فصل‌نامه‌ی مطالعات اقتصاد انرژی/ سال هشتم / شماره‌ی ۳۱/زمستان ۱۳۹۰/ صفحات ۱۹۵- ۱۶۱

# ارائه مدلی برای کاهش ریسک پروژه‌های نیروگاهی براساس رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی

**سید حسام الدین ذگردی***

**دانشیار دانشکده‌ی فنی بخش مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس،**
**zegordi@modares.ac.ir**
**ابراهیم رضایی نیک**
**دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس و پژوهشگر دانشگاه هیروشیما (ژاپن) ernik@modares.ac.ir**
**احد نظری**
**استادیار دانشکده‌ی معماری و شهر سازی دانشگاه شهید بهشتی، a_nazari @sbu.ac.ir**
**فریدون هنری چوبر**
**مدیر برنامه‌ریزی شر کت احداث و توسعه‌ی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی مپنا (توسعه‌ی ۲)**
**honari@mapnamd2.com**

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۲۶

## چکیده

نیروگاه‌ها یکی از زیرساخت‌های اساسی توسعه‌ی اقتصادی محسوب می‌شوند و در حال حاضر پروژه‌های نیروگاهی متعددی در کشو ر در حال اجرا هستند. به دلایل مختلف از جمله پیچیدگی فنی، نیاز به منابع ریالی و ارزی قابل توجه، نیاز به تجهیزات خاص و هم‌بستگی بین فازهای مختلف، این پروژه‌ها در معرض ریسک‌های متعدد قرار دارند، بنابراین مدیریت مؤثر ریسک یکی از الزامات این پروژه‌ها می‌باشد. از سوی دیگر هنوز کمبودهای قابل توجهی در حوزه‌ی ارزیابی و انتخاب اقدامات کاهش ریسک پروژه‌ها وجود دارد. در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود که ساختار شکست کار، رخدادهای ریسک، اقدامات کاهش ریسک، ریسک‌های ثانویه و تأثیرات آن‌ها را به‌طور یک پارچه بررسی می‌کند. هدف مدل حداقل سازی زیان کل مورد انتظار می‌باشد که شامل هزینه‌ی اجرای اقدام‌ها و اثرات نامطلوب مورد انتظار بر زمان، هزینه و کیفیت پروژه است. ضرایب تابع هدف مربوطه از طریق فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی تعیین شده است. علاوه بر این، به منظور اعتبارسنجی مدل، یک مطالعه‌ی موردی در پروژه‌های نیروگاهی ایران انجام شده است. براساس نتایج کسب شده، مدل پیشنهادی منجر به بهبود قابل توجه زمان، هزینه و کیفیت پروژه می‌شود.

**طبقه‌بندی JEL:** C02, C51, C52, C61, O21, O22

**کلید واژه:** پروژه‌های نیروگاهی، مدیریت ریسک پروژه، پاسخ‌گویی به ریسک‌ها، مدل‌های بهینه‌سازی، منطق فازی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی.

---

*- نویسنده‌ی مسئول

**۱- مقدمه**

بیش‌تر پروژه‌ها در یک محیط پویا و پیچیده اجرا می شوند، به‌طوری‌که عدم اطمینان و ریسک، جزء ویژگی‌های ذاتی آن‌ها به شمار می‌رود. این عدم اطمینان سبب می‌شود که بیش‌تر پروژه‌های کشور در رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده (زمان، هزینه، کیفیت و...) مؤفقیت قابل توجهی کسب نکنند. بر طبق تعریف راهنمای گستره‌ی دانش، مدیریت پروژه، ریسک عبارت است از یک رخداد غیرقطعی که در صورت وقوع حداقل بر یکی از اهداف پروژه تأثیر می‌گذارد (مؤسسه‌ی مدیریت پروژه[1]، ۲۰۰۸). هدف مدیریت ریسک افزایش احتمال مؤفقیت پروژه می‌باشد و این کار از طریق شناسایی و ارزیابی سیستماتیک ریسک، ارائه‌ی روش‌هایی برای اجتناب یا کاهش آن‌ها و حداکثرسازی فرصت‌ها انجام می‌گیرد (چپمن و وارد[2]، ۲۰۰۳ ). فرایند مدیریت ریسک به دو مرحله‌ی اصلی ارزیابی ریسک‌ها ( شامل شناسایی و تحلیل ریسک‌ها) و پاسخ‌گویی به آن‌ها قابل تقسیم می‌باشد (میلر[3]، ۲۰۰۵). فرایند مدیریت ریسک مؤثر، با ارزیابی مؤثر ریسک‌ها شروع می‌شود و بدون انجام این مرحله، مدیریت ریسک‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد (دپارتمان انرژی آمریکا[4]، ۲۰۰۵). از سوی دیگر، بسیاری از محققان تأکید کرده‌اندکه شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها بدون پاسخ‌گویی به آن‌ها مفید نیست (هیلسون[5]، ۱۹۹۹). بر طبق نظر محققان مختلف، با وجود انتشار مقالات متعدد در مورد موضوع مدیریت ریسک پروژه، تا کنون ابزارها و تکنیک‌های معدودی در زمینه‌ی پاسخ‌گویی به ریسک‌ها توسعه یافته است (بن دیوید و رز[6]، ۲۰۰۱؛ ساری[7]، ۲۰۰۴؛ سید حسینی و همکاران، ۲۰۰۹). در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی جهت ارزیابی و انتخاب اقدامات پاسخ‌گویی به ریسک‌ها در پروژه‌های نیروگاهی ارائه می‌شود. هدف مدل پیشنهادی حداقل‌سازی زیان کل مورد انتظار می‌باشد که شامل هزینه‌ی اجرای اقدام‌ها و اثرات نامطلوب مورد انتظار بر زمان، هزینه و کیفیت پروژه است. نیروگاه‌ها یکی از زیرساخت‌های اساسی توسعه‌ی اقتصادی کشور می‌باشند و در حال حاضر پروژه‌های

1 - Project Management Institute.
2 - Chapman and Ward.
3- Miler.
4- Department of Energy (U.S. DoE).
5- Hillson.
6- Ben-David and Raz.
7- Saari.

نیروگاهی حرارتی متعددی در کشور ما در حال اجرا هستند. اگر چه برنامه‌ریزی‌های بلندمدت برای ایجاد تنوع در روش‌های تولید انرژی در خصوص انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد، ولی نیروگاه‌های حرارتی هم‌چنان نقش اصلی را در تولید انرژی الکتریکی به عهده دارند، به‌طوری‌که در سال ۱۳۸۹ ظرفیت این نیروگاه‌ها در کشور بیش از ۶۰ هزار مگاوات بوده است و ایران به‌عنوان یکی از معدود سازندگان نیروگاه‌های حرارتی به شمار می‌رود. این پروژه‌ها بیش‌تر به روش کلید در دست انجام می‌شود و پیمانکار عمومی، مسئول طراحی، تأمین تجهیزات و ساخت می‌باشد. به دلایل متعدد از جمله پیچیدگی فنی، نیاز به منابع ریالی و ارزی قابل توجه، نیاز به تجهیزات خاص و تداخل و هم‌بستگی بین فازهای مختلف، این پروژه‌ها در معرض ریسک‌های متعدد قرار دارند و بیش‌تر آن‌ها انحراف قابل توجهی از اهداف تعیین شده دارند، بنابراین مدیریت مؤثر ریسک یکی از الزامات این پروژه‌ها می‌باشد.

این مقاله در پنج بخش تنظیم شده است. پس از مقدمه، در بخش دوم به مرور اجمالی ادبیات موضوع پاسخ‌گویی به ریسک‌های پروژه پرداخته می‌شود. در بخش سوم، چارچوب کلی مدل پیشنهادی و روش‌های حل آن ارائه می‌شود. بخش چهارم، به مطالعه‌ی موردی در یک پروژه‌ی نیروگاهی اختصاص دارد. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادات در بخش پنجم ارائه می شود.

## ۲- مرور ادبیات

علم مدیریت ریسک در دوره رنسانس در قرن شانزدهم میلادی مطرح شده است. از سال ۱۹۹۰میلادی مدل‌های مختلفی برای مدیریت ریسک پروژه‌ها با هدف افزایش مؤفقیت آن‌ها ارائه شده است (بوهم[1]، ۱۹۹۱، کوپر و همکاران[2]، ۲۰۰۵ ). به‌طور کلی همه‌ی این مدل‌ها چارچوبی مشابه دارند، ولی از نظر گام‌های اجرایی با یکدیگرمتفاوت‌اند (مرتی و ویلا[3]، ۲۰۱۱ ). از یک دیدگاه کلی، فرایند مدیریت ریسک پروژه شامل دو مرحله‌ی عام ارزیابی و پاسخ‌گویی به ریسک می‌باشد. ارزیابی ریسک از دو بخش شناسایی و تحلیل ریسک‌ها تشکیل شده است. روش‌های اصلی در شناسایی

1- Boehm.
2- Cooper et al.
3- Morote and Vila.

ریسک‌ها شامل طوفان فکری، مرور مستندات، روش دلفی، تحلیل چک لیست‌ها و تحلیل فرضیات می‌باشند. تحلیل ریسک به دو صورت کیفی و کمّی انجام می‌شود. تحلیل کیفی ریسک معمولا شامل ارزیابی احتمال، تأثیر و ماتریس احتمال- تأثیر می‌باشد. در تحلیل کمی از روش‌هایی مانند تحلیل حساسیت، تحلیل ارزش پولی مورد انتظار، درخت تصمیم با استفاده از نظریه‌ی مطلوبیت، شبیه‌سازی، نمودار علت و معلول، نمودار نفوذ، نظریه‌ی بازی، نظریه‌ی فازی و تحلیل درخت خطا استفاده می‌شود (لی و همکاران[1]، ۲۰۰۹).

مرحله‌ی پاسخ‌گویی ریسک‌ها شامل شناسایی، ارزیابی و انتخاب اقدامات پاسخ می‌باشد. اقدامات پاسخ به ریسک‌ها به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شود. یک دسته‌بندی مهم شامل پاسخ‌های پیشگیرانه و واکنشی می‌باشد. هیلسون (۱۹۹۹) برای دسته‌بندی اقدامات پاسخ‌گویی به ریسک دو سطح مطرح کرده است. سطح اول دسته‌بندی عمومی پاسخ‌هاست که بیانگر استراتژی پاسخ می‌باشد و سطح دوم شامل لیست کردن مجموعه‌ای از اقدامات خاص تحت هر استراتژی می‌باشد. با دیدگاه دسته‌بندی عمومی اقدامات پاسخ‌گویی به تهدیدها، یک دسته‌بندی متداول شامل چهار مورد اجتناب، کاهش، انتقال و پذیرش ریسک است. متناظر با استراتژی‌های اجتناب، انتقال، کاهش و پذیرش در تهدیدها، استراتژی‌های بهره‌گیری، شراکت (تسهیم)، ارتقا (تشدید) و پذیرش (چشم پوشی) برای فرصت‌ها تعریف می‌شود (هیلسون، ۲۰۰۱). برای انتخاب راهبرد مناسب پاسخ به ریسک، برخی چارچوب‌های کلی تدوین شده است. هیلسون (۱۹۹۹)، روش متداول در شناسایی و انتخاب اقدامات پاسخ‌گویی به ریسک‌ها را در قالب یک نمودار آبشاری تشریح کرده است. در این روش ابتدا استراتژی اجتناب از ریسک بررسی و در صورت عدم امکان آن، استراتژی انتقال مطالعه می‌شود و در صورت عدم انتخاب پاسخ، استراتژی کاهش، مطالعه و در نهایت نیز پذیرش ریسک بررسی می‌شود.

گروهی از محققان ابزارهای نموداری را برای انتخاب پاسخ ریسک‌ها پیشنهاد داده‌اند. در این ابزارها، با توجه به معیارهای تعیین شده، با استفاده از یک گراف یا ماتریس دو بعدی، ناحیه‌ی تقریبی برای انتخاب اقدام پاسخ شناسایی می‌شود. پینی[2](۲۰۰۲)، یک

1- Lee et al.
2- Piney.

