

### روش الکترو فازی مردد در مدیریت ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه‌های تونل‌سازی

#### مقاله پژوهشی

محمد امین قسوره<sup>۱</sup>؛ غلامرضا لشکری پور<sup>۲\*</sup>؛ حسین صادقی<sup>۳</sup>؛ جواد طبیبی<sup>۴</sup>  
۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده‌ی علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، aminghasvareh@mail.um.ac.ir  
۲- استاد؛ دانشکده‌ی علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، lashkaripour@um.ac.ir  
۳- دانشیار؛ دانشکده‌ی علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، sadeghi@um.ac.ir  
۴- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی کامپیوتر و صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، javadtayyebi@birjandut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳

شماره صفحات: ۱۴۳ تا ۱۶۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2023.12600.1469

واژگان کلیدی	چکیده
تصمیم‌گیری تونل‌سازی فضاهای زیرزمینی روش الکترو ریسک مجموعه‌های فازی مردد	فضاهای زیرزمینی در محیط‌هایی با شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی دارای عدم قطعیت بالا اجرا می‌شوند و ریسک‌های زیادی را نیز در بردارند. بیشترین حوادث و رخدادها اغلب با عدم قطعیت در ساخت و اجرای این سازه‌ها همراه است؛ بنابراین جلوگیری از وقوع حوادث با پیشرفت روش‌های تحلیل و مدیریت ریسک امری ضروری است. در این تحقیق به کمک روش الکترو فازی مردد، روشی برای مدیریت ریسک‌های موجود در تونل‌سازی ارائه می‌شود. به عنوان یک مطالعه آزمایشی، روش مورد نظر برای ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در خط ۳ قطار شهری مشهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس پاسخ متخصصان و خبرگان به پرسشنامه‌های تهیه شده، ریسک‌های مختلف زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه شناسایی و همچنین پاسخ‌های مورد نظر برای کاهش اثرات این ریسک‌ها مشخص می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری فازی مردد رتبه‌بندی پاسخ این ریسک‌ها بر مبنای درجه اهمیت آن‌ها انجام می‌گیرد. نتایج نهایی نشان‌دهنده آن است که تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری بر اساس آن و استفاده از روش‌های بهسازی خاک در رتبه اول قرار گرفته‌اند. حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل در رتبه دوم و رعایت و اجرای صحیح و به موقع دستورالعمل‌های فنی حفاری به منظور محدودسازی نشست‌های القایی در رتبه سوم به لحاظ اهمیت جای گرفته‌اند.

جدایی روزافزون بین مهندسی و مدیریت است. شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر ساخت و اجرای این پروژه‌ها می‌تواند منجر به ارائه راهکارهای مؤثرتر و اقتصادی در بهبود عملکرد و توسعه روش‌های کاری شود (Muir Wood, 2000).

#### ۱- پیش‌گفتار

بررسی روند تونل‌سازی، چگونگی به چالش کشیده شدن این صنعت برای نفوذ به زمین‌های با شرایط مشکل‌تر را نشان می‌دهد. بزرگ‌ترین جنبه تضعیف‌کننده حرفه تونل‌سازی،

\* خراسان رضوی؛ مشهد؛ میدان آزادی؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ دانشکده‌ی علوم؛ گروه زمین‌شناسی؛ طبقه اول؛ شماره‌ی تلفن: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴؛ کدپستی:

ریسک‌های موجود در پروژه‌ها، ضروری به نظر می‌رسد (El-Sayegh, 2008). محدودیت‌هایی برای اعمال مناسب عدم قطعیت‌ها در تحلیل ریسک‌ها وجود دارد. وجود موارد ذکر شده، تحلیل ریسک را میان روش‌های قطعی و روش‌های فازی قرار می‌دهد. ارزیابی شرایط نامطلوب با استفاده از تحلیل ریسک به عنوان تلفیقی از قضاوت مهندسی و علم امکان فراهم بوده و امکان بررسی همه جانبه‌تر ایمنی پروژه‌ها را ممکن می‌سازد. چنانچه ریسک‌ها درست شناسایی، تحلیل و ارزیابی شده و با بخش‌های درگیر ارتباط برقرار کنند، یک استراتژی کاهش و تعدیل ریسک به دست خواهد آمد (Cleland & Ireland, 2007).

تحقیقاتی متفاوتی در زمینه ارزیابی و مدیریت ریسک در پروژه‌های مهندسی از جمله تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی با روش‌های مختلف ارائه شده است. این تحقیقات در طی سالیان مختلف انجام گرفته است که تعدادی از آن‌ها در جدول ۱، ذکر شده است.

عوامل مؤثر در موفقیت پروژه‌ها در حالت کلی وابسته به بهینه‌سازی و مدیریت هزینه‌ها و زمان با حفظ کیفیت در کار است. پروژه‌های تونل‌سازی همواره با عدم قطعیت و ریسک‌هایی همراه هستند که بر دو عامل هزینه و زمان تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی، سازمان‌دهی و پشتیبانی مناسب، مدیریت ریسک، نظارت بر اجرا، کنترل کیفیت، کنترل هزینه‌ها و همچنین مدیریت دانش سازمانی وجود دارد (Muir Wood, 2000).

اجرای پروژه‌ها به خصوص ساخت و اجرای تونل‌ها به دلیل مواجهه با مسائلی مانند شرایط پیش‌بینی نشده زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، محیطی و فنی، حضور افراد درگیر در پروژه، شرایط اقتصادی همواره با ریسک‌هایی روبه‌رو هستند. بزرگی پروژه، تعداد و اهمیت هر یک از این ریسک‌های موجود را تعیین می‌کند. ممانعت از وقوع ریسک‌ها در پروژه امری ناممکن خواهد بود؛ بنابراین استفاده از یک سیستم جامع مدیریت ریسک جهت مدیریت تمامی انواع

جدول ۱- پیشینه پژوهش

پژوهشگران	موضوع	روش مورد استفاده	فازی	فازی	غیر فازی	چند تصمیم گیرنده	اندازه‌گیری عدم قطعیت
شغیعی و همکاران، ۲۰۲۲	شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه تونل‌سازی مکانیزه	تحلیل سلسله مراتبی فازی	*			*	
شرافت و همکاران، ۲۰۲۱	تحلیل ریسک پروژه‌های تونل‌سازی حفاری شده با TBM	روش پاپیونی			*	*	
میکائیل و همکاران، ۲۰۱۹	ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی پروژه تونل‌سازی	خوشه‌بندی فازی سی-مینز	*				
نیکخواه و همکاران، ۲۰۱۹	مدیریت ریسک در تونل‌های شهری	تصمیم‌گیری چند معیاره			*	*	
ژیا و همکاران، ۲۰۱۷	ارزیابی ریسک در شرایط عدم قطعیت در تونل‌سازی	تصمیم‌گیری چند معیاره			*	*	
نظارت و همکاران، ۲۰۱۵	رتبه‌بندی خطرات زمین‌شناسی در تونل زنی مکانیزه	تحلیل سلسله مراتبی فازی	*			*	
یزدانی و همکاران، ۲۰۱۳	رتبه‌بندی ریسک پروژه‌های ساخت تونل	الکره فازی	*			*	
پژوهش حاضر	مدیریت ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه‌های تونل‌سازی	الکره فازی مردد	*	*	*	*	*

حساس و دارای مقادیر غیردقیق است (Xia & Zhang, 2018).

به‌منظور بهبود فرآیند پیشرفت پروژه‌ها، می‌توان با پرداختن به علت‌های ریشه‌ای بروز هر ریسک با روش‌های جدید، چارچوبی را برای ارائه پاسخ‌های مناسب به ریسک‌ها فراهم کرد. هدف اصلی از انجام این پژوهش، ارائه یک رویکرد مبتنی بر ارزیابی ریسک است. با شناسایی پارامترهای نامطلوب و با استفاده از این رویکرد می‌توان پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه تونل‌سازی مکانیزه را کمی کرد و در نتیجه گامی مؤثر در بهینه‌سازی و کاهش اثرات ریسک‌های موجود پروژه برداشت؛ بنابراین از مهم‌ترین اهداف عمده این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

الف- ارائه یک برنامه جامع مدیریت ریسک‌های تونل‌سازی با استفاده از روش الکترون فازی مردد.

ب- شناسایی و تحلیل ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد به عنوان یک مطالعه موردی و رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های شناسایی شده بر اساس درجه اهمیت با روش مذکور.

## ۲- مدیریت ریسک

مفاهیم زیادی برای ریسک وجود دارد و هر یک از محقق‌ها، تعریف خاص خود را با دلایل مختلف، بیان کرده‌اند. واژه ریسک، به احتمال وقوع یک اتفاق به صورت نامعلوم گفته می‌شود، به صورتی که آن اتفاق نامعلوم بتواند باعث بروز و ایجاد مشکلاتی گردد (Smith, et al., 2014). مدیریت ریسک بخش مهم و مستقل در طراحی و ساخت هر سازه زیرزمینی بزرگ بوده و مزیت و نتیجه‌های آن نیز در سیستم مدیریت پروژه مشخص می‌گردد. با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع، ارزیابی و مدیریت ریسک‌ها یکی از ارکان مهم در این پروژه‌ها است (Ghosh & Jintanapakanont, 2004). در شکل ۱، فرآیند کلی مدیریت ریسک نشان داده شده است.

برنامه‌ریزی ریسک، فرآیند تصمیم‌گیری در مورد تعیین اهداف و چگونگی فعالیت‌های مدیریت ریسک است که به اهمیت ارزیابی ریسک واحد مورد نظر و منابع در دسترس بستگی دارد. پس از آن تشخیص و شناسایی ریسک‌ها صورت

با وجود تحقیق‌های انجام شده در زمینه مدیریت ریسک و در سال‌های اخیر، متأسفانه عدم وجود یک فرمول خاص برای مدیریت ریسک‌ها، همچنان به عنوان یک مشکل خودنمایی می‌کند. این روش‌های مدیریت ریسک، موارد چند شاخصه بوده و هیچ جواب بهینه کلی را نمی‌توان برای آن‌ها تعیین کرد؛ بنابراین پژوهشگران بایستی روش‌های مختلف را امتحان کنند. در جدول ۱، مشاهده می‌شود که پژوهش حاضر، نسبت به سایر پژوهش‌های انجام شده، دارای مزایایی است. به کارگیری رویکردهای فازی جهت افزایش انعطاف و دقت مدل، یکی از ابعاد مورد توجه در این مسائل است.

روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه و چند معیاره نقش مهمی در حل مسائل موجود در دنیای واقعی دارند. در مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره کلاسیک، اغلب گزینه‌ها، با اختصاص مقادیر دقیق به معیارها، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در عالم واقعیت به دلیل وجود عدم قطعیت، تعیین مقادیر دقیق درجه عضویت برای ارزیابی یک گزینه نسبت به معیار مورد نظر، سخت است.

مجموعه‌های فازی مردد، ابزارهای مؤثری برای بیان اطلاعات مبهم در روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به شمار می‌روند که به یک عضو در مساله و فضای تصمیم مجموعه‌ای از مقادیر ممکن را به عنوان درجه عضویت تخصیص می‌دهد (Xia & Xu, 2011). با توجه به اینکه نظر خبرگان و کارشناسان ممکن است با تردیدهایی همراه باشد و چون مقدار مردد بودن به هر شاخص اعطا می‌گردد، بنابراین وزن دقیق‌تری برای رتبه‌بندی در اختیار پژوهشگر قرار داده خواهد شد. در واقع فازی مردد، اندازه‌گیری میزان عدم قطعیت‌های موجود است. عدم قطعیت در مورد یک مساله به آن معنا است که در بخش و یا تمام اطلاعات آن مساله اطمینان کافی وجود ندارد (Ataei, 2016)؛ بنابراین مجموعه‌های فازی مردد می‌توانند ابزار مناسبی در تشخیص و مقایسه گزینه‌های مورد نظر باشند. هرچه داده‌های مساله تصادفی‌تر باشد، کاربرد مجموعه‌های فازی مردد مشهودتر می‌گردد. در رویکرد فازی مردد، به جای در نظر گرفتن یک درجه عضویت، می‌توان چند درجه عضویت برای یک عنصر در نظر گرفت و عدم قطعیت بیشتری را پوشش داد. این کار کمک می‌کند که خطای حاصل از عدم قطعیت کاهش یابد؛ بنابراین مهم‌ترین مزیت تصمیم‌گیری در شرایط فازی مردد، توجه به داده‌ها و اطلاعات

مجموعه‌های فازی مردد این است که هرچه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص اهمیت بیشتری دارد و وزن بالاتری به خود اختصاص می‌دهد. از نکات تمایز مجموعه‌های فازی با فازی مردد این است که در مجموعه‌های فازی تمامی عناصر باید در تعداد با هم برابر باشند، ولی در تعداد عناصر فازی مردد این کار لزومی ندارد، زیرا ممکن است اجتماع تمامی تصمیم‌گیرندگان در مورد معیاری، دو عدد مردد باشند که تعداد عناصر آن نیز دو خواهد بود.

