

بهینه‌یابی تخصیص ریسک در پروژه‌های ساخت؛ با الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان (ACO)

گرشاسب خزان‌ی (دکتری)

مصطفی خاززادی* (استادیار)

عباس افشار (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوره‌ی ۲-۱۳۹، شماره‌ی ۳، ص. ۶۱-۶۹

هدف از تخصیص ریسک، انتقال ریسک‌ها به توانمندترین عامل و تفاهم برای تسهیم متناسب سود قرارداد است. با توجه به تأثیر تخصیص ریسک بر زمان و هزینه‌ی تمام‌شده‌ی پروژه، انتخاب مناسب‌ترین تخصیص ریسک‌ها برای کارفرما اهمیتی حیاتی دارد. در این نوشتار، برای اولین بار انتخاب مناسب‌ترین تخصیص ریسک‌های پروژه، در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌یابی به صورت کمی مدل‌سازی شده است. مدل بهینه‌ی پیشنهادی با هدف دستیابی به بالاترین اطمینان در کسب اهداف پروژه با کمترین هزینه‌ی ممکن، یک پارامتر تصمیم‌گیری (سود هر عامل برای پذیرش ریسک) را تعریف کرده و یک مدل بهینه‌یابی را براساس الگوریتم جامعه‌ی مورچگان توسعه داده است. همچنین آنالیز حساسیت مدل، می‌تواند بهترین سناریوی ممکن در ارائه‌ی ضمانت‌های مالی را توصیه کند. قابلیت مدل پیشنهادی با پیاده‌سازی آن برای یک پروژه‌ی موردی نیز نمایش داده شده است.

واژگان کلیدی: تخصیص ریسک، مدیریت ریسک، بهینه‌یابی، الگوریتم مورچگان (ACO).

مقدمه

تنظیم یک قرارداد به معنای تعیین مسئولیت‌ها و نقش عوامل یک پروژه‌ی ساخت (کارفرما، پیمانکار، مشاور و...) در قبال ریسک‌های پروژه است و از این لحاظ قرارداد را ابزار تخصیص ریسک دانسته‌اند.^[۱] هدف در تخصیص ریسک، تعریف و تقسیم سود و زیان‌های محتمل، به منظور تعیین مسئولیت برای شرایط احتمالی است که براساس برنامه‌ریزی انجام‌شده نباید اتفاق بیفتد.^[۲] لذا تخصیص ریسک در هر قرارداد می‌تواند تأثیر عمده‌ی بر هزینه، زمان و کیفیت پروژه داشته باشد. براساس یافته‌های اداری فدرال بزرگراه‌های امریکا، عمده‌ترین دلیل ایجاد دعاوی در قراردادهای ساخت در ایالات متحده تخصیص نامناسب ریسک‌هاست.^[۱] به همین دلیل حجم عمده‌ی زمان و هزینه‌ی صرف‌شده برای فرایند مذاکرات و مناقصه در فاز توسعه‌ی یک پروژه، مربوط به شناسایی چگونگی تخصیص ریسک‌ها و متناسب با آن تعیین سود طرفین قرارداد است.^[۳]

در فرایند تخصیص ریسک به‌طور سنتی، کارفرمایان تمایل دارند که تمامی ریسک‌ها را به پیمانکاران منتقل کنند؛^[۴] ولی باید در نظر داشت که رویکرد یک جانبه در تخصیص ریسک موجب می‌شود در مقابل پیمانکار یک سری راهکارهای تدافعی اتخاذ کند،^[۵] که نهایتاً موجب افزایش هزینه‌ها، تأخیر در پروژه، و عدم دستیابی به ارزش افزوده‌ی موردنظر برای کارفرما می‌شود.^[۶] علاوه بر این، تخصیص نامناسب

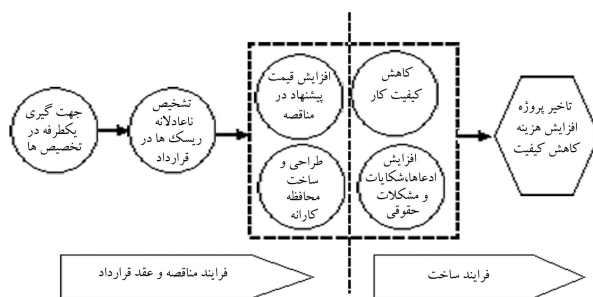
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۴/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۰/۸/۷، پذیرش ۱۳۹۰/۱۰/۱۷.

gkhasayeni@iust.ac.ir
khanzadi@iust.ac.ir
a.afshar@iust.ac.ir

ریسک‌ها هزینه‌های پنهان دیگری (شامل: عدم امکان شرکت در مناقصه، افزایش احتمال دعاوی و مشکلات حقوقی و بیش از همه روابط تیره‌ی کارفرما و پیمانکار) را می‌تواند به کارفرما تحمیل کند.^[۷] نتایج یک تحقیق در قراردادهای کشورکانادا نشان می‌دهد که تخصیص یک‌جانبه‌ی ریسک (از طریق الزامات قراردادی) می‌تواند ۹ تا ۱۹ درصد قیمت مناقصه را، بسته به نوع ریسک، افزایش دهد.^[۸] نمودار ۱، مشکلات ناشی از تخصیص نامناسب ریسک در یک پروژه را در ۳ فاز: مناقصه، عقد قرارداد، و فاز ساخت نمایش می‌دهد.^[۷]

تخصیص مناسب ریسک در یک پروژه باید مشخص کند که کدامین عامل مدیریت چه ریسکی را عهده‌دار شود، یا در مقابل تعیین کند که چه مشوق‌ها و ضمانت‌هایی به پیمانکار اعطا شود. این چهارچوب باید هر ریسک شناسایی‌شده در یک پروژه را به عملی که بیشترین کنترل را بر آن ریسک دارد، اختصاص دهد تا بدین وسیله تضمین کند که آن ریسک به وقوع نمی‌پیوندد یا در صورت وقوع کمترین تأثیر محتمل را خواهد داشت.^[۱] علی‌رغم آنکه شناسایی مناسب‌ترین الگوی تخصیص ریسک در یک پروژه، موضوع بسیاری از تحقیقات در سال‌های اخیر بوده است؛^[۱۲-۹] ولی عموم این تحقیقات، بهترین عامل برای پذیرش ریسک را در تطابق آن با یک سری اصول ثابت،^[۱۱] و یا با ارائه‌ی چهارچوبی استاتیک با پرسش از خبرگان مورد شناسایی قرار داده‌اند.^[۹] ولی در عمل، پویایی پروژه‌های ساخت ایجاد می‌کند که تصمیم‌گیرندگان به مدلی دسترسی داشته باشند که با مدل‌سازی فرایند حقیقی تخصیص ریسک، بتواند به صورت کمی اهداف کارفرما را از تخصیص



نمودار ۱. نتایج تخصیص نامناسب برای کارفرما. [۷]

تمایل به یک عامل،^[۱۱] و یا خطا در قضاوت‌های مشخص می‌تواند انحراف جدیدی در نتایج خروجی ایجاد کند.^[۱۲] وقتی این مسئله حساس‌تر می‌شود که بدانیم بین عوامل پروژه در ارتباط با نحوه‌ی مناسب تسهیم ریسک‌ها و یا آنکه چه عاملی کدامین ریسک را تحمل کند، تضادی جدی وجود دارد؛^[۱۳] و این می‌تواند بر نظرات خیرگان، بسته به آنکه دارای چه پیش‌زمینه‌ی (کارفرما یا پیمانکار) هستند، مؤثر باشد.^[۱۴]

دسته‌ی دوم از پژوهشگران،^[۱۵] اقدام به تحلیل کیفی تخصیص ریسک‌ها، و تعریف و پیشنهاد اصولی برای آن‌ها کرده‌اند تا به این وسیله دامنه‌ی واگرایی نظرات متخصصان را محدود و تفاهم بین طرفین قرارداد را ممکن سازند. ولی نکته‌ی که آن‌ها در نظر نگرفته‌اند آن است که عملاً مقادیر ریسک‌های مشخص در پروژه‌های متمایز، ثابت نیست و مکانیسم تخصیص ریسک باید این تغییرات را نشان دهد.^[۱۶] در سال ۲۰۰۷، در تکمیل کارهای قبلی، یک مدل کمی بر مبنای قواعد فازی برای فرایند تخصیص ریسک ارائه شد که در آن از اصول تخصیص ریسک در قالب قواعدی معین، برای ساخت مدل کمی بهره گرفته شده است.^[۱۷] استفاده از این مدل نیازمند پاسخ به هفت قاعده‌ی مختلف برای هر ریسک خواهد بود. این روند علاوه بر دشواری و زمان‌بری آن در یک پروژه‌ی بزرگ با چندین عامل متفاوت؛ به علت آنکه محدودیت توان هر عامل برای پذیرش، میزان محدودی از ریسک‌ها را در نظر نگرفته است؛ منجر به نتایجی غیرمتعادل شده و زمینه‌ی برای افزایش ادعاهای قراردادی به وجود می‌آورد. لذا نیاز به مدلی است که به صورت کمی و براساس یک پارامتر تصمیم ملموس و کاربردی، الگوی بهینه‌ی تخصیص ریسک را پیشنهاد دهد و بتواند تغییرات در ارزش ریسک‌ها را در پروژه‌های متفاوت منعکس کند.

