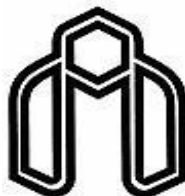


سورة الاحقاف



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی

پایان نامه کارشناسی ارشد

رتبه‌بندی ریسک‌های موجود در حفاری مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع در محیط‌های سنگی

(مطالعه موردی: تونل غربی البرز)

نخارنده: علی رضا اکبری

استاد راهنما:

دکتر شکراله زارع

دکتر محمد عطائی

بهمن ماه ۱۳۹۷

شماره: ۴۹۷۴۰۳۲
تاریخ: ۱۳/۱۱/۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای **علی رضا اکبری**

با شماره دانشجویی: ۹۵۰۱۷۶۴ رشته: **مهندسی معدن** گرایش: **تولید و صنایع زیرزمینی**

تحت عنوان: **رتبه بندی ریسک های موجود در حاری کانیزه تولید های بزرگ متخ در محیط های سنگی (مطالعه موردی: تولید غبلی البرز)**

که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: ...)
<input type="checkbox"/> عملی	<input checked="" type="checkbox"/> نظری

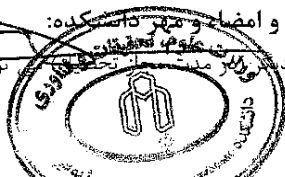
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر شکراله زارع	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد عطائی	استاد	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مریم نازک کانی	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: **دکتر محمد عطائی**

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار در سال مجاز است. (تاریخ: ...)

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود.



با احترام تقدیم به

پدرم، اول اسنادم، که همداره چتر مجبش بر سرم است

بزرگواری که انبای زندگی راز او آموختم.

مادرم، بلند تکیه گاهم، که دلمان پر مهرش یکنه پناهیم است

مهربانی که عشق ورزیدن راز او آموختم.

و

روح پاک خواهرزاده عزیزم علی رضا

مشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، دستودن او مانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گنزدن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان و امدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز..

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی سائبه ی او، با زبان قاصود دست ناتوان، چیزی بجا نیاوریم.

اما از آنجایی که بحلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هرف و غایت آفرینش را تا این می کند و سلامت ایمنی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر النعم من المخلوقین لم یشکر الله عز و جل ":

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عنو کشیده و گریانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است؛ از خواهر و برادرهای دوست داشتنی ام به پاس تشویق و دلگرمی؛

از اساتید با کمال و شایسته؛ جناب آقای پروفور عطاءئی و دکتر زارع که در کمال سع صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ لگی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛

از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر کاکائی و دکتر جلالی که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند؛ از دوستان عزیزم برای تمام یاری رسانی های که در به پایان رسانیدن این پایان نامه داشتند کمال مشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید

تعمدنامه

اینجانب **علی رضا اکبری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی** دانشکده معدن، **نفت و ژئوفیزیک** دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان **"رتبندنی ریسک های موجود در حفاری مکانیزه تونل های بزرگ مقطع در محیط های سنگی (مطالعه موردی: تونل غربی البرز)"** تحت راهنمایی **دکتر شکراله زارع** و **دکتر محمد عطائی** متعهد

می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

امروزه پیشرفت تکنولوژی از یک سو و افزایش روزافزون جمعیت و نیاز آنان به خدمات بیشتر از سوی دیگر، باعث افزایش درخواست برای فضاهای عمومی شده است. یکی از این فضاهای زیرزمینی شامل تونل‌ها است که در صنایع و علوم مختلف از قبیل معدن، راه و راه‌آهن، سدها، انتقال آب، فاضلاب شهری، مترو، مقاصد نظامی و دفاعی و ذخیره‌سازی نفت و سایر موارد استفاده می‌شوند. برای اجرای هر کدام از این تونل‌ها، امکان بروز پیشامدهای نامطلوب مانند: خطر، خسارت‌های مالی و صدمات جانی است که هر کدام احتمال وقوع خاصی دارند و می‌تواند بر روی پروژه تونل‌سازی اثرگذار باشد، که از آن به عنوان ریسک در تونل‌سازی یاد می‌شود. امروزه سیستم‌های مدیریت ریسک به عنوان یک ابزار کارآمد در خدمت بخش‌های مختلف طرح‌ها، سازمان‌ها و مدیران و مسئولان است.

تونل غربی البرز در آزادراه تهران- شمال، از جمله طرح‌های بزرگ راه کشور است که مطابق برنامه‌ریزی انجام شده قرار است عملیات اجرایی آن با استفاده از TBM و روش حفاری مکانیزه در محیط سنگی انجام شود. در این تحقیق با بررسی مشخصات زمین‌شناسی و عوامل هندسی، سرمایه‌گذاری، فنی- محیطی و سیاسی، تعداد ۱۷ مخاطره محتمل پیشبینی و با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای رتبه‌بندی مخاطرات تونل‌سازی مکانیزه در تونل غربی البرز با استفاده از روش‌های شباهت به گزینه ایده‌آل و الکتراه، هم در محیط فازی و هم به صورت کلاسیک پرداخته شده و به منظور دست یافتن به نظری واحد از استراتژی‌های اولویت‌بندی استفاده شده است. طبق چهار روش بیان شده نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تجربه تونل‌سازی پیمانکاران داخلی برای قطرهای بزرگ، تصاعد گازهای سمی و خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته از بین ۱۷ مخاطره محتمل به ترتیب مهم‌ترین مخاطره‌های موجود در تونل غربی البرز با ریسک بالا می‌باشند.

کلمات کلیدی: تونل‌سازی مکانیزه، تونل‌های بزرگ مقطع، مدیریت ریسک، تصمیم‌گیری چند

معیاره، محیط سنگی، TBM

لیست مقالات استخراج شده

ارائه‌ی مقاله‌ای با عنوان "ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های تونل‌سازی مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع در محیط‌های سنگی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (تاپسیس و الکره فازی)" در نشریه علمی - پژوهشی مهندسی عمران امیرکبیر (تحت داوری)

فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات
۱-۱	مقدمه
۲	۲-۱ بیان مسأله
۳	۳-۱ ضرورت انجام تحقیق
۳	۴-۱ اهداف تحقیق
۴	۵-۱ روش تحقیق
۵	۶-۱ ساختار پایان نامه
۷	۲ فصل دوم: مفاهیم ریسک، مدیریت ریسک و روش‌های ارزیابی آن
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ تعریف ریسک و مدیریت ریسک
۸	۱-۲-۲ عدم قطعیت و ریسک
۹	۱-۲-۲-۱ عدم قطعیت
۱۰	۲-۲-۲ ریسک
۱۱	۲-۲-۲ مدیریت ریسک
۱۲	۳-۲-۲ فرایند مدیریت ریسک
۱۵	۳-۲ روش‌های ارزیابی ریسک
۱۶	۱-۳-۲ درخت خطا
۱۷	۲-۳-۲ تحلیل درخت رویداد
۱۸	۳-۳-۲ تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA)
۲۱	۴-۳-۲ روش ویلیام فاین
۲۱	۵-۳-۲ روش 3D دانشگاه ملبورن
۲۲	۶-۳-۲ روش‌های فازی
۲۲	۷-۳-۲ شبیه‌سازی مونت کارلو
۲۳	۸-۳-۲ روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره
۲۴	۴-۲ روش‌های رتبه‌بندی ریسک مورد استفاده در تحقیق
۲۵	۱-۴-۲ روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)
۲۷	۲-۴-۲ روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (FTOPSIS)
۳۱	۳-۴-۲ روش حذف و انتخاب سازگار با واقعیت (ELECTRE)

۳۲	.....۱-۳-۴-۲ نقاط ضعف و قوت روش الکترون
۳۳	.....۲-۳-۴-۲ گام‌های روش الکترون
۳۶	.....۴-۴-۲ روش حذف و انتخاب سازگار با واقعیت فازی (FUZZY ELECTRE)
۴۰	.....۵-۲ استراتژی‌های اولویت‌بندی
۴۰	.....۱-۵-۲ روش میانگین رتبه‌ها
۴۰	.....۲-۵-۲ روش بردا
۴۱	.....۳-۵-۲ روش کپلند
۴۱	.....۴-۵-۲ مرحله ادغام
۴۱	.....۶-۲ جمع‌بندی
۴۳	.....۳ فصل سوم: سابقه علمی موضوع
۴۴	.....۱-۳ مقدمه
۴۴	.....۲-۳ پیشینه تحقیق
۵۰	.....۳-۳ جمع‌بندی
۵۱	.....۴ فصل چهارم: انواع مخاطرات در تونل‌سازی مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع در محیط‌های سنگی
۵۲	.....۱-۴ مقدمه
۵۳	.....۲-۴ چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی در نواحی کوهستانی
۵۴	.....۱-۲-۴ برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
۵۵	.....۲-۲-۴ ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
۵۶	.....۳-۲-۴ نشت و هجوم آب به داخل تونل
۵۸	.....۴-۲-۴ سینه‌کار مختلط
۵۹	.....۵-۲-۴ پدیده‌ی آماس‌پذیری (متورم‌شوندگی)
۶۱	.....۶-۲-۴ پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)
۶۳	.....۷-۲-۴ تشکیل گل (انسداد)
۶۴	.....۸-۲-۴ پتانسیل کارست
۶۵	.....۹-۲-۴ نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
۶۶	.....۳-۴ روش‌های شناسایی و راهکارهای پیشگیری ریسک‌های ژئوتکنیکی
۶۸	.....۴-۴ جمع‌بندی
۶۹	.....۵ فصل پنجم: معرفی تونل غربی البرز و رتبه‌بندی ریسک‌های آن
۷۰	.....۱-۵ مقدمه
۷۰	.....۲-۵ معرفی پروژه تونل البرز

- ۷۱-۳-۵- وضعیت زمین‌شناسی منطقه.....
- ۷۳-۱-۳-۵- زمین ساخت محدوده‌ی تونل.....
- ۷۳-۲-۳-۵- سنگ‌های میزبان تونل البرز.....
- ۷۴-۱-۲-۳-۵- سازند دورود.....
- ۷۴-۲-۲-۳-۵- سازند شمشک (دهانه شمالی).....
- ۷۵-۳-۲-۳-۵- سازند کرج (دهانه خروجی).....
- ۷۶-۴-۲-۳-۵- بخش میانی با سازند دورود (زون گسله کندوان).....
- ۷۶-۴-۵- زمین‌شناسی مهندسی.....
- ۷۶-۱-۴-۵- ویژگی‌های دیداری زمین‌شناسی مهندسی.....
- ۷۷-۲-۴-۵- رتبه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های میزبان تونل البرز.....
- ۷۸-۵-۵- پروژه‌های خارجی مشابه با تونل غربی البرز.....
- ۷۹-۶-۵- ریسک‌های موجود در تونل البرز و راهکارهای پیش‌بینی شده برای کاهش ریسک.....
- ۸۰-۱-۶-۵- عوامل زمین‌شناسی.....
- ۸۰-۱-۶-۵- زون‌های گسله.....
- ۸۰-۲-۱-۶-۵- خطر ریزش‌های سنگی.....
- ۸۲-۳-۱-۶-۵- هجوم آب زیرزمینی.....
- ۸۳-۴-۱-۶-۵- شرایط سینه‌کار مختلط.....
- ۸۴-۵-۱-۶-۵- پدیده‌ی آماس (متورم شوندگی).....
- ۸۴-۶-۱-۶-۵- مچاله‌شوندگی.....
- ۸۵-۷-۱-۶-۵- امکان گل‌گرفتگی.....
- ۸۵-۸-۱-۶-۵- حفرات کارستی.....
- ۸۷-۹-۱-۶-۵- نشت گازهای سمّی.....
- ۸۷-۱۰-۱-۶-۵- ناپایداری دیواره‌های حفاری و سینه‌کار.....
- ۸۹-۱۱-۱-۶-۵- فاصله‌داری درزه‌ها.....
- ۹۰-۱۲-۱-۶-۵- سنگ‌های سخت و ساینده.....
- ۹۱-۲-۶-۵- عامل هزینه (هزینه خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته).....
- ۹۲-۳-۶-۵- عوامل فنی و محیطی.....
- ۹۲-۱-۳-۶-۵- تجربه تونل‌سازی مکانیزه در پیمانکاران داخلی.....
- ۹۳-۲-۳-۶-۵- نحوه تأمین مصارف برق.....
- ۹۴-۳-۳-۶-۵- حمل قطعات بزرگ ماشین.....

۹۴	..... ۴-۶-۵ عامل سیاسی (تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات)
۹۵	..... ۵-۶-۵ عوامل هندسی
۹۵	..... ۱-۵-۶-۵ حفاری محل دستک‌ها، پارکینگ، ایستگاه‌های جانپناه و راهروهای نفرو
۹۸	..... ۲-۵-۶-۵ پارامترهای طول و قطر تونل
۹۸	..... ۷-۵-۷ رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز (آزادراه تهران-شمال)
۱۰۱	..... ۱-۷-۵-۱ رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل
۱۰۴	..... ۲-۷-۵-۲ رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی
۱۰۷	..... ۳-۷-۵-۳ رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش الکترون
۱۱۳	..... ۴-۷-۵-۴ رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش الکترون فازی
۱۱۹	..... ۸-۵-۸ استراتژی اولویت‌بندی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره
۱۲۱	..... ۹-۵-۹ جمع‌بندی
۱۲۳	..... ۶ فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۲۴	..... ۱-۶-۱ مقدمه
۱۲۴	..... ۲-۶-۲ نتیجه‌گیری
۱۲۵	..... ۳-۶-۳ پیشنهادات
۱۲۷	..... منابع
۱۳۳	..... پیوست

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه..... ۱۱
- شکل ۲-۲: مراحل انجام کار روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن..... ۲۰
- شکل ۳-۲: روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه و انواع مدل‌های آن..... ۲۴
- شکل ۱-۴: بلوک‌های بزرگ جدا شده از سینه‌کار تونل..... ۵۶
- شکل ۲-۴: ریزش آب از دیواره‌های تونل و صعوبت کار برای پرسنل در تونل انتقال آب زاگرس..... ۵۷
- شکل ۳-۴: جریان آب زیاد در کف تونل و صعوبت کار برای پرسنل در قطعه دوم تونل انتقال آب قمرود..... ۵۸
- شکل ۴-۴: جبهه‌کار مختلط (وجود قلوه‌سنگ درماتریس خاک)..... ۵۹
- شکل ۵-۴: نمونه‌ای از حفرات کارستی و پدیده‌ی کارستیفیکاسیون در تشکیلات آهکی..... ۶۵
- شکل ۱-۵: موقعیت جغرافیایی تونل البرز..... ۷۱
- شکل ۲-۵: پروفیل طولی از تونل اکتشافی تونل البرز در امتداد محور تونل..... ۷۲
- شکل ۳-۵: مقطع طولی تونل و عملکرد گسله‌های راندگی..... ۷۳
- شکل ۴-۵: سازند شمشک در بخش خروجی تونل البرز..... ۷۴
- شکل ۵-۵: پروفیل طولی تونل سرویس البرز..... ۷۵
- شکل ۶-۵: تناوب ماسه‌سنگ و سیلتستون در محدوده‌ی پرتال ورودی تونل البرز..... ۷۵
- شکل ۷-۵: ریزش توده‌سنگ خرد شده بر روی کاترهد و سپرهای TBM..... ۸۱
- شکل ۸-۵: شکل شماتیکی از حفرات کارستی در مسیر حفاری تونل..... ۸۶
- شکل ۹-۵: محل تقاطع تونل‌های اصلی و ارتباطی..... ۹۵
- شکل ۱۰-۵: مشخصات پارکینگ نسبت به تونل اصلی..... ۹۶
- شکل ۱۱-۵: نمونه‌ای از سگمنت فلزی..... ۹۷
- شکل ۱۲-۵: ساختار سلسله مراتبی برای رتبه‌بندی ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع..... ۹۹
- شکل ۱۳-۵: نمودار ستونی میزان ریسک‌های تونل غربی البرز طبق روش TOPSIS..... ۱۰۴
- شکل ۱۴-۵: نمودار ستونی میزان ریسک‌های تونل غربی البرز طبق روش TOPSIS فازی..... ۱۰۷

فهرست جداول

- جدول (۳-۱): سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی... ۴۵
- جدول (۴-۱): انواع ریسک‌های ژئوتکنیکی و روش‌های شناسایی و پیشبینی آنها برای حذف یا کاهش ریسک... ۶۷
- جدول (۵-۱): ویژگی‌های دیداری زمین‌شناسی مهندسی تونل غربی البرز... ۷۷
- جدول (۵-۲): رتبه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های میزبان تونل غربی البرز... ۷۷
- جدول (۵-۳): مشخصات کلی پروژه‌های مشابه با تونل غربی البرز... ۷۸
- جدول (۵-۴): پروژه‌های مشابه تونل البرز از نظر شرایط زمین و ریسک‌های موجود در آنها... ۷۹
- جدول (۵-۵): فهرستی از پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در ایران (تمام واحدها به متر)... ۹۳
- جدول (۵-۶): مقایسه مالی گزینه‌های مختلف تأمین برق مصرفی... ۹۴
- جدول (۵-۷): پارامترهای کمی معادل پارامترهای کیفی و پارامتر بازهای... ۹۹
- جدول (۵-۸): اهمیت معیارها نسبت به هدف... ۱۰۰
- جدول (۵-۹): اهمیت گزینه نسبت به معیارها در قالب اعداد فازی... ۱۰۰
- جدول (۵-۱۰): اهمیت معیارها نسبت به هدف در قالب اعداد فازی... ۱۰۰
- جدول (۵-۱۱): نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان برای وزن معیارها... ۱۰۱
- جدول (۵-۱۲): میانگین مقادیر کمی نتایج پرسشنامه‌ها جهت رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز... ۱۰۱
- جدول (۵-۱۳): ماتریس بدون مقیاس مخاطرات حفاری مکانیزه تونل غربی البرز برای حل با روش TOPSIS... ۱۰۲
- جدول (۵-۱۴): اهمیت نسبی معیارها... ۱۰۲
- جدول (۵-۱۵): ماتریس بدون مقیاس وزن دار مسأله رتبه‌بندی برای حل با روش TOPSIS... ۱۰۲
- جدول (۵-۱۶): فاصله از حد ایده‌آل، ضد ایده‌آل و شاخص شباهت... ۱۰۳
- جدول (۵-۱۷): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش TOPSIS... ۱۰۴
- جدول (۵-۱۸): ماتریس تصمیم فازی... ۱۰۵
- جدول (۵-۱۹): وزن فازی معیارها... ۱۰۵
- جدول (۵-۲۰): ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده... ۱۰۵
- جدول (۵-۲۱): ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده وزن دار... ۱۰۶
- جدول (۵-۲۲): رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت... ۱۰۶
- جدول (۵-۲۳): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش TOPSIS فازی... ۱۰۷
- جدول (۵-۲۴): ماتریس تصمیم‌گیری حاصل نظرسنجی خبرگان... ۱۰۷
- جدول (۵-۲۵): ماتریس تصمیم نرمال‌سازی شده... ۱۰۸
- جدول (۵-۲۶): ماتریس وزن معیارها... ۱۰۸
- جدول (۵-۲۷): ماتریس تصمیم وزن دار نرمال شده V... ۱۰۸
- جدول (۵-۲۸): نمونه‌ای از مجموعه موافقت C تشکیل داده شده در روش الکترون... ۱۰۹
- جدول (۵-۲۹): ماتریس موافقت C روش الکترون... ۱۰۹
- جدول (۵-۳۰): ماتریس موافقت مؤثر (بولین) F... ۱۱۰
- جدول (۵-۳۱): نمونه‌ای از مجموعه مخالفت D تشکیل داده شده در روش الکترون... ۱۱۰
- جدول (۵-۳۲): ماتریس مخالفت D روش الکترون... ۱۱۱
- جدول (۵-۳۳): ماتریس مخالفت مؤثر (بولین) G... ۱۱۱
- جدول (۵-۳۴): ضرب $F * G$... ۱۱۲

- جدول (۵-۳۵): رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه با روش الکتراه..... ۱۱۲
- جدول (۵-۳۶): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش الکتراه..... ۱۱۳
- جدول (۵-۳۷): ماتریس تصمیم فازی ۱۱۳
- جدول (۵-۳۸): ماتریس تصمیم فازی نرمال‌سازی شده ۱۱۳
- جدول (۵-۳۹): بردار وزن معیارها ۱۱۴
- جدول (۵-۴۰): ماتریس نرمال شده وزن‌دار ۱۱۴
- جدول (۵-۴۱): دیفازی شده ماتریس نرمال شده وزن‌دار ۱۱۵
- جدول (۵-۴۲): نمونه‌ای از مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکتراه فازی..... ۱۱۵
- جدول (۵-۴۳): ماتریس موافقت C در الکتراه فازی..... ۱۱۶
- جدول (۵-۴۴): ماتریس موافقت مؤثر F (ماتریس بولینی)..... ۱۱۶
- جدول (۵-۴۵): نمونه‌ای از مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الکتراه فازی ۱۱۷
- جدول (۵-۴۶): ماتریس مخالفت D در الکتراه فازی..... ۱۱۷
- جدول (۵-۴۷): ماتریس مخالفت مؤثر G (ماتریس بولینی)..... ۱۱۸
- جدول (۵-۴۸): ماتریس نهایی H..... ۱۱۸
- جدول (۵-۴۹): رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه با روش الکتراه فازی ۱۱۹
- جدول (۵-۵۰): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش الکتراه فازی ۱۱۹
- جدول (۵-۵۱): ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها برای روش بردا و کپلند..... ۱۲۰
- جدول (۵-۵۲): استراتژی اولویت‌بندی برای رتبه‌بندی نهایی ریسک‌ها..... ۱۲۰
- جدول (۵-۵۳): رتبه‌بندی نهایی ریسک‌های تونل غربی البرز..... ۱۲۱

۱. فصل اول:

کلیات

ایده استفاده از ماشین‌های حفار حدود ۱۵۰ سال پیش در انگلستان و امریکای شمالی شکل گرفت ولی نتوانست به صورت مؤثر در تونل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. این تلاش‌ها در بین سال‌های ۱۹۵۰-۱۹۶۰ ادامه پیدا کرده و بالاخره امریکایی‌ها موفق به حفر تونل در سنگ‌های نرم با استفاده از ماشین‌های تمام مقطع (TBM^۱) و به تدریج همزمان با پیشرفت فناوری آنها موفق به استفاده از تی‌بی‌ام در انواع خاک‌ها شدند. به دلیل پیچیدگی عملیات حفاری با ماشین‌های حفار TBM احتمال وقوع حوادث در هنگام حفاری این تونل‌ها بالاست. کار کردن در محیط‌های فاقد روشنایی طبیعی، با احتمال ریزش دیواره‌های تونل، مواجهه با انواع آلاینده‌های هوا، خطرات ناشی از انفجار آتش‌سوزی همگی از جمله عواملی هستند که باعث می‌شوند تا کارگران شاغل در چنین محیط‌هایی در معرض ریسک‌های متعددی قرار گیرند.

۱-۲- بیان مسأله

ساخت تونل و سایر سازه‌های زیرزمینی، به دلیل متغیرهای زیاد، از جمله شرایط غیرقابل پیش‌بینی و نامطمئن ژئوتکنیکی زمین، با خطرهایی مواجه می‌باشد که می‌توان ایمنی و یا اقتصاد طرح را به مخاطره افکند. از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ریسک تونل‌سازی مکانیزه می‌توان؛ طراحی و ملزومات دستگاه حفاری TBM، مسائل ساخت، عوامل و فاکتورهای مالی و انسانی، مقاومت فشاری، قابلیت حفاری (سختی، ساینده‌گی)، نواحی گسلی، نشت و هجوم آب زیرزمینی، نشت گازهای سمی، تورم سنگ‌های رسی، چسبندگی خاک‌ها و سنگ‌های رسی، مچاله‌شوندگی زمین، سینه‌کار مختلط، ناپایداری سینه‌کار و دیواره و سقف تونل، را نام برد. همچنین با توجه به رشد بسیار سریع فناوری ساخت ماشین‌های حفار تمام مقطع (TBM) بزرگ‌تر و پیچیده‌تر و همچنین مشکلات ژئوتکنیکی؛ مدیریت پروژه‌های تونل‌سازی را با چالش همراه کرده است. با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های

^۱ Tunnel Boring Machine

تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع توجه به مدیریت مراحل طراحی و ساخت‌وساز که منجر به شناسایی ژئوتکنیکی در طول تونل می‌شود، تا حدودی ریسک‌های ژئوتکنیکی، ریسک‌های نیروی انسانی و ریسک‌های عملیاتی حفاری تونل بزرگ مقطع در سنگ به روش مکانیزه را شناسایی و تعیین نمود. در نهایت در صورت امکان این ریسک‌ها را کاهش داد. به دلیل وجود ریسک‌های فراوان در پروژه‌های تونل‌سازی، لازم است قبل و در هنگام انجام پروژه، ریسک‌ها شناسایی شده و تمهیدات لازم برای به حداقل رساندن رویدادهای نامطلوب و به حداکثر رساندن رویدادهای مطلوب از سوی مدیر پروژه اندیشیده شود.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به رشد بسیار سریع در فناوری تونل‌سازی، جاده‌سازی و ساخت دستگاه‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر و همچنین مشکلات زمین‌شناسی، سیاسی و...؛ مدیریت این پروژه‌ها با چالش روبرو شده است. مدیریت ریسک به عنوان یکی از فازهای مدیریت پروژه؛ و با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع آنها، دارای اهمیت انکار ناپذیری است. با توجه به تعداد محدود پروژه‌هایی که با TBM های قطر بزرگ، در دنیا کار شده است، تونل غربی البرز یکی از مهم‌ترین گزینه‌های اجرایی تونل راه با حفاری مکانیزه TBM در ایران بوده که با سطح مقطع بیش از ۱۰۰ متر مربع است و ضرورت دارد که ریسک‌های ناشی از حفاری مکانیزه و سایر ریسک‌ها، شناسایی و رتبه‌بندی شوند.

۱-۴- اهداف تحقیق

هدف از فاز ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها براساس شاخص‌های مختلف از قبیل: «احتمال وقوع ریسک»، «میزان تأثیر ریسک بر هزینه، زمان و کیفیت پروژه»، «میزان عدم اطمینان از تخمین» و «توانایی سازمان در واکنش به ریسک» می‌باشد.

هدف از انجام این تحقیق، استفاده از روش‌های ارزیابی کیفی و کمی ریسک برای رتبه‌بندی ریسک‌های ماشین حفاری TBM برای تونل آزاد راه البرز می‌باشد. حال بسته به شرایط یک یا چندتا از

روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، انتخاب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اهداف به طور خلاصه شامل موارد زیر است:

۱. شناسایی و تعیین ریسک‌های ناشی از حفاری بزرگ مقطع مکانیزه در محیط سنگی
۲. پیشگیری از حوادث در حین اجرا ناشی از ریسک‌های ژئوتکنیکی، ریسک‌های مربوط به ماشین حفار و ریسک‌های مالی و انسانی
۳. کاهش هزینه‌های حفاری تونل با شناسایی به موقع ریسک‌ها
۴. تعیین ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل برای کاهش مدت زمان و هزینه نگهداری پروژه تونل‌سازی

۱-۵- روش تحقیق

در اکثر روش‌های ارزیابی ریسک از دو یا سه مولفه (معیار) استفاده می‌شود. در تصمیم‌گیری‌ها، معیارهای مختلفی باید مورد توجه قرار گیرند که این معیارها اهمیت یکسانی ندارند. بعضی‌ها از این معیارها، کمی و بعضی از آنها کیفی هستند. اخیراً روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به منظور کمک به مدیران به منظور تصمیم‌سازی مناسب و با در نظر گرفتن مجموعه معیارها، کاربرد زیادی در زمینه‌های مختلف علمی داشته و دارد. روش شباهت به گزینه ایده‌آل^۱، فرایند سلسله مراتبی^۲، روش تحلیل تاکسونومی، روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی^۳، فرایند سلسله مراتبی فازی^۴، فرایند سلسله مراتبی دلفی فازی^۵ و روش حذف و انتخاب سازگار با واقعیت^۶ کارآمدترین فنون تصمیم‌گیری چند معیاره هستند که بسته به این که داده‌های بدست آمده کیفی باشند یا کمی، قطعیت داشته باشند یا عدم قطعیت، دو روش انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت.

برای رتبه‌بندی ریسک‌های موجود در تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های سنگی از شاخص‌های تصمیم‌گیری، احتمال وقوع ریسک، شدت پیامد، عدم اطمینان از تخمین و توانایی سازمان در واکنش به ریسک استفاده شد. مراحل کار به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

¹ TOPSIS

² AHP

³ FTOPSIS

⁴ FAHP

⁵ FDAHP

⁶ ELECTRE

۱. مطالعات کتابخانه‌ای، جستجوی اینترنتی.
۲. شناسایی انواع ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل بزرگ مقطع از قبیل ریسک‌های مربوط به زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، ریسک‌های سرمایه‌گذاری، هندسی، سیاسی، ریسک‌های مربوط به طراحی و بویژه ریسک‌های مربوط به دوره ساخت تونل.
۳. دسته‌بندی ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع.
۴. شناسایی و جمع‌آوری داده‌های مربوطه.
۵. تحلیل داده‌ها با استفاده از تکنیک‌های هوشمند.
۶. ارائه نتایج و در صورت امکان ارائه راهکارهای عملیاتی برای کاهش ریسک در تونل‌سازی مکانیزه مقاطع بزرگ در محیط سنگی

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

این تحقیق شامل شش فصل می‌باشد:

در فصل اول به بیان مسأله، ضرورت تحقیق، مراحل انجام تحقیق و ساختار پایان‌نامه پرداخته شده است. در فصل دوم مفاهیم اصلی ریسک و مدیریت ریسک، فرایند مدیریت ریسک، روش‌های ارزیابی ریسک از جمله روش‌های کمی، مزایا و معایب آنها شرح داده شده است و در ادامه‌ی این فصل روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و چند معیاره فازی از جمله روش تاپسیس، تاپسیس فازی، الکتراه و الکتراه فازی که برای رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه تونل غربی البرز استفاده شده‌اند به طور کامل شرح داده شده‌اند. همچنین استراتژی‌های اولویت‌بندی برای رتبه‌بندی واحد ریسک‌ها، که شامل روش‌های میانگین رتبه‌ها، بردا و کپلند است آورده شده است. با توجه به این که پیشینه مطالعات پیرامون مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه و روش‌های اولویت‌بندی ریسک‌ها مهم می‌باشد فصل سوم پایان‌نامه به این بخش اختصاص داده شده است. در فصل چهارم انواع مخاطرات زمین‌شناسی در تونل‌سازی مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع در محیط‌های سنگی و روش‌های شناسایی و راهکارهای پیشگیری ریسک‌های ژئوتکنیکی در تونل‌سازی مکانیزه بیان شده است.

فصل پنجم که مهم‌ترین فصل این پایان‌نامه می‌باشد، ابتدا به معرفی پروژه تونل البرز پرداخته شده است. سپس مخاطرات زمین‌شناسی موجود و پدیده‌های خطرزا در مسیر تونل غربی البرز، تجربه تونل‌سازی مکانیزه در پیمانکاران داخلی، ریسک‌های هزینه خرید ماشین و تجهیزات وابسته، نحوه

تأمین مصارف برق این تونل، حفاری محل دستک‌ها، پارکینگ‌ها، ایستگاه‌های جان‌پناه و راهروهای نفرو و راهکارهای پیشنهادی برای حذف یا کاهش ریسک بیان شده است. در نهایت ریسک‌های زمین‌شناسی، سیاسی، هزینه‌ای، هندسی و فنی محیطی ماشین حفاری مکانیزه تونل غربی البرز توسط روش‌های تاپسیس، تاپسیس فازی، الکترون و الکترون فازی رتبه‌بندی شده و نتایج محاسبات بیان شده است.

در فصل ششم نتایج بدست آمده و پیشنهادات ارائه شده در راستای اهداف این تحقیق ارائه شده است.

۲. فصل دوم:

مفاهیم ریسک و مدیریت ریسک

و روش‌های ارزیابی آن

همه ساله تعداد زیادی حادثه‌ی کاری در جهان روی می‌دهد و کارگران بسیاری، حادثه دیده یا دچار بیماری شغلی می‌شوند. این بیماری‌های شغلی و حوادث ناشی از کار، علاوه بر هزینه‌های گزافی که متوجه سازمان می‌نمایند باعث از دست رفتن نیروی کار در صنایع و سازمان‌ها می‌شوند. صیانت از نیروی انسانی و کاهش هزینه حوادث در صنایع به عنوان مهم‌ترین اصول سیستم‌های مدیریت ایمنی مطرح می‌باشند که حفظ و بقای سازمان را در پی دارد. شناسایی خطرات موجود در سیستم و ارزیابی این خطرات با تمرکز به نحوه‌ی رویداد این خطر و عواقب پیرامون آن باعث می‌شود سازمان‌ها و کارخانجات منابع خود را به نحو مؤثر و مطلوبی به امر پیشگیری اختصاص دهند و از اتلاف منابع جلوگیری به عمل آورند. همچنین در پی این ارزیابی کارکنان با خطرات سیستم آشنا شده و نحوه‌ی مقابله با خطرات را می‌آموزند. امروزه شناسایی و مدیریت این خطرات "مدیریت ریسک" نامیده می‌شود.

در این فصل ابتدا اصول و مفاهیم اولیه ریسک و مدیریت ریسک و روش‌های ارزیابی ریسک و همچنین مزایا و محدودیت روش‌ها بیان شده و در ادامه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که برای رتبه‌بندی ریسک‌های مسأله، مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند به طور کامل شرح داده شده است و همچنین استراتژی‌های اولویت‌بندی که شامل روش میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند است بیان شده است.

۲-۲- تعریف ریسک و مدیریت ریسک

۲-۲-۱- عدم قطعیت و ریسک

ریسک و عدم قطعیت دو هویت متفاوت دارند اما از یک گونه هستند. با این حال حد فاصل بین این دو مقوله بسیار محو و نامشخص است. وجود عدم قطعیت لزوماً به معنای وجود ریسک نیست بلکه ریسک در نتیجه عدم قطعیت به وجود می‌آید. با تغییر ریسک در طول زمان، تعیین حدود عدم قطعیت پیچیده‌تر می‌شود [۱].

به منظور رسیدن به اهداف پروژه، مدیران پروژه باید آماده رویارویی با ریسک‌ها و عدم قطعیت‌ها باشند. بدیهی است، ریسک‌ها و عدم قطعیت‌های موجود توانایی یک مدیر پروژه را برای مدیریت پروژه به چالش می‌اندازد [۲].

در ادامه مفاهیم عدم قطعیت و ریسک به صورت جامع مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۱-۱-۲-۱-۱ - عدم قطعیت

عدم قطعیت به عنوان یک عبارت مصطلح در میان مردم دارای مفهوم مشخصی می‌باشد که ممکن است این مفهوم در تقاطع با علوم مختلف تعاریف متفاوتی را به خود گیرد. در هر علم و هر حوزه عدم قطعیت همان ابهامات موجود در آن فضا را در برمی‌گیرد و لذا تعاریف دچار تنوع می‌گردند. اما عدم قطعیت به عنوان یک مفهوم عمومی اصطلاحی است که عدم اطمینان انسان را در مورد برخی اشخاص یا اشیا منعکس می‌نماید، و بازه‌ی باز میان اطمینان کامل و عدم اطمینان محض را در بر می‌گیرد [۳].

وضعیتی که عدم قطعیت در تصمیم‌گیری به وجود می‌آورد، باعث ایجاد انحرافات مثبت (شانس) و منفی (تهدید) در نتایج مورد انتظار می‌شود [۴]. همان‌گونه که از تعاریف عدم قطعیت بر می‌آید، نبود آگاهی سرچشمه‌ی اصلی حضور یافتن در چنین وضعیتی است. زمانی که قرار است یک تصمیم اتخاذ شود، عدم قطعیت در این است که تصمیم‌گیرنده نمی‌داند کدام موقعیت طبیعی رخ می‌دهد [۵]. در دنیای واقعی انواع مختلفی از عدم قطعیت وجود دارد که عبارت‌اند از فازی بودن، تصادفی بودن و غیرقطعی بودن که شامل دو مورد اول می‌شود [۶].

در بحث مربوط به عدم قطعیت سه سطح از عدم قطعیت وجود دارد [۱]:

- عدم قطعیت شناخته شده : مواردی هستند که اتفاق خواهد افتاد و در مورد رخداد آن اطمینان وجود دارد (الزامات قراردادی یا رویدادهای تضمین شده).
- عدم قطعیت ناشناخته : مواردی هستند که اطلاعاتی در مورد آن وجود ندارد ولی می‌توان آن را شبیه‌سازی کرد. ناشناخته‌ها با گذشت زمان با انجام برخی فعالیت‌ها شناخته می‌شوند. این فعالیت‌ها دارای ریسک هستند و ریسک آنها با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند.
- عدم قطعیت غیر قابل شناخت : مواردی هستند که دارای عدم قطعیت و ریسک هستند و

کلیت ریسک و عدم قطعیت با گذشت زمان و انجام اقدامات تغییر نمی‌کند.
در تحلیل‌های متداول، تمرکز بر روی عوامل شناخته شده است ولی در تجزیه و تحلیل ریسک
تمرکز بر روی عوامل ناشناخته و غیر قابل شناخت است [۱].

۲-۱-۲-۲- ریسک

در منابع مختلف تعاریف متعددی از ریسک صورت گرفته که در ادامه به چند مورد از این تعاریف
اشاره شده است:

انجمن مدیریت پروژه^۱ (PMI) ریسک را این گونه تعریف می‌نماید: «یک رویداد با وضعیت غیر
قطعی است که در صورت وقوع، اثری مثبت یا منفی بر اهداف پروژه خواهد داشت» در این تعریف به
ریسک نه به عنوان خطر بلکه به صورت عدم قطعیت نگاه شده است که دارای دو جنبه مثبت (فرصت)
و منفی (تهدید) می‌باشد [۷].

انجمن مدیریت پروژه انگلستان^۲ (APM)، ریسک را این گونه تعریف می‌کند: «رویداد ریسک یک
رویداد نامطمئن است و زمانی که مجموعه‌ای از شرایط رخ می‌دهد بر روی دستیابی به یک یا تعداد
بیشتری از اهداف پروژه تأثیر می‌گذارد» [۸].

هندبوک مدیریت ریسک، آن را «تأثیر آینده یک خطر در نتیجه عدم حذف و کنترل آن» معرفی
می‌نماید [۹].

هندبوک مدیریت پروژه، آن را رویدادی بیان می‌کند که در صورت وقوع به عنوان تهدید بالقوه
برای یکپارچگی پروژه شناخته می‌شود [۱۰].

از دیدگاه بیچر^۳، احتمال منجر شدن یک خطر به حادثه یا سانحه، ریسک گفته می‌شود. در واقع
ریسک ترکیبی از احتمال وقوع و وخامت عواقب ناشی از حادثه یا سانحه است [۱۱]. در نمودار شکل
(۱-۲) ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه نشان داده شده است.

¹ Project Management Institute

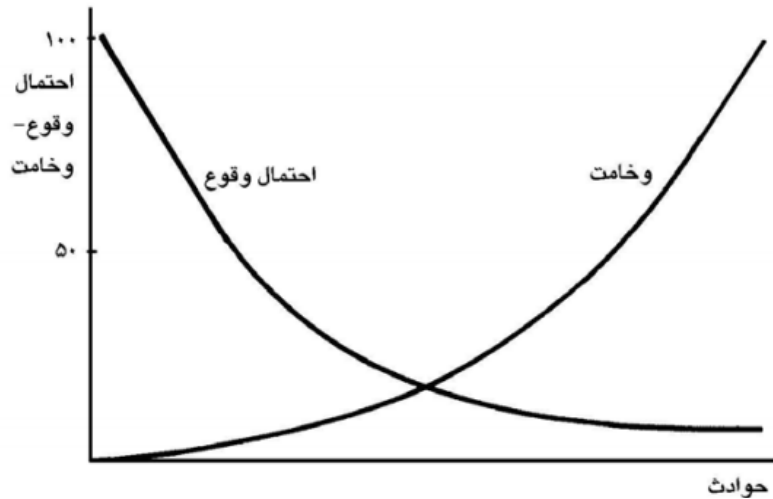
² Association for Project Management

³ Beacher

گرژنر^۱ ریسک را برآورد احتمال و شدت پیامد بیان می‌داند [۱۲].

انجمن بین‌المللی تونل برای ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل‌سازی از تعریف مرسوم ریسک استفاده

می‌نماید، به عبارتی ریسک حاصل احتمال وقوع آن در میزان تأثیر آن است [۱۳].



شکل ۱-۲: ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه [۱۱]

۲-۲-۲- مدیریت ریسک

برای مدیریت ریسک نیز مانند واژه ریسک، تعاریفی ارائه شده است که البته همه در برگیرنده

مفهومی یکسان هستند و تمرکز روی فرآیند مدیریت ریسک دارند:

طبق تعریف مؤسسه مدیریت پروژه، مدیریت ریسک شامل فرآیندهای برنامه‌ریزی، شناسایی

تحلیل، برنامه‌ریزی پاسخ و کنترل ریسک پروژه است. در واقع می‌توان هدف از مدیریت ریسک را

افزایش احتمال و اثر وقایع مثبت و کاهش احتمال و اثر وقایع منفی در پروژه دانست. لازم به ذکر

است فرآیندهای یادشده با یکدیگر هم‌پوشانی داشته و در تعامل هستند [۱۰].

از نظر انجمن مدیریت پروژه انگلستان، مدیریت ریسک «یک فرآیند ساختارمند است که اجازه

می‌دهد تا رویدادهای انفرادی ریسک و ریسک کلی پروژه به خوبی درک شود و کارهای پیشگیرانه با

به حداقل رساندن تهدیدها و حداکثر کردن فرصت‌ها برای مدیریت بهتر پروژه صورت پذیرد» [۱۴].

¹ Kerzner

طبق نظر ویلیامز و هینزا^۱، مدیریت ریسک، فرآیند شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌های بالقوه‌ای است که مشخصاً پیامدهای ممکن آن خسارت یا عدم تغییر در وضع موجود می‌باشد. مدیریت ریسک، ریسک‌ها را به وسیله کنترل آنها و تأمین مالی خسارت‌هایی که به رغم تلاش‌های کنترل خسارت، اتفاق افتاده‌اند، اداره می‌کند [۱۵].

کرژنر مدیریت ریسک را «فعالیت یا کوشش در جهت پرداختن به ریسک» معرفی می‌کند [۱۲]. از بین تعاریف ذکر شده برای ریسک و مدیریت ریسک، تعاریف ارائه شده توسط انجمن مدیریت پروژه از جامعیت بیشتری برخوردارند.

۲-۲-۳- فرایند مدیریت ریسک

راهنمای مدیریت پروژه PMBOK، مدیریت پروژه را در قالب نه فرآیند مورد بررسی قرار می‌دهد که بند هشتم آن مدیریت ریسک است. این راهنما در هریک از بندهای نه گانه، فرآیند مربوطه را در قالب ورودی‌ها، تکنیک‌ها و ابزارها و خروجی‌ها مورد اشاره قرار می‌دهد. طبق استاندارد PMBOK فرآیند مدیریت ریسک مالی شش مرحله به شرح زیر است:

۱. برنامه‌ریزی مدیریت ریسک ۲. شناسایی ریسک ۳. تجزیه و تحلیل کیفی ریسک ۴. تجزیه و تحلیل کمی ریسک ۵. برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک ۶. کنترل و بازبینی ریسک

فرآیندهای مذکور با یکدیگر و با سایر فرآیندهای موجود در سایر زمینه‌های دانش مدیریت پروژه در تعامل می‌باشند [۷].

۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک

برنامه‌ریزی مدیریت ریسک، شالوده فعالیت‌های آتی را تشکیل می‌دهد. برنامه‌ریزی مدیریت ریسک پروژه عبارت است از فرآیند تصمیم‌گیری در مورد چگونگی هدایت فعالیت‌های مدیریت ریسک در پروژه. این فرآیند برای تدارک زمان و منابع لازم برای فعالیت‌های مدیریت ریسک و همچنین تعیین

¹ Williams & Heins

اصول یکسان و مورد توافق به منظور ارزیابی ریسک‌ها، دارای اهمیت فراوانی است. در برنامه مدیریت ریسک در استاندارد PMBOK مواردی همچون روش‌شناسی مدیریت ریسک، نقش‌ها، بودجه و زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت‌های مدیریت ریسک، دسته‌های ریسک، ماتریس شدت اثر ریسک و... لحاظ می‌شود [۱].

۲- شناسایی ریسک

در این بخش از فرآیند ایجاد سیستم مدیریت ریسک، کل تیم پروژه برای بحث و شناسایی ریسک‌های مربوط به پروژه گرد هم می‌آیند. پیشنهاد می‌شود در این جلسات، تمرکز تیم تنها بر ریسک باشد. تمرکز بر روی ریسک در این جلسات باعث می‌شود که کل تیم به اهمیت ریسک در پروژه پی برده و همه به ریسک‌های موجود در پروژه فکر کنند. به دلیل مشکل بودن این بخش، شناسایی و مدیریت ریسک در پروژه‌ها به خوبی انجام نمی‌شود. از آنجایی که ریسک یک رخداد عدم قطعی و تا حدودی ناشناخته می‌باشد، فرآیند مدیریت ریسک نسبت به سایر فرآیندهای مهندسی، امری غریب به نظر می‌رسد، به همین دلیل شناسایی ریسک برای بسیاری از مدیران پروژه امری سخت و طاقت فرسا می‌باشد، در صورتی که رویه شناخت ریسک مشخص شده باشد، مدیریت آنها راحت‌تر خواهد بود [۱].

۳- تجزیه و تحلیل کیفی ریسک

پس از لیست کردن کلیه ریسک‌های بالقوه پروژه، نوبت به تجزیه و تحلیل کیفی ریسک می‌رسد در تجزیه و تحلیل کیفی، با توجه به کمبود اطلاعات دقیق در مورد ریسک‌های پروژه و میزان اثر گذاری آنها بر روی پروژه از مقادیر کیفی برای بررسی ریسک استفاده می‌شود. با توجه به محدودیت‌های زمانی و بودجه‌ای امکان بررسی و پرداختن به کلیه ریسک‌های بالقوه پروژه، عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا لازم است که ریسک‌های شناخته شده پروژه رتبه‌بندی شده و بر اساس رتبه احراز شده برای هر ریسک، نسبت به برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات آنها، اقدام نمود [۱].

تجزیه و تحلیل کیفی ریسک سریع و مقرون به صرفه است و برای اولویت‌بندی و برنامه‌ریزی پاسخ

به ریسک کاربرد دارد و پایه و اساسی را برای تجزیه و تحلیل کمی ریسک فراهم می کند [۷].

۴- تجزیه و تحلیل کمی ریسک

هدف از تجزیه و تحلیل کمی ریسک آنالیز عددی احتمال وقوع یک یا چند ریسک و پیامدهای آن

بر اهداف پروژه می باشد، با استفاده از تجزیه و تحلیل کمی می توان به موارد زیر دست یافت [۱]:

- ریسک های مهم و مورد توجه را شناسایی کرد
- احتمال دستیابی به یک هدف خاص از پروژه را تعیین کرد
- مقدار ریسک پروژه، میزان هزینه زمان محدوده نهایی واقعی و دست یافتنی پروژه را تعیین کرد

در این مرحله آنالیز عددی موارد ریسک و پیامدهای وقوع آنها بر اهداف پروژه محاسبه می شود،

موارد ذیل طی مرحله آنالیز کمی معین می شوند [۱]:

- تعیین احتمال کسب هدف مشخصی در پروژه
- مشخص نمودن مقدار واکنش مورد نیاز برای ریسک بر اساس مقدار اثر آن بر پروژه
- مشخص نمودن مقدار هزینه، زمان و حوزه کاری واقعی و قابل دسترس ریسک

با تکرار و اشاره به ریسک از طرف مجموعه پروژه در مرحله آنالیز کمی، به خصوص وقتی مرحله

فوق در طول مدت پروژه تکرار می شود، نشان دهنده لزوم داشتن واکنش بیشتر یا کمتر در پاسخگویی

به ریسک می باشد [۱].

۵- برنامه ریزی واکنش در مقابل ریسک

برنامه ریزی واکنش به ریسک فرآیند افزایش مداوم فرصت ها از طریق واکنش مناسب به ریسک ها و

تهدیدها می باشد، برنامه ریزی واکنش به ریسک بایستی متناسب با شدت ریسک، هزینه و زمان واقعی

تعریف شده توسط تمام متولیان و دست اندرکاران پروژه باشد. همچنین بایستی نحوه تخصیص

ریسک ها به افراد و گروه ها در این برنامه مشخص شود [۱].

برنامه ریزی واکنش در مقابل ریسک به شناسایی بیشتر ریسک ها و تخصیص افراد برای به عهده

گرفتن مسئولیت هر واکنش می پردازد، همیشه باید بهترین واکنش را از بین گزینه های مختلف

انتخاب کرد، انواع راهکارهای قابل انتخاب برای مقابله با ریسک ها بسته به فرصت یا تهدید بودن

ریسک متفاوت است. راهکارهای مختلفی برای واکنش در برابر ریسک‌های مختلف توسعه داده شده است. این راهکارها در مورد ریسک‌های منفی و مثبت متفاوت می‌باشد [۱].

