Journal of Modeling in Engineering 22 (2024) 157-170

Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538

Research Article

A Game Theory-Based Approach to Hierarchically Rank Responses to Geological and Geotechnical Risks

Mohammad Amin Ghasvareh [a], Gholam Reza Lashkaripour [b,*], Hossein Sadeghi [c], Javad Tayyebi [d]

[a] *PhD Candidate, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[b] *Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[c] *Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[d] *Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Computer Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 07 September 2023
Revised: 17 February 2024
Accepted: 20 February 2024

Keywords:

Degree of importance,
Risk,
Geotechnic,
Uncertainty,
Game theory.

ABSTRACT

Due to uncertainty in design, financial estimates, geotechnical and geological issues, tunneling projects are always associated with risks. The project's functional goals may be lost or even fail if these risks are not managed. Many tunnel construction projects have experienced failures that have caused a lot of damage. The use of risk management knowledge is necessary to achieve the main goals in tunnel project construction. One of the most significant challenges for engineers is identifying and assessing risks in tunneling projects, which can lead to proper risk management during tunnel construction. A game theory-based method has been developed to study the risks in tunnel construction projects in this research. To verify the proposed model, as an experimental study, the existing geological and geotechnical risks on line 3 of the Mashhad urban Subway were investigated. Based on the degree of importance, the responses to the desired risks are determined and prioritized in the following. The results showed that preparing engineering geological profiles along the route using the obtained information and changing the excavation parameters based on it with soil Improvement methods are the most significant risk response.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.31717.2527

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: lashkaripour@um.ac.ir

How to cite this article:
hasvareh, M. A., Lashkaripour, G. R., Sadeghi, H., & Tayyebi, J. (2024). A game theory-based approach to hierarchically rank responses to geological and geotechnical risks. Journal of Modeling in Engineering, 22(78), 157-170. doi: 10.22075/jme.2024.31717.2527

مقاله پژوهشی

رویکردی مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای سطح‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

محمدامین قسوره[۱]، غلامرضا لشکری پور[۲،*]، حسین صادقی[۳]، جواد طیبی[۴]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

واژگان کلیدی:
درجه اهمیت،
ریسک،
ژئوتکنیک،
عدم قطعیت،
نظریه بازی.

چکیده

پروژه‌های تونل‌سازی به دلیل وجود عدم قطعیت در طراحی، برآوردهای مالی، مسائل ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی، همواره با ریسک‌هایی همراه است. در صورت عدم مدیریت این ریسک‌ها، امکان از دست دادن اهداف عملکردی پروژه و حتی شکست آن وجود دارد. موارد بسیاری از عدم موفقیت در پروژه‌های ساخت تونل وجود دارد که خسارت‌های بسیاری به همراه داشته است. لذا به منظور رسیدن به اهداف اصلی در ساخت پروژه‌های تونلی به کارگیری دانش مدیریت ریسک ضروری است. شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها در پروژه‌های تونل سازی یکی از چالش‌های مهم مهندسان محسوب می‌شود که می‌تواند باعث مدیریت صحیح ریسک در حین ساخت تونل شود. در این پژوهش، یک روش مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای مطالعه ریسک‌های موجود در پروژه‌های ساخت‌وساز تونل‌ها توسعه داده شده است. جهت بررسی مدل پیشنهادی، به عنوان یک مطالعه آزمایشی، ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در خط ۳ قطار شهری مشهد بررسی شده است. در ادامه پاسخ به ریسک‌های مورد نظر تعیین و به لحاظ درجه اهمیت اولویت‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری براساس آن، مهم‌ترین پاسخ ریسک است. استفاده از روش‌های ژئوفیزیک برای مطالعات زیرسطحی در رتبه بعدی به لحاظ درجه اهمیت قرار دارد.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.31717.2527

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه[۱]

واژه ریسک، مفاهیم متعددی دارد و هریک از محققان به فراخور حال، تعریف خاص مورد نظر خود را با بیان دلیل و مباحث گسترده مطرح کرده‌اند. احتمال (کم یا زیاد) وارد شدن آسیب و زیان توسط خطرات، ریسک نامیده می‌شود. در واقع به شانس یا احتمال اینکه کسی از خطر آسیب ببیند یا اموالی دچار صدمه شود، ریسک اطلاق می‌شود [۱].

پریتچارد دو تعریف از ریسک ارائه داده است. در تعریف اول ریسک، تأثیر تجمعی احتمال رویداد غیرقطعی که ممکن است بر اهداف پروژه به طور مثبت یا منفی تأثیر بگذارد. در تعریف دوم، ریسک میزان قرار گرفتن در معرض رویدادهای منفی و پیامدهای محتمل این رویدادها است. این رویدادها به وسیله سه فاکتور توصیف می‌شوند: رویداد ریسک، احتمال ریسک و مقداری که در معرض خطر بوده

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: lashkaripour@um.ac.ir
۱. دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲. استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳. دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴. دانشیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر و صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

استناد به این مقاله:
قسوره، محمد امین، لشکری پور، غلامرضا، صادقی، حسین، و طیبی، جواد. (۱۴۰۳). رویکردی مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای سطح‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۱۵۷-۱۷۰. doi: 10.22075/jme.2024.31717.2527

است [۲].

مدیریت ریسک یک فرآیند پیچیده و شامل مراحل شناسایی، آنالیز و مقابله با ریسک (پاسخ به ریسک) است. مدیریت ریسک، فرآیند شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌های بالقوه است. هر بخش، واژه مدیریت ریسک را با توجه به شرایط خود به کار گرفته، تکنیک‌ها و مفاهیم آن را با شرایط مجموعه خود تطبیق می‌دهد. مدیریت ریسک اغلب فرایند سیستماتیک و پیوسته‌ای را از شناسایی، اندازه‌گیری، تحلیل، کنترل، جلوگیری، کاهش و ارزیابی ریسک و جذب اعتبار دنبال می‌کند. این مدیریت تضمین کننده بیشینه نمودن احتمال و پیامد رویدادهای مثبت و کمینه کردن احتمال و پیامد رویدادهای نامطلوب در راستای اهداف پروژه است [۳].