در این نوشتار، برای اولین بار، تخصیص ریسک به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی طرح و مدل‌سازی شده است. این روش ۲ مزیت عمده را برای تصمیم‌گیرندگان در یک مسئله‌ی تخصیص ریسک قرارداد در بر خواهد داشت: ۱. برخلاف روش‌های قبلی که مبتنی بر یک سری اصول فرض شده و قضاوت افراد بوده‌اند، در این روش معیار تصمیم‌گیری پارامتری قابل لمس و منطبق با معیارهای واقعی است که در روند مذاکرات تخصیص ریسک توسط کارفرما و پیمانکارانش مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا در انتها کارفرما می‌تواند میزان دست‌یابی به اهداف پروژه را براساس خروجی مدل اندازه‌گیری کند؛ ۲. برخلاف روش‌های موجود که محدود به تخصیص ریسک بین کارفرما و پیمانکار بوده‌اند، تعریف مدل در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌یابی امکان مدل‌سازی و تهیه‌ی نرم‌افزارهای تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند، که در نتیجه فرایند تصمیم‌گیری سرعت و قابلیت تعمیم بیشتری خواهد داشت. اهمیت این مسئله وقتی بیشتر درک می‌شود که در یک پروژه‌ی کلان، نیاز به تصمیم‌گیری برای تخصیص تعداد بالایی از ریسک‌ها بین چندین عامل متفاوت باشد (مانند پروژه‌ی موردی که در این نوشتار بررسی شده است)، در این صورت پیچیدگی و عدم قطعیت بالای تصمیم‌گیری می‌تواند منجر به طولانی شدن زمان تصمیم‌گیری و حتی غیر قابل حل بودن آن شود.

برای مدل‌سازی فرایند تخصیص ریسک در یک الگوریتم بهینه‌یابی، ابتدا براساس اهداف تصمیم‌گیرندگان روند تصمیم‌گیری در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌یابی مدل‌سازی شده است. سپس با تعیین اهداف و محدودیت‌های تصمیم‌گیری کارفرما در روند مذاکرات تخصیص ریسک، مسئله‌ی بهینه‌یابی برای تخصیص ریسک تعریف می‌شود. با داشتن پارامتر تصمیم، می‌توان پارامترهای مسئله‌ی بهینه‌یابی را فرموله و روابط ریاضی موردنیاز را تعیین کرد. برای یافتن بهترین الگوی تخصیص ریسک، مدلی خاص بر مبنای الگوریتم جامعه‌ی مورچگان طراحی شده است.

ریسک‌ها اندازه‌گیری و تغییرات در ارزش ریسک‌ها را در پروژه‌های متفاوت منعکس کند.

هدف از این نوشتار، ارائه‌ی یک مدل کمی برای شناسایی الگوی بهینه‌ی تخصیص ریسک در پروژه‌های ساخت است. در این نوشتار، برای اولین بار مسئله‌ی تخصیص ریسک در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌یابی فرموله و مدلی کمی برای بهینه‌یابی تخصیص ریسک ارائه شده است. مدل پیشنهادی با تعریف یک پارامتر تصمیم کاربردی و ملموس در قالب «سود درخواستی هر عامل برای پذیرش یک ریسک»، الگوی بهینه‌ی تخصیص ریسک‌ها را به نحوی تعیین می‌کند که کمینه‌ی قیمت تمام‌شده برای پروژه به دست آید. کارفرما با دست‌یابی به الگوی تخصیص توصیه‌شده توسط این مدل، می‌تواند نحوه‌ی تقسیم منافع پروژه و سهم سود هر عامل را مشخص سازد. این مدل با استفاده از الگوریتم مورچگان (ACO)^۲ فرموله شده و در فضای نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده و در انتها قابلیت و توانایی آن با حل یک پروژه‌ی موردی نمایش داده شده است.

این مدل قابلیت انعطاف‌پذیری کافی برای پوشش پویایی ناشی از تغییرات در ریسک‌های شناسایی شده یا برآورد ارزش آن‌ها پس از فاز ارزیابی را دارد و روشی نظام‌مند را پیشنهاد می‌دهد که براساس اصول تخصیص ریسک و با تعریف متغیرهایی مستقل، امکان تصمیم‌گیری برای کارفرما در مورد نحوه‌ی مناسب تخصیص ریسک‌ها را فراهم می‌سازد. در حالتی که کارفرما قصد دارد گزینه‌های متفاوت از ضمانت‌های ممکن و با صرفه را برای تشویق پیمانکار بیازماید، ابزار تحلیل حساسیت این مدل می‌تواند کمک بزرگی برای او باشد.

بهینه‌یابی تخصیص ریسک‌ها

مسئله‌ی یافتن تخصیص ریسک مناسب برای یک پروژه در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است.^[۱۸-۱۹] دسته‌ی اول از پژوهشگران،^[۱۹] با مراجعه به نخبگان مستقیماً گزینه‌ی مناسب برای کنترل ریسک‌ها را از متخصصان سؤال کرده‌اند و جمع‌بندی این پرسش‌نامه‌ها را به‌منزله‌ی مناسب‌ترین تخصیص ریسک ارائه داده‌اند. مدل‌های ارائه‌شده در این دسته تحقیقات، عملاً یک چهارچوب ایستا برای تسهیم ریسک‌ها بین عوامل پروژه در قالب یک جدول تخصیص ریسک ارائه داده‌اند. چهارچوب ایستا به معنای آن است که چهارچوب توصیه‌شده فقط محدود به مورد خاص مورد بررسی است و قابلیت تعمیم را ندارد؛ لذا با تغییر ریسک شناسایی شده یا شرایط پروژه، الگوی پیشنهادی دیگر معتبر نیست.^[۲۰] همچنین لازمه‌ی مراجعه به نخبگان در این دست مطالعات، ناهمگرایی شدید در نظرات و در نتیجه خطای بالا در نتایج است.^[۲۱] در مراجعه به نخبگان، عوامل انسانی مانند

در این حالت فرض اساسی آن است که پیشنهاد کمترین قیمت برای پذیرش یک ریسک، به معنای توانایی بالاتر آن عامل برای مدیریت آن ریسک است،^[۱۶] و ریسک باید به آن عامل منتقل شود. چرا که عاملی با توانایی بیشتر برای مدیریت یک ریسک، قیمت کمتری برای مدیریت آن برآورد و پیشنهاد می‌کند.

ولی در عمل انتخاب کمترین قیمت در تمام موقعیت‌ها ممکن نیست؛ چرا که برای انتقال یک ریسک به عاملی خاص باید محدودیت‌های عمده‌ی در نظر گرفت. در واقع توافق دیگر طرف‌های قرارداد بر انتقال یک ریسک به عامل خاص، نیازمند اطمینان از جبران هزینه‌های ناشی از ریسک در صورت وقوع احتمالی آن است. لذا انتقال یک ریسک، نیازمند داشتن اعتبار یا ذخیره‌ی مالی کافی برای جبران زیان‌های ناشی از وقوع احتمالی آن ریسک است و البته بدهی است که هر عامل تا میزان محدودی توان جبران هزینه‌های ریسک را دارد. در نتیجه، محدودیت اعتباری هر عامل برای پذیرش تعداد محدودی از ریسک‌ها موجب می‌شود که لزوماً تمامی ریسک‌ها به کمترین قیمت و یا به توانا‌ترین عامل منتقل نشود.