۶- پایش و کنترل ریسک

کنترل ریسک فرآیندی است که به منظور اطمینان کامل از اجرای برنامه‌های مدیریت ریسک و اثربخشی تحقق این برنامه‌ها در کاهش ریسک‌های پروژه انجام می‌شود. در این فرآیند علاوه بر پیگیری ریسک‌های شناسایی شده کنترل ریسک‌های باقیمانده و نیز شناسایی ریسک‌های جدید در طول چرخه حیات پروژه نیز مد نظر می‌باشد. پس از آنکه اقدامات و راهکارهای مورد نظر برای رویارویی با ریسک تعیین شده باید نسبت به اجرای این راهکارها اقدام نمود. برای این کار رویه‌های پایش ریسک باید به گونه‌ای باشد که بتواند تیم پروژه را از ریسک‌های ناگهانی مطلع نماید [۱].

پایش ریسک تنها به بررسی رخداد یا عدم رخداد ریسک محدود نمی‌شود، بلکه بایستی در همین حین، بررسی‌های لازم در مورد کفایت اقدامات استراتژیک پیش‌بینی شده برای رویارویی با ریسک و در صورت نیاز تعیین اقدامات اضافی برای مقابله با آن نیز صورت گیرد. به علاوه باید در خلال این مرحله بررسی‌های لازم در مورد ریسک‌های شناسایی شده در پروژه نیز انجام شود و در صورت نیاز استراتژی‌های مرتبط برای رویارویی با آن نیز تعیین شود [۱].

۲-۳- روش‌های ارزیابی ریسک

ارزیابی ریسک یک قسمت از فرآیند مدیریت ریسک می‌باشد و در نتیجه این ارزیابی، رتبه‌بندی جامع ریسک‌های پروژه بدست آمده و ریسک‌های با اولویت بالاتر برای واکنش سریع‌تر مشخص می‌شوند، تا با مدیریت درست و به هنگام، از عواقب این ریسک‌ها (در جهت مقابله با کاهش) بر پروژه جلوگیری به عمل آید. با رتبه‌بندی ریسک‌ها، تجزیه و تحلیل‌های مورد نیاز بعدی مشخص شده و حدود کار معین می‌شود.

جهت ارزیابی ریسک روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به روش‌های

درخت خطا^۱ (FTA)، درخت رویداد^۲ (ETA)، تجزیه تحلیل حالات شکست و اثرات آن^۳ (FMEA)، روش‌های فازی^۴، شبیه‌سازی مونت کارلو^۵، و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره^۶ اشاره کرد. در ادامه ویژگی‌ها و حوزه‌های مناسب برای استفاده از این روش‌ها به صورت مختصر توضیح داده شده است.

۲-۳-۱- درخت خطا

به طور کلی می‌توان گفت روش ارزیابی درخت خطا عبارت از مدلی منطقی-دیداری است که برای شرح چگونگی وقوع رویدادهای ناخواسته ویژه در یک سیستم که ممکن است به وسیله اثرات یک نقص ساده یا ترکیبی از نقایص ایجاد شود، استفاده می‌شود. با استفاده از این تحلیل می‌توان رابطه منفرد یا ترکیبی که رویدادی منفی پیش می‌آورد را مورد تحلیل قرار داد. این روش را در هر صورت با یا بدون کمیت احتمال وقایع می‌توان به کار گرفت و ساختار مسایل پیچیده‌ای را که رویدادهای متعددی در آنها دخیل می‌باشند بنا نهاد [۱۶].

تحلیل درخت خطا، شاید بهترین روش برای شناسایی و تحلیل ایمنی است. درخت خطا توانایی تشخیص نحوه ایجاد علت‌های بروز واقعه (رویداد) را دارد. درخت خطا می‌تواند یک روش کارا برای تشریح احتمال وقوع یک حادثه و تخمین عمر مفید یک سیستم باشد [۱۹].

مراحل روش تحلیل درخت خطا به ترتیب: شناخت سیستم و انتخاب بخشی از سیستم، انتخاب حادثه نامطلوب، شناسایی علل حادثه نامطلوب، ترسیم درخت خطا، بازنگری، تکمیل و آزمایش درخت خطا، ارزیابی درخت خطا و ارزیابی درخت خطای معادل می‌باشد.

روش تحلیل درخت خطا مزایا و معایبی دارد که به شرح زیر می‌باشد [۱۹]:

مزایا:

- امکان ارزیابی احتمالات، ترکیبات مختلف خطاها و عیوب داخل یک سیستم پیچیده

¹ Fault Tree Analysis

² Event Tree Analysis

³ Failure Mode and Effective Analysis

⁴ Fuzzy set

⁵ Monte Carlo Simulation

⁶ Multi Criteria Decision Making

- هدایت تجزیه و تحلیل به سوی کشف خطاها و نقص‌های اصلی
- امکان تجزیه و تحلیل خطاهای انسان و تجهیزات
- کمک به فهم دقیق عملکردها و ارتباط بین اجزا و عناصر عملکردی سیستم
- تمرکز هم زمان روی یک عیب (بدون از دست دادن تصویر و نمای کلی خطرات)
- امکان برآوردهای احتمالی یک عیب یا حادثه به دلیل کمی و کیفی بودن روش
- به دست آوردن ترسیم گرافیکی از ترکیب وقایع و ختم شدن به رویداد اصلی
- شناسایی رویداد با بیشترین ارزش
- شناسایی و حذف مجموعه‌ای که سبب ایجاد یک رویداد ناخواسته شود.

معایب:

- دقیق نبودن درخت خطا در صورت شناسایی نشدن خطاها با علل مشترک
- عدم شناسایی کلیه رویدادها به دلیل عدم تجربه و آگاهی کافی تحلیل‌گر از رفتار سیستم
- نیاز به انجام تحلیل‌های متعدد برای تحلیل ایمنی یک سیستم
- نیاز به منابع و زمان زیاد به دلیل ارزیابی دقیق و بیان جزئیات
- نیاز به داشتن اطلاعات جامع و تخصصی از سیستم و نیاز به آموزش
- ایجاد خطا به دلیل احتمال وجود خطا برای منابع مختلف
- کاربردی نبودن روش به دلیل امکان گرفتن نتایج یکسان از درخت‌های خطای متعدد
- قابل استفاده نبودن راحت برای سیستم‌های بزرگ و حجیم
- تکمیل و اجرا نشدن این روش به دلیل محدودیت عدم دسترسی به مدارک مستند

۲-۳-۲- تحلیل درخت رویداد

تشریح توسعه ریسک از رویداد اولیه تا حالت نهایی از طریق نتایج ممکن، توسط روش آنالیز درخت رویداد قابل اجرا می‌باشد. در این روش با استفاده از ارزیابی احتمالات برای خروجی‌های مختلف، تحلیل کمی ریسک حاصل می‌شود [۱۶].

درخت رویداد پاسخ‌های سیستم در برابر یک چالش شروع‌کننده را تشریح کرده و ارزیابی احتمال پیامد مطلوب و یا نامطلوب را فراهم می‌سازد. این روش کلیه مسیرهای محتمل از عملیات مختلف سیستم را از رویداد شروع‌کننده به تصویر می‌کشد. روش اجرای روش تحلیل درخت رویداد به شرح زیر است [۱۹]:

۱. شناسایی رویداد اولیه برای سیستم مورد بررسی
 ۲. تعیین مسیرها با پاسخ دادن به این سؤال «اگر رویداد شروع کننده در سیستم آغاز شود چه اتفاقی به وقوع می پیوندد؟».
 ۳. محاسبه احتمال کمی رویداد شروع کننده با استفاده از تحلیل درخت خطا و یا سایر روش ها
 ۴. تعیین احتمال بروز مسیرهای بالقوه از طریق ضرب احتمال وقوع رویدادهای تشکیل دهنده
 ۵. بدست آمدن احتمال موفقیت سیستم با جمع کردن احتمال وقوع مسیرهای منتهی به موفقیت
 ۶. بدست آمدن احتمال شکست سیستم با جمع کردن احتمال وقوع مسیرهای منتهی به شکست
- مهم ترین مزایا و محدودیت های روش تحلیل درخت رویداد به شرح زیر است:

مزایا:

- فراهم کردن امکان ارزیابی خطاها و نقص های چندگانه
- ارائه کردن کارکردی همزمان از حالات شکست و موفقیت
- نیاز نبودن به پیش بینی رویداد پایانی
- امکان شناسایی و پیگیری مسیرهای گسترش نقص در سیستم.

معایب:

- امکان نیاز به یک سیستم ویژه تحلیل درخت رویداد چندگانه به دلیل آغاز تنها با یک چالش شروع کننده
- نیاز به مشخص بودن چالش شروع کننده توسط محقق از ابتدا
- لازم به مشخص بودن مسیرهای عملیاتی توسط محقق
- احتمال از دست دادن بعضی از اطلاعات در جریان ساده سازی درخت رویداد

۲-۳-۳- تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA)

FMEA یک روش مهندسی است که به منظور مشخص کردن و حذف خطاها، مشکلات و اشتباهات بالقوه موجود سیستم به کار برده می شود. در این روش، حالت های مختلف خرابی در تجهیزات و وسایل گوناگون و نیز اثرات این خرابی روی کل سیستم یا واحد صنعتی فهرست می شود. حالت خرابی، نمایانگر چگونگی بروز نقص در تجهیزات است. اثر حالت خرابی با واکنش سیستم نسبت به نقص تجهیزات مشخص می شود. روش FMEA، حالت های مختلف خرابی یک وسیله را بررسی

کرده تا مشخص کند که آیا این حالت‌های خرابی می‌توانند در بروز یک حادثه مؤثر باشد [۱۹].

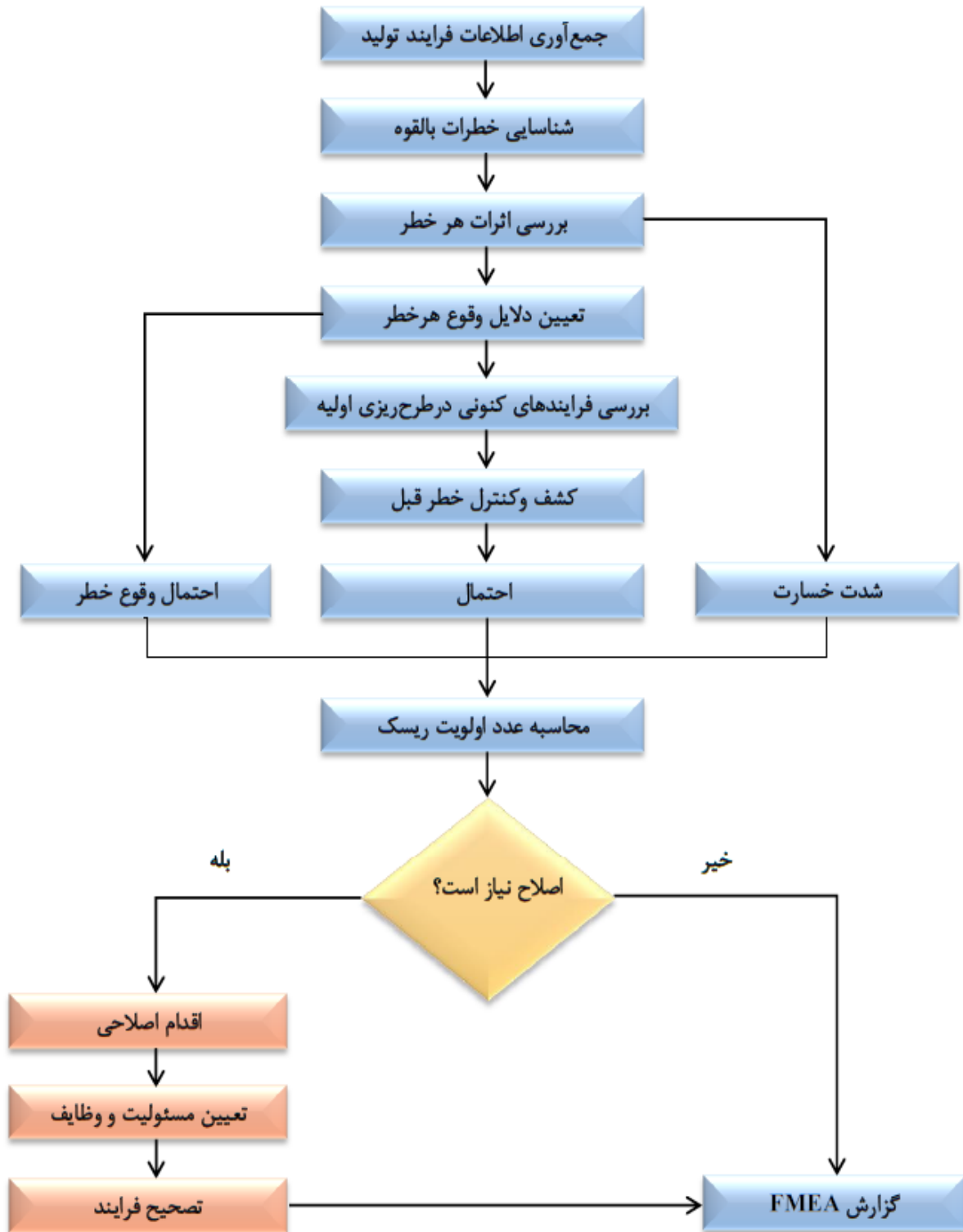
FMEA در شرایط زیر اجرا می‌شود [۱۸]:

- در زمان طراحی سیستمی جدید، محصولی جدید و یا فرآیندی جدید
- زمانی که قرار است طرح‌های موجود یا فرآیند تولید/ مونتاژ مورد بررسی قرار گیرد
- زمانی که فرآیندهای تولید یا مونتاژ و یا یک محصول در محیطی جدید قرار می‌گیرد
- برنامه‌های بهبود مستمر

در این روش هدف شناسایی، پیش‌بینی و انجام اقدامات پیشگیرانه در جهت جلوگیری از یک رخداد بالقوه است، عدد اولویت ریسک RPN بر اساس حاصل ضرب سه شاخص احتمال وقوع، شدت یا وخامت و احتمال کشف تعریف می‌شود. برای RPN بالاتر از حد قبول می‌بایست فوراً اقدامات لازم انجام شود. یکی از عوامل موفقیت FMEA زمان اجرای آن است. این تکنیک برای آن طرح‌ریزی شده که یک اقدام قبل از واقعه باشد نه یک تمرین بعد از آشکار شدن مشکلات. در اجرای FMEA با پیش‌بینی مشکلات بالقوه و محاسبه میزان ریسک‌پذیری آنها، اقداماتی در جهت حذف و یا کاهش میزان وقوع آنها تعریف و اجرا می‌شود. علاوه بر این، هر تغییری در این مرحله با فرآیند به راحتی انجام شده و در نتیجه احتمال نیاز به تغییرات بحرانی در آینده را حذف می‌کند یا کاهش خواهد داد [۱۸].

در شکل (۲-۲) الگوریتم مراحل انجام کار روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن به طور

مختصر نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: مراحل انجام کار روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن [۱۹]

مزایا و معایب روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن به شرح زیر می‌باشد [۱۹]:
مزیت‌ها:

۱. یک ابزار پیشگیری از خطرات است.
 ۲. یک روش مناسب کمی برای ارزیابی ریسک است.
 ۳. یک روش مطمئن برای پیش‌بینی مشکلات و تشخیص مؤثرترین راه‌های پیشگیری است.
- محدودیت‌ها:

۱. امکان نادیده گرفتن خطاهایی که عدد اولویت ریسک پایینی دارند.
۲. عدد اولویت ریسک می‌تواند برای اعداد متفاوت شدت، وقوع و تشخیص یکسان باشد.
۳. از اهمیت نسبی سه فاکتور ورودی غفلت شده است.

۲-۳-۴- روش ویلیام فاین

از این روش برای تصمیم‌گیری درباره ضرورت و موجه بودن هزینه‌های حذف خطر و همچنین لزوم اجرای هر چه سریع‌تر برنامه‌های کنترل خطرات استفاده می‌شود. این روش به مدیران کمک می‌کند که با اولویت‌بندی برنامه‌های کنترل خطرات و تعیین فوریت و برنامه‌ریزی‌های کنترلی به منظور تسریع در رسیدن به اهداف مشخص به صورت کاملاً شفاف گام بردارند [۱۹].

اساس این روش بر پایه محاسبه و ارزیابی نمره ریسک به شرح زیر می‌باشد:

$$R=C \times E \times P \quad (1-2)$$

که در این رابطه R نمره ریسک، C شدت پیامد، E میزان مواجهه و P احتمال وقوع است. لازم به ذکر است که اگر چه این روش راه ساده‌ای را برای ارزیابی انواع مختلف خطرات و کنترل‌ها برای بررسی و تصمیم‌گیری به مدیریت ارائه می‌دهد، ولی از این روش تنها می‌توان به عنوان یک راهنما استفاده کرد.

۲-۳-۵- روش 3D دانشگاه ملبورن

از این روش برای شناسایی کلیه خطرات ناشی از فعالیت‌ها (عادی و غیر عادی) و ارزیابی ریسک‌های مربوطه به منظور تعیین اولویت آنها برای انجام اقدامات کنترلی استفاده می‌شود به نحوی که کلیه فعالیت‌ها، فرایندها و تجهیزات، مد نظر قرار گرفته و خطرات ناشی از آنها تعیین و ریسک‌های

مربوطه ارزیابی شود. در این روش ارزیابی ریسک بر مبنای سه عامل تماس، احتمال و پیامد صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، رتبه ریسک حاصل ضرب تماس، احتمال و پیامد است [۱۹]:

$$R=E \times L \times C \quad (2-2)$$

که در این رابطه R نمره ریسک، E میزان مواجهه (تماس)، L احتمال وقوع و C شدت پیامد است.

۲-۳-۶- روش‌های فازی

منطق فازی در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی علی عسگرزاده پروفیسور علوم کامپیوتر دانشگاه برکلی کالیفرنیا ارائه شده است. به صورت مفهومی، منطق فازی منطقی چند ارزشی است و اجازه می‌دهد که ارزش‌هایی را بین دو ارزشی‌هایی مثل "درست و نادرست"، "بله خیر" یا "بالا پایین" و ... تعریف کرد، منطق فازی طیف نامحدودی از خاکستری بین سیاه و سفید در نظر می‌گیرد لذا منطق فازی را می‌توان منطق خاکستری نامید، منطق دو ارزشی، منطق خاکستری را نادیده می‌گیرد آن را نفی می‌کند یا آن را به طور کامل سیاه و سفید فرض می‌کند. می‌توان مفاهیمی چون "خیلی"، "نسبتاً"، "تقریباً" و ... را که از پایه‌های اندیشه و استدلال‌های معمولی انسان می‌باشند، به صورت ریاضی درآورد تا بوسیله کامپیوتر قابل فهم باشند و از این طریق بتوان برنامه‌های کامپیوتری که به منطق و تفکر انسان نزدیک‌ترند را به وجود آورد [۱۹].

به طور کلی در منطق فازی احتیاج به دانستن سه چیز است، اول تعریف یا مدلی برای متغیرها دوم چگونگی ارتباط متغیرها (اگر چند ورودی داشته باشیم) و سوم چگونگی نتیجه‌گیری می‌باشد. در واقع هدف نهایی منطق فازی ایجاد یک تئوری برای استدلال در مورد گزاره‌هایی است که درستی یا نادرستی آنها به صورت قطعی مشخص نیست. در منطق فازی درستی گزاره می‌تواند هر مقداری در بازه [۰ و ۱] اختیار کند [۱۹].

۲-۳-۷- شبیه‌سازی مونت کارلو

اغلب در پروژه‌های زیرزمینی تخمین‌ها متشکل از چندین متغیر تصادفی می‌باشند. راه‌حل‌های

تحلیلی برای این نوع مسائل حتی اگر عبارت تحلیلی نیز برقرار باشد، بسیار پیچیده است در این گونه موارد با استفاده از شبیه‌سازی‌ها، از جمله شبیه‌سازی مونت کارلو که به صورت وسیعی در پروژه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، راه‌حلهایی را به صورت تقریبی می‌توان محاسبه نمود. معادله، متشکل از متغیرهای تصادفی و ثابت می‌باشد و توزیع متغیرهای تصادفی مربوطه و ارتباط مابین متغیرها مشخص است. در این صورت نتیجه‌ی تقریبی معادله قابل شبیه‌سازی می‌باشد. در هر مرحله از شبیه‌سازی معادله به صورت انتخاب یک نمونه‌ی تصادفی از متغیرهای تصادفی و رابطه‌ها محاسبه می‌شود. هرچه تعداد شبیه‌سازی بیشتر باشد، نتیجه مناسب‌تر می‌باشد. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل به صورت توزیع عدم قطعیت، می‌توان هیستوگرام‌ها، میانگین، انحراف معیار استاندارد و دیگر پارامترهای استاتیکی را تعیین نمود [۲۰].

۲-۳-۸- روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

به مجموعه فنونی اطلاق می‌شود که به دنبال ارزیابی راه‌حل‌های ممکن بر اساس بیش از یک معیار (چند معیار)، برای انتخاب بهترین راه حل می‌باشند. فنون تصمیم‌گیری چند معیاره خود به دو دسته تصمیم‌گیری چند هدفه^۱ (MODM) و تصمیم‌گیری چند شاخصه^۲ (MADM) تقسیم می‌شوند که MODM به منظور طراحی و MADM برای انتخاب گزینه برتر انتخاب می‌شوند [۲۱، ۱۹].

▪ تصمیم‌گیری با اهداف چندگانه

در شرایط واقعی بسیار اتفاق می‌افتد که برای تصمیم‌گیرنده تعریف یک هدف کلی بسیار مشکل است و مطلوب این است که در یک مسأله چند هدف به طور همزمان تأمین شود. برای حل این گونه مسائل روش‌های تصمیم‌گیری با اهداف چندگانه مناسب خواهند بود. در این روش باید محدودیت‌ها و اهداف به صورت کمی تعریف شوند. برای حل مسائل MODM تکنیک‌های متعددی وجود دارد که برنامه‌ریزی آرمانی، معروف‌ترین آنها می‌باشد.

¹ Multi Objective Decision Making (MODM)

² Multiple Attribute Decision Making (MADM)

▪ تصمیم‌گیری با شاخص‌های چندگانه

این مدل‌ها به منظور انتخاب مناسب‌ترین گزینه از بین m گزینه موجود به کار می‌روند. خصوصیت متمایز مدل‌های تصمیم‌گیری با شاخص‌های چندگانه آن است که معمولاً تعداد محدود و قابل شماری از گزینه‌های از پیش تعیین شده وجود دارد. به طور کلی فنون تصمیم‌گیری چند شاخصه به دو دسته کلی جبرانی و غیرجبرانی تقسیم می‌شود و در میان روش‌های موجود تنها می‌توان از روش‌های جبرانی در مساله رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده نمود چرا که در مساله رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه، شاخص‌های مختلف بر یکدیگر تأثیر دارند. از مهم‌ترین فنون جبرانی روش میانگین وزنی ساده^۱،

$LINMAP^2$ ، MDS^3 ، MRS^4 ، $TOPSIS^5$ ، $ELECTRE^6$ و تخصیص خطی^۷ می‌باشند [۲۲].

مزایای مدل‌های جبرانی و محدودیت مدل‌های غیر جبرانی به صورت شکل زیر بیان شده است .



شکل ۲-۳: روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه و انواع مدل‌های آن [۲۳]

۲-۴- روش‌های رتبه‌بندی ریسک مورد استفاده در تحقیق

با توجه به توضیحات داده شده در بخش‌های قبلی، الگوریتم حل مساله با روش‌های شباهت به گزینه

¹ Simple Additive Weighting (SAW)

² Linear Programming for Multidimensional Analysis of Preferences

³ Multidimensional Scaling With Ideal Point

⁴ Marginal Rate of Substitution of Attributes

⁵ Technique for order Preference by Similarity to Ideal Solution

⁶ Eliminationet Choice Translating Reality

⁷ Linear Assignment (LA)

ایده‌آل (TOPSIS)، شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (FTOPSIS)، حذف و انتخاب سازگار با واقعیت (ELECTRE) و حذف و انتخاب سازگار با واقعیت فازی (FELECTRE) که با استفاده از آنها ریسک‌های حفاری مکانیزه مسأله رتبه‌بندی شده‌اند، در ادامه آورده شده‌اند.

۲-۴-۱- روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)

روش شباهت به گزینه ایده‌آل، توسط یون و هوانگ در سال ۱۹۸۱ ارائه شده و مورد استقبال محققان و کاربران مختلف واقع شده است. در این روش، گزینه‌ها بر اساس شباهت به حل ایده‌آل رتبه‌بندی می‌شوند، به طوری که هر چه یک گزینه شبیه‌تر به حل ایده‌آل باشد، رتبه بیشتری دارد. این روش تصمیم‌گیری، از پشتوانه ریاضی قوی برخوردار است و همانند بسیاری از روش‌های علمی، دانستن و رعایت مفروضات، محدوده و شرایط اعتبار قوانین و صحت فرمول‌های پیشنهادی، محدوده دقت نتایج و شرایط قابل قبول بودن جواب‌ها، بسیار حائز اهمیت است.

اگر در یک مسأله تصمیم‌گیری چند معیاره، n معیار و m گزینه وجود داشته باشد، به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از روش شباهت به حل ایده‌آل، مراحل انجام این روش به شرح ذیل است [۱۹، ۲۴]:

مرحله اول: تشکیل ماتریس تصمیم

با توجه به تعداد معیارها و گزینه‌ها و ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$D = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

که در آن عملکرد گزینه i ($i=1,2,\dots,m$) در رابطه با معیار j ($j=1,2,\dots,n$) است.

مرحله دوم: بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم

در این مرحله سعی می‌شود معیارهای با ابعاد مختلف به معیارهای بدون بعد تبدیل شوند. ماتریس

به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

روش‌های مختلفی برای بی‌بعد کردن ماتریس وجود دارد، اما در روش شباهت به گزینه ایده‌آل

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4-2)$$

معمولاً از رابطه زیر استفاده می‌شود:

مرحله سوم: تعیین ماتریس وزن معیارها

در این مرحله با توجه به ضریب اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم‌گیری، ماتریس وزن معیارها

به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$W = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & W_n \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

ماتریس W یک ماتریس قطری به ابعاد $n \times n$ است که فقط عناصر روی قطر آن غیر صفر و مقدار

این عناصر مساوی ضریب اهمیت بردار مربوطه است.

مرحله چهارم: تعیین ماتریس تصمیم وزن‌دار

ماتریس تصمیم وزن‌دار از ضرب ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده در ماتریس وزن معیارها بدست

می‌آید:

$$V = R \times W = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1n} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ V_{m1} & V_{m2} & \dots & V_{mn} \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

مرحله پنجم: پیدا کردن حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل

اگر حل ایده‌آل را با A^* و حل ضد ایده‌آل را با A^- نشان داده شود در این صورت :

$$A^* = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_i^*, \dots, V_n^*\} \quad (8-2)$$

$$A^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_i^-, \dots, V_n^-\} \quad (9-2)$$

که در آن V_i^* بهترین مقدار i امین معیار از بین تمام گزینه‌ها و V_i^- بدترین مقدار i امین معیار از

بین تمام گزینه‌ها می‌باشد. گزینه‌هایی که در A^* و A^- قرار می‌گیرند، به ترتیب نشان‌دهنده گزینه‌هایی

کاملاً بهتر و کاملاً بدتر هستند

مرحله ششم: محاسبه فاصله از حل ایده آل و ضد ایده آل

در این مرحله برای هر گزینه، فاصله از حل ایده آل و فاصله از حل ضد ایده آل به ترتیب از روابط

زیر محاسبه می‌شوند :

$$S_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V_i^*)^2} \quad (10-2)$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V_i^-)^2} \quad (11-2)$$

در روابط فوق اندیس های 1 و j به ترتیب معرف معیار و گزینه مورد نظر می‌باشند.

مرحله هفتم: محاسبه شاخص شباهت

در آخرین مرحله شاخص شباهت (G_j^*) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_j^* = \frac{S_j^-}{S_j^* + S_j^-} \quad (12-2)$$

مقدار شاخص شباهت بین صفر و یک تغییر می‌کند و هر چه گزینه مورد نظر به ایده آل مشابه‌تر باشد مقدار شاخص شباهت آن به یک نزدیک‌تر خواهد بود، کاملاً واضح است که اگر $A_j = A^*$ باشد، آنگاه $S_j^* = S_j^-$ مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی یک خواهد بود و در صورتی که $A_j = A^-$ آنگاه $S_j^- = S_j^*$ مساوی صفر و شاخص شباهت آن مساوی صفر خواهد بود؛ لذا رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس مقدار شاخص شباهت خواهد بود، بدین ترتیب، گزینه‌ای که دارای بیشترین شاخص شباهت است، دارای رتبه اول و گزینه‌ای که دارای کمترین شاخص شباهت، است حائز رتبه آخر خواهد بود.

۲-۴-۲- روش شباهت به گزینه ایده آل فازی^۱ (FTOPSIS)

در روش شباهت به گزینه ایده آل کلاسیک، وزن معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها توسط مقادیر دقیق و معین تعیین می‌شود. بسیاری از مواقع تفکرات انسان با عدم قطعیت همراه است و این عدم قطعیت

¹ Fuzzy Technique for order performance by similarity to ideal solution

در تصمیم‌گیری تأثیرگذار است؛ لذا باید از روش‌های تصمیم‌گیری فازی استفاده کرد که روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی یکی از این روش‌ها است. در این حالت عناصر ماتریس تصمیم‌گیری یا وزن معیارها و یا هر دو آنها توسط متغیرهای زبانی که توسط اعداد فازی ارائه شده‌اند، ارزیابی شده و بدین ترتیب بر مشکلات روش شباهت به گزینه ایده‌آل کلاسیک غلبه شده است [۱۹، ۲۵].

اگر در یک مسأله تصمیم‌گیری چند معیاره n معیار و m گزینه وجود داشته باشد، به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی باید مراحل زیر انجام شود [۱۹، ۲۵]:

مرحله اول: تشکیل ماتریس تصمیم

با توجه به تعداد معیارها و تعداد گزینه‌ها و ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} \bar{X}_{11} & \cdots & \bar{X}_{1j} & \cdots & \bar{X}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{X}_{i1} & \cdots & \bar{X}_{ij} & \cdots & \bar{X}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{X}_{m1} & \cdots & \bar{X}_{mj} & \cdots & \bar{X}_{mn} \end{bmatrix} \quad (13-2)$$

در صورتی که از اعداد فازی مثلثی استفاده شود، $\bar{X} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ عملکرد گزینه i ام $i=(1,2,\dots,m)$ در رابطه با معیار j ام $(j=1,2,\dots,n)$ می‌باشد.

در بیشتر مواقع برای تصمیم‌گیری در انتخاب یک گزینه از نظرات کارشناسان مختلفی استفاده می‌شود که در این صورت برای ترکیب نظرات کارشناسان مختلف و تعیین X_{ij} ها برای انتخاب محل مناسب به ترتیب زیر عمل کنیم.

اگر کمیته تصمیم‌گیرنده دارای k تصمیم‌گیرنده باشد و رتبه‌بندی فازی k امین تصمیم‌گیرنده $\bar{X}_{ijk} = (a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk})$ (عدد فازی مثلثی) به ازای $i=1,2,\dots,m$ و $j=1,2,\dots,n$ باشد، رتبه‌بندی فازی ترکیبی $\bar{X}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ گزینه‌ها را با توجه به معیارها می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

$$a_{ij} = \text{Min} \{a_{ijk}\} \quad b_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^k b_{ijk}}{k} \quad c_{ij} = \text{Max} \{c_{ijk}\} \quad (14-2)$$

مرحله دوم: تعیین ماتریس وزن معیارها

در این مرحله ضریب اهمیت معیارهای مختلف، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n] \quad (15-2)$$

در صورتی که از اعداد فازی مثلثی استفاده شود:

$$\bar{W}_j = (\bar{W}_{j1}, \bar{W}_{j2}, \bar{W}_{j3}) \quad (16-2)$$

اگر کمیته تصمیم‌گیرنده دارای k تصمیم‌گیرنده باشد و ضریب اهمیت k امین تصمیم‌گیرنده \bar{W}_{jk}

$$\bar{W}_j = (W_{jk1}, W_{jk2}, W_{jk3}) = (\text{عدد فازی مثلثی}) \text{ به ازای } j=1,2,\dots,n \text{ باشد، رتبه‌بندی فازی ترکیبی}$$

را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

$$W_{j1} = \text{Min} \{W_{jk1}\} \quad W_{j2} = \frac{\sum_{k=1}^k W_{jk2}}{k} \quad W_{j3} = \text{Max} \{W_{jk3}\} \quad (17-2)$$

مرحله سوم: بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم فازی

زمانی که X_{ij} ها به صورت فازی هستند، مسلماً r_{ij} ها نیز فازی خواهند بود. در این مرحله به جای

محاسبات پیچیده نرمالیزه کردن در روش شباهت به گزینه ایده‌آل کلاسیک، تغییر مقیاس خطی برای

تبدیل مقیاس معیارهای مختلف به مقیاس قابل مقایسه استفاده می‌شود.

اگر اعداد فازی به صورت مثلثی باشند، درایه‌های ماتریس تصمیم نرمال برای معیارهای مثبت و

منفی به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شود:

اگر \tilde{X}_{ij} جنبه مثبت داشته باشد:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_{j^*}}, \frac{b_{ij}}{c_{j^*}}, \frac{c_{ij}}{c_{j^*}} \right), \quad c_{j^*} = \text{Max} \{c_{ij}\} \quad (18-2)$$

اگر \tilde{X}_{ij} جنبه منفی داشته باشد.

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), \quad a_j^- = \text{Min} \{a_{ij}\} \quad (19-2)$$

بنابراین ماتریس تصمیم فازی نرمال (\tilde{R}) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad j = 1, 2, \dots, n ; i = 1, 2, \dots, m \quad (20-2)$$

و یا:

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \bar{r}_{11} & \dots & \bar{r}_{1j} & \dots & \bar{r}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{r}_{i1} & \dots & \bar{r}_{ij} & \dots & \bar{r}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{r}_{m1} & \dots & \bar{r}_{mj} & \dots & \bar{r}_{mn} \end{bmatrix} \quad (21-2)$$

که m بیانگر تعداد گزینه‌ها و n بیانگر تعداد معیارها می‌باشد.

مرحله چهارم: تعیین ماتریس تصمیم فازی وزن دار

با توجه به وزن معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم فازی وزن دار از ضرب ضریب اهمیت مربوط به

هر معیار (\tilde{w}_j) در ماتریس نرمالیزه شده فازی (\tilde{R}) به صورت ماتریس زیر به دست می‌آید:

$$\tilde{V} = \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_j \quad (22-2)$$

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} \bar{v}_{11} & \dots & \bar{v}_{1j} & \dots & \bar{v}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{v}_{i1} & \dots & \bar{v}_{ij} & \dots & \bar{v}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{v}_{m1} & \dots & \bar{v}_{mj} & \dots & \bar{v}_{mn} \end{bmatrix} \quad (23-2)$$

که (\tilde{w}_j) بیان‌کننده ضریب اهمیت معیار C_j می‌باشد.

اگر اعداد فازی به صورت مثلثی باشند، برای معیارهای با جنبه مثبت و منفی به ترتیب داریم:

$$\tilde{V}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_j = \left(\frac{a_{ij}}{c_{j^*}}, \frac{b_{ij}}{c_{j^*}}, \frac{c_{ij}}{c_{j^*}} \right) \cdot (W_{j1}, W_{j2}, W_{j3}) \quad (24-2)$$

$$= \left(\frac{a_{ij}}{c_{j^*}} W_{j1}, \frac{b_{ij}}{c_{j^*}} W_{j2}, \frac{c_{ij}}{c_{j^*}} W_{j3} \right)$$

$$\tilde{V}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_j = \left(\frac{a_{j^-}}{c_{ij}}, \frac{a_{j^-}}{b_{ij}}, \frac{a_{j^-}}{a_{ij}} \right) \cdot (W_{j1}, W_{j2}, W_{j3}) \quad (25-2)$$

$$= \left(\frac{a_{j^-}}{c_{ij}} W_{j1}, \frac{a_{j^-}}{b_{ij}} W_{j2}, \frac{a_{j^-}}{a_{ij}} W_{j3} \right)$$

مرحله پنجم: یافتن حل ایده‌ال فازی و حل ضد ایده‌ال فازی

$$A^* = \{\tilde{V}_1^*, \tilde{V}_2^*, \dots, \tilde{V}_n^*\}, \quad \tilde{V}_i^* = \text{Max}\{\tilde{V}_{ij}^*\}, \quad j = 1, 2, \dots, n ; i = 1, 2, \dots, m \quad (26-2)$$

$$A^- = \{\tilde{V}_1^-, \tilde{V}_2^-, \dots, \tilde{V}_n^-\}, \quad \tilde{V}_i^- = \text{Min}\{\tilde{V}_{ij}^-\}, \quad j = 1, 2, \dots, n ; i = 1, 2, \dots, m \quad (27-2)$$

که \tilde{V}_i^* بهترین مقدار i امین معیار از بین تمام گزینه‌ها و \tilde{V}_i^- بدترین مقدار i امین معیار از بین تمام گزینه‌ها می‌باشد.

گزینه‌هایی که در آن A^* و A^- قرار می‌گیرند، به ترتیب نشان‌دهنده گزینه‌های کاملاً بهتر و کاملاً بدتر هستند.

مرحله ششم: محاسبه فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی

فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$S_i^* = \sum d_V(V_{ij}, V_j^*) \quad , i = 1, 2, \dots, m \quad (28-2)$$

$$S_i^- = \sum d_V(V_{ij}, V_j^-) \quad , i = 1, 2, \dots, m \quad (29-2)$$

فاصله از حل ایده‌آل برای اعداد فازی مثلی مثبت و منفی به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$d_V(V_{ij}, V_j^*) = \sqrt{\frac{1}{3}(\sum (v_{ij} - v_j^*)^2)} \quad (30-2)$$

$$d_V(V_{ij}, V_j^-) = \sqrt{\frac{1}{3}(\sum (v_{ij} - v_j^-)^2)} \quad (31-2)$$

قابل ذکر است که $d_V(V_{ij}, V_j^*)$ و $d_V(V_{ij}, V_j^-)$ اعداد قطعی هستند.

مرحله هفتم: محاسبه شاخص شباهت

در آخرین مرحله شاخص شباهت (C_j^*) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_j^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad , i = 1, 2, \dots, m \quad (32-2)$$

مرحله هشتم: رتبه‌بندی گزینه‌ها

در این مرحله با توجه به میزان شاخص شباهت گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند به طوری که گزینه‌های با شاخص شباهت بیشتر در اولویت قرار دارند.

۲-۴-۳- روش حذف و انتخاب سازگار با واقعیت (ELECTRE)

روش الکتراه (ELECTRE) یا تسلط تقریبی از روش‌های پرکاربرد تصمیم‌گیری چندمعیاره است.

تکنیک ELECTRE از حروف اول عبارت Elimination et choice trancelating reality به معنی روش حذف و انتخاب سازگار با واقعیت گرفته شده است. در مقالات مختلف مثال‌هایی از کاربرد این روش بیان شده است از جمله رتبه‌بندی پروژه‌ها، طرح‌ریزی تسهیلات، انتخاب محل کارخانه، برنامه‌ریزی استراتژیک و...

تاریخچه روش الکتراه به اروپا در اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی بر می‌گردد و می‌توان به عنوان یکی از بهترین روش‌های در نظر گرفته شده در حل مسائل تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه برشمرد. برنارد روی به عنوان پدر روش الکتراه شناخته می‌شود [۲۶]. این تکنیک برای اولین بار در سال ۱۹۶۶ توسط ساسمن، روی و بنایون در شرکت مشاوره سما پیشنهاد گردید. این شرکت تیمی را تشکیل داد تا در مورد مسائل چندمعیاره، برای تصمیم‌گیری در مورد فعالیت‌های جدید شرکت به تحقیق بپردازند که در اصل این روش جزو یکی از اولین رویکردهای تصمیم‌گیری بود. در این روش کلیه گزینه‌ها با استفاده از مقایسات غیر رتبه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و بدان طریق گزینه‌های غیر مؤثر حذف می‌شوند. کلیه این مراحل بر اساس یک مجموعه موافق و یک مجموعه مخالف پایه‌ریزی می‌شوند که به دلیل این موضوع این روش معروف به آنالیز موافقت نیز می‌باشد. روش الکتراه دارای نسخه‌های مختلفی است از جمله روش الکتراه ۱، الکتراه ۲ و ۳ و ۴. اختلاف نسخه‌های مختلف این روش در نوع عملیات ریاضی و نوع مسائلی است که این روش‌ها قادر به حل آن می‌باشند [۲۳، ۲۷].

پرسشنامه این روش نیز همانند روش TOPSIS است یعنی پرسشنامه‌ای که از ماتریس معیار-گزینه تشکیل شده است و پاسخگویی به آن بر اساس طیف‌های کلامی و یا اعداد واقعی است.

۲-۴-۳-۱- نقاط ضعف و قوت روش الکتراه

- یکی از نقاط ضعف روش الکتراه استفاده از حداقل آستانه موافق و مخالف برای محاسبه ماتریس موافقت و مخالفت مؤثر می‌باشد. زیرا با توجه به این که مجموعه موافق و مجموعه مخالف به نسبت دلخواه بوده و همچنین می‌توانند روی جواب نهایی تا حد زیادی تأثیرگذار باشند، بنابراین تغییر در میزان حد آستانه جواب‌های مساله را تا حدود زیادی دستخوش تغییر می‌نماید. از طرفی، این روش، رتبه‌بندی کامل و نهایی را به ما نمی‌دهد و به ارائه گزینه‌های برتر اکتفا می‌کند.

- از مزایای آن می‌توان به قوانین ساده، حداکثر استفاده از اطلاعات ماتریس تصمیم و در نهایت محاسبات منظم و منسجم آن اشاره نمود.

۲-۴-۳-۲- گام‌های روش الکنره

گام‌های روش الکنره به صورت زیر است [۲۷-۲۹]:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم

با توجه به تعداد معیارها و تعداد گزینه‌ها و مقادیر ارزیابی شده گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (۳۳-۲)$$

گام دوم: بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم (نرمال سازی)

در این مرحله سعی می‌شود معیارها با ابعاد مختلف به معیارهایی بدون بعد تبدیل شوند برای بی‌مقیاس کردن از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_i (X_{ij})^2}}, i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (۳۴-۲)$$

گام سوم: تعیین ماتریس وزن معیارها

در این مرحله با توجه به ضرایب اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم‌گیری، بردار ضریب اهمیت معیارها (W) تعیین می‌شود.

گام چهارم: تعیین ماتریس تصمیم وزن دار نرمال شده

ماتریس تصمیم وزن دار از ضرب ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده در برابر وزن معیارها به دست می‌آید.

$$V_{ij} = W_j \times R_{ij} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (۳۵-۲)$$

گام پنجم: تشکیل مجموعه معیارهای موافق و مخالف

برای هر زوج گزینه k و e مجموعه معیارها به دو زیر مجموعه موافق و مخالف تقسیم می‌شوند. مجموعه موافق (S_{ke}) مجموعه‌ای از معیارهایی است که در آن گزینه k به گزینه e ترجیح دارد و

مجموعه مکمل آن مجموعه مخالف (D_{ke}) می‌باشد مجموعه معیارهای موافق برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} S_{ke} &= \{j | v_{kj} \geq v_{ej}\} \\ S_{ke} &= \{j | v_{kj} \leq v_{ej}\} \end{aligned} \quad (۳۶-۲)$$

مجموعه معیارهای مخالف برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} D_{ke} &= \{j | v_{kj} < v_{ej}\} = J - S_{ke} \\ D_{ke} &= \{j | v_{kj} > v_{ej}\} = J - S_{ke} \end{aligned} \quad (۳۷-۲)$$

گام ششم: تشکیل ماتریس موافق

ماتریس موافق یک ماتریس مربعی است که بعد آن تعداد گزینه‌ها می‌باشد. هر یک از درایه‌های این ماتریس، شاخص موافق بین دو گزینه نامیده می‌شود. مقدار این شاخص، از جمع وزن معیارهایی که در مجموعه موافق وجود دارند، به دست می‌آید. به عبارت دیگر برای محاسبه شاخص موافق (C_{ke}) باید گزینه k و گزینه e مقایسه شده و مقدار آن از جمع وزن معیارهایی که گزینه k نسبت به گزینه e ترجیح دارد، به دست می‌آید. به زبان ریاضی، شاخص موافق از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C_{ke} = \sum_{j \in S_{ke}} W_j \quad (۳۸-۲)$$

شاخص موافق، بیانگر میزان برتری گزینه k بر گزینه e بوده و مقدار آن از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند.

گام هفتم: تشکیل ماتریس مخالف

ماتریس مخالف یک ماتریس مربعی می‌باشد که بعد آن تعداد گزینه‌ها می‌باشد. هر یک از درایه‌های این ماتریس، شاخص عدم موافق (مخالفت) بین دو گزینه نامیده می‌شود. مقدار این شاخص از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$d_{ke} = \frac{\max_{j \in D_{ke}} |v_{kj} - v_{ej}|}{\max_j |v_{kj} - v_{ej}|} \quad (۳۹-۲)$$

گام هشتم: تشکیل ماتریس تسلط موافق

در مرحله ششم نحوه محاسبه شاخص توافق (C_{ke}) بیان شد، هم اکنون در این مرحله یک مقدار معین برای شاخص توافق مشخص می شود که آن را آستانه موافقت می نامند و با \bar{C} نشان داده می شود. آستانه موافقت از میانگین گیری شاخص های توافق (درایه های ماتریس توافق) به دست می آید. به زبان ریاضی مقدار آستانه موافقت از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\bar{C} = \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m \frac{C_{ke}}{m(m-1)} \quad (40-2)$$

ماتریس تسلط موافق (F) با توجه به مقدار آستانه موافقت تشکیل می شود. اگر C_{ke} بزرگتر از \bar{C} باشد، برتری گزینه k بر گزینه e قابل قبول است در غیر این صورت گزینه k بر گزینه e برتری ندارد لذا درایه های ماتریس تسلط موافق از رابطه زیر تعیین می شود.

$$f_{ke} = \begin{cases} 1 & c_{ke} \geq \bar{c} \\ 0 & c_{ke} < \bar{c} \end{cases} \quad (41-2)$$

گام نهم: تشکیل ماتریس تسلط مخالف

ماتریس تسلط مخالف (G) مانند ماتریس تسلط موافق تشکیل می شود. بدین منظور ابتدا باید مقدار آستانه مخالفت (\bar{d}) از میانگین گیری شاخص های مخالفت (درایه های ماتریس مخالف) محاسبه شود. به زبان ریاضی مقدار آستانه مخالفت از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\bar{d} = \sum_{k=1}^m \sum_{e=1}^m \frac{d_{ke}}{m(m-1)} \quad (42-2)$$

همان گونه که در مرحله هفتم بیان شد، مقدار شاخص مخالفت (d_{ke}) هر چه کمتر باشد بهتر است. زیرا میزان مخالفت (عدم توافق) برتری گزینه k بر گزینه e را بیان می کند. چنانچه d_{ke} از \bar{d} بزرگتر باشد میزان مخالفت زیاد بوده و نمی توان از آن صرف نظر کرد، بنابراین درایه های ماتریس تسلط مخالف (G) به صورت زیر محاسبه می شود.

$$g_{ke} = \begin{cases} 0 & d_{ke} \geq \bar{d} \\ 1 & d_{ke} < \bar{d} \end{cases} \quad (43-2)$$

هر عضو ماتریس G نیز نشان گر رابطه تسلط مابین گزینه ها می باشد.

گام دهم: تشکیل ماتریس تسلط نهایی

ماتریس تسلط نهایی (H) از ضرب تک تک درایه‌های ماتریس تسلط موافق (F) در ماتریس تسلط مخالف (G) حاصل می‌شود.

انتخاب بهترین گزینه

ماتریس تسلط نهایی (H) ترجیحات جزئی گزینه‌ها را بیان می‌کند. به طور مثال، اگر مقدار h_{ke} برابر یک باشد بدین معناست که برتری گزینه k بر گزینه e در هر دو حالت موافق و مخالف قابل قبول است (یعنی برتری آن از حد آستانه موافقت بیشتر بوده و مخالفت و یا ضعف آن نیز از حد آستانه مخالفت کمتر است) ولیکن هنوز گزینه k شانس مسلط شدن توسط گزینه‌های دیگر را دارد. گزینه‌ای باید انتخاب شود که بیشتر از آن که مغلوب شود، تسلط داشته باشد و از این نظر می‌توان گزینه‌ها را رتبه‌بندی کرد.

۲-۴-۴- روش حذف و انتخاب سازگار با واقعیت فازی (FUZZY ELECTRE)

روش الکتراه از روش‌های پرکاربرد تصمیم‌گیری چند معیاره است. استفاده از روش الکتراه فازی با توجه به ماهیت عدم اطمینان و ابهام موجود در ارزیابی مقایسه‌ها جهت تکمیل ماتریسی عملکرد تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. در این روش، گزینه‌های رقیب با استفاده از مقایسه‌های غیر رتبه‌ای ارزیابی می‌شوند.

در اینجا گام‌های روش ELECTRE I که توسط Hatami-Marbini و Tavana (۲۰۱۱) پیشنهاد شده است، به طور مختصر آورده شده است [۲۹].