نمودار برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک ارائه کرده است. که براساس مطلوبیت تصمیم‌گیرنده از ماتریس احتمال- تأثیر ریسک استخراج می‌شود. پس از تشکیل این نمودار، مطابق یک دستورالعمل مشخص، ناحیه‌ی اتخاذ استراتژی تعیین می‌شود. الکجائر و فلدینگ[1](۱۹۹۹)، از ماتریس احتمال- تأثیر به منظور انتخاب استراتژی پاسخ استفاده کرده‌اند. در این روش با توجه به احتمال و تأثیر ریسک، منطقه‌ی قرارگیری ریسک، شناسایی و استراتژی پاسخ به آن تعیین می‌شود. الکجائر و فلدینگ (۱۹۹۹)، ماتریس پیش بینی-نفوذ (کنترل) را برای تعیین استراتژی پاسخ معرفی کرده‌اند. در این روش برای ریسک‌های با قابلیت پیش بینی و کنترل بالا از برنامه‌های پیشگیرانه استفاده می‌شود. برای سایر قسمت‌ها نیز استراتژی‌های پیشنهادی شامل برنامه‌های اضطراری، پایش ریسک‌ها و سکوت در مقابل ریسک‌ها می‌باشد. برخی محققان استراتژی پاسخ را با استفاده از ماتریس‌های طبقه‌بندی ریسک‌ها، تعیین کرده‌اند. نمونه‌ای از این ماتریس‌ها توسط داتا و مخرجی[2](۲۰۰۱)، ارائه شده که ریسک‌ها به دو طبقه‌ی داخلی و خارجی تقسیم‌بندی شده‌اند. نمونه‌ی دیگری از این ماتریس‌ها توسط میلر و لاسارد[3](۲۰۰۱) معرفی شده که در آن از طبقه‌بندی ریسک‌ها به سیستمی و غیرسیستمی و قابلیت مدیریت ریسک برای انتخاب استراتژی پاسخ استفاده شده است.

در برخی تحقیقات از مفهوم مرز کارا (مؤثر) جهت ارزیابی پاسخ‌های ریسک‌ها استفاده شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. چپمن و وارد[4] (۲۰۰۳)، رابطه هزینه‌ی اجرای پاسخ و سطح ریسک هزینه را بررسی کرده‌اند. بر این اساس پاسخ‌هایی که هزینه‌ی اجرا و سطح ریسک هزینه‌ی آن از سایر اقدامات موجود بدتر باشد، حذف و جواب‌های کارا تعیین می‌شود. کوجاوسکی[5](۲۰۰۲)، برای هر پاسخ مجموع هزینه‌های اجرای پاسخ و هزینه‌ی ریسک پس از اجرای پاسخ را با کمک درخت تصمیم، محاسبه و منحنی توزیع احتمال تجمعی را ترسیم کرده است. هایمز[6] (۲۰۰۴)، با استفاده از تبادل هزینه‌ی اجرای پاسخ و هزینه‌ی ریسک پس از اجرای پاسخ، مرز کارا را در یک پروژه‌ی

1- Elkjaer and Felding.
2- Datta and Mukherjee.
3- Miller and Lessard. Chapman, C.B. and Ward
4- Chapman & Ward.
5- Kujawski.
6- Haimes.

مبارزه با آفات گیاهی محاسبه کرده است. کلین[1](۱۹۹۳)، یک مدل مفهومی براساس نمودار نفوذ بین سطح عدم اطمینان مربوط به زمان، هزینه و کیفیت پروژه ارائه داده است. مرز کارای پاسخ‌ها با در نظر گرفتن سه عنصر زمان، هزینه و کیفیت تشکیل می‌شود و با استفاده از تبادل بین این سه معیار، گزینه‌ی مطلوب انتخاب می‌شود.

برخی محققان از ساختار شکست کار به منظور برقراری ارتباط بین مدل ارزیابی پاسخ ریسک‌ها با سایر سیستم‌های مدیریت پروژه استفاده کرده‌اند. اولین تحقیق انجام شده در این زمینه مربوط به چپمن (۱۹۷۹)، می‌باشد. در این تحقیق یک متدولوژی با عنوان SCERT[2] ارائه شده است که تک تک اجزای ساختار شکست کار، بررسی و ریسک‌ها و پاسخ‌های مربوطه شناسایی می‌شود. این روش نیازمند حجم زیاد مطالعات در پروژه‌های بزرگ می‌باشد. به منظور کاهش این مشکل،کلین و همکاران (۱۹۹۴)، نسخه‌ی اصلاح شده‌ی این مدل را ارائه کرده‌اند که به‌جای بررسی ریسک و پاسخ تک تک فعالیت‌های مجموعه، فعالیت‌های الگو بررسی شده و نتایج برای تمام فعالیت‌های مجموعه تعمیم داده می‌شود.

مسأله‌ی انتخاب پاسخ برای ریسک‌ها را می‌توان در قالب یک مسأله‌ی بهینه‌سازی مدل‌سازی کرد. بن دیوید و رز[3] (۲۰۰۱)، یک چارچوب کلی به همراه یک الگوریتم ابتکاری برای انتخاب مجموعه‌ی پاسخ‌ها ارائه کرده‌اند. مدل ریاضی مربوط به آن نیز توسط بن دیوید و همکاران (۲۰۰۲)، مطرح شده است. مدل پیشنهادی عناصر کاری پروژه، رخدادهای ریسک تأثیرگذار بر عناصر کاری و مجموعه‌ی اقدامات تخفیف ریسک را با یکدیگر مرتبط می‌کند. تابع هدف به‌دنبال حداقل کردن هزینه‌های کل مورد انتظار مرتبط با ریسک‌ها می‌باشد که از دو جزء هزینه‌های اقدامات تخفیف ریسک و ضررهای مورد انتظار ریسک‌ها تشکیل شده است. پوپا و مارکوت[4] (۲۰۰۸)، یک الگوریتم تکاملی برای مدل مذکور پیشنهاد داده و کارایی آن را از طریق آزمایشات عددی بررسی کرده‌اند. از دیگر مطالعات مرتبط می‌توان به تحقیق سید حسینی و همکاران (۲۰۰۹ ) اشاره کرد. در این تحقیق یک مدل پاسخ‌گویی به ریسک‌های پروژه با رویکرد طراحی سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری ارائه شده است. مدل پیشنهادی ارتباط نزدیکی با

1- Klein.
2- Synergistic Contingency Evaluation and Response Techniques.
3- Ben-David and Raz.
4- Popa and Marcut.

سیستم برنامه‌ریزی پروژه دارد و شامل زیر سیستم‌های ارزیابی پروژه، رتبه‌بندی پروژه، ارزیابی ریسک، رتبه‌بندی ریسک، ارزیابی پاسخ و رتبه‌بندی پاسخ می‌باشد.

## ۳- مدل پیشنهادی برای ارزیابی و انتخاب پاسخ ریسک‌ها

مطالعه‌ی ادبیات موضوع بیانگر آن است که تاکنون ابزارها و تکنیک‌های معدودی در زمینه‌ی ارزیابی و انتخاب اقدامات پاسخ‌گویی به ریسک‌ها توسعه یافته است. طبق نظر هیلسون (۱۹۹۹)، تحقیقات مرتبط با پاسخ‌گویی به ریسک‌های پروژه، ضعیف‌ترین بخش فرایند مدیریت ریسک می‌باشد. بن دیوید و رز (۲۰۰۱)، یادآوری کرده‌اند که هیچ فرایند جامع قابل قبولی برای انتخاب اقدامات پاسخ ریسک وجود ندارد. ساری[1] (۲۰۰۴)، تصریح کرده است که ابزارهای اندکی در ادبیات موضوع برای تعیین پاسخ‌های ریسک مطرح می‌باشد. بر طبق نظر پیپاتاناپیوانگ[2] (۲۰۰۴)، در فرایند پاسخ‌گویی به ریسک‌ها، چارچوب‌های جامع و نظام‌مند اندکی ارائه شده است. سیدحسینی و همکاران (۲۰۰۹)، نیز اظهار کرده‌اند که تعداد روش‌های نظام‌مند و قابل قبول در حوزه‌ی انتخاب و ارزیابی پاسخ‌های ریسک، ناچیز می‌باشد. از سوی دیگر مدل‌های موجود نیز دارای محدودیت‌هایی از جمله موارد زیر می‌باشند.

ابزارهای نموداری به‌طور تقریبی استراتژی پاسخ را مشخص می‌کنند، ولی در انتخاب جزئیات پاسخ‌ها مفید نیستند. این روش‌ها عموما برای هر ناحیه یک استراتژی تعیین می‌کنند، در حالی‌که در دنیای واقعی باید استراتژی‌های متفاوتی برای ریسک‌های موجود در هر ناحیه در نظر گرفت. علاوه بر این، این ابزارها فقط دو معیار را در نظر می‌گیرند، ولی بیش‌تر اوقات در مسائل عملی باید معیارهای متعددی بررسی شود. در روش‌های مبتنی بر مرز کارا نیز عمدتا یک مرز کارا مشخص می‌شود، ولی روش مشخصی برای ارزیابی و انتخاب نهایی پاسخ‌ها مطرح نمی‌باشد. تمرکز بر روی عناصر هزینه‌ای و در نظر نگرفتن سایر اهداف پروژه یکی از معایب بیش‌تر روش‌های مبتنی بر ساختار شکست کار می‌باشد. ضمن این‌که در بیش‌تر تحقیقات مربوطه، روش مشخصی برای تحلیل ریسک‌ها و پاسخ‌ها از نظر زمان، هزینه و کیفیت ارائه نشده است. از سوی دیگر، یک مدل تصمیم‌گیری خوب باید در شرایط مبهم و غیردقیق دارای

1- Saari.
2- Pipattanapiwong

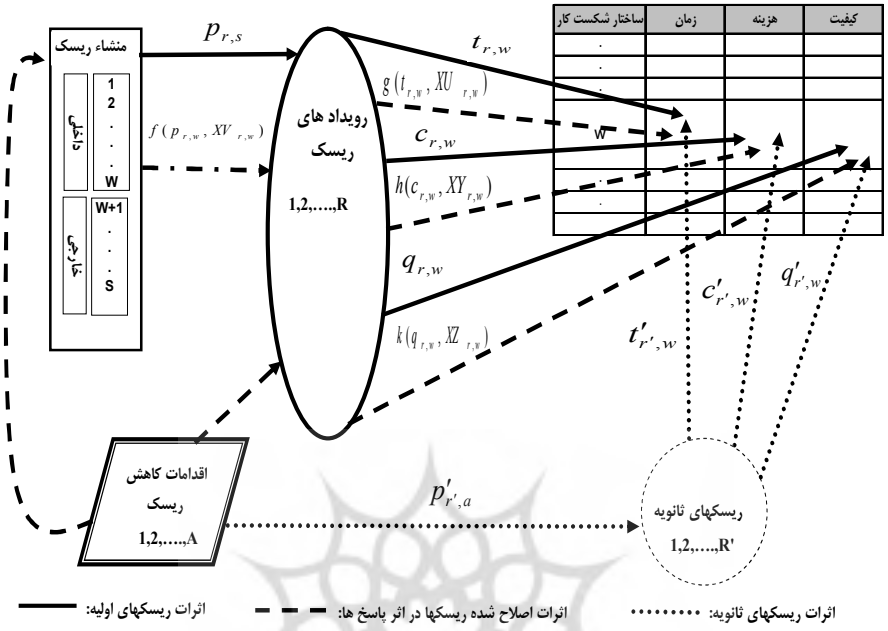
کارایی باشد، زیرا ابهام، خاصیت مشترک بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری می‌باشد (یو[1]، ۲۰۰۲). طبق نظر چو[2] و همکاران (۲۰۰۲)، در کشورهایی که داده‌های عینی برای ارزیابی ریسک ناکافی است، استفاده از قضاوت خبرگان اجتناب ناپذیر می‌باشد. در این‌گونه موارد، استفاده از رویکردهای فازی می‌تواند بسیار مفید باشد. با توجه به پیچیدگی‌های بیش‌تر پروژه‌های بزرگ و فقدان اطلاعات کافی، استفاده از رویکرد فازی مناسب‌تر می‌باشد. در مدل پیشنهادی تلاش می‌شود با ارائه‌ی یک چارچوب عملی، بر مبنای تئوری بهینه‌سازی و ترکیب آن با منطق فازی، این اشکالات تا حدی کاهش یابد.

## چارچوب مدل پیشنهادی

در این قسمت یک مدل ریاضی برای ارزیابی و انتخاب پاسخ‌های ریسک پروژه پیشنهاد می‌شود که ساختار شکست کار، رخدادهای ریسک، اقدامات کاهش ریسک، ریسک‌های ثانویه و تأثیرات آن‌ها را به‌طور روشن با یکدیگر مرتبط می‌کند. برای برقراری ارتباط بین مدل انتخاب پاسخ ریسک‌ها با کل سیستم پروژه، در نظر گرفتن ساختار شکست کار به‌عنوان محور ارتباط، ضروری است. (هاتفی، ۱۳۸۶). هدف مدل پیشنهادی، حداقل سازی زیان کل مورد انتظار می‌باشد که شامل هزینه‌ی اجرای اقدام‌ها و اثرات نامطلوب مورد انتظار بر زمان، هزینه و کیفیت پروژه است. چارچوب مدل پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده است و در ادامه‌ی این بخش، جزئیات آن تشریح می‌شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1- Yu
2- Cho et al.