ممکن است در مورد معیاری، اجتماع نظر خبرگان در پنج عدد مردد باشد که تعداد آن نیز پنج می‌گردد و این یک مزیت روش فازی مردد نسبت به مجموعه‌های فازی است (Zhu, et al., 2012).

پیچیدگی مسائل، عدم اطمینان و ابهام اطلاعات در مسائل مربوط به ریسک و مدیریت آن سبب می‌شود که تصمیم‌گیری برای مدیران سخت و دشوار شود. استفاده از مجموعه‌های فازی مردد ابزاری مناسب جهت رفع ابهام و مقابله با عدم قطعیت است. در پروژه تونل سازی نیاز است که یک مدل مناسب برای ارزیابی و رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌های موجود خصوصاً ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تدوین شود. این کار سبب می‌شود که ریسک‌هایی که بیشترین آسیب را به فرآیند ساخت و اجرا وارد می‌کنند، شناسایی گردند. سپس پاسخ به این ریسک‌ها به لحاظ درجه اهمیت رتبه‌بندی گردند. به همین منظور در این‌گونه مسائل یک مدل تصمیم‌گیری برای ارزیابی ریسک‌ها، انتخاب و تصمیم‌گیری‌ها ارائه می‌گردد.

از آنجایی که مسائل مربوط به ریسک‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه هستند، مجموعه‌های فازی مردد را می‌توان به عنوان ابزاری سودمند به منظور ارزیابی آن‌ها قلمداد کرد. روش انجام این پژوهش به سه قسمت تقسیم‌بندی شده است. در مرحله اول، برای مطالعه تئوری‌ها و مبانی نظری از مطالعات کتابخانه‌ای و همچنین بازدیدهای میدانی از پروژه و مطالعه گزارش‌های موجود که دید جامعی از ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه فراهم آورده، استفاده شده است. در مرحله دوم، برای تعیین ریسک‌ها و پاسخ‌های مورد نظر به ریسک‌ها از سه رویکرد (۱) بررسی اسناد، (۲) طوفان فکری و مصاحبه و (۳) تکنیک دلفی استفاده شده است. در این مرحله ابتدا بررسی اسناد و مدارک موجود

می‌گیرد. در گام تحلیل ریسک، بررسی احتمال وقوع و پیامد هرکدام از ریسک‌ها دنبال می‌شود. در مرحله ارزیابی ریسک‌ها، به اولویت‌بندی ریسک‌ها و تعیین ریسک‌های بحرانی پرداخته می‌شود. در نهایت هدف پاسخ به ریسک، رسیدگی به ریسک‌های مختلف و نحوه برخورد با آن‌ها است. اگر نتوان خطری را پذیرفت، باید ریسک ناشی از آن خطر به وسیله اقدامات مختلف تا سطح مورد پذیرش کاهش داد (Ataei, 2017).



شکل ۱- فرآیند کلی مدیریت ریسک (Ataei, 2017)

### ۳- روش پژوهش

برای هر کدام از مجموعه‌های فازی و مجموعه‌های فازی شهودی عملگرهای زیادی تعریف شده است (Nezarat, et al., 2015; Ataei, 2016). همچنین برای مجموعه‌های فازی مردد نیز عملگرهای متنوعی تعریف شده که در واقع توسیعی از همان عملگرهای فازی هستند. در منطق کلاسیک عضویت در یک مجموعه به صورت صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که عضوی در یک مجموعه وجود داشته باشد، با یک و در غیر این صورت با صفر نشان داده می‌شود.

تفاوت عمده مجموعه‌های فازی کلاسیک و مجموعه‌های فازی مردد، استفاده از درجه‌های عضویت نسبت به یک درجه عضویت است که دقت حل مساله را افزایش می‌دهد (Zhu & Xu, 2013). در واقع فازی مردد اندازه‌گیری میزان عدم قطعیت را در حضور چندین تصمیم‌گیرنده میسر می‌سازد. هرچه داده‌های مساله تصادفی‌تر باشد کاربرد استفاده از مجموعه‌های فازی مردد مشهودتر و هرچه میزان تصادفی بودن کمتر باشد، مقدار آن کاهش می‌یابد. ایده اصلی

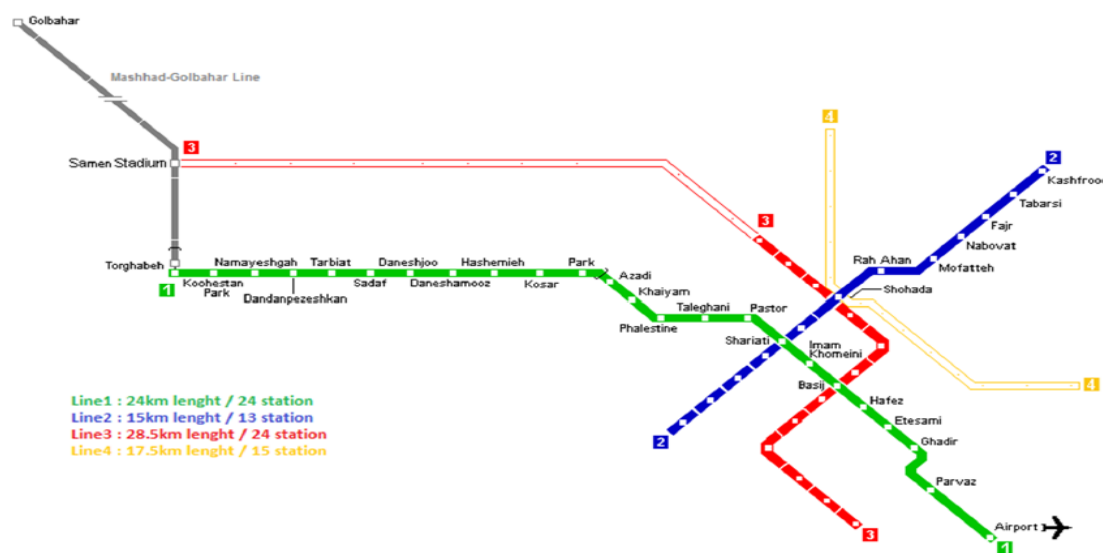
ارائه یک برنامه جامع مدیریتی برای پاسخ به ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در پروژه تهیه شده است. سپس ضمن تجمیع نظرات خبرگان، با استفاده از روش الکترون فازی مردم، رتبه‌بندی سلسله‌مراتبی پاسخ به ریسک‌ها بر اساس درجه اهمیت و برتری گزینه‌ها نسبت به یکدیگر انجام گرفته است. سپس پروژه مورد مطالعه و ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود و پاسخ‌های در نظر گرفته شده برای کاهش اثرات ریسک‌ها ارائه شده است.

#### ۴- مطالعه موردی

مسئولیت ساخت، بهره‌برداری و حمل‌ونقل ریلی درون شهری مشهد بر عهده شرکت قطار شهری مشهد است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش خط ۳ قطار شهری مشهد است. این خط طول حدود ۲۸/۵ کیلومتر را پوشش می‌دهد. بر مبنای پروفیل طراحی شده، خط ۳ دارای ۲۴ ایستگاه بوده و 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. در شکل ۲، نقشه جامع سامانه حمل‌ونقل ریلی شهر مشهد مقدس ارائه شده است.

انجام گرفته اما با توجه به مشکلاتی که در این زمینه می‌تواند وجود داشته باشد (از جمله اعتبار و صحت اسناد و احتمال تحریف اسناد با گذشت زمان) در ادامه از روش‌های دیگر نیز جهت شناسایی بهتر ریسک‌ها بهره گرفته شده است. پس از آن، فرآیند مصاحبه با افراد خبره و استفاده از سؤالات اساسی به عنوان بخشی از یک برنامه‌ریزی مصاحبه و جلسات هم‌فکری و مشاوره جهت استفاده از روش طوفان ذهنی انجام و تعداد ۲۰ ریسک زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مشخص گردید. در نهایت با استفاده از تکنیک دلفی تعداد ۱۴ ریسک زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی برای مطالعه موردی (پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد) به عنوان ریسک‌های بالقوه انتخاب شد. روش دلفی یک فرآیند قوی، مبتنی بر ساختار گروهی است. این روش به منظور بررسی نگرش‌ها و قضاوت‌های افراد و گروه‌های متخصص و نیز ایجاد هماهنگی بین دیدگاه‌ها، به نظرسنجی از افراد می‌پردازد. این نظرسنجی‌ها با استفاده از پرسشنامه طی چندین مرحله انجام می‌شود. در پایان، جمع‌بندی و تحلیل مجموعه دیدگاه‌ها و نظرهای افراد، مبنای تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد (Ataei, 2015).

در ادامه مرحله سوم، پرسشنامه جامعی جهت جمع‌آوری نظرات متخصصان پروژه مذکور برای رتبه‌بندی و



شکل ۲- نقشه جامع سامانه حمل‌ونقل ریلی شهر مشهد مقدس (شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد)

دلفی شناسایی شده است. همچنین پاسخ‌های پیش‌بینی شده جهت کاهش اثرات این ریسک‌ها در مطالعه موردی، در

ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بر اساس رویکردهای بررسی اسناد، طوفان فکری و مصاحبه و تکنیک

جدول ۲، ارائه گردیده است.

جدول ۲- ریسک‌های شناسایی شده و پاسخ به ریسک‌های تعیین شده

نماد	ریسک‌های شناسایی شده	نماد	پاسخ به ریسک تعیین شده	طبقه پاسخ
C <sub>1</sub>	کمبود ریزدانه برای ماشین حفاری و لیزهای ماسه‌ای	A <sub>1</sub>	بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهات اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی زمین‌شناسی	زمان اجرا
C <sub>2</sub>	لرزه‌خیزی منطقه	A <sub>2</sub>	حفاری گمانه‌های اکتشافی و تهیه نمونه‌ها	زمان اجرا
C <sub>3</sub>	برخورد به گسل و زون‌های گسلی	A <sub>3</sub>	استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات زیرسطحی	زمان اجرا
C <sub>4</sub>	وجود بولدرها در مسیر تونل	A <sub>4</sub>	حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل	زمان اجرا
C <sub>5</sub>	پدیده <i>swelling</i> در سازندهای مستعد	A <sub>5</sub>	تهیه نقشه تراز آب زیرزمینی	زمان اجرا
C <sub>6</sub>	انسداد و گل گرفتگی کاترهد و ابزار برش	A <sub>6</sub>	تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی	زمان اجرا
C <sub>7</sub>	سینه کار مختلط	A <sub>7</sub>	تعیین نقاط دارای پتانسیل هجوم آب	زمان اجرا
C <sub>8</sub>	وجود سفره آب زیرزمینی و تغییرات نفوذپذیری	A <sub>8</sub>	انجام آزمایش‌های لازم برای پیش‌بینی میزان چسبندگی زمین	زمان اجرا
C <sub>9</sub>	نشست زمین و تأثیر برسازه‌های مجاور	A <sub>9</sub>	بررسی میزان و نوع کانی‌ها و رسوبات تورمزا با استفاده از آزمایش‌های مختلف	زمان اجرا
C <sub>10</sub>	برخورد با قنوات دایر و متروکه و مشکلات تخمین آب ورودی	A <sub>10</sub>	مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل	زمان اجرا
C <sub>11</sub>	رسوبات و سنگ‌های با ساینده‌ی بالا در مسیر	A <sub>11</sub>	انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای	زمان اجرا
C <sub>12</sub>	برخورد با خاک‌های مساله‌دار (ریزشی، رمبنده روانگرا و خاک خورنده)	A <sub>12</sub>	انجام آزمون‌های تعیین ساینده‌ی سنگ و خاک و استفاده از معیارهای ژئوتکنیکی	زمان اجرا
C <sub>13</sub>	برخورد با موانع و تأسیسات زیرسطحی	A <sub>13</sub>	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)	زمان بهره‌برداری
C <sub>14</sub>	چسبندگی و سیمان شدگی خاک	A <sub>14</sub>	تخمین آب ورودی به تونل (روش‌های تجربی، تحلیلی و ...)	زمان اجرا
		A <sub>15</sub>	استفاده از سیستم زهکشی مناسب	زمان بهره‌برداری
		A <sub>16</sub>	کنترل و مانیتورینگ فشار سینه کار	زمان بهره‌برداری
		A <sub>17</sub>	استفاده از روش‌های بهسازی خاک	زمان اجرا و بهره‌برداری
		A <sub>18</sub>	تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری بر اساس آن	زمان اجرا
		A <sub>19</sub>	استفاده از شاتکریت به منظور افزایش چسبندگی مصالح	زمان اجرا
		A <sub>20</sub>	تزریق هوای فشرده جهت کاهش گل گرفتگی	زمان اجرا
		A <sub>21</sub>	حفر چاه تهویه در مسیر تونل	زمان اجرا و بهره‌برداری