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم فازی

برای تشکیل ماتریس تصمیم فازی از m گزینه و n معیار استفاده می‌شود، ابتدا اهمیت فازی هر معیار مشخص می‌شود. این اهمیت همان وزن معیار است که می‌تواند مستقیم توسط تصمیم‌گیرنده یا تصمیم‌گیرندگان تعیین شود و یا اینکه از روش‌هایی نظیر AHP فازی تعیین شود. البته می‌توان وزن‌ها را به صورت قطعی تعیین کرد و جهت فازی کردن آن وزن را سه بار تکرار نمود.

$$\tilde{U} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (44-2)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{W}_1 \quad \tilde{W}_2 \quad \dots \quad \tilde{W}_N]$$

گام دوم: نرمال سازی ماتریس تصمیم

نرمال سازی در روش الکترون فازی توسط دو رابطه زیر برای معیارهای مثبت و منفی انجام می شود. اگر معیار جنبه مثبت داشته باشد یعنی افزایش آن معیار باعث بهبود در سیستم شود از رابطه اول استفاده می کنیم و اگر معیار جنبه منفی داشته باشد یعنی کاهش آن باعث بهبود در سیستم شود از رابطه دوم استفاده می شود.

$$\tilde{r}_{ij} = (r_{ij}^l, r_{ij}^y, r_{ij}^u) = \left(\frac{x_{ij}^l}{c_j^+}, \frac{x_{ij}^y}{c_j^+}, \frac{x_{ij}^u}{c_j^+} \right), \quad (45-2)$$

$$c_j^+ = \max_i(x_{ij}^u), j \in B, \quad \text{and}$$

$$\tilde{r}_{ij} = (r_{ij}^l, r_{ij}^y, r_{ij}^u) = \left(\frac{a_j^-}{x_{ij}^u}, \frac{a_j^-}{x_{ij}^y}, \frac{a_j^-}{x_{ij}^l} \right), \quad (46-2)$$

$$a_j^- = \min_i(x_{ij}^l), j \in C$$

گام سوم: تشکیل ماتریس نرمال وزن دار

در این گام وزن های معیارها که در گام ۱ بدست آورده بودیم را در ماتریس نرمال ضرب می کنیم. تا ماتریس وزن دار حاصل شود.

گام چهارم: محاسبه فاصله بین هر دو گزینه

در این گام با استفاده از رابطه زیر فاصله بین هر دو گزینه مسأله را نسبت به هر معیار بدست می آوریم.

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \int |\mu_{\tilde{A}}(x) - \mu_{\tilde{B}}(x)| dx \quad (47-2)$$

مجموعه موافق و مخالف از ماتریس وزن دار شده بدست می آیند و برای تشکیل ماتریس های موافق و مخالف از رابطه بالا استفاده می شود.

گام پنجم: ساخت مجموعه موافق و ایجاد ماتریس موافقت

مجموعه موافق مجموعه‌ای از معیارهایی است که $V_{xj} > V_{yj}$ است که V همان ماتریس نرمال وزن دار است. که ماتریس موافقت از مجموع وزن تمام معیارهای موجود در مجموعه موافق بر اساس رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{11} & \dots & \tilde{c}_{1x} & \dots & \tilde{c}_{1(m-1)} & \tilde{c}_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{c}_{x1} & \dots & \dots & \dots & \tilde{c}_{x(m-1)} & \tilde{c}_{xm} \\ \dots & \dots & \dots & \tilde{c}_{xy} & \dots & \dots \\ \tilde{c}_{(m-1)1} & \dots & \tilde{c}_{(m-1)x} & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{c}_{m1} & \dots & \dots & \dots & \tilde{c}_{m(m-1)} & \tilde{c}_{mm} \end{bmatrix} \quad (48-2)$$

$$\text{where } \tilde{c}_{xy} = (c_{xy}^l, c_{xy}^y, c_{xy}^u) = \left(\sum_{j \in J_c} w_j^l, \sum_{j \in J_c} w_j^y, \sum_{j \in J_c} w_j^u \right)$$

سپس مقدار آستانه مجموعه موافق را از رابطه زیر بدست می‌آوریم. که این میانگین حسابی از درایه‌های ماتریس موافق است.

$$\tilde{c} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^{m-1} \frac{\tilde{c}_{xy}}{m(m-1)} \quad (49-2)$$

گام ششم: تشکیل ماتریس بولین موافق

با استفاده از مقدار آستانه و ماتریس موافق، می‌توان ماتریس بولین (صفر و یک) را ایجاد کرد. اگر درایه ماتریس موافق از مقدار آستانه بزرگ‌تر باشد عدد متناظر آن در ماتریس بولین ۱ می‌شود و در غیر این صورت مقدار صفر اختیار می‌کند.

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & \dots & e_{1x} & \dots & e_{1(m-1)} & e_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{x1} & \dots & \dots & \dots & e_{x(m-1)} & e_{xm} \\ \dots & \dots & \dots & e_{xy} & \dots & \dots \\ e_{(m-1)1} & \dots & e_{(m-1)x} & \dots & \dots & \dots \\ e_{m1} & \dots & \dots & \dots & e_{m(m-1)} & e_{mm} \end{bmatrix} \quad (50-2)$$

$$\text{Where } \begin{cases} \tilde{c}_{xy} \geq \tilde{c} \leftrightarrow e_{xy} = 1 \\ \tilde{c}_{xy} < \tilde{c} \leftrightarrow e_{xy} = 0 \end{cases}$$

گام هفتم: ساخت مجموعه مخالف و ایجاد ماتریس مخالفت

مجموعه مخالف مجموعه‌ای از معیارهایی است که $V_{xj} < V_{yj}$ است و با استفاده از رابطه زیر ماتریس مخالف را تشکیل می‌دهیم.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1x} & \dots & d_{1(m-1)} & d_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{x1} & \dots & \dots & \dots & d_{x(m-1)} & d_{xm} \\ \dots & \dots & \dots & d_{xy} & \dots & \dots \\ d_{(m-1)1} & \dots & d_{(m-1)x} & \dots & \dots & \dots \\ d_{m1} & \dots & \dots & \dots & d_{m(m-1)} & d_{mm} \end{bmatrix} \quad (51-2)$$

$$\text{Where } d_{xy} = \frac{\max_{j \in D} |\tilde{v}_{xj} - \tilde{v}_{yj}|}{\max_j |\tilde{v}_{xj} - \tilde{v}_{yj}|} = \frac{\max_{j \in D} |d(\max(\tilde{v}_{xj}, \tilde{v}_{yj}), \tilde{v}_{xj})|}{\max_j |d(\max(\tilde{v}_{xj}, \tilde{v}_{yj}), \tilde{v}_{yj})|}$$

همچنین مقدار آستانه مخالفت با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\bar{d} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^{m-1} \frac{d_{xy}}{m(m-1)} \quad (52-2)$$

گام هشتم: تشکیل ماتریس بولین مخالف

با استفاده از مقدار آستانه و ماتریس مخالفت، می‌توان ماتریس بولین (صفر و یک) را ایجاد کرد. اگر درایه ماتریس مخالف از مقدار آستانه بزرگ‌تر باشد عدد متناظر آن در ماتریس بولین صفر می‌شود و در غیر این صورت مقدار ۱ اختیار می‌کند.

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1x} & \dots & f_{1(m-1)} & f_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{x1} & \dots & \dots & \dots & f_{x(m-1)} & f_{xm} \\ \dots & \dots & \dots & f_{xy} & \dots & \dots \\ f_{(m-1)1} & \dots & f_{(m-1)x} & \dots & \dots & \dots \\ f_{m1} & \dots & \dots & \dots & f_{m(m-1)} & f_{mm} \end{bmatrix} \quad (53-2)$$

$$\text{Where } \begin{cases} d_{xy} \geq \bar{d} \leftrightarrow f_{xy} = 0 \\ d_{xy} < \bar{d} \leftrightarrow f_{xy} = 1 \end{cases}$$

گام نهم: تشکیل ماتریس نهایی

ماتریس نهایی از ضرب درایه‌های متناظر دو ماتریس بولین موافق و مخالف بدست می‌آید. به عبارتی $H = E * F$. ماتریس H نیز یک ماتریس صفر و یک است. این ضرب به گونه‌ای است که وقتی هر دو مقدار ۱ باشد جواب یک می‌شود و در غیر این صورت جواب ۰ خواهد بود.

گام دهم: رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

ماتریس تسلط نهایی (H) ترجیحات جزئی گزینه‌ها را بیان می‌کند. به طور مثال، اگر مقدار h_{ke} برابر یک باشد بدین معناست که برتری گزینه k بر گزینه e در هر دو حالت موافق و مخالف قابل قبول است (یعنی برتری آن از حد آستانه موافقت بیشتر بوده و مخالفت و یا ضعف آن نیز از حد آستانه

مخالفت کمتر است) ولیکن هنوز گزینه k شانس مسلط شدن توسط گزینه‌های دیگر را دارد. گزینه‌ای باید انتخاب شود که بیشتر از آن که مغلوب شود، تسلط داشته باشد و از این نظر می‌توان گزینه‌ها را رتبه‌بندی کرد.

۲-۵- استراتژی‌های اولویت‌بندی

در یک مسأله تصمیم‌گیری چندمعیاره تکنیک‌های مختلفی به منظور اولویت‌بندی ریسک مخاطرات وجود دارد و امکان دارد نتایج این روش‌ها مشابه نباشد، لذا در چنین مواردی، عدم توافقی در انتخاب گزینه درست به وجود می‌آید. در چنین وضعی باید از روش‌های ادغام^۱، که شامل روش میانگین رتبه‌ها^۲، روش بُردا^۳ و روش کُپلند^۴ برای اولویت‌بندی نهایی استفاده کرد.

۲-۵-۱- روش میانگین رتبه‌ها

در این روش برای هر گزینه، میانگین حسابی رتبه‌های به دست آمده برای هر گزینه از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره تعیین می‌شود و بر این اساس گزینه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. بدیهی است که گزینه‌های با میانگین حسابی پایین‌تر در اولویت خواهند بود [۲۴].

۲-۵-۲- روش بردا

در این روش برای تصمیم‌گیری، ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها ایجاد می‌شود. در صورتی که بر اساس روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره تعداد ارجحیت گزینه‌ای بر گزینه دیگر بیش از تعداد مغلوب شدن آن گزینه بر گزینه دیگری باشد در ماتریس مقایسه زوجی عدد ۱ گذاشته می‌شود و در صورتی که رأی اکثریت وجود نداشت و یا آرا باهم مساوی باشد در ماتریس مقایسه زوجی عدد صفر گذاشته می‌شود. عدد ۱ به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد و عدد صفر به منزله آن است که ستون بر سطر ارجحیت دارد. پس از $\frac{m(m-1)}{2}$ مقایسه زوجی (m تعداد گزینه‌ها) ماتریس

¹ Partially Ordered Set (POSET)

² Ranks Mean

³ Borda Method

⁴ Copeland Method

مقایسه زوجی شکل خواهد گرفت. مجموع عناصر هر سطر تعداد مسلط شدن هر گزینه را نشان می‌دهد و گزینه‌ها براساس تعداد مسلط شدن اولویت‌بندی می‌شوند [۲۴].

۲-۵-۳- روش کپلند

روش کپلند مشابه روش بردا است؛ منتها در اولویت‌بندی علاوه بر تعداد بردهای گزینه، تعداد باخت‌های گزینه (تعداد ۱ در ستون‌ها) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور گزینه‌ها بر اساس تفاضل مقادیر تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن اولویت‌بندی می‌شود [۲۴].

۲-۵-۴- مرحله ادغام

پس از آن که اولویت‌بندی گزینه‌ها توسط هر سه روش به دست آمد، نتایج این روش‌ها با یکدیگر ادغام شده تا رتبه‌بندی نهایی برای گزینه‌ها به دست آید. برای تلفیق سه روش فوق از رتبه‌بندی‌های به دست آمده برای هر گزینه میانگین گرفته می‌شود.

۲-۶- جمع‌بندی

در این فصل اصول و مفاهیم اولیه ریسک و مدیریت ریسک، عدم قطعیت و مدیریت ریسک از دیدگاه افراد و کتب مرجع آورده شده است. فرایند مدیریت ریسک با توجه به منابع مختلف بیان و دیدگاه استاندارد بین‌المللی دانش مدیریت پروژه به صورت کامل شرح داده شده است و روش‌های ارزیابی کمی ریسک با توجه به اهمیت آنها در امر مدیریت ریسک و مزایا و محدودیت روش‌ها ارائه شده است. در ادامه‌ی این فصل مبانی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره توضیح داده شد و به شرح روش‌هایی که قابلیت بکار بردن در سیستم مدیریت ریسک را دارند، پرداخته شد. از بین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره روش‌های شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)، شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (FTOPSIS)، حذف و انتخاب سازگار با واقعیت (ELECTRE) و حذف و انتخاب سازگار با واقعیت فازی (FELECTRE) بطور کامل شرح داده شد. همچنین استراتژی‌های رتبه‌بندی که شامل روش‌های ادغام است تشریح شد. در این تحقیق برای رتبه‌بندی ریسک‌های موجود در حفاری مکانیزه

مسأله از روش‌های ذکر شده استفاده خواهد شد که در فصل پنجم به طور کامل نحوه محاسبات و رتبه‌بندی ریسک‌ها تشریح شده است.

۳. فصل سوم:

سابقه علمی موضوع

پروژه‌های تونل‌سازی از جمله مواردی است که با استفاده از روش‌های سیستماتیک در قسمت مدیریت خود توانسته است به نتایج منطقی‌تری دسترسی پیدا کند. با توجه به حساسیت بالای عملیات اجرایی یک پروژه تونل و خسارات هنگفت وارده که ناشی از ضعف در قسمت مدیریت پروژه است، کاربرد مدیریت ریسک به عنوان جز لاینفک تونل‌سازی، ضروری به شمار می‌آید که در نتیجه کلیه افراد مرتبط با پروژه اعم از کارفرما، پیمانکار و مشاور مدیریت ریسک را به صورت رسمی و از پیش تعیین شده و یا به صورت غیر رسمی و بدون اختصاص بودجه یا شاخه‌ی فعالیتی مستقل در این زمینه، پذیرفته و اجرا می‌کنند [۷]. تونل‌سازی و عملیات احداث سازه‌های زیرزمینی در همه‌ی قسمت‌های درگیر پروژه، تحت تأثیر ریسک قرار دارند و عدم قطعیت‌های بیشماری طراحی سازه‌های زیرزمینی را احاطه نموده است. طبیعت پروژه‌های تونل‌سازی دلالت بر این دارد که دست اندرکاران توسعه چنین پروژه‌هایی با انواع ریسک مواجه هستند. همچنین در کنار پیشرفت‌هایی که در ساخت فضاهای زیرزمینی در چند دهه اخیر به وجود آمده است، طراحان تونل هنوز نگران ریسک‌هایی هستند که تونل‌سازی را در بر می‌گیرد [۳۰].

در ادامه، مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک و تونل‌سازی مکانیزه که در داخل و خارج از کشور در دهه‌های اخیر صورت گرفته و پروژه‌هایی که با ریسک سازوکار دارند به صورت مختصر ارائه شده است.

۳-۲- پیشینه تحقیق

ارزیابی ریسک یکی از مراحل مدیریت ریسک بوده و با توجه به ماهیت پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع، دارای اهمیت زیادی می‌باشد. به علت اهمیت این ریسک‌ها در اجرای فضاهای زیرزمینی و پروژه‌های تونل‌سازی، محققان زیادی بر روی ارزیابی و اولویت‌بندی آنها تحقیق کرده‌اند.

در جدول (۳-۱) به تعدادی از مطالعات انجام شده در داخل و خارج از کشور که در دهه‌های اخیر

صورت گرفته اشاره شده است:

جدول (۳-۱): سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

مرجع	مطالعات	سال	نویسندگان
۳۱	در تحقیقات خود نشان دادند که در پروژه‌های بزرگ مهندسی ابتدا ریسک‌ها شناسایی شده و طبقه‌بندی می‌شوند و برای کاهش هرکدام از ریسک‌ها راه کارهایی پیشنهاد شده و اجرا می‌شود.	۱۹۹۸	اورت هوک، آلساندور پالمیری ^۱
۳۲	این تحقیق برای کمک به همه کسانی که قصد تهیه نقشه کلی برای شناسایی و مدیریت ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی و زیرزمینی دارند، تهیه شده است. این تحقیق صاحبان و مشاوران را با آنچه مد نظر صنعت در آنالیز ریسک است فراهم می‌کند و مراحل مدیریت ریسک را در طول کل اجرای پروژه از طراحی تا شروع عملیات توصیف می‌کند. این مقاله در واقع دستورالعمل پژوهشی گروه مدیریت ریسک انجمن بین‌المللی تونل در سه حوزه طراحی، برگزاری مناقصه و انتخاب پیمانکار و ساخت تونل است که به بررسی روش‌های ارزیابی و مدیریت ریسک و ملاحظاتی که باید عوامل درگیر پروژه اعم از کارفرما تا پیمانکار در این حوزه‌ها داشته باشند، پرداخته شده است. در مرحله طراحی و مناقصه که به انتخاب پیمانکار منجر می‌شود، کارفرما مسئول ارزیابی و کاهش ریسک معرفی شده و در مرحله ساخت تونل تنها بحث نظارت و پشتیبانی به عهده کارفرما گذاشته شده و مسئولیت شناسایی و کاهش ریسک‌ها در طول دوره ساخت به عهده پیمانکار است.	۲۰۰۴	اسکیسن، تنگبورگ، کامپن، واپچرتز ^۲
۳۳	در این مقاله به بررسی مچاله‌شوندگی تونل‌های دو قلوئی هیمالیا، پنال پرداخته شده است. مچاله‌شوندگی همیشه جزو مشکلات مهم در تونل‌سازی در محیط‌های سنگی دارای روباره بالا است. نویسنده ابتدا مقادیر همگرایی تونل را برای ایستگاه‌های مختلف مسیر تونل محاسبه کرده است. در ادامه به منظور تحلیل عدم قطعیت دو تونل از نرم‌افزار Risk @ استفاده شده است. درنهایت بر اساس طبقه‌بندی جدید معرفی شده بر مبنای نظریه هوک و مارینوس و پنتی درجه مچاله‌شوندگی تعیین شده است	۲۰۰۷	پنتی ^۳ و همکاران
۳۴	منابع بالقوه بسیاری از ریسک‌های ژئوتکنیکی از قبیل برخورد با ناحیه گسله، ناپایداری دیواره تونل، بخش‌های سخت و سایشی سنگ و همگرایی تونل در تونل‌سازی مکانیزه سنگ علل اصلی وقوع خطر هستند. از سوی دیگر عملکرد TBM در چنین شرایطی متفاوت خواهد بود. این مقاله به بحث در مورد انتخاب TBM بر اساس کمینه‌سازی خطر ژئوتکنیک پرداخته است. با استفاده از درخت تصمیم‌گیری یک رویکرد جدید پیشنهاد شده که بر اساس این روش مناسب‌ترین TBM دارای حداقل ریسک قبل یا بعد از اقدامات کاهش خطر است.	۲۰۰۷	شهریار، شریف زاده، خادمی حمیدی
۳۵	در این تحقیق برای طبقه‌بندی ریسک‌های مؤثر در تونل‌های جاده‌ای، روش‌های احتمالی بهینه‌سازی ریسک استفاده شده است.	۲۰۰۸	میلان هولیکی ^۴

¹ Evert Hoek, Alessandro Palmeiri

² Søren Degn Eskesen, Per Tengborg, Jørgen Kampmann, Trine Holst Veicherts

³ panthi

⁴ Milan Holický

ادامه جدول ۳-۱: سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

مرجع	مطالعات	سال	نویسندگان
۳۶	هانگ و همکاران در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی کمی ریسک بر اساس روش تکنیک درخت رویداد» با استفاده از روش آنالیز درختی اقدام به ارزیابی ریسک تونل‌سازی به وسیله ماشین EPB در ۵ حوزه طراحی و برنامه‌ریزی، نوع ماشین، مدیریت ساخت و اقدامات تأمینی و تحکیمی پرداخته و با توجه به مخاطرات موجود راه‌کارهای لازم را به منظور کاهش ریسک‌های محتمل ارائه کرده است. ارزیابی ریسک این پژوهش شامل ۵ مرحله است که عبارت‌اند از ۱- شناسایی مخاطرات، ۲- شناسایی اقداماتی که منجر به کاهش ریسک می‌شود، ۳- ساختار آنالیز درخت رویداد، ۴- ارزیابی کمی ریسک، ۵- آنالیز نتایج به دست آمده. با مطالعه نتایج به دست آمده مشاهده شد که شرایط بد زمین‌شناسی دارای بالاترین میزان احتمال ریسک و بهترین راه‌کارهای مقابله با آن بررسی روش و مدیریت ساخت عنوان شده است.	۲۰۰۹	هانگ ^۱ و همکاران
۳۷	معمولاً مخاطرات موجود در حفاری تونل از سه گروه: شرایط نامساعد زمین، شکست در طراحی و شکست در اجرای طرح تشکیل می‌شود. در این مقاله از یک روش برای اندازه‌گیری مقدار ریسک حفاری در ارتباط با مخاطرات فوق‌العاده از FTA ^۳ و ابزار ETA ^۴ استفاده شده است، که به مدیریت طراحان و مسئولان کمک می‌کند که چگونه با خطرهای احتمالی مقابله کنند و در نحوه تصمیم‌گیری آنها را مساعدت نماید.	۲۰۰۹	سجنوها، جاروسکوا، اسپکوا، نووتنا ^۲
۳۸	در این تحقیق نخست ساختار جامعی از ریسک‌های اصلی پروژه‌های تونل‌سازی در قالب ۱۷ دسته اصلی و ۱۹۶ زیر سطح تهیه شده و سپس این ریسک‌ها در عملیات تونل‌سازی سد سیمره رتبه‌بندی شده است. بدین منظور از روش‌های تصمیم‌گیری گروهی و میانگین وزنی جهت جمع‌آوری و تجمیع نظر خبرگان و از روش‌های تخصیص خطی، ELECTRE، SAW، TOPSIS، LINMAP و TAXONOMY به عنوان مهم‌ترین روش‌های جبرانی در تصمیم‌گیری چند شاخصه جهت رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده شده است. در آخر برای رسیدن به یک اجماع کلی از رتبه‌بندی ریسک‌ها، از روش‌های تلفیقی (میانگین، بردا و کپلند)، استفاده شد و بدین ترتیب عوامل اقتصادی و شرایط حقوقی به ترتیب بیشترین و کمترین رتبه ریسک را به خود اختصاص دادند.	۲۰۰۹	حیاتی و صیادی

^۱ Hong

^۲ J. Šejnoha, D. Jarušková, O. Špačková, E. Novotná

^۳ روش تحلیل درخت خطا

^۴ روش تحلیل درخت رویداد

ادامه جدول ۳-۱: سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

مرجع	مطالعات	سال	نویسندگان
۳۹	صیادی و همکاران در سال ۱۳۸۸ در مقاله‌ای با عنوان «رتبه‌بندی ریسک در پروژه های تونل‌سازی به کمک روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)» به بررسی و رتبه‌بندی ریسک‌های موجود در تونل‌سازی سنتی و رتبه‌بندی آنها با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل پرداخته است. در این پژوهش با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به ارزیابی ریسک در یکی از تونل‌های متروی شهر تهران پرداخته شده است که در نهایت مشخص شد خرابی و تصادف ماشین‌آلات دارای بالاترین ریسک است.	۲۰۰۹	صیادی و همکاران
۴۰	در این مقاله در پروژه خط ۷ متروی تهران بر اساس طرح مدیریت ریسک RMP، با بررسی مطالعات ژئوتکنیکی و مشخص نمودن ریسک‌های پروژه نتایج نشان داد که، ۴۸٪ از پتانسیل‌های ایجاد خرابی با ریسک بالا، ۴۵٪ با ریسک متوسط و ۷٪ دارای ریسک پائینی بوده که پس از ارزیابی هرکدام و شناسایی اقدامات کاهشده مربوطه، سطح ریسک به ترتیب برای پتانسیل‌های ایجاد خرابی به ترتیب به ۴٪ با ریسک بالا، ۳۳٪ با ریسک متوسط و ۶۳٪ با سطح ریسک پایین تقلیل پیدا نمود.	۲۰۱۰	عماد، طالبی، نژاد، قراباغی، پرورش، اسدی
۴۱	در این تحقیق ارزیابی ریسک در قطعه دوم تونل بلند زاگرس که با ماشین تونل‌زنی سپر تلسکوپی حفر می‌شود با استفاده از منطق فازی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از مدل فازی می‌توان تأثیر پارامترهای ورودی در تعیین میزان ریسک را مشخص نمود. با استفاده از سیستم فازی در ۱۲ کیلومتر حفاری تونل، با حالت واقعی عملیات تی بی ام تطابق بسیار خوبی دارد و حجم زیادی آب و گاز به تونل وارد شده است.	۲۰۱۱	مختاری
۴۲	در این مقاله سعی شده که ریسک‌های ژئوتکنیکی حفاری تونل دسته‌بندی شده و با روش‌های مدیریت ریسک مورد ارزیابی قرار گرفته و جهت کاهش این ریسک‌ها اقداماتی اصولی انجام گیرد.	۲۰۱۲	نیک بارتون ^۱
۲۱	در این تحقیق به منظور رتبه‌بندی دقیق‌تر ریسک‌ها با استفاده از شاخص‌های احتمال وقوع ریسک، میزان تأثیر ریسک بر هزینه، زمان و کیفیت پروژه و شاخص‌های تکمیلی: عدم اطمینان از تخمین و توانایی سازمان در واکنش به ریسک نیز در نظر گرفته شده است. برای رسیدن به یک اجماع کلی از رتبه‌بندی ریسک‌ها، از تکنیک‌های ادغامی که شامل روش‌های میانگین، بردا و کپلند است، استفاده شد. در نهایت مجاله‌شوندگی و ناپایداری سینه کار تونل بیشترین و نشت گاز و چسبناکی سنگ‌ها و خاک‌های رسی به ترتیب کمترین رتبه ریسک‌ها را به خود اختصاص دادند.	۲۰۱۲	نظارت

¹ Nick Barton

ادامه جدول ۳-۱: سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

مرجع	مطالعات	سال	نویسندگان
۴۳	ساندرا و همکاران طی مقاله‌ای با عنوان «چالش‌ها در طراحی و ساخت از ۳۰ کیلومتر پیشروی TBM در تونل گاتهارد ^۲ با روباره نزدیک به ۲۴۰۰ متر» به بررسی مخاطرات خسارت‌زا در طول ۳۰ کیلومتری تونل گاتهارد با بررسی پارامترهای سرمایه مالی، قوانین، زمین‌شناسی، قطعه‌های اصلی، مجوزهای ساخت، مدیریت پروژه، ابزارهای مدیریت، NEAT ^۳ و راه‌کارهای مقابله با مخاطرات پرداخته است. از این مقاله می‌توان مخاطرات محتمل و دارای ریسک بالا و راه‌حل‌های ارائه شده برای آنها را مورد بررسی قرار داد. برای مثال در محیط‌های سنگی دارای روباره بالا، هجوم آب زیرزمینی به داخل تونل و شرایط مجاله‌شوندگی عمده‌ترین علل توقف روند حفاری می‌باشند که در تونل گاتهارد علاوه بر این‌ها دمای ۴۸ درجه‌ای آب وارد شده به داخل تونل نیز به علت اثرات مخرب بر روی دیسک‌های برشی و کاترهد دستگاه، مشکل‌ساز شده و پیمان‌کار را مجبور کرده تا دمای آن را به حداکثر ۲۸ درجه سانتی‌گراد برساند. ناحیه‌های گسلی که فضای بین آنها با مواد رونده پر شده است، خردشدگی سقف، آماس کف به علت آسیب به کف تونل و عدم اجازه برای حرکت TBM به خصوص مدل‌های باز آن از جمله مخاطرات محتمل و آسیب‌زننده در تونل‌سازی در محیط‌های سنگی است.	۲۰۱۲	ساندر ^۱ و همکاران
۴۴	با توجه به اهمیت موضوع و هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در این مقاله ابتدا به بررسی مشکلات ناشی از ریسک‌هایی مانند: هجوم آب، نشت گازهای مضر، تورم و لهیدگی، نشست زمین و... پرداخته شده و سپس راهکارهای پیشگیری و مقابله با هر ریسک ارائه شده است.	۲۰۱۲	نظارت، سرشکی، عطائی
۴۵	در این تحقیق مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی موجود در حفاری مکانیزه در مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز شناسایی شده و پس از بررسی کیفی این مخاطرات، اقدام به رتبه‌بندی ریسک این مخاطرات با استفاده روش AHP و TOPSIS شده است.	۲۰۱۳	فاقدی، سرشکی، زارع
۲۷	در این تحقیق از روش ELECTRE فازی استفاده شده است. برای نشان دادن قابلیت و اثربخشی مدل پیشنهادی، مطالعه موردی واقعی در جهان، پروژه متروی خط ۷ تهران است. نتایج نشان می‌دهد که "خسارات و حوادث ماشین آلات" و "شرایط نامساعد کار" در بالاترین رتبه قرار گرفته‌اند. در حالی که، "تأخیر در تکمیل پروژه" و "شکست تجهیزات" به عنوان کمترین اجزای مهم رتبه‌بندی می‌شوند.	۲۰۱۳	یزدانی و همکاران

¹ Sander

² Gotthard

³ Neue Eisenbahn-Alpentransversale

ادامه جدول ۳-۱: سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

مرجع	مطالعات	سال	نویسندگان
۴۶	در این مطالعه، به منظور تجزیه و تحلیل ریسک، از تکنیک ردیابی انرژی و آنالیز مانع استفاده شد. در این مطالعه ۵۱ منبع انرژی خطرناک در گروه‌های شش گانه‌ی انرژی شناسایی شد. ۲۹/۴٪ از این منابع مربوط به انرژی‌های فیزیکی، ۱۹/۶٪ مربوط به شیمیایی، ۴۱٪ مربوط به مکانیکی، ۸٪ مربوط به الکتریکی و تنها ۲٪ مربوط به عوامل طبیعی بود. بر اساس نتایج مطالعه، عملیات دستگاه TBM دربردارنده‌ی منابع خطر متنوع و متعددی است. می‌توان از روش ردیابی انرژی و آنالیز مانع به عنوان یک روش مؤثر در نتیجه و تحلیل ریسک عملیات دستگاه TBM استفاده نمود.	۲۰۱۳	ملکوتی، غریبی
۴۷	در این تحقیق به اولویت‌بندی ریسک زمین‌شناسی در تونل‌سازی مکانیزه با استفاده از روش‌های شباهت به گزینه ایده‌آل فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی در تونل انتقال آب نوسود پرداخته شده است. ابتدا ریسک‌های زمین‌شناسی شناسایی شده و عوامل مؤثر بر آن تعیین شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نشت گازهای سمی موجود در سنگ و نشت و هجوم آب به داخل تونل به ترتیب مهم‌ترین مخاطره موجود در تونل بلند زاگرس می‌باشند.	۲۰۱۳	رمضان نیا طلوتی
۴۸	در سال ۲۰۱۴ طی مطالعاتی با عنوان «مطالعه سیستم‌های ارزیابی ریسک برای هجوم آب در طول ساخت تونل در ساختارهای کارستی» به بررسی ریسک هجوم آب در این تونل‌ها پرداخته‌اند. در این پژوهش ابتدا به بررسی و شناسایی پارامترهای مؤثر بر ریسک مورد مطالعه پرداخته شده است این پارامترها عبارت‌اند از پارامترهای زمین‌شناسی شامل لیتولوژی، چین‌خوردگی، نواحی گسلی، نواحی کارستی و سنگ‌های حلال و همچنین پارامترهای ژئومکانیکی شامل چگالی بالک، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی.	۲۰۱۴	لی ^۱ و لی
۴۹	این مقاله به منظور تجزیه و تحلیل ریسک عملیات حفاری مکانیزه، با بهره‌گیری از تکنیک ردیابی انرژی و آنالیز مانع، انجام شده است. در فرایند جمع‌آوری اطلاعات از سوابق حوادث و شبه حوادث ثبت شده در واحدهای ایمنی و آیین‌نامه‌ها و استانداردهای مرتبط استفاده شده است. با توجه به نتایج این تحقیق، عملیات تی بی ام دربردارنده منابع خطرات متنوع و متعددی با در نظر گرفتن عوامل مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی، الکتریکی و طبیعی است که می‌توان با ابزارهای مختلف ریسک آنها را ردیابی، ارزیابی و کنترل نمود.	۲۰۱۵	زمان زاده، بدافی
۵۰	در این تحقیق، جهت تحلیل ریسک‌های پروژه از روش نزدیک به گزینه‌ی ایده‌آل استفاده شده است، نتایج حاصل نشان داده است که ریسک عوامل و عوامل مالی و انسانی در رتبه‌ی اول قرار دارند. همچنین ریسک برخورد با شبکه‌ی قنات‌ها از مهم‌ترین مشکلات در پروژه‌ی شناخته شده است.	۲۰۱۷	سلطانی محمدی و همکاران

¹ Li

۳-۳- جمع‌بندی

در مقاله‌ها و منابع متعددی ارزیابی ریسک به ویژه ریسک عملیات ساخت تونل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در اکثر مطالعات از روش کلاسیک ارزیابی ریسک استفاده شده است. می‌توان ملاحظه نمود که در این تحقیقات عمدتاً از دو شاخص «احتمال وقوع» و «میزان تأثیر» ریسک در قالب ماتریس احتمال - اثر ریسک استفاده شده است. بسیاری نیز تنها به ارزیابی کیفی و نیمه کمی بسنده کرده‌اند. برخی دیگر از پژوهشگران هزینه و زمان پروژه‌های زیرزمینی و تونل را با لحاظ ریسک به صورت یک تابع احتمالاتی بیان کرده‌اند. این در حالی است که برای ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک در سایر پروژه‌ها، شاخص‌های دیگری نظیر "توانایی سازمان در واکنش به ریسک" و "عدم اطمینان از تخمین" نیز مطرح شده‌اند.

با توجه به محدودیت‌های متفاوتی که پروژه‌ها در دسترسی به منابع گوناگون اعم از منابع مالی و انسانی و نیز زمان روبرو می‌باشند، مدیران پروژه توان واکنش و پاسخ‌دهی به تمامی ریسک‌ها را به طور هم‌زمان نخواهند داشت. از این رو باید پیش از آغاز و ضمن اجرای پروژه نسبت به تعیین و شناسایی مهم‌ترین ریسک‌ها و حذف ریسک‌های کم اهمیت اقدام نمود. رتبه‌بندی ریسک گامی مهم در برآورده کردن هر چه بهتر این نیاز است.

انواع مخاطرات در تونل‌سازی مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع در محیط‌های سنگی

مخاطرات از منظر زمین شناسی به هر نوع عکس العمل یا رفتار بالقوه‌ی زمین در مقابل برداشت بخشی از زمین به علت حفاری تونل اطلاق شده است که پتانسیل کاهش راندمان حفاری نسبت به مقدار مورد انتظار را دارد. بنابراین رفتار زمین در مواقعی به یک حادثه تبدیل می‌شود که آن رفتار پیش‌بینی نشده و یا پیش‌بینی مناسبی برای آن انجام نشده است. مشکلات به وجود آمده در چنین شرایطی، علاوه بر طولانی شدن زمان ساخت و تحمیل هزینه‌های اضافی به پروژه ممکن است باعث ایجاد محیط کار ناامن در این تونل‌ها شود [۵۱].

عوامل زمین‌شناسی مهم‌ترین فاکتور برای تعیین ساختار، نحوه حفاری و هزینه ساخت یک تونل است. مسیر یک تونل و طراحی و ساخت آن بیشتر به ملاحظات زمین‌شناسی آن محل بستگی داشته و در صورتی که این ملاحظات در عملیات تونل‌زنی با اطمینان کامل صورت نگرفته باشد، مشکلات و خطراتی آن را تهدید خواهد کرد. این مسأله به اطلاعات جمع‌آوری شده ناکافی از شرایط زمین در ترازوی که تونل در آن حفر می‌شود، بر می‌گردد. در نتیجه تخمین هزینه ساخت تونل به ویژه در نواحی که شرایط زمین‌شناسی پیچیده است، غیر قطعی و نامعلوم خواهد بود [۵۲].

شرایط ژئوتکنیکی از مهم‌ترین اصولی هستند که برای طراحی و اجرای یک پروژه تونل باید اطلاعات مشخصی از آنها در دسترس باشد. هدف از تحقیقات ژئوتکنیکی مشخص شدن شرایط زمین شناسی و هیدروژئولوژی مورد نیاز پروژه تونل‌زنی است که بایستی تا حد ممکن جامع و شفاف باشد. این بررسی‌ها در مراحل اجرای پروژه، امکان رفع موانع را برای مهندسین فراهم می‌کنند. مخاطرات ژئوتکنیکی در عملیات تونل‌زنی با TBM به شرایط دشوار زمین اطلاق می‌شود که ماشین انتخابی قادر به انجام عملیات حفاری به خوبی عملکرد پیش‌بینی شده، نباشد [۵۳ و ۵۴].

مخاطرات زمین‌شناسی در حفاری مکانیزه با TBM به شرایط دشوار زمین اطلاق می‌شود به طوری که ماشین انتخابی قادر به انجام عملیات به خوبی عملکرد پیش‌بینی شده برای آن نباشد. این مخاطرات عمدتاً به علت عدم انجام مطالعات زمین‌شناسی - ژئوتکنیکی کافی بروز می‌کند و ممکن

است پیامدهای جدی و حتی جبران ناپذیری بر روند عملیات تونل سازی داشته باشد. اگر پتانسیل بروز این مخاطرات قبل از شروع عملیات حفاری به درستی ارزیابی شود، به کارگیری اقدامات پیشگیرانه در هنگام ساخت ماشین تا حد زیادی شدت مخاطرات و ریسک ناشی از آن را کاهش می دهد [۵۵].

در ادامه به تشریح هر یک از مخاطرات زمین شناسی مرتبط با تونل سازی مکانیزه در محیط های سنگی پرداخته و همچنین روش های شناسایی و پیش بینی مخاطرات و راهکارهای پیشگیری و مقابله با آن به طور مختصر بیان شده است.

۴-۲- چالش ها و مخاطرات زمین شناسی در نواحی کوهستانی

پس از مطالعه مقالات مرتبط و تحقیق و کاوش در زمینه ی مخاطرات زمین شناسی در نواحی کوهستانی موارد زیر به عنوان مخاطرات اصلی در این نواحی شناسایی و تعیین شده اند که به شرح ذیل می باشند:

- برخورد با زون های خرد شده و گسله
 - ریزش و سقوط بلوک های سنگی^۱
 - نشت و هجوم آب^۲ به داخل تونل
 - سینه کار مختلط^۳
 - تورم^۴ سازندهای شیلی و مارنی
 - پدیده ی لهیدگی (مچاله شوندگی)^۵
 - تشکیل گل (انسداد)^۶
 - پتانسیل کارست
 - نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
- در ادامه هریک از موارد فوق تشریح می شود.

¹ Ravelling & Rockfall

² Water Inrush

³ Mixed Face

⁴ Swelling

⁵ Squeezing

⁶ Clogging

۴-۲-۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله

زون‌های گسلی از جمله عوارض ژئوتکنیکی هستند که بیشتر پروژه‌های تونل‌زنی با آنها مواجه می‌شوند. به طور کلی، اگر تونل در طول مسیر خود با گسلی برخورد کند، مشکلات زیادی پیش خواهد آمد که نتیجه آن کاهش نرخ پیشروی، تأخیر در برنامه‌ریزی زمانی صورت گرفته و حتی بر حسب شدت مشکل، ممکن است عملیات متوقف شود. عمده‌ترین مشکل در برخورد با زون‌های گسلی، ریزش سینه کار و هجوم آب و مواد شسته شده توسط آن به داخل تونل و یا ایجاد حفره‌ای در تاج تونل است زیرا اغلب مناطق گسلی حاوی مواد ریزدانه و آبدار هستند که حین عملیات حفاری، در زیر این فضای خالی ایجاد و به علت عدم وجود یک سیستم متعادل‌کننده، این مواد تمایل به هجوم به داخل تونل را دارند که حتی در بعضی موارد ممکن است هجوم مواد منجر به مدفون شدن دستگاه و تجهیزات شود.

اگر یک TBM باز بدون شناخت قبلی از وجود گسل، به چنین شرایطی برخورد کند، امکان بروز موارد حاد و جبران ناپذیر مانند: گیر کردن و مدفون شدن ماشین در این موقعیت وجود دارد در حالی که اگر یک TBM سپری (تک‌سپری یا دوسپری) با این شرایط برخورد کند، اگرچه مطمئناً امکان ادامه حفاری وجود ندارد ولی این امکان وجود دارد که از داخل سپر عملیات بهسازی موردنیاز صورت گیرد و همچنین تونل از این احتمال که کاملاً بسته شود محفوظ خواهد ماند [۵۶].

در صورت استفاده از عملیات بهسازی برای عبور از مناطق گسلی شناسایی شده، روش‌های مکانیزه بسیار مطلوب هستند. البته استفاده از عملیات بهسازی باعث افت عملکرد دستگاه می‌شود و در صورت وجود مناطق متعدد گسلی که حجم عملیات بهسازی بالای می‌طلبند، روش‌های مکانیزه توصیه نمی‌شود [۵۷].

به هنگام عبور از یک ناحیه گسلی، یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی داشته و نقش مهمی در قابلیت کاربرد روش‌های حفر را دارد، عرض گسل است. عملکرد دستگاه TBM باز را در گسل‌ها می‌توان به سه دسته تقسیم کرد [۵۷]: ۱- گسل با عرض کمتر از ۱ متر: ماشین باز می‌تواند بدون

مشکلی از آن عبور کند ولی طبق نظر بارلا در صورت عدم شناسایی گسل در مرحله اکتشاف، ممکن است عبور از گسل باعث تأخیر در زمان تکمیل پروژه شود. ۲- گسل با عرض ۱ متر تا ۱۰ متر: در عبور از این مناطق ماشین باز مشکل زیادی خواهد داشت. ۳- گسل با عرض بیشتر از ۱۰ متر: ماشین باز کارآیی ندارد و نمی‌تواند عبور کند.

مسیر تونل ممکن است در امتداد گسل باشد و یا در عرض، آن را قطع کند. در صورتی که امتداد گسل به موازات محور تونل و عرض منطقه گسلی کم باشد، به طوری که انجام عملیات بهسازی به راحتی امکان پذیر باشد، می‌توان از کلیه ماشین‌ها استفاده کرد. در صورت عریض شدن گسل، ناپایداری بیشتر می‌شود و امکان هجوم مواد پرکننده و آب به داخل تونل افزایش می‌یابد، لذا باید در نگهداری سینه‌کار و دیواره تونل دقت بیشتری به عمل آید. به همین دلیل در این موارد ماشین‌های باز ارجحیت دارند [۵۶].

۴-۲-۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی

سنگ‌ها در اثر تقاطع ناپیوستگی‌های مختلفی چون لایه‌بندی، درزه و گسل به بلوک‌های مجزا تبدیل می‌شوند. در چنین شرایطی، بلوک‌هایی که از کمترین سطح تکیه‌گاهی برخوردار هستند، بحرانی‌ترین وضعیت را خواهند داشت. جابجایی بلوک‌های بحرانی باعث سست شدن بلوک‌های مجاور شده و سقوط و لغزش این بلوک‌ها می‌تواند گسیختگی‌های کلی را به همراه داشته باشد [۵۸].

تونل‌سازی در مناطق ناپایدار ساختاری به علت وجود گسل و ناپیوستگی‌های متعدد که متحمل شکستگی‌های فراوان می‌باشد، با مسائلی همچون ریزش‌های ساختاری مواجه می‌شود. در تونل‌های سنگی عامل ریزش و سقوط بلوک‌ها، ناپایداری‌های سینه‌کار، سقف و دیواره تونل می‌باشد.

هنگامی که وضعیت شکستگی و یا هوازدگی توده‌سنگ در حال حفاری به گونه‌ای باشد که عمده‌ی ناپایداری‌ها در سینه‌کار حفاری با ریزش بلوک‌های سنگی و مواد دانه‌ریز رخ دهد به نحوی که تا برقراری تعادل در سینه‌کار و ایجاد حفرات بزرگ متوقف نمی‌شود، رسیدن به یک شرایط محدود

کننده برای عملکرد ماشین‌های سپری برای سنگ امکان‌پذیر است [۵۹].

در بیشتر تونل‌های سنگی احتمال وقوع دو نوع ناپایداری در جداره های تونل وجود دارد که شامل

[۶۰]:

- سقوط بلوک‌های سنگی با ناپایداری‌های با کنترل ساختاری
- ریزش سنگ‌های خردشده با ناپایداری‌های بدون کنترل ساختاری

شکل (۴-۱) ریزش بلوک از سینه‌کار تونل لوشبرگ در سوئیس را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: بلوک‌های بزرگ جدا شده از سینه‌کار تونل [۶۰]

۴-۲-۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل

وجود آب زیرزمینی در توده‌سنگ‌های دربرگیرنده تونل همواره منجر به مشکلات زیادی شده است. ورود ناگهانی حجم زیاد آب به درون تونل به صورت هجوم آب یا انفجار آب یکی از مهم‌ترین و پرمخاطره‌ترین مشکلات حفاری تونل در محیط‌های آبدار می‌باشد. هجوم آب به مواردی اطلاق می‌شود که مقدار آب ورودی به درون تونل به صورت متمرکز بیش از ۷۵۰ لیتر در ثانیه باشد. این پدیده اغلب با ناپایداری سینه‌کار همراه است و معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که تونل با یک ساختار زمین‌شناسی غیر عادی مانند یک زون گسله آبدار برخورد نماید [۶۱].

برخی سنگ‌ها (به ویژه سنگ‌های رسی) به حضور آب حساس است. در حقیقت حضور آب زیرزمینی با افزایش درجه دگرسانی توده سنگ و کاهش مقاومت ماده سنگ و مواد پرکننده درزه‌ها

نقشی منفی در وقوع ریزش‌ها و ناپایداری دیواره‌های تونل دارد. پرکننده‌های درزه‌ها در صورت حضور آب به یک فشار آماسی رسیده و این امر می‌تواند سبب از بین بردن تقویت‌کننده‌های تونل شود. از سوی دیگر، حضور آب در سنگ‌هایی که طی فرایند خردایش ریزدانه زیادی تولید می‌کنند، می‌تواند باعث افزایش تولید گل و ایجاد مشکل در بارگیری مصالح کنده شده و تردد شود که در مجموع کاهش ضریب بهره‌وری را به دنبال خواهد داشت. همچنین حضور آب باعث گل‌گرفتگی بخش‌های مختلف کله حفاری و دیسک کاترها و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ ماشین می‌شود. صرف زمان‌های زیاد برای تمیزکاری دیسک کاترها و کله حفاری، خسارت به سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی و افزایش صعوبت کار برای پرسنل از دیگر مشکلات ناشی از نشت و هجوم آب زیرزمینی می‌باشد [۵۹،۶۰ و ۶۲].

نمونه‌های زیادی از تونل‌هایی که در برخورد با آب زیرزمینی دچار توقفات طولانی مدت شده‌اند، در داخل و خارج از کشور وجود دارد. از آن جمله می‌توان به تونل سوم انتقال آب کوه‌رنگ، تونل انتقال آب زاگرس (قطعه دوم) و تونل قمرود اشاره نمود (شکل ۲-۴ و ۳-۴). در تونل انتقال آب کوه‌رنگ برخورد با زون گسلی زراب که از گسل‌های اصلی زاگرس محسوب می‌شود و در میان سازندهای آهکی زاگرس عبور می‌نماید، حجم زیادی از آب را وارد تونل نمود که باعث توقف طولانی مدت ماشین حفاری (TBM باز، ساخت شرکت هرکنشت) در یکی از جبهه‌های کاری شد [۶۰].



شکل ۲-۴: ریزش آب از دیواره‌های تونل و صعوبت کار برای پرسنل در تونل انتقال آب زاگرس [۶۰]



شکل ۴-۳: جریان آب زیاد در کف تونل و صعوبت کار برای پرسنل در قطعه دوم تونل انتقال آب قمرود [۶۰]

۴-۲-۴- سینه کار مختلط

تنوع در فرآیندهای زمین‌شناسی مانند رسوب‌گذاری، سرد شدن ماگما و اختلاط تشکیلات مختلف زمین‌شناسی، ممکن است باعث ایجاد محیط‌های پیچیده مخلوط و ناهمگنی شود. نمونه‌های بارز این محیط‌ها در زمین‌های آبرفتی و رسوبی کنگلومراها، برش‌ها و ماسه‌سنگ‌ها و در تشکیلات آذرین توف‌ها، سنگ‌های آگلومرای و ملانژهای تکتونیک است [۶۳].

دو تعریف مختلف برای جبهه کار مختلط وجود دارد. تعریف اول، جبهه کار مختلط را شرایطی از زمین بیان می‌کند که در آن توزیع دانه‌بندی مختلفی در سینه کار وجود دارد و قلوه سنگ‌هایی با ابعاد مختلف در داخل ماتریس خاک حضور دارند (شکل (۴-۴)) [۶۴].

تعریف دوم شرایط جبهه کار مختلط را به صورت تغییرات شرایط محیط از نظر خواص مقاومتی، لیتولوژی و دانه‌بندی در طول مسیر و یا در نقاط مختلف جبهه کار بیان می‌کند. این شرایط می‌تواند به دو صورت رخ دهد. حالت اول شرایطی است که در آن تناوبی از مصالح با خواص مقاومتی، نفوذپذیری، چسبندگی متفاوت در مسیر حفاری تونل وجود دارد. حالت دوم شرایطی است که در آن بر اثر عواملی مانند لایه‌بندی، پر کردن دستی، هوازدگی و ... خواص زمین به صورت قائم و با تغییر عمق تغییر می‌کند، و سبب وجود برخی خواص متغیر در قسمت‌های مختلفی از سینه کار در یک مقطع قائم می‌شود [۶۵].



شکل ۴-۴: جبهه کار مختلط (وجود قلوه سنگ در ماتریس خاک) [۶۴]

از جمله مشکلات ناشی از جبهه کار مختلط می‌توان به ساینده‌گی و آسیب رسیدن به ابزار برش در اثر برخورد با قلوه سنگ‌ها، لرزش و سروصدا در ماشین، تغییرات شرایط آب زیرزمینی، تغییرات ناگهانی فشار سینه کار و گیرکردن قلوه سنگ در داخل اتاقک فشار و یا نوار نقاله ماریچ دستگاه اشاره کرد که هرکدام از این مشکلات می‌توانند سبب کاهش بهره‌وری و ایجاد تأخیر در عملیات حفاری شوند [۶۳].