توجه به ریسک باید در بطن هر فرآیند طراحی باشد. امروزه همراه با پیشرفت صنعت تونل سازی و فناوری‌های مرتبط با آن، نگرانی‌های بسیار زیادی در مورد پیامدهای منفی مرتبط با این پیشرفت‌ها، زندگی بشر را تهدید می‌کند. پروژه‌های احداث تونل و به خصوص تونل‌های شهری به دلیل پیچیدگی‌های اجرایی و استفاده از فن‌آوری‌های نوین و شرایط خاص کار در زیرزمین دارای ریسک‌های ویژه‌ای هستند که عدم توجه به آن‌ها می‌تواند تأخیرهای زمانی و افزایش هزینه فراوانی را بر پروژه تحمیل کند [۴].

این پروژه‌ها به دلیل وضعیت غیر قابل پیش‌بینی و ماهیت شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی اساساً خطرناک هستند. علاوه بر این، شرایطی همچون گسل‌ها و زون‌های گسلی، کارست، سنگ بسیار شکسته و بی‌کیفیت، تنش‌های بالا، فشار بالای آب زیرزمینی و غیره خطرات قابل‌توجهی را برای ساخت تونل ایجاد می‌کند. همچنین مواجهه با مسائلی همچون شرایط پیش‌بینی نشده فنی، حضور افراد درگیر در پروژه، مسائل مالی و اقتصادی و غیره از جمله سایر ریسک‌های موجود است. وقوع حوادث و به تبعات آن طولانی شدن زمان اجرای پروژه‌ها و موارد هزینه زا از جمله تبعات سنگین وجود این تهدیدها به شمار می‌آیند [۵]. حوادثی که باعث آسیب‌های جانی، مالی و زیست‌محیطی می‌شوند، می‌توانند به صورت مستقیم یا غیر مستقیم، پروژه را تحت تأثیر قرار دهند [۱]؛ بنابراین نیاز است ریسک‌ها در این پروژه‌ها به دقت شناسایی شده و پاسخ به ریسک‌ها به‌گونه‌ای طبقه‌بندی گردند که به راحتی قابل ارائه به مدیران ارشد پروژه و یا حتی پیمانکاران بوده و آنان بتوانند با کنترل علل ریشه‌ای ریسک‌های اصلی، از وقوع آن‌ها جلوگیری کرده و یا شدت اثر حوادث را کاهش دهند [۴].

تحقیقات متفاوتی در زمینه ارزیابی ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیک در پروژه‌های مهندسی از جمله تونل سازی با روش‌های مختلف ارائه شده که در ادامه تعدادی از این تحقیق‌ها بیان شده است.

سانچز و همکاران (۲۰۰۸) ضمن شناسایی برخی از ریسک‌های زمین‌شناختی از قبیل لغزش یا ریزش سقف، نشت آب و ...، دو شاخص (نیمه کمی شاخص‌های طبیعی یا ذاتی و ضریب اطمینان) را ارائه کرده‌اند و بر اساس آن محیط را طبقه‌بندی و ریسک‌ها را موردبررسی و ارزیابی قرار داده‌اند [۶].

غفاری و امین زاده (۲۰۱۵) در تحقیقی به بررسی ریسک‌های موجود در پروژه تونل سازی با استفاده از روش ساختار شکست ریسک پرداخته‌اند. این ریسک‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی رتبه‌بندی شده و در ادامه تحقیق از روش RBS استفاده شده است. از آنجا که این روش یک ابزار برای شناسایی و طبقه‌بندی هدفمند ریسک‌ها است، در نهایت اقدامات ضروری برای نظارت و کنترل روند سیستماتیک مدیریت ریسک ارائه شده است [۷].

حق‌شناس و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل جدید برای ارزیابی ریسک‌های زمین‌شناسی را بر اساس خواص ژئومکانیکی با استفاده از الگوریتم رقابت برای مطالعه موردی تونل امامزاده هاشم تهیه کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم استفاده شده می‌تواند به عنوان یک ابزار ریاضی و یک روش مدل‌سازی برای ارزیابی ریسک زمین‌شناسی پروژه‌های تونل زنی مورد استفاده قرار گیرد [۸].

ژیا و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی تأثیر عدم قطعیت در ارزیابی و مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری را در مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی مورد بررسی قرار داده‌اند. این پروژه برای مطالعه موردی تونلی در غرب چین با ساختار زمین‌شناسی پیچیده در منطقه کوهستانی انجام شده است [۹].

نوبل (۲۰۲۳)، در پروژه‌ای به بررسی و مقایسه ریسک‌های ژئوتکنیکی موجود در دو نوع مختلف استفاده از تونل‌ها پرداخته است. تونل‌های مربوط به پروژه‌های برق آبی و تونل‌های شهری موارد مورد مقایسه در این پروژه است. نتایج حاصل نشان دهنده آن است که دسته‌بندی خطرات

و ریسک‌های ژئوتکنیکی در پروژه‌های تونل زنی حمل‌ونقل شهری شبیه به پروژه‌های برق آبی بوده اما مقیاس این خطرات و ریسک‌ها می‌تواند به طور گسترده‌ای متفاوت باشند [۱۰].

اید و همکاران (۲۰۲۳)، سی و دو عامل خطر مرتبط با فعالیت‌های تونل سازی را شناسایی کردند. احتمال وقوع عامل خطر و اثرات آن بر هزینه، زمان، کیفیت و ایمنی تعیین شده است. با توجه به محیط مخاطره‌آمیز و نامطمئن، از روش منطق فازی برای توسعه مدلی برای تحلیل اثرات مخاطرات بر فرآیند تونل سازی استفاده شده است [۱۱].

اگرچه تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است اما با توجه به این نکته که هیچ جواب بهینه کلی را نمی‌توان تعیین کرد؛ بنابراین پژوهشگران بایستی روش‌های مختلف را امتحان کنند. استفاده از نظریه بازی‌ها می‌تواند یک راه‌کار مفید و مؤثر جهت مدیریت مناسب ریسک‌ها و کاهش هزینه‌ها و زمان اجرای پروژه باشد. تفاوت مدل‌های ریاضی ارائه شده در نظریه بازی‌ها و تحقیق در عملیات این است که در تحقیق در عملیات، چون تابع هدف و محدودیت‌های مسئله ثابت‌اند، بهینه‌سازی در شرایط معین صورت می‌گیرد اما در نظریه بازی‌ها امکانات طرفین بازی و عملی که انجام می‌دهند مشخص است اما امکان وقوع در هر مرحله با مرحله دیگر بازی، متفاوت است. به همین دلیل بازی بهینه‌سازی در شرایط نامعین است و بنابراین می‌توان بازی را به صورت مدل ریاضی نظریه تصمیم در شرایط تصادم تعریف کرد [۱۲]. با توجه به این نکته که ریسک‌های تونل سازی نیز شرایطی نامعین دارند، در این مقاله از نظریه بازی‌ها برای ارائه یک مدل جهت مدیریت ریسک‌های تونل سازی استفاده شده است. بازی مورد استفاده، بازی‌های دو نفره مجموع صفر است. هدف از انتخاب این نوع بازی آن است که به شدت رقابتی هستند. همچنین این بازی‌ها یک مدل ریاضی از وضعیتی است که سود (زیان) یک بازیکن، دقیقاً معادل با زیان (سود) بازیکن دیگر است. در این راستا مدل مورد نظر به عنوان یک مطالعه آزمایشی برای ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در خط ۳ قطار شهری مشهد بررسی شده است.

