammad Ali. (2009). "An Integrated Methodology for Assessment and Selection of the Project Risk Response Actions". *Risk Analysis*, 29(5), 752-763. doi: 10.1111/j.1539-6924.2008.01187.x
7. Purnus, Augustin, & Bodea, Constanta-Nicoleta. (2013). "Considerations on Project Quantitative Risk Analysis". *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 74, 144-153.
8. Nieto-Morote, Ana, & Ruz-Vila, F. (2011). "A fuzzy approach to construction project risk assessment". *International Journal of Project Management*, 29(2), 220-231.
9. Taroun, Abdulmaten. (2014). Towards a better modelling and assessment of construction risk: Insights from a literature review. *International Journal of Project Management*, 32(1), 101-115.
10. Mojtahedi, S Mohammad H, Mousavi, S Meysam, & Makui, Ahmad. (2010). "Project risk identification and assessment simultaneously using multi-attribute group decision making technique". *Safety science*, 48(4), 499-507.
11. Hillson, David. (2002). "Extending the risk process to manage opportunities". *International Journal of project management*, 20(3), 235-240.
12. Lee, Eunchang, Park, Yongtae, & Shin, Jong Gye. (2009). "Large engineering project risk management using a Bayesian belief network". *Expert Systems with Applications*, 36(3), 5880-5887.
13. Zhang, Yao, & Fan, Zhi-Ping. (2014). "An optimization method for selecting project risk response strategies". *International Journal of Project Management*, 32(3), 412-422.
14. S,H, Zegordi. E, Rezaeenik. A, Nazari. F, Honari Ch. (2011). "A multi-objective optimization and fuzzy

- prioritization approach for project risk responses selection". *Quarterly Energy Economics Review* 8(1). 161-196 (In Persian)
15. Datta, Sumit, & Mukherjee, SK. (2001). "Developing a risk management matrix for effective project planning-an empirical study". *Project Management Journal*, 32(2), 45-57.
  16. Miller, Roger, & Lessard, Donald. (2001). "Understanding and managing risks in large engineering projects". *International Journal of Project Management*, 19(8), 437-443.
  17. López, Cristina, & Salmeron, Jose L. (2012). "Risks Response Strategies for Supporting Practitioners Decision-Making in Software Projects". *Procedia Technology*, 5(0), 437-444.
  18. Kujawski, Edouard. (2002). "Selection of technical risk responses for efficient contingencies". *Systems Engineering*, 5(3), 194-212. doi: 10.1002/sys.10025
  19. Pipattanapiwong, Jirapong, & Watanabe, Tsunemi. (2000). "Multi-party Risk Management Process (MRMP) for a Construction Project Financed by an International Lender". *Paper presented at the Proceedings of the 16th ARCOM Conference*.
  20. Haimes, Yacov Y. (2005). *Risk modeling, assessment, and management* (Vol. 40): John Wiley & Sons.
  21. Chapman, C.B. (1979). "Large engineering project risk analysis". *IEEE Transactions on Engineering Management*, 26, 78-86.
  22. Klein, Jonathan H, Powell, Philip L, & Chapman, Chris B. (1994). "Project risk analysis based on prototype activities". *Journal of the Operational Research society*, 749-757.
  23. Ben-David, I, Rabinowitz, G, & Raz, T. (2002). "Economic Optimization of Project Risk Management Efforts". *The Israel Institute of Business Research*.
  24. Fan, Miao, Lin, Neng-Pai, & Sheu, Chwen. (2008). "Choosing a project risk-handling strategy: An analytical model". *International Journal of Production Economics*, 112(2), 700-713.
  25. Gonen, Amnon. (2011). "Optimal risk response plan of project risk management". *Paper presented at the Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), IEEE International Conference*.
  26. Kayis, B., Arndt, G., Zhou, M., & Amornsawadwatana, S. (2007). "A risk mitigation methodology for new product and process design in concurrent engineering projects". *Annals of the CIRP*, 56, 167-170.
  27. Popa, Emil M, & Marcut, Ioana Gabriela. (2008). "ASM and evolutionary algorithm for economic optimization of project risk management". *Paper presented at the WSEAS International Conference, Sofia, Bulgaria*.
  28. Fang, Chao, Marle, Franck, Xie, Min, & Zio, Enrico. (2013). "An integrated framework for risk response planning under resource constraints in large engineering projects". *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 60(3), 627-639.
  29. B, Dori. E, Hamze'i. (2010). "Determining the Best Responding Strategy to Project Risk Using ANP Technique (Case Study: North Azadegan Oil Field Development Project)". *Journal of Industrial Management*, 2(4), 77-94 (In Persian)
  30. Al-Fawzan, Mohammad A, & Haouari, Mohamed. (2005). "A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling". *International Journal of production economics*, 96(2), 175-187.
  31. Abbasi, Babak, Shadrokh, Shahram, & Arkat, Jamal. (2006). "Bi-objective resource-constrained project scheduling with robustness and makespan criteria". *Applied mathematics and computation*, 180(1), 146-152.
  32. Chtourou, Hédi, & Haouari, Mohamed. (2008). "A two-stage-priority-rule-based algorithm for robust resource-constrained project scheduling". *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 183-194.
  33. Hazır, Öncü, Haouari, Mohamed, & Erel, Erdal. (2010). "Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem". *European Journal of Operational Research*, 207(2), 633-643.
  34. Lambrechts, Olivier, Demeulemeester, Erik, & Herroelen, Willy. (2008). "A tabu search procedure for
-

- developing robust predictive project schedules”. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 493-508.
35. Herroelen, Willy, & Leus, Roel. (2005). “Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials”. *European journal of operational research*, 165(2), 289-306.
36. O. Yousefi, P. Naseri, A. Nilipour Tabatabaei. (2014). “Project Risk Assessment Model Using Multi-Objective Decision-Making Approach (case study: the earth dam project Asalooye)”. *Journal of Industrial Engineering*, Issue 1, 125-135 (In Persian)

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Abstract State Machine
  2. Bi-objective Resource-Constrained Project Scheduling Problem (BRCPSP).
  3. Activity on Arc
  4. Total Cost
  5. Abatement Actions Costs
  6. Risk Loss
-