احتمال وقوع ریسک‌ها را هدف قرار می‌دهند و پاسخ‌های واکنشی به دنبال کاهش اثر وقوع ریسک‌ها هستند (Ataei, 2016). مجموعه‌ای از پاسخ به ریسک‌ها که در دو دسته مذکور قرار گرفته‌اند، برای پروژه مورد نظر پیش‌بینی شده

با استفاده از روش‌های متفاوتی می‌توان راهبردهای مورد نظر در پاسخ به ریسک‌ها را طبقه‌بندی کرد. ترکیبی دربرگیرنده پاسخ‌های پیشگیرانه و واکنشی یک انتخاب مناسب و طبقه‌بندی مهم و اساسی است. پاسخ‌های پیشگیرانه

$$\sigma(h) = \sqrt{\frac{1}{l(h)} \sum_{\gamma_i, \gamma_j \in h} (\gamma_i - \gamma_j)^2}, \quad (2)$$

$$S(h) = \frac{1}{l(h)} \sum_{\gamma \in h} \gamma$$

پس از تعیین عملگرهای ارزش و انحراف معیار، بایستی مجموعه‌های سازگاری قوی و ضعیف و همچنین ناسازگاری قوی و ضعیف فازی مورد تعیین گردند. مجموعه سازگاری فازی مردد  $J_{C_{kl}}$  مجموعه همه معیارهایی است که گزینه  $A_k$  نسبت به گزینه  $A_l$  برتر است و به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود (Chen et al., 2015).

$$J_{C_{kl}} = \{j | S(h_{kj}) \geq S(h_{lj}), \sigma(h_{kj}) < \sigma(h_{lj})\} \quad (3)$$

که در آن  $j = \{j | j = 1, 2, \dots, n\}$  مجموعه‌ای شامل همه معیارها است. همچنین سازگاری ضعیف مجموعه  $J_{C'_{kl}}$  به صورت زیر تعریف می‌شود. تفاوت عمده میان  $J_{C_{kl}}$  و  $J_{C'_{kl}}$  در نامساوی مربوط به عملگر وارپانس نهفته است.

$$J_{C'_{kl}} = \{j | S(h_{kj}) \geq S(h_{lj}), \sigma(h_{kj}) \geq \sigma(h_{lj})\} \quad (4)$$

به طور مشابه برای ناسازگاری مجموعه فازی مردد  $J_{D_{kl}}$  که متشکل از همه معیارها است و  $A_k$  اولویت کمتری نسبت به  $A_l$  دارد، رابطه (۵) تعریف می‌گردد (Chen et al., 2015).

$$J_{D_{kl}} = \{j | S(h_{kj}) < S(h_{lj}), \sigma(h_{kj}) \geq \sigma(h_{lj})\} \quad (5)$$

شرایط ناسازگاری ضعیف مجموعه  $J_{D'_{kl}}$  به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$J_{D'_{kl}} = \{j | S(h_{kj}) < S(h_{lj}), \sigma(h_{kj}) < \sigma(h_{lj})\} \quad (6)$$

سپس جهت محاسبه ماتریس‌های سازگاری و ناسازگاری فازی مردد، نیاز به محاسبه شاخص انطباق  $C_{kl}$  و شاخص عدم سازگاری  $d_{kl}$  است.  $C_{kl}$  در الگوریتم فازی مردد به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود (Chen et al., 2015).

$$C_{kl} = \frac{\lambda_C \times |J_{C_{kl}}| + \lambda_{C'} \times |J_{C'_{kl}}|}{n} \quad (7)$$

در آن  $\lambda_C$  و  $\lambda_{C'}$  به ترتیب وزن‌های مجموعه‌های فازی مردد سازگار و ناسازگار است که به نظر تصمیم‌گیرندگان بستگی دارد. همچنین منظور از  $|J_{C_{kl}}|$ ، تعداد عناصر مجموعه  $J_{C_{kl}}$  است. شاخص  $C_{kl}$ ، نشان‌دهنده اهمیت نسبی  $A_k$  در رابطه با  $A_l$  است. شاخص ناسازگاری فازی مردد، نشان‌دهنده تفاوت نسبی  $A_k$  در رابطه با  $A_l$  در شرایط عدم توافق است.

است؛ بنابراین می‌توان با یک دید جامع و دقیق، تلفیقی از پاسخ‌های مورد نظر را ارائه و نقشه راه دقیقی را برای مقابله با ریسک‌ها تعیین کرد. در ادامه توضیحات مربوط به روش الگوریتم فازی مردد و استفاده از این روش جهت رتبه‌بندی سلسله مراتبی پاسخ به ریسک‌ها برای مطالعه موردی ارائه شده است.

## ۵- الگوریتم فازی مردد

فرض شود  $X$  یک مجموعه ثابت باشد؛ بنابراین مجموعه فازی مردد روی  $X$  تابعی است که اگر روی  $X$  به کار برده شود، یک زیر مجموعه از مقادیر متعلق به  $[0,1]$  را نتیجه می‌دهد. مجموعه فازی مردد به صورت زیر بیان می‌شود

$$A = \{ \langle x, h_A(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (1)$$

$h_A(x)$  مجموعه‌ای از مقادیر متعلق به  $[0,1]$  است که درجه عضویت‌های ممکن عنصر  $x \in X$  نسبت به مجموعه  $A$  را نمایش می‌دهد (Xia & Xu, 2011). مجموعه فازی مردد به عنوان یک تعمیم از مجموعه‌های فازی، در شرایطی که تعیین درجه عضویت عناصر در ابهام و تردید باشد، ابزار مفیدی است. در چنین مواردی مجموعه فازی مردد، به عنوان تعمیم مجموعه فازی، درجه عضویت یک عنصر را به مجموعه‌ای از مقادیر نسبت می‌دهد که توسط چندین مقدار بین صفر تا یک ارائه می‌شوند (Torra, 2010).

تصمیم‌گیری در شرایط فازی مردد به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که یکی از این روش‌ها، الگوریتم فازی مردد است. یک مساله تصمیم‌گیری شامل گزینه‌های  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  و معیارهای  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  را در نظر بگیرید. در روش الگوریتم فازی مردد پس از تعیین ماتریس تصمیم‌گیری که بر مبنای نتایج حاصل از پرسشنامه‌های مورد نظر به دست می‌آید، ابتدا بایستی عملگر ارزش و انحراف معیار گزینه‌ها، بر اساس معیارهای مساله تعیین گردند. جهت تعیین عملگر ارزش، بایستی میانگین کمی شده نظرات حاصل از پرسشنامه‌های مختلفی که توسط خبرگان تکمیل گردیده است، تعیین گردد. پس از آن محاسبه عملگر وارپانس و انحراف معیار گزینه‌ها انجام می‌گیرد. برای محاسبه عملگرهای میانگین و انحراف معیار از رابطه (۲) استفاده می‌شود (Chen, et al., 2015).

ریسک نیز یک مساله تصمیم‌گیری در مدیریت ریسک‌ها به وجود می‌آید، یعنی بایستی انتخاب یک راهبرد از بین چند راهبرد پاسخ مربوط به یک ریسک انجام گیرد. مدیر پروژه می‌بایست برای تمامی ریسک‌های موجود در پروژه برنامه پاسخ تهیه نماید. در زمان تهیه برنامه پاسخ گزینه‌های مختلفی وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند؛ بنابراین این امر فراتر از لیست کردن و رتبه‌بندی ریسک‌ها و پاسخ‌های مربوطه خواهد بود. در صورت رتبه‌بندی ریسک‌ها ممکن است توجهات بیشتر به ریسک‌هایی صورت گیرد که در رده‌های اول این رتبه‌بندی قرار گرفته و این کار در پروژه‌های بزرگ می‌تواند ضربات جبران‌ناپذیری را وارد کند؛ بنابراین نیاز به ایجاد یک برنامه جامع جهت رفع آثار منفی تمامی ریسک‌های موجود در پروژه‌ها وجود دارد.

پاسخ به ریسک‌ها به معنای انتخاب و به کارگیری گزینه‌های مناسب برای تعامل با ریسک‌های موجود در پروژه است.

یک بخش مهم موجود در مدیریت ریسک‌ها زمانی آشکار می‌شود که اقدامی عملی برای درمان ریسک‌ها مشخص و اجرا گردد. هدف این مرحله به طور کلی رسیدگی به ریسک‌های مختلف و نحوه برخورد با ریسک‌ها است. اگر خطرهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود در ساخت و اجرای پروژه‌های تونل‌سازی را نتوان حذف کرد یا آن را پذیرفت، باید ریسک ناشی از آن خطر به وسیله اقدامات مختلف تا سطحی که قابل پذیرش باشد، کاهش یابند.

با توجه به اینکه محدودیت‌های هزینه و زمان در اجرای پروژه‌ها وجود دارد؛ بنابراین نیاز است که مدیران پروژه‌های مهم، برنامه‌هایی برای پیاده‌سازی راهکارهایی برای مقابله با ریسک‌های موجود در آن پروژه را در اختیار داشته باشند. دستیابی به مؤثرترین ترکیبی از اقدامات عملی که با حداقل هزینه‌ها، سطح کلی ریسک‌ها را کاهش دهد، هدف اصلی رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌ها است.

رتبه‌بندی حاصل می‌تواند به عنوان یک نقشه و طرح اجرایی از پاسخ به ریسک‌های موجود که بر اساس اهمیت رتبه‌بندی شده‌اند، در دستور کار مدیران پروژه قرار گیرد. هدف اصلی این مقاله آن است که برنامه‌ای برای اولویت‌بندی پاسخ به ریسک‌های مذکور با استفاده از روش الکترون فازی مردد تدوین شود تا با صرف حداقل منابع، بالاترین نرخ کاهش ریسک به دست آید. این کار با استفاده از کاربرد روش‌های

شاخص عدم سازگاری نیز به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$d_{kl} = \frac{\max\{\lambda_D \times d(h_{kj}, h_{lj}), \lambda_B \times d(h_{kj}, h_{lj})\}}{\max d(h_{kj}, h_{lj})} \quad (8)$$

در صورت رابطه  $J \in J_{D_{kl}} \cup J_{B_{kl}}$  بوده و در مخرج آن  $h \in J$  است.  $d(h_{kj}, h_{lj})$  اندازه فاصله بین  $h_{kj}$  و  $h_{lj}$  است. ماتریس سازگاری فازی مردد و ماتریس ناسازگاری فازی مردد دارای روابط مکمل هستند. در مرحله بعد ماتریس غالب سازگاری و ماتریس جامع ناسازگاری تعریف می‌گردد. اگر شاخص تطابق فازی مردد  $C_{kl}$  از  $A_k$  نسبت به  $A_l$  بالاتر از سطح حداقل باشد، درجه برتری از  $A_k$  به  $A_l$  افزایش پیدا می‌کند. سطح تطابق فازی مردد را می‌توان به عنوان میانگین همه شاخص‌های تطابق فازی مردد به صورت رابطه (۹) زیر تعریف کرد.

$$\bar{c} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1, l \neq k}^m \frac{C_{kl}}{m(m-1)} \quad (9)$$

بر اساس سطح تطابق، ماتریس غالب سازگاری را می‌توان بیان کرد (Chen, et al., 2015). به همین ترتیب عناصر ماتریس جامع ناسازگاری مردد نیز توسط سطح اختلاف نظر اندازه‌گیری می‌شود.

$$\bar{d} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1, l \neq k}^m \frac{d_{kl}}{m(m-1)} \quad (10)$$

در نهایت ماتریس جامع که تسلط ترکیبی از عناصر ماتریس تسلط سازگاری و ماتریس جامع ناسازگاری است از طریق ضرب داخلی دو ماتریس یاد شده، ایجاد می‌گردد.

## ۶- تعریف مساله و حل آن

امروزه یک پروژه در چرخه عمر خود با مخاطرات و ریسک‌های فراوانی مواجه می‌شود. در صورت مواجهه با هر یک از مخاطرات باید نتایج ناشی از آن‌ها، ارزیابی و بررسی شود. با توجه به شکل ۱ که فرآیند کلی مدیریت ریسک‌ها را نشان می‌دهد، بعد از شناسایی، تحلیل و ارزیابی ریسک‌ها، مرحله پاسخ به ریسک است.