۲-روش پژوهش

برنامه‌ریزی باید به صورت سیستماتیک انجام گیرد، طوری که نشان دهنده یک فرآیند هدف‌دار باشد و برای رسیدن به هدف‌ها، اولویت‌ها و محدودیت‌ها را مورد توجه قرار دهد. در طول برنامه‌ریزی، مشکلات احتمالی و راه‌حل‌های مناسب و همچنین روش‌های جدیدی که ممکن است مناسب پروژه و حل‌کننده برخی مشکلات باشد، باید در نظر گرفته شوند. در برنامه‌ریزی یک پروژه باید کلیه اطلاعات و داده‌هایی که در پروژه مؤثر هستند، مورد توجه قرار گیرند چراکه اگر تصورات و فرضیات نادرستی اراده شده باشند به سختی قابل اصلاح خواهد بود [۱۳]. پیچیدگی مسائل و عدم اطمینان و ابهام اطلاعات به خصوص در مسائل مربوط به ریسک و مدیریت آن سبب می‌شود که تصمیم‌گیری برای مدیران سخت و دشوار شود. استفاده از نظریه بازی‌ها ابزاری مناسب جهت رفع ابهام و مقابله با عدم قطعیت است.

نظریه بازی، مطالعه رفتار منطقی در شرایطی است که وابستگی متقابل وجود دارد. وابستگی متقابل یعنی اینکه هر بازیکن از آنچه دیگران در بازی انجام می‌دهند، تأثیر می‌پذیرد. رفتار خود بازیکن‌ها نیز بر دیگران تأثیر می‌گذارد. خروجی بازی وابسته به تصمیم‌های بازیکن‌ها است و هیچ فردی کنترل کامل بر آنچه اتفاق می‌افتد، ندارد. افراد، این وابستگی‌های متقابل را می‌دانند و آن‌ها را در تصمیم‌ها لحاظ می‌کنند [۱۴]. طبق تعریف مایرسون، نظریه بازی‌ها مطالعه مدل‌های ریاضی تعارض و همکاری بین تصمیم‌گیرندگان است؛ بنابراین از نظریه بازی‌ها با عناوین دیگری نظیر تحلیل تعارض یا نظریه تصمیم‌گیری تعاملی نیز یاد می‌کنند. نظریه بازی‌ها از روش‌های ریاضی به‌منظور تجزیه‌وتحلیل مواردی استفاده می‌کند که دو طرف یا بیشتر، ملزم به تصمیم‌گیری در شرایطی هستند که تصمیم هریک از طرفین بر پیامد طرف دیگر تأثیرگذار است [۱۵]. از آنجایی که مسائل مربوط به ریسک‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه هستند، نظریه بازی‌ها را می‌توان به عنوان ابزاری سودمند به منظور ارزیابی آن‌ها قلمداد کرد. در ادامه توضیحات جامعی در رابطه با نوع بازی مورد استفاده در این مقاله ارائه خواهد شد.

یک بازی دو نفره مجموع صفر، نوعی بازی است که مجموع دریافتی بازیکنان برابر صفر خواهد شد. این بازی‌ها به شدت رقابتی هستند زیرا آنچه یک بازیکن به دست می‌آورد، بازیکن دیگر از دست می‌دهد. بازی از قانون حفظ مقدار مطلوبیت پیروی می‌کند به طوری که مقدار مطلوبیت هیچ‌گاه ساخته نشده و از بین نمی‌رود بلکه تنها از یک بازیکن به دیگری انتقال می‌یابد. علاقه‌مندی دو بازیکن همیشه متضاد و به طور اکید رقابتی و بدون احتمال

همکاری است. یک بازیکن باید با هزینه دیگری برنده شود، این خصوصیت به عنوان کارایی–پاراتو شناخته می‌شود. به صورت جامع‌تر کارایی پاراتو موقعیتی است که در آن سود یک بازیکن تا زمانی که سود حداقل یک بازیکن دیگر بدتر نشود، بهبود نمی‌یابد [۱۶]. هر بازی دارای سه عنصر اصلی است ۱) بازیکنان، ۲) استراتژی و ۳) پیامدها.

بازیکنان فرد یا گروهی از تصمیم‌گیرندگان را در برمی‌گیرد. برای شکل‌گیری بازی وجود حداقل دو بازیکن الزامی است، اما در مورد حداکثر تعداد بازیکن‌ها سقف و محدودیتی وجود ندارد. میزان پیچیدگی با افزایش تعداد بازیکن‌ها بیشتر شده و مدل‌سازی سخت‌تر خواهد شد. در بازی‌هایی با تعداد حداقل سه بازیکن، امکان شکل‌گیری ائتلاف به وجود می‌آید. منظور از عمل (اقدام) انتخاب‌های ممکن پیش روی هر بازیکن است که یکی از آن‌ها را انتخاب می‌کند و به آن، انتخاب یا عمل بازیکن گفته می‌شود. به اختیارهایی که هریک از طرفین بازی دارند، راهکار (استراتژی) اطلاق می‌گردد. برای مثال جابجا کردن مهره‌ها در بازی شطرنج یک راهکار است. مجموعه راهکارهای محض بازیکنان A و B در یک بازی دو نفره به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$S_C^A = \{A_1, A_2, A_3, \dots A_m\} \quad (۱)$$
$$S_C^B = \{B_1, B_2, B_3, \dots B_n\}$$

به مقدار عددی که به ازای هریک از عناصر مجموعه موقعیت‌ها، عاید بازیکن می‌شود، پیامد آن بازیکن گفته می‌شود. تابع پیامد بازیکن A به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_A: S_C^A \times S_C^B \to R \quad (۲)$$
$$U_A(x) = U_A(A_i, B_j)$$

بازیکن به منظور موفق شدن در بازی (کسب حداکثر مطلوبیت) باید با در نظر گرفتن تصمیم حریف، موقعیتی را پیدا کند که پیامد مربوط به آن موقعیت برای بازیکن، حداکثر باشد. به این موقعیت، موقعیت بهینه گفته می‌شود. موقعیت بهینه، موقعیتی است که اگر بازی به تعداد زیاد تکرار شود، تضمین می‌کند که امید ریاضی پیروزی‌ها، حداکثر مقدار را بگیرد. البته ممکن است نتیجه بازی به صورت برد و باخت مطلق نباشد و هریک از بازیکن‌ها، در پیروزی سهمی داشته باشند [۱۷].