همچنین، در پروژه‌های ساخت عموماً تصور انتقال کامل یک ریسک به یک عامل به تنهایی دشوار است. لذا فرض شده است که عامل پذیرنده‌ی ریسک با دریافت ضمانت‌هایی از طرف‌های مقابل، آن‌ها را در مدیریت ریسک سهیم گرداند. میزان مشارکت در مدیریت ریسک با نسبت مبلغ ضمانت به ارزش ریسک مشخص می‌شود،^[۱۶] در نتیجه هر عامل توان محدودی برای ارائه‌ی ضمانت‌های مالی خواهد داشت. لذا با در نظر گرفتن محدودیت‌های پیش روی عوامل متفاوت یک قرارداد، حل موازی مسئله‌ی تخصیص ریسک در یک پروژه منجر به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی تخصیص می‌شود. گسسته بودن متغیر تصمیم در مسئله‌ی بهینه‌یابی تخصیص ریسک، منجر به ایجاد فضای جواب بسیار بزرگی می‌شود که در نتیجه‌ی آن انتخاب گزینه‌ی بهینه در بسیاری موارد دشوار و گاه ناممکن می‌شود. لذا تصمیم‌گیرنده برای انتخاب تخصیص بهینه‌ی ریسک‌ها، نیازمند طراحی یک الگوریتم بهینه‌سازی است که در ادامه ارائه می‌شود.



نمودار ۲. فلوجارت الگوریتم بهینه‌یابی تخصیص ریسک های پروژه.

قابلیت مدل پیشنهادی با پیاده‌سازی آن در یک پروژه‌ی موردی و خردی آن در شکل هزینه‌ی تمام‌شده‌ی پروژه محاسبه و ارائه شده است که بر مبنای آن کارفرما می‌تواند نحوه‌ی تقسیم سود و منافع پروژه را بین عوامل قرارداد تعیین کند. در انتهای این نوشتار، با استفاده از ابزار تحلیل حساسیت مدل، مناسب‌ترین ضمانت‌های قابل اعطا از سوی کارفرما انتخاب شده است. نمودار ۲، گام‌های تعریف شده در این نوشتار را برای طراحی مدل بهینه‌یابی تخصیص ریسک‌های پروژه نمایش می‌دهد.

طراحی مدل بهینه‌یابی تخصیص ریسک

در این بخش برای طراحی یک مدل بهینه‌یابی، پارامترهای تصمیم‌گیری در مذاکرات تخصیص ریسک مدل‌سازی شده است. برای این منظور، ابتدا تابع هدف مسئله تعریف و سپس پارامتر تصمیم و محدودیت‌های مسئله تعیین شده است. با تغییر پارامترهای تصمیم در حدود تعریف شده برای محدودیت‌های مسئله، می‌توان بهترین حالت تخصیص ریسک را با اندازه‌گیری تابع هدف به دست آورد. تمامی تابع هدف و پارامترهای تصمیم در قالب توابع ریاضی فرموله و مقادیر مشخص برای محدودیت‌ها تعیین می‌شوند. براساس روابط به دست آمده از فرموله‌کردن مسئله، می‌توان الگوریتم بهینه‌یابی را طراحی و مدل‌سازی کرد.

هدف در بهینه‌یابی تخصیص ریسک، یافتن الگویی از تخصیص ریسک‌ها بین عوامل پروژه است که کمترین هزینه‌ی انتقال ریسک را به دست دهد، لذا تابع هدف به صورت «کاهش هزینه‌ی انتقال ریسک» (T) تعریف شده است. کمترین هزینه برای انتقال ریسک به معنای انتقال ریسک به مناسب‌ترین عامل است، چرا که پیشنهاد قیمت پایین‌تر به این دلیل صورت می‌گیرد که آن عامل شناخت بیشتری از ریسک دارد و توان بالاتری در خود برای کنترل ریسک می‌بیند یا آنکه سرمایه‌ی

تعریف فرایند تخصیص ریسک به منزله‌ی یک مسئله‌ی

بهینه‌یابی

هدف اصلی کارفرمایان در فرایند تخصیص ریسک، انتقال ریسک به مناسب‌ترین عامل برای مدیریت آن ریسک است،^[۱۷] ولی باید در نظر داشت که انتقال هر ریسک همراه با هزینه‌ی است که کارفرما باید آن را بپردازد.^[۱۵] برای رسیدن به تخصیص مناسبی از ریسک‌ها در روند مذاکرات، عموماً فهرستی از ریسک‌ها در برابر طرفین قرار می‌گیرد و از پیمانکار خواسته می‌شود که قیمت پیشنهادی خود را برای پذیرش مدیریت هر ریسک ارائه دهد.^[۱۷] در این حالت یک موازنه بین انتقال ریسک و پرداخت سود درخواستی پیمانکار یا نگهداری ریسک و پذیرش هزینه‌های محتمل ریسک توسط خود کارفرما ایجاد می‌شود. لذا تابع هدف در این حالت نشان‌دهنده‌ی برآیند این موازنه و حالتی است که با کمترین هزینه، ریسک به مناسب‌ترین عامل منتقل می‌شود. نتایج مطالعه‌ی صورت‌گرفته توسط مؤسسه‌ی صنعت ساخت (CII)^۳ در ایالات متحده در سال ۱۹۹۰، نیز به‌طور مشابه نشان می‌دهد که هدف تخصیص ریسک، کمینه‌سازی هزینه‌ی تمام‌شده‌ی مدیریت یک ریسک در پروژه است.^[۱]

بالاتری از او در خطر است و لذا تمایل و حساسیت بالاتری برای پذیرش کنترل ریسک دارد. [۱۶]

براساس تابع هدف تعریف شده، پارامتر تصمیم «مبلغ درخواستی پیمانکار برای قبول مدیریت یک ریسک» انتخاب شده است. این مبلغ در قالب سود پیمانکار (P_{ij}) ثبت می‌شود، که برای جریان هزینه‌های مترتب به او برای تأمین ابزارهای کنترل ریسک و هزینه‌های فرایند کنترل ریسک پرداخت می‌شود. عملاً سود (P_{ij}) علاوه بر هزینه‌ی کنترل ریسک، حاوی پاداشی است که برای قرارگرفتن پیمانکار در معرض آن ریسک و متناسب با اندازه‌ی آن ریسک به او پرداخت می‌شود.

هر عامل در مقابل سود درخواستی، با پذیرش مدیریت ریسک، هزینه‌ی مدیریت آن ریسک (αC_i) را متقبل می‌شود. هزینه‌ی مدیریت ریسک، زیان حاصل از وقوع ریسک را به دیگر عوامل پروژه نشان می‌دهد. این هزینه متناسب با سرمایه‌ی در خطر آن ریسک (C_i) است که عموماً مقدار آن در مطالعات ارزیابی ریسک توسط کارفرما تعیین و مبنای فاز تخصیص ریسک خواهد بود. هزینه‌ی وقوع ریسک برابر با حاصل ضرب تأثیر ریسک (α) در سرمایه‌ی در خطر (C_i) است. این مقدار زمانی قابل پرداخت است که ریسک وقوع یابد؛ لذا هزینه‌ی وقوع ریسک $(\alpha.C_i)$ به صورت حاصل ضرب تابع احتمال (π_i) در تابع هزینه‌ی تخصیص ریسک (t_{ij}) وارد می‌شود. بر این اساس تابع هزینه‌ی تخصیص ریسک (t_{ij}) به صورت تابعی از سود پیشنهادی، اعتبار عامل و میزان حمایت‌ها از او با رابطه‌ی ۱ تعریف خواهد شد.

$$t_{ij} = P_{ij} - \pi_i(\alpha C_{ij} - \beta C_{ij}) \quad i \in (1, \dots, n) \quad j \in (1, \dots, m) \quad (1)$$

که در آن t_{ij} تابع هزینه‌ی تخصیص ریسک P_{ij} ، سود درخواستی عامل A_j برای مدیریت ریسک r_i ، احتمال وقوع ریسک βC_i ، بیان‌کننده‌ی میزان ضمانتی است که از سوی کارفرما به عامل A_j برای پذیرش ریسک r_i اعطا می‌شود، و αC_i میزان هزینه‌یی است که عامل A_j برای جریان هزینه‌های ریسک r_i در صورت وقوع می‌کند.