منبع: یافته‌های تحقیق

**شکل ۱- چارچوب مدل پیشنهادی برای ارزیابی و انتخاب پاسخ‌های ریسک پروژه**

در مدل پیشنهادی سه معیارکلیدی مؤفقیت پروژه شامل زمان، هزینه و کیفیت در نظر گرفته شده است. حالت خاصی که فقط شامل هزینه‌ها می‌باشد، توسط بن دیوید و رز (۲۰۰۱)، بررسی شده است. در نظر گرفتن معیارهای مختلف موجب تطابق بیش‌تر مدل با دنیای واقعی می‌شود. این سه معیار جزء معیارهای اساسی بیش‌تر پروژه‌ها می‌باشند (کرزنر[1]،۲۰۰۳ ). عناصر کاری همان اجزای ساختار شکست کار هستند و با w=1,2,…,W نمایش داده می‌شوند. برخی از رویدادهای ریسک (یا پاسخ‌ها) ممکن است بر پایین‌ترین سطح ساختار شکست کار (بسته‌های کاری) تأثیرگذار باشند، در حالی‌که برخی رویدادها ممکن است بر سطوح بالاتر ساختار شکست کار یا کل پروژه مؤثر باشند. رویدادهای ریسک با r=1,2,…,R مشخص می‌شوند و ریسک‌ها مستقل از یکدیگر فرض شده‌اند. در صورت وابستگی بین رویدادها، همه‌ی رویدادهای وابسته

1- Kerzner.

به‌صورت یک مجموعه ترکیب می‌شوند و به صورت یک رویداد عمل می‌کنند. هر رویداد ریسک یک منشا دارد که با s=1,2,…,S مشخص می‌شوند. منشاءهای داخلی همان اجزای ساختار شکست کار هستند. بنابراین W نیز منشاء داخلی و S-W منشاء نیز خارجی ( مثل آب و هوا، وضعیت اقتصادی و...) می‌باشد. هر منشاء ریسک می‌تواند چند رویداد ریسک ایجاد کند. عناصر کاری می‌توانند به‌عنوان منشاء ریسک باشند و هم‌چنین می‌توانند در معرض ریسک‌های حاصل از سایر منشاءها قرار گیرند. احتمال وقوع ریسک بستگی به منشاء آن دارد و احتمال وقوع رویداد ریسک r، به علت منشاء s با $p_{r,s}$ نمایش داده می‌شود. عناصر $p_{r,s}$ در داخل ماتریس احتمال (P) قرار می‌گیرند. تأثیر رویداد ریسک r بر زمان عنصر کاری w به‌اندازه‌ی $t_{r,w}$ می‌باشد و این عناصر در ماتریس T قرار داده می‌شوند. به‌طور مشابه، تأثیر رویداد ریسک r بر هزینه‌ی عنصر کاری w به اندازه‌ی $c_{r,w}$ و بر کیفیت عنصر کاری w به اندازه‌ی $q_{r,w}$ می‌باشد. این عناصر نیز در ماتریس‌های C و Q قرار داده می‌شوند. در مدل، از هزینه، زمان و کیفیت مبنای پروژه، که هیچ اقدام تخفیف ریسکی در نظر گرفته نشده، صرف نظر شده است.

ماتریس تأثیر زمانی مورد انتظار (ET)، از ضرب ماتریس ترانهاده‌ی احتمال و ماتریس تأثیر زمانی به‌دست می‌آید. مجموع عناصر ماتریس ET بیانگرکل ریسک زمانی پروژه می‌باشد. به روش مشابه، ماتریس‌های تأثیر هزینه‌ای مورد انتظار (EC) و تأثیر کیفی مورد انتظار (EQ) به ترتیب از طریق ضرب ماتریس ترانهاده‌ی احتمال در ماتریس تأثیر هزینه‌ای و کیفی به‌دست می‌آیند، بنابراین ماتریس‌های ET، EC و EQ از طریق روابط زیر قابل تعریف می‌باشند که علامت ' بیانگر ترانهاده‌ی ماتریس است.

$$ET = P' \times T = (et_{s,w})_{S\times W} = (\sum_{r=1}^{R}(p_{s,r} \times t_{r,w}))_{S\times W} \qquad (1)$$

$$EC = P' \times C = (ec_{s,w})_{S\times W} = (\sum_{r=1}^{R}(p_{s,r} \times c_{r,w}))_{S\times W} \qquad (2)$$

$$EQ = P' \times Q = (eq_{s,w})_{S\times W} = (\sum_{r=1}^{R}(p_{s,r} \times q_{r,w}))_{S\times W} \qquad (3)$$

اقدامات تخفیف ریسک احتمال و یا تأثیر رویداد ریسک را اصلاح می‌کنند و اجرای آن‌ها می‌تواند دارای اثر مثبت یا منفی بر عناصر کاری باشد. به عبارت دیگر این اقدامات منجر به اصلاح ماتریس‌های احتمال و یا تأثیر (ماتریس‌های P, T, C, Q ) می‌شوند. این

اقدامات نمی‌توانند سبب تغییر احتمال ریسک‌های با منشاء خارجی شوند، ولی می‌توانند اثرات آن‌ها را تغییر دهند. این اقدامات با مجموعه‌ی $a=1,2,\ldots, A$ نمایش داده می‌شوند. متغیرتصمیم صفر-یک $X_a$ نشان دهنده‌ی انتخاب یا عدم انتخاب اقدام a می‌باشد. هزینه‌ی اجرای پاسخ a با $c_a$ مشخص می‌شود.

تأثیر اصلاحی اقدام a بر احتمال ریسک r ناشی از عنصر کاری w با $v_{r,w,a}$ نمایش داده می‌شود، به‌طوری‌که $V_{r,w}=(v_{r,w,1},\ldots,v_{r,w,A})$ می‌باشد. تأثیر اصلاحی اقدام a بر اثر زمانی ریسک r روی عنصر کاری w با $u_{r,w,a}$ نمایش داده می‌شود، به‌طوری که $U_{r,w}=(u_{r,w,1},\ldots,u_{r,w,A})$ می‌باشد. به‌طور مشابه، تأثیر اصلاحی اقدام a بر اثر هزینه‌ای ریسک r روی عنصر کاری w با $y_{r,w,a}$ نمایش داده می‌شود، به‌طوری که $Y_{r,w}=(y_{r,w,1},\ldots,y_{r,w,A})$ می‌باشد. در نهایت، تأثیر اصلاحی اقدام a بر اثر کیفیتی ریسک r روی عنصر کاری w با $z_{r,w,a}$ نمایش داده می‌شود و $Z_{r,w}=(z_{r,w,1},\ldots,z_{r,w,A})$ می‌باشد.

ماتریس $X_{(A*A)}$، یک ماتریس قطری است که در صورت انتخاب اقدام a، $X_{a,a}=1$ می‌شود، بنابراین $XV_{r,w}$ ، $XU_{r,w}$، $XY_{r,w}$ و $XZ_{r,w}$ به ترتیب بیانگر بردارهای تأثیر بر احتمال، اثر زمان، هزینه و کیفیت حاصل از اقدامات انتخابی می‌باشند. در حالت کلی، احتمال اصلاح شده‌ی رویداد ریسک r ناشی از منشاء w با $f(p_{r,w},XV_{r,w})$ نمایش داده می‌شود. $g(t_{r,w},XU_{r,w})$، بیانگر اثر زمانی اصلاح شده‌ی ریسکr روی عنصر کاری w می‌باشد. به‌طور مشابه $h(c_{r,w},XY_{r,w})$، بیانگر اثر هزینه‌ای اصلاح شده‌ی ریسک r روی عنصر کاری w و $k(q_{r,w},XZ_{r,w})$، نشان دهنده‌ی اثر کیفیتی اصلاح شده‌ی ریسک r روی عنصر کاری w می‌باشد.

با روش مشابه، احتمال و تأثیرات ناشی از ریسک‌های ثانویه قابل تعریف است. منشاء این ریسک‌ها اقدامات انتخابی برای پاسخ به ریسک‌های موجود می‌باشد. همان‌طورکه شکل ۱ نشان می‌دهد، از علامت' برای ریسک‌های ثانویه استفاده شده است. با این حال برای اجتناب از پیچیدگی غیرضروری در مدل سازی، احتمال و تأثیرات حاصل از ریسک‌های ثانویه، با احتمال و تأثیرات ناشی از منشاءهای ریسک و اقدامات کاهش ریسک ترکیب شده‌اند.

در مسأله‌ی مورد بررسی پاسخ‌ها باید طوری انتخاب شوند که از یک‌سو هزینه‌ی اجرای پاسخ‌ها حداقل شود و از سوی دیگر تأثیرات نامطلوب بر اهداف پروژه (افزایش

زمان، افزایش هزینه و کاهش کیفیت) نیز کاهش یابد. به عبارت دیگر با یک مسأله‌ی چند هدفه سر و کار داریم. براساس تعاریف ارائه شده، هزینه‌های اجرای اقدامات کاهش ریسک[1] (AAC) از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$AAC(X) = \sum_{a=1}^{A} c_a . X_{a,a} \qquad (۴)$$

در صورتی که هیچ پاسخی انتخاب نشود، اثرات زمانی، هزینه‌ای و کیفیتی مورد انتظار ریسک‌ها از روابط ۵ تا ۷ به‌دست می‌آید. خسارت زمانی مورد انتظار[2] (ETL) بیانگر تأثیرات ریسک‌ها بر زمان پروژه بوده و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$ETL. = \sum_{s=1}^{S}\sum_{w=1}^{W}(et_{s,w}) = \sum_{s=1}^{S}\sum_{w=1}^{W}(\sum_{r=1}^{R} p_{s,r} \times t_{r,w}) \qquad (۵)$$

خسارت هزینه‌ای (پولی) مورد انتظار[3] (ECL) بیانگر تأثیرات ریسک‌ها بر هزینه‌ی پروژه است و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$ECL. = \sum_{s=1}^{S}\sum_{w=1}^{W}(ec_{s,w}) = \sum_{s=1}^{S}\sum_{w=1}^{W}(\sum_{r=1}^{R} p_{s,r} \times c_{r,w}) \qquad (۶)$$

خسارت کیفی مورد انتظار[4] (EQL) نشان دهنده‌ی تأثیرات ریسک‌ها بر کیفیت پروژه بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$EQL. = \sum_{s=1}^{S}\sum_{w=1}^{W}(eq_{s,w}) = \sum_{s=1}^{S}\sum_{w=1}^{W}(\sum_{r=1}^{R} p_{s,r} \times q_{r,w}) \qquad (۷)$$

در صورت انتخاب اقدامات کاهش ریسک، تأثیرات زمانی، هزینه‌ای و کیفیتی مورد انتظار ریسک‌ها طبق روابط ۸ تا ۱۰ تغییر می‌کند. چون اقدامات کاهش ریسک نمی‌تواند سبب تغییر احتمال ریسک‌های با منشاء خارجی شود، احتمال وقوع این ریسک‌ها به شکل اولیه در نظر گرفته شده است.

$$ETL(X) = \sum_{r=1}^{R}(\sum_{w=1}^{W} f(p_{r,w}, XV_{r,w}) + \sum_{s=W+1}^{S} p_{r,s})(\sum_{w=1}^{W} g(t_{r,w}, XU_{r,w})) \qquad (۸)$$

1- Abatement Actions Costs.
2- Expected Time Loss.
3- Expected Cost (Monetary) Loss.
4- Expected Quality Loss.

$$ECL(X)=\sum_{r=1}^{R}\Big(\sum_{w=1}^{W} f(p_{r,w},XV_{r,w})+\sum_{s=W+1}^{S} p_{r,s}\Big)\Big(\sum_{w=1}^{W} h(c_{r,w},XY_{r,w})\Big) \quad (۹)$$

$$EQL(X)=\sum_{r=1}^{R}\Big(\sum_{w=1}^{W} f(p_{r,w},XV_{r,w})+\sum_{s=W+1}^{S} p_{r,s}\Big)\Big(\sum_{w=1}^{W} k(q_{r,w},XZ_{r,w})\Big) \quad (۱۰)$$