اکثر مدیران در هنگام تصمیم‌گیری، به‌خصوص زمانی که قرار است از بین چند راه‌حل برای یک مساله یکی را انتخاب کنند، دچار چالش می‌شوند. در مرحله پاسخ‌گویی به

عملگر ارزش و انحراف معیار می‌توان گزینه‌های متفاوتی را بر اساس معیارها ترسیم نمود. همچنین انواع مختلف سازگاری در مجموعه‌های فازی مردد را می‌توان به عنوان تطبیق روش، بر اساس سازگاری مجموعه بیان کرد. محاسبه عملگر ارزش گزینه‌ها بر مبنای معیارهای مساله (مطالعه موردی) انجام گرفته و نتایج حاصله در جدول ۳، نشان داده شده است.

فازی مردد انجام گرفته است.

مساله تصمیم‌گیری چند معیاره در این پژوهش با مجموعه گزینه‌های  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{21}\}$  (پاسخ‌های به ریسک تعیین شده) و معیارهای  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{14}\}$  (ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شناسایی شده) در نظر گرفته شده است. در محیط فازی مردد با توجه به مفاهیم

جدول ۳-مقادیر عملگر ارزش

$C_{14}$	$C_{13}$	$C_{12}$	$C_{11}$	$C_{10}$	$C_9$	$C_8$	$C_7$	$C_6$	$C_5$	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$	
۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۴۵	۰/۳	۰/۴	۱	۱	۰/۲	$A_1$
۱	۰/۲	۱	۱	۰/۴	۱	۱	۱	۱	۰/۹۵	۱	۰/۴	۰/۳	۱	$A_2$
۰/۲	۰/۹۵	۰/۲	۰/۲	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۹۵	۰/۷	۰/۲	۰/۲	۰/۶	۰/۷۵	۰/۶	۰/۳۵	$A_3$
۰/۸	۱	۰/۸۵	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۷	۰/۳۵	۰/۲	۰/۷۵	$A_4$
۰/۲	۰/۲	۰/۳۵	۰/۲	۰/۵۵	۰/۵۵	۱	۰/۲	۰/۵۵	۰/۵	۰/۲	۰/۳۵	۰/۲	۰/۲	$A_5$
۰/۴	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۶	۱	۰/۳	۰/۳	۰/۶۵	۰/۲	۰/۵	۰/۲	۰/۳	$A_6$
۰/۴	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۲	۰/۹۵	۰/۷۵	۱	۰/۲	۰/۶۵	۰/۶	۰/۲	۰/۷	۰/۲	۰/۴	$A_7$
۰/۸۵	۰/۲	۰/۴۵	۰/۲	۰/۲	۰/۳۵	۰/۲	۰/۵	۱	۰/۹۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۷	$A_8$
۰/۵۵	۰/۲	۰/۸۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲	۰/۴۵	۰/۹	۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۴۵	$A_9$
۰/۵۵	۰/۲	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۲	۰/۹	۰/۳۵	۰/۸۵	۰/۹	۰/۷	۰/۴	۰/۲	۰/۳۵	۱	$A_{10}$
۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۶	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۹	۱	۰/۲	$A_{11}$
۰/۴۵	۰/۲	۰/۲	۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲۵	۰/۶	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۸۵	۰/۲۵	۰/۲	۰/۳	$A_{12}$
۰/۲	۰/۹	۱	۰/۲	۰/۹	۱	۰/۶۵	۰/۹۵	۰/۵	۰/۲	۰/۷	۰/۶۵	۰/۲	۰/۸	$A_{13}$
۰/۲	۰/۶	۰/۴۵	۰/۲	۰/۸	۰/۹۵	۱	۰/۳۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۸۵	۰/۲	۰/۳	$A_{14}$
۰/۲	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲	۰/۹	۰/۲۵	۰/۹	۰/۲	۰/۲	۰/۶۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲	۰/۳	$A_{15}$
۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۷	۰/۵۵	۰/۸	۱	۰/۵۵	۰/۹	۰/۷۵	۰/۷	۰/۶۵	۰/۷	۰/۲	۰/۷	$A_{16}$
۰/۶۵	۰/۲	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۷	۰/۸	۰/۸۵	۰/۷	۱	۰/۸	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۲	۱	$A_{17}$
۱	۰/۳۵	۱	۰/۹	۰/۸۵	۰/۹۵	۱	۱	۱	۰/۹	۱	۱	۰/۷۵	۱	$A_{18}$
۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۵	۰/۵۵	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۴۵	۰/۲	۰/۳	$A_{19}$
۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۳۵	۰/۵	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	$A_{20}$
۰/۵۵	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۲	۰/۷	۰/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۴	$A_{21}$

به آن معنا که انجام گزینه بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهات اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی زمین‌شناسی می‌تواند اثرات منفی ریسک کمبود ریزدانه برای ماشین حفاری و لنت‌های ماسه‌ای را تا میزان ۲۰ درصد کاهش دهد.

اعداد موجود در جدول ۳، به معنای میزان تأثیر گزینه‌های پاسخ به ریسک‌های موجود، جهت کاهش اثر ریسک‌های شناسایی شده است. برای مثال، تأثیر پاسخ به ریسک  $A_1$  بر ریسک  $C_1$  برابر ۲۰ درصد بر اساس نظر خبرگان است.

نیز بیان نمود. در ادامه محاسبه عملگر واریانس گزینه‌ها با استفاده از رابطه ۲ و بر اساس معیارهای مساله انجام و نتایج حاصله در جدول ۴، نشان داده شده است.

همچنین تأثیر گزینه  $A_1$  بر ریسک  $C_2$  برابر ۱۰۰ درصد است به این معنا که این گزینه می‌تواند اثرات منفی این ریسک را به طور کامل برطرف نماید. تمامی تفاسیر مذکور را می‌توان بر اساس اعداد موجود برای سایر پاسخ‌ها و ریسک‌ها

جدول ۴- مقادیر انحراف معیار به دست آمده توسط عملگر انحراف معیار

$C_{14}$	$C_{13}$	$C_{12}$	$C_{11}$	$C_{10}$	$C_9$	$C_8$	$C_7$	$C_6$	$C_5$	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$	
۰/۱	۰	۰	۰/۱۷۳۲	۰	۰/۲	۰/۱۴۱۴	۰/۱۴۱۴	۰/۲۵۹۸	۰/۱	۰/۱۴۱۴	۰	۰	۰	$A_1$
۰	۰	۰	۰	۰/۱۴۱۴	۰	۰	۰	۰	۰/۰۸۶۶	۰	۰/۱۴۱۴	۰/۱	۰	$A_2$
۰	۰/۰۸۶۶	۰	۰	۰/۲۵۹۸	۰/۰۸۶۶	۰/۰۸۶۶	۰/۱	۰	۰	۰/۲	۰/۱۶۵۸	۰	۰/۱۶۵۸	$A_3$
۰/۲	۰	۰/۱۶۵۸	۰/۲	۰/۳	۰	۰/۱	۰/۳۵۷۰	۰/۲۵۹۸	۰/۱۶۵۸	۰/۱۷۳۲	۰/۰۸۶۶	۰	۰/۲۵۹۸	$A_4$
۰	۰	۰/۱۶۵۸	۰	۰/۲۵۹۸	۰/۳۵۷۰	۰	۰	۰/۲۱۷۹	۰/۱	۰	۰/۱۶۵۸	۰	۰	$A_5$
۰/۲	۰	۰/۱	۰	۰/۱	۰/۴	۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱۶۵۸	۰	۰/۳۳۱۶	۰	۰/۱	$A_6$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
۰/۱۶۵۸	۰/۰۸۶۶	۰/۱	۰/۲۵۹۸	۰/۲	۰	۰/۲۵۹۸	۰/۱	۰/۲۵۹۸	۰/۳	۰/۲۵۹۸	۰/۱	۰	۰/۳	$A_{16}$
۰/۱۶۵۸	۰	۰/۰۸۶۶	۰/۱۶۵۸	۰/۳	۰/۲۴۴۹	۰/۱۶۵۸	۰/۳۳۱۶	۰	۰/۲	۰/۱۶۵۸	۰/۱۶۵۸	۰	۰	$A_{17}$
۰	۰/۱۶۵۸	۰	۰/۱	۰/۰۸۶۶	۰/۰۸۶۶	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰	۰/۲۵۹۸	۰	$A_{18}$
۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۰۸۶۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۶۵۸	۰	۰/۱	$A_{19}$
۰	۰	۰/۱	۰	۰	۰/۱۶۵۸	۰/۲۲۳۶	۰	۰/۱۴۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	$A_{20}$
۰/۲۵۹۸	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۲	$A_{21}$

در ادامه مجموعه‌های سازگاری قوی و مجموعه‌های سازگاری ضعیف فازی مردد ایجاد شده‌اند. برای ایجاد مجموعه‌های سازگاری قوی و ضعیف، از روابط ریاضی ۳ و ۴ و همچنین از مقادیر موجود در جدول ۳ و جدول ۴، استفاده شده است. بر مبنای رابطه ۳، گزینه‌ای در مقایسه انتخاب می‌گردد که به دو لحاظ برتری داشته باشد. اول آنکه میانگین آن گزینه بزرگ‌تر یا مساوی گزینه دوم و انحراف معیار آن (پراکندگی نظرات خبرگان) نسبت به دیگری کمتر باشد. این نکته نشان دهنده آن است که جواب به دست آمده ارزش بیشتری داشته و خبرگان همگی نسبت به برتری آن نسبت

هدف از محاسبه میزان انحراف معیار، تعیین میزان پراکندگی داده‌ها است. انحراف معیار در برخی از سلول‌های جدول برابر صفر است. اعداد صفر موجود در جدول ۳، نشان دهنده این نکته است که نظرات همه خبرگان در مورد تأثیر پاسخ به ریسک بر یک ریسک خاص یکسان بوده است. هرچه میزان انحراف معیار کمتر و نزدیک‌تر به صفر باشد، نشان دهنده آن است که نظرات افراد خبره به یکدیگر نزدیک‌تر بوده است. به طور کلی از نتایج حاصل از انحراف معیارها می‌توان بیان کرد که داده‌های پرت در این پژوهش بسیار کم بوده و داده‌ها قابل اطمینان هستند.

$C_2$  و  $C_3$  قرار گرفته‌اند گزینه بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهت اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی زمین‌شناسی (گسل و...) در دو ریسک برخورد به گسل و زون‌های گسلی و لرزه‌خیزی منطقه نسبت به گزینه حفاری گمانه‌های اکتشافی و تهیه نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده دارای سازگاری قوی‌تر و برتری است. این گزینه توانایی پوشش بیشتری از این ریسک‌ها را برای کاهش اثرات منفی آن‌ها دارد. همچنین در رابطه با ریسک  $C_8$  (وجود سفره آب زیرزمینی و تغییرات نفوذپذیری)، گزینه  $A_2$  نسبت به گزینه  $A_1$  دارای برتری است. نتایج حاصل از ایجاد مجموعه سازگاری قوی به طور خلاصه در جدول ۵، نشان داده شده است.

به گزینه دوم هم نظر هستند و جواب آن‌ها دارای درصد اطمینان بالاتری است. نتیجه یک ماتریس  $21 \times 21$  خواهد بود که به مقایسه گزینه‌ها با یکدیگر بر مبنای ریسک‌ها می‌پردازد. در این مقایسه بین گزینه‌ها، شرایط بیان شده در رابطه ۳ برای هر ریسک چک شده و در صورتی که شرایط برقرار باشند به معنای سازگاری قوی است. به همین صورت مقایسه گزینه‌ها برای تمامی ۱۴ ریسک موجود در پروژه انجام و در نهایت در درایه ماتریس مورد نظر ریسک‌هایی که سازگاری قوی با گزینه مورد نظر در مقایسه با گزینه‌ای دیگر دارند، قرار می‌گیرد.