با استفاده از رابطه‌ی ۱، تصمیم‌گیرنده می‌تواند مطمئن باشد که کمترین هزینه برای مدیریت ریسک پروژه منجر به کمترین قیمت تمام‌شده برای کاربر و مطمئن‌ترین حالت برای کنترل ریسک‌ها خواهد بود. در ابتدای پروژه تمامی ریسک‌های پروژه با کارفرماست و هزینه‌ی برابر αC_i برای مدیریت هر ریسک r_i باید پرداخت کند. [۱۷] ولی با انتقال هر ریسک به عاملی دیگر مقدار این ریسک تغییر می‌یابد و برابر با t_{ij} خواهد شد. لذا تابع هدف مسئله‌ی تخصیص، برای به‌دست‌آوردن کمترین هزینه‌ی انتقال ریسک به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$\min T(x) = \sum_{i=1}^n \pi_i \cdot \alpha C_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ij} \cdot x_{ij} \quad i \in (1, \dots, n), \quad j \in (1, \dots, m) \mid (i, j) \in \varphi^k \quad (2)$$

که در آن، φ^k الگوی تخصیص انتخابی و یکی از جواب‌های ممکن برای مسئله‌ی بهینه‌یابی تخصیص ریسک است. در این حالت قیمت تمام‌شده‌ی پروژه (C') برابر خواهد بود با مجموع قیمت قطعی پروژه (C) و هزینه‌ی مدیریت ریسک‌های پروژه

$$C' = C + T = C + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m t_{ij} x_{ij}$$

$$C' = C + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (P_{ij} - \pi_i(\alpha C_i - \beta C_i)) \cdot x_{ij} \quad i \in (1, \dots, n), \quad j \in (1, \dots, m) \mid (i, j) \in \varphi^k \quad (3)$$

البته باید توجه داشت که توان اعتباری هر عامل برای پذیرش مسئولیت ریسک‌ها و جریان هزینه‌های احتمالی ناشی از وقوع ریسک محدود است و متناسب با سهم هر عامل در پروژه تعیین می‌شود. این محدودیت به معنای آن است که در صورت تخصیص چند ریسک مختلف به یک عامل یکسان؛ آن عامل لزوماً توان جبران هزینه‌های مدیریت تمامی آن ریسک‌ها را، در صورت وقوع هم‌زمان آن‌ها، ندارد. رابطه‌ی ۴، این محدودیت را نشان می‌دهد:

$$\sum_{i=1}^n \pi_i * \alpha C_i * x_{ij} \leq a_j \quad i = 1, \dots, n \quad j \in (1, \dots, m) \quad (4)$$

که در آن a_j سقف توان اعتباری عامل مسئول مدیریت ریسک برای جریان هزینه‌های وقوع ریسک است و معمولاً مقدار آن متناسب با سهم آن عامل از قرارداد برآورد می‌شود.

دومین محدودیت در مدل بهینه‌یابی، محدودیت در ضمانت‌های مالی است. کارفرما در برخی موارد برای تشویق پیمانکار به پذیرش برخی ریسک‌ها و یا کاهش هزینه‌های تخصیص، در مقابل انتقال هزینه‌ی مدیریت ریسک (αC_i) به آن عامل، مبلغی از هزینه‌ی ریسک را به صورت ضمانت (βC_i) متعهد می‌شود. [۱۶] این مبلغ باید در صورت وقوع ریسک به پیمانکار پرداخت شود، ولی بدیهی است که توان اعتباری کارفرما برای اختصاص ضمانت‌های مختلف نیز محدود است و با محدودیت تعریف شده در رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \pi_i * \beta C_i * x_{ij} \leq b_j \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1 \quad (5)$$

که در آن b_j برابر توان اعتباری کارفرما برای تأمین ضمانت‌های لازم برای حمایت از عامل مسئول مدیریت ریسک است، و براساس سرمایه‌ی آن در پروژه قابل برآورد است.

طبق رابطه‌های ۱ تا ۵، مدل پیشنهادی با دریافت اطلاعات ورودی (شامل ارزش ریسک‌ها و سود درخواستی هر عامل) هزینه‌ی مدیریت ریسک‌ها را محاسبه می‌کند و سپس با کمینه‌ساختن مقدار هزینه‌ی مدیریت ریسک، الگوی بهینه‌ی تخصیص ریسک‌ها را تعیین و پیشنهاد می‌کند. نمودار ۳، در ادامه مراحل الگوریتم این مدل را نمایش می‌دهد.

اطلاعات ورودی مدل بهینه‌یابی (شامل: ضرایب احتمال، اثر ریسک‌ها، و سهم عوامل در قرارداد) مقادیر معینی هستند که در فرایند ارزیابی ریسک‌ها برآورد می‌شوند. این مقادیر عموماً پیش از شروع مذاکرات تخصیص ریسک تعیین می‌شوند و طرف‌های قرارداد بر روی آن‌ها توافق دارند. پارامتر تصمیم و تابع هدف تعریف شده در این مدل، انعطاف‌پذیری کافی برای نشان دادن تغییرات در «ارزش ریسک» یا «توانایی عوامل در پذیرش ریسک‌ها» در پروژه‌های مختلف یا زمان‌های متفاوت از یک پروژه را دارد.

در مدل بهینه‌یابی تخصیص ریسک، مجموعه‌ی ریسک‌ها ($i \in n$) به تعدادی عوامل ($j \in m$) واگذار می‌شود. هر عامل فقط یک ظرفیت محدود a_j دارد و هر ریسک i بر مبنای مجموع ظرفیت در نظر گرفته شده‌ی a_j برای عامل j به آن واگذار می‌شود. برای هر ریسک، هزینه‌ی تخصیص t_{ij} مربوط به تخصیص ریسک i به عامل j فرض شده است. هدف یافتن تخصیص بهینه‌ی ریسک، با کمترین هزینه‌ی انتقال ریسک‌های پروژه (T_k) است. هزینه‌ی تخصیص هر ریسک (t_{ij}) بر اساس رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود. در این حالت، اگر ریسک i به عامل j تخصیص یابد، x_{ij} برابر ۱ و اگر تخصیص نیابد، برابر صفر خواهد بود. به این ترتیب مدل مزبور را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف کرد:

$$Z = \min T(x) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij}$$

$$g_1 = \sum_{i=1}^n \alpha C_i * x_{ij} < a_j \quad j = 1, \dots, m$$

$$g_2 = \sum_{i=1}^n \beta C_i * x_{ij} < b_j \quad j = 1$$

$$g_3 = \sum_{i=1}^n x_{ij} \equiv 1 \quad x_{ij} = [0, 1] \quad (6)$$

گراف ساختار مسئله به شکل $G = (P, X, T)$ فرض می‌شود؛ که در آن $P = \{p_{ij}\}$ مجموعه‌ی نقاط تصمیم (سود درخواستی عوامل)، $X = \{x_{ij}\}$ مجموعه‌ی گزینه‌های^۴ تخصیص ریسک‌ها و $T = \{t_{ij}\}$ مجموعه‌ی هزینه‌های تخصیص است. جواب (φ) که کمترین هزینه را در بر داشته باشد، جواب بهینه (φ^*) نامیده می‌شود. آنگاه هزینه‌ی هر جواب با $f(\varphi)$ و هزینه‌ی جواب بهینه با $f(\varphi^*)$ نشان داده می‌شود.

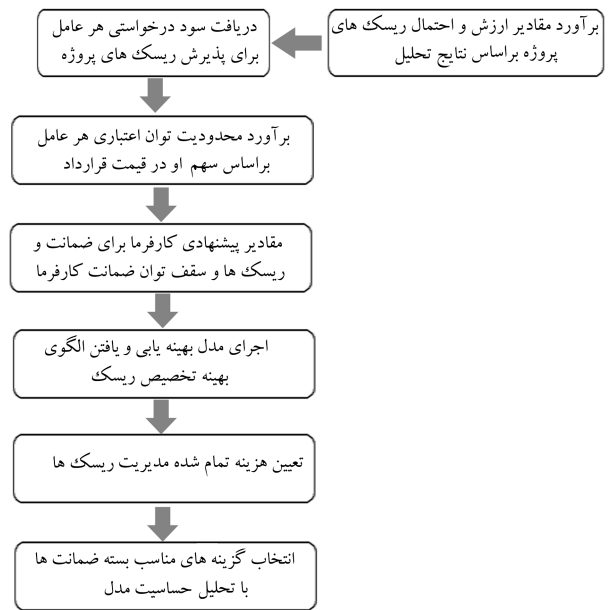
روند بهینه‌سازی در الگوریتم مورچگان با قرارگیری k مورچه بر روی n نقطه‌ی تصمیم از گراف G آغاز می‌شود. در ابتدا یک مقدار فرمان یکسان بر روی تمام مسیرهای گراف در نظر گرفته می‌شود، که به معنای احتمال یکسان برای انتخاب تمام نقاط است. برای ادامه‌ی حرکت، هر مورچه باید نقطه یا گزینه‌ی مقصد بعدی از میان همسایگی ممکن (N_i^k) را که قبلاً توسط هیچ‌یک از عوامل تخصیص نیافته است، انتخاب کند. انتخاب گزینه‌ها با استفاده از تابع احتمالاتی نمایش داده شده در رابطه‌ی ۷، انجام می‌شود:

$$q_{ij}(k, t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j=1}^J [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{t_{ij}} \quad (7)$$