یکی از موضوعات مهم در مدل پیشنهادی، چگونگی نمایش ریاضی تأثیر اقدامات کاهش ریسک بر روی ویژگی‌های ریسک می‌باشد. ترتیب اجرای اقدامات نباید در نتیجه‌ی حاصل از ترکیب اقدامات تأثیرگذار باشد. عملیات ریاضی که مستقل از ترتیب اقدامات می‌باشد، شامل توابع حداقل، حداکثر، ضرب، جمع یا ترکیبی از آن‌ها می‌باشد (بن دیوید و همکاران، ۲۰۰۲). به‌عنوان یک حالت متداول، تابع احتمال اصلاح شده‌ی رویداد ریسک و تابع اثر کیفی اصلاح شده‌ی ریسک بر روی عناصر کاری از طریق تابع ضرب تعیین می‌شود. هم‌چنین توابع اثرات زمان و هزینه‌ی اصلاح شده‌ی ریسک بر روی عناصر کاری از طریق تابع مینیمم تعیین می‌شود. این روش از طریق روابط ریاضی زیر قابل بیان می‌باشد:

$$f(p_{r,w},XV_{r,w})=p_{r,w}\times\prod_{a=1_{x_{a,a}\neq 0}}^{A} v_{r,w,a}.x_{a,a} \quad (۱۱)$$

$$g(t_{r,w},XU_{r,w})=\text{Minimum}\{t_{r,w},u_{r,w,1}.x_{1,1},u_{r,w,2}.x_{2,2},\ldots,u_{r,w,A}.x_{A,A}\,|\,x_{a,a}\neq 0\} \quad (۱۲)$$

$$h(c_{r,w},XY_{r,w})=\text{Minimum}\{c_{r,w},y_{r,w,1}.x_{1,1},y_{r,w,2}.x_{2,2},\ldots,y_{r,w,A}.x_{A,A}\,|\,x_{a,a}\neq 0\} \quad (۱۳)$$

$$k(q_{r,w},XZ_{r,w})=q_{r,w}\times\prod_{a=1_{x_{a,a}\neq 0}}^{A} z_{r,w,a}.x_{a,a} \quad (۱۴)$$

چون هر ریسک می‌تواند دارای تأثیر مثبت یا منفی بر اهداف پروژه باشد، تأثیرات نا مطلوب (افزایش زمان، افزایش هزینه و کاهش کیفیت) با علامت مثبت و تأثیرات مطلوب با علامت منفی نشان داده می‌شود، بنابراین ETL(X)، ECL(X) و EQL(X) باید حداقل شود. با ترکیب اهداف تعریف شده از طریق روش مجموع وزین ساده (SAW)[1]، تابع هدف مدل حاصل می‌شود. در مدل پیشنهادی، خسارت مورد

1- Simple Additive Weighting .

انتظار کل با[1] TEL نمایش داده شده است. $d_1$ تا $d_3$، ضرایب وزنی تابع هدف است که بیانگر اهمیت نسبی اهداف پروژه (زمان، هزینه و کیفیت ) از دیدگاه تصمیم‌گیرندگان می‌باشد.

بیش‌تر اوقات محدودیت‌های عملی برای انتخاب اقدامات وجود دارد، به‌عنوان نمونه برخی اقدامات نمی‌توانند با هم انتخاب شوند، یا این‌که انتخاب یک اقدام مستلزم انتخاب اقدام دیگری می‌باشد. در مدل پیشنهادی دو نوع محدودیت زوجی تعریف شده است. اگر انتخاب هم‌زمان اقدام i و j امکان‌پذیر نباشد، آن‌گاه $q_{i,j}=1$ تعریف می‌شود. اگر انتخاب i نیازمند انتخاب اقدام j باشد، آن‌گاه $b_{i,j}=1$ تعریف می‌شود. در صورت وجود محدودیت بودجه برای اقدامات، می‌توان این محدودیت را نیز به مدل اضافه کرد که در این مدل رابطه‌ی ۱۸ بیانگر محدودیت بودجه‌ی اقدامات در سطح B می‌باشد. بدیهی است با توجه به شرایط واقعی پروژه‌ها، می‌توان محدودیت‌های دیگری نیز به سیستم اضافه کرد.

$$\text{Min TEL} = d_1 \times \left(\frac{\text{ETL}(X) - \text{ETL}_0}{\text{ETL}_0}\right) + d_2 \times \left(\frac{\text{AAC}(X) + \text{ECL}(X) - \text{ECL}_0}{\text{ECL}_0}\right) + d_3 \times \left(\frac{\text{EQL}(X) - \text{EQL}_0}{\text{EQL}_0}\right) \quad (15)$$

$$\text{subject to:}$$

$$X_{i,i} + X_{j,j} \le 1 \quad \forall q_{i,j} = 1, i, j \in A \quad (16)$$

$$X_{i,i} \le X_{j,j} \qquad \forall b_{i,j} = 1,\ i, j \in A \quad (17)$$

$$\text{AAC}(X) \le B \quad (18)$$

$$X_{i,i} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in A \quad (19)$$

### *تعیین ضرایب وزنی تابع هدف*

در مدل پیشنهادی، $d_1$ تا $d_3$ ضرایب وزنی تابع هدف می‌باشد. اهمیت نسبی این وزن‌ها بستگی به عوامل مختلفی از قبیل نوع پروژه و ترجیحات ذینفعان پروژه دارد. در صورتی که تعیین مقادیر وزنی به سادگی امکان‌پذیر نباشد، می‌توان از روش‌های تحلیلی استفاده کرد. در این تحقیق به منظور تعیین ضرایب وزنی تابع هدف از فرایند تحلیل

1- Total Expected Loss.

سلسله مراتبی[1](AHP) فازی استفاده شده است. این روش در سال ۱۹۸۰توسط ساعتی معرفی شده است و یکی از روش‌های مناسب برای حل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری می‌باشد. فرایند تحلیل سلسله مراتبی توسط نویسندگان مختلف برای محیط فازی توسعه داده شده است. در این تحقیق از رویکرد اولویت بندی فازی استفاده می‌شود که اولین بار توسط میخائیلف و تسوتینف[2] (۲۰۰۴)، معرفی شده است. با این‌حال این روش برای تصمیم گروهی اصلاح شده است. یکی از ویژگی‌های مهم این روش محاسبه‌ی نرخ سازگاری در حالت فازی می‌باشد که در اکثر روش‌های دیگر به آن پرداخته نشده است. علاوه بر این به مجموعه‌ی کامل مقایسات زوجی به صورت فازی نیازی ندارد و حل مدل غیرخطی حاصل نیز از سایر مدل‌های غیرخطی راحت‌تر می‌باشد. در این روش فرض می‌شود مقایسات زوجی فازی به صورت اعداد فازی مثلثی $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ باشد. بردار قطعی وزن (اولویت) $w = (w_1, w_2, ...., w_n)$ به‌گونه‌ای استخراج می‌شود که نرخ‌های اولویت $\frac{w_i}{w_j}$ تقریبا در محدوده‌ی قضاوت‌های فازی ابتدایی قرار گیرد، به عبارت دیگر وزن‌ها طوری تعیین می‌شود که رابطه‌ی فازی زیر برقرار باشد.

$$l_{ij} \tilde{\leq} \frac{w_i}{w_j} \tilde{\leq} u_{ij} \qquad (۲۰)$$

هر بردار وزنی قطعیw با درجه‌ای در نامعادلات فازی فوق صدق می‌کند که از طریق تابع عضویت خطی زیر (بر حسب نرخ مجهول $\frac{w_i}{w_j}$) قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

$$\mu_{ij}(\frac{w_i}{w_j}) = \begin{cases} \dfrac{(w_i / w_j) - l_{ij}}{m_{ij} - l_{ij}}, & \dfrac{w_i}{w_j} \leq m_{ij} \\ \dfrac{u_{ij} - (w_i / w_j)}{u_{ij} - m_{ij}}, & \dfrac{w_i}{w_j} \geq m_{ij} \end{cases} \qquad (۲۱)$$

به منظور اجتناب از تقسیم بر صفر، فرض می‌شود $u_{ij} > m_{ij} > l_{ij}$ باشد که از لحاظ عملی محدودیتی ایجاد نمی‌کند. حل مسأله‌ی اولویت‌بندی فازی بر مبنای دو

1- Analytic Hierarchy Process.
2- Mikhailov and Tsvetinov.

فرض اصلی می‌باشد. اولین فرض نیازمند وجود ناحیه‌ی موجه فازی غیرتهی P بر روی ابر صفحه سیمپلکس $n-1$ بعدی $Q^{n-1}$ می‌باشد.

$$Q^{n-1}=\{(w_1,w_2,...,w_n),|w_i>0,\ \sum_{i=1}^{n}w_i=1\} \qquad (22)$$

تابع عضویت ناحیه‌ی موجه فازی P از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\mu_P(w)=\min_{ij}\{\mu_{ij}(w),\ i=1,2,...,n-1;\ \ j=2,3,...,n;\ j>i\} \qquad (23)$$

با تعریف توابع عضویت (۲۱) به‌عنوان مجموعه‌های فازی $L\{L=[-\infty,1]\}$، می‌توان فرض ناتهی بودن P برروی سیمپلکس را آزاد کرد. اگر قضاوت‌های فازی خیلی ناسازگار باشند، آن‌گاه $\mu_P(w)$ برای تمام بردارهای اولویت نرمال $w\in Q^{n-1}$ مقادیر منفی می‌گیرد. دومین فرض یک قاعده‌ی انتخاب مشخص می‌کند که یک بردار اولویت دارای بالاترین درجه‌ی عضویت در تابع عضویت تلفیقی (۲۳) را تعیین می‌کند. ثابت می‌شود که $\mu_P(w)$ یک مجموعه‌ی محدب است، بنابراین همیشه یک بردار اولویت $w^*\in Q^{n-1}$ وجود دارد که دارای ماکزیمم درجه‌ی عضویت $(\lambda^*)$ می باشد.

$$\lambda^*=\mu_P(w^*)=\max_{w\in Q^{n-1}}\min_{ij}\{\mu_{ij}(w)\} \qquad (24)$$

با در نظر گرفتن شکل خاص توابع عضویت، مسأله‌ی اولویت بندی ماکسی- مین فوق تبدیل به یک مسأله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی می‌شود.

(۲۵)

$$\begin{aligned}&\max\ \lambda\\ &\text{subject to:}\\ &(m_{ij}-l_{ij})\lambda w_j-w_i+l_{ij}w_j\le 0,\\ &(u_{ij}-m_{ij})\lambda w_j+w_i-u_{ij}w_j\le 0,\quad i=1,2,...,n-1,\ j=2,3,...,n,\ j>i,\\ &\sum_{k=1}^{n}w_k=1,\quad w_k>0,\ k=1,2,...,n,\end{aligned}$$

مثبت بودن $\lambda^*$ در جواب مدل فوق بیانگر سازگاری نسبی مجموعه قضاوت‌های فازی و مقدار منفی $\lambda^*$ نشان دهنده‌ی ناسازگاری قوی قضاوت‌هاست.

بـه منظـور جمـع‌آوری اطلاعـات مـرتبط بـا اهمیـت ضـرایب وزنـی تـابع هـدف، از عبارت‌های زبانی و اعداد فازی جدول ۱ استفاده شده اسـت. عـلاوه بـر ایـن، بـه‌منظـور افزایش دقت اطلاعات جمع‌آوری شده، از تصمیم‌گیری گروهی استفاده مـی‌شـود. چـون ممکن است نظرات افراد خبره با یکدیگر متفـاوت باشـد، مقایسـات نهـایی بایـد بیـانگر نظرات مختلف باشد. فرض کنید گـروه تصـمیم‌گیـری شـامل K عضـو اسـت و ارزیـابی تصمیم‌گیرنده‌ی k ام به صورت $\tilde{x}_{ijk} = (l_{ijk}, m_{ijk}, u_{ijk})$ موجود مـی‌باشـد. براسـاس تحقیق چن[1] و همکاران (۲۰۰۶)، تجمیع نظرات از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}), \quad l_{ij} = \min_k \{l_{ijk}\}, m_{ij} = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} m_{ijk}, u_{ij} = \max_k \{u_{ijk}\} \qquad (۲۶)$$

**جدول ۱- عبارت‌های زبانی و اعداد فازی جهت مقایسات زوجی ضرایب وزنی تابع هدف**

| عبارت زبانی | برابر | اهمیت ضعیف | اهمیت زیاد | اهمیت خیلی زیاد | اهمیت مطلق |
|---|---|---|---|---|---|
| عددفازی مثلثی | (۱،۱،۱) | (۱،۲،۳) | (۲،۳،٤) | (۳،٤،٥) | (٤،٥،٦) |
| معکوس عددفازی مثلثی | (۱،۱،۱) | (۱.۳،۱.۲،۱) | (۱.٤،۱.۳،۱.۲) | (۱.٥،۱.٤،۱.۳) | (۱.٦،۱.٥،۱.٤) |

منبع: یافته‌های تحقیق

## ارزیابی تأثیرات ریسک‌ها

به منظور اندازه‌گیری اثرات ریسک‌ها بر زمـان، هزینـه و کیفیـت پـروژه از ابزارهـای معروف ساختار شکست کار[2] (WBS) ، ساختار شکست هزینه[3] (CBS) و ساختار شکست کیفیت[4] (QBS) استفاده می‌شود. ساختار شکست کار علاوه بر برآورد زمـان، بـه‌عنـوان ابزاری برای برآورد منابع نیز استفاده می‌شود که از طریـق آن سـاختار شکسـت هزینـه قابل استخراج می‌باشد. در روش هزینه‌یابی متـداول (پـایین بـه بـالا)، بـا معلـوم بـودن

1- Chen.
2 - Work Breakdown Structure.
3 - Cost Breakdown Structure.
4 - Quality Breakdown Structure.