۴-۲-۵- پدیده‌ی آماس‌پذیری (متورم شونده‌گی)

بر اساس تعریف انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، پدیده تورم یا آماس ترکیبی از واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی سنگ یا خاک با آب و رها شدن تنش می‌باشد. خاک‌های متورم‌شونده، خاک‌های ریزدانه هستند که به سبب جذب آب، ازدیاد حجم یافته و فشارهای بالایی ایجاد می‌کنند. تورم معمولاً با انقباض توده سنگ یا خاک همراه است یعنی با کاهش رطوبت، زمین زیر سازه‌ها کاهش حجم پیدا می‌کند. بنابراین موضوع تورم خاک‌ها به عنوان یک مساله همواره باید مورد نظر مهندسان قرار داشته باشد [۶۶].

دو مکانیزم عمده در پدیده آماس وجود دارد [۱۲۰]: (۱) مکانیزم مکانیکی (۲) مکانیزم فیزیکی و شیمیایی.

مکانیزم اول که در رس‌ها، رس‌های سیلتی و سیلت‌های رسی و سنگ‌های مرتبط با آنها رخ

می‌دهد عکس پدیده تحکیم است و در نتیجه ایجاد فشار آب منفذی منفی رخ می‌دهد. مکانیزم فیزیک و شیمیایی شامل واکنش شیمیایی بین آب و کانی‌های موجود در سنگ و خاک می‌شود. این نوع آماس به وجود کانی‌های خاصی در زمین بستگی دارد.

زمین‌هایی که دارای پتانسیل رفتار آماسی هستند شامل موارد زیر می‌شوند:

- زمین‌هایی که در اثر تغییرات تنش شل وسست شده‌اند.
 - رس‌هایی که قابلیت انبساط دارند و دارای مقدار زیادی مونت موریلونیت یا ایلیت و مقدار کمتری کائولینیت هستند.
 - شیل‌ها، گل‌سنگ‌ها و مارن‌های حاوی مواد دارای خاصیت آماسی نظیر مونت موریلونیت و ایلیت.
 - انیدریت که در اثر هیدراسیون و تبدیل به ژیپس آماس می‌کند.
 - مواد خردشده گسلی، درزه‌های پر شده و مواد پرکننده درزه‌ها و سنگ‌های دگرسان شده که می‌توانند بر اثر هوازدگی و یخبندان آماس کنند.
- بر اثر آماس و برآمدگی معمولاً مشکلاتی بروز می‌نماید که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- در تونل‌های دارای کف پلاستیک و ضعیف، فرو رفتن وسایل نگهداری خساراتی در پی خواهد داشت. علاوه بر این چنین تونل‌هایی نسبت به تغییر تنش حساس می‌باشند.
 - آماس و تورم سنگ‌ها باعث همگرایی فضای حفر شده و ناکارآمدگی عملیات حفاری می‌شود.
 - برآمدگی یا بالا آمدن سنگ‌های اطراف فضای حفر شده، کج‌شدگی کالی سیستم نگهداری را موجب می‌شود و اغلب باعث وارد آمدن خسارت به سیستم نگهداری در نقاط خاصی از تونل می‌شود.
 - همچنین زمانی که لایه حساس به تنش و آب در بین لایه‌های دیگری که تونل در آنها حفر شده است، قرار می‌گیرد، جذب آب موجب همگرایی تونل و وارد آمدن خسارت موضعی به سیستم نگهداری می‌شود.
- تغییر حجم خاک‌ها و زمین‌های آماسی یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که مهندسان و محققان مربوطه با آن روبرو هستند، به نحوی که شاید بتوان این پدیده را یک مشکل جهانی به حساب آورد. بررسی‌ها نشان داده است که خسارت‌های ناشی از عملکرد منفی این نوع محیط‌ها، بیش از هر یک از بلایای زمین‌شناسی دیگر است. به عنوان مثال در ایالات متحده، خاک‌های تورمی و منبسط‌شونده سالیانه بیش از ۳ / ۲ میلیارد دلار خسارت به بار می‌آورند [۶۸].

وجود خاک‌های متورم‌شونده در مسیر تونل، مشکلات مهمی را در موقع ساخت و بهره‌برداری از

تونل ایجاد می‌کنند. در موقع عملیات اجرایی، تورم خاک ممکن است دستگاه حفر تونل را متوقف کند و در موقع بهره‌برداری هم خاک‌های متورم‌شونده ضمن جذب آب، متورم شده و موجب تخریب داخلی تونل می‌شوند که این امر نشان‌دهنده اهمیت مطالعات لازم برای شناسایی رفتار تغییر حجم و فشار تورمی خاک‌های ریزدانه می‌باشد [۶۹].

۴-۲-۶- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)

مچاله‌شوندگی به همگرایی وابسته به زمان تونل‌ها در خلال حفاری گفته می‌شود. طبق تعریف ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) مچاله‌شوندگی سنگ، تغییر شکل‌های بزرگ مقیاس وابسته به زمان است که به خواص خزشی ایجادشده توسط تنش‌های برشی مرتبط می‌شود. وجود عواملی همانند تنش‌های بالا و خواص مقاومتی ضعیف توده‌سنگ موجب افزایش تنش‌های برشی در محدوده توده‌سنگ اطراف تونل می‌شود. این تنش‌های برشی در ایجاد رفتار خزشی توده سنگ نقش اساسی دارند. مچاله‌شوندگی هنگامی رخ می‌دهد که تنش‌های محیطی حداکثر در سنگ دیواره تونل از میزان باری که سنگ در حالت فشاری نامحصور می‌تواند تحمل کنند بیشتر شود. به این ترتیب خزش سنگ به داخل حفره ایجاد شده، آغاز می‌شود. این تغییر شکل‌ها ممکن است در خلال احداث تونل خاتمه یافته و یا برای مدت زمان طولانی ادامه یابد. این پدیده بیشتر در ارتباط با توده‌سنگ‌های با دگرشکلی و خصوصیات مقاومتی ضعیف روی می‌دهد. سنگ‌های مستعد شامل: گنایس‌ها، میکاشیست‌ها، کالکشیست‌ها (به خصوص در مناطق تکتونیزه و گسلی)، گل‌سنگ‌های مارن‌ها و شیل‌های رسی است [۷۰].

در مواردی نیز پدیده مچاله‌شوندگی با پدیده انفجار سنگ^۱ مقایسه می‌شود. اگر تغییر شکل‌های تونل به صورت آنی اتفاق بیافتد، پدیده انفجار سنگ رخ می‌دهد، ولی اگر تغییر شکل‌ها به صورت آهسته اتفاق بیافتد، پدیده مچاله‌شوندگی به وجود می‌آید. میزان همگرایی تونل، نرخ تغییر شکل و

¹ Rock burst

گسترش ناحیه تسلیم شده در اطراف تونل بستگی به شرایط زمین‌شناسی، وضعیت تنش‌های برجای اولیه نسبت به مقاومت توده سنگ، جریان آب زیرزمینی و فشار آب منفذی و خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ دارد. در ضمن جهت‌یافتگی صفحات ناپیوستگی نظیر لایه‌بندی و شیستوزیته نقش مهمی در ایجاد و توسعه این پدیده دارد، به طوری که اگر امتداد ناپیوستگی‌ها به موازات محور تونل (و با جبهه‌کار) باشد، میزان این تغییر شکل بسیار افزایش می‌یابد [۷۰].

تجربه نشان می‌دهد که پدیده مچاله‌شوندگی می‌تواند در یک تونل جایی که یکی از شرایط زیر به وجود می‌آید، گسترش یابد [۵۳]:

۱. روباره زیاد مانند عبور تونل از زیر کوه‌های مرتفع؛
 ۲. کاهش در مقاومت سنگ‌ها مانند تغییر در نوع سنگ یا شرایط سنگی با کیفیت پایین یا ضعیف. سنگ‌هایی که حاوی رس هستند مانند: شیل‌های رسی، فیلیت‌های رسی، توف‌های آتشفشانی نیز ممکن است به آب‌های آزاد حساس بوده و پدیده آماسی ممکن است علاوه بر مچاله‌شوندگی رخ دهد.
- تونل‌زنی با TBM در زمین‌های مچاله‌شونده دارای مزایا و معایبی است. از یک طرف این نوع زمین‌ها از نوع زمین‌های نرم هستند و مزایای حفاری در زمین‌های نرم در آن صادق است.
- استفاده از TBM در زمین‌های مچاله‌شونده مزایای زیر را دربردارد [۷۱، ۷۲]:

۱. حفار با نرخ خوبی در سنگ پیشروی می‌کند. سرعت مناسب در حدود دو تا چهار برابر سرعت پیشروی با روش حفاری و انفجار است.
 ۲. این نوع حفاری، نگهداری آبی را برای سنگ پشت سر ماشین فراهم می‌آورد.
 ۳. روش مناسبی را برای انتقال نگهداری سنگ از ماشین به سیستم نگهداری دائمی، بدون آنکه بارهای نگهداری شده رها شوند، فراهم می‌آورد.
 ۴. قابلیت چرخش کله‌حفار و شروع دوباره کار در جبهه‌کار همگراشده را دارد.
- اما از طرف دیگر استفاده از TBM در زمین‌های مچاله‌شونده دارای معایب زیر است [۷۱، ۷۲]:

۱. به خاطر وجود تغییر شکل‌های بزرگ در این نوع زمین قطر تونل کاهش یافته که در این صورت اگر نرخ همگرایی با پیشروی TBM هماهنگ نباشد امکان گیر کردن ماشین در تونل وجود دارد.
۲. به خاطر کاهش قطر تونل و نتایج حاصله برای TBM نصب پوشش تونل و مجموعه کارهایی که پس از عبور TBM انجام می‌شود (رفتارنگاری و ...) با مشکل روبرو می‌شود.

رفتار مجاله‌شوندگی می‌تواند به عنوان افزایش تغییر شکل برشی یک المان سنگ با زمان تعریف شود، این پدیده که اغلب به عنوان پیشرفت آرام کرنش‌های پلاستیک تعریف می‌شود، یک تغییر شکل حجمی محدود ایجاد می‌کند که به اتساع پذیری سنگ وابسته است. البته باید توجه داشت که برخی اوقات توسعه تغییر شکل وابسته به زمان مربوط به پدیده خزش است [۷۲].

مهم‌ترین مشکلات به وجود آمده در حین حفاری مکانیزه با TBM تحت شرایط مجاله‌شوندگی به شرح زیر است [۶۴]:

۱- ناپایداری سینه‌کار؛ ۲- بروز مشکل در اعمال نیروی عکس‌العمل کافی به دلیل مشکل ایجاد شده در محل کفشک‌های ماشین تونل‌زنی باز؛ ۳- عدم انعطاف‌پذیری ماشین در تغییر قطر مقطع حفاری شده؛ ۴- به علت سست و ناهمگن بودن توده‌سنگ مسیر تونل به هنگام پیشروی، کنترل ماشین در مسیر واقعی آن با مشکل مواجه می‌شود.

۴-۲-۷- تشکیل گل (انسداد)

در تونل‌هایی که ماشین‌های حفر تونل برای حفاری در سنگ‌ها و یا خاک‌های رسی و چسبنده به کار گرفته می‌شوند، همواره خطر گل‌گرفتگی و انسداد، کله‌حفاری و ابزار برش را تهدید می‌نماید. معمولاً در چنین محیطی، چسبناکی کانی‌های رسی به سطوح فلزی ماشین سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در بهره‌وری ماشین می‌شود، مشکل چسبناکی و گل‌گرفتگی مربوط به رس غالباً منجر به هدایت‌پذیری سخت، نرخ پیشروی پایین و تمیزکاری اضافه می‌شود [۶۰].

از مشکلات ناشی از چسبناکی خاک‌ها و سنگ‌های رسی می‌توان به افزایش گشتاور ماشین، سایش نامتقارن دیسک کاترها، مشکل حمل مواد بر روی نوار نقاله و باقی ماندن حجم زیادی از مصالح حفاری بین سینه‌کار و کله‌حفار را نام برد [۷۳و۵۵].

در سال‌های اخیر، به منظور شناسایی رفتار چسبناکی کانی‌های رسی و ارزیابی خطر انسداد و گل‌گرفتگی در ماشین TBM، پژوهش‌هایی توسط GEODATA , Thewes and Burger 2004

Ses & Burbaum 2008 1995 انجام شده است. در میان پژوهش‌های مختلف، نموداری که توسط Burger و Thewes در سال ۲۰۰۴ برای ارزیابی خطر انسداد و گل‌گرفتگی ارائه شده از مقبولیت بیشتری برخوردار است [۵۵ و ۷۳].

از جمله راهکارهای پیشنهادی به منظور کنترل مشکلات ناشی از شرایط زمین چسبنده می‌توان استفاده از جت آب پرفشار در کله حفار، تزریق هوای فشرده برای کاهش مشکل گل‌گرفتگی، استفاده از روش‌های آماده‌سازی زمین همچون تزریق فوم در سینه کار و انجام اصلاحات اپراتوری ماشین، به عنوان مثال کاهش نیروی پیشران اعمالی به کله حفار را نام برد [۵۵].

۴-۲-۸- پتانسیل کارست

اصطلاح کارست از نام یکی از ایالات یوگسلاوی سابق اقتباس شده که در آنجا مراحل نسبتاً کاملی از اشکال آهکی به وجود آمده است، هر چند این اشکال مخصوص سنگ‌های متراکم و پرحجم آهکی می‌باشند، اما گونه‌هایی از آن ممکن است در داخل سنگ‌های تبخیری ژیبس و سنگ نمک توسعه یابند [۷۴].

کارست، حاصل فرایندهای متنوعی است که در سنگ‌های انحلال‌پذیر مختلف و تحت شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی متفاوتی پدید می‌آید، ساختارهای کارستی بیشتر در مناطق سرد و مرطوب با بارش بیش از ۳۰۰ میلی‌متر که دارای سنگ بستر کربناته یا تبخیری باشند، شکل می‌گیرند [۷۵]. لازم به ذکر است سنگ‌های کربناته هرچه خالص‌تر (رس‌ها کمتر) باشند انحلال‌پذیری بیشتری دارند [۷۶].

اساس تشکیل مورفولوژی^۱ کارست به سنگ‌های کربناتی خصوصیات شیمیایی خصوصیات ساختمانی؛ شرایط اقلیمی و زمان بستگی دارد [۷۷]. نمونه‌ای از حفرات کارستی و پدیده‌ی کارستیفیکاسیون در شکل (۴-۵) آورده شده است.

^۱ ریخت‌شناسی



شکل ۴-۵: نمونه‌ای از حفرات کارستی و پدیده‌ی کارستیفیکاسیون در تشکیلات آهکی [۷۸]

نواحی کارستی دارای خصوصیات ویژه و اشکال زمین ریختی به خصوص در سطح و زیر سطح زمین هستند و مسیرهایی که در امتداد آنها آب جریان می‌یابد باعث ایجاد این اشکال شده که عمدتاً در اثر توسعه تخلخل ثانویه ایجاد می‌شوند. نشانه‌ها و عوارض کارستی معمولاً به صورت عوارض سطحی، زیرسطحی و عمقی یا درونی رده‌بندی می‌شوند [۷۷].

۴-۲-۹- نشت گازهای سمّی موجود در سنگ‌ها

تجمع گازهای سمّی، قابل اشتعال و خفه‌کننده هنگام ساخت سازه‌های زیرزمینی منجر به وارد آمدن صدمات و تلفات انسانی می‌شود. انفجار گازهای قابل اشتعال به عنوان یکی از اتفاقات بسیار ناگوار در تاریخچه تونل زنی به ثبت رسیده است. هنگامی که در تونل با گاز برخورد می‌شود، پیش‌بینی وضعیت موجود اغلب ضعیف و غیر قابل انتظار است. حتی اگر از بروز حوادث مهم جلوگیری شود، اتمام پروژه به احتمال زیاد با تأخیری پرهزینه همراه خواهد بود. گازهای سمّی (متان، سولفید هیدروژن) ممکن است در اکثر سنگ‌های رسوبی یافت شود. بعضی مواقع سولفید هیدروژن و دی اکسید گوگرد در شکستگی‌های انواع سنگ‌هایی که حاوی سولفیدهای آهن هستند، به وجود می‌آید که در صورت وجود گاز مشکلات تنفسی و یا حتی وقوع پدیده انفجار وجود دارد [۶۷].

جریان یافتن گاز به درون تونل یکی از پدیده‌های بسیار پیچیده است که بستگی به حجم و فشار

گاز، تخلخل و نفوذپذیری زمین و سایر عوامل دیگر دارد. نرخ جریان گاز به فشار غالب جو یا اتمسفر حساس بوده که در فشار اتمسفری پایین (ممکن است در شرایط هوای ابری به وجود آید) نرخ جریان گاز بالاتر خواهد بود. حرکات و جابجایی زمین که در اطراف تونل رخ می‌دهد می‌تواند مسیر جریان و تأثیر انتشار گاز را تغییر دهد. وجود آب‌های زیرزمینی از جریان گاز جلوگیری می‌کند. اگر زمین اطراف تونل زهکشی شود جریان گاز ممکن است افزایش یابد. پیش‌بینی دقیق مقدار گازی که احتمال ورود آن به داخل تونل وجود دارد عملاً غیرممکن است.

تجربیات به دست آمده از عملیات معدن کاری و تونل‌های به اتمام رسیده با توجه به کامل نبودن آنها می‌تواند در رفع مشکلات کارساز باشد. در جاهایی که شرایط زمین گازدار انتظار می‌رود، بایستی حفاری‌های آزمایشی برای یافتن گاز صورت گیرد. در زمین‌های گازدار، گمانه پیشرو می‌تواند در سینه‌کار برای یافتن محل‌های انباشت گاز در پیش‌روی عملیات حفاری حفر شود. این کار برای جلوگیری از افزایش ناگهانی غلظت گاز با ورود در شکستگی‌ها، گسل‌ها و سایر ساختارهای زمین‌شناسی که ممکن است حاوی گاز باشد، صورت می‌گیرد. گمانه‌های پیشرو در حد امکان بایستی در جهاتی حفر شوند که احتمال برخورد با نواحی که تجمع گاز در آنها محتمل است، را داشته باشند. در عملیات حفاری با TBM گمانه‌های پیشرو از سینه‌کار تا فاصله ۳۰ متری یا بیشتر به جلو زده می‌شوند تا سیکل عادی حفاری بیش از حد متوقف نشود چون حفر این گمانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر روی نرخ پیشروی می‌گذارند [۷۹].

۴-۳- روش‌های شناسایی و راه‌کارهای پیشگیری ریسک‌های ژئوتکنیکی

با توجه به مطالب گفته شده در این فصل، در جدول (۴-۱) انواع ریسک‌های ژئوتکنیکی در مناطق کوهستانی که امکان رخ دادن آن در حفاری مکانیزه است، آورده شده است. با توجه به مکانیزه بودن حفر تونل روش‌های شناسایی و پیش‌بینی ریسک‌ها قبل از شروع حفاری و همچنین راهکارهای پیشگیری و مقابله با ریسک‌ها در حین اجرای تونل‌سازی برای حذف و یا کاهش آنها به طور خلاصه بیان شده است.

جدول (۴-۱): انواع ریسک‌های ژئوتکنیکی و روش‌های شناسایی و پیش‌بینی آنها برای حذف یا کاهش ریسک‌ها در تونل‌سازی مکانیزه

ریسک	روش‌های شناسایی و پیش‌بینی قبل از اجرا	راهکارهای پیشگیری و مقابله
پتانسیل کارست	بررسی ویژگی‌های آبخوان‌های دارای پتانسیل کارست از نظر درجه توسعه کارست و عمق توسعه کارست در منطقه و...	شناسایی به موقع با استفاده از حفر گمانه پیشرو
ناپایداری سینه‌کار تونل	مطالعه وضعیت خردشدگی سنگ‌ها و شرایط تنش در منطقه	شناسایی به موقع با استفاده از گمانه‌زنی پیشرو، انجام عملیات پیش‌تزیق، استفاده از راک‌بولت‌های فایبرگلاس در زمین‌های بلوکی، شاتکریت (در زمین‌های نرم و روان)، استفاده از میله‌های سردی ^۱ ، ساخت پلاگ بتنی، استفاده از گریزلی در کله‌حفار
ناپایداری جداره‌های تونل	مطالعه وضعیت خرد شدگی سنگ‌ها و شرایط تنش در منطقه، شناسایی زون‌های گسله از طریق بررسی لوگ گمانه‌ها	شناسایی به موقع با استفاده از گمانه‌زنی پیشرو، انجام عملیات پیش‌تزیق، کاهش دور کاترهد جهت کاهش ضربه کاترهد و جلوگیری از گسترش ریزش، عدم گریپ کردن در مناطق سست
تورم سنگ‌های رسی	بررسی درصد کانی‌های رسی در سنگ‌های مسیر	طراحی پوشش نگهداری موقت و دائم با در نظر گرفتن بار ناشی از تورم مصالح رسی
لهیدگی (مچاله‌شوندگی)	مطالعه وضعیت خردشدگی سنگ‌ها و شرایط تنش القایی در محیط اطراف تونل، استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی برای برآورد میزان همگرایی تونل	در نظر گرفتن بار وارده در طراحی پوشش نهایی تونل، کاهش زمان توقفات ماشین، تزیق مواد روان‌کننده به پشت شیلدها جهت کاهش اصطکاک، افزایش اضافه حفاری با بستن دیسک کاترهای گیج در حاشیه بیرونی کاترهد، افزایش نیروی پیشران جک‌های طولی
هجوم آب زیرزمینی	بررسی پتانسیل کارست، شناسایی ساختارهای هدایت‌کننده جریان آب مانند گسل‌ها با حفر گمانه‌های اکتشافی، شناخت ویژگی‌های آبگذری زمین اطراف تونل، اندازه‌گیری نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی	عملیات پیش‌تزیق، استفاده از تجهیزات مناسب برای پرسنل، طرح‌های زهکشی مناسب، استفاده از سگمنت‌های آب‌بند، انجماد زمین، استفاده از TBM دارای فشار سینه‌کار
قابلیت گریپ خردشدگی سنگ‌ها	بررسی ویژگی‌های مقاومتی ماده سنگ و وضعیت خردشدگی سنگ‌ها	انتخاب صحیح نوع ماشین، استفاده از مد سینگل در دستگاه‌های با سپر تلسکوپی
سنگ‌های بسیار ساینده	بررسی ویژگی‌های پتروگرافیکی سنگ‌ها و نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های ساینده‌گی سنگ به تعداد کافی	بازدید منظم کاترهد، تعویض به موقع دیسک کاترها و ابزار برش، استفاده از صفحات ضد سایش بر روی کاترهد، اعمال گشتاور بالا
نشت گاز	شناسایی به هنگام انجام عملیات حفاری اکتشافی	شناسایی به موقع از طریق نصب سنسورهای حساس بر روی ماشین، طراحی سیستم تهویه مناسب، استفاده از ماسک، سیستم اطفای حریق برای گازهای قابل اشتعال
چسبندگی خاک‌ها و سنگ‌های رسی (گل‌گرفتگی)	تعیین ویژگی‌های خاک و کانی‌های رسی با آزمایش‌های مختلف	اصلاحات ماشین در حین طراحی و ساخت آن با شناخت زمین، ایجاد فضای خالی کافی برای عبور گل، کاهش خصوصیت چسبناکی زمین با تزیق مواد مناسب (فوم، پلیمر)
سینه‌کار مختلط	بررسی‌های ژئوتکنیکی دقیق نظیر حفر گمانه، حفر ترانشه و چاهک	جلوگیری از آسیب به کاترهدها با کاهش نرخ پیشروی دستگاه، اصلاح طراحی دیسک‌ها، کاهش فشار آب زیرزمینی با حفر چال‌های افقی در جبهه کار

¹ Grill bars

ادامه جدول (۴-۱): انواع ریسک‌های ژئوتکنیکی و روش‌های شناسایی و پیش‌بینی آنها برای حذف یا کاهش ریسک‌ها در تونل‌سازی مکانیزه

ریسک	روش‌های شناسایی و پیش‌بینی قبل از اجرا	راهکارهای پیشگیری و مقابله
برخورد با زون گسله	پیشگویی لرزه‌ای تونل (TSP)، حفاری گمانه اکتشافی	کم کردن میزان حفاری برای کاهش تأخیر زمانی، تزریق مواد روان‌کننده برای کاهش ضریب اصطکاک بین سپر و سنگ‌های اطراف، انجماد، استفاده از اپراتور و پرسنل ماهر، پوشش تونل با قطعات پیش ساخته، چال‌های زهکشی (در صورت حضور فشار زیاد آب)، استفاده از TBM های سپری

۴-۴- جمع‌بندی

در این فصل مهم‌ترین ریسک‌های ژئوتکنیکی از قبیل برخورد با زون‌های خرد شده و گسله، ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی، نشت و هجوم آب به داخل تونل، سینه‌کار مختلط، تورم سازندهای شیلی و مارنی، پدیده‌ی لهیدگی (مچاله شوندگی)، تشکیل گل (انسداد)، پتانسیل کارست، نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها، معرفی شده‌اند و راهکارهای پیش‌بینی و مقابله با این خطرات برای حذف یا کاهش ریسک توضیح داده شده است.

۵. فصل پنجم:

معرفی تونل غربی البرز و

رتبه‌بندی ریسک‌های آن

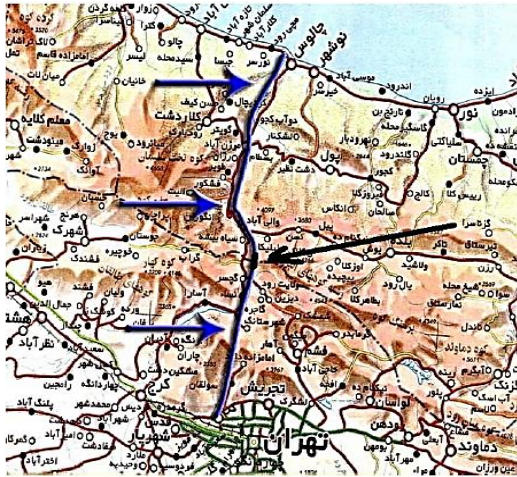
پروژه ملی احداث آزاد راه تهران- شمال که تونل‌های شرقی و غربی البرز در مسیر قطعه دوم این پروژه قرار دارند نقش حیاتی در حمل و نقل جاده‌ای کشور ایفا می‌کند. در این فصل با بررسی منطقه‌ی مورد مطالعه، زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی تونل و پروژه‌های خارجی مشابه تونل البرز، ریسک‌های زمین‌شناسی خطرناک مسیر تونل، ریسک‌های هزینه‌ای، ریسک‌های هندسی حفاری تونل، ریسک‌های سیاسی و نحوه تأمین برق دستگاه و تجهیزات و دیگر ریسک‌های فنی و محیطی در تونل غربی البرز با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و چند معیاره فازی رتبه‌بندی شده‌اند.

۵-۲- معرفی پروژه تونل البرز

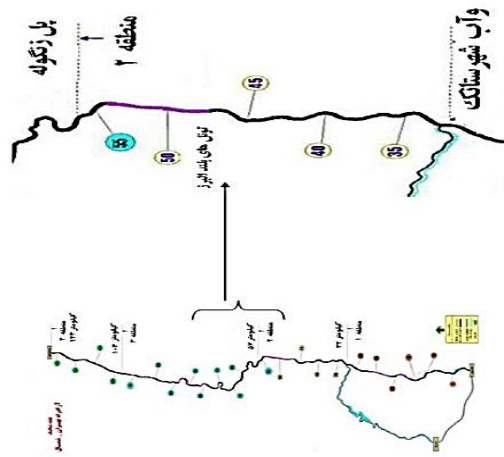
طرح احداث بزرگراه ۱۲۱ کیلومتری تهران- شمال از سال ۱۳۵۳ برنامه‌ریزی شده که از سال ۱۳۷۷ عملیات احداث آن آغاز شده است و به چهار قطعه تقسیم شده که تاکنون تنها قطعه چهارم آن راه‌اندازی شده و به بهره‌برداری رسیده است. مسیر آزادراه از تقاطع غیر همسطح با بزرگراه شهید همت و بزرگراه آزادگان شروع و در امتداد درّه کن پس از گذشتن از حاشیه روستای سولقان به تدریج از منطقه کوهستانی توچال عبور کرده و سپس توسط تونل بلند تالون به طول ۴۹۰۰ متر این رشته کوه را قطع نموده و در دامنه‌های شمالی آن در منطقه دوآب شهرستانک قرار می‌گیرد (اجرای این قسمت که طول تقریبی آن ۳۲ کیلومتر است، باعث می‌شود مسیر فعلی حدود ۶۰ کیلومتر کوتاه‌تر شود). از آن پس، مسیر به موازات جاده قدیم کرج- چالوس امتداد می‌یابد و در درّه سرهنگ وارد تونل البرز شده و در پل زنگوله خارج می‌شود، سپس با عبور از ارتفاعات البرز به موازات جاده موجود کرج - چالوس تا شهر چالوس ادامه یافته و در نهایت با یک تقاطع غیر هم‌سطح به کمربندی چالوس - تنکابن متصل می‌شود. تونل البرز در مسیر قطعه دوم این پروژه قرار دارد. این قطعه از دوآب شهرستانک تا پل زنگوله را شامل می‌شود و ۲۵ کیلومتر طول دارد. تونل البرز که با ۶ هزار و ۳۷۴ متر طول، بزرگترین تونل این آزادراه محسوب می‌شود، در این قطعه قرار دارد [۸۰].

در شکل ۵-۱ (الف) محل تونل البرز واقع در منطقه (قطعه) دوم از پروژه چهار منطقه‌ای آزادراه

تهران - شمال و در شکل (ب) موقعیت جاده‌ای بین شهری این تونل و در شکل (ج) نمایی از دهانه جنوبی تونل (البرز)، نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۵-۱: موقعیت جغرافیایی تونل البرز [۸۰]

۵-۳- وضعیت زمین‌شناسی منطقه

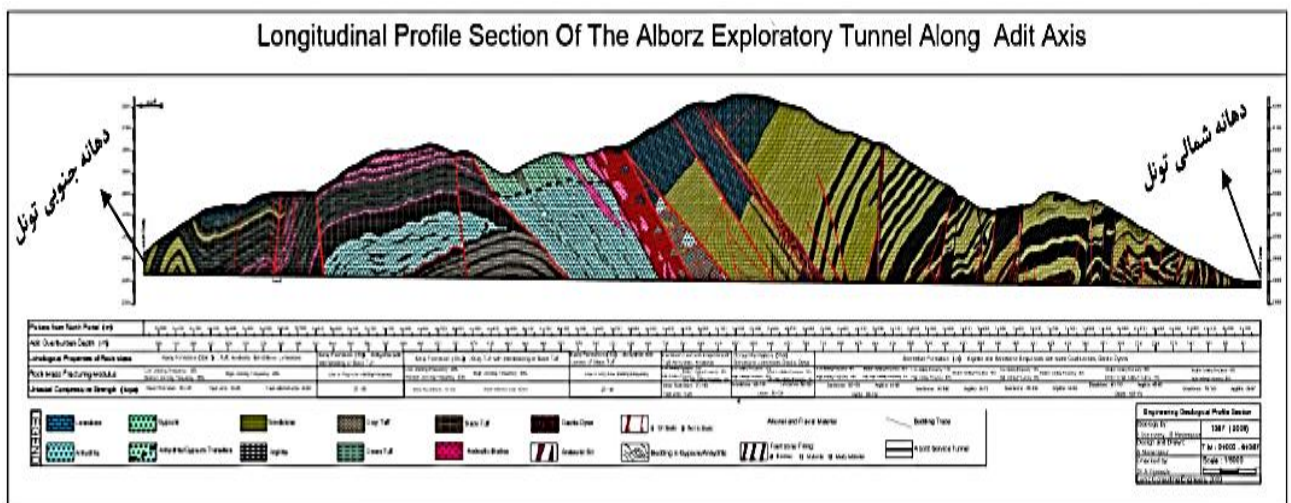
تونل البرز از لحاظ زمین‌شناسی در سازند شمشک و کرج قرار دارد. تونل اکتشافی تونل البرز به وسیله TBM به قطر ۵/۵ متر و طولی معادل تونل البرز حفاری شده است. این مطالعه بر روی دهانه جنوبی به طول ۳۸۸۷ متر انجام گرفته است (زیرا اطلاعات این دهانه در دسترس بوده است). برداشت زمین‌شناسی - مهندسی تونل اکتشافی البرز از دهانه شمالی توسط زمین‌شناسان روسی و ایرانی انجام شده است. ضمن برداشت زمین‌شناسی، پارامترهای زیر تعیین و ثبت شده‌اند: ۱- لیتولوژی سنگ‌ها

۲- نوع کنتاکت‌های موجود بین واحدهای مختلف سنگی ۳- وجود چین‌خوردگی و تخریب‌های تکتونیکی و پارامترهای مربوطه ۴- درجه درزه‌داری و پارامترهای مربوطه عرض بازشدگی درزه‌ها، نوع پرکننده، طول درزه، مشخصات سطح جداره درزه‌ها و غیره ۵- مشخصات چینه‌بندی سنگ‌ها، گسل‌ها و درزه‌ها ۶- آبدهی و دبی آب زیرزمینی ۷- موارد نشت گاز ۸- درجه هوازدگی سنگ‌ها و سایر متغیرها.

لازم به ذکر است که حفاری تونل اکتشافی البرز در بیش‌تر نواحی محدوده مورد بررسی پس از حفاری چال و گمانه پیشگام صورت گرفته است. غالباً چال‌های پیشگام افقی (بدون مغزه‌گیری) به عمق ۲۵-۳۵ متر و بعضی گمانه‌های پیشگام (همراه با مغزه‌گیری) حفاری شده است. لیتولوژی مسیر تونل در دهانه شمالی عمدتاً از توف‌ها (سیاه، سبز، خاکستری)، آندزیت (سبز و خاکستری)، انیدریت، سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، آرژلیت و گابرو تشکیل شده است. مقاومت فشاری تک محوره تخمین زده شده برای این سنگ‌ها از ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال متغیر است. طولانی‌ترین گسل در متر ۵۳۶۱-۵۳۳۹ قرار دارد که از برش سیمانته شده تشکیل شده است و دبی آب ورودی به تونل از این گسل تقریباً زیاد است که شرایط را برای مچاله‌شوندگی سنگ‌های این مسیر مهیا می‌سازد [۶۷].

پروفیل طولی تونل البرز در امتداد محور تونل که از حفاری تونل اکتشافی بدست آمده است به

صورت شکل ۵-۲ نشان داده شده است.



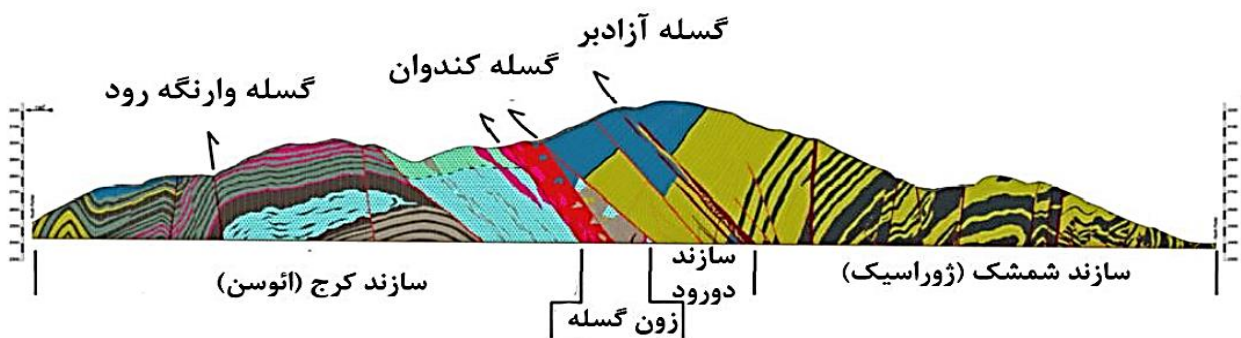
شکل ۵-۲: پروفیل طولی از تونل اکتشافی تونل البرز در امتداد محور تونل [۸۰]

۵-۳-۱- زمین ساخت محدوده‌ی تونل

بر اساس مطالعات پیشین محدوده‌ی تونل البرز در زیر زون گچسر قرار گرفته است. این محدوده بخشی از زون چین خورده رانده‌شده‌ی البرز مرکزی است که راندگی طالقان مرز جنوبی آن و راندگی کندوان مرز شمالی آن را می‌سازد. گسله‌ی طالقان حدوداً ۵ کیلومتر از دهانه‌ی جنوبی تونل فاصله دارد و گسله‌ی کندوان تونل را قطع می‌کند.

گسله‌ی کندوان با طول ۲۰۰ کیلومتر و با روند شمال باختر- جنوب خاور در البرز مرکزی مرز بین زون پالئوزوئیک- مزوزوئیک مرکزی در شمال و زون ترشیاری مرکزی را در جنوب شکل داده است. این گسل راندگی سازنده‌های شمشک (ژوراسیک) و دورود (پرمین) را بر روی سازند کرج (ائوسن) رانده است. جهت حرکت گسل بر اساس مطالعات پیشین به سوی جنوب باختر با سازوکار حرکت معکوس با مولفه‌ی راست لغز راست گرد می‌باشد.

بین گسله‌های طالقان و کندوان چندین گسل راندگی موازی درون زیر پهنه‌ی گچسر ایجاد شده‌اند که در شکل ۳-۵ به نقشه در آمده‌اند. هرکدام از این گسله‌های راندگی بخش‌هایی را جابجا کرده‌اند و بر روی واحدهای دیگر رانده‌اند.



شکل ۳-۵: مقطع طولی تونل و عملکرد گسله‌های راندگی [۶۷]

۵-۳-۲- سنگ‌های میزبان تونل البرز

در محدوده‌ی تونل البرز از ورودی به سمت خروجی به ترتیب سازنده‌های کرج، دورود و شمشک برونزد یافته‌اند. مشخصات این سازندها به شرح زیر است [۶۷]:

۵-۳-۲-۱- سازند دورود

پالئوزوئیک میانی - بالایی در ناحیه پروژه با سازند دورود آغاز می‌شود. در محدوده‌ی تونل، سازند دورود به سن پرمین به طول ۵۲۷ متر برونزد یافته است. این واحد شامل مجموعه‌ای از سنگ آهک پر فسیل، ماسه‌سنگ و آرژیلیت می‌باشد. این توالی در بخش‌هایی توسط دایک‌های پورفیری که در طول زون‌های شکستگی شکل گرفته‌اند، قطع شده است. چندین زون گسله مانند زون‌های میلونیتی توده‌سنگ را بخصوص در ماسه‌سنگ‌ها متأثر کرده‌اند. در مرز زیرین سازند دورود، ماسه‌سنگ‌های ستبر لایه با میان‌لایه‌های آرژیلیت این سازند به زون گسله کندوان می‌رسند که توسط این سازند به روی سنگ‌های جوان‌تر ائوسن (سازند کرج) رانده شده‌اند.

۵-۳-۲-۲- سازند شمشک (دهانه شمالی)

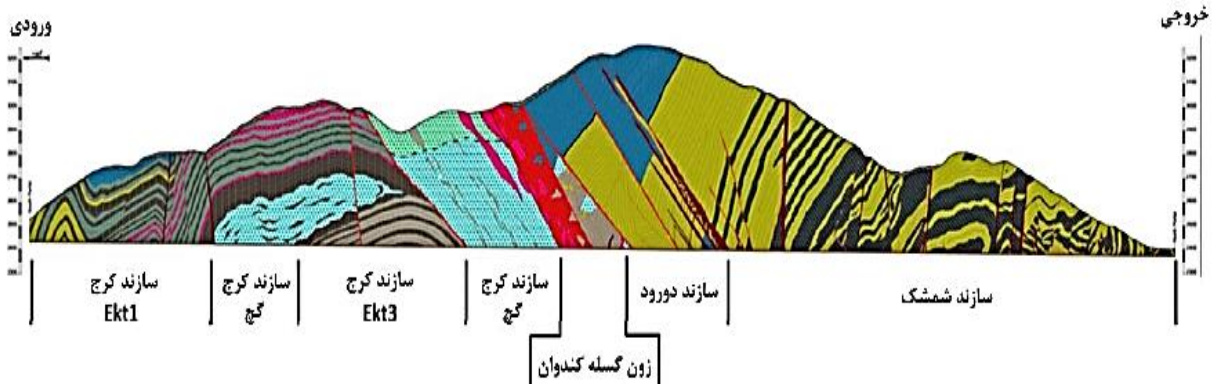
محدوده نیمه انتهایی تونل در سازند شمشک حفاری خواهد شد و این سازند میزبان دهانه خروجی تونل نیز خواهد بود. در این محدوده سازند شمشک شامل تناوبی از لایه‌های سیلتستون، ماسه‌سنگ و شیل با میان‌لایه‌هایی از لایه‌های زغالی می‌باشد (شکل ۴-۵). دایک‌های پورفیری به صورت محدود این سازند را قطع کرده‌اند. ماسه‌سنگ‌های ریز تا متوسط‌دانه به رنگ زرد-قهوه‌ای تا خاکستری دارای بیش از ۳۰ درصد کوارتز هستند. سیلتستون یا به صورت لایه‌های ستبر رخنمون دارند و یا به صورت لایه‌های نازک به همراه ماسه‌سنگ‌ها و یا در تناوب با لایه‌های ذغالدار گسترش یافته‌اند.



شکل ۴-۵: سازند شمشک در بخش خروجی تونل البرز [۶۷]

۵-۳-۲-۳-۵ سازند کرج (دهانه خروجی)

مطابق شکل (۵-۵) بر اساس گزارش‌های فنی شرکت مشاوران لانیز، در مسیر ورودی تونل ابتدا سازند کرج و زون گسله کندوان سپس سازندهای درود و شمشک سر راه تونل قرار گرفته‌اند.



شکل ۵-۵: پروفیل طولی تونل سرویس البرز [۶۷]

سازند کرج با رخساره و ویژگی‌های فیزیکی گوناگون گسترش زیادی داشته و تقریباً نیمی از تونل را زیر پوشش خود قرار داده است. این سازند در مسیر تونل به سه واحد سنگی قابل تفکیک است:

الف: واحد EKb_1 : مجموعه‌ای از توف‌های سبز رنگ، ماسه سنگ، سیلتستون و میان‌لایه‌های سنگ آهکی می‌باشد، میزبان بخش‌های جنوبی تونل است و پس از آن با یک زون گسله که حاوی سنگ‌های خرد شده و قطعات گچی است

ب: واحد گچی: این واحد با طول ۴۴۰ متر شامل توده گچ با میان‌لایه‌هایی از توف خاکستری است.
پ: واحد EKt_3 : شامل توف‌های خاکستری با میان‌لایه‌های توف سیاه‌رنگ به صورت یک طاق‌دیس چین‌خورده بزرگ میزبان تونل خواهد بود. ضخامت لایه‌های توفی ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر بوده و شیب کم لایه‌بندی عمومی در برخی نقاط در اثر عملکرد گسله افزایش یافته و به قائم نزدیک می‌شود. حداکثر ستبرای زون گسله در این بخش ۳ تا ۴ متر است.



شکل ۵-۶: تناوب ماسه‌سنگ و سیلتستون در محدوده‌ی پرتال ورودی تونل البرز [۶۷]

۵-۳-۲-۴- بخش میانی با سازند دورود (زون گسله کندوان)

گسله کندوان که یک گسله‌ی راندگی با شیب به سوی شمال می‌باشد نهشته‌های قدیمی‌تر (سازند دورود و روته) را به سوی جنوب و بر روی نهشته‌های جوانتر سازند کرج (اوسن) رانده است. زون تأثیر این گسله تا حدود ۴۰۰ متر نیز گزارش شده است که مجموعه‌ای از توفها، گچ‌ها، بخش‌های آندزیتی و... در آن بخش به شدت تکتونیزه شده‌اند. توده‌سنگ در این بخش به شدت درزه‌دار، شکسته شده و در برخی نقاط هوازده است و گوج گسلی را می‌توان در پرشدگی درزه‌ها و شکستگی‌ها یافت. مرز این واحد به شدت تکتونیزه و سازند دورود با حدود ۱۰ تا ۱۵ متر برش حاوی ماسه‌سنگ، آرژیلیت و توده‌سنگی به شدت هوازده مشخص می‌شود. شیب لایه‌ها در این بخش ۳۴۰-۶۰ / ۳۲۰-۵۰ می‌باشد و جریان آب زیرزمینی در این بخش ۱۴۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد اما به سمت جنوب از میزان آبگذری کاسته شده به تقریباً ۲۰ لیتر بر ثانیه می‌رسد.

به سمت جنوب و با نزدیک شدن به سازند کرج مجموعه‌ای از گچ، نفوذی‌های آندزیتی، توف‌های آندزیتی و بازالت که در یک زون خرد شده به شدت تکتونیزه شده قرار گرفته‌اند، سر راه تونل قرار خواهد گرفت. این واحد متأثر از گسله‌ی کندوان که به نظر می‌رسد شامل بخش‌هایی از سازند دورود و سازند کرج باشد به دلیل خردشدگی، تکتونیزه شده و هوازدگی آن تحت عنوان "واحد گسله کندوان" از سایر بخش‌ها مجزا می‌شود.

۵-۴- زمین‌شناسی مهندسی

۵-۴-۱- ویژگی‌های دیداری زمین‌شناسی مهندسی

در این مرحله از مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، ویژگی‌های دیداری زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ‌های میزبان تونل موردنظر قرار گرفته است. این بررسی‌ها با استفاده از مقدار واگشت چکش اشمیت، اندازه‌گیری‌های تکتونیک و نیز تجربه کاری فراوان در پهنه البرز تعیین گردیده است. ویژگی‌های دیداری زمین‌شناسی، پیشنهاد IAEG و ISRM شامل ۶ پارامتر قابل مشاهده و بررسی در عملیات صحرائی است و برای هریک طبقه‌بندی‌های مربوطه ساماندهی شده است. این پارامترها

عبارتند از [۶۷]:

ضخامت لایه‌ها، درزه‌داری و نامناسب‌ترین فاصله‌داری (و تضمین RQD)، مقاومت فشاری نمونه

سنگ بکر، میزان هوازدگی - دگرسانی، نفوذپذیری و اندازه واریزه‌ها و بلوک‌های سنگی

نتیجه این بررسی‌ها در جدول ۵-۱ بازتاب یافته است.

جدول (۵-۱): ویژگی‌های دیداری زمین‌شناسی مهندسی تونل غربی البرز [۶۷]

موقعیت تونل	لیتولوژی	خواص زمین‌شناسی مهندسی دیداری				
		لایه‌بندی (میانگین)	Jointing (فاصله داری)	RQD (%)	هوازدگی	σ_{ci} (مگاپاسکال)
بخش شمالی	تناوب شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرای خرد شده (سازند شمشک)	15-90 (40)	B+3J (25)	50-55	W _{2,3}	28
بخش میانی	سنگ آهک، شیل، ماسه سنگ و ماسه سنگ کوارتز (شکل گیری دورود و روته)	20-150 (60)	B+3J (30)	60-65 و 45-55	W ₃	53
بخش جنوبی	ماسه سنگ نازک، سنگ آهک و سنگ آهک (سازند کرج)	10-70 (25)	B+3J (20)	50-55	W _{2,3}	30

۵-۴-۲- رتبه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های میزبان تونل البرز

برای ارزیابی توده‌های سنگی و تعیین پارامترهای مکانیکی آنها، از رده‌بندی مهندسی استفاده

می‌شود. در این بررسی‌ها توده‌های سنگی میزبان تونل البرز بر پایه دو روش معتبر یعنی RMR

(بنیائوسکی: ۱۹۸۸) و GSI (هوک : ۲۰۰۱) بهره گرفته شده که نتیجه آن در جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۲): رتبه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های میزبان تونل غربی البرز [۶۷]

موقعیت تونل	لیتولوژی	طبقه‌بندی توده‌سنگ	
		BRMR (class)	GSS
بخش شمالی	تناوب باریکی از شیل و ماسه سنگ	30-45 (Class IV-III)	35±5
بخش میانی	شیل و ماسه سنگ آهکی متوسط و ضخیم	40-55 (Class III)	45±5
بخش جنوبی	ماسه سنگ شیل آهکی و سنگ آهک	35-50 (Class IV-III)	40±5

۵-۵- پروژه‌های خارجی مشابه با تونل غربی البرز

در جدول (۳-۵) پروژه‌های انجام شده در کشورهای مختلف که از نظر کارایی تونل، قطر بزرگ حفاری و نوع ماشین بکار گرفته شده برای حفاری، شباهت نزدیکی با پروژه تونل غربی البرز داشته‌اند، آورده شده است.