که در آن $q_{ij}(k, t)$ برابر است با احتمال اینکه مورچه‌ی k ام در دوره‌ی تکرار t ام و نقطه‌ی تصمیم i ام، گزینه‌ی $(i+1)$ ام را انتخاب کند. مقدار فرمان مسیر گزینه‌ی $(i+1)$ ام در نقطه‌ی تصمیم i ام؛ و η_{ij} مقدار هدایت‌گر کاوشی مسیر گزینه‌ی $(i+1)$ ام در نقطه‌ی تصمیم i ام است. دو پارامتر α و β ضرایب ثابتی هستند که در رابطه‌ی ۷ به ترتیب برای تنظیم وزن فرمان (τ_{ij}) و اطلاعات کاوشی (η_{ij}) استفاده می‌شوند. پس از تخصیص تمامی ریسک‌ها به عوامل پروژه، هزینه‌ی تخصیص ریسک‌های پروژه محاسبه و براساس آن مسیر فورمن گذاری می‌شود. این روند با رابطه‌ی ۸ صورت می‌گیرد:

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_o = 1/T_k \quad (8)$$



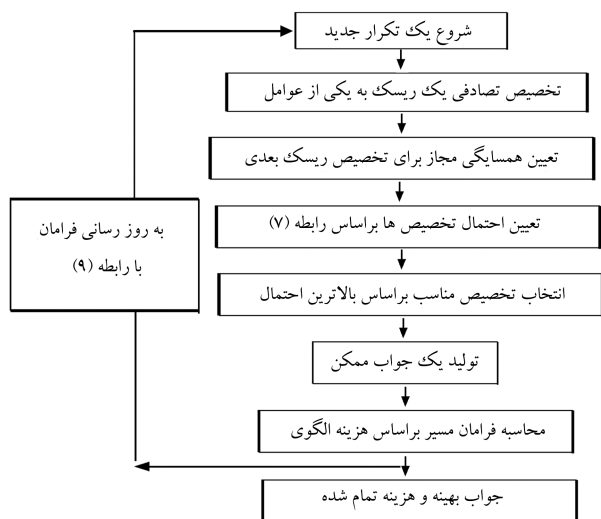
نمودار ۳. طرح مفهومی مدل بهینه‌یابی تخصیص ریسک.

طراحی الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان

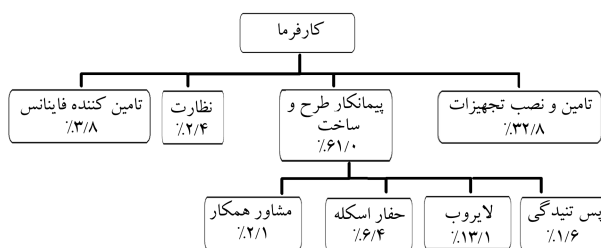
(ACO) برای بهینه‌یابی تخصیص ریسک

در این نوشتار، برای حل مسئله‌ی بهینه‌یابی الگوی تخصیص ریسک، از الگوریتم جامعه‌ی مورچگان (ACO) استفاده شده است. الگوریتم جامعه‌ی مورچگان (ACO) یکی از انواع الگوریتم‌های فراکاوشی است که توانایی بالایی در جستجو و شناسایی نقاط بهینه در فضای جواب‌های گسسته دارد.^[۱۷] استفاده از روش‌های فراکاوشی یا الگوریتم‌های تکاملی، تضمین‌کننده‌ی جواب بهینه‌ی مطلق نیست؛ ولی در هنگام حل مسئله، جواب‌های ممکن مختلفی ایجاد و نهایتاً جوابی را که خوب و مناسب است انتخاب می‌کنند.^[۱۷] لذا الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان برای حل مسئله‌ی بهینه‌یابی تخصیص ریسک، که تصمیم‌گیرنده در جستجوی رسیدن به جواب‌های فقط مناسب (و نه لزوماً جواب بهینه‌ی مطلق) در یک فضای جواب گسسته (که در آن متغیر تصمیم و گزینه‌های جواب به صورت گسسته تولید می‌شوند) است، مناسب به نظر می‌رسد.

بهینه‌یابی با استفاده از مورچه‌های مصنوعی، اولین بار در سال ۱۹۹۱ معرفی شد.^[۱۸] در طول سالیان اخیر این الگوریتم توسعه یافته و معایب آن اصلاح شده است و نیز الگوریتم‌های دیگری از الگوریتم اولیه منشعب شده است. این الگوریتم براساس رفتار طبیعی مورچه‌ها در یافتن کوتاه‌ترین مسیر ممکن بین لانه و منبع غذا شکل گرفته است که در طبیعت به دنبال غذا می‌روند؛ در طول مسیر حرکت خود، ماده‌ی به نام فرمان از خود به جا می‌گذارند، که سایر مورچه‌های در جست‌وجوی غذا را به عبور از آن مسیر تشویق می‌کند. با عبور مورچه‌ها از یک مسیر، غلظت فرمان در آن مسیر و احتمال انتخاب این مسیر توسط مورچه‌های بعدی نیز افزایش می‌یابد. این فرایند اصلاح محیط، به منظور تشویق تغییر در رفتار برای ایجاد ارتباط، را استیگ‌مرجی (پیراسانتش) می‌نامند که اولین بار در سال ۱۹۵۹ مطرح شد و براساس این خصوصیت رفتاری مورچه‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان (ACO) پیشنهاد شد.^[۱۸]



نمودار ۴. فلوجارت طراحی الگوریتم بهینه‌یابی جامعه‌ی مورچگان برای تخصیص ریسک.



نمودار ۵. ساختار پروژه‌ی نمونه‌ی موردی و سهم هر یک از عوامل در قیمت پروژه.

ریسک‌ها (درصد افزایش قیمت قرارداد) را ارائه دهد. جدول ۱، ورودی‌های مدل (شامل: نتایج تحلیل ریسک و سود درخواستی هر عامل) برای هر عنوان ریسک را ارائه می‌دهد. سود درخواستی هر عامل (متغیر تصمیم ورودی مدل بهینه‌یابی) در جدول ۱، براساس درصد افزایش قیمت قرارداد و زیر عنوان هر عامل مربوط ارائه شده است. مثلاً در صورت تخصیص ریسک «خطا در طراحی» به عامل «نظارت»، این عامل مقدار ۳۰٪ به قیمت قرارداد خود (۱٫۷۷ میلیون دلار) اضافه می‌کند تا هزینه‌های مربوط برای مدیریت این ریسک را پوشش دهد. ردیف‌هایی که مقدار ندارند، مواردی هستند که آن عامل خاص حاضر به پذیرش ریسک نبوده و پیشنهاد قیمت خود را ارائه نداده است؛ لذا مدل با تخصیص ضریب پنازتی، انتخاب آن‌ها را غیرمحمتمل می‌سازد.