بر اساس خروجی ماتریس  $J_C$  (ماتریس سازگاری فازی مردد قوی) نتایج زیر را می‌توان استنباط کرد. برای مثال در درایه مربوط به مقایسه بین گزینه‌های  $A_1$  و  $A_2$ ، دو ریسک

جدول ۵- ماتریس  $J_C$  (ماتریس سازگاری فازی مردد قوی)

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	...	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۲,۳	۳	...	۲	۳	۸	۲,۳,۷
$A_2$	۴,۵,۶,۷,۸,۹,۱۱,۱۴	-	۱,۴,۷,۸,۹	...	۵,۹,۱۱	۱,۹	۶,۸,۹,۱۲	۱,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۱,۱۲,۱۴
$A_3$	۷,۸,۹	۲	-	...	۱۳	-	۸,۹	۲,۳,۴,۷,۸,۱۳
$A_4$	۸,۹	-	۴,۱۳	...	۱۳	۹	۸,۹	۴,۵,۸,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴
$A_5$	۶,۸	-	۸	...	-	-	۸	۵,۸
$A_6$	۸	-	۸	...	-	-	۸	۵,۸
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$A_{16}$	۷,۹	۳	۹,۱۰	...	۹,۱۳	۳,۹	۹	۳,۴,۷,۱۱,۱۲,۱۳
$A_{17}$	۶	-	۱	...	-	۱	۶,۸,۱۲	۱,۳,۴,۶,۸,۱۱,۱۲,۱۴
$A_{18}$	۴,۶,۷,۸,۹,۱۱,۱۴	۳,۱۰	۱,۳,۴,۷,۸,۱۰	...	-	۱,۳,۱۰	۶,۸,۹,۱۲	۱,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴
$A_{19}$	۹	۱۰	-	...	-	-	۹,۱۲	۳
$A_{20}$	-	-	-	...	-	-	-	-
$A_{21}$	۶	-	-	...	-	-	-	-

نمونه‌ای از نتایج به دست آمده از ماتریس سازگاری قوی برای ریسک وجود سفره آب زیرزمینی و تغییرات نفوذپذیری در جدول ۶، نشان شده است. مشابه جدول ۶ را می‌توان برای

برتری‌ها را می‌توان برای یک ریسک خاص و بر مبنای مقایسه بین دو گزینه بیان کرد؛ بنابراین می‌توان با استفاده از محاسبات انجام‌شده تا این مرحله نیز به نتایجی دست یافت.

تمامی ۱۴ ریسک موجود با استفاده از ماتریس سازگاری قوی ایجاد کرد.

### جدول ۶- مقایسه گزینه‌های پاسخ به ریسک برای وجود سفره آب زیرزمینی و تغییرات نفوذپذیری

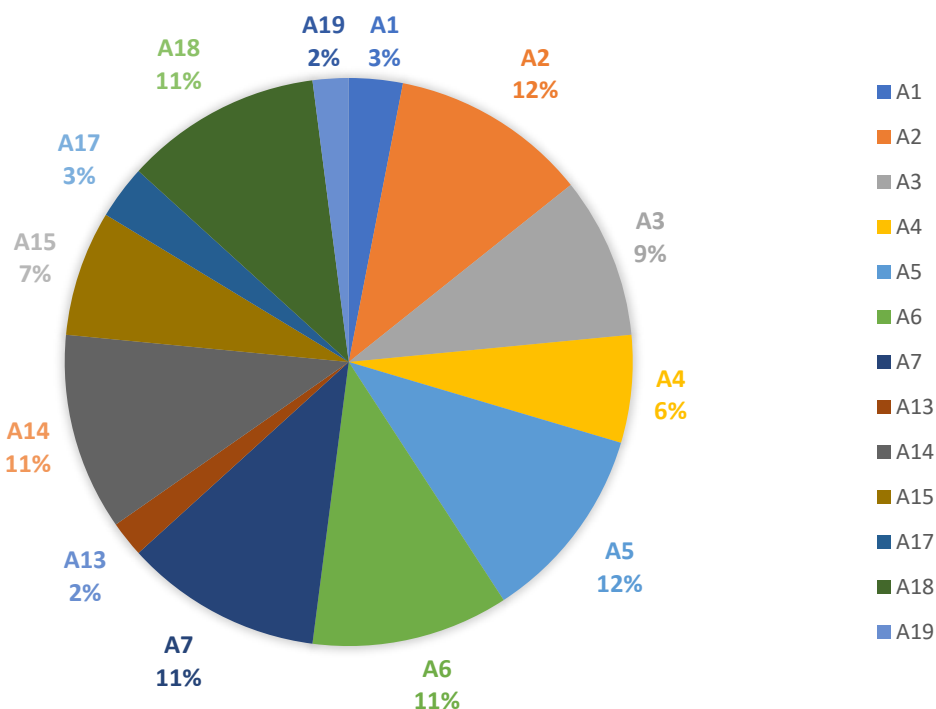
پاسخ به ریسک انتخاب شده	برتری قوی نسبت به سایر گزینه‌ها
بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهات اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی	<ul style="list-style-type: none"> <li>• مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل</li> <li>• کنترل و مانیتورینگ فشار سینه کار</li> <li>• تزریق هوای فشرده جهت کاهش گل گرفتگی</li> </ul>
حفاری گمانه‌های اکتشافی و تهیه نمونه‌ها دست‌خورده و دست‌نخورده	<ul style="list-style-type: none"> <li>• بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهات اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی</li> <li>• استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات زیرسطحی</li> <li>• حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل</li> <li>• مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل</li> <li>• انجام آزمون‌های تعیین ساینده‌گی سنگ و خاک و استفاده از معیارهای ژئوتکنیکی</li> <li>• رعایت و اجرای صحیح و به موقع دستورالعمل‌های فنی حفاری به منظور محدودسازی نشست القایی</li> <li>• استفاده از سیستم زهکشی مناسب</li> <li>• کنترل و مانیتورینگ فشار سینه کار</li> <li>• استفاده از روش‌های بهسازی خاک</li> <li>• تزریق هوای فشرده جهت کاهش گل گرفتگی</li> <li>• حفر چاه تهویه در مسیر تونل</li> </ul>
استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات زیرسطحی	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهات اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی</li> <li>➤ حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل</li> <li>➤ مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل</li> <li>➤ رعایت و اجرای صحیح و به موقع دستورالعمل‌های فنی حفاری به منظور محدودسازی نشست القایی</li> <li>➤ استفاده از سیستم زهکشی مناسب</li> <li>➤ کنترل و مانیتورینگ فشار سینه کار</li> <li>➤ استفاده از روش‌های بهسازی خاک</li> <li>➤ تزریق هوای فشرده جهت کاهش گل گرفتگی</li> <li>➤ حفر چاه تهویه در مسیر تونل</li> </ul>
استفاده از شاتکریت به منظور افزایش چسبندگی مصالح	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل</li> <li>✓ انجام آزمون‌های تعیین ساینده‌گی سنگ و خاک و استفاده از معیارهای ژئوتکنیکی</li> </ul>
تزریق هوای فشرده جهت کاهش گل گرفتگی	<ul style="list-style-type: none"> <li>- برتری قوی نسبت به سایر گزینه‌ها ندارد</li> </ul>
حفار چاه تهویه در مسیر تونل	<ul style="list-style-type: none"> <li>• برتری قوی نسبت به سایر گزینه‌ها ندارد</li> </ul>

جدول ۶، بیان‌کننده این نکته است که در رابطه با یک ریسک خاص مانند  $C_1$  (وجود سفره آب زیرزمینی و تغییرات نفوذپذیری)، کدام گزینه‌ها نسبت به دیگری دارای برتری قوی است. مدیر یک پروژه می‌تواند از این جدول و سایر جدول‌هایی

روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات زیرسطحی، تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی، تعیین نقاط دارای پتانسیل هجوم آب، تخمین آب ورودی به تونل (روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی) و تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری بر اساس آن می‌توان تقریباً ۸۰ درصد از ریسک بیان شده جلوگیری و در راستای کاهش اثرات منفی آن اقدام کرد. برای تمامی ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی شناسایی شده می‌توان همانند شکل ۳ را ایجاد و در راستای استفاده از آن برآمد.

که می‌توان برای بقیه ریسک‌ها تنظیم کرد، در راستای جلوگیری از وقوع و کاهش اثرات منفی ریسک‌ها بهره ببرد. اگر مدیر پروژه بین دو پاسخ ریسک دارای شک و تردید برای اجرا باشد، این جدول‌ها می‌توانند راهنمای مناسبی برای انتخاب گزینه‌های برتر باشند.

در شکل ۳، درصد تأثیر هر گزینه بر ریسک وجود سفره آب زیرزمینی و تغییرات نفوذپذیری نشان داده شده است. بر مبنای این شکل می‌توان بیان کرد که با انجام راهکارهای حفاری گمانه‌های اکتشافی و تهیه نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده، تهیه نقشه تراز آب زیرزمینی، استفاده از



شکل ۳- درصد تأثیر گزینه‌ها بر ریسک وجود سفره آب زیرزمینی و تغییرات نفوذپذیری

هستند. نتایج حاصل از ایجاد ماتریس سازگاری ضعیف در جدول ۷، نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از ماتریس سازگاری ضعیف می‌توان برتری ضعیف گزینه‌ها نسبت به یکدیگر را برای یک ریسک خاص همانند جدول ۶ و همچنین درصد تأثیر گزینه‌ها را نیز مانند شکل ۳، ایجاد کرد.

به صورت مشابه مجموعه سازگاری ضعیف با استفاده از رابطه ۴ ایجاد شده است. بر مبنای این رابطه، گزینه‌ای در مقایسه انتخاب می‌گردد که به دو لحاظ برتری داشته باشد. میانگین یک گزینه بزرگ‌تر یا مساوی دیگری و بعلاوه انحراف معیار آن گزینه بزرگ‌تر یا مساوی گزینه دوم باشد. دو ماتریس سازگاری قوی و ضعیف دارای روابط مکمل با یکدیگر

جدول ۷- ماتریس  $J_C$  (ماتریس سازگاری فازی مردد ضعیف)

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	...	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	-	۵,۶,۱۱,۱۴	-	...	۴,۵,۶,۷,۹,۱۱,۱۴	۹
$A_2$	۱۰	-	۵	۲,۳	...	۲,۳,۵,۱۰	-
$A_3$	۱,۴,۱۰,۱۳	۳,۱۰,۱۳	-	۳,۹	...	۱,۳,۴,۷,۱۰,۱۳	۹,۱۰
$A_4$	۱,۴,۵,۷,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴	۱۰	۱,۵,۶,۱۱,۱۲,۱۴	-	...	۱,۳,۴,۵,۶,۷,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴	۱,۶,۷,۱۰
$A_5$	۹,۱۰,۱۲	۱۰	۵,۶,۱۲	۳	...	۳,۵,۶,۹,۱۰,۱۲	۹
$A_6$	۱,۵,۹,۱۰,۱۲,۱۴	۳	۵,۶,۱۲,۱۴	۳,۹	...	۱,۳,۵,۷,۹,۱۰,۱۴	۳,۹
...	...	...	...	...	...	...	...
$A_{16}$	۱,۴,۵,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴	۱۰,۱۳	۱,۴,۵,۶,۱۱,۱۲,۱۴	۳	...	۱,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۳,۱۴	۱,۵,۶,۹
$A_{17}$	۴,۵,۷,۸,۹,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴	۳,۱۰	۵,۷,۹,۱۱,۱۲,۱۴	۳,۸,۹	...	۳,۴,۵,۷,۹,۱۰,۱۱,۱۴	۷,۹,۱۰
$A_{18}$	۱۰,۱۳	۲,۱۳	۲,۵,۱۱	۲,۹	...	۲,۵,۱۰,۱۱,۱۳	۲,۹
$A_{19}$	۱,۱۰	۳	-	۳	...	۱,۳,۱۰	۹
$A_{20}$	۱۲	-	۶,۱۲	-	...	-	۹
$A_{21}$	۱,۴,۵,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴	۳,۱۰,۱۳	۱,۵,۶,۱۱,۱۲,۱۴	۲,۳,۸	...	۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴	-

گزینه بزرگ‌تر یا مساوی گزینه دوم باشد.  
ماتریس ناسازگاری قوی، نشان دهنده اولویت کمتر  
گزینه‌ها نسبت به یکدیگر است. ماتریس  $J_D$  (ماتریس  
ناسازگاری قوی) در جدول ۸، ارائه شده است.