جدول (۳-۵): مشخصات کلی پروژه‌های مشابه با تونل غربی البرز

ردیف	نام تونل	نوع تونل	قطر حفاری (متر)	نوع ماشین	کشور	منابع
۱	Jinping II	انتقال آب	۱۲/۴۳	سپر باز	چین	۸۱، ۸۲
۲	SLBC	انتقال آب	۱۰	سپر تلسکوپی	هند	۸۳
۳	Gotthard	ریلی	۹/۵۸	سپر باز	سوئیس	۸۴ تا ۹۵
۴	Guadarrama	راه	۹/۵۶	سپر تلسکوپی	اسپانیا	۹۰، ۹۶ تا ۹۹
۵	Abdalajis	راه	۱۰/۲	سپر تلسکوپی	اسپانیا	۹۰، ۹۶، ۱۰۰ تا ۱۰۴
۶	Pajares	راه	۱۰/۱۲	سپر تلسکوپی	اسپانیا	۹۰، ۹۶، ۱۰۱
۷	Frasnadello	راه	۱۱/۸	سپر منفرد	ایتالیا	۵۴، ۱۰۱، ۱۰۴، ۱۰۵
۸	San Pellegrino	راه	۸	سپر تلسکوپی	ایتالیا	۱۰۶
۹	Dul Hasti	انتقال آب	۸	سپر باز	هند	
۱۰	Lötschberg	ریلی	۹/۴۳	سپر باز	سوئیس	۱۰۷
۱۱	Himalaya	راه	۱۴/۴	سپر تلسکوپی	هند، نپال	۱۰۸، ۱۰۹
۱۲	Manapori	انتقال آب	۱۰/۰۵	سپر باز	نیوزلند	
۱۳	WienerWald	راه	۱۰/۶۸	سپر منفرد		۱۱۰
۱۴	Niagara	انتقال آب	۱۴/۴	سپر باز	کانادا	
۱۵	Qinling	ریلی	۱۰/۲	سپر باز	چین	۱۱۱
۱۶	Mont Russelin	راه	>۱۰		سوئیس	۱۱۲
۱۷	Boezberg	راه	۱۱/۸۷	سپر منفرد	سوئیس	۱۱۲
۱۸	Kargi Kizilmark	انحراف آب	۹/۸۴	سپر تلسکوپی	ترکیه	۱۱۳
۱۹	HongKong	ریلی	۸/۸۵	سپر تلسکوپی	چین	۱۱۴، ۱۱۵
۲۰	Moutier	راه	۱۱/۷	سپر منفرد	سوئیس	۱۱۶
۲۱	Pinglin	انتقال آب	۱۱/۷۴	سپر منفرد	تایوان	۵۴، ۱۱۷ تا ۱۱۹

در جدول ۴-۵ نیز برخی از پروژه‌هایی که از نظر قطر ماشین، نوع ماشین و طول تونل و همچنین شرایط زمین با پروژه تونل غربی البرز شباهت دارند آورده شده که انتظار می‌رود با توجه به ریسک‌هایی که در ساخت این تونل‌ها بوجود آمده، ریسک‌هایی حفاری تونل غربی البرز به درستی پیش‌بینی و مدیریت ریسک شود.

جدول (۴-۵): پروژه‌های مشابه تونل البرز از نظر شرایط زمین و ریسک‌های موجود در آنها

نام تونل	سال	قطر تونل (متر)	شرایط زمین	مخاطرات	نوع ماشین
Pinglin Tunnel (تایوان)	1999-2005	۱۱/۸	ماسه سنگ بسیار سخت با مقاومت فشاری بیشتر از ۳۵۰ مگاپاسکال، محتوای کوارتز بالا (تا ۹۸٪) و پرکننده‌های رسوبی نازک	سایش زیاد کاترهدها- ناپایداری سینه کار و دیواره‌ها- مجاله- شوندگی- هجوم آب در زون‌های گسلی	TBM (تلسکوپی)
Frasnadello (سوئیس)	2000	۱۱/۸	آرژیلیتی- سنگ آهک	زون گسلی	Single shield TBM
Gotthard (سوئیس)	2009	۹/۵۸	گنایس- دولومیت و سنگ گچ- روباره ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر	ناپایداری دیواره‌های تونل	Open TBM
Belchen renovation tunnel (سوئیس)	2016-2017	۱۳/۹۱	سنگ، ژیبس، رس، آهک	وجود گسل- آب زیرزمینی- افزایش فشار سنگ در طول زمان	Single shield TBM
Lefortovo (مسکو)	2002	۱۴/۲	سنگ		Mixshield TBM
Weser tunnel (آلمان)	1998-2004	۱۱/۶۸	زمین ناهمگن و سخت (شامل شن، بلوک‌های گرانیتی، شن و ماسه، مالت، تیل و میکا سیلت)	وجود بولدر در مسیر- تغییرات ناگهانی شرایط زمین	1x Mixshield TBM
SMART Tunnel (مالزی)	2004-2007	۱۳/۲۱	سنگ- سنگ آهک- سنگ ماسه- شن و ماسه		2x Mixshield TBM
Silver forest tunnel (مسکو)	2004-2006	۱۴/۲	سنگ- گل- ماسه		Mixshield TBM
Halland (سوئد)		۹/۱	لايه‌های گنایس با میان لایه های آمفیبولیت		Single shield TBM
Tunnel de Bure	2008	۱۲/۵۳	سنگ مارل، سنگ آهک		1x Single Shield TBM
A1 Sparvo highway tunnel (ایتالیا)	2011	۱۵/۵۵	رس- سنگ آهک- سنگ گچ- ماسه سنگ		EPB SHILD
Brisbane Airport Link East-West Tunnel (استرالیا)	2011	۱۲/۴۵	زمین نرم، سنگ ابتدای تونل سازند تینگالپا / اسپلی، بریزبن توف		2x EPB Shield

۵-۶- ریسک‌های موجود در تونل البرز و راهکارهای پیش‌بینی شده برای کاهش ریسک

در این بخش به شرح مخاطرات موجود در تونل غربی البرز که شامل ریسک‌هایی همچون: عوامل زمین‌شناسی، عامل هزینه‌ای، عامل سیاسی، عوامل هندسی و عوامل فنی- محیطی و همچنین راهکارهای پیشنهادی برای پیش‌بینی مخاطرات جهت حذف یا کاهش ریسک پرداخته شده است.

۵-۶-۱- عوامل زمین‌شناسی

عوامل زمین‌شناسی که برای تونل غربی البرز مخاطره به حساب می‌آیند، به شرح است [۶۷]:

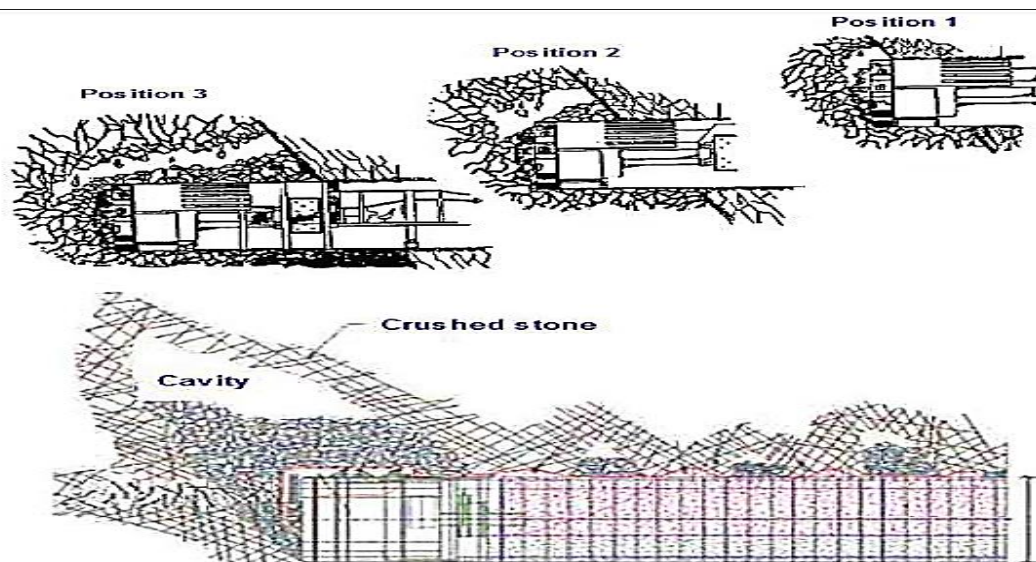
۵-۶-۱-۱- زون‌های گسله

بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفته، قرارگیری واحدهای سنگی در کنار یکدیگر در مسیر تونل البرز تکتونیک بوده و متأثر از حرکت راندگی گسل کندوان و مجموعه گسل‌های همراه صورت گرفته است. از دیگر ویژگی‌های زمین‌شناختی منطقه تونل‌های البرز رخنمون واحدهای گچی در راستای راندگی کسل کندوان است. لذا در منطقه تونل‌های البرز توسعه پیچیدگی‌های زمین‌ساختاری موجب توسعه شدید شکستگی‌ها در توده‌سنگ‌ها، بالا رفتن تنش توده‌سنگ‌ها، افزایش شدت لرزه‌ای و پتانسیل بالای وقوع خطرات زمین‌شناسی در آنها شده است. این ویژگی‌ها و خطرات می‌توانند موجب ریسک بالایی به هنگام ساخت تونل‌ها گردند. بیشتر مشکلات حفاری در واحدها در مقاطعی رخ می‌دهد که عملکرد گسل‌ها موجب خردشدگی توده‌سنگ‌ها شده است. بدیهی است که به هنگام توقف TBM در پهنه‌های گسلی، عملیات آزادسازی دستگاه و پایدارسازی دیواره‌ها، کار بسیار طاقت فرسا و خطرناکی بوده که تنها توسط کارگران ماهر و با صرف زمان زیاد قابل انجام است. با توجه به وجود پهنه‌های گسلی و خرد شده در مسیر طرح، استفاده از ماشین حفاری سپر دوپل می‌تواند در شرایط ریزشی زمین‌های سست از تونل حفاظت کند و بنابراین امکان عبور TBM از این پهنه‌های نامناسب را فراهم کند.

۵-۶-۱-۲- خطر ریزش‌های سنگی

وقوع خطر ریزش‌های سنگی جدار تونل در منطقه تونل‌های البرز به دلیل حضور گسل‌های بنیادین و مناطق برشی همراه، با سطوح گسلی پوشیده از کانی‌های رسی، اثر دگرسانی آب‌های فرورو و وقوع پدیده فشارنده سنگ در توده سنگ‌های شدیداً دگرسان و خرد شده اجتناب ناپذیر می‌باشد. در این راستا بایستی پایداری ترانشه‌های ورودی تأمین و پدیده افت سنگ نیز بررسی شود. همچنین وجود زون شدیداً خرد شده می‌تواند فاکتوری منفی برای استفاده از حفاری مکانیزه باشد. در صورتی که

توده‌سنگ خرد شده دارای گسترش زیادی بوده و حجم زیادی از مصالح خرد شده به صورت روباره اضافی بر روی دستگاه بریزد می‌تواند باعث گیرگرددن دستگاه شود (همانند شکل ۵-۷). چنین حالتی فقط در زون‌های خرد شده با زمان ایستایی بسیار کم محتمل است. برای بقیه مسیر تونل، احتمال بروز مشکل برای حرکت TBM ناچیز است. پیشروی ماشین در زون‌های گسله بدون پیش‌بینی تمهیدات لازم و انجام عملیات تحکیم سبب گیرافتادن دستگاه خواهد شد. زمان ایستایی اندک توده‌سنگ سبب می‌شود مصالح داخل زون خرد شده با سرعتی بیشتر از سرعت حفاری و حرکت TBM حرکت نماید و فضای خالی دودکش مانند در جلوی دستگاه ایجاد نماید [۶۷].



شکل ۵-۷: ریزش توده‌سنگ خرد شده بر روی کاترهد و سپرهای TBM [۶۷]

نکته دیگر در استفاده از سپر در نواحی با روباره زیاد یا احتمال تورم، احتمال بروز همگرایی شدید زمین است که در صورت تعطیلی مدت‌دار کارگاه ممکن است باعث گیرکردن سپر شود. البته برای این مساله نیز راه‌حلهایی همچون تزریق بنتونیت در پشت سپر وجود دارد، ولی بهترین و مؤثرترین راه مقابله، جلوگیری از تعطیلی کارگاه با تعمیر و نگهداری منظم ماشین و پرداخت‌های به موقع کارفرما برای جلوگیری از توقف کار است. با توجه به مجموع موارد بالا، استفاده از ماشین‌های Open TBM در این پروژه رد می‌شود.

تونل البرز در زیر خط الرس کوه‌های البرز حفر شده و دهانه جنوبی آن در حوضه آبریز رودخانه کرج و دهانه شمالی آن در حوضه آبریز رودخانه چالوس واقع شده است و اکثر آب نفوذیافته به تونل البرز از دامنه‌های شمالی کوه‌های البرز تغذیه می‌شود. با توجه به اینکه عمده بارش در ماه‌های سرد سال در این منطقه به شکل برف است، در چنین شرایطی، بخشی از برف ذوب‌شده به درون زمین نفوذ کرده و سپس به صورت چشمه، آبراهه‌های سطحی را تغذیه می‌کند. از طرفی، حفاری تونل البرز سبب زهکشی آب‌های زیرزمینی از طبقات فوقانی خواهد شد. این جریان آب گاهی اوقات با شستن مواد (سرازیر شدن حجم عظیمی از خاک و سنگ مرطوب و شل به داخل تونل) و ایجاد دیگر مسائل حاد، مشکلاتی در امر حفاری تونل ایجاد می‌کند. اگر این مشکلات به شکل ناگهانی اتفاق افتد، امکان توقف کامل فعالیت تونل‌زنی وجود دارد. در این شرایط، سولفات موجود در آب به بتن حمله می‌برد، بنابراین کیفیت آب باید بررسی شود و آب‌های عبوری از سکانس‌های چین‌های حاوی ژئوپس و انیدریت باید مورد توجه قرار گیرند چون جریان آب حاوی نمک می‌تواند بسیار مضر باشد و نیاز به تمهیدات ویژه دارد. تأثیرات آب‌های زیرزمینی بر عملیات تونل‌زنی می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

۱. جریان یافتن آب به داخل فضاهاى زیرزمینی، تأثیر گذاشتن بر عملیات معمول ساخت و احداث و امکان تأثیر بر پایداری سقف و سینه‌کار تونل،
۲. جریان یافتن ناگهانی مواد اشباع از آب به همراه وجود وضعیت و ساختارهای موضعی و خاص مانند گسله‌ها و زون‌های خرد شده، حفرات کارستی بزرگ و...
۳. گسترش حفره یا گودال در نواحی حساس در اثر فرسایش داخلی به سبب وجود آب،
۴. تسریع در تجزیه و انحلال رسوبات انحلالی باعث به وجود آمدن غارها و حفرات می‌شود،
۵. نشست‌های غیرقابل قبول در جاهایی که مواد ریزدانه یا توده‌سنگ‌هایی با شکستگی فراوان وجود دارد که این پدیده در اثر افزایش تنش‌های مؤثر به دلیل پائین بردن سطح آب زیرزمینی به وجود می‌آید.

مطابق با موارد ذکر شده از بابت مخاطرات زمین‌شناسی حین اجرا از گزارش‌های شرکت GEO DATA، دبی ورودی قابل توجهی از آب زیرزمینی به داخل تونل مخصوصاً در سازند دورود پیش‌بینی می‌شود که در گزارش‌ها بالغ بر ۲۰۰ لیتر بر ثانیه گزارش شده است [۶۷].

مهم‌تر از موارد ذکر شده در پایان طراحی‌ها برای افزایش ضریب اطمینان و کمک به قابلیت‌های دستگاه برای عبور از نقاط گسلی، خرد شده و آبدار سیستم حفاری بسته در مد EPB به دستگاه اضافه خواهد شد و عملاً هر آنچه که برای حفاری در چنین زمین‌هایی نیاز است، در طرح دستگاه TBM پیش‌بینی شده است. همچنین اعمال فشار جبهه کار از طریق مد EPB که تا ۴ بار در سقف و ۶ بار در کف خواهد بود ضمن جلوگیری از نفوذ آب در مقاطع ضعیف آبدار به پایداری جبهه کار کمک می‌نماید تا حفاری در چنین شرایطی با استفاده از نقاله حلزونی^۱ به انجام رسد.

خوشبختانه در دستگاه TBM پروژه البرز غربی دو قابلیت برای بررسی جبهه کار پیش‌بینی شده که اول استفاده از اسکن به روش ژئوفیزیک با سیستم BEAM می‌باشد و دوم استفاده از پراب دریل در دستگاه برای نمونه‌گیری از جبهه کار و انجام عملیات تزریق تحکیمی در مواقع لزوم برای پایداری می‌باشد.

۵-۶-۱-۴- شرایط سینه کار مختلط

نوع سینه کار مختلط ممکن است یکی از حالات زیر باشد [۶۷]:

۱- زمینی که از خاک و سنگ تشکیل شده و مواد هوازده در بالای سنگ میزبان قرار دارند.

۲- زمین مختلط که در آن قطعات سنگی با مواد خاک مانند مخلوط شده است.

در شرایط سینه کار مختلط، TBM در سینه کار ضربات شدیدی را به هنگام چرخش دیسک کاترها، در لحظه برخورد با سنگ‌های مقاومتر، وارد می‌کند که سبب خرد شدن آنها می‌شود. از این‌رو اولین مسأله دیده شده هنگام حفاری، افزایش لرزش TBM و انحرافات لحظه‌ای آن است. این مسأله موجب کاهش نیروی پشت دیسک‌ها و کاهش نرخ نفوذ می‌شود. در حالت بحرانی، ممکن است، TBM تا حدی از مسیر خود منحرف شود که لازم است این انحراف کنترل شود.

در مسیر پروژه با شرایطی روبرو خواهیم بود که از این بابت طراحی کاترهد برای مدل MIXED FACE صورت گرفته و سایر تجهیزات برای حفاری در جبهه کار بسته از جمله تأمین فشار جبهه کار،

¹ SCREW

نقاله حلزونی و غیره پیش‌بینی شده است. اضافه شدن مد EPB به دستگاه عملاً قابلیت‌های حفاری این دستگاه در شرایط مذکور را بالا خواهد برد.

۵-۶-۱-۵- پدیده‌ی آماس (متورّم شوندگی)

تونل البرز با توجه به درازای ۶ کیلومتری و لیتولوژی سنگ‌های میزبان، می‌تواند در بردارنده این پدیده باشد. متورّم شوندگی می‌تواند با ایجاد فشارهای جانبی، موجب تغییر ابعاد تونل شود. این پدیده بیش از همه در گچ‌سنگ‌های سازند کرج وجود دارد، وجود آب در گچینه‌سنگ^۱ می‌تواند موجب فعالیت‌های شیمیایی شده و گچینه‌سنگ را به گچسنگ^۲ تبدیل نماید که باعث انبساط و افزایش حجم ۵ درصدی سنگ می‌شود که پیامد آن تغییر شکل در اندازه‌های تونل و سیستم حفاظت تونل است.

۵-۶-۱-۶- مچاله‌شوندگی

یکی دیگر از پدیده‌هایی که در تونل البرز وقوع آن بر اساس مطالعات پیشین محتمل است، پدیده مچاله‌شوندگی است. این موضوع می‌تواند در محدوده توده سنگ ضعیف مسیر تونل مخصوصاً زون‌های گسلی از جمله گسل کندوان وجود داشته باشد. با توجه به سرپاره بیش از ۶۰۰ متر، سنگ‌های مستعد شامل گنایس‌ها، میکاشیست‌ها، کالک‌شیست‌ها (به خصوص در مناطق تکتونیزه و گسلی)، گل‌سنگ‌ها، مارن‌ها و شیل‌های رسی است. اگر چه توقف‌های در شرایط مچاله‌شونده متأثر از شرایط نامساعد زمین‌شناسی منطقه است ولی با گذشت زمان، برخی عوامل اجرایی مانند افزایش تجربه اپراتورهای TBM می‌توانند برای جلوگیری از توقف‌ها و عبور دستگاه از زمین‌های فشارنده نقش کلیدی داشته باشند. برای نمونه در بحث هدایت دستگاه، با ورود به زمین‌های فشارنده و درگیر شدن سپر دستگاه با دیواره تونل، میزان پارامترهای نرخ نفوذ^۳ و گشتاور کله حفار^۴ کاهش می‌یابد و در

¹ anhydrite

² gysum

³ penetration of Rate

⁴ Torque

مقابل آن، میزان نیروی پیشران^۱ و فشار دیوارگیری^۲ دستگاه افزایش نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به روند تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه در اتاق کنترل TBM، می‌تواند اپراتور را نسبت به ورود به زمین‌های فشارنده و اندیشیدن تمهیدات لازم (تنظیم گشتاور و نیروی پیشران برای جلوگیری از توقف دستگاه) آگاه کند. در صورتی که TBM مجهز به سامانه ثبت داده^۳ برای ذخیره‌سازی اطلاعات دستگاه به صورت خودکار باشد، این امکان وجود دارد که بتوان روند تغییرات پارامترهای دستگاه را در شرایط مختلف زمین‌شناسی به‌طور دقیق تجزیه و تحلیل کرد.

برای کاهش پتانسیل لهیدگی راهکارهایی به شرح ذیل در دستگاه TBM پیش‌بینی شده است

[۶۷].

- کوتاه شدن شیلد دستگاه تا حد ممکن
- طراحی سپر به صورت مخروطی در این راستا قطر حفاری ۱۲۹۲۰ میلیمتر و قطر شیلد در انتها ۱۲۸۳۵ میلیمتر می‌باشد. یعنی به میزان ۸.۵ سانتیمتر اختلاف قطر حفاری و قطر خارجی شیلد وجود دارد.
- نصب دیسک کاترهای محیطی در حاشیه بیرونی کاترهد برای اضافه حفاری
- تزریق بنتونیت یا گریس به عنوان روان‌کننده پشت سپر که در این راستا تعداد ۱۲ نازل تزریق بنتونیت پیرامون شیلد در نظر گرفته شده است.

۵-۶-۱-۷- امکان گل‌گرفتگی

با توجه به زون‌های خرد شده و بازدید از تونل شرقی که در مقاطعی به دلیل خردشدگی بیش از حد سنگ، رفتار آن شبیه به خاک می‌باشد، ضمن اضافه کردن SCREW برای تخلیه چنین مصالحی در مد EPB، نازل‌های تزریق فوم روی کاترهد و داخل SCREW پیش‌بینی شده است.

۵-۶-۱-۸- حفرات کارستی

از دیگر ویژگی‌های زمین‌شناختی منطقه تونل‌های البرز وجود حفرات کارستیک در سطح این توده‌های گچی دیده می‌شوند که ناشی از پدیده انحلال این توده‌های گچی می‌باشند. لذا وجود

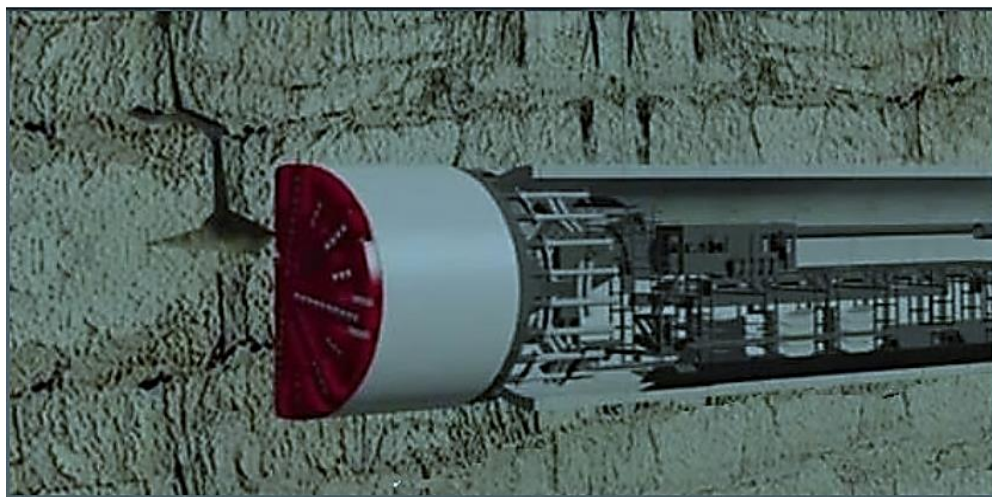
¹ Thrust

² Regripping

³ system logger Data

شواهد فراوان حفرات کارستیک در مسیر تونل‌های البرز بیانگر احتمال برخورد این تونل‌ها با فضا‌های بزرگ محبوس و اشباع را در عمق تونل‌ها دارد. در اثر انحلال، حفره‌ها و چاهک‌هایی در سنگ‌ها ایجاد می‌شود که آب و گاز می‌تواند از میان آنها جریان یابد و این امر می‌تواند مشکلات زیادی را در تونل سازی به وجود آورد. اما دیگر مشکلی که این حفرات در تونل‌سازی مکانیزه ایجاد می‌کنند در هنگام کفشک‌زنی ماشین باز است. در این موارد استفاده از کفشک‌زنی به علت کاهش ظرفیت باربری سنگ با محدودیت مواجه است زیرا ممکن است در اثر وجود حفرات، سنگ زیر کفشک بشکند و مشکلاتی را برای پیشروی ماشین به وجود آورد. برخورد با غارها و حفرات کارستی بزرگ در عملیات تونل‌زنی ممکن است با مشکلاتی همراه باشد که غلبه بر آنها اغلب بسیار دشوار است مانند:

۱. صعوبت ایجاد پل بر روی این حفرات برای عبور دستگاه TBM در صورت خالی بودن حفرات
 ۲. مشکل تونل‌زنی از درون مواد پرکننده که از لحاظ ژئوتکنیکی بسیار ضعیف است
 ۳. مقابله با هجوم آب به همراه جریان گل (اگر حفره آبدار و با مواد پرکننده پر شده باشد)
- مشکلی که در استفاده از ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع وجود دارد، آن است که وجود حفرات بزرگ در جلوی سینه‌کار تونل اغلب سبب انحراف ماشین از مسیر اصلی خود می‌شود. شکل ۵-۸ حفرات کارستی را در مسیر تونل نشان می‌دهد.



شکل ۵-۸: شکل شماتیکی از حفرات کارستی در مسیر حفاری تونل [۶۷]

در صورت برخورد با نواحی کارستی راه‌کارهای زیر را می‌توان برای مقابله با آن در نظر گرفت

[۶۷]:

- ۱- استفاده از روش طاق چتری برای نگهداری در صورت شناسایی حفرات به وسیله گمانه‌ها
 - ۲- تزریق مواد پرکننده به داخل حفره.
 - ۳- استفاده از تزریق برای پر کردن فضای خالی بین سگمنت و سنگ‌های اطراف به صورت فوری و تکمیل آن در صورت امکان.
 - ۴- محافظت از صفحه حفار و بخش جلوئی سینه کار به منظور جلوگیری از هرگونه ریزش.
 - ۵- پائین آوردن نرخ پیشروی TBM و هدایت آن با دقت بسیار زیاد.
 - ۶- پل زدن و پر کردن حفره در صورت وجود حفره‌های کارستی بزرگ.
 - ۷- عقب کشیدن دیسک‌های برشی برای کاهش تأثیر مواد سنگی سست شده در سینه کار.
 - ۸- استفاده از صفحه حفار مسطح برای ایجاد نگهداری در سینه کار به هنگام ورود TBM به حفره‌ای که با دوغاب پر شده یا نشده.
- ۵-۶-۱-۹- نشت گازهای سمّی

رسوبات ائوسن که مسیر تونل البرز در آنها قرار دارد، روی رسوبات ژوراسیکی قرار دارند. رسوبات ژوراسیک در سیستم چین خوردگی البرز حاوی ته‌نشست‌های زغال‌دار هستند. در بخش‌هایی که گاز تجمع می‌یابد، گاز از لایه‌های رسوبی ژوراسیک زیرین به طرف رسوبات بالای ائوسن حرکت می‌کند. به منظور جلوگیری از هرگونه انفجار در تونل، باید کنترل گاز متان پیش‌بینی شود.

برای مقابله با حضور گاز علاوه بر افزایش تهویه داخل تونل که سبب رقیق شدن گاز می‌شود تجهیزات الکتریکی برای چنین شرایطی پیش‌بینی شده است که به محض برخورد با این پدیده تجهیزات الکتریکی و دستگاه TBM خاموش می‌شوند. سنسورهای حساس به گاز H_2S و CH_4 (تعداد ۸ عدد سنسور برای گاز H_2S) نیز پیش‌بینی شده تا نسبت به حضور گاز هشدار دهند. همچنین اتاقک اکسیژن^۱ به صورت آب‌بند در سیستم پشتیبانی تعبیه شده تا در صورت نشت شدید گاز پرسنل در اتاقک قرار گیرد تا بعد از تصفیه هوا و رقیق شدن گاز در سلامت باشند. تهویه ثانویه نیز برای این منظور پیش‌بینی شده است تا در صورت نشت شدید گاز نسبت به رقیق شدن آن وارد مدار شود.

۵-۶-۱۰- ناپایداری دیواره‌های حفاری و سینه کار

موقعیت تکتونیکی تونل‌های البرز بیانگر آن است که توده‌سنگ‌های مسیر تونل تحت اثر تنش‌های

¹ REFUGE CHAMBER

تکتونیک و قبل از حفاری تونل‌ها قرار دارند. بنابراین به احتمال زیاد یک چنین وضعیتی از تنش اولیه توده‌سنگ‌ها ممکن است موجب بروز مشکلاتی در خلال حفاری تونل‌ها شود. این تنش‌های اولیه غالباً به دو شیوه موجب بروز مشکلاتی در خلال حفر تونل‌ها می‌شوند. یکی اینکه توده‌سنگ‌های جداره تونل به تغییرات تنش حاصل از حفاری بصورت گسیختگی یا خزش پاسخ می‌دهند و یا در تونل‌های عمیق در گسیختگی ناگهانی بصورت انفجار سنگ روی می‌دهند. ناپایداری دیواره تونل عاملی بازدارنده در استفاده از TBM باز است. این مشکل زمانی به وجود می‌آید که ناپایداری بلافاصله در پشت کله حفر دستگاه رخ داده و نصب اجزاء سیستم نگهداری و موقعیت کفشک‌ها را با مشکل مواجه کند. نتایج این گونه مشکلات بر نرخ پیشروی و تمهیدات به کار رفته برای غلبه بر آن به موارد زیر بستگی دارد [۶۷]:

- نوع پدیده ناپایداری و میزان (بزرگی) آن،
 - نوع TBM استفاده شده (سیستم یک کفشک یا دو کفشک)،
 - طراحی و مشخصات TBM
 - قطر تونل
 - سیستم به کار گرفته شده در TBM برای نصب نگهداری تونل و نوع نگهداری استفاده شده.
- ماشین‌های سپری (تک سپری یا دوسپری) در قبال پدیده ناپایداری دیواره، کمتر از ماشین‌های باز حساسیت دارند، زیرا در این ماشین‌ها امکان نصب سیستم نگهداری بتنی یا فولادی تحت پوشش سپر وجود دارد. هم چنین در این دستگاه‌ها با تکیه بر پوشش نصب شده، امکان پیشروی ایمن ماشین (در مقایسه با پیشروی ماشین باز در این نوع زمین) وجود دارد. در شرایط ناپایداری دیواره و در تونل‌های با قطر متوسط تا زیاد (۱ تا ۱۲ متر)، تفاوت در رفتار و نرخ پیشروی بین TBM باز و سپری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و ماشین سپری بر ماشین باز ارجحیت دارد. استفاده از TBM باز در شرایط ناپایداری دیواره با در نظر گرفتن ملاحظات زیر امکان پذیر است [۶۷]:

- پایدارسازی و تحکیم دیواره پشت کله حفر، بلافاصله پس از حفر
- پایدارسازی سنگ جلوی سینه‌کار حفاری از درون گمانه‌های حفاری و تزریق و یا با نصب قوس چتری در بالای سر TBM

در مواردی که وضعیت ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ به گونه‌ای باشد که در حین حفاری ناپایداری عمده در سینه‌کار ایجاد شود و سبب ریزش بلوک‌های سنگی موجود در سینه‌کار تونل شود، امکان تشکیل حفرات بزرگ در بالای تونل وجود دارد و تنها روش عبور از این شرایط به‌کارگیری و استفاده از سپر است. هنگامی که وضعیت توده‌سنگ مورد نظر در سینه‌کار تونل از نظر هوازدگی و درزه‌داری به گونه‌ای است که هر لحظه احتمال سقوط بلوک‌های سنگی و ریزش مواد ریزدانه وجود دارد و این وضعیت زمانی اتمام یابد که یک حفره عظیم در پیشانی تونل به وجود آید، این امکان وجود دارد که دیگرم TBM سپری در چنین موردی قابلیت کاربرد نداشته باشد و گیر کند [۶۷].

۵-۱-۱۱- فاصله‌داری درزه‌ها

یکی از پارامترهایی که باید در زمان حفاری و نگهداری به آن دقت شود، فاصله‌داری درزه‌ها است. درزه‌ها معمولاً مشکلات و محدودیت‌های زیر را در هنگام حفاری و نگهداری به وجود می‌آورند که در هنگام انتخاب روش باید مدنظر قرار گیرند:

- ۱- محدودیت نگهداری مناسب برای سیستم درزه مورد نظر،
 - ۲- اصطکاک بین سپر با محیط خرد شده و شکسته و حتی گیر افتادن دستگاه،
 - ۳- افتادن بلوک‌های با وزن زیاد از سقف یا دیواره به روی ماشین،
 - ۴- محدودیت استفاده از کفشک‌زنی.
- فاصله‌داری ۰/۶ متر و بیشتر برای ماشین باز مناسب است، زیرا اگر در اثر فاصله‌داری بیشتر از ۰/۶ متر بلوکی از سنگ در سقف یا دیواره تونل ایجاد شود، بهترین راه برای مقابله با آن نصب راک‌بولت است. بنابراین در صورت استفاده از ماشین‌های سپری ممکن است در اثر گسیختگی بلوک و سقوط آن بر روی سپر، بار متمرکزی بر ماشین ایجاد شود و باعث گیر افتادن ماشین شود. هم‌چنین اگر بلوک بعد از نصب قطعات پیش ساخته نگهداری آزاد شود، در حالی که این بار در حین طراحی به حساب نیامده باشد، ممکن است موجب شکست پوشش بتنی شود. ۰/۲ تا ۰/۶ متر، امکان بروز ناپایداری در دیواره وجود دارد که کفشک‌زنی را با مشکل مواجه می‌کند. البته می‌توان از عملیات بهسازی استفاده کرد که این کار زمان بر و پرهزینه است. لذا در این شرایط بهتر است از ماشین‌های

سپری استفاده شود. اما از آنجا که در این شرایط، محیط سست و ریزشی است و احتمال سقوط سنگهای خرد شده زیاد است، این ماشین‌ها نیز با مشکلاتی روبرو هستند؛ زیرا سپر با سنگ‌های خرد شده کوچکی که مابین دیواره و سپر وجود دارد، درگیر است که در هنگام پیشروی دستگاه باعث اصطکاک محیط تونل با دستگاه می‌شوند. این مشکل در نوع دوسپری بیشتر است زیرا این مواد در درز سپرها گیر می‌کند و باید زمانی را صرف تمیز کردن درز سپرها نمود.

۵-۶-۱-۱۲- سنگ‌های سخت و ساینده

در تونل البرز در مواردی ممکن است به علت برخورد و مواجه شدن ماشین TBM با دایک‌های آندزیتی، گرانیت‌ها، ماسه‌سنگ‌های کوارتزی و غیره منجر به توقف TBM شود که می‌تواند نرخ نفوذ پایین، قابلیت دسترسی پایین ماشین به خاطر زمان لازم برای تعویض برش‌دهنده‌ها و هزینه بالای برش‌دهنده‌های سنگ باشد. در این حالت وقتی که سنگ از نظر کیفیت در حد عالی و RQD آن در حدود ۱۰۰ است به عنوان شرایط مناسب حفاری قلمداد نشده و فقط سنگ بسیار سخت و ساینده جلوه می‌نماید. سنگ ایده‌آل سنگی است که با توجه به لیتولوژی آن مقاومت و سختی یکنواخت داشته باشد تناوب لایه‌های سنگی سخت و نرم باعث ایجاد لرزش در ماشین به هنگام حفاری و صدمه دیدن برش‌دهنده‌ها و حتی خرد شدن آنها می‌شود. نرخ نفوذ TBM به مقاومت و سختی سنگ حساس است. سایش برش‌دهنده‌ها به سختی و میزان سایندگی سنگ حساس و به نوع کانی‌شناسی سنگ، مخصوصاً به وجود کوارتز و چرت در سنگ بستگی دارد. سنگ ایده‌آل در این مورد سنگی است که مقاومت متوسط داشته و سختی و درجه سایندگی آن پایین باشد، سنگ آهک مارنی بدون کوارتز یا سنگ آهکی گچی و نیز اکثر شیست‌ها، شیل‌ها و توف‌های متراکم این خاصیت را دارند.

بر روی دستگاه سنسورهای تشخیص ساییدگی ابزار دیسک‌های ۱۷ اینچی^۱ در نظر گرفته شده است که با بازبینی‌های دوره‌ای در جبهه کار سخت و یا با کمک سیستم هایپرباریک می‌توان به دلایل کاهش راندمان حفاری و نیاز به تعویض ابزار پی برد. بر اساس مقادیر CAI توده‌سنگ مسیر تونل در

^۱ DISC CUTTER ROTATION MONITORING SYSTEM

رده سنگ با سایش زیاد تا بسیار زیاد $CAI = 3 \sim 4$ (very abrasive) قرار می‌گیرد که لازم است روی کاترهد و صفحات SCREW از صفحات سخت‌کننده استفاده شود [۶۷].

۵-۶-۲- عامل هزینه (هزینه خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته)

هزینه‌های حفر تونل را به دو گروه کلی، هزینه‌های ثابت و متغیر تقسیم می‌کنند. هزینه‌های ثابت مربوط به سرمایه‌گذاری‌ها، خرید ماشین و تجهیزات مربوط به آن و استهلاک است که مجموع آن‌ها را برای هر متر از تونل در نظر می‌گیرند. این هزینه‌ها در طول مدت اجرای یک پروژه معین ثابت است و عملکرد ماشین و نیز پرسنل در آن دخالتی ندارد.

بطور کلی هزینه سرمایه‌گذاری این‌گونه ماشین‌ها بالا است. قیمت یک Double Shield TBM به همراه سیستم پشتیبانی^۱ تقریباً ۱۵٪ بیشتر از قیمت یک Single Shield TBM است. این موضوع به دلیل نداشتن سیستم کفشک^۲ و سپر کوتاه‌تر در ماشین‌های Single Shield است. یک ماشین Open نیز قیمتی پایین‌تر از دو نوع دیگر دارد. هزینه سپر نیز تقریباً ۱۰ درصد قیمت کل ماشین فرض می‌شود. با توجه به اینکه سرعت اتمام تونل با استفاده از یک Double Shield TBM بسیار بیشتر از دو دستگاه دیگر می‌باشد، با این فرض هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر برای یک Double Shield TBM در صورت اتمام به موقع یا زودتر تونل، کاملاً توجیه اقتصادی خواهد داشت. با توجه به موارد مطرح شده و مشکلات ژئوتکنیکی مسیر دستگاه Open TBM برای این تونل مناسب نبوده و احتمال گیرکردن دستگاه زیاد است. از طرفی با توجه زون گسله و تجربه‌ای که از تونل پیلوت البرز بدست آمده است، گزینه Double Shield Machine یا Single Shield Machine اما با تجهیزات EPB پیشنهاد می‌شود که در مرحله نهایی با توجه به نظرات شرکت سازنده، پیشنهاد نهایی برای انتخاب بهترین ماشین ارائه خواهد شد [۶۷].

از طرفی بر اساس امتیازدهی به ماشین‌هایی که برای حفاری تونل البرز محتمل می‌باشند، گزینه

¹ Back-up system

² Gripping system

دستگاه single shield حائز بیشترین امتیاز شد. علاوه بر این به دلایل فنی از جمله عدم امکان گریپ زدن در زون‌های گسله و عدم نیاز به سرعت بالای حفاری این تونل و همچنین نیاز به سرمایه‌گذاری بالاتر، ماشین double shield در درجه بعدی نسبت به ماشین single shield قرار می‌گیرد. با توجه به شرایط هیدروژئولوژی مسیر تونل و هجوم آب به داخل آن نیاز به حفاری در حالت جبهه‌کار بسته در مقطعی از تونل می‌باشد که در این خصوص دستگاه single shield از نوع dual mode می‌تواند مجهز به سیستم حفاری با اعمال فشار جبهه‌کار شود. لذا در طراحی این دستگاه می‌بایست مورد توجه قرار گیرد تا دستگاه بتواند در مواقع لزوم در حالت بسته حفاری نماید تا علاوه بر خصوصیات یک دستگاه Hard Rock Single بتوان از حفاری بسته در زون‌های آبدار و ضعیف که با ناپایداری جبهه کار همراه است با استفاده از مد EPB استفاده نمود [۶۷].

۵-۶-۳- عوامل فنی و محیطی

۵-۶-۳-۱- تجربه تونل‌سازی مکانیزه در پیمانکاران داخلی

در زمان تهیه گزارش فنی، عملاً پیمانکاران داخلی تجربه اجرا با ماشین‌های سپر تعادلی فشار زمین، سپر دوبل، سینگل شیلد و گریپر را داشته‌اند ولی تا کنون تجربه سپر هوای فشارده و سپردوغابی (تجربه محدود تنها در پروژه‌های لوله‌رانی) در نزد پیمانکاران ایرانی موجود نمی‌باشد. در جدول ۵-۵ فهرستی از تمامی پروژه‌های تونل‌سازی ایران به همراه مشخصات کلی پروژه و نوع ماشین ارائه شده است [۶۷].

با توجه به اینکه از یک طرف تجربه ماشین‌های سپر هوای فشرده و سپردوغابی در ایران وجود ندارد، بکارگیری پرسنل متخصص خارجی برای استفاده از این ماشین حداقل در کیلومترهای اولیه الزامی می‌باشد؛ ولی مسأله اصلی این است که با وضعیت نرخ ارز، استخدام پرسنل خارجی در ایران مشکل و بسیار پرهزینه خواهد بود.

جدول (۵-۵): فهرستی از پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در ایران (تمام واحدها به متر) [۶۷]

R	نام پروژه	طول تونل	قطر حفاری	قطر نهایی	کاربری	نوع ماشین	نام سازنده
۱	Alborz	6300	5.2	4.9	Service	1 Grippe	WIRTH
۲	Koohrang III (Lot 1)	7000	4.9	4.1	Water	1 Grippe	Komugai
۳	Koohrang III (Lot 2)	6500	4.9	4.1	Water	1 Grippe	Herrenknecht
۴	Cheshmeh Langan (Lot 1)	7000	3.9	3.2	Water	1 Grippe	Komugai
۵	Cheshmeh Langan (Lot 2)	5000	3.9	3.2	Water	1 Grippe	Komugai
۶	Gavoshan	4200+3555	5.5	4.3;4.8	Water	1 Grippe	Herrenknecht
۷	Karaj (lot 1)	15980	4.6	3.9	Water	1 D.S.	Herrenknecht
۸	Nosoud (Lot 2)	26000	6.7	6	Water	1 D.S.	Herrenknecht+SELI
۹	Ghomrud 3&4	24500	4.5	3.8	Water	1 D.S.	WIRTH+SELI
۱۰	Ghomrud 5	9175	4.5	3.8	Water	1 D.S.	WIRTH+SELI
۱۱	Ghomrud 1&2	11311	4.5	3.8	Water	1 Hard rock EPB	Herrenknecht
۱۲	Aleppo (Iranian contr. in Syria)	5389	5.2	4.6	Water	1 S.S.	Herrenknecht
۱۳	Tabriz Metro (L 1)	2×8000	6.78	6	Subway	2 EPB	NFM
۱۴	Shiraz Metro	2×15000	6.88	6	Subway	2 EPB	NFM
۱۵	Khayyam	5625	4.3	3.7	water collection	1 EPB	LOVAT
۱۶	Bahmanyar	6150	4.3	3.7	water collection	1 EPB	LOVAT
۱۷	Esfahan Metro (Lane 1)	2×5250	6.78	6	Subway	2 EPB	Herrenknecht
۱۸	Tabriz Metro (L 2)	10000	9.4	8.15	Subway	EPB	Herrenknecht+SELI
۱۹	Tabriz Metro (L 3)	7000	9.2	8.15	Subway	EPB	Herrenknecht
۲۰	Tabriz Metro (L 6)	12000	9.2	8.15	Subway	EPB	Herrenknecht
۲۱	Tehran Metro (L 7) Lot N-S	15000	9.16	8.15	Subway	EPB	LOVAT-SELI
۲۲	Tehran Metro (L 7) Lot E-W	12000	9.16	8.15	Subway	EPB	LOVAT-SELI
۲۳	Mashhad Metro (L2)	14000	9.2	8.15	Subway	EPB	NFM-NHI
۲۴	Ahwaz Metro (L 1)	2×24000	6.7	5.9	Subway	2 EPB	NFM-NHI

۵-۶-۳-۲- نحوه تأمین مصارف برق

جهت تأمین توان مورد نیاز کارگاه با توجه به زمان‌بندی سه ساله پیشنهادی، راهکار ممکن عبارت

است از: ۱- استفاده از توان شبکه (تا سقف ۹ مگاوات) ۲- استفاده از دیزل ژنراتور گازوئیلی (۹)

مگاوات)

در گزینه دیزل ژنراتور معادل یک مگاوات جهت مصارف اضطراری و استفاده در زمان‌های تعمیرات و نگهداری اساسی در نظر گرفته شده است. در ادامه هر یک از گزینه‌های ممکن از نقطه نظر امکان‌سنجی و هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و مزایا و معایب هر گزینه بیان گردیده است. با توجه به مقایسه مالی جدول ۵-۶ طبق گزارش‌های فنی سال ۱۳۹۵، نحوه تأمین مصارف برق تونل البرز از نظر هزینه و دیگر گزینه‌ها استفاده از توان شبکه (۹ مگاواتی) به صرفه خواهد بود.

جدول (۵-۶): مقایسه مالی گزینه‌های مختلف تأمین برق مصرفی [۶۷]

عنوان گزینه	استفاده از توان شبکه (۹ مگاوات)	استفاده از دیزل ژنراتور گازویلی (۹ مگاوات)
سرمایه‌گذاری اولیه تجهیزات	۱۵۰ میلیارد ریال	۹۰ میلیارد ریال
هزینه پرداخت شده برای گازوئیل یا برق	۱۴۰ میلیارد ریال	۱۸۱ میلیارد ریال
هزینه‌های کلی تعمیرات و نگهداری	۶ میلیارد ریال	۴۷ میلیارد ریال
قیمت هر کیلووات ساعت تمام شده	۲۵۴۰ ریال	۲۹۹۰ ریال
مزایا	کمترین هزینه تعمیرات و نگهداری / قیمت مناسب برای هر کیلووات ساعت توان / بالا رفتن قابلیت اطمینان	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پایین / راه اندازی سریع
مشکلات و معایب	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا / مشکلات احداث خط و تملک زمین و راه‌اندازی زمان بر	هزینه‌های سوخت و تعمیرات نگهداری بالا، آلودگی بسیار بدلیل سوختن حجم بالای گازوئیل، مشکلات تأمین و حمل و نقل حجم بالای گازوئیل

۵-۶-۳- حمل قطعات بزرگ ماشین

با توجه به وجود قطعات بزرگ در ساختار TBM، حمل آنها از محل بارگیری (مثل بندر) به محل مونتاژ قطعات (محل پروژه) یک ریسک به شمار می‌آید که با مشکلاتی از قبیل عبور وسیله نقلیه از جاده‌ها و تونل‌های موجود در کشور همراه است و این فرایند قطعاً زمان‌بر و هزینه‌بر خواهد بود.

۵-۶-۴- عامل سیاسی (تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات)

با وجود تحریم‌های اعمال شده از طرف کشورهای خارجی به دلایل سیاسی امکان خرید ماشین و

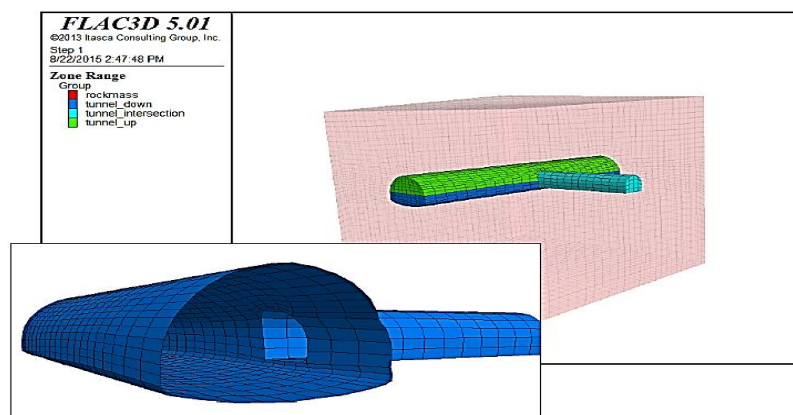
قطعات مورد نیاز از بعضی کشورها مقدور نمی‌باشد که همین باعث به تأخیر افتادن شروع حفاری تونل غربی البرز شده است. لغو قراردادهای خرید دستگاه و پشتیبانی و تأمین قطعات از سوی برخی کشورهای خارجی به دلیل تحریم کشورمان باعث شده تا با این مخاطره مواجه شده و برای جبران آن به فکر بستن قرارداد برای خرید دستگاه با کشورهایی که دچار مشکلات سیاسی کمتری هستند، افتاده شود.

۵-۶-۵- عوامل هندسی

در این بخش به عوامل هندسی که می‌تواند در روند حفاری مکانیزه یک ریسک باشد پرداخته شده است.

۵-۶-۵-۱- حفاری محل دستک‌ها، پارکینگ، ایستگاه‌های جان‌پناه و راهروهای نفرو

از آنجا که شرکت Geodata طراحی سنتی محل دستک‌ها، پارکینگ و ایستگاه‌های SOS را انجام داده است و با توجه به اینکه در این محدوده‌ها، روش اجرا به صورت سنتی می‌باشد؛ در این مرحله از اسناد، نحوه اجرا بر اساس طرح‌های شرکت Geodata شرح داده می‌شود. در این گروه مشارکت، طرح‌های مختلفی از حفاری ایستگاه‌های SOS، پارکینگ و محل دستک‌ها انجام شده است که به عنوان نمونه تحلیل و طراحی در مورد تقاطع‌ها و جان‌پناه تونل‌های آزادراه منجیل- رودبار در شکل ۹-۵ نشان داده شده است [۶۷].