نرخ‌های واحد منابع، هزینه‌ی سطوح پایین، محاسبه و این فرایند تا بالاترین قسمت ادامه می‌یابد و از این طریق هزینه‌ی کل پروژه تعیین می‌شود.

برای تحلیل کیفی پروژه نیز می‌توان از ساختار شکست کار کمک گرفت. اگر ارزش وزنی کل کیفیت پروژه برابر عدد ثابتی (مثلا۱۰۰) فرض شود، این ارزش را می‌توان به کمک ساختار شکست کار از بالا به پایین به اجزای کوچک‌تری تقسیم کرد که به آن ساختار شکست کیفیت گویند. ساختار شکست کیفیت ممکن است نسبت به ساختار شکست کار جزئیات و سطوح بیش‌تری داشته باشد. در مدل پیشنهادی برای سادگی فرض شده است که ساختار شکست کار برای بررسی اثرات هزینه‌ای و کیفیتی قابل استفاده می‌باشد و جزئیات محاسبات می‌تواند از طریق ساختارهای شکست هزینه و کیفیت، انجام و نتیجه در ساختار شکست کار منعکس شود.

### *روش‌های حل مدل پیشنهادی*

در این قسمت به ۳ روش حل مدل پیشنهادی به شرح زیر می پردازیم.

### *روش شمارش صریح*

با توجه به‌این‌که تمام متغیرها از نوع صفر-یک می‌باشند، تمام حالت‌های ممکن $۲^A$ می‌باشد که A تعداد اقدامات است. برای انتخاب جواب بهینه، کافی است جواب‌های قابل قبول، بررسی و با توجه به تابع هدف بهترین آن‌ها انتخاب شود. این روش در عین سادگی تئوری، از نظر حجم محاسبات غیرکاراست و با اضافه شدن یک اقدام، تعداد حالت‌های ممکن ۲ برابر می‌شود. به‌عنوان نمونه برای مسأله‌ای با ۱۰ اقدام به محاسبه‌ی ۱۰۲۴حالت و برای ۳۰ اقدام به محاسبه‌ی بیش از یک میلیارد حالت نیاز می‌باشد.

### *روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی صفر-یک*

این روش‌ها عمدتا بر مبنای روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح می‌باشد که معروف‌ترین آن‌ها براساس الگوریتم شاخه و حد است. قدم انشعاب در این مسأله روشن است و در هر مرحله متغیر انشعاب باید به ۲ شاخه‌ی ۰ یا ۱ تقسیم شود. مسأله‌ی اصلی، محاسبه‌ی حد پایین هر زیر شاخه می‌باشد که بستگی به ساختار توابع f، g، h و

k دارد. در رابطه با آزمون‌های به عمق رسیدن نیز باید حداقل یکی از شرایط زیر برقرار باشد:

الف: مجموعه، فاقد جواب موجه باشد. ب: بهترین جواب زیر مجموعه از جواب فعلی بدتر باشد. ج: جواب بهینه‌ی زیر مجموعه به‌دست آمده باشد.

در مورد آزمون "الف"، محاسبات به‌طور عمده به ساختار محدودیت‌ها بستگی دارد که با توجه به خطی بودن توابع محدودیت‌ها، پیچیدگی چندانی وجود ندارد و می‌توان آزمون‌های برنامه‌ریزی صفر-یک (از جمله آزمون‌های مربوط به الگوریتم بالاس) را برای این مسأله توسعه داد. با این حال آزمون‌های "ب" و"ج" نیازمند بررسی خواص توابع f، g، h و k می‌باشند. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم دقیق از رابطه‌ی $O(2^A)$ به‌دست می‌آید.

### *روش‌های ابتکاری*

با توجه به حجم محاسبات بالا به ازای افزایش تعداد اقدامات در روش‌های دقیق، استفاده از روش‌های ابتکاری اجتناب ناپذیر می‌باشد، بنابراین در این قسمت دو الگوریتم ابتکاری جهت حل مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

### الگوریتم ابتکاری ساده

این الگوریتم هر اقدام پاسخ را به صورت جداگانه بررسی می‌کند و در صورتی که اجرای اقدام سبب کاهش TEL شود و در محدودیت‌های مدل صدق کند، این اقدام انتخاب می‌شود. اولویت انتخاب اقدامات براساس کاهش TEL می‌باشد. یعنی این‌که در ابتدا اقدامی بررسی می‌شود که بیش‌ترین میزان کاهش TELرا دارد. از مزایای این روش، سادگی آن می‌باشد، ولی مهم‌ترین عیب آن در نظر نگرفتن تأثیرات متقابل اقدام‌هاست، در حالی‌که در مسائل واقعی معمولا اقدامات بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند.

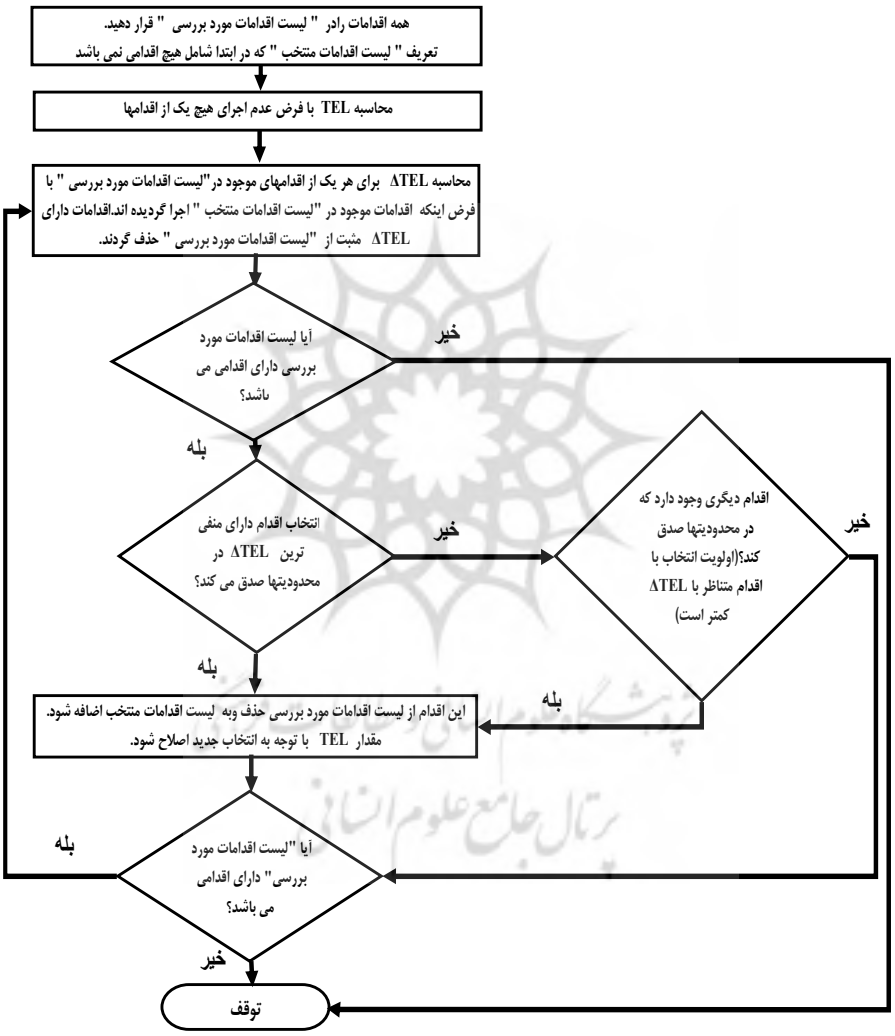
### الگوریتم ابتکاری حلقوی

شکل ۲، نمای کلی الگوریتم ابتکاری حلقوی را نمایش می‌دهد. مبنای انتخاب اقدام‌ها در الگوریتم ابتکاری حلقوی براساس بیش‌ترین کاهش TEL در اثر اجرای اقدام می‌باشد.

گام‌های این الگوریتم به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد:

گام صفر: در اولین تکرار هیچ اقدامی اجرا نمی‌شود (AAC=0) و اثرات اولیه‌ی ریسک‌ها یعنی $ETL_0$، $ECL_0$ و $EQL_0$ محاسبه می‌شود.

گام تکراری: به ازای انتخاب هر یک از پاسخ‌های اجرا نشده، احتمال و اثرات ریسک‌های سیستم در اثر اجرای اقدام مربوطه، اصلاح و با در نظر گرفتن هزینه‌ی اقدام مربوطه، مقدار کاهش TEL در اثر اجرای این اقدام محاسبه می‌شود. معیار انتخاب پاسخ براساس بیش‌ترین کاهشTEL می‌باشد.




منبع: یافته‌های تحقیق

**شکل ۲- نمای کلی الگوریتم ابتکاری حلقوی برای انتخاب اقدامات پاسخ‌گویی به ریسک‌ها**

با منظور کردن اجرای قطعی اقدام انتخاب شده، گام تکراری برای پاسخ‌های اجرا نشده تکرار می‌شود.

شرط توقف: الگوریتم وقتی متوقف می‌شود که به ازای انتخاب هیچ یک از پاسخ‌های انتخاب نشده، تابع هدف کاهش نیابد.

با اجرای فرایند فوق، یک لیست مرتب از اقدامات حاصل می‌شود. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم ابتکاری حلقوی از رابطه‌ی $O(A^3)$ به‌دست می‌آید.

## ۴- یافته های تحقیق

در این بخش، کاربرد مدل پیشنهادی در یک پروژه‌ی نیروگاهی سیکل ترکیبی ارائه می‌شود. شرکت توسعه‌ی برق ایران به‌عنوان کارفرما و گروه مپنا به‌عنوان پیمانکار عمومی می‌باشد. شرکت مپنا اجرای پروژه را به یکی از شرکت‌های تابعه (شرکت توسعه‌ی ۲) واگذار کرده است، ولی مسئولیت تأمین برخی از تجهیزات و مدیریت کلان پروژه بر عهده‌ی شرکت مپنا می‌باشد. شرکت توسعه‌ی ۲ نیز از پیمانکاران متعددی جهت اجرای پروژه استفاده می‌کند. چگونگی اجرای پروژه به صورت طراحی- تأمین تجهیزات – ساخت می‌باشد. جدول ۲ قسمتی از ساختار شکست کار پروژه را به همراه زمان، هزینه و کیفیت عناصر کاری نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که پروژه‌ی مورد بررسی بالغ بر ۳۰۰۰ فعالیت دارد که ساختار شکست کار ارائه شده در این جدول به‌صورت کلی و در راستای اهداف این تحقیق می‌باشد. به منظور محاسبه‌ی وزن کیفی عناصر کاری، وزن ۱۰۰٪ برای کل پروژه تعریف و سپس این وزن به کمک ساختار شکست کار به اجزای کوچک‌تری تقسیم شده است، به‌عنوان مثال، نسبت وزن کیفی عنصر کاری ۱.۶ به کل پروژه برابر ۱۱٪ می‌باشد.