ماتریس‌های ناسازگاری قوی و ضعیف با استفاده از  
روابط ۵ و ۶ ایجاد می‌شوند. برای به دست آوردن ماتریس  
ناسازگاری قوی با استفاده از رابطه ۵ گزینه‌ای در مقایسه  
انتخاب می‌گردد که میانگین آن کمتر و انحراف معیار آن

جدول ۸- ماتریس  $J_D$  (ماتریس ناسازگاری فازی مردد قوی)

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	...	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۴,۵,۶,۷,۸,۹,۱۱,۱۴	۷,۸,۹	۸,۹	...	۴,۶,۷,۸,۹,۱۱,۱۴	۹	-	۶
$A_2$	۲,۳	-	۲	-	...	۳,۱۰	۱۰	-	-
$A_3$	۳	۱,۴,۷,۸,۹	-	۴,۱۳	...	۱,۳,۴,۷,۸,۱۰	-	-	-
$A_4$	۳	۱,۴,۵,۶,۷,۸,۱۱,۱۲,۱۴	۷,۸,۱۰	-	...	۱,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴	-	-	-
$A_5$	۳	۳,۵,۶,۹,۱۲	۹	۹	...	۳,۶,۹,۱۰,۱۲	۱۲	-	۶,۱۰
$A_6$	۳	۱,۵,۶,۷,۹,۱۲,۱۴	۳,۹	-	...	۱,۳,۵,۶,۷,۹,۱۰,۱۲,۱۴	۱۲	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$A_{16}$	۳,۸	۱,۴,۵,۶,۷,۸,۱۱,۱۲,۱۴	۸	۱,۴,۵,۸,۱۱,۱۳	...	۱,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴	-	-	-
$A_{17}$	۳	۴,۵,۷,۸,۹,۱۱,۱۲,۱۴	۸,۱۰	۱۳	...	۳,۴,۵,۷,۸,۹,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴	-	-	-
$A_{18}$	۲	۵,۹,۱۱	۱۳	۱۳	...	-	-	-	۱۳
$A_{19}$	۳	۱,۹	-	۹	...	۱,۳,۱۰	-	-	-
$A_{20}$	۸	۶,۸,۹,۱۲	۸,۹	۸,۹	...	۶,۸,۹,۱۲	۹,۱۲	-	-
$A_{21}$	۲,۳,۷	۱,۴,۵,۶,۷,۸,۱۱,۱۲,۱۴	۲,۳,۴,۷,۸,۱۳	۴,۵,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴	...	۱,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۴	۳	-	-

شده است. در ماتریس ناسازگاری ضعیف با کمک رابطه

ماتریس  $J_D$  (ناسازگاری ضعیف) در جدول ۹، آورده

۶، گزینه‌ای در مقایسه انتخاب می‌گردد که میانگین و انحراف معیار آن گزینه کمتر از گزینه دوم باشد.

جدول ۹- ماتریس  $J_D$  (ماتریس ناسازگاری فازی مردد ضعیف)

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	...	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۱۰	۱,۴,۱۰,۱۳	...	۱۰,۱۳	۱,۱۰	۱۲	۱,۴,۵,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴
$A_2$	-	-	۳,۱۰,۱۳	...	۲,۱۳	۳	-	۱۰,۱۳
$A_3$	۵,۶,۱۱,۱۴	۵	-	...	۲,۵,۱۱	-	۶,۱۲	۱,۵,۶,۱۱,۱۲,۱۴
$A_4$	-	۲,۳	۳,۹	...	۲,۹	۳	-	۲,۳
$A_5$	۴,۷,۱۱,۱۴	۲	۱,۴,۷,۱۳	...	۲,۱۱,۱۳	۱	-	۱,۲,۳,۴,۷,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴
$A_6$	۴,۶,۷,۱۱	۲,۱۰	۱,۴,۱۰,۱۳	...	۲,۱۱,۱۳	-	۶	۱,۲,۴,۶,۷,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$A_{16}$	-	۲	۳	...	۲	-	-	۲,۸,۱۴
$A_{17}$	-	۲	۴,۱۳	...	۲,۱۳	-	-	۲,۱۳
$A_{18}$	-	-	-	...	-	-	-	-
$A_{19}$	۴,۵,۶,۷,۸,۱۱,۱۴	۲,۵	۱,۴,۷,۸,۱۰,۱۳	...	۲,۵,۱۱,۱۳	-	۶,۸	۱,۲,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴
$A_{20}$	۴,۵,۶,۷,۹,۱۱,۱۴	۲,۳,۵,۱۰	۱,۳,۴,۷,۱۰,۱۳	...	۲,۵,۱۰,۱۱,۱۳	۱,۳,۱۰	-	۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴
$A_{21}$	۹	-	۹,۱۰	...	۲,۹	۹	۹	-

قوی با توجه به تأثیر بیشتر، ضریب یک و ماتریس‌های سازگاری و ناسازگاری ضعیف، ضریب دوسوم می‌گیرد. حال با استفاده از دو ماتریس سازگاری قوی و سازگاری ضعیف و ریسک‌های تعیین شده در درایه‌های این ماتریس‌ها، شاخص سازگاری محاسبه و در نهایت ماتریس سازگاری فازی مردد ایجاد گردیده است. ماتریس جامع سازگاری به صورت جدول ۱۰، ارائه شده است.

برای پیاده‌سازی روش، وزن نسبی مجموعه‌های سازگار و ناسازگار فازی مردد به ترتیب به صورت  $\lambda = (\lambda_C, \lambda_C, \lambda_D, \lambda_D) = (1, \frac{2}{3}, 1, \frac{2}{3})$  در نظر گرفته شده است. بردار  $\lambda$ ، نشان دهنده تأثیر بیشتر ماتریس‌های سازگاری و ناسازگاری قوی نسبت به ماتریس‌های ضعیف است. به این ترتیب که ماتریس‌های سازگاری و ناسازگاری

جدول ۱۰- ماتریس سازگاری فازی مردد

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	...	$A_{16}$	$A_{17}$	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۰/۰۹۶	۰/۱۷۶۶	۰/۰۴۸	۰/۱۷۶۶	۰/۱۷۶۶	...	۰/۰۹۶	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۲۷۳۱	۰/۲۷۳۱	۰/۱۷۶۲
$A_2$	۰/۴۱۶۲	-	۰/۲۷۲۲	۰/۴۹۶۳	۰/۲۷۲۲	۰/۴۰۰۳	...	۰/۴۶۴۲	۰/۴۱۶۲	۰/۱۴۴۰	۰/۱۶۰۳	۰/۳۲۰۶	۰/۴۸۰
$A_3$	۰/۲۷۲۶	۰/۱۴۴۵	-	۰/۲۰۸۳	۰/۱۷۶۶	۰/۲۲۴۶	...	۰/۰۸۰۲	۰/۲۰۸۳	۰/۰۴۸	۰/۱۹۲۹	۰/۲۸۸۹	۰/۳۵۲۳
$A_4$	۰/۳۵۳۳	۰/۰۳۲۱	۰/۲۸۸۹	-	۰/۳۵۳۳	۰/۲۷۳۱	...	۰/۳۵۳۳	۰/۱۴۴۵	۰/۰۴۸	۰/۳۶۹۶	۰/۴۱۷۶	۰/۴۶۴۶
$A_5$	۰/۱۹۲۵	۰/۰۳۲۱	۰/۱۴۴۵	۰/۰۸۰۲	-	۰/۰۹۶۵	...	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	-	۰/۱۲۸۶	۰/۲۴۰۹	۰/۱۲۸۲
$A_6$	۰/۲۴۰۹	۰/۰۳۲۱	۰/۱۷۶۶	۰/۱۱۲۳	۰/۱۹۲۹	-	...	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	-	۰/۱۹۲۹	۰/۲۷۳۱	۰/۱۶۰۳
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$A_{16}$	۰/۳۵۳۳	۰/۱۱۲۳	۰/۳۲۱۱	۰/۱۲۸۲	۰/۴۴۹۳	۰/۳۶۹۱	...	-	۰/۲۵۶۳	۰/۰۹۶	۰/۴۴۹۸	۰/۴۰۱۸	۰/۳۸۴۵
$A_{17}$	۰/۳۳۷۴	۰/۰۶۴۳	۰/۲۴۰۹	۰/۲۸۸۵	۰/۳۳۶۹	۰/۴۴۸۸	...	۰/۲۸۸۰	-	-	۰/۳۳۷۴	۰/۴۰۱۳	۰/۴۸۰۵
$A_{18}$	۰/۴۰۰۳	۰/۱۶۰۳	۰/۳۸۴۵	۰/۵۹۲۳	۰/۳۳۶۵	۰/۵۲۸۵	...	۰/۵۶۰۲	۰/۵۴۴۳	-	۰/۲۷۲۶	۰/۳۵۲۸	۰/۵۹۲۳
$A_{19}$	۰/۱۱۲۳	۰/۰۸۰۲	-	۰/۰۳۲۱	۰/۱۲۸۲	۰/۰۴۸	...	-	-	-	-	۰/۱۹۲۵	۰/۰۸۰۲
$A_{20}$	۰/۰۳۲۱	-	۰/۰۶۴۳	-	-	۰/۰۳۲۱	...	-	-	-	۰/۰۶۴۳	-	۰/۰۳۲۱
$A_{21}$	۰/۳۳۷۴	۰/۰۹۶۵	۰/۱۹۲۹	۰/۰۹۶۵	۰/۳۸۵۴	۰/۳۲۱۶	...	۰/۰۹۶۴	۰/۰۶۴۳	۰/۰۳۲۱	۰/۳۵۳۷	۰/۳۸۵۹	-

مسیر تونل در مقایسه با گزینه استفاده از روش‌های بهسازی خاک در تقابل با ریسک‌ها برابر ۰/۰۶۴۳ بوده که میزان سازگاری پایینی است. برای جواب به این نکته که کدام گزینه نسبت به گزینه دیگر برتری دارد، بایستی سطح همبستگی فازی مردود محاسبه گردد. سپس اعداد موجود با سطح همبستگی فازی مردود مقایسه شود. همچنین به صورت مشابه، ماتریس جامع ناسازگاری فازی مردود در جدول ۱۱ و با استفاده از رابطه ۸ محاسبه گردیده است.

جدول ۱۰، نشان دهنده مقایسه دوبه‌دو گزینه‌های پاسخ به ریسک‌ها بر مبنای میزان سازگاری راهکارها در تقابل با ریسک‌های شناسایی شده است. میزان سازگاری گزینه تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری بر اساس آن در مقایسه با گزینه حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل در تقابل با ریسک‌ها برابر ۰/۵۹۲۳ است. برای مثالی دیگر میزان سازگاری گزینه حفر چاه تهویه در

جدول ۱۱- ماتریس ناسازگاری فازی مردود

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	...	$A_{16}$	$A_{17}$	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۰/۸۷۴۰	۰/۶۶۶۶	۰/۵۴۰۷	۰/۴۹۸۷	۰/۴۹۸۷	...	۰/۷۴۵۴	۰/۶۸۷۷	۰/۸۷۴۰	۰/۳۱۲۳	۰/۰۸۴۰	۰/۳۸۰۵
$A_2$	۰/۸۷۴۰	-	۰/۶۲۴۶	۰/۳۳۲۵	۰/۲۰۸۱	۰/۲۴۹۳	...	۰/۶۶۷۹	۰/۴۴۳۹	۱	۰/۱۲۵۹	-	۰/۲۴۹۳
$A_3$	۰/۳۳۲۳	۰/۸۱۱۰	-	۰/۶۶۶۶	۰/۳۶۳۱	۰/۴۰۰۶	...	۰/۶۶۷۹	۰/۸۱۱۰	۰/۸۱۱۰	-	۰/۱۷۶۵	۰/۴۸۳۶
$A_4$	۰/۸۱۱۰	۰/۴۳۸۲	۰/۴۱۰۱	-	۰/۳۷۵۳	۰/۳۷۵۳	...	۰/۸۷۸۹	۰/۵۶۱۷	۱	۰/۲۴۹۳	-	۰/۲۷۹۷
$A_5$	۰/۸۱۱۰	۰/۸۱۱۰	۰/۶۶۶۶	۰/۵۰۱۳	-	۰/۵۳۱۹	...	۰/۶۶۶۶	۰/۵۶۱۷	۰/۸۱۱۰	۰/۲۴۸۳	-	۱
$A_6$	۰/۶۲۴۷	۰/۸۷۴۰	۰/۶۶۶۶	۰/۵۰۱۳	۰/۶۶۶۶	-	...	۰/۶۶۶۳	۱	۰/۸۷۴۰	۰/۱۱۸۹	۰/۲۶۶۰	۰/۵۰۱۶
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$A_{16}$	۰/۴۳۸۳	۱	۰/۷۲۵۲	۰/۸۷۸۹	۰/۶۴۲۶	۰/۷۴۸۲	...	-	۰/۵۴۵۸	۱	-	-	۰/۳۳۲۵
$A_{17}$	۰/۴۳۸۳	۱	۰/۴۳۸۲	۰/۳۱۲۳	۰/۱۸۶۴	۰/۲۱۳۲	...	۰/۶۶۷۹	-	۰/۸۱۶۸	-	-	۰/۲۲۱۳
$A_{18}$	۰/۳۱۲۳	۰/۲۴۸۲	۰/۷۵۰۷	۱	-	-	...	۰/۷۲۵۲	-	-	-	-	۰/۱۳۲۵
$A_{19}$	۰/۶۸۷۷	۰/۸۷۴۰	۰/۶۶۶۶	۰/۵۴۰۷	۰/۳۸۹۲	۰/۶۶۷۸	...	۰/۶۶۶۶	۰/۸۷۴۰	۰/۸۷۴۰	-	۰/۴۴۲۷	۰/۶۶۶۸
$A_{20}$	۰/۳۳۲۵	۰/۸۷۴۰	۰/۶۶۶۶	۰/۵۴۰۷	۱	۰/۶۶۶۶	...	۰/۹۲۷۹	۰/۷۵۰۷	۰/۸۷۴۰	۰/۶۶۶۳	-	۰/۶۶۶۸
$A_{21}$	۱	۰/۷۵۰۷	۱	۱	۰/۸۵۶۳	۰/۷۵۲۶	...	۰/۶۸۷۸	۱	۰/۸۰۱۱	۰/۵۸۵۸	۰/۲۴۸۹	-

سازگاری عدد یک و اگر  $f_{C_{kl}} < \bar{c}$  آنگاه درایه ماتریس، عدد صفر خواهد گرفت. سطح همبستگی محاسبه شده در این پژوهش برابر با ۰/۱۹۶۲ است؛ بنابراین اگر هرکدام از درایه‌های ماتریس سازگاری فازی مردود بزرگ‌تر با مساوی ۰/۱۹۶۲ باشد، عدد یک و هرکدام کوچک‌تر بوده، صفر گرفته است. نتایج حاصله در جدول ۱۲، ماتریس تسلط سازگاری) نشان داده شده است.