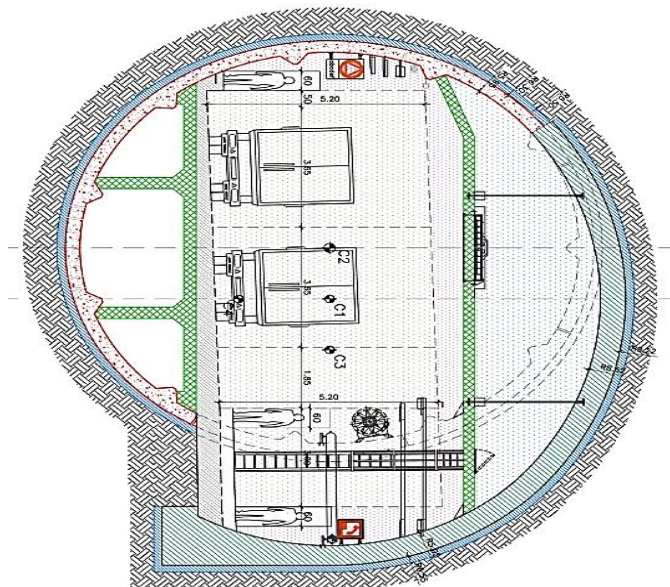


شکل ۹-۵: محل تقاطع تونل‌های اصلی و ارتباطی [۶۷]

با توجه به برنامه زمان‌بندی اجرای ایستگاه‌ها و تونل، عبور TBM از محدوده‌های فوق‌الذکر مسیر

در دو حالت کلی امکان پذیر است. در حالت اول، حفاری و سگمنت گذاری تونل انجام شده و سپس در فواصلی حدود ۲۰۰ الی ۳۰۰ متر، محدوده های مورد نظر تعریض می شوند. در این حالت سگمنت های نصب شده در طول ایستگاه جمع آوری یا تخریب خواهد شد و سپس تعریض و تکمیل عملیات انجام می شود. در حالت دیگر، ابتدا حفاری پارکینگ ها و دستک ها انجام شده و TBM از فضای خالی پارکینگ عبور خواهد کرد.

تونل غربی شامل ۱۲ پارکینگ، ۳۲ پستوی اضطراری یا به اصطلاح SOS و ۹ محل دستک سواره رو می باشد. در شکل ۵-۱۰ مشخصات پارکینگ نسبت به تونل مکانیزه، نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰: مشخصات پارکینگ نسبت به تونل اصلی [۶۷]

با توجه به عدم دسترسی از تونل های شرقی و سرویس به محل پارکینگ ها، ایستگاه ها و دستک ها امکان حفاری آن قبل از رسیدن TBM وجود ندارد. لذا روش اول، در این اسناد مورد نظر خواهد بود.

روش اجرای پارکینگ ها و ایستگاه های SOS

- حفاری مکانیزه تونل اصلی
- نصب سگمنت و تحکیمات آن
- تثبیت سگمنت های مجاور فضای مورد نظر
- برش و تخریب سگمنت های جانمایی شده
- حفاری و تحکیم فضای لازم
- اجرای لاینینگ

روش اجرای دستک‌های ماشین‌رو و پیاده‌رو

روش اجرای دستک‌ها به دو صورت می‌تواند باشد:

- الف) اجرا از طریق حفاری گالری‌های ارتباطی تونل اصلی شرقی به تونل اصلی غربی.
- ب) پیشروی TBM و عبور از محدوده دستک‌ها و نصب سگمنت. در ادامه عبور TBM از محل دستک و حفاری و سگمنت‌برداری محل دستک و تعریض آن.



شکل ۵-۱۱: نمونه‌ای از سگمنت فلزی [۶۷]

حفاری کلاسیک در محل گالری‌های ارتباطی

حفاری تونل‌ها با روش چالزنی و انفجار، مؤثرترین نوع حفاری غیر دستی است که در حال حاضر نیز متداول‌ترین روش حفاری می‌باشد. به علت سرمایه‌گذاری کم خرید ماشین‌آلات، انعطاف‌پذیری و قدرت مانور ماشین در حفاری ابعاد مختلف، انعطاف‌پذیری استفاده از ماشین در سنگ‌های مختلف، وزن کم و سرعت زیاد حرکت و جابجایی، استفاده از آب در مراحل چالزنی و در نتیجه سهولت تهیه چالزنی، سهولت راه‌اندازی و استفاده از ماشین، سهولت کنترل محور و شیب مقطع حفاری، وجود فضا جهت اپراتورهای ماشین چالزنی و حداقل افراد موردنیاز در زمان چالزنی باعث گردیده است که این روش عملی‌ترین روش حفاری در تونل‌های با طول کوتاه تا متوسط باشد.

با توجه به توضیحات فوق و همچنین جنس سنگ منطقه مورد نظر عملی‌ترین روش حفاری این تونل روش حفاری چالزنی و انفجار می‌باشد که ماشین‌آلات و نیروی تخصصی آن کاملاً آماده و در

دسترس می‌باشد. می‌توان برای چالزنی در اجرای تونل دسترسی از دستگاه جامبو دریل هیدرولیک اطلس L2D استفاده نمود.

۵-۶-۲- پارامترهای طول و قطر تونل

با توجه به این که قطر تونل و طول حفاری زیاد می‌باشد، این دو پارامتر تأثیر زیادی بر تمامی مخاطرات ذکر شده می‌گذارد که از این نظر بسیار حائز اهمیت است و باید در رتبه‌بندی مخاطرات مورد توجه قرار گیرد.

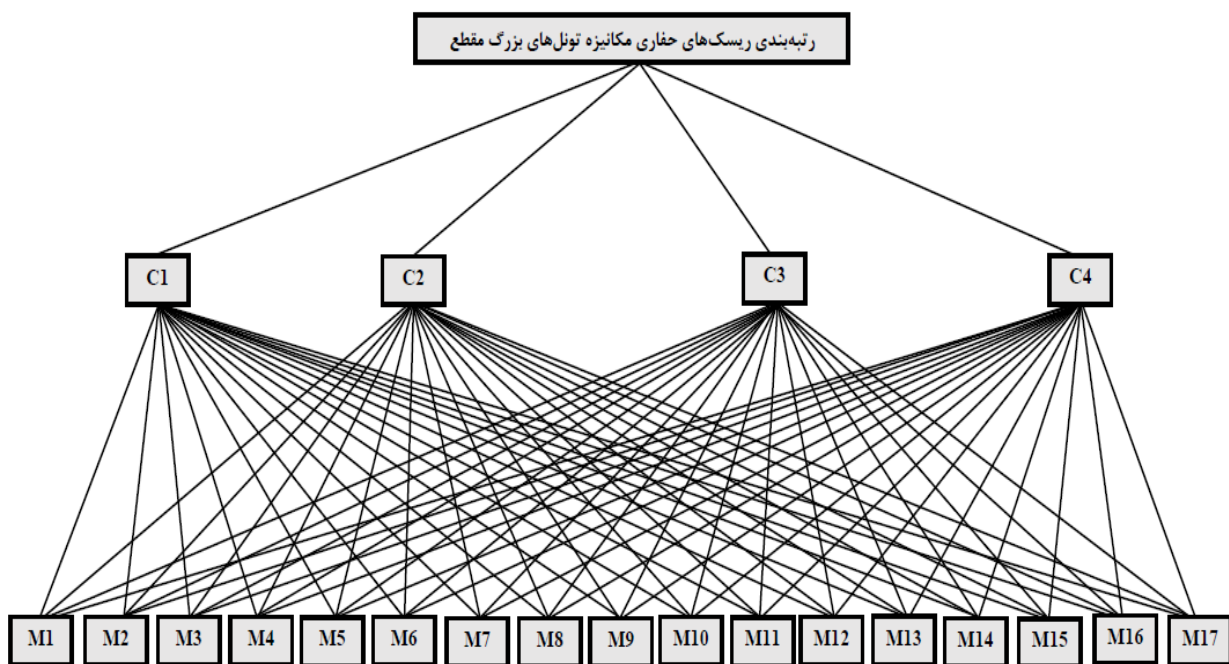
۵-۷- رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز (آزادراه تهران - شمال)

به منظور رتبه‌بندی ریسک‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع TBM در تونل آزادراه تهران - شمال (تونل غربی البرز) پس از بررسی مطالعات زمین‌شناسی و مسیر تونل مطابق مطالب ارائه شده و پس از برگزاری جلسات مختلف مشورتی با صاحب نظران تعداد ۱۷ ریسک در حوزه‌های مختلف از جمله ریسک‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی، ریسک‌های سرمایه‌گذاری و هزینه، ریسک‌های فنی - محیطی، ریسک‌های سیاسی و ریسک‌های هندسی برای رتبه‌بندی ریسک‌های حفاری مکانیزه این تونل انتخاب شدند. این ریسک‌ها شامل: پدیده‌ی آماس یا متورم شونده‌ی (M1)، جریان آب زیرزمینی (M2)، حفرات کارستی یا انحلالی (M3)، تصاعد گازهای سمی و قابل انفجار (M4)، زون‌های گسلی (M5)، ناپایداری دیواره‌های حفاری و سینه‌کار (M6)، فاصله‌داری درزه‌ها (M7)، سنگ‌های سخت و ساینده (M8)، پدیده‌ی مچاله شونده‌ی (M9)، خطر ریزش‌های سنگی (M10)، هزینه خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته (M11)، تجربه تونل‌سازی پیمانکاران برای قطرهای بزرگ (M12)، حمل قطعات بزرگ ماشین (M13)، تأمین مصارف برق (M14)، تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات (M15)، حفاری پارکینگ، دستک‌ها و راهروهای نفرو و سواره‌رو (M16) و پارامترهای طول و قطر تونل (M17) می‌باشد.

در این فصل به منظور استفاده از تجارب و نظرات کارشناسان و خبرگان در زمینه‌ی حفاری مکانیزه تونل، اقدام به طراحی پرسشنامه شد. در این پرسشنامه با توجه به نظر کارشناسان و اساتید

محترم شاخص‌های تصمیم‌گیری این مسأله چهار معیار احتمال وقوع ریسک (C1)، میزان تأثیر ریسک بر هزینه، زمان و کیفیت پروژه (C2)، میزان عدم اطمینان از تخمین (C3) و توانایی سازمان در واکنش به ریسک (C4) می‌باشد. در ادامه این فصل رتبه‌بندی ریسک‌ها با استفاده از نتایج پرسشنامه‌ها ارائه شده است.

برای تفهیم ارتباط شاخص‌ها با ریسک‌های معرفی شده در این تحقیق، ساختار سلسله‌مراتبی این مسأله در شکل (۵-۱۲) به نمایش آمده است.



شکل ۵-۱۲: ساختار سلسله‌مراتبی برای رتبه‌بندی ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل‌های بزرگ مقطع

برای کمی‌سازی داده‌های کیفی در پرسش‌نامه، اعداد معادل گزینه‌های کیفی و بازه‌ای در جدول (۵-۷) و کمی‌سازی اهمیت معیارها نسبت به هدف در جدول (۵-۸) آورده شده است.

جدول (۵-۷): پارامترهای کمی معادل پارامترهای کیفی و پارامتر بازه‌ای [۲۴]

پارامتر کیفی	پارامتر معادل کمی	پارامتر بازه‌ای	پارامتر کمی معادل
خیلی کم	۱	کمتر از ۲۰٪	۱۰
کم	۳	۲۰٪-۴۰٪	۳۰
متوسط	۵	۴۰٪-۶۰٪	۵۰
زیاد	۷	۶۰٪-۸۰٪	۷۰
خیلی زیاد	۹	بیشتر از ۸۰٪	۹۰

جدول (۵-۸): اهمیت معیارها نسبت به هدف [۲۴]

مقدار کمی	اهمیت	
۰/۱	بسیار کم اهمیت	Very low Importance
۰/۳	کم اهمیت	Low Importance
۰/۵	با اهمیت برابر (متوسط)	Equal
۰/۷	با اهمیت	Important
۰/۹	بسیار با اهمیت	Very Important

و همچنین برای کمی‌سازی داده‌ها در قالب اعداد فازی در پرسش‌نامه‌ها، اعداد معادل گزینه‌های

کیفی و بازه‌ای در جدول (۵-۹) و کمی‌سازی اهمیت معیارها نسبت به هدف در جدول (۵-۱۰) آورده شده است.

جدول (۵-۹): اهمیت گزینه نسبت به معیارها در قالب اعداد فازی [۲۵]

اهمیت		عدد فازی
VL	خیلی کم (کمتر از ۲۰٪)	(۱ , ۱ , ۳)
L	کم (۲۰٪-۴۰٪)	(۱ , ۳ , ۵)
M	متوسط (۴۰٪ تا ۶۰٪)	(۳ , ۵ , ۷)
H	زیاد (۶۰٪-۸۰٪)	(۵ , ۷ , ۹)
VH	خیلی زیاد (بیشتر از ۸۰٪)	(۷ , ۹ , ۹)

جدول (۵-۱۰): اهمیت معیارها نسبت به هدف در قالب اعداد فازی [۲۵]

اهمیت		عدد فازی
VLI	بسیار کم اهمیت	(۰ , ۰/۱ , ۰/۳)
LI	کم اهمیت	(۰/۱ , ۰/۳ , ۰/۵)
E	با اهمیت برابر	(۰/۳ , ۰/۵ , ۰/۷)
I	با اهمیت	(۰/۵ , ۰/۷ , ۰/۹)
VI	بسیار با اهمیت	(۰/۷ , ۰/۹ , ۱)

نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان در مورد اهمیت معیارها نسبت به هدف در جدول (۵-۱۱)

آورده شده است و همچنین می‌توان نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان برای تشکیل ماتریس

تصمیم مخاطرات شناسایی شده با در نظر گرفتن شاخص‌های تأثیرگذار روی آنها را در پیوست

مشاهده نمود. میانگین نتایج پرسش‌نامه‌های پر شده توسط هفت کارشناس متخصص تونل‌سازی

مکانیزه مرتبط با پروژه تونل البرز غربی در جدول (۵-۱۲) نشان داده شده است. میانگین این نتایج با

استفاده از روش میانگین ساده به دست آمده است. در ادامه این بخش رتبه‌بندی ریسک‌ها با استفاده

از چهار روش رتبه‌بندی ریسک تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل روش‌های TOPSIS، TOPSIS فازی، ELECTRE و ELECTRE فازی انجام شده است.

جدول (۵-۱۱): نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان برای وزن معیارها

C4	C3	C2	C1	
VI	I	I	E	کارشناس اول (E1)
VI	I	I	I	کارشناس دوم (E2)
I	I	I	I	کارشناس سوم (E3)
VI	I	VI	E	کارشناس چهارم (E4)
VI	I	VI	I	کارشناس پنجم (E5)
I	E	VI	VI	کارشناس ششم (E6)
I	I	VI	E	کارشناس هفتم (E7)

جدول (۵-۱۲): میانگین مقادیر کمی نتایج پرسشنامه‌ها جهت رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز

C4	C3	C2	C1	رویداد ریسک	ردیف
5.57	32.85	55.71	5	پدیده‌ی آماس (متورم شوندگی)	M1 1
6.71	27.14	67.14	7.57	جریان آب زیرزمینی	M2 2
5.3	50	47.14	4.43	حفرات کارستی (انحلالی)	M3 3
5.85	41.43	81.43	7.3	تصادف گازهای سمی و قابل انفجار	M4 4
6.43	30	67.14	8.43	زون های گسلی	M5 5
6.14	41.43	35.71	6.14	ناپایداری دیوارهای حفاری و سینه کار	M6 6
6.71	41.43	30	5.3	فاصله‌داری درزه‌ها	M7 7
7	47.14	35.71	5.85	سنگ‌های سخت و ساینده	M8 8
5.85	47.14	61.43	6.71	پدیده‌ی مجاله شوندگی	M9 9
7	38.57	52.85	7	خطر ریزش‌های سنگی	M10 10
4.43	38.57	64.3	7	خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته	M11 11
3.57	52.85	75.71	6.43	تجربه تونل‌سازی پیمانکار برای قطرهای بزرگ	M12 12
5	41.43	47.14	6.43	حمل قطعات بزرگ ماشین	M13 13
5.3	24.3	41.43	4.14	تأمین مصارف برق	M14 14
5	41.43	52.85	5.57	تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات	M15 15
5.3	27.14	47.14	5	حفاری پارکینگ، دستک‌ها و راهروهای نفرو	M16 16
3.85	35.71	47.14	5	پارامترهای طول و قطر تونل	M17 17

۵-۷-۱- رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل

به منظور رتبه‌بندی ریسک با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل، به جای گزینه‌ها از ریسک‌های مختلف و به جای شاخص‌های تصمیم‌گیری از شاخص‌های ارزیابی ریسک (احتمال وقوع، میزان تأثیر ریسک، عدم اطمینان تخمین و توانایی سازمان در واکنش به ریسک) استفاده شده است. در ادامه ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل غربی البرز با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل

رتبه‌بندی شده‌اند. به منظور رتبه‌بندی ریسک‌ها و تشکیل ماتریس بدون مقیاس برای این تونل، جدول (۱۲-۵) با استفاده از رابطه‌ی (۲-۵) بی‌مقیاس شده و در جدول (۵-۱۳) آورده شده است.

جدول (۵-۱۳): ماتریس بدون مقیاس ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل غربی البرز برای حل با روش TOPSIS

ریسک	C1	C2	C3	C4
M1	0.196	0.244	0.201	0.237
M2	0.296	0.294	0.166	0.286
M3	0.173	0.206	0.306	0.226
M4	0.286	0.356	0.253	0.249
M5	0.330	0.294	0.183	0.274
M6	0.240	0.156	0.253	0.262
M7	0.207	0.131	0.253	0.286
M8	0.229	0.156	0.288	0.298
M9	0.263	0.269	0.288	0.249
M10	0.274	0.231	0.236	0.298
M11	0.274	0.281	0.236	0.189
M12	0.252	0.331	0.323	0.152
M13	0.252	0.206	0.253	0.213
M14	0.162	0.181	0.148	0.226
M15	0.218	0.231	0.253	0.213
M16	0.196	0.206	0.166	0.226
M17	0.196	0.206	0.218	0.164

پس از تعریف ریسک‌های اولیه، نیاز به تعیین اهمیت نسبی ریسک‌ها بر اساس یک روش علمی مشخص است این اوزان با میانگین‌گیری از نظرات خبرگان نسبت به اهمیت معیار نسبت به هدف محاسبه شده و در جدول (۵-۱۴) نشان داده شده است.

جدول (۵-۱۴): اهمیت نسبی معیارها

W	احتمال وقوع ریسک	میزان تأثیر ریسک	میزان عدم اطمینان از تخمین	توانایی سازمان در واکنش به ریسک
0.814	0.643	0.814	0.671	0.82

در مرحله بعد به منظور تعیین ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار، ماتریس جدول (۵-۱۳) در وزن معیارهای موجود در جدول (۵-۱۴) ضرب شده است. ماتریس بدون مقیاس وزن‌دار مخاطرات در جدول (۵-۱۵) آورده شده است.

جدول (۵-۱۵): ماتریس بدون مقیاس وزن‌دار مسأله رتبه‌بندی برای حل با روش TOPSIS

ریسک	C1	C2	C3	C4
M1	0.126	0.198	0.135	0.195
M2	0.190	0.239	0.111	0.235
M3	0.111	0.168	0.205	0.18

ادامه جدول (۵-۱۵): ماتریس بدون مقیاس وزن دار مسأله رتبه بندی برای حل با روش TOPSIS

ریسک	C1	C2	C3	C4
M4	0.184	0.290	0.170	0.204
M5	0.212	0.239	0.123	0.225
M6	0.154	0.127	0.170	0.215
M7	0.133	0.107	0.170	0.235
M8	0.147	0.127	0.193	0.245
M9	0.169	0.219	0.193	0.204
M10	0.176	0.188	0.158	0.245
M11	0.176	0.229	0.158	0.155
M12	0.162	0.270	0.217	0.125
M13	0.162	0.168	0.170	0.175
M14	0.104	0.147	0.099	0.185
M15	0.140	0.188	0.170	0.175
M16	0.126	0.168	0.111	0.185
M17	0.126	0.168	0.146	0.134

در این رتبه بندی، زیاد بودن مقدار شاخص های احتمال، تأثیر و عدم اطمینان تخمین موجب افزایش ریسک و زیاد شدن مقدار شاخص توانایی سازمان در واکنش به ریسک موجب کاهش رتبه ریسک می شود. بدین معنی که در مورد هر ریسک شاخص احتمال و تأثیر ریسک و عدم اطمینان از تخمین بالاتر باشد، آن ریسک دارای اهمیت بیشتری بوده و رتبه آن بالاتر خواهد بود. عکس این موضوع نیز در مورد شاخص توانایی سازمان در واکنش به ریسک صادق است.

فاصله از حل ایده آل و ضد ایده آل و شاخص شباهت برای هر یک از گزینه ها به صورت جدول (۵-۱۶) آمده است. در محاسبه حل ایده آل و حل ضد ایده آل معیارهای C1، C2 و C3 مثبت و C4 منفی در نظر گرفته شده اند.

$$A^* = \begin{matrix} 0/125 & 0/217 & 0/290 & 0/212 \end{matrix} \text{ (حل ایده آل)}$$

$$A^- = \begin{matrix} 0/245 & 0/099 & 0/107 & 0/104 \end{matrix} \text{ (حل ضد ایده آل)}$$

جدول (۵-۱۶): فاصله از حد ایده آل، ضد ایده آل و شاخص شباهت

ریسک	فاصله از حل ایده آل (Si+)	فاصله از حل ضد ایده آل (Si-)	شاخص شباهت (Cj*)	رتبه
M1	0.166	0.112	0.403	12
M2	0.162	0.158	0.494	6
M3	0.170	0.136	0.444	10
M4	0.096	0.215	0.690	2
M5	0.146	0.173	0.542	5
M6	0.200	0.093	0.318	14
M7	0.232	0.076	0.248	16
M8	0.214	0.105	0.329	13

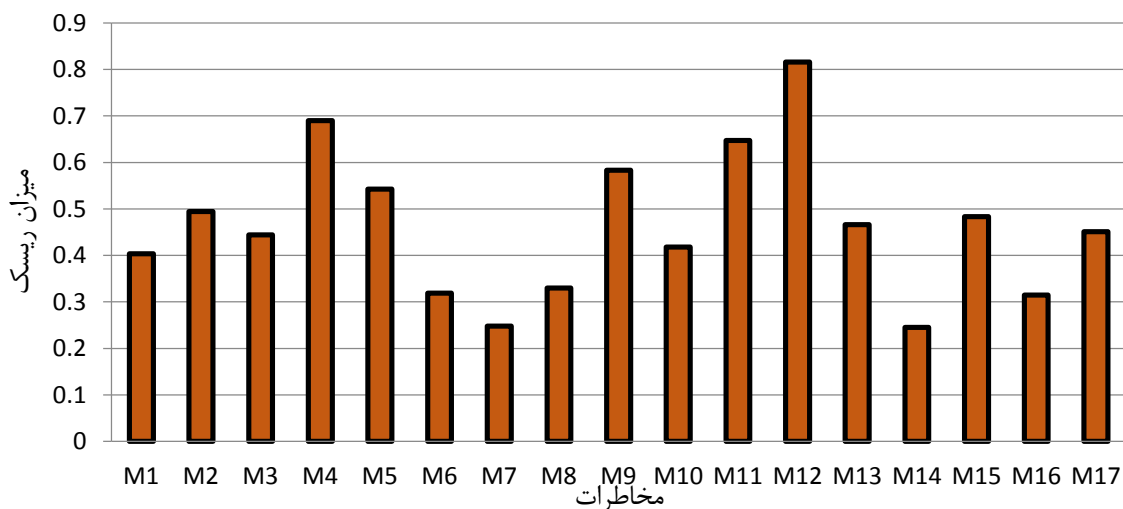
ادامه‌ی جدول (۵-۱۶): فاصله از حد ایده‌آل، ضد ایده‌آل و شاخص شباهت

رتبه	شاخص شباهت (Cj*)	فاصله از حل ضد ایده‌آل (Si-)	فاصله از حل ایده‌آل (Si+)	ریسک
4	0.583	0.165	0.117	M9
11	0.418	0.123	0.171	M10
3	0.647	0.178	0.096	M11
1	0.815	0.241	0.054	M12
8	0.466	0.130	0.149	M13
17	0.244	0.072	0.222	M14
7	0.483	0.133	0.142	M15
15	0.315	0.088	0.193	M16
9	0.451	0.136	0.165	M17

با توجه به مقادیر شاخص شباهت برای گزینه‌های مختلف، نتایج رتبه‌بندی ریسک‌ها با تکنیک

شباهت به گزینه ایده‌آل به صورت نمودار شکل ۵-۱۳ زیر است. همان‌طور که در جدول ۵-۱۷ آمده

سه مخاطره M12، M4 و M11 به ترتیب دارای بیشترین میزان ریسک هستند.



شکل ۵-۱۳: نمودار ستونی میزان ریسک‌های تونل غربی البرز طبق روش TOPSIS

جدول (۵-۱۷): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش TOPSIS

17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	RANK
M14	M7	M16	M6	M8	M1	M10	M3	M17	M13	M15	M2	M5	M9	M11	M4	M12	TOPSIS

۵-۷-۲- رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی

با توجه به نتایج به دست آمده از نظرسنجی از کارشناسان ماتریس تصمیم فازی به صورت جدول

(۵-۱۸) خواهد بود.

جدول (۵-۱۸): ماتریس تصمیم فازی

C4			C3			C2			C1			
1	5.57	9	1	3.28	9	1	5.57	9	1	5	9	M1
1	6.71	9	1	2.71	9	1	6.71	9	1	7.57	9	M2
1	5.28	9	1	5.28	9	1	4.71	9	1	4.42	9	M3
1	5.58	9	1	4.14	9	3	8.14	9	3	7.28	9	M4
1	6.42	9	1	3	7	3	6.71	9	3	8.42	9	M5
1	5.58	9	1	4.14	9	1	3.57	9	1	6.14	9	M6
3	6.71	9	1	4.42	9	1	3	7	1	4.71	9	M7
3	7	9	1	4.71	9	1	5.57	9	3	4.14	9	M8
3	5.58	9	1	4.42	9	1	6.14	9	3	6.71	9	M9
3	7	9	1	3.85	7	1	5.28	9	3	7	9	M10
1	4.42	9	1	4.14	9	1	6.14	9	1	7	9	M11
1	3.85	7	1	5.28	9	3	7.57	9	1	6.42	9	M12
1	5	9	1	5.57	9	1	4.71	9	3	6.42	9	M13
1	5.28	9	1	2.42	7	1	4.14	7	1	4.14	7	M14
1	5	9	1	4.14	9	1	5.28	9	1	5.57	9	M15
1	5.28	9	1	2.71	7	1	4.71	9	1	5	9	M16
1	5	9	1	3.57	9	1	4.71	9	1	5	9	M17

با به دست آوردن براینده نظرات خبرگان، بردار وزن فازی معیارها بدست می‌آید که در جدول

(۵-۱۹) نشان داده شده است.

جدول (۵-۱۹): وزن فازی معیارها

C4			C3			C2			C1			
0.5	0.82	1	0.3	0.67	0.9	0.5	0.81	1	0.3	0.64	1	W

با توجه به مثبت بودن معیارهای اول، دوم و سوم و منفی بودن معیار چهارم، ماتریس تصمیم فازی

بی‌مقیاس شده تشکیل و در جدول (۵-۲۰) درج شده است.

جدول (۵-۲۰): ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده

C4			C3			C2			C1			
0.111	0.179	1	0.111	0.364	1	0.111	0.618	1	0.111	0.555	1	M1
0.111	0.149	1	0.111	0.301	1	0.111	0.745	1	0.111	0.841	1	M2
0.111	0.189	1	0.111	0.586	1	0.111	0.523	1	0.333	0.491	1	M3
0.111	0.179	1	0.111	0.460	1	0.333	0.904	1	0.333	0.808	1	M4
0.111	0.155	1	0.111	0.333	0.777	0.333	0.745	1	0.111	0.935	1	M5
0.111	0.179	1	0.111	0.46	1	0.111	0.396	1	0.111	0.682	1	M6
0.111	0.149	0.333	0.111	0.491	1	0.111	0.333	0.777	0.333	0.523	1	M7
0.111	0.142	0.333	0.111	0.523	1	0.111	0.618	1	0.333	0.460	1	M8
0.111	0.179	0.333	0.111	0.491	1	0.111	0.682	1	0.333	0.745	1	M9
0.111	0.142	0.333	0.111	0.427	0.777	0.111	0.586	1	0.111	0.777	1	M10
0.111	0.226	1	0.111	0.460	1	0.111	0.682	1	0.111	0.777	1	M11
0.142	0.259	1	0.111	0.586	1	0.333	0.841	1	0.333	0.713	1	M12
0.111	0.200	1	0.111	0.618	1	0.111	0.523	1	0.111	0.713	1	M13
0.111	0.189	1	0.111	0.268	0.777	0.111	0.460	0.777	0.111	0.460	0.777	M14
0.111	0.200	1	0.111	0.460	1	0.111	0.586	1	0.111	0.618	1	M15
0.111	0.189	1	0.111	0.301	0.777	0.111	0.523	1	0.111	0.555	1	M16
0.111	0.200	1	0.111	0.396	1	0.111	0.523	1	1	0.555	1	M17

در جدول (۵-۲۱)، ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده وزن‌دار تشکیل شده است.

جدول (۵-۲۱): ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده وزن دار

C4			C3			C2			C1			
0.055	0.147	1	0.033	0.244	0.9	0.055	0.501	1	0.033	0.355	1	M1
0.055	0.122	1	0.033	0.201	0.9	0.055	0.603	1	0.033	0.538	1	M2
0.055	0.155	1	0.033	0.393	0.9	0.055	0.423	1	0.1	0.314	1	M3
0.055	0.146	1	0.033	0.308	0.9	0.166	0.732	1	0.1	0.5176	1	M4
0.055	0.127	1	0.033	0.223	0.7	0.166	0.603	1	0.033	0.598	1	M5
0.055	0.146	1	0.033	0.308	0.9	0.055	0.321	1	0.033	0.436	1	M6
0.055	0.122	0.333	0.033	0.329	0.9	0.055	0.270	0.778	0.1	0.334	1	M7
0.055	0.117	0.333	0.033	0.350	0.9	0.055	0.501	1	0.1	0.294	1	M8
0.055	0.1469	0.333	0.033	0.329	0.9	0.055	0.552	1	0.1	0.477	1	M9
0.055	0.117	0.333	0.033	0.286	0.7	0.055	0.475	1	0.033	0.497	1	M10
0.055	0.185	1	0.033	0.308	0.9	0.055	0.552	1	0.033	0.497	1	M11
0.071	0.212	1	0.033	0.393	0.9	0.166	0.681	1	0.1	0.456	1	M12
0.055	0.164	1	0.033	0.414	0.9	0.055	0.423	1	0.033	0.456	1	M13
0.055	0.155	1	0.033	0.180	0.7	0.055	0.372	0.778	0.033	0.294	0.778	M14
0.055	0.164	1	0.033	0.308	0.9	0.055	0.475	1	0.033	0.396	1	M15
0.055	0.155	1	0.033	0.201	0.7	0.055	0.423	1	0.033	0.355	1	M16
0.055	0.164	1	0.033	0.265	0.9	0.055	0.423	1	0.3	0.355	1	M17

در این مرحله حل ایده‌آل فازی و ضد ایده‌آل فازی برای معیارهای مختلف محاسبه شده است:

C4 (-)			C3			C2			C1			
0.071	0.212	1	0.033	0.414	0.9	0.166	0.732	1	0.3	0.598	1	A*
0.055	0.117	0.333	0.033	0.180	0.7	0.055	0.27	0.777	0.033	0.294	0.777	A-

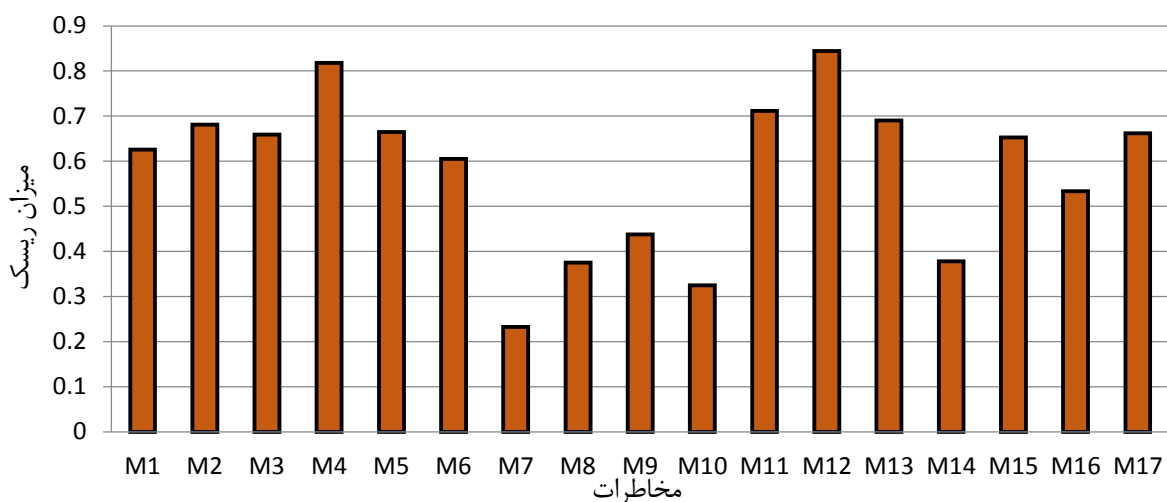
در این مرحله فاصله بین هر گزینه از حل ایده‌آل برای هر معیار، و فاصله بین گزینه و حل ضد

ایده‌آل برای هر معیار و شاخص شباهت برای گزینه‌های مختلف محاسبه شده و رتبه‌بندی بر اساس

شاخص شباهت در جدول (۵-۲۲) و شکل (۵-۱۴) آورده شده است.

جدول (۵-۲۲): رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت

رتبه	Cci	Si ⁻	Si [*]	ریسک
10	0.625	0.824	0.494	M1
5	0.681	0.923	0.432	M2
8	0.658	0.844	0.437	M3
2	0.817	1.011	0.225	M4
6	0.664	0.867	0.438	M5
11	0.604	0.806	0.526	M6
17	0.232	0.282	0.932	M7
15	0.375	0.470	0.784	M8
13	0.437	0.539	0.693	M9
16	0.324	0.410	0.852	M10
3	0.711	0.905	0.366	M11
1	0.844	0.998	0.183	M12
4	0.690	0.878	0.393	M13
14	0.378	0.444	0.731	M14
9	0.652	0.838	0.446	M15
12	0.533	0.687	0.600	M16
7	0.661	0.871	0.445	M17



شکل ۵-۱۴: نمودار ستونی میزان ریسک‌های تونل غربی البرز طبق روش TOPSIS فازی

جدول (۵-۲۳): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش TOPSIS فازی

17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	RANK
M7	M10	M8	M14	M9	M16	M6	M1	M15	M3	M17	M5	M2	M13	M11	M4	M12	F TOPSIS

۵-۷-۳- رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش الکترون

با توجه به تعداد معیارها و تعداد گزینه‌ها، ماتریس تصمیم‌گیری حاصل میانگین‌گیری نظرات

خبرگان در مورد پروژه تونل غربی البرز به صورت جدول (۵-۲۴) آمده است.

جدول (۵-۲۴): ماتریس تصمیم‌گیری حاصل نظرسنجی خبرگان

ریسک	C1	C2	C3	C4
M1	5	55.715	32.858	5.572
M2	7.572	67.143	27.143	6.715
M3	4.43	47.143	50	5.3
M4	7.3	81.43	41.43	5.85
M5	8.43	67.143	30	6.43
M6	6.143	35.715	41.43	6.143
M7	5.3	30	41.43	6.714
M8	5.857	35.71	47.143	7
M9	6.714	61.43	47.143	5.85
M10	7	52.85	38.57	7
M11	7	64.3	38.57	4.43
M12	6.43	75.715	52.85	3.571
M13	6.43	47.143	41.43	5
M14	4.143	41.43	24.3	5.3
M15	5.571	52.85	41.43	5
M16	5	47.143	27.143	5.3
M17	5	47.143	35.714	3.85

در این مرحله با کمک رابطه ۲-۳۴، ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی شده و در جدول (۵-۲۵)

درج شده است.

جدول (۵-۲۵): ماتریس تصمیم نرمال‌سازی شده

C4	C3	C2	C1	ریسک
0.237	0.201	0.244	0.196	M1
0.286	0.166	0.294	0.296	M2
0.226	0.306	0.206	0.173	M3
0.249	0.253	0.356	0.286	M4
0.274	0.183	0.294	0.330	M5
0.262	0.253	0.156	0.240	M6
0.286	0.253	0.131	0.207	M7
0.298	0.288	0.156	0.229	M8
0.249	0.288	0.269	0.263	M9
0.298	0.236	0.231	0.274	M10
0.189	0.236	0.281	0.274	M11
0.152	0.323	0.331	0.252	M12
0.213	0.253	0.206	0.252	M13
0.226	0.148	0.181	0.162	M14
0.213	0.253	0.231	0.218	M15
0.226	0.166	0.206	0.196	M16
0.164	0.218	0.206	0.196	M17

در جدول (۵-۲۶) ماتریس وزن معیارها همانند ماتریس وزن معیارهای محاسبه شده در روش

تاپسیس آورده شده است.

جدول (۵-۲۶): ماتریس وزن معیارها

C4	C3	C2	C1	
0.82	0.671	0.814	0.643	W

حال در این مرحله در جدول (۵-۲۷) ماتریس تصمیم وزن‌دار از ضرب ماتریس نرمال شده در بردار

وزن معیارها بدست آمده است. یادآوری می‌شود که معیار چهارم (توانایی سازمان در واکنش به

ریسک) منفی است و خلاف سایر معیارها عمل می‌کند.

جدول (۵-۲۷): ماتریس تصمیم وزن‌دار نرمال شده V

C4(-)	C3(+)	C2(+)	C1(+)	ریسک
0.195	0.135	0.198	0.126	M1
0.235	0.111	0.239	0.190	M2
0.185	0.205	0.168	0.111	M3
0.204	0.170	0.290	0.184	M4
0.225	0.123	0.239	0.212	M5
0.215	0.170	0.127	0.154	M6
0.235	0.170	0.107	0.133	M7

ادامه‌ی جدول (۵-۲۷): ماتریس تصمیم وزن‌دار نرمال شده V

C4(-)	C3(+)	C2(+)	C1(+)	ریسک
0.245	0.193	0.127	0.147	M8
0.204	0.193	0.219	0.169	M9
0.245	0.158	0.188	0.176	M10
0.155	0.158	0.229	0.176	M11
0.125	0.217	0.270	0.162	M12
0.175	0.170	0.168	0.162	M13
0.185	0.099	0.147	0.104	M14
0.175	0.170	0.188	0.140	M15
0.185	0.111	0.168	0.126	M16
0.134	0.146	0.168	0.126	M17

در ادامه‌ی محاسبات در این مرحله مجموعه‌های موافقت تشکیل می‌شود. این نکته حائز اهمیت است که شاخص توانایی پاسخ سازمان به ریسک منفی است لذا در حالت مقایسه خلاف سایر شاخص‌ها اعمال می‌شود. در جدول (۵-۲۸) نمونه‌ای از مجموعه‌های موافقت تشکیل داده شده درج شده است. همه‌ی مجموعه‌ها در پیوست قابل مشاهده است.

جدول (۵-۲۸): نمونه‌ای از مجموعه موافقت C تشکیل داده شده در روش الکترون

مجموع	C4(-)	C3	C2	C1	
-	-	-	-	-	C1-1
1.49	0.82	0.67			C1-2
1.45			0.81	0.64	C1-3
0.82	0.82				C1-4
1.49	0.82	0.67			C1-5
1.63	0.82		0.81		C1-6
1.63	0.82		0.81		C1-7
0.81			0.81		C1-8
0.82	0.82				C1-9
1.63	0.82		0.81		C1-10
					C1-11
					C1-12
0.81			0.81		C1-13
2.12		0.67	0.81	0.64	C1-14
0.81			0.81		C1-15
2.12		0.67	0.81	0.64	C1-16
1.45			0.81	0.64	C1-17

با جایگزینی مجموع اوزان در ماتریس، ماتریس موافق C به صورت جدول (۵-۲۹) تشکیل شده است.

جدول (۵-۲۹): ماتریس موافقت C روش الکترون

C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
1.45	2.12	0.81	2.12	0.81	0	0	1.63	0.82	0.81	1.63	1.63	1.49	0.82	1.45	1.49		C1
1.45	2.12	1.45	2.12	1.45	0.64	1.45	2.27	1.45	2.27	1.45	1.45	0.81	0.64	1.45		1.45	C2
1.48	1.48	0.67	2.12	1.48	0	0.67	1.49	1.49	2.30	2.30	2.30	1.49	1.49		1.49	1.49	C3
2.12	2.12	2.12	2.12	2.94	1.45	2.12	2.94	1.45	2.27	2.94	2.94	2.30		2.30	2.30	2.12	C4
1.45	2.12	1.45	2.12	1.45	0.64	1.45	2.27	1.45	2.27	2.27	1.45		0.64	1.45	2.94	1.45	C5
1.31	1.31	1.31	1.31	0.67	0	0.67	1.49	0	2.27	2.94		1.49	0.67	0.64	1.49	1.31	C6

ادامه‌ی جدول (۵-۲۹): ماتریس موافقت C روش الکره

C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
1.31	0.67	0.67	1.31	0.67	0	0.67	1.49	0	0.82		0.67	0.67	0.67	0.64	0.67	1.31	C7
1.31	1.31	1.31	1.31	0.67	0	0.67	0.67	0.67		2.12	1.48	0.67	0.67	0.64	0.67	1.31	C8
2.12	2.12	1.48	2.12	2.12	0.64	0.67	2.30		2.94	2.94	2.94	1.49	0.67	1.45	1.49	2.12	C9
2.12	2.12	1.45	2.12	1.45	0.64	1.31		0.64	1.45	1.45	1.45	0.67	0	1.45	0.67	1.31	C10
2.12	2.94	2.27	2.94	2.27	0.64		2.94	2.27	2.27	2.27	2.27	1.49	0.8	2.27	1.49	2.94	C11
2.94	2.94	2.94	2.94	2.94		2.30	2.30	2.30	2.94	2.94	2.94	2.30	1.49	2.94	2.30	2.94	C12
2.12	2.94	1.31	2.94		0.64	0.67	1.49	0.82	2.27	2.94	2.94	1.49	1.49	2.27	1.49	2.13	C13
0	0	0		0	0	0	0.82	0.82	1.63	1.63	1.63	0.82	0.82	0	0.82	0.82	C14
2.12	2.94		2.94	1.48	0	0.67	2.30	0.82	1.63	2.94	2.30	1.49	1.49	2.27	1.49	2.13	C15
1.45		0	2.12	0.81	0	0	0.82	0.82	1.63	1.63	1.63	0.82	0.82	1.45	1.49	1.46	C16
	2.94	0.82	2.94	1.63	0	0.82	0.82	0.82	1.63	1.63	1.63	1.49	0.82	2.27	1.49	2.13	C17

در این مرحله حد آستانه تمامی عناصر ماتریس موافق را محاسبه کرده و با توجه به مقدار آن

ماتریس موافقت مؤثر در جدول (۵-۳۰) تشکیل شده است.

$$\bar{c} = 1.52$$

جدول (۵-۳۰): ماتریس موافقت مؤثر (بولین) F

C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0		C1
0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0		0	C2
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0		0	0	C3
1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1		1	1	1	C4
0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0		0	0	1	0	C5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		0	0	0	0	0	C6
0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	C7
0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	C8
1	1	0	1	1	0	0	1		1	1	1	0	0	0	0	1	C9
1	1	0	1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	C10
1	1	1	1	1	0		1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	C11
1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	C12
1	1	0	1		0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	C13
0	0	0		0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	C14
1	1		1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	C15
0		0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	C16
	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	C17

در این گام مجموعه‌های مخالفت بر اساس روش ذکر شده در بخش تشریح‌های روش الکره

محاسبه شده است. در جدول (۵-۳۱) نمونه‌ی تکمیل شده از مجموعه مخالفت درج شده است.

ادامه‌ی مجموعه‌های تشکیل شده در پیوست به صورت جداول قابل مشاهده است.

جدول (۵-۳۱): نمونه‌ای از مجموعه مخالفت D تشکیل داده شده در روش الکره

	LOSS/ROW	MAX ROW	MAX LOSS	C4	C3	C2	C1
D1-1				-	-	-	-
D1-2	1	0.064	0.064	0.040	0.023	0.040	0.064
D1-3	1	0.070	0.070	0.009	0.070	0.030	0.014
D1-4	1	0.091	0.091	0.009	0.035	0.091	0.057
D1-5	1	0.086	0.086	0.030	0.011	0.040	0.086
D1-6	0.494	0.071	0.035	0.019	0.035	0.071	0.028
D1-7	0.384	0.091	0.035	0.039	0.035	0.091	0.007

ادامه‌ی جدول (۳۱-۵): نمونه‌ای از مجموعه مخالفت D تشکیل داده شده در روش الکره

	LOSS/ROW	MAX ROW	MAX LOSS	C4	C3	C2	C1
D1-8	0.823	0.071	0.058	0.050	0.058	0.071	0.021
D1-9	1	0.058	0.058	0.009	0.058	0.020	0.043
D1-10	1	0.050	0.050	0.050	0.023	0.010	0.050
D1-11	1	0.050	0.050	0.039	0.023	0.030	0.050
D1-12	1	0.082	0.082	0.070	0.082	0.071	0.036
D1-13	1	0.036	0.036	0.020	0.035	0.030	0.036
D1-14	0.186	0.050	0.009	0.009	0.035	0.050	0.021
D1-15	1	0.035	0.035	0.020	0.035	0.010	0.014
D1-16	0.311	0.030	0.009	0.009	0.023	0.030	0
D1-17	1	0.060	0.060	0.060	0.011	0.030	0

با جایگزینی شاخص مخالفت در ماتریس، ماتریس مخالفت به صورت جدول (۳۲-۵) تشکیل شده

است.

جدول (۳۲-۵): ماتریس مخالفت D روش الکره

C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
1	0.31	1	0.18	1	1	1	1	1	0.82	0.38	0.49	1	1	1	1		C1
1	0.69	1	0.65	0.84	1	1	0.92	1	0.73	0.44	0.52	1	1	1		0.61	C2
0.86	0.15	0.81	0	1	1	1	1	1	0.60	0.35	1	1	1		0.84	0.43	C3
0.57	0.15	0.29	0.13	0	1	0.81	0	0.32	0.14	0	0	0.55		0.59	0.11	0.10	C4
1	0.45	0.69	0.36	0.70	1	1	0.69	1	0.62	0.35	0.41		1	0.81	0	0.34	C5
1	0.69	1	0.41	1	1	1	1	1	0.78	0		1	1	0.94	1	1	C6
1	1	1	0.70	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	C7
1	0.72	1	0.63	1	1	1	1	1		0.42	1	1	1	1	1	1	C8
1	0.23	0.97	0.20	0.58	1	1	0.17		0	0	0	0.61	1	0.33	0.26	0.16	C9
1	1	1	0.82	1	1	1		1	0.57	0.14	0.49	1	1	0.91	1	0.99	C10
0.33	0	0.28	0	0.19	1		0	0.70	0.34	0.09	0.11	0.51	1	0.72	0.18	0	C11
0	0	0	0	0		0.24	0.19	0.08	0	0	0	0.50	0.27	0	0.26	0	C12
1	0	0.94	0		1	1	0.29	1	0.33	0	0	1	1	0.69	1	0.84	C13
1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	C14
1	0		0	1	1	1	0.51	1	0.33	0	0.23	1	1	1	0.84	0.28	C15
1		1	0	1	1	1	0.84	1	1	0.96	1	1	1	1	1	1	C16
	0	0.58	0	0.89	1	1	0.45	0.72	0.42	0.23	0.35	0.95	1	1	0.71	0.50	C17

در این گام ابتدا طبق رابطه ۲-۴۲، مقدار آستانه مخالفت از ماتریس مخالفت D محاسبه شده و

بدنبال آن در جدول (۳۳-۵) ماتریس مخالفت مؤثر G تشکیل شده است.

$$\bar{d} = 0.69$$

جدول (۳۳-۵): ماتریس مخالفت مؤثر (بولین) G

C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0		C1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		1	C2
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		0	1	C3
1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1		1	1	1	C4
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1		0	0	1	1	C5
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0	C6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	C7
0	0	0	1	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	C8
0	1	0	1	1	0	0	1		1	1	1	1	0	1	1	1	C9

ادامه‌ی جدول (۵-۳۳): ماتریس مخالفت مؤثر(بولین) G

C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	C10
1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	C11
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	C12
0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	C13
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C14
0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	C15
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C16
0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	C17

در این مرحله برای تعیین برتری‌ها دو ماتریس F و G در هم ضرب برداری شده و نتایج به صورت

جدول (۵-۳۴) بیان شده است.

جدول (۵-۳۴): ضرب F*G

C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	C1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C2
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	C3
1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	C4
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	C5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	C6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C8
0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	C9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C10
1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	C11
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	C12
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	C13
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C14
0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	C15
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C16
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	C17

در ادامه‌ی محاسبات تعداد صفر و یک‌های هر ردیف شمرده شده و همانند جدول (۵-۳۵) جمع

یک‌ها در ستون غالب و جمع صفرها در ستون مغلوب و اختلاف آنها در ستون اختلاف که بر اساس

این اختلاف ریسک‌های پروژه اولویت‌بندی شده‌اند. با توجه به جدول ۶-۳۶ سه مخاطره M4، M12 و

M11 به ترتیب بیشترین ریسک را دارند.