**جدول ۲- قسمتی از ساختار شکست پروژه**

| کیفیت (٪) | هزینه (میلیون تومان) | زمان (هفته) | شرح فعالیت | کد فعالیت | کیفیت (٪) | هزینه (میلیون تومان) | زمان (هفته) | شرح فعالیت | کد فعالیت |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۱ | ۱۰۴۰۰ | ۳۰ | ساخت سایر تجهیزات توسط سازندگان داخلی | ۱،٤،۲ | ۱۰۰ | ٤۱۵۲۳ | ۱۹۲ | احداث نیروگاه سیکل ترکیبی | ۱ |
| ۷ | ۱۳۰۰ | ۱۰ | تحویل و حمل تجهیزات | ۱،٤،۳ | ٤ | ۱۱۸ | ٤ | انعقاد قرارداد بین کارفرما و مپنا | ۱،۱ |
| ۱٤ | ۸۷۲٦ | ٤۰ | عملیات ساختمان سازی | ۱،۵ | ۸ | ۷۸۵ | ۸ | تحویل سا یت توسط کارفرما به مپنا | ۱،۲ |
| ۱۱ | ۲۵۲۱ | ۲٤ | نصب تجهیزات | ۱،٦ | ۳ | ۷۳ | ۲ | تحویل زمین به همراه نقشه کلی نیروگاه | ۱،۲،۱ |
| ۷ | ۱٦۵۸ | ۱٦ | تست و راه اندازی | ۱،۷ | ۵ | ۷۱۲ | ٦ | تحویل امکانات (آب، برق، گاز،و...) | ۱،۲،۲ |
| ۹ | ۱٤۳۲ | ۲۰ | تحویل نیروگاه | ۱،۸ | ۱٦ | ۱٤۵۸ | ۲۸ | طراحی تجهیزات | ۱،۳ |
| ۲ | ۲۸۳ | ٤ | تحویل موقت نیروگاه به کارفرما/ بهره بردار | ۱،۸،۱ | ٤ | ۲۱۳ | ۵ | ارائه اطلاعات طراحی تجهیزات اصلی توسط کارفرما | ۱،۳،۱ |
| ۵ | ۸۲۸ | ۱۲ | بهره برداری آزمایشی | ۱،۸،۲ | ۱۲ | ۱۲٤۵ | ۲۳ | طراحی تجهیزات و قطعات توسط مپنا | ۱،۳،۲ |
| ۲ | ۳۲۱ | ٤ | تحویل نهایی | ۱،۸،۳ | ۳۱ | ۲٤۸۲۵ | ۵۲ | تأمین تجهیزات | ۱،٤ |
| | | | | | ۱۳ | ۱۳۱۲۵ | ۱۲ | تأمین تجهیزات اصلی توسط کارفرما | ۱،٤،۱ |

منبع: یافته‌های تحقیق

به منظور شناسایی ریسک‌های پروژه، ابتدا با مطالعات کتابخانه‌ای و جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از پروژه‌های مورد بررسی، ساختار مناسبی جهت شکست ریسک‌ها تهیه و سپس با استفاده از روش‌های مختلف (بررسی گسترده مطالعات مرتبط با شناسایی ریسک‌ها در داخل و خارج کشور، مطالعه سوابق و درس‌های آموخته در پروژه‌های قبلی، مصاحبه‌های متعدد با افراد متخصص و برگزاری جلسات طوفان فکری)، بیش از ۱۰۰ ریسک شناسایی شده است. از بین تمام ریسک‌های شناسایی شده، با

استفاده از روش‌های متداول ارزیابی ریسک، ۱۰ ریسک به‌عنوان ریسک‌های مهم تعیین شده است. این ریسک‌ها با R1تا R10 کدگذاری شده و شرح آن‌ها نیز در جدول (۳) آمده است.

**جدول ۳- ریسک‌های مهم**

| کد ریسک | شرح ریسک | کد ریسک | شرح ریسک |
|---|---|---|---|
| R1 | مشکلات ایجاد شده توسط معارضین | R6 | برآورد نامناسب احجام کاری |
| R2 | ایجاد اختلال درواگذاری امکانات (آب، برق و ...) به سایت | R7 | تخصص و مهارت نامناسب نیروی انسانی |
| R3 | اختلال در تأمین منابع مالی پروژه | R8 | عدم تطابق تجهیزات ارسالی با مدارک مهندسی تأیید شده |
| R4 | ارائه‌ی اطلاعات نامناسب طراحی توسط کارفرما | R9 | مدیریت مالی نامناسب توسط پیمانکاران فرعی |
| R5 | ایجاد اختلال درتأمین تجهیزات اصلی از خارج کشور | R10 | شرایط نامساعد جوی |

منبع: یافته‌های تحقیق

در مرحله‌ی بعد، ماتریس‌های احتمال وقوع رویدادهای ریسک و تأثیر رویدادهای ریسک بر زمان، هزینه و کیفیت عناصر کاری تعیین می‌شود. به منظور جمع‌آوری اطلاعات مربوط به ماتریس‌های احتمال و تأثیر، از قضاوت خبرگان براساس عبارت‌های زبانی (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) و اعداد فازی استفاده شده است. در این روش ابتدا عبارت‌های زبانی و اعداد فازی معادل جهت ارزیابی احتمال وقوع ریسک‌ها و تأثیرات ریسک‌ها (مطلوب و نامطلوب) تعریف و سپس با استفاده از میانگین اعداد فازی و مقادیر اسمی زمان، هزینه و کیفیت عناصر کاری، اعداد قطعی متناظر در ماتریس‌ها محاسبه شده است. به‌منظور خلاصه‌سازی، از ذکر جزئیات این محاسبات صرف‌نظر می‌شود. اطلاعات مورد نیاز ماتریس احتمال رویدادهای ریسک در جدول (۴) درج شده است. در این جدول، آب و هوا به‌عنوان یک منشاء خارجی تعریف و با E1 کدگذاری شده است. ماتریس‌های تأثیرات ریسک‌ها بر زمان، هزینه و کیفیت فعالیت‌ها در جداول (۵) تا (۷) نشان داده شده است. عناصر ماتریس تأثیر زمانی بر حسب هفته و

عناصرماتریس تأثیر هزینه بر حسب میلیون تومان می‌باشد. به‌عنوان نمونه، اگر ریسک R1 رخ دهد، سبب افزایش زمان عنصر کاری ۱. ۲ .۱ به اندازه‌ی ۶ هفته می‌شود. عناصر ماتریس کیفیت بر حسب درصد می‌باشد. به‌عنوان مثال براساس محاسبات مبتنی بر نظرات خبرگان، در صورت وقوع ریسک R6، کیفیت عنصر کاری ۶. ۱ به اندازه‌ی ۲۰٪ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر عنصر کاری ۶. ۱ دارای وزن کیفی ۱۱٪ در مقایسه با کل پروژه می‌باشد. بنابراین همان‌طور که جدول (۷) نشان می‌دهد، مقدار عنصر متناظر در ماتریس Q عبارت است از ۲.۲٪ = ۲۰٪×۱۱٪.

**جدول ۴- منشاء و احتمال وقوع رویدادهای ریسک**

| کد رویداد ریسک | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کد منشاء ریسک | ۱،۲،۱ | ۱،۲،۲ | ۱ | ۱،۳،۱ | ۱،٤،۱ | ۱،۱ | ۱،٥ | ۱،٤ | ۱،٥ | E1 |
| احتمال وقوع ریسک | ۰،۲٥ | ۰،٤۰ | ۰،۳۰ | ۰،۲۰ | ۰،٤۰ | ۰،٥۰ | ۰،۳٥ | ۰،۳۰ | ۰،٤٥ | ۰،۱٥ |

منبع: یافته‌های تحقیق

**جدول ۵- تأثیر رویدادهای ریسک بر زمان عناصر کاری (برحسب هفته)**

| رویداد ریسک | عناصرکاری | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۱،۱ | ۱،۲ | ۱،۲،۱ | ۱،۲،۲ | ۱،۳ | ۱،۳،۱ | ۱،۳،۲ | ۱،٤ | ۱،٤،۱ | ۱،٤،۲ | ۱،٤،۳ | ۱،٥ | ۱،٦ | ۱،۷ | ۱،۸ | ۱،۸،۱ | ۱،۸،۲ | ۱،۸،۳ |
| R1 | | | | ٦ | | | | | | | | | | | | | | | |
| R2 | | | | | ۸ | | | | | | | | | | | | | | |
| R3 | | | | | | | | ٥ | | ۹ | ۱۸ | ٤ | ۱۲ | | | | | | |
| R4 | | | | | | | | ٦ | | | | | | | | | | | |
| R5 | | | | | | | | | | ۱٤ | | | | | | | | | |
| R6 | | | | | | ۷ | | | ۹ | | | | ٥ | ۳ | | | | | |
| R7 | | | | | | | | | | | | | ۹ | | | | | | |
| R8 | | | | | | | | | | | | | | ۷ | ٥ | | | | ٤ |
| R9 | | | | | | | | | | | | | ۱۲ | | | | | | |
| R10 | | | | | ۲ | | | | | | | | ۱۰ | | | | | | |

منبع: یافته‌های تحقیق

**جدول ۶- تأثیر رویدادهای ریسک پرهزینه عناصر کاری (برحسب میلیون تومان)**

| رویداد ریسک | عناصرکاری | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۰ | ۱،۱ | ۱،۲ | ۱،۲،۱ | ۱،۲،۲ | ۱،۳ | ۱،۳،۱ | ۱،۳،۲ | ۱،۴ | ۱،۴،۱ | ۱،۴،۲ | ۱،۴،۳ | ۱،۵ | ۱،۶ | ۱،۷ | ۱،۸ | ۱،۸،۱ | ۱،۸،۲ | ۱،۸،۳ |
| **R1** | | | | ۱۵ | | | | | | | | | | | | | | | |
| **R2** | | | | | ۷۵ | | | | | | | | | | | | | | |
| **R3** | | | | | | | | | | ۳۱۰۰ | ۲۲۰۰ | ۲۳۰ | ٤۲۰ | | | | | | |
| **R4** | | | | | | | | ۱۶۰ | | | | | | | | | | | |
| **R5** | | | | | | | | | | ٤۱۰۰ | | | | | | | | | |
| **R6** | | | | | | ۲۵۰ | | | ۳٦۰۰ | | | | ۲۱۰۰ | ۱۱۰ | | | | | |
| **R7** | | | | | | | | | | | | | ۱۲۰۰ | | | | | | |
| **R8** | | | | | | | | | | | | | | ۳۷۰ | ۳۱۰ | | | | ۹۰ |
| **R9** | | | | | | | | | | | | | ۱۹۰۰ | | | | | | |
| **R10** | | | | | ۷ | | | | | | | | ۴۲۵ | | | | | | |

منبع: یافته‌های تحقیق

**جدول ۷- تأثیر رویدادهای ریسک بر کیفیت عناصر کاری (برحسب درصد)**

| رویداد ریسک | عناصرکاری | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۰ | ۱،۱ | ۱،۲ | ۱،۲،۱ | ۱،۲،۲ | ۱،۳ | ۱،۳،۱ | ۱،۳،۲ | ۱،۴ | ۱،۴،۱ | ۱،۴،۲ | ۱،۴،۳ | ۱،۵ | ۱،۶ | ۱،۷ | ۱،۸ | ۱،۸،۱ | ۱،۸،۲ | ۱،۸،۳ |
| **R1** | | | | | ۱،۵۰ | | | | | | | | | | | | | | |
| **R2** | | | | | | | | | | ۱،۹۰ | ۲،۲۰ | ۰،۷۰ | ۲،۸۰ | | | | | | |
| **R3** | | | | | | | | ۱۰۹۰ | | | | | | | | | | | |
| **R4** | | | | | | | | | | ۲،۷۰ | | | | | | | | | |
| **R5** | | | | | | ٤،۱۰ | | | ۷،۰۰ | | | | ۳،۰۰ | ۲،۲۰ | | | | | |
| **R6** | | | | | | | | | | | | | ۲،۸۰ | | | | | | |
| **R7** | | | | | | | | | | | | | | ٤،۰۰ | ۲،۳۰ | | | | |
| **R8** | | | | | | | | | | | | | ۳،۵۰ | | | | | | |
| **R9** | | | | | ۱،۲۰ | | | | | | | | ۲،۸۰ | | | | | | |
| **R10** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

منبع: یافته‌های تحقیق

سپس از طریق مصاحبه با خبرگان و مطالعه‌ی سوابق موجود در پروژه‌ها، اقدامات پیشنهادی جهت پاسخ‌گویی به ریسک‌ها تعیین شده است. این اقدامات به همراه هزینه‌های اجرای آن‌ها (بر حسب میلیون تومان) در جدول (۸) آمده است. در مرحله‌ی بعد اثرات اصلاحی اجرای این اقدامات تعیین و در جدول (۹) درج شده است. هر اقدام می‌تواند دارای چند تأثیر اصلاحی بر احتمال یا اثرات ریسک‌ها باشد. هر سطر این جدول متناظر یک اثر اصلاحی است و بیانگر برداری است که از آن برای اصلاح ستون مربوطه در ماتریس‌های P، T، C یا Q استفاده می‌شود. ستون‌های این ماتریس نیز متناظر با رویدادهای ریسک در سطرهای ماتریس‌های P، T، C و Q می‌باشد. همان‌گونه که قبلا نیز گفته شد، تابع احتمال و تأثیر کیفی اصلاح شده‌ی ریسک از طریق ضرب و توابع اثرات زمان و هزینه‌ی اصلاح شده‌ی ریسک از طریق مینیمم تعیین می‌شود. مقادیر اصلاحی اقدامات برای احتمال وقوع و تأثیر کیفی به‌عنوان ضرایبی است که در عناصر متناظر در ماتریس‌های P و Q ضرب می‌شود. مقادیر اصلاحی اقدامات برای تأثیر زمانی بر حسب هفته و برای تأثیر هزینه بر حسب میلیون تومان می‌باشد، به‌عنوان مثال، اقدام A2 دارای پنج اثر اصلاحی است. درصورت انتخاب این اقدام، هر اثر اصلاحی سبب تغییر یک ستون در ماتریس متناظر می‌شود. به‌عنوان نمونه، اثر اصلاحی A2-1 عنصر کاری ۱.۱ در ماتریس P را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این اثر اصلاحی سبب می‌شود که احتمال ریسک R6 به ۰.۴ مقدار فعلی کاهش یابد و احتمال وقوع اصلاحی برابر است با ۰.۲ =۰.۵×۰.۴. به‌عنوان یک مثال دیگر، اثر اصلاحی A2-2 عنصر کاری ۱.۴ را در ماتریس T تحت تأثیر قرار می‌دهد. این اثر اصلاحی سبب کاهش تأثیر زمانی ریسک ۶ بر روی عنصر کاری۱.۴ از مقدار فعلی ۹ هفته به مینیمم ۶ و ۹ می‌شود. در نتیجه مقدار اصلاحی متناظر در ماتریس T برابر ۶ هفته می‌باشد.

پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۸- اقدامات پیشنهادی کاهش ریسک و هزینه‌های مربوطه برحسب میلیون تومان

| کد اقدام | شرح اقدام | هزینه اقدام | کد اقدام | شرح اقدام | هزینه اقدام |
|---|---|---|---|---|---|
| A1 | بازنگری در زمانبندی تأمین تجهیزات اصلی بر اساس برنامه ریزی اقتضایی | ۷۰ | A8 | طراحی و برگزاری دوره های آموزشی و توجیهی برای پیمانکاران و کار فرما | ۱۲۵ |
| A2 | بازنگری در استانداردهای تدوین احجام کاری | ۲۰۰ | A9 | قرارداد با یک شرکت مشاور جهت بهبود طراحی تجهیزات | ٤۰۰ |
| A3 | کنترل دقیق مستندات طراحی | ۱۲۰ | A10 | بهبود فرآیند کنترل کیفیت در حین ساخت تجهیزات | ۱۵۰ |
| A4 | تهیه یک بانک اطلاعاتی جامع از تأمین کنندگان و پیمانکاران | ۱۰۰ | A11 | بازنگری در سیستم پرداختها به پیمانکاران فرعی | ۷۵ |
| A5 | تحقیق درباره اعتبار اسناد زمین و سایر موارد مرتبط با معارضین از قبیل راههای دسترسی به سایت | ۱۲ | A12 | افتتاح حساب مشترک بین پیمانکاران فرعی و مپنا | ۲۵ |
| A6 | جایگزینی برخی از تجهیزات خارجی با تجهیزات مشابه ساخت داخل | ۵۰۰ | A13 | افزایش تعامل با ارگانهای متولی خدمات عمومی | ۳۰ |
| A7 | بازنگری در سیستم مدیریت پروژه پیمانکاران فرعی | ٤۵ | A14 | اصلاح روشهای اجرایی و مدارک طراحی متناسب با شرایط جوی محل پروژه | ۲۹۰ |

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۹- تأثیرات اقدامات کاهش ریسک

| کد اقدام | نوع تاثیر | کد تاثیر | عنصر کاری | رویدادهای ریسک | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 |
| A1 | زمان | A1-1 | ۱،٤،۱ | | | | | ۹ | | | | | |
| | هزینه | A1-2 | ۱،٤،۱ | | | | | ۲٤۰۰ | | | | | |
| A2 | احتمال | A2-1 | ۱،۱ | | | | | | ۰،٤ | | | | |
| | زمان | A2-2 | ۱،٤ | | | | | | ٦ | | | | |
| | زمان | A2-3 | ۱،٥ | | | | | | ۳ | | | | |
| | هزینه | A2-4 | ۱،٤ | | | | | | ۱۷۰۰ | | | | |
| | هزینه | A2-5 | ۱،٥ | | | | | | ۱۳۰۰ | | | | |
| A3 | احتمال | A3-1 | ۱،٤ | | | | | | | | ۰،٦ | | |
| | زمان | A3-2 | ۱،٦ | | | | | | | | ٥ | | |
| | زمان | A3-3 | ۱،۷ | | | | | | | | ٤ | | |
| | هزینه | A3-4 | ۱،٦ | | | | | | | | ۲٤۰ | | |
| | هزینه | A3-5 | ۱،۷ | | | | | | | | ۱۹۰ | | |
| | کیفیت | A3-6 | ۱،٦ | | | | | | | | ۰،٥ | | |
| A4 | احتمال | A4-1 | ۱،٥ | | | | | | | ۰،٥ | | | |
| | احتمال | A4-2 | ۱،٥ | | | | | | | | | ۰،۹ | |
| A5 | احتمال | A5-1 | ۱،۲،۱ | ۰،٤ | | | | | | | | | |
| | زمان | A5-2 | ۱،۲،۱ | ۲ | | | | | | | | | |
| A6 | احتمال | A6-1 | ۱،٤،۱ | | | | | ۰،۸ | | | | | |
| | احتمال | A6-2 | ۱،٤ | | | | | | | | ۱،٥ | | |
| | کیفیت | A6-3 | ۱،٦ | | | | | | | | ۱،٥ | | |
| | کیفیت | A6-4 | ۱،۷ | | | | | | | | ۱،٤ | | |
| A7 | زمان | A7-1 | ۱،٥ | | | | | | ۲ | | | | |
| A8 | هزینه | A8-1 | ۱،٥ | | | | | | | ٥۰۰ | | | |
| | کیفیت | A8-2 | ۱،٥ | | | | | | | ۰،٤ | | | |
| A9 | احتمال | A9-1 | ۱،۳،۱ | | | | ۰،۷ | | | | | | |
| | کیفیت | A9-2 | ۱،٦ | | | | | | | | ۰،٦ | | |
| A10 | احتمال | A10-1 | ۱،٤ | | | | | | | | ۰،٦٥ | | |
| A11 | احتمال | A11-1 | ۱،٥ | | | | | | | | | ۰،۷ | |
| A12 | احتمال | A12-1 | ۱،٥ | | | | | | | | | ۰،٦ | |
| A13 | احتمال | A13-1 | ۱،۲،۲ | | ۰،٥ | | | | | | | | |
| | زمان | A13-2 | ۱،۲،۲ | | ٥ | | | | | | | | |
| | هزینه | A13-3 | ۱،۲،۲ | | ٥۰ | | | | | | | | |
| A14 | زمان | A14-1 | ۱،٥ | | | | | | | | | | ٦ |
| | هزینه | A14-2 | ۱،٥ | | | | | | | | | | ۱٤۰ |
| | کیفیت | A14-3 | ۱،٥ | | | | | | | | | | ۰،٤ |

منبع: یافته‌های تحقیق

در مرحله‌ی بعد، به منظور تعیین اهمیت نسبی اهداف پروژه، از سه متخصص جهت تشکیل تیم تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. هر یک از اعضای تیم، مقایسات زوجی خود را طبق جدول (۱) ارائه کرده‌اند. سپس اطلاعات براساس رابطه‌ی (۲۶) تجمیع و با استفاده از مقایسات تجمیع شده، مدل بهینه‌سازی (۲۵) از طریق نرم افزار لینگو حل شده است. مقایسات زوجی و وزن‌های حاصل در جدول (۱۰) آمده است. طبق محاسبات نرم افزار لینگو، مقدار $\lambda$ برای مقایسات زوجی برابر ۰.۹۹۳ است که بیانگر سازگاری قوی مقایسات می‌باشد.

**جدول ۱۰- ماتریس مقایسات زوجی اهمیت زمان، هزینه و کیفیت و وزن‌های حاصل از نرم افزار لینگو**

| | زمان | هزینه | کیفیت | وزن اهداف |
|---|---|---|---|---|
| زمان | ( ۱،۱،۱ ) | ( ۱.۳،۵.۶،۱ ) | ( ۱.٤،۱۷.۱۸،۳ ) | ۰،۳۰۷ |
| هزینه | ( ۱،٤.۳،۳ ) | ( ۱،۱،۱ ) | ( ۱.۳،۷.۶،۳ ) | ۰،۳۷۱ |
| کیفیت | ( ۱.۳،۱۱.۶،٤ ) | ( ۱.۳،۷.۶،۳ ) | ( ۱،۱،۱ ) | ۰،۳۲۲ |

$\lambda$=0.993

منبع: یافته‌ها و محاسبات تحقیق

در نهایت، با تکمیل اطلاعات مورد نیاز، اقدامات مناسب براساس مدل پیشنهادی انتخاب شده است. جدول (۱۱)، اقدامات کاهش ریسک را به ترتیب انتخاب توسط روش ابتکاری حلقوی نمایش می‌دهد. مقادیر منفی برای بهبود در زیان کل بیانگر آن است که انتخاب اقدام منجر به افزایش تابع هدف می‌شود. برطبق اطلاعات جدول (۱۱)، الگوریتم ابتکاری حلقوی اقدامات ۲، ۱، ۱۲، ۳، ۴، ۱۳، ۱۱، ۵، ۸ و ۱۰ را انتخاب می‌کند که در نتیجه ٪-۴۲.۶ =TEL، ۹۰۷۰۰۰۰۰ =AAC تومان، ETL=۳۱،۱٤ هفته، ECL=٤۰۰٦۲۸۰۰۰۰ تومان و EQL=۹،۱۹% به‌دست می‌آید. شکل (۳)، تغییرات TEL را به همراه اجزای آن در طی تکرارهای مختلف الگوریتم ابتکاری حلقوی نمایش می‌دهد. محور افقی نشان دهنده‌ی ترتیب انتخاب اقدامات توسط الگوریتم ابتکاری حلقوی می‌باشد. در شروع فرایند برنامه‌ریزی هیچ اقدامی انتخاب نشده است و این استراتژی منجر به نتایج زیر می‌شود:

AAC=0 تومان، $ETL=ETL_0$=۵۳.۰۵ هفتـه، $ECL=ECL_0$=۸۱۰۱۰۰۰۰۰۰ تومـان، $EQL=EQL_0$=۱۷.۵٤% ،TEL=۰%

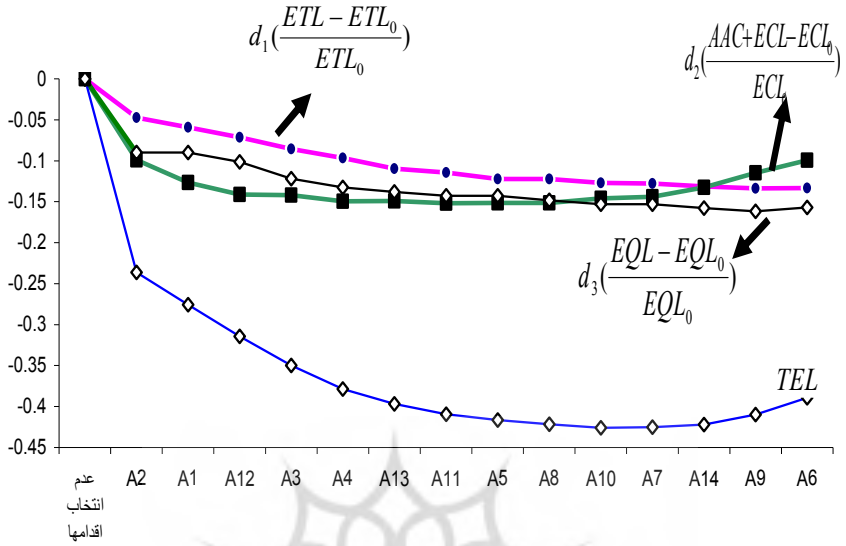
در هر تکرار الگوریتم، در اثر اجرای اقدامات، AAC افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در اثر اصلاح ماتریس‌های احتمال وقـوع و تـأثیر ریسـک‌هـا، مقـادیر ETL، ECL و EQL کاهش می‌یابد. با این‌حال، گاهی اوقات ممکن است انتخاب اقدامات منجـر بـه افـزایش برخی از این مقادیر شود. شکل (۳)، نشان می‌دهد که حداقل زیان کل مـورد انتظـار در تکرار دهم الگوریتم ابتکاری حلقوی رخ می‌دهد که در آن اقدام A10 انتخاب شده است. این نتایج بیانگر آن است که با اجـرای روش پیشـنهادی انتظـار مـی‌رود زیـان کـل بـه اندازه‌ی ۴۲.۶٪ کاهش یابد. از سوی دیگر، طبق رابطه‌ی زیر، اثرات نامطلوب مورد انتظار پر هزینه‌ی پروژه (با احتساب هزینه‌ی اجرای اقـدامات) بـه مقـدار ۳۱۸۷۷۲۰۰۰۰ تومـان کاهش می‌یابد.