مدل بهینه‌سازی تخصیص ریسک، با استفاده از اطلاعات ورودی (جدول ۱) اقدام به یافتن بهترین تخصیص ریسک‌ها کرده است. به علت آنکه برخی عوامل، حاضر به ارائه‌ی پیشنهاد برای فازهایی از پروژه (که در آن‌ها درگیر نیستند) نشدند، لذا تخصیص ریسک‌ها در ۵ فاز مجزا (فازهای ساخت، لایروبی، حفاری، پس‌تنیدگی، و نصب) تقسیم و پیشنهاد عوامل برای پذیرش ۵۲ ریسک حاصل جمع‌آوری شده است. نتایج خروجی مدل پیشنهادی در جدول ۲، الگوی بهینه‌ی تخصیص ریسک‌ها را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که مدل پیشنهادی توصیه می‌کند که برای مثال، ریسک «خطا در طراحی» در فاز «ساخت» به پیمانکار طرح و ساخت تخصیص یابد؛ ولی در فاز «حفاری» حالت بهینه آن است که این ریسک

که در آن T_k هزینه تخصیص ناشی از الگوی پیشنهادی یا به عبارت دیگر مسیر انتخاب روی گراف است. احتمال انتخاب راه‌حل‌های غیرممکن (یعنی راه‌حل‌هایی که محدودیت‌های ۴ و ۵ را برآورده نسازند)، با ضرب یک ضریب پنازتی (10^4) در بزرگ‌ترین هزینه تخصیص کاهش می‌یابد. این ضریب پنازتی همچنین در مواردی که عاملی مشخص حاضر به پذیرش یک ریسک نباشد و پیشنهادی برای پذیرش آن ریسک ارائه نداده باشد، اعمال می‌شود.

پس از یک تکرار کامل، تمامی مورچه‌ها برمی‌گردند و در مسیر برگشت فورم‌گذاری می‌کنند. این فورم‌های به‌جای‌مانده با رابطه ۹ به روز می‌شوند:

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \rho \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in L \quad (9)$$

این رابطه نشان‌دهنده‌ی تبخیر فورم‌ها از مسیر است؛ که در آن ρ ($0 < \rho \leq 1$) نرخ تبخیر فورم است. تبخیر فورم، موجب جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در نقاط بهینه‌ی محلی می‌شود. در مدل پیشنهادی، مقدار ρ برابر با ۰٫۱ در نظر گرفته شده است. مقدار افزایش فرمان در هر تکرار براساس رابطه‌ی ۱۰ محاسبه خواهد شد.

$$\Delta \tau_{ij}^k = 1/T_k = \frac{1}{\left(\sum_i \sum_j t_{ij} * x_{ij} \right)} \quad (i, j) \in \varphi^k$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = 0 \quad (i, j) \notin \varphi^k \quad (10)$$

که در آن T_k هزینه جواب ساخته‌شده توسط مورچه‌ی k ام (φ^k) است که از جمع طول یال‌های متعلق به این جواب بر روی گراف G به‌دست می‌آید.

با این روش، جواب‌هایی که از سوی تعداد زیادی از مورچه‌ها انتخاب شوند؛ شانس بیشتری برای انتخاب در تکرارهای بعدی دارند. با تخصیص تمامی ریسک‌ها، یک دور الگوریتم پایان می‌پذیرد و مورچه‌ها باز می‌گردند. در مسیر بازگشت فورم‌گذاری مسیر صورت می‌گیرد و مقدار احتمال هر تخصیص با اضافه‌شدن $\Delta \tau_{ij}$ به روز می‌شود. با تخصیص تمامی ریسک‌ها یک جواب (φ) ساخته می‌شود و بر اساس تابع هدف تعریف‌شده، هزینه‌ی تخصیص آن جواب $T(\varphi)$ محاسبه می‌شود. جوابی که کمترین هزینه را در برداشته باشد $T(\varphi^*)$ ، الگوی بهینه را ارائه خواهد داد. نمودار ۴، الگوریتم بهینه‌یابی جامعه‌ی مورچگان برای مدل تخصیص ریسک‌های پروژه را نمایش می‌دهد.

کاربرد مدل پیشنهادی در حل یک پروژه‌ی موردی

یک پروژه‌ی بندری از سال ۱۳۸۲ در قالب یک قرارداد طرح و ساخت با قیمت ثابت در ایران آغاز شده است. خدمات اجرا و طراحی پروژه به یک کنسرسیوم طرح و اجرا (شامل پیمانکار و مشاور همکار) با تأمین مالی به‌صورت فاینانس^۵ واگذار شده است. کارفرما یک شرکت ناظر را برای نظارت پروژه و یک شرکت مدیریت طرح را به‌منزله‌ی عامل چهارم وارد پروژه کرده است. بر اساس اسناد مناقصه، حضور یک شرکت لایروب و یک شرکت حفار بین‌المللی به‌منزله‌ی تأمین‌کنندگان الزام شده است. نمودار ۵، نحوه‌ی ارتباط این شرکت‌ها و درصد سهم هر یک در قیمت نهایی پروژه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شرح مدل بیان شد، توان هر عامل برای پذیرش ریسک محدود به سهم آن عامل در قیمت پروژه است.

در سال ۸۹ با توجه به تأخیر زیاد پروژه و هزینه‌های ادعاهای قراردادی، کارفرما تصمیم گرفت قرارداد را بازننگری کند. برای این منظور فهرستی از ریسک‌های پروژه تنظیم و از هر یک از عوامل پروژه خواسته شده است که سود درخواستی برای مدیریت

جدول ۱. اطلاعات ورودی مدل (شامل: نتایج تحلیل ریسک و درصد افزایش قیمت قرارداد هر عامل برای پذیرش ریسک‌های پروژه).

ردیف	عنوان ریسک	نتایج تحلیل ریسک‌ها (%)			ورودی‌های تخصیص ریسک (درصد افزایش قیمت قرارداد در صورت پذیرش ریسک)						
		ضریب ارزش ریسک (α)	ضریب احتمال ریسک (π)	ضریب ضمانت ریسک (β)	تأمین	پیمانکار	مشاور	حفار	پس		
۱	خطا در طراحی	۳۵	۲۰	-	۳۰	۵	۲,۵	۰	۵	۵	۲۵
۲	مجوزهای زیست محیطی	۵	۴۰	۱	۵	۵	۱۵	۵	۳۰	۳	-
۳	تغییرات احجام و مقادیر	۲۵	۵۰	۵	۲۰	۵	۲,۵	۱۰	۱۰	۵	۲۵
۴	تورم قیمت‌ها	۳۵	۷۰	-	۳۰	۴۰	۲۰	۳۰	۱۵	۲,۵	۲۰
۵	تأمین سوخت	۱۰	۴۰	-	-	۳۰	۵	-	۳۵	۲,۵	-
۶	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح	۱۵	۳۰	-	-	۲۰	۰	۲,۵	-	-	۳۰
۷	مشخصات زیر زمین	۵	۲۰	-	-	۰	-	۰	-	۲,۵	-
۸	حوادث غیر مترقبه	۷	۲۰	-	-	۱۰	۲,۵	-	۲,۵	۲,۵	-
۹	تأمین تجهیزات و ماشین‌آلات	۵	۲۰	-	-	۲,۵	-	۰	-	۲,۵	۱۰
۱۰	حل معارضان	۵	۳۰	۱,۵	-	۰	-	۰	-	-	-
۱۱	کارایی و کیفیت نیروی انسانی	۱۷	۲۰	-	۴۰	۱۰	۰	۰	۲۰	۰	۵
۱۲	حوادث و ایمنی	۱۱	۴۰	-	-	۰	۲,۵	۰	-	-	۵
۱۳	خطا یا کیفیت بد اجرا	۳۵	۷۰	-	۱۰۰	۱۰	۲,۵	۰	۲۰۰	۰	۵

جدول ۲. نتایج تخصیص ریسک‌های پروژه (خروجی مدل بهینه یابی).