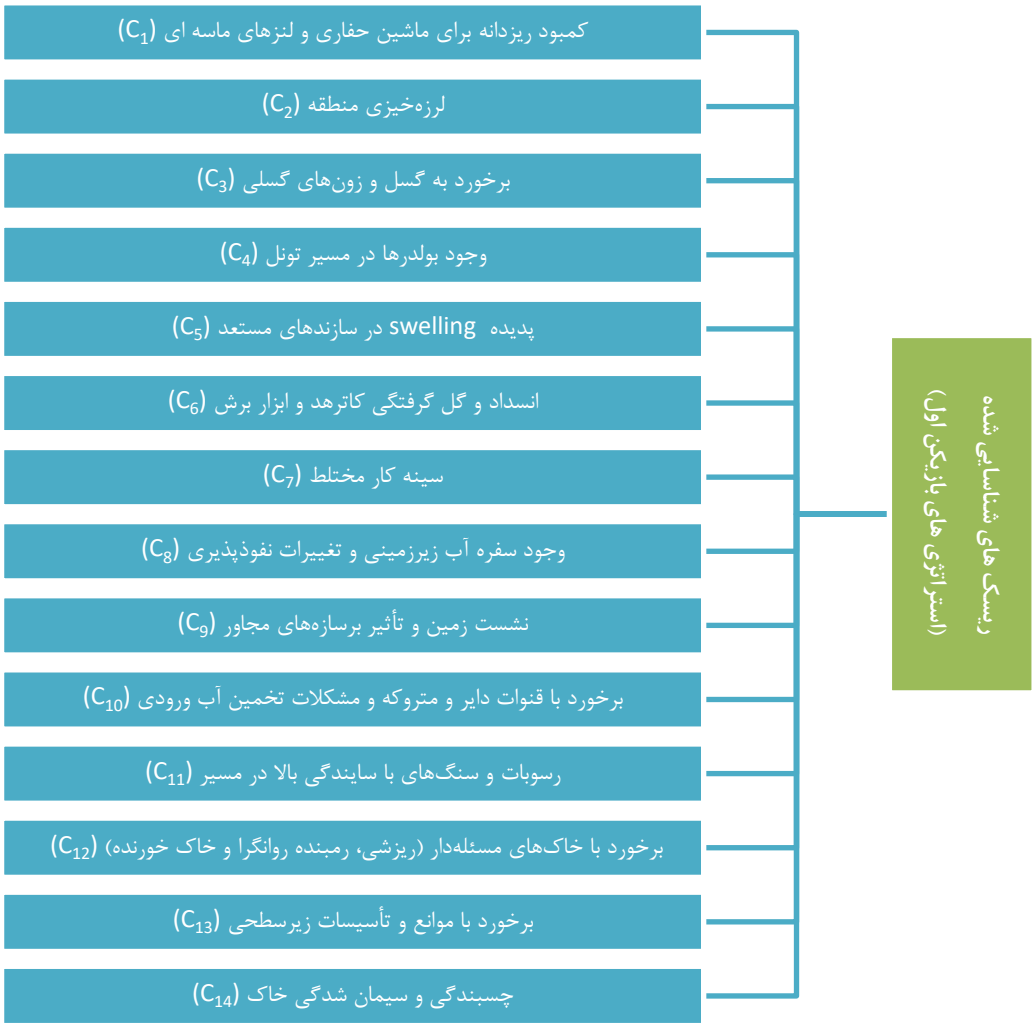
در پروژه‌های تونل سازی و فضاهای زیرزمینی نیاز است که یک مدل مناسب برای ارزیابی و رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های موجود خصوصاً ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تدوین شود که ریسک‌هایی که بیشترین آسیب را به فرآیند ساخت و اجرا وارد می‌کنند شناسایی شده و سپس پاسخ به این ریسک‌ها به لحاظ درجه اهمیت رتبه‌بندی گردند. به همین منظور در این‌گونه مسائل یک مدل تصمیم‌گیری برای ارزیابی ریسک‌ها و انتخاب و تصمیم‌گیری‌ها ارائه می‌گردد. روش انجام این پژوهش به طور کلی در سه قسمت تقسیم‌بندی شده است. شکل (۱) رویکرد کلی پژوهش مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

شکل ۱. رویکرد کلی پژوهش مورد مطالعه

۲-۱-پروژه مورد مطالعه

شرکت قطار شهری مشهد مسئولیت ساخت، بهره‌برداری و حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری مشهد را بر عهده دارد. قطار شهری مشهد دارای ۴ خط بوده که در حال حاضر خط یک و دو در حال بهره‌برداری است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش خط ۳ قطار شهری مشهد است. خط ۳ قطار شهری مشهد در حدود ۲۸ کیلومتر طول دارد. حفاری خط ۳ قطار شهری مشهد توسط دو دستگاه TBM از میدان فردوسی شروع شده است که به صورت دو مسیر غربی و مسیر شرقی حفاری آن انجام می‌گردد.

بر مبنای پروفیل طراحی شده برای خط ۳، تمامی ایستگاه‌ها در تراز زیرزمین واقع‌اند. حدود ۱۳ کیلومتر از تونل مسیر خط ۳ قطار شهری مشهد به روش استفاده از ماشین حفار اجرا می‌گردد. عمق ریل در این ناحیه از مسیر در محدوده ۱۷ تا ۳۵ متر متغیر است [۱۸].