در ادامه سطح همبستگی فازی مردود با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شده و شناسایی ماتریس تسلط سازگاری انجام گرفته است.

سطح همبستگی فازی مردود با تمام درایه‌های ماتریس سازگاری فازی مردود مقایسه شده و سپس اگر  $f_{C_{kl}} \geq \bar{c}$  (سطح همبستگی فازی مردود بزرگ‌تر مساوی درایه ماتریس سازگاری فازی مردود) آنگاه درایه مربوط به ماتریس تسلط

جدول ۱۲- ماتریس تسلط سازگاری

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$	$A_{15}$	$A_{16}$	$A_{17}$	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰
$A_2$	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱
$A_3$	۱	۰	-	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱
$A_4$	۱	۰	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱
$A_5$	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_6$	۱	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_7$	۱	۰	۱	۰	۱	۱	-	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_8$	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
$A_9$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	-	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱
$A_{10}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{11}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
$A_{12}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
$A_{13}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱
$A_{14}$	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	-	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_{15}$	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_{16}$	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	-	۱	۰	۱	۱	۱
$A_{17}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۰	۱	۱	۱
$A_{18}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۱	۱	۱
$A_{19}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	-	۰
$A_{20}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰
$A_{21}$	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	-

گرفت. سطح ناسازگاری محاسبه شده در این پژوهش برابر با  $0/5767$  است؛ بنابراین اگر هرکدام از درایه‌های ماتریس ناسازگاری فازی مردد کوچک‌تر از  $0/5767$  باشد، عدد یک و هرکدام بزرگ‌تر یا مساوی با عدد بوده، صفر گرفته است. نتایج حاصله در جدول ۱۳ (ماتریس جامع ناسازگاری) نشان داده شده است.

با استفاده از رابطه ۱۰، ماتریس جامع ناسازگاری محاسبه شده است. سطح ناسازگاری فازی مردد با تمام درایه‌های ماتریس ناسازگاری مقایسه شده و سپس اگر  $g_{c_{kl}} < \bar{d}$  (سطح ناسازگاری کوچک‌تر از درایه ماتریس سازگاری) آنگاه درایه مربوط به ماتریس تسلط ناسازگاری عدد یک و اگر  $f_{c_{kl}} \geq \bar{C}$  آنگاه درایه ماتریس، عدد صفر خواهد

جدول ۱۳- ماتریس جامع ناسازگاری

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$	$A_{15}$	$A_{16}$	$A_{17}$	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_2$	۰	-	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱
$A_3$	۱	۰	-	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_4$	۰	۱	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱
$A_5$	۰	۰	۰	۱	-	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰
$A_6$	۰	۰	۰	۱	۰	-	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_7$	۱	۰	۰	۰	۱	۱	-	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_8$	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	-	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰
$A_9$	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	-	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{10}$	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{11}$	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	-	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱
$A_{12}$	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{13}$	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	-	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{14}$	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	-	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{15}$	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	-	۰	۰	۰	۱	۱	۰
$A_{16}$	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	-	۱	۰	۱	۱	۱
$A_{17}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	-	۰	۱	۱	۱
$A_{18}$	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	-	۱	۱	۱
$A_{19}$	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	-	۱	۰
$A_{20}$	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰
$A_{21}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-

است. عدد یک در این ماتریس نشان دهنده برتری آن گزینه نسبت به گزینه مورد مقایسه و عدد صفر نشان دهنده آن است که گزینه مورد نظر هیچ برتری نسبت به گزینه مورد مقایسه ندارد. برای مثال گزینه‌های  $A_{18}$  (تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری بر اساس آن) و  $A_{17}$  (استفاده از روش‌های بهسازی خاک) نسبت به ۱۵ گزینه دیگر دارای برتری بوده و به لحاظ رتبه‌بندی گزینه‌ها در رتبه اول قرار گرفته است. گزینه  $A_4$  (حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل) با برتری نسبت به ۱۴ گزینه در رتبه دوم

در نهایت، ماتریس جامع که تسلط ترکیبی از عناصر ماتریس تسلط سازگاری و ماتریس جامع ناسازگاری است با استفاده از ضرب داخلی دو ماتریس یاد شده ایجاد می‌گردد. ماتریس جامع تسلط در جدول ۱۴، نشان داده شده است. با استفاده از این ماتریس می‌توان هر گزینه را نسبت به گزینه دیگر مقایسه و برتری گزینه‌ها را نسبت به یکدیگر تعیین کرد. در نهایت رتبه‌بندی نهایی برای گزینه‌های پاسخ به ریسک بر اساس درجه اهمیت و تعداد برتری نسبت به سایر گزینه‌ها مشخص گردیده است. ماتریس جامع تسلط، به صورت یک ماتریس صفر و یک

و گزینه  $A_{13}$  (رعایت و اجرای صحیح و به موقع دستورات عمل‌های فنی حفاری به منظور محدودسازی نشست‌های القایی ناشی از حفاری تونل با برتری نسبت به ۱۳ گزینه در رتبه سوم به لحاظ اهمیت قرار گرفته‌اند. سایر گزینه‌ها نیز در رتبه‌های بعدی به لحاظ اهمیت قرار دارند. در ادامه با استفاده از نتایج حاصل از جدول ۱۳، رتبه‌بندی پاسخ به ریسک‌ها بر مبنای برتری نسبت به سایر گزینه‌ها در جدول ۱۵، ارائه شده است.

جدول ۱۴- ماتریس جامع تسلط

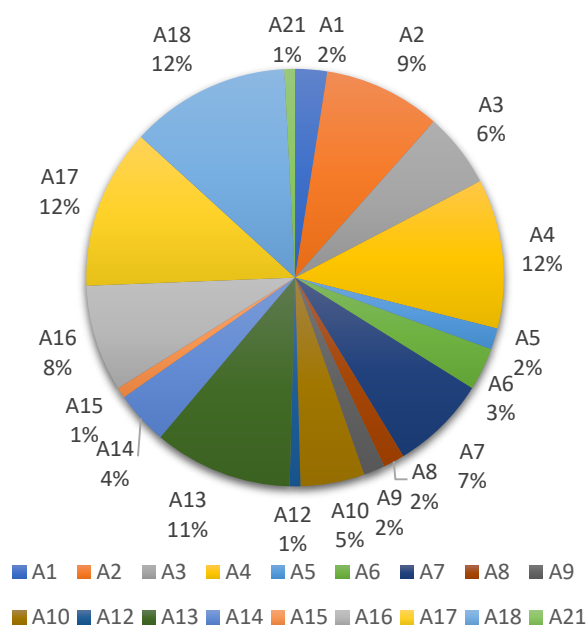
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$	$A_{15}$	$A_{16}$	$A_{17}$	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$	$A_{21}$
$A_1$	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰
$A_2$	۰	-	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱
$A_3$	۱	۰	-	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱
$A_4$	۰	۰	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_5$	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_6$	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_7$	۱	۰	۰	۰	۱	۱	-	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_8$	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_9$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
$A_{10}$	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{11}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
$A_{12}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
$A_{13}$	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	-	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱
$A_{14}$	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	-	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_{15}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۱	۰
$A_{16}$	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	-	۱	۰	۱	۱	۱
$A_{17}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	-	۰	۱	۱	۱
$A_{18}$	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	-	۱	۱	۱
$A_{19}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	-	۰
$A_{20}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	-	۰
$A_{21}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-

موجود در پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد را کاهش دهد. چون برخی از گزینه‌های پاسخ به ریسک، برتری نسبت به گزینه‌های دیگر نداشته‌اند؛ بنابراین در نتیجه تأثیر بسیاری کمی داشته و این گزینه‌ها در شکل ۴، نشان داده نشده‌اند. نمودار تصمیم‌گیری در مورد مساله در شکل ۵، ارائه شده است.

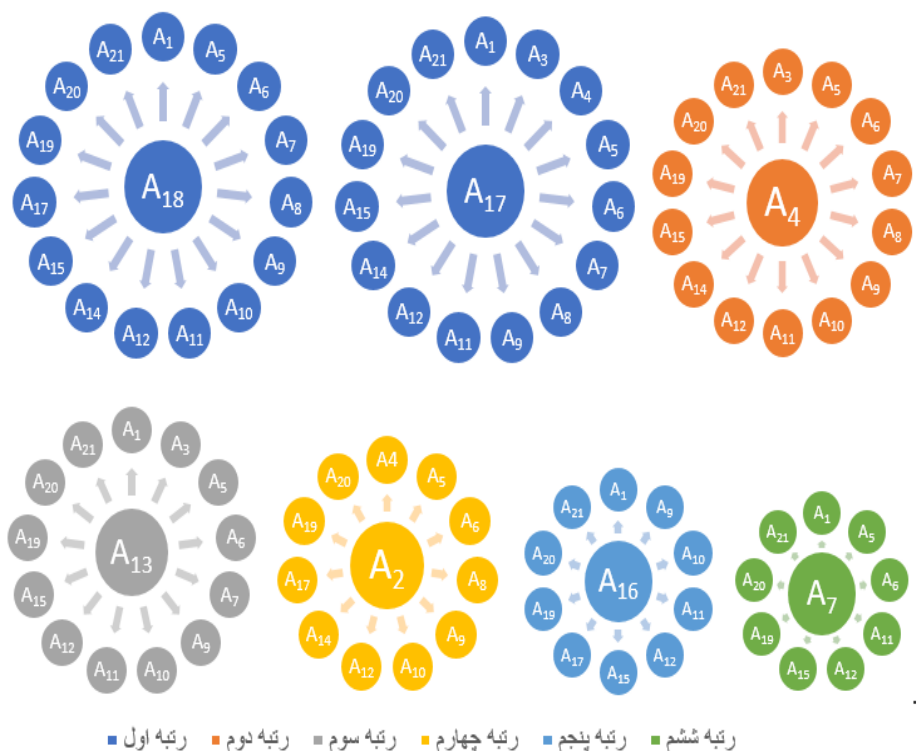
شکل ۴، درصد کلی تأثیر هر گزینه بر مجموع ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد را نشان می‌دهد. بر مبنای این شکل می‌توان بیان نمود که برای مثال گزینه تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری براساس آن می‌تواند تا ۱۲ درصد از تأثیرات منفی ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی احتمالی