ردیف	نام ریسک	تخصیص ریسک	ردیف	نام ریسک	تخصیص ریسک
۱	خطا در طراحی (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت	۲۷	مشخصات زیر زمین (لایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت
۲	خطا در طراحی (لایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت	۲۸	مشخصات زیر زمین (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت
۳	خطا در طراحی (حفاری)	نظارت	۲۹	حوادث غیر مترقبه (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت
۴	خطا در طراحی (پس تنیدگی)	کارفرما	۳۰	حوادث غیر مترقبه (لایروبی)	کارفرما
۵	خطا در طراحی (نصب)	تأمین و نصب تجهیزات	۳۱	حوادث غیر مترقبه (حفاری)	کارفرما
۶	مجوزهای زیست محیطی (ساخت)	کارفرما	۳۲	حوادث غیر مترقبه (نصب)	پیمانکار طرح و ساخت
۷	مجوزهای زیست محیطی (لایروبی)	نظارت	۳۳	تأمین تجهیزات و ماشین‌آلات (ساخت)	فاینانسر
۸	مجوزهای زیست محیطی (حفاری)	کارفرما	۳۴	تأمین تجهیزات و ماشین‌آلات (لایروبی)	کارفرما
۹	تغییرات احجام و مقادیر (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت	۳۵	تأمین تجهیزات و ماشین‌آلات (حفاری)	کارفرما
۱۰	تغییرات احجام و مقادیر (لایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت	۳۶	تأمین تجهیزات و ماشین‌آلات (پس تنیدگی)	کارفرما
۱۱	تغییرات احجام و مقادیر (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت	۳۷	حل معارضان (ساخت)	حفار اسکله
۱۲	تغییرات احجام و مقادیر (پس تنیدگی)	فاینانسر	۳۸	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (ساخت)	کارفرما
۱۳	تغییرات احجام و مقادیر (نصب)	کارفرما	۳۹	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (لایروبی)	لایروب
۱۴	تورم قیمت‌ها (ساخت)	کارفرما	۴۰	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (حفاری)	حفار اسکله
۱۵	تورم قیمت‌ها (لایروبی)	لایروب	۴۱	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (پس تنیدگی)	پیمانکار طرح و ساخت
۱۶	تورم قیمت‌ها (حفاری)	فاینانسر	۴۲	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (نصب)	تأمین و نصب تجهیزات
۱۷	تورم قیمت‌ها (پس تنیدگی)	مشاور همکار	۴۳	حوادث و ایمنی (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت
۱۸	تورم قیمت‌ها (نصب)	کارفرما	۴۴	حوادث و ایمنی (لایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت
۱۹	تأمین سوخت (ساخت)	کارفرما	۴۵	حوادث و ایمنی (حفاری)	حفار اسکله
۲۰	تأمین سوخت (لایروبی)	کارفرما	۴۶	حوادث و ایمنی (پس تنیدگی)	کارفرما
۲۱	تأمین سوخت (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت	۴۷	حوادث و ایمنی (نصب)	تأمین و نصب تجهیزات
۲۲	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت	۴۸	خطا یا کیفیت بد اجرا (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت
۲۳	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (لایروبی)	کارفرما	۴۹	خطا یا کیفیت بد اجرا (لایروبی)	لایروب
۲۴	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت	۵۰	خطا یا کیفیت بد اجرا (حفاری)	حفار اسکله
۲۵	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (پس تنیدگی)	کارفرما	۵۱	خطا یا کیفیت بد اجرا (پس تنیدگی)	مشاور همکار
۲۶	مشخصات زیر زمین (ساخت)	کارفرما	۵۲	خطا یا کیفیت بد اجرا (نصب)	تأمین و نصب تجهیزات

جدول ۳. اطلاعات ورودی تحلیل حساسیت (شامل: تغییرات ضمانت کارفرما و درصد افزایش قیمت قرارداد عوامل).

ردیف	عنوان ریسک	نتایج تحلیل ریسک‌ها (%)			ورودی‌های تخصیص ریسک (درصد افزایش قیمت قرارداد در صورت پذیرش ریسک)					
		ارزش ریسک	احتمال ریسک	ضمانت کارفرما	نظارت	فاینانسر و نصب تجهیزات	مشاور همکار	لاایروب	حفار اسکله	پس تنیدگی
۳	تغییرات احجام و مقادیر	۲۵	۵۰	۱۲٫۵	۱۰	۳	۰	۵	۵	-
۴	تورم قیمت‌ها	۳۵	۷۰	۱۲	۵	۱۵	۱۰	۰	۰	۱۰

جدول ۴. نتایج تخصیص ریسک (خروجی تحلیل حساسیت مدل).

ردیف	نام ریسک	تخصیص ریسک	ردیف	نام ریسک	تخصیص ریسک
۱	خطا در طراحی (ساخت)	کارفرما	۲۷	مشخصات زیر زمین (لاایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت
۲	خطا در طراحی (لاایروبی)	لاایروب	۲۸	مشخصات زیر زمین (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت
۳	خطا در طراحی (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت	۲۹	حوادث غیر مترقبه (ساخت)	کارفرما
۴	خطا در طراحی (پس تنیدگی)	پیمانکار طرح و ساخت	۳۰	حوادث غیر مترقبه (لاایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت
۵	خطا در طراحی (نصب)	تامین و نصب تجهیزات	۳۱	حوادث غیر مترقبه (حفاری)	کارفرما
۶	مجوزهای زیست محیطی (ساخت)	نظارت	۳۲	حوادث غیر مترقبه (نصب)	کارفرما
۷	مجوزهای زیست محیطی (لاایروبی)	مشاور همکار	۳۳	تامین تجهیزات و ماشین آلات (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت
۸	مجوزهای زیست محیطی (حفاری)	حفار اسکله	۳۴	تامین تجهیزات و ماشین آلات (لاایروبی)	فاینانسر
۹	تغییرات احجام و مقادیر (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت	۳۵	تامین تجهیزات و ماشین آلات (حفاری)	کارفرما
۱۰	تغییرات احجام و مقادیر (لاایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت	۳۶	تامین تجهیزات و ماشین آلات (پس تنیدگی)	پس تنیدگی
۱۱	تغییرات احجام و مقادیر (حفاری)	حفار اسکله	۳۷	حل معارضات (ساخت)	کارفرما
۱۲	تغییرات احجام و مقادیر (پس تنیدگی)	پیمانکار طرح و ساخت	۳۸	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (ساخت)	کارفرما
۱۳	تغییرات احجام و مقادیر (نصب)	فاینانسر	۳۹	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (لاایروبی)	لاایروب
۱۴	تورم قیمت‌ها (ساخت)	تامین و نصب تجهیزات	۴۰	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت
۱۵	تورم قیمت‌ها (لاایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت	۴۱	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (پس تنیدگی)	پس تنیدگی
۱۶	تورم قیمت‌ها (حفاری)	لاایروب	۴۲	کارایی و کیفیت نیروی انسانی (نصب)	تامین و نصب تجهیزات
۱۷	تورم قیمت‌ها (پس تنیدگی)	نظارت	۴۳	حوادث و ایمنی (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت
۱۸	تورم قیمت‌ها (نصب)	کارفرما	۴۴	حوادث و ایمنی (لاایروبی)	لاایروب
۱۹	تامین سوخت (ساخت)	کارفرما	۴۵	حوادث و ایمنی (حفاری)	پیمانکار طرح و ساخت
۲۰	تامین سوخت (لاایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت	۴۶	حوادث و ایمنی (پس تنیدگی)	کارفرما
۲۱	تامین سوخت (حفاری)	کارفرما	۴۷	حوادث و ایمنی (نصب)	کارفرما
۲۲	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت	۴۸	خطا یا کیفیت بد اجرا (ساخت)	پیمانکار طرح و ساخت
۲۳	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (لاایروبی)	فاینانسر	۴۹	خطا یا کیفیت بد اجرا (لاایروبی)	پیمانکار طرح و ساخت
۲۴	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (حفاری)	کارفرما	۵۰	خطا یا کیفیت بد اجرا (حفاری)	حفار اسکله
۲۵	کمبود یا عدم دسترسی به مصالح (پس تنیدگی)	پیمانکار طرح و ساخت	۵۱	خطا یا کیفیت بد اجرا (پس تنیدگی)	کارفرما
۲۶	مشخصات زیر زمین (ساخت)	کارفرما	۵۲	خطا یا کیفیت بد اجرا (نصب)	تامین و نصب تجهیزات

تغییر احجام و مقادیر) و ۲۴ (تورم قیمت) مبالغ ضمانت بالاتر، به ترتیب ۱۲٫۵٪ و ۱۲٪ انتخاب شود تا بتواند برون‌سپاری مدیریت ریسک‌ها را تشویق کند و سهم خود را کاهش دهد. با این فرض، برای دو ریسک مشخص، قیمت جدید از عوامل پروژه خواسته شد که اطلاعات آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

با ورودی‌های جدید، مدل دوباره حل شد و نتایج جدید به دست آمد. براساس نتایج حل دوباره‌ی مسئله، هزینه‌ی مدیریت ریسک‌ها در این حالت نسبت به الگوی اولیه به میزان ۵۳٫۷۲۳۰ میلیون دلار (۱۵٫۲۶٪ افزایش قیمت پروژه) کاهش یافت. جدول ۴، الگوی بهینه‌ی به دست آمده برای تخصیص ریسک‌ها (خروجی تحلیل حساسیت) را نمایش می‌دهد. در این جدول مشخص است که سهم کارفرما در

به عامل نظارت تخصیص یابد. در نتیجه‌ی به‌کارگیری الگوی پیشنهادی این مدل (جدول ۲)، هزینه‌ی مدیریت ریسک‌های پروژه برابر ۶۳٫۳۹۸۰ میلیون دلار آمریکا خواهد بود و قیمت نهایی پروژه به مقدار ۲۶٪ افزایش می‌یابد. براساس نتایج مدل، سهم بهینه برای مشارکت کارفرما در مدیریت ریسک‌های پروژه ۳۴٫۶٪ خواهد بود.