شکل ۲. ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شناسایی شده در خط ۳ قطار شهری مشهد (استراتژی‌های بازیکن اول)

۲-۲-زمین‌شناسی پروژه

بررسی عوامل زمین‌شناسی و زمین ساختی هر منطقه، به منظور آگاهی از شرایط زمین‌شناختی آن منطقه در برنامه‌ریزی‌های گوناگون بسیار دارای اهمیت است. لذا جهت شناسایی وضعیت زمین‌شناسی هر منطقه باید مطالعات گذشته و سابقه تغییرات تکتونیکی و ژئوتکنیکی آن مورد بررسی قرار گیرد. برای انجام طراحی و برآورد اطلاعات ژئوتکنیک این پروژه حدود ۱۵۰ حلقه گمانه حفر شده است و اطلاعات لازم پس از برداشت نمونه و انجام آزمایش‌های مربوطه و همچنین انجام آزمایش‌های صحرایی از قبیل SPT و پرسیومتری جمع‌آوری شده است. آزمون‌های برجا شامل پرسیومتری (هر ۳ متر)، نفوذ استاندارد (هر ۳ متر یا با تغییر نوع خاک)، دانهول، دانسیته و رطوبت در گمانه‌های ماشینی انجام پذیرفته است.

روند عمومی تکتونیکی ناحیه‌ای در دشت مشهد در امتداد شمال غربی به جنوب شرقی است که با روند مسیر خط ۳ همخوانی دارد. مهم‌ترین پدیده زمین ساختی دشت مشهد وجود زون گسل خورده در شمال و حاشیه شمالی است. با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌ها، به صورت کلی می‌توان ایستگاه مربوط به میدان فردوسی را مرز بین ریزدانه و درشت‌دانه دانست. به طوری که در مسیر شرقی بافت ریزدانه و در مسیر غربی بافت درشت‌دانه غالب است. عمده مصالح در برگیرنده تونل در محدوده شرقی از نوع CL-ML بوده و در قسمت غربی بیشتر شاهد مصالح درشت‌دانه با بافت غالب SM و GC-GM است. عمق تونل‌ها در محدوده مورد مطالعه متغیر است. در این محدوده ۱۵ متر به عنوان کمترین عمق و ۴۱ متر به عنوان بیشترین عمق است. تونل‌های بخش شرقی نسبت به بخش غربی دارای عمق بیشتری است. در ادامه ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شناسایی شده در خط ۳ قطار شهری مشهد در شکل (۲) نشان داده شده است.

در ادامه مشکلات ناشی از ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شناسایی شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳. مشکلات ناشی از ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شناسایی شده

۲-۳-تعریف مسئله و مدل بازی مورد استفاده

پرسشنامه جامعی جهت جمع‌آوری نظرات متخصصان پروژه مذکور برای رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه تهیه شده و سپس ضمن تجمیع نظرات خبرگان، با استفاده از نظریه بازی‌ها، رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌ها براساس درجه اهمیت انجام گرفته است. با استفاده از تکنیک دلفی تعداد ۱۴ ریسک زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی و ۲۱ راهکار جهت مدیریت ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی برای پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد انتخاب شده است. در ادامه بازی مورد نظر ایجاد شده و هرکدام از اجزای بازی معرفی شده‌اند.

همان‌طور که اشاره شد هر بازی دارای سه عنصر اصلی است ۱) بازیکنان ۲) استراتژی ۳) پیامدها. در ادامه به معرفی عناصر اصلی بازی در مدل طراحی شده جهت رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پرداخته شده است. بازیکنان فرد یا گروهی از تصمیم‌گیرندگان را در بر می‌گیرد. بازی طراحی شده متشکل از دو بازیکن است که عبارت‌اند از: ۱- ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد و ۲- گروه عوامل درگیر در پروژه ساخت تونل اعم از کارفرما، پیمانکار و مشاوران. استراتژی بازیکنان قاعده از پیش تعریف شده‌ای است که بر اساس آن بازیکن برنامه اقدام خود را از لیست خود در طول بازی تعیین می‌کند. استراتژی‌های بازیکن اول ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه و استراتژی‌های بازیکن دوم پاسخ‌های در نظر گرفته شده برای ریسک‌ها است.

بازیکن اول دارای ۱۴ استراتژی و بازیکن دوم دارای ۲۱ استراتژی است. استراتژی‌های بازیکن اول (ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود) در شکل (۳) و بازیکن دوم (پاسخ‌های در نظر گرفته شده توسط تیم کارفرما، مشاور و پیمانکار برای کاهش اثرات ریسک‌ها) در شکل (۵) ارائه شده است.