جدول (۵-۳۵): رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه با روش الکترون

ریسک	رتبه	اختلاف	مغلوب	غالب
M1	8	-8	12	4
M2	10	-14	15	1
M3	9	-10	13	3
M4	2	10	3	13
M5	7	-6	11	5
M6	10	-14	15	1
M7	11	-16	16	0

ادامه‌ی جدول (۵-۳۵): رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه با روش الکتراه

ریسک	رتبه	اختلاف	مغلوب	غالب
M8	10	-14	15	1
M9	4	0	8	8
M10	11	-16	16	0
M11	3	4	6	10
M12	1	14	1	15
M13	7	-6	11	5
M14	11	-16	16	0
M15	5	-2	9	7
M16	10	-14	15	1
M17	6	-4	10	6

جدول (۵-۳۶): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش الکتراه

RANK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ELECTRE	M12	M4	M11	M9	M15	M17	M5, M13	M1	M3	M2, M8, M6, M16	M7, M10, M14

۵-۷-۴- رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با استفاده از روش الکتراه فازی

ماتریس تصمیم فازی حاصل از نظرسنجی متخصصان به صورت جدول (۵-۳۷) می‌باشد.

جدول (۵-۳۷): ماتریس تصمیم فازی

	C4			C3			C2			C1			
M1	9	5.57	1	9	3.28	1	9	5.57	1	9	5	1	M1
M2	9	6.71	1	9	2.71	1	9	6.71	1	9	7.57	1	M2
M3	9	5.28	1	9	5.28	1	9	4.71	1	9	4.42	1	M3
M4	9	5.58	1	9	4.14	1	9	8.14	3	9	7.28	3	M4
M5	9	6.42	1	7	3	1	9	6.71	3	9	8.42	3	M5
M6	9	5.58	1	9	4.14	1	9	3.57	1	9	6.14	1	M6
M7	9	6.71	3	9	4.42	1	7	3	1	9	4.71	1	M7
M8	9	7	3	9	4.71	1	9	5.57	1	9	4.14	3	M8
M9	9	5.58	3	9	4.42	1	9	6.14	1	9	6.71	3	M9
M10	9	7	3	7	3.85	1	9	5.28	1	9	7	3	M10
M11	9	4.42	1	9	4.14	1	9	6.14	1	9	7	1	M11
M12	7	3.85	1	9	5.28	1	9	7.57	3	9	6.42	1	M12
M13	9	5	1	9	5.57	1	9	4.71	1	9	6.42	3	M13
M14	9	5.28	1	7	2.42	1	7	4.14	1	7	4.14	1	M14
M15	9	5	1	9	4.14	1	9	5.28	1	9	5.57	1	M15
M16	9	5.28	1	7	2.71	1	9	4.71	1	9	5	1	M16
M17	9	5	1	9	3.57	1	9	4.71	1	9	5	1	M17

گام اول: ماتریس تصمیم به صورت جدول (۵-۳۸) نرمالایزه شده است:

جدول (۵-۳۸): ماتریس تصمیم فازی نرمال‌سازی شده

	C4(-)			C3(+)			C2(+)			C1(+)			
M1	1	0.179	0.111	1	0.364	0.111	1	0.618	0.111	1	0.556	0.111	M1
M2	1	0.149	0.111	1	0.301	0.111	1	0.745	0.111	1	0.841	0.111	M2
M3	1	0.189	0.111	1	0.586	0.111	1	0.523	0.111	1	0.491	0.111	M3
M4	1	0.179	0.111	1	0.460	0.111	1	0.904	0.333	1	0.808	0.333	M4
M5	1	0.155	0.111	0.77	0.333	0.111	1	0.745	0.333	1	0.935	0.333	M5

ادامه‌ی جدول (۵-۳۸): ماتریس تصمیم فازی نرمال سازی شده

C4(-)		C3(+)			C2(+)			C1(+)				
1	0.179	0.111	1	0.460	0.111	1	0.396	0.111	1	0.682	0.111	M6
0.33	0.149	0.111	1	0.491	0.111	0.77	0.333	0.111	1	0.523	0.111	M7
0.33	0.142	0.111	1	0.523	0.111	1	0.618	0.111	1	0.460	0.333	M8
0.33	0.179	0.111	1	0.491	0.111	1	0.682	0.111	1	0.745	0.333	M9
0.33	0.142	0.111	0.77	0.427	0.111	1	0.586	0.111	1	0.778	0.333	M10
1	0.226	0.111	1	0.460	0.111	1	0.682	0.111	1	0.778	0.111	M11
1	0.259	0.142	1	0.586	0.111	1	0.841	0.333	1	0.713	0.111	M12
1	0.2	0.111	1	0.618	0.111	1	0.523	0.111	1	0.713	0.333	M13
1	0.189	0.111	0.77	0.268	0.111	0.77	0.460	0.111	0.77	0.46	0.111	M14
1	0.2	0.111	1	0.460	0.111	1	0.586	0.111	1	0.618	0.111	M15
1	0.189	0.111	0.77	0.301	0.111	1	0.523	0.111	1	0.556	0.111	M16
1	0.2	0.111	1	0.396	0.111	1	0.523	0.111	1	0.556	0.111	M17

جدول (۵-۳۹): بردار وزن معیارها

C4			C3			C2			C1			
0.82	0.82	0.82	0.671	0.671	0.671	0.814	0.814	0.814	0.643	0.643	0.643	W

گام دوم: در مرحله بعد بردار وزن جدول (۵-۳۹) در ماتریس نرمالیزه شده ضرب شده و ماتریس

نرمالیزه شده وزن دار طبق جدول (۵-۴۰) بدست آمده است.

جدول (۵-۴۰): ماتریس نرمال شده وزن دار

C4			C3			C2			C1			
0.82	0.147	0.091	0.671	0.244	0.074	0.814	0.503	0.090	0.643	0.357	0.071	M1
0.82	0.122	0.091	0.671	0.202	0.074	0.814	0.606	0.090	0.643	0.540	0.071	M2
0.82	0.155	0.091	0.671	0.393	0.074	0.814	0.425	0.090	0.643	0.315	0.071	M3
0.82	0.146	0.091	0.671	0.308	0.074	0.814	0.736	0.271	0.643	0.520	0.214	M4
0.82	0.127	0.091	0.521	0.223	0.074	0.814	0.606	0.271	0.643	0.601	0.214	M5
0.82	0.146	0.091	0.671	0.308	0.074	0.814	0.322	0.090	0.643	0.438	0.071	M6
0.273	0.122	0.091	0.671	0.329	0.074	0.633	0.271	0.090	0.643	0.336	0.071	M7
0.273	0.117	0.091	0.671	0.351	0.074	0.814	0.503	0.090	0.643	0.295	0.214	M8
0.273	0.146	0.091	0.671	0.329	0.074	0.814	0.555	0.090	0.643	0.479	0.214	M9
0.273	0.117	0.091	0.521	0.287	0.074	0.814	0.477	0.090	0.643	0.500	0.214	M10
0.82	0.185	0.091	0.671	0.308	0.074	0.814	0.555	0.090	0.643	0.500	0.071	M11
0.82	0.212	0.117	0.671	0.393	0.074	0.814	0.684	0.271	0.643	0.458	0.071	M12
0.82	0.164	0.091	0.671	0.415	0.074	0.814	0.425	0.090	0.643	0.458	0.214	M13
0.82	0.155	0.091	0.521	0.180	0.074	0.633	0.374	0.090	0.500	0.295	0.071	M14
0.82	0.164	0.091	0.671	0.308	0.074	0.814	0.477	0.090	0.643	0.397	0.071	M15
0.82	0.155	0.091	0.521	0.202	0.074	0.814	0.425	0.090	0.643	0.357	0.071	M16
0.82	0.164	0.091	0.671	0.266	0.074	0.814	0.425	0.090	0.643	0.357	0.071	M17

گام سوم: دیفازی کردن مقادیر

گاهی لازم است که دو عدد فازی را با هم مقایسه کرده تا مشخص شود که کدام یک بزرگ‌تر از

دیگری است. گاهی نیز به دلیل متغیرهای زیاد و محاسبات گسترده اعداد فازی، باید اعداد فازی را به

اعداد قطعی تبدیل کرد. به این کار دیفازی کردن (تبدیل اعداد از حالت فازی به قطعی) گفته می‌شود.

طبق جدول (۵-۴۱) ماتریس نرمال شده وزن دار با روش میانگین دیفازی شده است.

جدول (۵-۴۱): دیفازی شده ماتریس نرمال شده وزن دار

C4	C3	C2	C1	
0.352	0.330	0.469	0.357	M1
0.344	0.315	0.503	0.418	M2
0.355	0.379	0.443	0.343	M3
0.352	0.351	0.607	0.459	M4
0.346	0.273	0.564	0.486	M5
0.352	0.351	0.409	0.384	M6
0.162	0.358	0.331	0.350	M7
0.160	0.365	0.469	0.384	M8
0.170	0.358	0.486	0.445	M9
0.160	0.294	0.460	0.452	M10
0.365	0.351	0.486	0.404	M11
0.383	0.379	0.589	0.391	M12
0.358	0.386	0.443	0.438	M13
0.355	0.258	0.365	0.289	M14
0.358	0.351	0.460	0.370	M15
0.355	0.266	0.443	0.357	M16
0.358	0.337	0.443	0.357	M17

گام چهارم: ساخت مجموعه‌های موافق و ایجاد ماتریس موافقت

مجموعه‌های موافق مجموعه‌ای از معیارهایی است که $V_{xz} > V_{yz}$ است که V همان ماتریس نرمال وزن دار است. مجموعه‌های موافق تشکیل شده در پیوست به صورت جدول قابل مشاهده است که در جدول (۵-۴۲) نمونه‌ای از مجموعه موافق آمده است.

جدول (۵-۴۲): نمونه‌ای از مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الگوریتم فازی

مجموع	C4	C3	C2	C1	
1.491	0.82	0.671			M1-2
1.457			0.814	0.643	M1-3
0.82	0.82				M1-4
1.491	0.82	0.671			M1-5
1.634	0.82		0.814		M1-6
2.277	0.82		0.814	0.643	M1-7
1.634	0.82		0.814		M1-8
1.463	0.82			0.643	M1-9
2.305	0.82	0.671	0.814		M1-10
0					M1-11
0					M1-12
0.814			0.814		M1-13
2.128		0.671	0.814	0.643	M1-14
0.814			0.814		M1-15
1.457			0.814	0.643	M1-16
0.643				0.643	M1-17

ماتریس موافقت از مجموع وزن تمام معیارهای موجود در مجموعه موافق بدست می‌آید.

جدول (۵-۴۳): ماتریس موافقت C در الکترون فازی

M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
0.643	1.457	0.814	2.128	0.814	0	0	2.305	1.463	1.634	2.277	1.634	1.491	0.82	1.457	1.491		M1
1.457	2.128	1.457	2.128	0.814	0.643	1.457	2.305	1.634	2.277	1.634	1.457	0.671	0	1.457		1.457	M2
1.485	2.305	0.671	2.948	0.814	0.671	0.671	1.491	1.491	1.491	2.305	2.305	1.491	1.491		1.491	1.491	M3
2.128	2.128	2.128	2.128	1.457	1.457	2.128	2.948	2.277	2.277	2.277	2.948	2.305		1.457	2.948	2.128	M4
1.457	2.128	1.457	2.128	1.457	0.643	1.457	2.277	2.277	2.277	2.277	1.457		0.643	1.457	2.277	1.457	M5
1.314	1.314	1.314	2.128	0	0	0.671	1.491	0.82	1.463	2.277		1.491	1.491	0.643	1.491	1.314	M6
0.671	0.671	0.671	1.314	0	0	0.671	1.491	0.671	0.82		0.671	0.671	0.671	0.643	0.671	0.671	M7
2.128	2.128	2.128	2.128	0.814	0	0.671	2.305	0.671		2.128	2.128	0.671	0.671	1.457	0.671	2.128	M8
5.128	4.128	3.128	2.128	1.457	0.643	2.128	2.305		2.277	2.948	2.128	0.671	0.671	1.457	1.314	2.128	M9
1.457	2.128	1.457	2.128	1.457	0.643	0.643		0.643	1.463	1.457	1.457	0.671	0	1.457	0.643	0.643	M10
2.948	2.948	2.948	2.948	1.634	0.643		2.305	1.634	2.277	2.277	2.948	1.491	1.491	2.277	1.491	2.948	M11
2.948	2.948	2.948	2.948	1.634		2.305	2.305	2.305	2.948	2.948	2.948	2.305	1.491	2.948	1.491	2.948	M12
2.948	2.948	2.134	2.948		1.314	1.314	1.491	1.491	2.134	2.948	2.948	1.491	2.134	2.948	2.134	2.134	M13
0	0.82	0		0	0	0	0.82	0.82	0.82	1.634	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	M14
4.948	3.277		2.948	0.82	0	0.671	2.305	1.463	0.82	2.277	2.305	1.491	1.491	2.277	1.491	2.134	M15
1.457		0	2.948	0.814	0	0	0.82	0.82	0.82	2.948	1.634	0.82	0.82	2.277	0.82	1.463	M16
	2.948	0.82	2.948	1.634	0	0	1.491	0.82	0.82	2.277	1.634	1.491	0.82	2.277	1.491	2.134	M17

سپس مقدار آستانه ماتریس موافقت را از رابطه ۲-۴۹ بدست می‌آوریم. که این همان میانگین

حسابی از درایه‌های ماتریس موافق است.

$$\bar{c} = 1.58$$

گام پنجم: تشکیل ماتریس بولین موافق

با استفاده از مقدار آستانه و ماتریس موافقت، می‌توان ماتریس بولین (صفر و یک) را ایجاد کرد. اگر

درایه ماتریس موافق از مقدار آستانه بزرگتر باشد عدد متناظر آن در ماتریس بولین ۱ می‌شود و در

غیر اینصورت مقدار صفر اختیار می‌کند.

جدول (۵-۴۴): ماتریس موافقت مؤثر F (ماتریس بولینی)

M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0		M1
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0		0	M2
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0		0	0	M3
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	M4
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0		0	0	1	0	M5
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0	M6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	M7
1	1	1	1	0	0	0	1	0		1	1	0	0	0	0	1	M8
1	1	1	1	0	0	1	1		1	1	1	0	0	0	0	1	M9
0	1	0	1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	M10
1	1	1	1	1	0		1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	M11
1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	M12
1	1	1	1		0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	M13
0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	M14
1	1		1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	M15
0		0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	M16
	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	M17

گام ششم: ساخت مجموعه‌های مخالف و ایجاد ماتریس مخالفت

- در این گام ابتدا قدرمطلق اختلاف میان دو گزینه مورد نظر محاسبه شده است.
 - سپس ماکزیمم شاخص‌هایی را که در ماتریس هماهنگی قرار نگرفته، محاسبه شده و در ستون Max Loss قرار داده شده است.
 - در ادامه ماکزیمم هر ردیف محاسبه شده و در ستون Max Row درج شده است.
 - در آخر جهت محاسبه مقدار ناهماهنگی مقدار Max loss را بر Max row تقسیم کرده تا مقدار مخالفت (ناهماهنگی) در شاخص بدست آید.
- مجموعه مخالف مجموعه‌ای از معیارهایی است که $V_{xj} < V_{yj}$ است و با استفاده از رابطه‌های بیان شده در بخش الکترو فازی ماتریس مخالف، تشکیل شده است. در جدول ۴۵-۵ نمونه‌ای از مجموعه‌های مخالفت تشکیل شده (قابل مشاهده در پیوست) در روش الکترو فازی آمده است.

جدول (۴۵-۵): نمونه‌ای از مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الکترو فازی

LOSS/ROW	MAX ROW	MAX LOSS	C4	C3	C2	C1	
1	0.061	0.061	0.008	0.014	0.034	0.061	M1-2
1	0.049	0.049	0.002	0.049	0.026	0.013	M1-3
1	0.137	0.137	0	0.021	0.137	0.101	M1-4
1	0.184	0.184	0.006	0.056	0.184	0.129	M1-5
0.450	0.060	0.027	0	0.021	0.060	0.027	M1-6
0.148	0.190	0.028	0.190	0.028	0.137	0.006	M1-7
0.184	0.192	0.035	0.192	0.035	0	0.027	M1-8
0.155	0.182	0.028	0.182	0.028	0.017	0.088	M1-9
0.495	0.192	0.095	0.192	0.035	0.008	0.095	M1-10
1	0.047	0.047	0.012	0.021	0.017	0.047	M1-11
1	0.120	0.120	0.030	0.049	0.120	0.033	M1-12
1	0.081	0.081	0.005	0.056	0.026	0.081	M1-13
0.026	0.103	0.002	0.002	0.071	0.103	0.068	M1-14
1	0.021	0.021	0.005	0.021	0.008	0.013	M1-15
1	0.063	0.063	0.002	0.063	0.026	0	M1-16
1	0.026	0.026	0.005	0.007	0.026	0	M1-17

در ادامه مجموع هر ستون در ماتریس مورد نظر قرار گرفته و ماتریس مخالفت طبق جدول ۴۶-۵

تشکیل شده است.

جدول (۴۶-۵): ماتریس مخالفت D در الکترو فازی

M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
1	1	1	0.026	1	1	1	0.495	0.155	0.184	0.148	0.450	1	1	1	1		M1
0.349	0.180	0.746	0.080	1	1	1	0.185	0.244	0.270	0.373	0.375	1	1	0.851		0.231	M2
0.325	0.121	0.966	0	1	1	1	0.559	0.552	0.210	0.035	1	1	1		1	0.521	M3
0.034	0.017	0.038	0.011	0.217	0.450	0.106	0	0.038	0.073	0.025	0	0.347		0.173	0	0	M4
0.494	0.071	0.675	0.046	0.941	1	0.958	0.113	0.483	0.496	0.365	0.503		1	0.744	0.626	0.438	M5
1	0.403	1	0.029	1	1	1	0.354	0.425	0.313	0.035		1	1	0.839	1	1	M6
1	1	1	1	1	1	1	0.791	1	1		1	1	1	1	1	1	M7
1	1	1	1	1	1	1	0.958	0.280		0.012	1	1	1	1	1	1	M8

ادامه‌ی جدول (۴۶-۵): ماتریس مخالفت D در الکترون فازی

M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
1	1	1	1	1	1	1	0.108		0.117	0	1	1	1	1	1	1	M9
1	1	1	1	1	1	0.277		1	1	0.494	1	1	1	1	1	1	M10
0	0	0	0	0.824	1		0.232	0.208	0.069	0.034	0	1	1	0.461	0.483	0	M11
0	0	0	0	0.325		0.133	0.275	0.256	0	0	0	0.89	1	0	1	0	M12
0	0	0.253	0.019		1	1	0.086	0.22	0.131	0	0	1	1	0	0.848	0.318	M13
1	1	1		1	1	1	0.838	0.845	0.546	0.514	1	1	1	1	1	1	M14
0	1		0	1	1	1	0.412	0.137	0.071	0.035	0.263	1	1	1	1	0.409	M15
1		1	0	1	1	1	0.488	0.498	0.509	0	1	1	1	1	1	1	M16
	0	1	0	1	1	1	0.481	0.470	0.137	0.138	0.789	1	1	1	1	1	M17

همچنین مقدار آستانه مخالفت محاسبه شده به شرح زیر است:

$$\bar{d} = 0.637$$

گام هفتم: تشکیل ماتریس بولین مخالف

با استفاده از مقدار آستانه مخالفت و ماتریس مخالفت، ماتریس بولین (صفر و یک) ایجاد شده

است.

جدول (۴۷-۵): ماتریس مخالفت مؤثر G (ماتریس بولینی)

M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0		M1
1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0		1	M2
1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0		0	1	M3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	M4
1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1		0	0	1	1	M5
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1		0	0	0	0	0	M6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	M7
0	0	0	0	0	0	0	0	1		1	0	0	0	0	0	0	M8
0	0	0	0	0	0	0	1		1	1	0	0	0	0	0	0	M9
0	0	0	0	0	0	1		0	0	1	0	0	0	0	0	0	M10
1	1	1	1	0	0		1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	M11
0	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	M12
1	1	1	1		0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	M13
0	0	0		0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	M14
1	0		1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	M15
0		0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	M16
	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	M17

گام هشتم: تشکیل ماتریس نهایی

ماتریس نهایی از ضرب درایه‌های متناظر دو ماتریس بولین موافق و مخالف بدست آمده است. به

عبارتی $H = G * F$. ماتریس H نیز یک ماتریس صفر و یک است.

جدول (۴۸-۵): ماتریس نهایی H

M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0		M1
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0		0	M2
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		0	0	M3
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	M4

ادامه‌ی جدول (۴۸-۵): ماتریس نهایی H

M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0		0	0	1	0	M5
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0	M6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	M7
0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	M8
0	0	0	0	0	0	0	1		1	0	0	0	0	0	0	0	M9
0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	M10
1	1	1	1	0	0		1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	M11
0	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	M12
1	1	1	1		0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	M13
0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	M14
1	0		1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	M15
0		0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	M16
	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	M17

گام نهم: رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

در این مرحله تعداد ۱ و ۰ های هر ردیف شمرده شده است. طبق جدول (۴۹-۵) جمع ۱ ها در ستون غالب و جمع صفرها در ستون مغلوب و اختلاف آن‌ها در ستون اختلاف قرار گرفته شده‌اند. سپس بر اساس ستون اختلاف، ریسک‌ها رتبه‌بندی شده‌اند.

جدول (۴۹-۵): رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه با روش الکترو فازی

ریسک	رتبه	اختلاف	مغلوب	غالب
M1	7	-6	11	5
M2	6	-4	10	6
M3	8	-10	13	3
M4	1	10	3	13
M5	5	-2	9	7
M6	9	-12	14	2
M7	11	-16	16	0
M8	10	-14	15	1
M9	8	-10	13	3
M10	11	-16	16	0
M11	3	6	5	11
M12	2	8	4	12
M13	4	0	8	8
M14	10	-14	15	1
M15	6	-4	10	6
M16	9	-12	14	2
M17	8	-10	13	3

جدول (۵۰-۵): اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش الکترو فازی

RANK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F ELECTRE	M4	M12	M11	M13	M5	M15, M2	M1	M17, M3, M9	M6, M16	M14, M8	M10, M7

۵-۸- استراتژی اولویت‌بندی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

برای رسیدن به نظری واحد در رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با توجه روش‌های ذکر شده

از تکنیک استراتژی اولویت‌بندی استفاده می‌شود. این تکنیک شامل روش‌های میانگین رتبه‌ها، بردا، کپلند و در نهایت مرحله ادغام می‌باشد. نتایج حاصل از این روش‌ها برای رتبه‌بندی ریسک‌های تونل غربی البرز با توجه به جدول ۵-۵۱ در جدول ۵-۵۲ ارائه شده است.

جدول (۵-۵۱): ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها برای روش بردا و کپلند

$\sum R - \sum C$	$\sum R$	M17	M16	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	
-2	6	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	-	M1
3	8	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	-	1	M2
-3	6	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	-	0	0	M3
13	14	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	M4
7	11	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	-	0	1	1	1	M5
-8	3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	-	0	0	0	0	0	M6
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	M7
-10	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-	1	0	0	0	0	0	0	M8
2	7	0	1	0	1	0	0	0	1	-	1	1	1	0	0	1	0	0	M9
-14	1	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	1	0	0	0	0	0	0	M10
11	13	1	1	1	1	1	0	-	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	M11
15	15	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	M12
8	11	1	1	0	1	-	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	M13
-11	2	0	0	0	-	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	M14
4	8	1	1	-	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	M15
-7	4	0	-	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	M16
1	8	-	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	M17
-	-	7	11	4	13	3	0	2	15	5	12	16	11	4	1	9	5	8	$\sum C$

جدول (۵-۵۲): استراتژی اولویت‌بندی برای رتبه‌بندی نهایی ریسک‌ها

ریسک	TOPSIS	F TOPSIS	ELECTRE	F ELECTRE	Ranks mean	Borda	Copeland	ادغام
M1	12	10	9	8	9.75	10.5	10	10.083
M2	6	5	12.5	6.5	7.5	7	7	7.166
M3	10	8	10	10	9.5	10.5	11	10.333
M4	2	2	2	1	1.75	2	2	1.916
M5	5	6	7.5	5	5.875	4.5	5	5.125
M6	14	11	12.5	12.5	12.5	13	13	12.833
M7	16	17	16	16.5	16.375	17	17	16.791
M8	13	15	12.5	14.5	13.75	14.5	14	14.083
M9	4	13	4	10	7.75	9	8	8.25
M10	11	16	16	16.5	14.875	16	16	15.625
M11	3	3	3	3	3	3	3	3
M12	1	1	1	2	1.25	1	1	1.0833
M13	8	4	7.5	4	5.875	4.5	4	4.791
M14	17	14	16	14.5	15.375	14.5	15	14.958
M15	7	9	5	6.5	6.875	7	6	6.625
M16	15	12	12.5	12.5	13	12	12	12.333
M17	9	7	6	10	8	7	9	8

بنابراین اولویت‌بندی نهایی ریسک‌ها برای تونل غربی البرز بر اساس مقادیر ستون ادغام به صورت

جدول زیر خواهد بود:

جدول (۵-۵۳): رتبه‌بندی نهایی ریسک‌های تونل غربی البرز

رتبه‌بندی نهایی	ریسک	رویداد
1	تجربه تونل‌سازی پیمانکاران برای قطرهای بزرگ	M12
2	تصادد گازهای سمّی و قابل انفجار	M4
3	خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته	M11
4	حمل قطعات بزرگ ماشین	M13
5	برخورد با زون‌های گسلی	M5
6	تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات	M15
7	هجوم جریان آب زیرزمینی	M2
8	پارامترهای طول و قطر تونل	M17
9	پدیده‌ی مچاله شوندگی	M9
10	پدیده‌ی آماس (متورّم شوندگی)	M1
11	حفرات کارستی (انحلالی)	M3
12	حفاری پارکینگ، دستک‌ها و راهروهای نفرو	M16
13	ناپایداری دیوارهای حفاری و سینه کار	M6
14	سنگ‌های سخت و ساینده	M8
15	تأمین مصارف برق	M14
16	خطر ریزش‌های سنگی	M10
17	فاصله‌داری درزه‌ها	M7

۵-۹- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا منطقه‌ی مورد مطالعه معرفی و از دیدگاه‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به منظور ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های حفاری مکانیزه تونل غربی البرز طبق مطالعات انجام شده، ۱۷ ریسک به عنوان مهم‌ترین ریسک‌های زمین‌شناسی، هزینه‌ای، فنی محیطی، سیاسی و هندسی در تونل‌سازی مکانیزه بزرگ مقطع در محیط‌های سنگی معرفی شده است که عبارت‌اند از: پدیده‌ی آماس یا متورّم‌شوندگی، جریان آب زیرزمینی، حفرات کارستی یا انحلالی، تصاعد گازهای سمّی و قابل انفجار، زون‌های گسلی، ناپایداری دیواره‌های حفاری و سینه‌کار، فاصله‌داری درزه‌ها، سنگ‌های سخت و ساینده، پدیده‌ی مچاله‌شوندگی، خطر ریزش‌های سنگی، هزینه خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته، تجربه تونل‌سازی پیمانکاران برای قطرهای بزرگ، حمل قطعات بزرگ ماشین، تأمین مصارف برق، تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات، حفاری پارکینگ، دستک‌ها و راهروهای نفرو و سواره‌رو و پارامترهای

طول و قطر تونل.

در این تحقیق شاخص‌های تصمیم‌گیری که بر ریسک‌های بیان شده تأثیر می‌گذارند، چهار معیار احتمال وقوع ریسک (C1)، میزان تأثیر ریسک بر هزینه، زمان و کیفیت پروژه (C2)، میزان عدم اطمینان از تخمین (C3) و توانایی سازمان در واکنش به ریسک (C4) می‌باشند. در ادامه برای رتبه‌بندی و اولویت دادن به ریسک‌های ذکر شده در تونل غربی البرز از روش‌های تاپسیس، تاپسیس فازی، الکتراه و الکتراه فازی استفاده شده است.

لازم به ذکر است نتایج محاسبات طبق چهار روش تصمیم‌گیری چند معیاره مشابه هم هستند و سه ریسک تجربه تونل‌سازی پیمان‌کاران برای قطرهای بزرگ، تصاعد گازهای سمّی و قابل انفجار و خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته به ترتیب مهم‌ترین ریسک‌های موجود در حفاری مکانیزه تونل بزرگ مقطع البرز و سه ریسک فاصله‌داری درزه‌ها، خطر ریزش‌های سنگی و تأمین مصارف برق به ترتیب کم اهمیت‌ترین مخاطره می‌باشند. در صورت نیاز می‌توان با توجه به جداول ذکر شده نتایج حاصل از رتبه‌بندی ریسک‌ها با روش‌های بیان شده را مشاهده نمود و مورد تحلیل و بررسی بیشتری قرار داد.

۶. فصل هشتم:

نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

امروزه سرمایه‌گذاری در پروژه‌ها به شدت تحت تأثیر عوامل ریسک‌زا بوده و تصمیم‌گیری جهت تأمین مالی با در نظر گرفتن ریسک و مدیریت آن اتخاذ می‌شود. مدیریت ریسک مجموعه فرآیندهای لازم برای شناسایی، تجزیه و تحلیل و واکنش در مقابل یک پروژه به منظور بیشینه کردن نتایج وقایع مثبت و کمینه کردن پیامدهای وقایع ناگوار و منفی است که می‌تواند بر روی اهداف اصلی پروژه تأثیر بگذارد. رتبه‌بندی ریسک‌های یک پروژه به ویژه زمانی که تعداد عوامل ریسک‌زا افزایش می‌یابد به عنوان بخش مهمی از فرآیند پیچیده مدیریت ریسک محسوب می‌شود. به دلیل عدم قطعیت بالا در پروژه‌های تونل‌سازی، مدیریت ریسک در این نوع پروژه‌ها اهمیت مضاعف پیدا می‌کند.

۶-۲- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با توجه به داده‌های موجود، ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی، سرمایه‌گذاری و هزینه‌ای، فنی- محیطی، سیاسی و هندسی تونل غربی البرز آزادراه تهران- شمال صورت گرفت. در این تونل ۱۷ نوع مخاطره شامل پدیده‌ی آماس یا متورم‌شوندگی، جریان آب زیرزمینی، حفرات کارستی یا انحلالی، تصاعد گازهای سمی و قابل انفجار، زون‌های گسلی، ناپایداری دیواره‌های حفاری و سینه‌کار، فاصله‌داری درزه‌ها، سنگ‌های سخت و ساینده، پدیده‌ی مچاله‌شوندگی، خطر ریزش‌های سنگی، هزینه خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته، تجربه تونل‌سازی پیمانکاران برای قطرهای بزرگ، حمل قطعات بزرگ ماشین، تأمین مصارف برق، تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات، حفاری پارکینگ، دستک‌ها و راهروهای نفرو و سواره‌رو و پارامترهای طول و قطر تونل با کمک متخصصان تونل‌شناسایی شد. در ادامه با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از قبیل Ftopsis, Topsis, Electre و FElectre با شاخص‌های "احتمال وقوع ریسک"، "میزان تأثیر ریسک بر هزینه و زمان"، "عدم اطمینان از تخمین" و "توانایی سازمان در واکنش به ریسک" اولویت‌بندی ریسک انجام شد و نتایج به صورت زیر حاصل شد:

تجربه تونل‌سازی پیمانکار برای قطرهای بزرگ، تصاعد گازهای سمی و قابل انفجار، خرید دستگاه

TBM و تجهیزات وابسته، حمل قطعات بزرگ ماشین و زون های گسلی به ترتیب از بین ۱۷ مخاطره بالاترین ریسک و سه ریسک فاصله‌داری درزه‌ها، خطر ریزش‌های سنگی و تأمین مصارف برق به ترتیب پایین‌ترین ریسک را دارند.

۳-۶- پیشنهادات

تونل غربی البرز به طول حدود ۶۴۵۸ قرار است با روش حفاری مکانیزه و توسط یک دستگاه به مدل DUAL Mode EPB Hard Rock Single Shield به قطر نزدیک به ۱۲/۷۳ متر حفاری شود. لازم به ذکر است که تاکنون تجربه ساخت تونل‌های راه در کشور به روش مکانیزه و با این قطر وجود نداشته است. تنها حفاری موجود، حفاری تونل پیش شکافی تالون در آزادراه تهران- شمال به قطر ۶/۵ متر با TBM سپر باز است. از این رو TBM پروژه تونل غربی البرز بزرگترین TBM در کشور محسوب می‌شود که ملاحظات خاص خود را دارد.

با توجه به این که تا زمان نگارش این پایان‌نامه دستگاه مورد نظر به دلیل تحریم‌ها و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا هنوز خریداری نشده است، پیشنهاد می‌شود وقتی که دستگاه خریداری و تهیه شد، پژوهشی درباره رتبه‌بندی ریسک‌ها در زمان حفاری تونل صورت گیرد. تا در صورت وقوع، عملیات تونل‌سازی با وقفه همراه نشود.

با توجه به اینکه پروژه هنوز در مرحله طراحی بوده و هنوز وارد فاز اجرایی نشده، برخی داده‌های ژئوتکنیکی به صورت دقیق محاسبه نشده است. به همین دلیل لازم است در صورت شروع حفاری و تکمیل اطلاعات، ارزیابی مجددی در حوزه محاسبه داده‌های ژئوتکنیکی انجام شود.

مطابق دستورالعمل انجمن بین‌المللی تونل، ارزیابی ریسک از جمله موضوعاتی است که در تمامی مراحل اجرای پروژه قابل انجام است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود بعد از شروع حفاری تونل، ارزیابی ریسک مجدداً انجام شود.

۱. روزبهی. ص، جدا. خ، مدیریت ریسک پروژه با استفاده از PertMaster، انتشارات کیان رایانه سبز، ۱۳۸۷.
2. Csiszar., (2008), "Managing Risk and Uncertainty", Business and Economic Review, 2008.
3. NRC (National Research Council -US) ., (2000), "Risk analysis and Uncertainty in Flood Reduction Studies", National Academic Press.
4. Ivanov D., Sokolov B., (2010), " Adaptive Supply Chain Management", Springer, viewed January26,2013
5. Monahan G.E., (2000), "Management decision making: spreadsheet modeling, analysis, and application", Cambridge University Press, England.
6. You C., (2009), " On the convergence of uncertain sequences", Mathematical and Computer Modelling.
7. Project Management Institute., (2008), " A Guide to the Project Management Body of Knowledge", fourth Edition, Pennsylvania, USA.
8. Association For Project Management., (2006), "APM body of Knowledge".
9. Federal Aviation Administration, (2009), "Risk Management Handbook."
10. Young L, (2007), "The handbook of project management", Revised 2nd edition,
11. Baecher G.B., Christian J.T, (2003), "Reliability and Statistics in geotechnical engineering", USA: John Wiley & Sons.
12. Kerzner H, (2009), "Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling", John Wiley & Sons, New York.
13. Wagner H, (2006), "Risk Evaluation and Control in Underground Construction", International symposium on underground excavation and tunneling, Bangkok : Thailand , 2-4 February
14. Association For Project Management, (2006), "APM body of Knowledge".
۱۵. ویلیامز س، هینزج، (۱۳۸۲)، مدیریت ریسک"، مترجمان: داور ونوس، حجت‌اله گودرزی، نشر نگاه دانش.
16. Raei, R. Saeedi, A. (2003) " Essentials of financial Engineering and Risk Management", SAMT and Tehran University Publications (in Persian).
17. Ericson, Clifton A. (2005) "Hazard analysis techniques for system safety", John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, United States.
۱۸. جعفر زاده م، (۱۳۸۶)، "متدولوژی تطبیقی تکنیک‌های کاربردی آنالیز ریسک"، نخستین کنگره بین‌المللی مدیریت ریسک، تهران.
۱۹. عطائی، محمد (۱۳۹۵) "مدیریت ریسک"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
20. Rezaie, K., Amalnik, M. (2007), "Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management", Applied Mathematics and Computation, Volume 190, Issue 2.
۲۱. نظارت ح، (۱۳۹۱)، "رتبه‌بندی ریسک زمین‌شناسی در ماشین حفاری TBM با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه موردی تونل انتقال آب گلاب)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، سرشکی ف، عطائی م (استاد راهنما)، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.
۲۲. اصغرپور. م، "تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره"، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.
۲۳. سایت آموزشی صنایع بیست به آدرس اینترنتی <https://sanaye20.ir/>، مهر ۱۳۹۷.
۲۴. عطائی، محمد (۱۳۸۸) "تصمیم‌گیری چندمعیاره"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
۲۵. عطائی، محمد (۱۳۸۸) "تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
۲۶. سایت آموزشی فراگیر به آدرس اینترنتی <http://farabegir.com>، مهر ۱۳۹۷.

27. Yazdani-Chamzini, A. Haji Yakhchali, S. Mahmoodian, M. (2013) "Risk ranking of tunnel construction projects by using the ELECTRE technique under a fuzzy environment", *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 8:1, 1-14.
28. Aytac, E., Tus, I. A., Kundakci, N. (2011) "Fuzzy ELECTRE I Method for Evaluating Catering Firm Alternatives", *Ege Academic Review*, volume 11, Issue 2011. PP 125-134.
29. Hatami-Marbini, A. and Tavana, M. (2011) "An extension of the Electre I method for group decision-making under a fuzzy environment". *Omega*, 39 (4), pp. 373-386
30. You K., Park Y., Lee J., (2005), "Risk analysis for determination of a tunnel support pattern" *Tunnelling and Underground Space Technology*.
31. Hoek, E. Palmeiri, A. (1998) "Geotechnical risks on large civil engineering projects", *International Association of Engineering Geologists Congress, Vancouver, Canada*.
32. S.D. Eskesen, P. Tengborg, J. Kampmann, T.H. Veicherts, (2004) "Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 19, pp. 217-237.
33. K. Panthi, B. Nilsen, "Uncertainty analysis of tunnel squeezing for two tunnel cases from Nepal Himalaya", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44 (2007) 67-76.
34. Shahriar, K. Sharifzadeh, M. Khademi Hamidi, J. (2008) "Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 318-325.
35. M. Holicky, (2008) "RISK ASSESSMENT AND OPTIMIZATION OF ROAD TUNNELS", *R&RATA* 4, vol. 1.
36. E.-S. Hong, I.-M. Lee, H.-S. Shin, S.-W. Nam, J.-S. Kong, "Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: application to the design of shield TBM", *Tunnelling and Underground Space Technology* 24 (2009) 269-277.
37. J. sejnoha, D. jaruskova, O. spackova, E. novotna, (2009) "Risk Quantification for Tunnel Excavation Process", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 58.
۳۸. حیاتی م، (۱۳۸۸)، "مدیریت ریسک در پروژه‌های ساخت تونل"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، صیادی ا ر (استاد راهنما)، آذر ع (مشاور)، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس.
۳۹. صیادی ا، رجب‌زاده ع، حسین‌پور سجیدان م، حیاتی م، (۱۳۸۸) "رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی به کمک روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)"، هشتمین کنفرانس تونل ایران، انجمن تونل ایران.
۴۰. عماد م، طالبی نژاد ع، قرباگی م، پرورش ع، اسدی ا، نعیمی ت، (۱۳۸۹) "ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیک در حفاری‌های تمام مقطع مکانیزه تونل‌های مترو (پروژه خط هفت مترو تهران)"، کنگره و نمایشگاه بین‌المللی معدن.
۴۱. مختاری ر، (۱۳۹۰)، "ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی در حفاری مکانیزه تمام مقطع (TBM) در سنگ با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: تونل بلند انتقال آب زاگرس)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، ابراهیمی فرسنگی م (راهنما)، منصوری ح (مشاور)، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.
42. Nick Barton. (2012) "Reducing risk in long deep tunnels by using TBM and drill-and-blast methods in the same project—the hybrid solution", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 4, no 2, pp. 115-126.
43. M. Rehbock-Sander, Y. Boissonnas, "Challenges in Design and Construction of a 30-km Hard Rock TBM Drive with an Overburden Reaching 2,400 Meters at the Gotthard Base Tunnel", *North American tunnelling Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado*, 2012.
44. Nezarat, H. Sereshki, F. Ataei, M. (2015), "Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 50, pp. 358-364.
۴۵. فاقدی ع، (۱۳۹۲)، "ارزیابی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی در تونل‌سازی مکانیزه در نواحی شهری - مطالعه موردی: تونل متروی خط ۱ تبریز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سرشکی ف، زارع ش (استاد راهنما)،

- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.
۴۶. ملکوتی ج، غریبی و، (۱۳۹۲) "تجزیه و تحلیل ریسک عملیات حفاری مکانیزه با استفاده از روش ردیابی انرژی و آنالیز مانع"، سلامت کار ایران، دوره ۱۰، شماره ۲، صفحات ۸۷-۹۸.
۴۷. رمضان نیا طلوتی ر، (۱۳۹۲)، "ارزیابی ریسک زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تونل‌سازی مکانیزه (مطالعه موردی تونل انتقال آب نوسود)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، عطائی م، میرزایی نصیر آباد ح (استاد راهنما)، بیاتی م (مشاور)، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.
48. X. Li, Y. Li, "Research on risk assessment system for water inrush in the karst tunnel construction based on GIS: Case study on the diversion tunnel groups of the Jinping II Hydropower Station". *Tunnelling and Underground Space Technology* 40 (2014) 182-191.
۴۹. زمانزاده ب، بدافی م، (۱۳۹۴) "مطالعه مدیریت ریسک در حفاری مکانیزه تونل‌ها با استفاده از TBM"، دومانه سلامت کار ایران، دوره ۱۰، شماره ۲
۵۰. سلطانی محمدی س، زمزم م ص، بخشنده امنیه ح، موسوی ا، مختاری ه، (۱۳۹۶) "ارزیابی و تحلیل ریسک مخاطرات پروژه‌ی حفاری مکانیزه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره"، مهندسی عمران شریف، دوره ۲، شماره ۱/۱، صفحات ۸۱-۸۸.
۵۱. ارومیه‌ای. ع، مظفری. ا، شریف‌زاده. م، زارعی. ح، "چالش‌های زمین‌شناسی مهندسی برای تونل‌های سنگی در ایران"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۰ تا ۱۲ آبان ۱۳۹۰.
52. Bell, G. F.(2004), "Engineering Geology & Construction". *Engineering Geology*.
53. Deere, D. U.(1981), "Adverse & TBM Tunnelling Problems". *Proc.Rapid,Excavation & Tunnelling Conference, California,May,pp 547-585*.
54. Barla, G., Pelizza, S.(2000), "TBM Tunnelling in Difficult Ground Conditions". *ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics, Melbourne, Australia*.
۵۵. افتخاری ع، خادمی حمیدی ج، (۱۳۸۸) "مخاطرات زمین‌شناسی در تونل‌زنی با TBM با مطالعه موردی در تونل بلند زاگرس"، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۲۹-۳۱.
56. Franklin, J. A., Dusseault, M. M.(1989), "Rock Engineering", *Mc Graw-Hill Publishing CO.USA*.
57. Sinha, R. S.(1989), "Underground Structure Design& Instrumentation", *Elsevier science publisher,B.V*.
۵۸. مدنی. ح، "تونل‌سازی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
۵۹. رنجبر پاشاکلائی. م، مهدی‌نژاد نوری. ع، خادمی حمیدی. ج، "نقش پارامترهای زمین‌شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی در انتخاب ماشین تونل‌زنی"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۰ تا ۱۲ آبان ۱۳۹۰.
۶۰. حسن‌پور. ج، شمسی. غ، "نقش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک در تونل‌سازی مکانیزه در شرایط دشوار زمین‌شناسی"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۰ تا ۱۲ آبان ۱۳۹۰.
۶۱. زارعی. ح.ر، ارومیه‌ای. ع، شریف‌زاده. م، "شناسایی و طبقه‌بندی مخاطرات ناشی از ورود آب به درون تونل سبزکوه"، ششمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، مهر ۱۳۸۸.
62. R. Goodman, D. Moye, A. Schalkwyk and I. Javandel, "Ground water inflow during tunnel driving," *engineering geology*, vol. 1, pp. 150-162, 1965.
63. Medley E.W (1994), "Engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks" (bimrocks), PhD dissertation, University of California, Berkley, UMJ.
۶۴. عقیقی پور م، و معارف وند پ، (۱۳۹۰)، "بررسی چالش‌های اجرای تونل در محیط‌های مخلوط سنگ و خاک" نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ایران.
65. Babendererde S, Hoek E, Marinos P and Cardosa A.S (2004) "Geological risk in the use of

- TBMs in heterogeneous rock masses – The case of Metro do Porto and the measures adopted” Course on Geotechnical Risks in Rock Tunnels, Portugal.
66. CHEN, F. H. (1957), "Foundation expansive soils", Elsevier Scientific Publishing Company.
67. شرکت مهندسی جنرال مکانیک، مهندسين مشاور لانيز، (۱۳۹۶)، گزارش فنی پروژه آزادراه تهران- شمال (تونل غربی البرز)، تهران
68. معماريان ح، (۱۳۷۴)، "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" انتشارات دانشگاه تهران.
69. عسگری ف، فاخر ع، (۱۳۷۲)، "تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندسی ژئوتکنیک" تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی، چاپ اول، ص ۸۷-۹۲.
70. Barla, G.(2001), "Tunnelling Under Squeezing Rock Condition", Eurosummer School in Tunnel Mechanics, Innsbruck.
71. Vigl, L., Jager, M.(1997), "Double Shield TBM and Open TBM in Squeezing Ground", Tunnel for People, Balkema, Rotterdam, pp 639-643.
72. Gioda, G., Cividini, A.(1996), "Numerical Methods For the Analysis of Tunnel Performance in Squeezing Rocks", Journal of Rock mechanics and Rock Engineering, Vol.29, No.4, pp 171-193
73. M. Thewes and W. Burger, "clogging of TBM drives in clay - identification and mitigation of risks," underground space use: analysis of the past and lessons for future, Vols. 1-2, 2005.
74. جمالی. م "بررسی ژئومورفولوژی اشکال کارستی پولیه ارژن"، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، آذر ۱۳۹۱.
75. مقصودی. م، کریمی ح، صفری. ف، چهارراهی. ذ، "بررسی توسعه کارست در توده پرآو- بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی"، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۹، پاییز ۱۳۸۸.
76. عباسی. م، گلیان م، شریفی تشنیزی. ا، ایزدی. ا، ر و آغاسی. ع. ا، "بررسی پتانسیل کارست در مسیر تونل انتقال آب سبزکوه با استفاده از GIS, RS"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۰ تا ۱۲ آبان ۱۳۹۰
77. مقیمی. ه، "هیدرولوژی کارست، انتشارات دانشگاه پیام نور، فروردین ۱۳۹۱.
78. امامی. س ن، "چالش‌های زمین‌شناختی پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای (مطالعه موردی: طرح انتقال آب بهشت‌آباد به فلات مرکزی)" همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها)، خرداد ۱۳۹۱.
79. Critchfield, J. W.(1985), "Tunnel in Gassy Ground"، proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference, pp 441-461.
80. شرکت مهندسی جنرال مکانیک، مهندسين مشاور لانيز، (۱۳۹۳)، گزارش‌های زمین‌شناسی و هندسی تونل البرز، تهران، ایران.
81. Q. Gong, L. Yin, Q. She, (2013) "TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: a case study in China". Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72 pp 163-172.
82. S. Smading, J. Roby, D. Willis, (2009) "Onsite Assembly and Hard Rock Tunneling at the Jinping-II Hydropower Station Power Tunnel Project", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference.
83. W. Brundan, (2009) "Robbins 10m double shield tunnel boring machines on Srisaillam left bank canal tunnel scheme, Alimineti Madhava Reddy project", Andhra Pradesh, India, Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference.
84. "Geological-structure problems of deep tunnels represented by the projected gotthard base tunnel of the federal swiss railways (in German): Rutschmann", W Erzmetall, V29, N4, April 1976, P148-156. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 14-62 1977.
85. K. Bucher, I. Stober, U. Seelig, (2012) "Water deep inside the mountains: Unique water

- samples from the Gotthard rail base tunnel”, Switzerland. *Chemical Geology* 334 , pp. 240-253.
86. H. Duddeck, (1996)“Challenges to tunnelling engineers”. *Tunnelling and Underground Space Technology* 11 , pp.5-10.
 87. E. Eberhardt, (2001)” Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 pp.499-518.
 88. H. Ehrbar, (2008)“Gotthard Base Tunnel, Switzerland. Experiences with different Tunnelling Methods”, Proc. 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, Sao Paulo.
 89. S. Loew, G. Barla, M. Diederichs, (2010)“Engineering geology of Alpine tunnels: Past, present and future”, *Geologically active Proceedings of the 11th IAEG Congress*, pp. 201-253.
 90. M. Ramoni, G. Anagnostou, (2010)“Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground”. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 , pp.433-455.
 91. N.R. Barton,(2000)“TBM tunnelling in jointed and faulted rock”, CRC Press.
 92. Y. Boissonnas, (2009)“experience gained in mechanical and conventional excavations in long alpline tunnelling in Switzerland”, *Rapid excavation and tunneling conference, SME, Las Vegas*, pp. 471-488.
 93. M. Herrenknecht, O. Böckli, K. Böppler, (2009)“Gotthard-Base Tunnel, Section Faido, Previous experience with the use of the TBM”, *Rapid excavation and tunneling conference, Las Vegas, SME Inc. Littleton*, pp. 1182-1205.
 94. Y. Boissonnas,(2011)“TBM drive in hard rock under high overburden at the Gotthard base tunnel in Switzerland, *Rapid excavation and tunneling conference SME*”, San Francisco, pp. 654-667.
 95. I. Vicenzi, S. Pedrazzini, A. Ferrari, G. Gubler, O. Böckli, (2007)“Deep tunnelling in hardrock with large diameter TBM: What’s up? An experience from the Gotthard Base Tunnel”.
 96. J.R. Ortiz, (2006)“Geomechanical problems in recent Spanish tunnels”. *Geotechnical Risk in Rock Tunnels: Selected Papers from a Course on Geotechnical Risk in Rock Tunnels, Aveiro, Portugal, 16–17 April 2004*, 119.
 97. F. Mendana, (2007)”Guadarrama tunnel construction with double shield TBMs”, *Rapid Excavation and Tunnelling Conference, USA, 2007*, pp. 1079-1093.
 98. M. Peláez González, J. Arroyo Cedrón, N. Alonso Fernández,(2009) “Experience acquired in the excavation of railway tunnels in Spain using tunnel boring machines”, *Safe tunnelling for the city and for the environment, ITA World Tunnel Congress*.
 99. I. Tardáguila, B. Celada, J.M. Galera, (2007)“Geotechnical control during the excavation of the tunnel of Guadarrama”.
 100. J. Gisbert, (2007)“Environmental and geotechnical problems in karstic terrains crossed by tunnels. A case study”, *Geophysical Research Abstracts*, pp. 06244.
 101. M.P. González, J.C.A. Cedrón, N.A. Fernandez, (2009)“EXPERIENCE ACQUIRED IN THE EXCAVATION OF RAILWAY TUNNELS IN SPAIN USING TUNNEL BORING MACHINES”, *Proceedings of the World Tunnel Congress, Budapest, Hungary*.
 102. R. Grandori, “Abdalajis east railway tunnel (Spain) – double shield universal TBM cope with extremely poor and squeezing formations”. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (2006) 268.
 103. W. Gütter, P. Romualdi, (2003)“New design for a 10 m universal double shield TBM

- for long railway tunnels in critical and varying rock conditions”, Proceedings of Rapid excavation & Tunnelling Conference.
104. D. Peila, S. Pelizza, (2009)“Ground probing and treatments in rock TBM tunnel to overcome limiting conditions”. Journal of mining science 45 , pp 602-619.
 105. G. Barla, (1999)“Larger diameter TBM tunnel excavation in weak environmental conditions”. News Journal, International Society for Rock Mechanics 5, pp 48-54.
 106. B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht, (2012)“Hardrock tunnel boring machines”, John Wiley & Sons.
 107. J. Zhao, Q. Gong, (2006)“Rock mechanics and excavation by tunnel boring machine– issues and challenges”, Rock Mechanics in Underground Construction Proceedings of the ISRM International Symposium, pp. 83-96.
 108. T. Carter, (2011)“Himalayan Ground Conditions challenge innovation for successful TBM Tunnelling”, Invited paper in Proc. Hydrovision India 2011 Conf, Delhi. SESSION 5c: (Risk Management in Tunnelling), 20pp.
 109. I. McFeat-Smith, (2008)“Tunnelling in the Himalayas: risk assessment and management for tunnelling in extreme geological conditions”, Proceedings of world tunnel Congress, pp. 1748-1760.
 110. G. Zwitnig, M. Diewald, K. Hechenblaickner, (2008)“TBM Wienerwald Tunnel – Steps towards Successful Tunnelling”. Geomechanik und Tunnelbau 1, pp 558-566.
 111. B. Khalighi, (2013)“Highly successful ground support for high cover: A case study of the west Qinling rail tunnels”, Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado, pp. 240-250.
 112. K. Kovari, R. Fechtig, C. Amstad, (1993)“Experience with large diameter tunnel boring machines in Switzerland”. Developments in geotechnical engineering 74, pp 485-496.
 113. J. Clark, S. Chorley, (2014)“The Greatest Challenges in TBM Tunneling: Experiences from the Field”. North American Tunneling: 2014 Proceedings.
 114. G. Exadaktylos, M. Stavropoulou, G. Xiroudakis, M. de Broissia, H. Schwarz, (2008)“A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM”. Rock mechanics and rock engineering 41, pp 797-834.
 115. R. Grandori, M. Sem, A. Lembo-Fazio, R. Ribacchi, (1995)“Tunnelling by double shield TBM in the Hong Kong granite”, 8th International Congress for Rock Mechanics, 1995, pp. 569-574.
 116. O. Balmer, F. Chavan,(2011)“Tunnel of Moutier, Switzerland: change from a TBM to the german excavation method”, Rapid excavation and tunnelling conference, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado, USA, pp. 723-738.
 117. X.Y.X.L.C. Daoci, Y. Cihao, (2001)“Application of geological survey technique during Pinglin tunnel construction [J]”. Modern Tunnelling Technology 2 (2001) 008.
 118. D.-J. Tseng, B.-R. Tsai, L.-C. Chang, (2001)“A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan”. Tunnelling and Underground Space Technology 16, pp175-183.
 119. Y. Tseng, S. Wong, B. Chu, C. Wong, (1998)“The Pinglin Mechanized Tunneling in difficult Ground”. St 8th Congr. of IAEG, Vancouver (Canada), pp 21-25.
۱۲۰. مهدی سارالانی ح، (۱۳۹۱)، "مقایسه ریسک های ژئوتکنیکی حفاری تونل (سنتی و مکانیزه) - (مطالعه موردی در تونل جاده شیبل و تونل متروی تبریز)"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، شهریار ک (راهنما)، پارسایی م (مشاور)، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود.