( ٤۰۰٦۲۸۰۰۰۰+ ۹۰۷۰۰۰۰۰۰ )- ۸۱۰۱۰۰۰۰۰۰ = - ۳۱۸۷۷۲۰۰۰۰

علاوه بر این، اثرات نامطلوب مورد انتظار بر زمان پروژه بـه میـزان ۲۱.۹۱ (۵۳.۰۵-۳۱.۱۴) هفته کاهش می‌یابد. در نهایت، با اجرای نتایج الگـوریتم انتظـار مـی‌رود اثـرات نامطلوب بر کیفیت پروژه به اندازه‌ی ۸.۳۵٪ (۱۷.۵۴٪- ۹.۱۹٪) کاهش یابد. بـه عبـارت دیگر، با اجرای روش پیشنهادی، انتظار می‌رود اثرات نامطلوب بر زمان پروژه به‌انـدازه‌ی ۴۱.۳٪ (۲۱.۹۱/۵۳.۰۵)، اثـرات نـامطلوب بـر هزینـه‌ی پـروژه بـه انـدازه ۳۹.۳٪ (۳۱۸۷۷۲۰۰۰۰/۸۱۰۱۰۰۰۰۰۰) و اثرات نامطلوب بر کیفیـت پـروژه بـه انـدازه ۴۷.۶٪ (۱۷.۵۴ /۸.۳۵)، کاهش یابد.

**جدول ۱۱- بهبود زیان کل مورد انتظار به‌ازای هر اقدام انتخابی**

| کد اقدام | A2 | A1 | A12 | A3 | A4 | A13 | A11 | A5 | A8 | A10 | A7 | A14 | A9 | A6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| بهبود درزیان کل | ۰٫۲۳۶۱ | ۰٫۰۳۹۵ | ۰٫۰۳۸۶ | ۰٫۰۳۵۵ | ۰٫۰۲۹۱ | ۰٫۰۱۷۸ | ۰٫۰۱۲۷ | ۰٫۰۰۷۱ | ۰٫۰۰۵۳ | ۰٫۰۰۴۳ | -۰٫۰۰۰۹ | -۰٫۰۰۳۲ | -۰٫۰۱۲۰ | -۰٫۰۲۰٤ |




منبع: یافته‌های تحقیق

**شکل ۳- تغییر زیان کل مورد انتظار و اجزای آن در هر تکرار روش ابتکاری حلقوی**

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پیشرفت اقتصادی در کشورهای در حال توسعه مانند کشور ایران نیازمند انجام پروژه‌های زیر بنایی از جمله نیروگاه می‌باشد. به‌این منظور پروژه‌های نیروگاهی زیادی در کشور در حال اجرا هستند. انجام این تحقیق در راستای تحقق مدیریت ریسک مناسب در این پروژه‌ها می‌باشد که می‌تواند نقش قابل توجهی در رسیدن این پروژه‌ها به اهداف تعیین شده داشته باشد. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که تا کنون ابزارها و تکنیک‌های معدودی در زمینه‌ی ارزیابی و انتخاب اقدامات پاسخ‌گویی به ریسک‌ها ارائه شده است و هنوز کمبودهای قابل توجهی در این بخش وجود دارد. در راستای برطرف کردن برخی کمبودها ی موجود، در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود که هدف آن حداقل سازی زیان کل مورد انتظار (شامل هزینه‌ی اجرای اقدام‌ها و اثرات نامطلوب مورد انتظار ریسک‌ها بر اهداف پروژه) می‌باشد. برخی از جنبه‌های قابل ذکر تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

- برقراری ارتباط مشخص بین عناصر کاری، رویدادهای ریسک، اقدامات کاهش ریسک، ریسک‌های ثانویه و تأثیرات آن‌ها
- در نظر گرفتن معیارهای کلیدی مؤفقیت پروژه‌ها (زمان، هزینه و کیفیت) در ارزیابی و انتخاب اقدامات کاهش ریسک
- توسعه‌ی مبانی ریاضی مدل سازی و روش حل دقیق جهت ارزیابی و انتخاب پاسخ‌های ریسک‌ها
- ارائه‌ی روش‌های ابتکاری کارا جهت حل مدل پیشنهادی
- استفاده از منطق فازی در ارزیابی پاسخ ریسک‌ها جهت تطابق بیش‌تر با دنیای واقعی
- در نظر گرفتن ترجیحات مختلف تصمیم‌گیرندگان به صورت نظام‌مند از طریق یک مدل ریاضی در شرایط فازی
- محاسبه‌ی شاخص سازگاری مقایسات زوجی در شرایط فازی

نتایج کاربرد مدل در مطالعه‌ی موردی بیانگر آن است که با اجرای روش پیشنهادی انتظار می‌رود زیان کل به اندازه‌ی ۴۲.۶٪ و اثرات نامطلوب مورد انتظار بر هزینه‌ی پروژه (با احتساب هزینه‌ی اجرای اقدامات) به اندازه‌ی ۳۹.۳٪ کاهش یابد. علاوه بر این، اثرات نامطلوب مورد انتظار بر زمان پروژه به اندازه‌ی ۴۱.۳٪ و اثرات نامطلوب بر کیفیت پروژه به اندازه‌ی ۴۷.۶٪ کاهش می‌یابد. یکی از نکات قابل ذکر در خروجی مدل، توجه به سهم واقعی هزینه‌ی اقدامات کاهش ریسک در هر پروژه می‌باشد. در حال حاضر گروه مپنا مشغول اجرای پروژه‌های نیروگاهی متعددی می‌باشد و قراردادهای دیگری نیز برای احداث نیروگاه در آینده منعقد کرده است. در مدل پیشنهادی، هزینه‌ی پاسخ‌های ریسک برای یک پروژه‌ی خاص در نظر گرفته شده است، با این حال در صورت اجرای برخی اقدامات کاهش ریسک در یک پروژه، می‌توان این اقدامات را با هزینه‌ی بسیار کم‌تری (و گاهی اوقات بدون هزینه) برای پروژه‌های آتی استفاده کرد. نمونه‌ای از این اقدام‌ها شامل" بازنگری در تدوین استانداردهای احجام کاری"، "تهیه‌ی یک بانک اطلاعاتی جامع از تأمین‌کنندگان و پیمانکاران"، "بازنگری در سیستم پرداخت‌ها به پیمانکاران فرعی" و "طراحی و برگزاری دوره‌های آموزشی و توجیهی برای پیمانکاران و کارفرما" می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، بهبود واقعی در تأثیرات نامطلوب هزینه‌ای بیش‌تر از ارقام ذکر شده در خروجی مدل می‌باشد. بر طبق نظر مدیران و

کارشناسان پروژه‌های مورد بررسی، تحقیق حاضر بستر مناسبی را برای مدیریت ریسک‌ها در پروژه‌های نیروگاهی فراهم آورد و با تغییرات جزئی می‌توان مدل را در سایر پروژه‌های نیروگاهی گروه مپنا پیاده‌سازی کرد.

در تحقیقات آتی می‌توان از سایر روش‌های دقیق (مانند برنامه‌ریزی پویا) و روش‌های فرا ابتکاری برای حل مدل و مقایسه با روش‌های پیشنهادی در این تحقیق استفاده کرد. در نظر گرفتن برخی فرضیات اضافی (مانند تأثیرات متقابل ریسک‌ها و ریسک‌پذیر یا ریسک گریز بودن تصمیم‌گیرندگان) نیز می‌تواند در آینده بررسی شود. توسعه‌ی مدل در سایر پروژه‌های زیربنایی نیز می‌تواند به‌عنوان یک موضوع تحقیقاتی مطرح باشد. علاوه براین، ایجاد نرم افزاری جهت انجام محاسبات در شبکه‌های پیچیده براساس مدل پیشنهادی به‌عنوان یک موضوع تحقیقی پیشنهاد می‌شود.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از گروه مپنا به دلیل حمایت‌های مالی و فنی از این تحقیق، براساس قرارداد پژوهشی RD-87-09، قدردانی می‌کنند.

## فهرست منابع

هاتفی، محمد علی "توسعه‌ی مدل یکپارچه‌ی ریسک پروژه‌ها با رویکرد طراحی معماریDSS"، رساله‌ی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران، به راهنمایی دکتر سید حسینی، ۱۳۸۶.

Ben-David, I. and Raz, T. (2001). An Integrated Approach to Risk Response Development in Project Planning. Journal of the Operational Research Society, 52(1), 14-25.

Ben-David, I., Rabinowitz, G. and Raz, T. (2002). Economic Optimization of Project Risk Management Efforts. Project Risk Management Optimization, 1, 1-10.

Boehm, B.W. (1991). Software Risk Management: Principles and Practices. IEEE Software, 8, 32-41.

Chapman, C. B. (1979). Large Engineering Project Risk Analysis. IEEE Transaction on Engineering Management, 26, 78-86.

Chapman, C.B. and Ward, S.C. (1997). Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights. Chichester, John Wiley and Sons.

Chapman, C.B. and Ward, S.C. (2003). Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights. Second Edition, Chichester, John Wiley and Sons.

Chen, C.T., Lin, C. T. and Huang, S. F. (2006). A Fuzzy Approach for Supplier Evaluation and Selection in Supply Chain Management. International Journal of Production Economics, 102, 289-301.

Cho, H.N., Choi, H. H. and Kim, Y.B. (2002). A Risk Assessment Methodology for Incorporating Uncertainties using Fuzzy Concepts. Reliability Engineering and System Safety, 78, 173-183.

Cooper, D.F., Grey, S., Raymond, G. and Walker, P. (2005). Project Risk Management Guidelines: Management Risk in Large Projects and Complex Procurements. Chichester, John Wiley and Sons.

Datta S. and Mukherjee S.K. (2001). Developing a Risk Management Matrix for Effective Project Planning: An Empirical Study. Project Management Journal, 32(2), 45-57.

Department of Energy (U.S. DoE) (2005). The Owner's Role in Project Risk Management. ISBN: 0-309-54754-7.

Elkjaer, M. and Felding, F.(1999). Applied Project Risk Management: Introducing the Project Risk Management Loop of Control. Project Management, 5(1), 16-25.

Haimes, Y. (2004). Risk Modeling, Assessment, and Management. Second Edition, New York, John Wiley and sons.

Hillson, D. (1999). Developing Effective Risk Response. Proceeding of the 30th Annual Project Management Institute, Seminar and Symposium, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

Hillson, D. (2001). Effective Strategies for Exploiting Opportunities. Proceedings of the Project Management Institute Annual Seminars and Symposium, Nashville, Tenn., USA.

Kerzner H. (2003). Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. Eighth Edition, New York, Wiley.

Klein, J. H. (1993). Modeling Risk Trade-off. Operational Research Society, 44, 445-460.

Klein, J. H., Powell P.L. and Chapman, C.B. (1994). Project Risk Analysis based on Prototype Activities. Operational Research Society, 45, 749-757.

Kujawski E. (2002). Selection of Technical Risk Responses for Efficient Contingencies. Systems Engineering, 5(3), 194-212.

Lee, E., Park, Y. and Shin J. G. (2009). Large Engineering Project Risk Management using a Bayesian Belief Network. Expert Systems with Applications, 36, 5880-5887.

Mikhailov L. and Tsvetinov, P. (2004). Evaluation of Services using a Fuzzy Analytic Hierarchy Process. Applied Soft Computing, 5, 23-33.

Miler, J. (2005). A Method of Software Project Risk Identification and Analysis. PhD Thesis, Gdansk University of Technology, Faculty of Electronics, Telecommunications and Informatics.

Miller, R. and Lessard, D. (2001). Understanding and Managing Risks in Large Engineering Projects. International Journal of Project Management, 19, 437-443.

Morote, A. N. and Vila, F.R. (2011). A Fuzzy Approach to Construction Project Risk Assessment. International Journal of Project Management, 29, 220-231.

Piney,C. (2002). Risk Response Planning: Select the Right Strategy. Fifth Project Management Conference, France.

Pipattanapiwong, J. (2004). Development of Multi-Party Risk and Uncertainty Management Process for an Infrastructure Project. PhD Thesis, Kochi University of Technology.

PMI (Project Management Institute), (2008). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). Fourth Edition, Pennsylvania.

Popa E. M. and Marcut I.G. (2008). ASM and Evolutionary Algorithm for Economic Optimization of Project Risk Management. 9th WSEAS International Conference on Evolutionary Computing, Sofia, Bulgaria.

Saari, H.L. (2004). Risk Management in Drug Development Projects. A Report by Helsink University of Technology, Laboratory of Industrial Management.

Seyedhoseini, S. M., Noori, S. and Hatefi, M. A. (2009). An Integrated Methodology for Assessment and Selection of the Project Risk Response Actions. Risk Analysis, 29(5), 752-763.

Yu, C.S. (2002). A GP-AHP Method for Solving Group Decision-making Fuzzy AHP Problems. Computers and Operations Research, 29, 1969-2001.