بازی مورد نظر به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

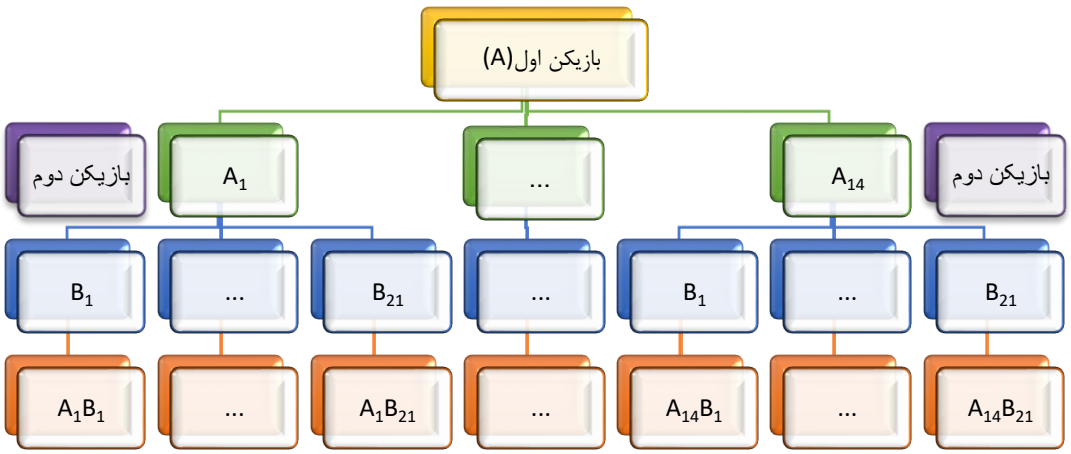
$$P = A, B \qquad (۳)$$

$$S_C^A = \{A_1, A_2, A_3, \dots A_{14}\},$$

$$S_C^B = \{B_1, B_2, B_3, \dots B_{21}\}$$

$$w_A(A_i, B_j) = a_{ij}, w_B(A_i, B_j) = -a_{ij}$$

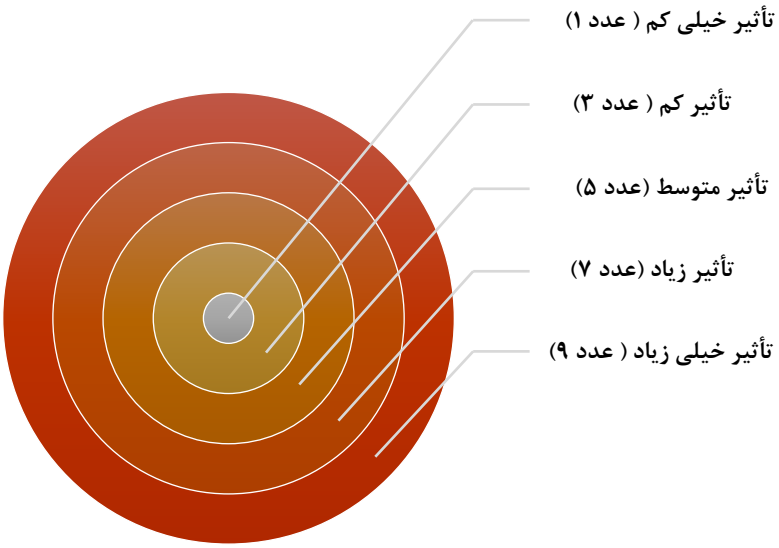
که در آن A, B بازیکنان تعریف شده در بازی هستند. S_C^A مجموعه استراتژی‌های بازیکن اول (۱۴ استراتژی) و S_C^B مجموعه استراتژی‌های بازیکن دوم (۲۱ استراتژی) است. a_{ij} میزان پیروزی بازیکن اول در حالتی است که این بازیکن استراتژی i ام و بازیکن دوم استراتژی j ام را انتخاب می‌کند. در این بازی بایستی بعد از ساختن مدل ریاضی، موقعیتی را یافت که میزان برد برای بازیکن A حداکثر و میزان برد برای بازیکن B حداقل شود. به منظور نشان دادن ارتباط میان درخت‌های بازی و تصمیم‌گیری شکل (۴) بازی را به صورت درختی نمایش می‌دهد.



شکل ۴. نمودار درختی بازی مدل‌سازی شده [۱۶]

شکل ۵. پاسخ به ریسک‌های تعیین شده در خط ۳ قطار شهری مشهد (استراتژی‌های بازیکن دوم)

در ادامه از نظرات خبرگان جهت رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌ها استفاده شده است. خبرگان برای ارائه نظرات و ترجیحات خود پرسشنامه‌ای را تکمیل کردند. یک مقیاس ۵ درجه‌ای انتخاب شده تا اهمیت معیارها را همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، تعریف کند. این جدول کمک می‌کند تا عبارات زبانی در پرسشنامه به اعداد کمی تبدیل شود.



شکل ۶. مقیاس ۵ درجه‌ای انتخاب شده جهت تبدیل نظرات کیفی به کمی

از دیدگاه بازیکن دوم، مدل ریاضی بازی حاصل جمع صفر به صورت زیر فرموله شده است.

$$\max \min_{i\in\{1,2,\dots,m\}} \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j$$

$$subject\ to\ \textstyle\sum_{j=1}^{n} x_j = 1, \qquad (۴)$$

$$x_j \geq 0\,, 1 \leq j \leq n.$$

که در آن a_{ij} مقدار پیامد بازیکن ۱ و x_j احتمال انتخاب استراتژی j توسط بازیکن ۲ است. m, n به ترتیب تعداد استراتژی‌های بازیکنان ۱ و ۲ است. مسئله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد. با حل این مسئله، می‌توان استراتژی بهینه بازیکن ۲ را پیدا کرد.

$$max\ v$$

$$s.t. \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \geq v \quad 1 \leq i \leq m,$$

$$subject\ to \textstyle\sum_{j=1}^{n} x_j = 1, \qquad (۵)$$

$$x_j \geq 0\,,\ 1 \leq j \leq n.$$

برای مطالعه موردی، مدل با استفاده از نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها به صورت زیر ایجاد شده است:

$$max\ v$$

s.t.

$$C_1\left\{1x_1 + 9x_2 + 5x_3 + 9x_4 + 1x_5 + 3x_6 + 5x_7 + 7x_8 + 5x_9 + 9x_{10} + 1x_{11} + 3x_{12} + 9x_{13} + 5x_{14} + 3x_{15} + \sum_{i=16}^{18} 9x_i + 3x_{19} + 1x_{20} + 5x_{21} \geq v\right.$$

$$C_2\left\{9x_1 + 3x_2 + 5x_3 + \sum_{i=4}^{9} 1x_i + 5x_{10} + 9x_{11} + \sum_{i=12}^{17} 1x_i + 9x_{18} + \sum_{i=19}^{20} 1x_i + 3x_{21} \geq v\right.$$

.

.

.

$$C_{14}\left\{3x_1 + 9x_2 + 1x_3 + 9x_4 + 1x_5 + \sum_{i=6}^{7} 5x_i + 9x_8 + 7x_9 + 5x_{10} + 1x_{11} + 7x_{12} + \sum_{i=13}^{15} 1x_i + 5x_{16} + 7x_{17} + 9x_{18} + \sum_{i=19}^{20} 1x_i + 5x_{21} \geq v\right.$$