تحلیل حساسیت مدل بهینه‌یابی تخصیص ریسک

براساس نتایج حاصله از مدل به کارفرما پیشنهاد داده شد که برای ریسک‌های ۲۳

لازم را مقایسه کند. کاربرد این مدل می‌تواند پیمانکاران را برای پذیرش سطح بالاتری از ریسک‌ها تشویق کند، کارفرما را در ارائه‌ی مشوق‌ها و ضمانت‌ها راهنمایی کند، و در نهایت ساختار مالی متعادلی را براساس رویکرد برنده-برنده ایجاد کند. در نتیجه‌ی چنین ساختار متعادلی، تمامی عوامل پروژه از مدیریت صحیح ریسک‌ها مطمئن هستند و هیچ عاملی از تقسیم ناعادلانه‌ی سود بین عوامل پروژه شکایت نخواهد کرد.

نتایج کاربرد این مدل نشان می‌دهد که کارفرمایان بهتر است به جای انتقال تمام ریسک‌های پروژه، ریسک‌ها را براساس توانایی و موقعیت عوامل تسهیم کنند. در این صورت با انتقال ریسک به مناسب‌ترین عامل، هزینه‌های ناشی از تخصیص نامناسب ریسک‌ها (مانند افزایش ادعاها و کیفیت پایین اجرا) کاهش می‌یابد و کارفرما می‌تواند اطمینان بیشتری از اتمام پروژه در زمان و با کیفیت برنامه‌ریزی شده داشته باشد. همچنین این مدل به‌خوبی نشان می‌دهد که مشارکت کارفرما در روند تخصیص ریسک از طریق پذیرش مدیریت برخی ریسک‌ها و یا ارائه‌ی ضمانت‌هایی برای تشویق دیگر عوامل به پذیرش ریسک‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های پروژه و موفقیت نهایی آن کمک شایانی کند.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار، با نوآوری نسبت به مطالعات قبلی در زمینه‌ی تخصیص ریسک، برای اولین بار تخصیص ریسک در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌یابی طرح و مدل‌سازی شده است. مزیت عمده‌ی این روش این است که: ۱. امکان اندازه‌گیری و مقایسه‌ی میزان دستیابی به اهداف کارفرما ممکن می‌شود، و ۲. سرعت بالاتر در تصمیم‌گیری و قابلیت تعمیم به پروژه‌های چند عاملی را داراست. با پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، کارفرما می‌تواند قیمت تمام‌شده‌ی پروژه را کمینه سازد و منافع ارائه‌ی ضمانت‌های

پانویس‌ها

1. dynamic character
2. ant colony optimization (ACO)
3. construction industry institute (CII)
4. alternatives
5. Finance

منابع (References)

1. Federal Highway Administration (US Department of Transportation), *Risk Assessment and Allocation for Highway construction Management*, International programs (2010).
2. Lam, K.C., Wang, D., Lee, P.T.K. and Tsang, Y.T. "Modeling risk allocation decision in construction contracts", *International Journal of Project Management*, **25**(5), pp. 485-493 (2007).
3. Pipattanapiwong, J. "Development of multi-party risk and uncertainty", *Management Process for an Infrastructure Project*, Kochi University of Technology (2004).
4. Gordon, C.M. "Choosing appropriate construction contracting method", *Journal of Construction Engineering and Management*, **120**(1), pp.196-210 (1994).
5. Levitt, R.E. and Ashley, D.B. "Allocating risk and incentive in construction", *Journal of the Construction Division*, **106**(3), pp. 297-305 (1980).
6. Ng, A. and Loosemore, M. "Risk allocation in the private provision of public infrastructure", *International Journal of Project Management*, **25**(1), pp. 66-76 (2007).
7. Fisk, R.E., *Construction Project Administration*, Fifth Edition, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey (1997).
8. Khan, Z.A. "Risk premium associated to exculpatory clauses", A Thesis for Master of Science, University of Calgary, Alberta (1998).
9. Bing, L., Akintoye, A., Edwards, P.J. and Hardcastle, C. "The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK", *International Journal of Project Management*, **23**(1), pp. 25-35 (2005).
10. El-Sayegh, M.S. "Risk assessment and allocation in the UAE construction industry", *International Journal of Project Management*, **26**(4), pp. 431-438 (2008).
11. Barnes, M. "How to allocate risks in construction contracts", *Int. J. Project Manage.*, **1**(1), pp. 24-28 (1983).
12. Kuesel, T.R. "Allocation of risks, proceedings of construction risk and liability sharing conference", Scottsdale (USA): American Society of Civil Engineers, pp. 51-60 (1979).
13. Hartman, F. and Snelgrove, P. "Risk allocation in the lump-sum contracts-concept of latent dispute", *Journal of Construction Engineering and Management*, **122**(3), pp. 291-296 (1996).
14. Rahman, M.M. and Kumaraswamy, M.M. "Risk management trends in the construction industry: moving towards joint risk management", *Eng. Const. Archt. Manage.*, **9**(2), pp. 31-51 (2002).
15. Al-Bahar, J.F. and Crandall, K.C. "Systematic risk management approach for construction projects", *Journal of Construction Engineering Management*, **116**(3), pp. 533-546 (1990).
16. Medda, F. "A game theory approach for the allocation of risks in transport PPP", *Int. Jou. Project management*, **25**(3), pp. 213-218 (2008).
17. Moeini, R. and Afshar, M.H. "Optimal operation of reservoirs using ant algorithm", *Sharif Journal of Science & Technology*, **48**, pp.85-93 (In Persian) (2009).
18. Dorigo, M. and Stutzle, T., *Ant Colony Optimization*, Massachusetts Institute of Technology (2004).

RISK ALLOCATION OPTIMIZATION IN A CONSTRUCTION PROJECT USING THE ANT COLONY ALGORITHM

G. Khazaeni

gkhazayeni@iust.ac.ir

M. Khanzadi(corresponding author)

khanzadi@iust.ac.ir

A. Afshar

a_afshar@iust.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Iran University of Science and Technology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 3, Page 61-69, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 18 July 2011; received in revised form 20 October 2011; accepted 7 January 2012.

Abstract

In order to transfer risks to the most capable party and provide a basis for project profit sharing, risk allocation has a strong influence on the time and cost of construction projects. In this paper, for the first time, allocation of risk to the most deserving party is defined as an optimization problem, and a quantitative model for risk allocation optimization is introduced. Since the aim of risk allocation is defined as achieving project objectives with maximum reliability and minimum cost, in the proposed model, an applicable and logical decision parameter is introduced and an optimization algorithm, based on the Ant Colony Optimization (ACO) method, is developed. The proposed model also provides a useful decision tool for the project owner to select the best insurance package by including a sensitivity analysis.

In order to design the ACO optimization algorithm of the risk allocation optimization model; initially, the objectives of owners within the allocation process are identified and the objective function is defined. With respect to the objective function, the risk allocation problem is then restructured as an optimization problem, and the decision parameters, constraints and a flowchart of the model structure are defined. These parameters and constraints are formulated in a mathematical equation;

and an optimization algorithm is designed based on Ant Colony Optimization (ACO).

By receiving “profit requested for risk bearing by each participant” as input, the proposed model calculates the cost of risk management for the owner and then minimizes the objective function in an Ant Colony Optimization algorithm. Two constraints are defined and formulated in the proposed model, in order to simulate the real decision process of risk allocation. As follows: 1) the maximum financial credit of each party to compensate the consequence of any risk and 2) the financial ability of the owner to ensure against risk events. Varying this constraint, sensitivity analysis would be available in the model to optimize the guarantee package for the owner. Therefore, this model could guide the decision maker towards addressing the most effective guarantees to the best party.

This model is applied in a case study to present its capability and usefulness. According to the findings of the applied proposed model, it could be concluded that risk sharing in a project should be done based on party competency and willingness. It is also concluded that the owner should participate in the risk allocation process if he/she wishes to achieve the best reliability in project objectives with minimum cost.

Key Words: Risk Allocation, risk management, optimization, ant colony optimization.