جدول ۱۵-رتبه‌بندی کلی پاسخ به ریسک‌ها بر مبنای برتری نسبت به سایر گزینه‌ها

رتبه	پاسخ به ریسک	برتری نسبت به سایر گزینه‌ها
۱	<ul style="list-style-type: none"> <li>تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری بر اساس آن</li> <li>استفاده از روش‌های بهسازی خاک</li> </ul>	برتر نسبت به ۱۵ گزینه
۲	حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل	برتر نسبت به ۱۴ گزینه
۳	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)	برتر نسبت به ۱۳ گزینه
۴	حفاری گمانه‌های اکتشافی و تهیه نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده	برتر نسبت به ۱۱ گزینه
۵	کنترل و مانیتورینگ فشار سینه کار	برتر نسبت به ۱۰ گزینه
۶	تعیین نقاط دارای پتانسیل هجوم آب	برتر نسبت به ۹ گزینه
۷	استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات زیرسطحی	برتر نسبت به ۷ گزینه
۸	مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل	برتر نسبت به ۶ گزینه
۹	تخمین آب ورودی به تونل (روش‌های تجربی، تحلیلی، عددی و ...)	برتر نسبت به ۵ گزینه
۱۰	تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی	برتر نسبت به ۴ گزینه
۱۱	بررسی زمین‌ساخت مسیر شامل تعیین جهات اصلی تنش حداکثر و حداقل، تعیین ساختارهای اصلی زمین‌شناسی (گسل و ...)	برتر نسبت به ۳ گزینه
۱۲	<ul style="list-style-type: none"> <li>تهیه نقشه تراز آب زیرزمینی</li> <li>انجام آزمایش‌های لازم برای پیش‌بینی میزان چسبندگی زمین</li> <li>بررسی میزان و نوع کانی‌ها و رسوبات تورم‌زا با استفاده از آزمایش‌های مختلف</li> </ul>	برتر نسبت به ۲ گزینه
۱۳	<ul style="list-style-type: none"> <li>انجام آزمون‌های تعیین ساینده‌گی سنگ و خاک و استفاده از معیارهای ژئوتکنیکی</li> <li>استفاده از سیستم زهکشی مناسب</li> <li>حفر چاه تهویه در مسیر تونل</li> </ul>	برتر نسبت به ۱ گزینه
۱۴	<ul style="list-style-type: none"> <li>انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای</li> <li>استفاده از شاکریت به‌منظور افزایش چسبندگی مصالح</li> <li>تزریق هوای فشرده جهت کاهش گل گرفتگی</li> </ul>	برتری نسبت به هیچ گزینه‌ای ندارد



شکل ۴- درصد کلی تأثیر هر گزینه بر مجموع ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد



شکل ۵- نمودار تصمیم‌گیری مساله برای رتبه‌های اول تا ششم (نوک پیکان فلش نماینده برتری گزینه تعیین شده نسبت به گزینه دیگر است برای مثال فلشی از  $A_{18}$  به  $A_{15}$  ترسیم شده که نشان دهنده برتری گزینه  $A_{18}$  نسبت به گزینه  $A_{15}$  است)

مخاطره‌آمیز است. این امر، مستلزم اعمال مدیریت مؤثر به خصوص مدیریت ریسک‌های موجود با تکیه بر آخرین دستاوردهای علمی و فنی روز خواهد بود. انجام ارزیابی و مدیریت ریسک‌ها در بسیاری از صنایع و پروژه‌ها الزام قانونی دارد، به‌گونه‌ای که کلیه فعالیت‌های مخاطره‌آمیز از لحاظ روش ساخت، اجرا، بهره‌برداری، نگهداری، نظارت و مدیریت باید در ارزیابی ریسک مورد توجه قرار گیرند.

با توجه به این نکته که مدیریت ریسک‌ها نیازمند درک درستی از ریسک‌های موجود در پروژه‌ها است بنابراین نیاز است که علاوه بر آن که ریسک‌ها شناسایی می‌شوند، بایستی پاسخ‌های مورد نظر برای این ریسک‌ها نیز شناسایی شده و به لحاظ درجه اهمیت رتبه‌بندی گردند. در این تحقیق به کمک روش الکترو فازی مردد، روشی برای مدیریت ریسک‌های موجود در تونل سازی ارائه شد. به منظور بررسی نتایج روش ارائه شده، به عنوان یک مطالعه آزمایشی، ریسک‌های زمین شناسی و ژئوتکنیکی در خط ۳ قطار شهری مشهد مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی موجود، شناسایی شده و سپس با استفاده از روش مذکور، رتبه‌بندی پاسخ به این ریسک‌ها انجام شد.

نتایج حاصل نشان دهنده آن است که گزینه‌های  $A_{18}$  (تهیه پروفیل زمین‌شناسی مهندسی طول مسیر با استفاده از اطلاعات به دست آمده و تغییر پارامترهای حفاری براساس آن) و  $A_{17}$  (استفاده از روش‌های بهسازی خاک) نسبت به ۱۵ گزینه دیگر دارای برتری بوده و به لحاظ رتبه‌بندی گزینه‌ها در رتبه اول قرار گرفته‌اند. گزینه  $A_4$  (حفر ترانشه برای بررسی‌های کم‌عمق در مسیر حفر تونل) با برتری نسبت به ۱۴ گزینه در رتبه دوم و گزینه  $A_{13}$  (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) با برتری نسبت به ۱۳ گزینه در رتبه سوم به لحاظ اهمیت قرار گرفته‌اند. سایر گزینه‌ها نیز در رتبه‌های بعدی به لحاظ اهمیت قرار دارند.

در نهایت می‌توان نتایج موجود در جدول ۶ و جدول ۱۵ یا شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵ 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.

با توجه به کاربرد روش‌های کمی تصمیم‌گیری در شرایط فازی مردد در مسائل تصمیم‌گیری و مهندسی از جمله انتخاب یک گزینه از بین گزینه‌های موجود برای مثال انتخاب ماشین حفاری، بررسی‌های مالی، تولید، مسائل اقتصادی، مدیریت ریسک و تطبیق نتایج حاصل در این پروژه‌ها با مقادیر واقعی، اهمیت کاربرد روش‌های فازی مردد را به اثبات می‌رساند. استفاده از روش‌های فازی مردد می‌تواند بر وجود اطلاعات ناقص و عدم اطمینان در مسائل تصمیم‌گیری غلبه و خطاهای به دست آمده را تا حد بسیار زیادی کاهش دهد. در رابطه با صحت سنجی نتایج به دست آمده، ابتدا باید در اعتبار روش مورد استفاده بررسی گردد. چون عملگرهای تجمعی و روش الکترو فازی مردد یک نتیجه سازگار را نشان می‌دهد، بنابراین اعتبار روش الکترو فازی مردد اثبات شده است (*Chen, et al., 2015; Xia & Xu, 2011*). در گام دوم بایستی ارزیابی خروجی‌های به دست آمده از روش، مورد بررسی قرار گیرد. 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. بدین 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. در نهایت نتیجه به دست آمده بیانگر آن بود که ۸۰/۶۲ درصد نتایج به دست آمده با واقعیت سازگاری دارد.

## ۷- نتیجه‌گیری

کار و فعالیت در پروژه‌های تونل سازی عملی بسیار

## ۸- مراجع

- Ataei, M. (2015). *Multi criteria decision making*. Shahrood University of Technology (in persian).
- Ataei, M. (2016). *Fuzzy multi criteria decision making*. Shahrood University of Technology (in persian).
- Ataei, M. (2017). *Risk Management*. Shahrood University of Technology (in persian).
- Chen, N., Xu, Z., & Xia, M. (2015, May). The ELECTRE I multi-criteria decision-making method based on hesitant fuzzy sets. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 14(03), 621-657. Retrieved from <https://doi.org/10.1142/S0219622014500187>
- Cleland, D. L., & Ireland, L. R. (2007). *Project manager's handbook*. McGraw Hill Professional.
- El-Sayegh, S. M. (2008, May). Risk assessment and allocation in the UAE construction industry. *International journal of project management*, 26(4), 431-438. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.07.004>
- Ghosh, S., & Jintanapakanont, J. (2004, November). Identifying and assessing the critical risk factors in an underground rail project in Thailand: a factor analysis approach. *International journal of project management*, 22(8), 633-643. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.05.004>
- Mikaeil, R., Shaffiee Haghshenas, S., & Sedaghati, Z. (2019, July). Geotechnical risk evaluation of tunneling projects using optimization techniques (case study: The second part of Emamzade Hashem tunnel). *Natural Hazards*, 97(3), 1099-1113. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03688-z>
- Muir Wood, A. (2000). *Tunnelling: Management by design* (p. 328). Taylor & Francis.
- Nezarat, H., Sereshki, F., & Ataei, M. (2015, August). Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). *Tunnelling and underground space technology*, 50, 358-364. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.07.019>
- Nikkhah, M., Ghasvareh, M. A., & Farzaneh Bahalgardi, N. (2019, July). Risk management in urban tunnels using methods of game theory and multi-criteria decision-making. *Journal of Mining and Environment*, 10(3), 597-611. Retrieved from <https://doi.org/10.22044/jme.2019.7136.1559>
- Shaffiee Haghshenas, S., Shaffiee Haghshenas, S., Abduelrhman, M. A., Zare, S., & Mikaeil, R. (2022, January). Identifying and Ranking of Mechanized Tunneling Project's Risks by Using a Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Technique. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 6(1), 29-45. Retrieved from <https://doi.org/10.22115/scce.2022.305718.1366>
- Sharafat, A., Latif, K., & Seo, J. (2021, May). Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103860. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103860>
- Smith, N. J., Merna, T., & Jobling, P. (2014). *Managing risk in construction projects*. John Wiley & Sons.

- Torra, V. (2010, June). Hesitant fuzzy sets. *International journal of intelligent systems*, 25(6), 529-539. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/int.20418>
- Xia, M., & Xu, Z. (2011, March). Hesitant fuzzy information aggregation in decision making. *International journal of approximate reasoning*, 52(3), 395-407. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2010.09.002>
- Xia, X., & Zhang, T. (2018, January). Reduced-order K-filters based decentralized fuzzy adaptive control of stochastic large-scale nonlinear systems with stochastic input unmodeled dynamics. *Neurocomputing*, 272, 584-595. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.07.035>
- Xia, Y., Xiong, Z., Dong, X., & Lu, H. (2017, October). Risk assessment and decision-making under uncertainty in tunnel and underground engineering. *Entropy*, 19(10), 549. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/e19100549>
- Yazdani-Chamzini, A., & Yakhchali, S. H. (2012, July). Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 194-204. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.02.021>
- Zhu, B., & Xu, Z. (2013, February). Consistency measures for hesitant fuzzy linguistic preference relations. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(1), 35-45. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2245136>
- Zhu, B., Xu, Z., & Xia, M. (2012, February). Dual hesitant fuzzy sets. *Journal of Applied mathematics*, 2012. Retrieved from <https://doi.org/10.1155/2012/879629>

## Hesitant fuzzy ELECTRE method in managing geological and geotechnical risks of tunneling projects

M. A. Ghasvareh<sup>1</sup>; G. R. Lashkaripour<sup>2\*</sup>; H. Sadeghi<sup>3</sup>; J. Tayyebi<sup>4</sup>

1- PhD candidate; Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, aminghasvareh@mail.um.ac.ir

2- Full Professor; Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, lashkaripour@um.ac.ir

3- Associate Professor; Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, sadeghi@um.ac.ir

4- Associate Professor; Faculty of Industrial and Computer Engineering, Birjand University of Technology, javadtayyebi@birjandut.ac.ir

Received: 14 Jan 2023; Accepted: 1 Jul 2023

DOI: 10.22044/tuse.2023.12600.1469

### Keywords

Decision making  
Tunneling  
ELECTRE method  
Risk  
Hesitant fuzzy sets

### Extended Abstract

#### Summary

Effective factors for project success, generally depend on optimizing and managing costs and time while maintaining the quality of the work. Tunneling projects are always associated with uncertainties and risks that influence the both cost and time factors of project implementation. The complexity of the issues and the uncertainty and ambiguity of the information, particularly in relation to risks and their management, make it difficult for managers to make decisions. Using hesitant fuzzy sets is an appropriate tool for resolving ambiguity and facing uncertainty. In tunneling projects, there is a need to develop an appropriate model and a comprehensive plan to assess the response to geological and geotechnical risks. In this research, a comprehensive model aimed to address the geological and geotechnical risks of tunnels using the hesitant fuzzy ELECTRE method is presented. As an experimental study, the proposed method has been used to investigate the geological and geotechnical hazards of line 3 of Mashhad Subway.

### Introduction

Underground spaces are constructed under highly uncertain geological and geotechnical conditions and pose many risks. Most accidents are often related to uncertainties in the construction and execution of these structures. Consequently, it is necessary to prevent accidents with progress in risk analysis and management methods. The size and complexity of the project dictate the number and significance of each of these existing risks, and it will be impossible to avoid and prevent risks from occurring within the project. As a result, there appears to be a need for a comprehensive risk management system to manage all types of risks within projects.

### Methodology and Approaches

In this study, using the hesitant fuzzy ELECTRE method, a risk management method in the tunnel of line 3 of Mashhad subway is presented. According to the answers given by experts to the prepared questionnaires, various geological and geotechnical risks of the project have been identified. In addition, the desired responses to minimize the effects of these risks have been identified, and then, using hesitant fuzzy decision-making methods, responses to these risks have been ranked in terms of their importances.

### Results and Conclusions

The results of this research show that preparing engineering geological profiles along the route under investigation using the obtained information, and accordingly, changing the excavation parameters using soil

---

improvement methods are the most significant risk response. The other risk responses have also been ranked in the next levels of importance.

---