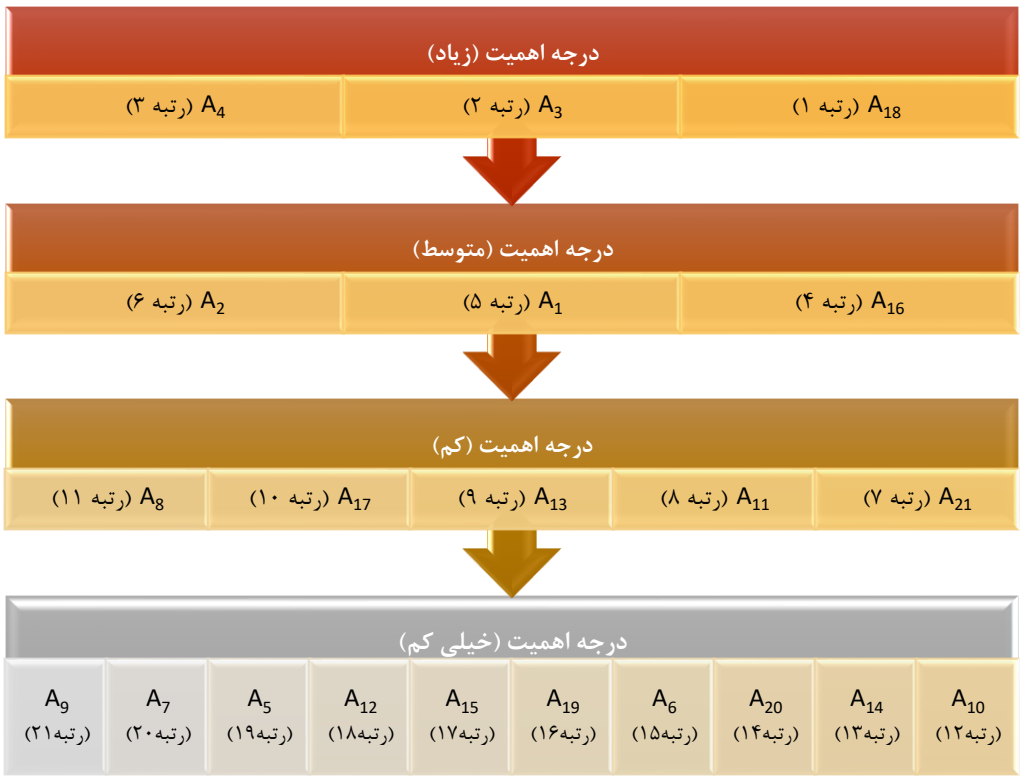
$$\sum_{i=1}^{21} x_i = 1,$$

$$x_1, x_2, \dots x_{21} \geq 0.$$

جدول ۱- رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی براساس درجه اهمیت

نماد	پاسخ به ریسک	رتبه	فراوانی پاسخ	سطح	درجه اهمیت سطح
A_{18}	تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات موجود و تغییر پارامترهای حفاری براساس آن	۱	0/5314	یک	۵/۴ (زیاد)
A_3	استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات زیرسطحی	۲	0/3608		
A_4	حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل	۳	0/1078		
A_{16}	کنترل و مانیتورینگ فشار سینه کار	۴	0/5143	دو	۳/۹ (متوسط)
A_1	بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهات اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی زمین‌شناسی (گسل و...)	۵	0/3346		
A_2	حفاری گمانه‌های اکتشافی و تهیه نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده	۶	0/1511		
A_{21}	حفر چاه تهویه در مسیر تونل	۷	0/2516	سه	۳/۱ (کم)
A_{11}	انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای	۸	0/2412		
A_{13}	رعایت و اجرای صحیح و به موقع دستورالعمل‌های فنی حفاری به منظور محدودسازی نشست‌های القایی ناشی از حفاری تونل (فشار سینه کار، تزریق پشت سگمنت)	۹	0/2397		
A_{17}	استفاده از روش‌های بهسازی خاک	۱۰	0/2194		
A_8	انجام آزمایش‌های لازم برای پیش‌بینی میزان چسبندگی زمین	۱۱	0/0481		
A_{10}	مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل	۱۲	0/1	چهار	۲/۱ (خیلی کم)
A_{14}	تخمین آب ورودی به تونل (روش‌های تجربی، تحلیلی، عددی و ...)	۱۳	0/1		
A_{20}	تزریق هوای فشرده جهت کاهش گل گرفتگی	۱۴	0/1		
A_6	تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی	۱۵	0/1		
A_{19}	استفاده از شاتکریت به‌منظور افزایش چسبندگی مصالح	۱۶	0/1		
A_{15}	استفاده از سیستم زهکشی مناسب	۱۷	0/1		
A_{12}	انجام آزمون‌های تعیین ساینده‌گی سنگ و خاک و استفاده از معیارهای ژئوتکنیکی	۱۸	0/1		
A_5	تهیه نقشه تراز آب زیرزمینی	۱۹	0/1		
A_7	تعیین نقاط دارای پتانسیل هجوم آب	۲۰	0/1		
A_9	بررسی میزان و نوع کانی‌ها و رسوبات تورم‌زا با استفاده از آزمایش‌های مختلف	۲۱	0/1		

نتیجه نهایی با استفاده از الگوریتم سیمپلکس برای مسئله محاسبه شده و نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. برای حل این مسئله از نرم افزار لینگو نسخه ۱۸.۰.۴۴ استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات موجود و تغییر پارامترهای حفاری براساس آن با درجه اهمیت زیاد به عنوان گزینه اول انتخاب شده است. با توجه به این نکته که رتبه‌های اول تا سوم به لحاظ درجه اهمیت در یک سطح (زیاد) قرار گرفته‌اند اما اهمیت رتبه اول از رتبه‌های دوم و سوم برای مدیران پروژه‌ها بیشتر خواهد بود. این مفهوم در مورد تمامی سطح‌های دیگر نیز صادق خواهد بود. فراوانی پاسخ‌ها در جدول۱ نشان داده شده است. به آن معنا که برای مثال در رابطه با سطح ۱، گزینه A_{18} با حدود ۵۷ درصد مهم‌ترین پاسخ به ریسک در این سطح است. پاسخ به ریسک A_3 و A_4 نیز با حدود ۳۶ و ۱۰ درصد در رتبه‌های بعدی در سطح ۱ قرار گرفته‌اند. در رابطه با صحت سنجی نتایج به دست آمده با توجه به اینکه اطلاعات مورد استناد و نتایج علمی در مورد مدیریت ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در خط ۳ وجود ندارد و پژوهش حاضر تنها کار انجام شده در این زمینه است؛ بنابراین می‌توان نتایج حاصل را با تجربیات افراد خبره و متخصص مورد سنجش قرار داد. به این صورت که نتایج به دست آمده، مجدداً در اختیار خبرگان و متخصصان جهت بررسی قرار گرفت. تجمیع نظرات خبرگان با استفاده از روش میانگین هندسی ارزیابی شد. بررسی‌ها نشان داد که نتایج به دست آمده نزدیکی زیادی با واقعیت دارد. با انجام رتبه‌بندی، ارجحیت هر پاسخ به ریسک در مقابل سایر پاسخ به ریسک‌ها بر اساس درجه اهمیت مشخص و در نتیجه می‌توان در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک و پاسخ به آن برنامه‌ریزی نمود. از این رو باید با تخصیص منابع بیشتر برای ریسک‌های با درجه اهمیت بالاتر، درصدد رفع یا کم‌رنگ کردن اثرات مخرب این ریسک‌ها بر اهداف پروژه بود. در نهایت می‌توان نتایج موجود در جدول ۳ را به عنوان یک نقشه راه مشخص و یک برنامه جامع، شامل مؤثرترین اقدامات عملی رتبه‌بندی شده دانست که با حداقل هزینه‌ها و زمان اجرا، سطح کلی ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد را پوشش می‌دهند. شکل (۷) نمودار تصمیم‌گیری و رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار تصمیم‌گیری و رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

۴-نتیجه‌گیری

به دلیل عدم اولویت‌بندی فنی مناسب پاسخ به ریسک‌های موجود در پروژه‌های تونل سازی، امکان تعیین مناسب اقدامات حفاظتی وجود ندارد؛ بنابراین، کمی کردن پاسخ به ریسک‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها به برنامه‌ریزی مدیریت ریسک کمک می‌کند. اگرچه رویکردهای زیادی برای اولویت‌بندی پاسخ به ریسک‌ها به کار گرفته شده است، اما هنوز تکنیک‌های کارآمدی مانند نظریه بازی‌ها عملاً برای اولویت‌بندی بسیار کم استفاده شده است. با توجه به محدودیت منابع مالی، زمان و نیروی انسانی، نیاز به شناسایی عوامل خطر و ریسک‌های مؤثر بر عملکرد پروژه اجتناب ناپذیر است. به منظور افزایش کارایی شیوه‌های مدیریتی، تعیین اولویت‌های پاسخ به ریسک‌ها نیز به اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب برای تخصیص منابع کمک می‌کند. هرچند امروزه حرفه تونل سازی از مشکلات سازمان‌دهی و مدیریتی به جز در برخی موارد فاصله گرفته، ولی بزرگ‌ترین جنبه تضعیف کننده این حرفه جدایی روزافزون بین مهندسی و مدیریت و عدم انسجام مدیریت اجزای مختلف طراحی است. در این تحقیق سعی شده تا با ارائه یک راهکار، مشکل بیان شده تا حدودی مرتفع گردد. از بین استراتژی‌های موجود جهت کاهش اثرات منفی ریسک‌ها باید محتمل‌ترین و اثربخش‌ترین راهکارها بنا به نیاز پروژه انتخاب گردد. ابتدا ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد شناسایی و سپس با استفاده از نظریه بازی‌ها رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه تونل سازی خط ۳ قطار شهری مشهد انجام شد. نظریه بازی‌ها با اعمال الگوریتم‌های مختلف، آزادی بیشتری را به مدیران برای انتخاب روش مناسب برای کاهش اثرات ریسک‌ها می‌دهد. در نهایت نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها نشان داد که تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری براساس آن مهم‌ترین پاسخ ریسک است. استفاده از روش‌های ژئوفیزیک برای مطالعات زیرسطحی و حفاری ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفاری تونل در رتبه بعدی به لحاظ درجه اهمیت قرار دارند.

مراجع

[1] M. Ataei. Risk Management. Shahrood University of Technology, 2017. (in Persian)

[2] C.L. Pritchard, and P.R. PMP. Risk management: concepts and guidance. CRC Press, 2014.

[3] S.D. Eskesen, P. Tengborg, J. Kampmann, and T.H. Veicherts. "Guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association, working group No. 2." *Tunnelling and Underground Space Technology 19*, no. 3 (2004): 217-237.

[4] P.K. Marhavilas, D. Koulouriotis, and V. Gemeni. "Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24*, no. 5 (2011): 477-523.

[5] S.M. El-Sayegh. "Risk assessment and allocation in the UAE construction industry." *International Journal of Project Management 26*, no. 4 (2008): 431-438.

[6] M.A. Sánchez, A. Foyo, C. Tomillo, and E. Iriarte. "Geological risk assessment of the area surrounding Altamira Cave: A proposed Natural Risk Index and Safety Factor for protection of prehistoric caves." *Engineering Geology* 94, no. 3-4 (2007): 180-200.

[7] M. Gafari, and R. Aminzadeh. "Identify and analyze the risks involved in tunnel projects." *Current World Environment* 10, no. Special-Issue 1 (2015): 1102-1108.

[8] S.S. Haghshenas, S.S. Haghshenas, R. Mikaeil, P. Sirati Moghadam, and A.S. Haghshenas. "A new model for evaluating the geological risk based on geomechanical properties-case study: the second part of emamzade hashem tunnel." *Electron J Geotech Eng* 22, no. 1 (2017): 309-320.

[9] Y. Xia, Z. Xiong, X. Dong, and H. Lu. "Risk assessment and decision-making under uncertainty in tunnel and underground engineering." *Entropy* 19, no. 10 (2017): 549.

[10] A.G. Noble. "Comparing the issues, risks and levels of geotechnical investigation for remote hydropower tunnels with urban transportation tunnels." *In Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*, CRC Press, (2023): 794-802.

[11] M.A. Eid, J.W. Hu, and U. Issa. "Developing a Model for Analyzing Risks Affecting Machinery Tunnel Execution." *Buildings* 13, no. 7 (2023): 1757.

[12] H.R. Navidi, and S. Ketabchi. An Introduction to Game Theory. Shahed University, 2011 (in Persian).

[13] M. Gharouni-Nik, and S. Hashemi. Tunneling: Management by design. 2017 (in Persian).

[14] M. Milan. "Games, Strategies & Managers: How Managers Can Use Game Theory to Make Better Business Decision." 1996.

[15] C.A. Holt, and A.E. Roth. "The Nash equilibrium: A perspective." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101, no. 12 (2004): 3999-4002.

[16] G.R. Jalali, M. Jafari, and H. Nozari. Game Theory. 2018 (in Persian).

[17] G. Abdoli. Game Theory and It Application. 2014 (in Persian).

[18] M. Nikkhah, M.A. Ghasvareh, and N. Farzaneh Bahalgardi. "Risk management in urban tunnels using methods of game theory and multi-criteria decision-making". *Journal of Mining and Environment* 10, no. 3 (2019): 597-611.