پوست

پوست ۱: پرسش نامه طراحی شده برای رتبه بندی ریسک های حفاری مکانیزه بزرگ مقطع تونل غربی البرزد محیط های سنگی

نام و نام خانوادگی کارشناس:	مدرك تحصیلی:	رست:	سابقه کار در تونلسازی (مدت زمان):	سن:
-----------------------------	--------------	------	-----------------------------------	-----

گروه عوامل	عوامل	احتمال وقوع ریسک					میزان تأثیر ریسک					عدم اطمینان تخمین					توانایی سازمان در واکنش به ریسک					توضیحات	
		خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	بیشتر از ۸۰٪	۶۰-۸۰٪	۴۰-۶۰٪	۲۰-۴۰٪	کمتر از ۲۰٪	بیشتر از ۸۰٪	۶۰-۸۰٪	۴۰-۶۰٪	۲۰-۴۰٪	کمتر از ۲۰٪	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم		
زمین شناسی	۱- پدیده‌ی آماس- پذیری (متورم شوندگی)																						با توجه به تعداد مخاطرات زیاد در تونلسازی مکانیزه، خواهشمند است اگر مخاطره ای از نظر دور مانده است، نام آن مخاطره را در سطر خالی آورده و سپس همانند پارامترهای مذکور، ستون های پرسشنامه را پر نمایید.
	۲- جریان آب زیرزمینی																						
	۳- حفرات کارستی (انحلالی)																						
	۴- تصاعد گازهای سمی و قابل انفجار																						
	۵- زون های گسلی																						
	۶- ناپایداری دیوارهای حفاری و سینه کار																						
	۷- فاصله‌داری درزه‌ها																						
	۸- سنگ‌های سخت و ساینده																						
	۹- پدیده مچاله شوندگی																						
	۱۰- خطر ریزش‌های																						

																				سنگی	
																				۱۱- خرید دستگاه TBM و تجهیزات وابسته	هزینه
																				۱۲- تجربه تونل‌سازی پیمانکار برای قطرهای بزرگ	فنی- محیطی
																				۱۳- حمل قطعات بزرگ ماشین	
																				۱۴- تأمین مصارف برق	
																				۱۵- تحریم‌های خارجی برای خرید ماشین و پشتیبانی و تأمین قطعات	سیاسی
																				۱۶- حفاری پارکینگ، دستک‌ها و راهروهای نفرو	هندسی
																				۱۷- پارامترهای طول و قطر تونل	

فرم امتیازدهی به شاخص‌ها برای تعیین وزن معیارها

معیار	احتمال وقوع					میزان تأثیر					عدم اطمینان تخمین					توانایی سازمان در واکنش به ریسک					
	بسیار کم اهمیت	کم اهمیت	متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت	بسیار کم اهمیت	کم اهمیت	متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت	بسیار کم اهمیت	کم اهمیت	متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت	بسیار کم اهمیت	کم اهمیت	متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت	
وزن معیار																					

پیوست ۲: نتایج حاصل از نظر سنجی خبرگان برای تشکیل ماتریس تصمیم

	C1							C2							C3							C4						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
M1	M	M	L	M	H	M	M	M	H	H	H	VH	L	VL	L	L	M	L	VL	H	VL	H	M	L	M	M	H	H
M2	VH	VH	VH	H	H	L	VH	H	VH	VH	H	M	L	H	VL	L	VH	VL	VL	L	VL	M	M	L	VH	VH	VH	H
M3	M	L	VL	H	M	H	L	H	M	H	L	M	M	VL	L	L	VH	H	VH	M	VL	M	M	L	H	M	M	H
M4	H	M	VH	H	VH	H	H	VH	VH	VH	VH	VH	H	M	M	M	VH	VL	VL	M	L	M	L	M	H	H	M	VH
M5	VH	VH	VH	VH	VH	M	VH	M	VH	M	H	VH	M	H	VL	M	M	L	VL	M	VL	L	M	M	VH	VH	H	H
M6	M	H	VH	M	M	L	VH	L	VL	H	L	L	L	M	M	M	H	L	L	L	L	H	L	M	VH	H	H	M
M7	M	L	H	M	M	L	M	L	M	L	VL	L	L	L	VL	M	M	H	VH	L	VL	H	M	H	H	H	H	H
M8	H	M	H	H	M	H	M	H	M	M	M	L	VH	M	M	M	M	M	M	H	VL	M	M	H	VH	VH	H	H
M9	VH	VH	M	M	M	H	H	H	VH	H	L	M	VH	L	H	L	M	M	M	M	VL	M	M	M	H	M	H	H
M10	H	M	H	VH	H	M	VH	H	M	M	H	L	M	M	M	M	L	L	L	M	L	VH	M	H	VH	H	H	M
M11	VH	VH	H	L	M	VH	H	VH	VH	H	L	VL	VH	M	H	M	L	VL	VL	VH	L	VL	VL	M	H	VH	VL	H
M12	H	VH	VH	M	M	L	H	H	VH	VH	M	M	VH	VH	VH	M	VL	M	L	VH	M	M	VL	M	M	M	VL	M
M13	VH	M	H	H	M	H	M	H	M	M	L	VL	VH	L	VH	M	VL	L	VL	H	L	L	L	M	H	VH	L	M
M14	M	M	M	M	L	M	VL	M	M	M	L	M	M	VL	L	M	VL	VL	VL	M	VL	H	L	H	H	M	M	L
M15	VH	VH	H	L	VL	M	M	VH	VH	H	L	VL	M	L	H	M	L	VL	L	M	M	M	VL	L	VH	H	M	M
M16	M	M	M	M	L	M	H	M	M	M	L	L	M	H	M	M	VL	VL	L	L	VL	M	L	H	H	H	VL	H
M17	VH	M	L	M	L	M	M	H	M	L	M	M	M	L	H	M	VL	L	L	L	L	M	L	VH	H	M	VL	M

پیوست ۳: مشخصات گروه کارشناسان

سن	مدت سابقه در زمینه تونل سازی	تخصص یا تجربه	تحصیلات	کارشناس
	بالای ۲۰ سال	حفاری مکانیزه، مشاور زمین شناسی مهندسی در شرکت مهندسیین مشاور ساحل	دکتری زمین شناسی مهندسی	E1
	۸ سال	طراحی و اجرای فضاهای زیرزمینی	دکتری مکانیک سنگ	E2
	۲۳ سال	تونل سازی و حفاری مکانیزه	دکتری مکانیک سنگ (عمران و ساخت تونل)	E3
۵۲	بالای ۲۰ سال	مسئول کارگروه بهداشت و ایمنی، مدیر توسعه و نوآوری شرکت جنرال مکانیک	کارشناس ارشد	E4
۵۰	۲۰ سال	کارشناس تونل قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا	کارشناس استخراج معدن	E5
۳۴	۶ سال	شرکت تأمین دستگاه‌ها و خدمات تونل و معدن	کارشناس ارشد عمران	E6
۳۷	۷ سال	شرکت تأمین دستگاه‌ها و خدمات تونل و معدن	کارشناس ارشد استخراج معدن	E7

پیوست

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش اکثره

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C1-1	-	-	-	-	-
C1-2			0.671	0.82	1.491
C1-3	0.643	0.814			1.457
C1-4				0.82	0.82
C1-5			0.671	0.82	1.491
C1-6		0.814		0.82	1.634
C1-7		0.814		0.82	1.634
C1-8		0.814			0.814
C1-9				0.82	0.82
C1-10		0.814		0.82	1.634
C1-11					
C1-12					
C1-13		0.814			0.814
C1-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C1-15		0.814			0.814
C1-16	0.643	0.814	0.671		2.128
C1-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C2-1	0.643	0.814			1.457
C2-2	-	-	-	-	-
C2-3	0.643	0.814			1.457
C2-4	0.643				0.643
C2-5		0.814			0.814
C2-6	0.643	0.814			1.457
C2-7	0.643	0.814			1.457
C2-8	0.643	0.814		0.82	2.277
C2-9	0.643	0.814			1.457
C2-10	0.643	0.814		0.82	2.277
C2-11	0.643	0.814			1.457
C2-12	0.643				0.643
C2-13	0.643	0.814			1.457
C2-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C2-15	0.643	0.814			1.457
C2-16	0.643	0.814	0.671		2.128
C2-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C3-1			0.671	0.82	1.491
C3-2			0.671	0.82	1.491
C3-3	-	-	-	-	-
C3-4			0.671	0.82	1.491
C3-5			0.671	0.82	1.491
C3-6		0.814	0.671	0.82	2.305
C3-7		0.814	0.671	0.82	2.305
C3-8		0.814	0.671	0.82	2.305
C3-9			0.671	0.82	1.491
C3-10			0.671	0.82	1.491
C3-11			0.671		0.671
C3-12					
C3-13		0.814	0.671		1.485
C3-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C3-15			0.671		0.671
C3-16		0.814	0.671		1.485
C3-17		0.814	0.671		1.485

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکره

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C4-1	0.643	0.814	0.671		2.128
C4-2		0.814	0.671	0.82	2.305
C4-3		0.814	0.671	0.82	2.305
C4-4	-	-	-	-	-
C4-5		0.814	0.671	0.82	2.305
C4-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C4-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C4-8	0.643	0.814		0.82	2.277
C4-9	0.643	0.814			1.457
C4-10	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C4-11	0.643	0.814	0.671		2.128
C4-12	0.643	0.814			1.457
C4-13	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C4-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C4-15	0.643	0.814	0.671		2.128
C4-16	0.643	0.814	0.671		2.128
C4-17	0.643	0.814	0.671		2.128

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C5-1	0.643	0.814			1.457
C5-2	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C5-3	0.643	0.814			1.457
C5-4	0.643				0.643
C5-5	-	-	-	-	-
C5-6	0.643	0.814			1.457
C5-7	0.643	0.814		0.82	2.277
C5-8	0.643	0.814		0.82	2.277
C5-9	0.643	0.814			1.457
C5-10	0.643	0.814		0.82	2.277
C5-11	0.643	0.814			1.457
C5-12	0.643				0.643
C5-13	0.643	0.814			1.457
C5-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C5-15	0.643	0.814			1.457
C5-16	0.643	0.814	0.671		2.128
C5-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C6-1	0.643		0.671		1.314
C6-2			0.671	0.82	1.491
C6-3	0.643				0.643
C6-4			0.671		0.671
C6-5			0.671	0.82	1.491
C6-6	-	-	-	-	-
C6-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C6-8	0.643	0.814		0.82	2.277
C6-9					
C6-10			0.671	0.82	1.491
C6-11			0.671		0.671
C6-12					
C6-13			0.671		0.671
C6-14	0.643		0.671		1.314
C6-15	0.643		0.671		1.314
C6-16	0.643		0.671		1.314
C6-17	0.643		0.671		1.314

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکترون

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C7-1	0.643		0.671		1.314
C7-2			0.671		0.671
C7-3	0.643				0.643
C7-4			0.671		0.671
C7-5			0.671		0.671
C7-6			0.671		0.671
C7-7	-	-	-	-	-
C7-8				0.82	0.82
C7-9					
C7-10			0.671	0.82	1.491
C7-11			0.671		0.671
C7-12					
C7-13			0.671		0.671
C7-14	0.643		0.671		1.314
C7-15			0.671		0.671
C7-16			0.671		0.671
C7-17	0.643		0.671		1.314

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C8-1	0.643		0.671		1.314
C8-2			0.671		0.671
C8-3	0.643				0.643
C8-4			0.671		0.671
C8-5			0.671		0.671
C8-6		0.814	0.671		1.485
C8-7	0.643	0.814	0.671		2.128
C8-8	-	-	-	-	-
C8-9			0.671		0.671
C8-10			0.671		0.671
C8-11			0.671		0.671
C8-12					
C8-13			0.671		0.671
C8-14	0.643		0.671		1.314
C8-15	0.643		0.671		1.314
C8-16	0.643		0.671		1.314
C8-17	0.643		0.671		1.314

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C9-1	0.643	0.814	0.671		2.128
C9-2			0.671	0.82	1.491
C9-3	0.643	0.814			1.457
C9-4			0.671		0.671
C9-5			0.671	0.82	1.491
C9-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C9-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C9-8	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C9-9	-	-	-	-	-
C9-10		0.814	0.671	0.82	2.305
C9-11			0.671		0.671
C9-12	0.643				0.643
C9-13	0.643	0.814	0.671		2.128
C9-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C9-15		0.814	0.671		1.485
C9-16	0.643	0.814	0.671		2.128
C9-17	0.643	0.814	0.671		2.128

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکره

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C10-1	0.643		0.671		1.314
C10-2			0.671		0.671
C10-3	0.643	0.814			1.457
C10-4					
C10-5			0.671		0.671
C10-6	0.643	0.814			1.457
C10-7	0.643	0.814			1.457
C10-8	0.643	0.814			1.457
C10-9	0.643				0.643
C10-10	-	-	-	-	-
C10-11	0.643		0.671		1.314
C10-12	0.643				0.643
C10-13	0.643	0.814			1.457
C10-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C10-15	0.643	0.814			1.457
C10-16	0.643	0.814	0.671		2.128
C10-17	0.643	0.814	0.671		2.128

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C11-1	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C11-2			0.671	0.82	1.491
C11-3	0.643	0.814		0.82	2.277
C11-4				0.82	0.82
C11-5			0.671	0.82	1.491
C11-6	0.643	0.814		0.82	2.277
C11-7	0.643	0.814		0.82	2.277
C11-8	0.643	0.814		0.82	2.277
C11-9	0.643	0.814		0.82	2.277
C11-10	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C11-11	-	-	-	-	-
C11-12	0.643				0.643
C11-13	0.643	0.814		0.82	2.277
C11-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C11-15	0.643	0.814		0.82	2.277
C11-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C11-17	0.643	0.814	0.671		2.128

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C12-1	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-2		0.814	0.671	0.82	2.305
C12-3	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-4			0.671	0.82	1.491
C12-5		0.814	0.671	0.82	2.305
C12-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-8	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-9		0.814	0.671	0.82	2.305
C12-10		0.814	0.671	0.82	2.305
C12-11		0.814	0.671	0.82	2.305
C12-12	-	-	-	-	-
C12-13	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-15	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C12-17	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکترون

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C13-1	0.643		0.671	0.82	2.134
C13-2			0.671	0.82	1.491
C13-3	0.643	0.814		0.82	2.277
C13-4			0.671	0.82	1.491
C13-5			0.671	0.82	1.491
C13-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C13-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C13-8	0.643	0.814		0.82	2.277
C13-9				0.82	0.82
C13-10			0.671	0.82	1.491
C13-11			0.671		0.671
C13-12	0.643				0.643
C13-13	-	-	-	-	-
C13-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C13-15	0.643		0.671		1.314
C13-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C13-17	0.643	0.814	0.671		2.128

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C14-1				0.82	0.82
C14-2				0.82	0.82
C14-3					
C14-4				0.82	0.82
C14-5				0.82	0.82
C14-6		0.814		0.82	1.634
C14-7		0.814		0.82	1.634
C14-8		0.814		0.82	1.634
C14-9				0.82	0.82
C14-10				0.82	0.82
C14-11					
C14-12					
C14-13					
C14-14	-	-	-	-	-
C14-15					
C14-16					
C14-17					

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C15-1	0.643		0.671	0.82	2.134
C15-2			0.671	0.82	1.491
C15-3	0.643	0.814		0.82	2.277
C15-4			0.671	0.82	1.491
C15-5			0.671	0.82	1.491
C15-6		0.814	0.671	0.82	2.305
C15-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C15-8		0.814		0.82	1.634
C15-9				0.82	0.82
C15-10		0.814	0.671	0.82	2.305
C15-11			0.671		0.671
C15-12					
C15-13		0.814	0.671		1.485
C15-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C15-15	-	-	-	-	-
C15-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C15-17	0.643	0.814	0.671		2.128

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکترون

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C16-1	0.643			0.82	1.463
C16-2			0.671	0.82	1.491
C16-3	0.643	0.814			1.457
C16-4				0.82	0.82
C16-5				0.82	0.82
C16-6		0.814		0.82	1.634
C16-7		0.814		0.82	1.634
C16-8		0.814		0.82	1.634
C16-9				0.82	0.82
C16-10				0.82	0.82
C16-11					
C16-12					
C16-13		0.814			0.814
C16-14	0.643	0.814	0.671		2.128
C16-15					
C16-16	-	-	-	-	-
C16-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4(-)	مجموع
C17-1	0.643		0.671	0.82	2.134
C17-2			0.671	0.82	1.491
C17-3	0.643	0.814		0.82	2.277
C17-4				0.82	0.82
C17-5			0.671	0.82	1.491
C17-6		0.814		0.82	1.634
C17-7		0.814		0.82	1.634
C17-8		0.814		0.82	1.634
C17-9				0.82	0.82
C17-10				0.82	0.82
C17-11				0.82	0.82
C17-12					
C17-13		0.814		0.82	1.634
C17-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C17-15				0.82	0.82
C17-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
C17-17	-	-	-	-	-

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الکتره

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
-	-	-	-				D1-1
0.064847	0.04078	0.023506	0.04003	0.064847	0.064847	1	D1-2
0.014371	0.030588	0.070506	0.009526	0.070506	0.070506	1	D1-3
0.057989	0.091762	0.035257	0.009736	0.091762	0.091762	1	D1-4
0.086479	0.04078	0.011755	0.030049	0.086479	0.086479	1	D1-5
0.028818	0.071368	0.035257	0.019997	0.035257	0.071368	0.494017	D1-6
0.007564	0.091762	0.035257	0.039995	0.035257	0.091762	0.384222	D1-7
0.021607	0.071386	0.058755	0.050011	0.058755	0.071386	0.823061	D1-8
0.043214	0.020393	0.058755	0.009736	0.058755	0.058755	1	D1-9
0.050425	0.010223	0.023494	0.050011	0.050425	0.050425	1	D1-10
0.050425	0.030635	0.023494	0.039995	0.050425	0.050425	1	D1-11
0.036054	0.071368	0.082228	0.070079	0.082228	0.082228	1	D1-12
0.036054	0.030588	0.035257	0.020033	0.036054	0.036054	1	D1-13
0.021607	0.050975	0.035199	0.009526	0.009526	0.050975	0.186876	D1-14
0.014396	0.010223	0.035257	0.020033	0.035257	0.035257	1	D1-15
0	0.030588	0.023506	0.009526	0.009526	0.030588	0.311429	D1-16
0	0.030588	0.011747	0.060308	0.060308	0.060308	1	D1-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.064847	0.04078	0.023506	0.04003	0.04003	0.064847	0.617299	D2-1
-	-	-	-				D2-2
0.079218	0.071368	0.094012	0.049556	0.094012	0.094012	1	D2-3
0.006858	0.050982	0.058763	0.030294	0.058763	0.058763	1	D2-4
0.021632	0	0.011751	0.009981	0.021632	0.021632	1	D2-5
0.036029	0.112148	0.058763	0.020033	0.058763	0.112148	0.523977	D2-6
0.057283	0.132541	0.058763	3.50E-05	0.058763	0.132541	0.443357	D2-7
0.043239	0.112166	0.082261	0.009981	0.082261	0.112166	0.733386	D2-8
0.021632	0.020386	0.082261	0.030294	0.082261	0.082261	1	D2-9
0.014422	0.051003	0.047	0.009981	0.047	0.051003	0.921514	D2-10
0.014422	0.010145	0.047	0.080025	0.080025	0.080025	1	D2-11
0.028793	0.030588	0.105734	0.110109	0.110109	0.110109	1	D2-12
0.028793	0.071368	0.058763	0.060063	0.060063	0.071368	0.841596	D2-13
0.086454	0.091754	0.011693	0.049556	0.060063	0.091754	0.654609	D2-14
0.05045	0.051003	0.058763	0.060063	0.060063	0.060063	1	D2-15
0.064847	0.071368	0	0.049556	0.049556	0.071368	0.694373	D2-16
0.064847	0.071368	0.035253	0.100338	0.100338	0.100338	1	D2-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.014371	0.030588	0.070506	0.009526	0.030588	0.070506	0.433835	D3-1
0.079218	0.071368	0.094012	0.049556	0.079218	0.094012	0.842637	D3-2
-	-	-	-				D3-3
0.07236	0.12235	0.035249	0.019262	0.12235	0.12235	1	D3-4
0.10085	0.071368	0.082261	0.039575	0.10085	0.10085	1	D3-5
0.043189	0.04078	0.035249	0.029523	0.043189	0.043189	1	D3-6
0.021935	0.061173	0.035249	0.049521	0.021935	0.061173	0.358573	D3-7
0.035978	0.040798	0.011751	0.059537	0.035978	0.059537	0.604296	D3-8
0.057585	0.050982	0.011751	0.019262	0.057585	0.057585	1	D3-9
0.064796	0.020365	0.047012	0.059537	0.064796	0.064796	1	D3-10
0.064796	0.061223	0.047012	0.030469	0.064796	0.064796	1	D3-11
0.050425	0.011722	0.011722	0.060553	0.060553	0.060553	1	D3-12
0.050425	0	0.035249	0.010507	0.050425	0.050425	1	D3-13
0.007236	0.020386	0.105705	0	0	0.105705	0	D3-14
0.028767	0.020365	0.035249	0.010507	0.028767	0.035249	0.816108	D3-15
0.014371	0	0.094012	0	0.014371	0.094012	0.152863	D3-16
0.014371	0	0.058759	0.050782	0.050782	0.058759	0.864242	D3-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.057989	0.091762	0.035257	0.009736	0.009736	0.091762	0.106101	D4-1
0.006858	0.050982	0.058763	0.030294	0.006858	0.058763	0.116706	D4-2
0.07236	0.12235	0.035249	0.019262	0.07236	0.12235	0.591418	D4-3
-	-	-	-	-	-	-	D4-4
0.02849	0.050982	0.047012	0.020313	0.02849	0.050982	0.558825	D4-5
0.029171	0.16313	0	0.010261		0.16313	0	D4-6
0.050425	0.183523	0	0.030259		0.183523	0	D4-7
0.036382	0.163148	0.023498	0.040275	0.023498	0.163148	0.144029	D4-8
0.014775	0.071368	0.023498	0	0.023498	0.071368	0.329251	D4-9
0.007564	0.101985	0.011763	0.040275		0.101985	0	D4-10
0.007564	0.061127	0.011763	0.049731	0.049731	0.061127	0.813568	D4-11
0.021935	0.020393	0.046971	0.079815	0.079815	0.079815	1	D4-12
0.021935	0.12235	0	0.029769		0.12235	0	D4-13
0.079596	0.142736	0.070456	0.019262	0.019262	0.142736	0.134948	D4-14
0.043592	0.101985	0	0.029769	0.029769	0.101985	0.291896	D4-15
0.057989	0.12235	0.058763	0.019262	0.019262	0.12235	0.157434	D4-16
0.057989	0.12235	0.02351	0.070044	0.070044	0.12235	0.572489	D4-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.086479	0.04078	0.011755	0.030049	0.030049	0.086479	0.347472	D5-1
0.021632	0	0.011751	0.009981		0.021632	0	D5-2
0.10085	0.071368	0.082261	0.039575	0.082261	0.10085	0.815677	D5-3
0.02849	0.050982	0.047012	0.020313	0.050982	0.050982	1	D5-4
-	-	-	-	-	-	-	D5-5
0.057661	0.112148	0.047012	0.010051	0.047012	0.112148	0.419196	D5-6
0.078915	0.132541	0.047012	0.009946	0.047012	0.132541	0.354698	D5-7
0.064872	0.112166	0.07051	0.019962	0.07051	0.112166	0.628622	D5-8
0.043265	0.020386	0.07051	0.020313	0.07051	0.07051	1	D5-9
0.036054	0.051003	0.035249	0.019962	0.035249	0.051003	0.691116	D5-10
0.036054	0.010145	0.035249	0.070044	0.070044	0.070044	1	D5-11
0.050425	0.030588	0.093983	0.100128	0.100128	0.100128	1	D5-12
0.050425	0.071368	0.047012	0.050081	0.050081	0.071368	0.701729	D5-13
0.108086	0.091754	0.023444	0.039575	0.039575	0.108086	0.366144	D5-14
0.072083	0.051003	0.047012	0.050081	0.050081	0.072083	0.694769	D5-15
0.086479	0.071368	0.011751	0.039575	0.039575	0.086479	0.457626	D5-16
0.086479	0.071368	0.023502	0.090356	0.090356	0.090356	1	D5-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.028818	0.071368	0.035257	0.019997	0.071368	0.071368	1	D6-1
0.036029	0.112148	0.058763	0.020033	0.112148	0.112148	1	D6-2
0.043189	0.04078	0.035249	0.029523	0.04078	0.043189	0.944222	D6-3
0.029171	0.16313	0	0.010261	0.16313	0.16313	1	D6-4
0.057661	0.112148	0.047012	0.010051	0.112148	0.112148	1	D6-5
-	-	-	-	-	-	-	D6-6
0.021254	0.020393	0	0.019997		0.021254	0	D6-7
0.007211	1.78E-05	0.023498	0.030014	0.023498	0.030014	0.782901	D6-8
0.014396	0.091762	0.023498	0.010261	0.091762	0.091762	1	D6-9
0.021607	0.061145	0.011763	0.030014	0.061145	0.061145	1	D6-10
0.021607	0.102003	0.011763	0.059992	0.102003	0.102003	1	D6-11
0.007236	0.142736	0.046971	0.090076	0.142736	0.142736	1	D6-12
0.007236	0.04078	0	0.04003	0.04078	0.04078	1	D6-13
0.050425	0.020393	0.070456	0.029523	0.029523	0.070456	0.419027	D6-14
0.014422	0.061145	0	0.04003	0.061145	0.061145	1	D6-15
0.028818	0.04078	0.058763	0.029523	0.04078	0.058763	0.693974	D6-16
0.028818	0.04078	0.02351	0.080305	0.080305	0.080305	1	D6-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.007564	0.091762	0.035257	0.039995	0.091762	0.091762	1	D7-1
0.057283	0.132541	0.058763	3.50E-05	0.132541	0.132541	1	D7-2
0.021935	0.061173	0.035249	0.049521	0.061173	0.061173	1	D7-3
0.050425	0.183523	0	0.030259	0.183523	0.183523	1	D7-4
0.078915	0.132541	0.047012	0.009946	0.132541	0.132541	1	D7-5
0.021254	0.020393	0	0.019997	0.021254	0.021254	1	D7-6
-	-	-	-	-	-	-	D7-7
0.014043	0.020376	0.023498	0.010016	0.023498	0.023498	1	D7-8
0.03565	0.112155	0.023498	0.030259	0.112155	0.112155	1	D7-9
0.042861	0.081538	0.011763	0.010016	0.081538	0.081538	1	D7-10
0.042861	0.122396	0.011763	0.07999	0.122396	0.122396	1	D7-11
0.02849	0.16313	0.046971	0.110074	0.16313	0.16313	1	D7-12
0.02849	0.061173	0	0.060028	0.061173	0.061173	1	D7-13
0.029171	0.040787	0.070456	0.049521	0.049521	0.070456	0.702864	D7-14
0.006833	0.081538	0	0.060028	0.081538	0.081538	1	D7-15
0.007564	0.061173	0.058763	0.049521	0.061173	0.061173	1	D7-16
0.007564	0.061173	0.02351	0.100303	0.100303	0.100303	1	D7-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.021607	0.071386	0.058755	0.050011	0.071386	0.071386	1	D8-1
0.043239	0.112166	0.082261	0.009981	0.112166	0.112166	1	D8-2
0.035978	0.040798	0.011751	0.059537	0.059537	0.059537	1	D8-3
0.036382	0.059537	0.023498	0.040275	0.059537	0.059537	1	D8-4
0.064872	0.112166	0.07051	0.019962	0.112166	0.112166	1	D8-5
0.007211	1.78E-05	0.023498	0.030014	0.030014	0.030014	1	D8-6
0.014043	0.020376	0.023498	0.010016	0.010016	0.023498	0.426249	D8-7
-	-	-	-	-	-	-	D8-8
0.021607	0.091779	0	0.040275	0.091779	0.091779	1	D8-9
0.028818	0.061162	0.035261	0	0.061162	0.061162	1	D8-10
0.028818	0.102021	0.035261	0.090006	0.102021	0.102021	1	D8-11
0.014447	0.142754	0.023473	0.12009	0.142754	0.142754	1	D8-12
0.014447	0.040798	0.023498	0.070044	0.070044	0.070044	1	D8-13
0.043214	0.020411	0.093954	0.059537	0.059537	0.093954	0.633682	D8-14
0.007211	0.061162	0.023498	0.070044	0.070044	0.070044	1	D8-15
0.021607	0.040798	0.082261	0.059537	0.059537	0.082261	0.723757	D8-16
0.021607	0.040798	0.047008	0.110319	0.110319	0.110319	1	D8-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.043214	0.020393	0.058755	0.009736	0.009736	0.058755	0.165705	D9-1
0.021632	0.020386	0.082261	0.030294	0.021632	0.082261	0.262968	D9-2
0.057585	0.050982	0.011751	0.019262	0.019262	0.057585	0.334497	D9-3
0.014775	0.071368	0.023498	0	0.071368	0.071368	1	D9-4
0.043265	0.020386	0.07051	0.020313	0.043265	0.07051	0.613601	D9-5
0.014396	0.091762	0.023498	0.010261		0.091762	0	D9-6
0.03565	0.112155	0.023498	0.030259		0.112155	0	D9-7
0.021607	0.091779	0	0.040275		0.091779	0	D9-8
-	-	-	-	-	-	-	D9-9
0.007211	0.030617	0.035261	0.040275	0.007211	0.040275	0.179044	D9-10
0.007211	0.010241	0.035261	0.049731	0.049731	0.049731	1	D9-11
0.00716	0.050975	0.023473	0.079815	0.079815	0.079815	1	D9-12
0.00716	0.050982	0.023498	0.029769	0.029769	0.050982	0.583912	D9-13
0.064821	0.071368	0.093954	0.019262	0.019262	0.093954	0.205015	D9-14
0.028818	0.030617	0.023498	0.029769	0.029769	0.030617	0.972303	D9-15
0.043214	0.050982	0.082261	0.019262	0.019262	0.082261	0.234157	D9-16
0.043214	0.050982	0.047008	0.070044	0.070044	0.070044	1	D9-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.050425	0.010223	0.023494	0.050011	0.050011	0.050425	0.99179	D10-1
0.014422	0.051003	0.047	0.009981	0.051003	0.051003	1	D10-2
0.064796	0.020365	0.047012	0.059537	0.059537	0.064796	0.918838	D10-3
0.007564	0.101985	0.011763	0.040275	0.101985	0.101985	1	D10-4
0.036054	0.051003	0.035249	0.019962	0.051003	0.051003	1	D10-5
0.021607	0.061145	0.011763	0.030014	0.030014	0.061145	0.490866	D10-6
0.042861	0.081538	0.011763	0.010016	0.011763	0.081538	0.144264	D10-7
0.028818	0.061162	0.035261	0	0.035261	0.061162	0.576518	D10-8
0.007211	0.030617	0.035261	0.040275	0.040275	0.040275	1	D10-9
-	-	-	-	-	-	-	D10-10
0	0.040858	0	0.090006	0.090006	0.090006	1	D10-11
0.014371	0.081592	0.058734	0.12009	0.12009	0.12009	1	D10-12
0.014371	0.020365	0.011763	0.070044	0.070044	0.070044	1	D10-13
0.072032	0.040751	0.058693	0.059537	0.059537	0.072032	0.826535	D10-14
0.036029	0	0.011763	0.070044	0.070044	0.070044	1	D10-15
0.050425	0.020365	0.047	0.059537	0.059537	0.059537	1	D10-16
0.050425	0.020365	0.011747	0.110319	0.110319	0.110319	1	D10-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.050425	0.030635	0.023494	0.039995		0.050425	0	D11-1
0.014422	0.010145	0.047	0.080025	0.014422	0.080025	0.180219	D11-2
0.064796	0.061223	0.047012	0.030469	0.047012	0.064796	0.725539	D11-3
0.007564	0.061127	0.011763	0.049731	0.061127	0.061127	1	D11-4
0.036054	0.010145	0.035249	0.070044	0.036054	0.070044	0.514734	D11-5
0.021607	0.102003	0.011763	0.059992	0.011763	0.102003	0.11532	D11-6
0.042861	0.122396	0.011763	0.07999	0.011763	0.122396	0.096106	D11-7
0.028818	0.102021	0.035261	0.090006	0.035261	0.102021	0.345625	D11-8
0.007211	0.010241	0.035261	0.049731	0.035261	0.049731	0.709035	D11-9
0	0.040858	0	0.090006		0.090006	0	D11-10
-	-	-	-	-	-	-	D11-11
0.014371	0.040733	0.058734	0.030084	0.058734	0.058734	1	D11-12
0.014371	0.061223	0.011763	0.019962	0.011763	0.061223	0.192134	D11-13
0.072032	0.081609	0.058693	0.030469		0.081609	0	D11-14
0.036029	0.040858	0.011763	0.019962	0.011763	0.040858	0.2879	D11-15
0.050425	0.061223	0.047	0.030469		0.061223	0	D11-16
0.050425	0.061223	0.011747	0.020313	0.020313	0.061223	0.331787	D11-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.036054	0.071368	0.082228	0.070079		0.082228	0	D12-1
0.028793	0.030588	0.105734	0.110109	0.028793	0.110109	0.261495	D12-2
0.050425	0.101956	0.011722	0.060553		0.101956	0	D12-3
0.021935	0.020393	0.046971	0.079815	0.021935	0.079815	0.274823	D12-4
0.050425	0.030588	0.093983	0.100128	0.050425	0.100128	0.503605	D12-5
0.007236	0.142736	0.046971	0.090076		0.142736	0	D12-6
0.02849	0.16313	0.046971	0.110074		0.16313	0	D12-7
0.014447	0.142754	0.023473	0.12009		0.142754	0	D12-8
0.00716	0.050975	0.023473	0.079815	0.00716	0.079815	0.089707	D12-9
0.014371	0.081592	0.058734	0.12009	0.014371	0.12009	0.119669	D12-10
0.014371	0.040733	0.058734	0.030084	0.014371	0.058734	0.244679	D12-11
-	-	-	-	-	-	-	D12-12
0	0.101956	0.046971	0.050046		0.101956	0	D12-13
0.057661	0.122343	0.117427	0.060553		0.122343	0	D12-14
0.021658	0.081592	0.046971	0.050046		0.081592	0	D12-15
0.036054	0.101956	0.105734	0.060553		0.105734	0	D12-16
0.036054	0.101956	0.070481	0.009771		0.101956	0	D12-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الکتره

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.036054	0.030588	0.035257	0.020033	0.030588	0.036054	0.848394	D13-1
0.028793	0.071368	0.058763	0.060063	0.071368	0.071368	1	D13-2
0.050425	0	0.035249	0.010507	0.035249	0.050425	0.699038	D13-3
0.021935	0.12235	0	0.029769	0.12235	0.12235	1	D13-4
0.050425	0.071368	0.047012	0.050081	0.071368	0.071368	1	D13-5
0.007236	0.04078	0	0.04003		0.04078	0	D13-6
0.02849	0.061173	0	0.060028		0.061173	0	D13-7
0.014447	0.040798	0.023498	0.070044	0.023498	0.070044	0.335475	D13-8
0.00716	0.050982	0.023498	0.029769	0.050982	0.050982	1	D13-9
0.014371	0.020365	0.011763	0.070044	0.020365	0.070044	0.290746	D13-10
0.014371	0.061223	0.011763	0.019962	0.061223	0.061223	1	D13-11
0	0.101956	0.046971	0.050046	0.101956	0.101956	1	D13-12
-	-	-	-	-	-	-	D13-13
0.057661	0.020386	0.070456	0.010507		0.070456	0	D13-14
0.021658	0.020365	0	0	0.020365	0.021658	0.940299	D13-15
0.036054	0	0.058763	0.010507		0.058763	0	D13-16
0.036054	0	0.02351	0.040275	0.040275	0.040275	1	D13-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.021607	0.050975	0.035199	0.009526	0.050975	0.050975	1	D14-1
0.086454	0.091754	0.011693	0.049556	0.091754	0.091754	1	D14-2
0.007236	0.020386	0.105705	0	0.105705	0.105705	1	D14-3
0.079596	0.142736	0.070456	0.019262	0.142736	0.142736	1	D14-4
0.108086	0.091754	0.023444	0.039575	0.108086	0.108086	1	D14-5
0.050425	0.020393	0.070456	0.029523	0.070456	0.070456	1	D14-6
0.029171	0.040787	0.070456	0.049521	0.070456	0.070456	1	D14-7
0.043214	0.020411	0.093954	0.059537	0.093954	0.093954	1	D14-8
0.064821	0.071368	0.093954	0.019262	0.093954	0.093954	1	D14-9
0.072032	0.040751	0.058693	0.059537	0.072032	0.072032	1	D14-10
0.072032	0.081609	0.058693	0.030469	0.081609	0.081609	1	D14-11
0.057661	0.122343	0.117427	0.060553	0.122343	0.122343	1	D14-12
0.057661	0.020386	0.070456	0.010507	0.070456	0.070456	1	D14-13
-	-	-	-	-	-	-	D14-14
0.036003	0.040751	0.070456	0.010507	0.070456	0.070456	1	D14-15
0.021607	0.020386	0.011693	0	0.021607	0.021607	1	D14-16
0.021607	0.020386	0.046946	0.050782	0.050782	0.050782	1	D14-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0.014396	0.010223	0.035257	0.020033	0.010223	0.035257	0.289957	D15-1
0.05045	0.051003	0.058763	0.060063	0.051003	0.060063	0.849158	D15-2
0.028767	0.020365	0.035249	0.010507	0.035249	0.035249	1	D15-3
0.043592	0.101985	0	0.029769	0.101985	0.101985	1	D15-4
0.072083	0.051003	0.047012	0.050081	0.072083	0.072083	1	D15-5
0.014422	0.061145	0	0.04003	0.014422	0.061145	0.235866	D15-6
0.006833	0.081538	0	0.060028		0.081538	0	D15-7
0.007211	0.061162	0.023498	0.070044	0.023498	0.070044	0.335475	D15-8
0.028818	0.030617	0.023498	0.029769	0.030617	0.030617	1	D15-9
0.036029	0	0.011763	0.070044	0.036029	0.070044	0.514377	D15-10
0.036029	0.040858	0.011763	0.019962	0.040858	0.040858	1	D15-11
0.021658	0.081592	0.046971	0.050046	0.081592	0.081592	1	D15-12
0.021658	0.020365	0	0	0.021658	0.021658	1	D15-13
0.036003	0.040751	0.070456	0.010507		0.070456	0	D15-14
-	-	-	-	-	-	-	D15-15
0.014396	0.020365	0.058763	0.010507		0.058763	0	D15-16
0.014396	0.020365	0.02351	0.040275	0.040275	0.040275	1	D15-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0	0.030588	0.023506	0.009526	0.030588	0.030588	1	D16-1
0.064847	0.071368	0	0.049556	0.071368	0.071368	1	D16-2
0.014371	0	0.094012	0	0.094012	0.094012	1	D16-3
0.057989	0.12235	0.058763	0.019262	0.12235	0.12235	1	D16-4
0.086479	0.071368	0.011751	0.039575	0.086479	0.086479	1	D16-5
0.028818	0.04078	0.058763	0.029523	0.058763	0.058763	1	D16-6
0.007564	0.061173	0.058763	0.049521	0.058763	0.061173	0.960604	D16-7
0.021607	0.040798	0.082261	0.059537	0.082261	0.082261	1	D16-8
0.043214	0.050982	0.082261	0.019262	0.082261	0.082261	1	D16-9
0.050425	0.020365	0.047	0.059537	0.050425	0.059537	0.846952	D16-10
0.050425	0.061223	0.047	0.030469	0.061223	0.061223	1	D16-11
0.036054	0.101956	0.105734	0.060553	0.105734	0.105734	1	D16-12
0.036054	0	0.058763	0.010507	0.058763	0.058763	1	D16-13
0.021607	0.020386	0.011693	0	0	0.021607	0	D16-14
0.014396	0.020365	0.058763	0.010507	0.058763	0.058763	1	D16-15
#	#	#	#				D16-16
0	0	0.035253	0.050782	0.050782	0.050782	1	D16-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	
0	0.030588	0.011747	0.060308	0.030588	0.060308	0.507196	D17-1
0.064847	0.071368	0.035253	0.100338	0.071368	0.100338	0.711276	D17-2
0.014371	0	0.058759	0.050782	0.058759	0.058759	1	D17-3
0.057989	0.12235	0.02351	0.070044	0.12235	0.12235	1	D17-4
0.086479	0.071368	0.023502	0.090356	0.086479	0.090356	0.957092	D17-5
0.028818	0.04078	0.02351	0.080305	0.028818	0.080305	0.358857	D17-6
0.007564	0.061173	0.02351	0.100303	0.02351	0.100303	0.23439	D17-7
0.021607	0.040798	0.047008	0.110319	0.047008	0.110319	0.42611	D17-8
0.043214	0.050982	0.047008	0.070044	0.050982	0.070044	0.727857	D17-9
0.050425	0.020365	0.011747	0.110319	0.050425	0.110319	0.457084	D17-10
0.050425	0.061223	0.011747	0.020313	0.061223	0.061223	1	D17-11
0.036054	0.101956	0.070481	0.009771	0.101956	0.101956	1	D17-12
0.036054	0	0.02351	0.040275	0.036054	0.040275	0.895196	D17-13
0.021607	0.020386	0.046946	0.050782		0.050782	0	D17-14
0.014396	0.020365	0.02351	0.040275	0.02351	0.040275	0.583737	D17-15
0	0	0.035253	0.050782		0.050782	0	D17-16
-	-	-	-				D17-17

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الگوریتمی

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M1-2			0.671	0.82	1.491
M1-3	0.643	0.814			1.457
M1-4				0.82	0.82
M1-5			0.671	0.82	1.491
M1-6		0.814		0.82	1.634
M1-7	0.643	0.814		0.82	2.277
M1-8		0.814		0.82	1.634
M1-9	0.643			0.82	1.463
M1-10		0.814	0.671	0.82	2.305
M1-11					0
M1-12					0
M1-13		0.814			0.814
M1-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M1-15		0.814			0.814
M1-16	0.643	0.814			1.457
M1-17	0.643				0.643

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M2-1	0.643	0.814			1.457
M2-3	0.643	0.814			1.457
M2-4					0
M2-5			0.671		0.671
M2-6	0.643	0.814			1.457
M2-7		0.814		0.82	1.634
M2-8	0.643	0.814		0.82	2.277
M2-9		0.814		0.82	1.634
M2-10		0.814	0.671	0.82	2.305
M2-11	0.643	0.814			1.457
M2-12	0.643				0.643
M2-13		0.814			0.814
M2-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M2-15	0.643	0.814			1.457
M2-16	0.643	0.814	0.671		2.128
M2-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M3-1			0.671	0.82	1.491
M3-2			0.671	0.82	1.491
M3-4			0.671	0.82	1.491
M3-5			0.671	0.82	1.491
M3-6		0.814	0.671	0.82	2.305
M3-7		0.814	0.671	0.82	2.305
M3-8			0.671	0.82	1.491
M3-9			0.671	0.82	1.491
M3-10			0.671	0.82	1.491
M3-11			0.671		0.671
M3-12			0.671		0.671
M3-13		0.814			0.814
M3-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M3-15			0.671		0.671
M3-16		0.814	0.671	0.82	2.305
M3-17		0.814	0.671		1.485

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکره فازی

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M4-1	0.643	0.814	0.671		2.128
M4-2	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M4-3	0.643	0.814			1.457
M4-5		0.814	0.671	0.82	2.305
M4-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M4-7	0.643	0.814		0.82	2.277
M4-8	0.643	0.814		0.82	2.277
M4-9	0.643	0.814		0.82	2.277
M4-10	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M4-11	0.643	0.814	0.671		2.128
M4-12	0.643	0.814			1.457
M4-13	0.643	0.814			1.457
M4-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M4-15	0.643	0.814	0.671		2.128
M4-16	0.643	0.814	0.671		2.128
M4-17	0.643	0.814	0.671		2.128

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M5-1	0.643	0.814			1.457
M5-2	0.643	0.814		0.82	2.277
M5-3	0.643	0.814			1.457
M5-4	0.643				0.643
M5-6	0.643	0.814			1.457
M5-7	0.643	0.814		0.82	2.277
M5-8	0.643	0.814		0.82	2.277
M5-9	0.643	0.814		0.82	2.277
M5-10	0.643	0.814		0.82	2.277
M5-11	0.643	0.814			1.457
M5-12	0.643				0.643
M5-13	0.643	0.814			1.457
M5-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M5-15	0.643	0.814			1.457
M5-16	0.643	0.814	0.671		2.128
M5-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M6-1	0.643		0.671		1.314
M6-2			0.671	0.82	1.491
M6-3	0.643				0.643
M6-4			0.671	0.82	1.491
M6-5			0.671	0.82	1.491
M6-7	0.643	0.814		0.82	2.277
M6-8	0.643			0.82	1.463
M6-9				0.82	0.82
M6-10			0.671	0.82	1.491
M6-11			0.671		0.671
M6-12					0
M6-13					0
M6-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M6-15	0.643		0.671		1.314
M6-16	0.643		0.671		1.314
M6-17	0.643		0.671		1.314

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکترون فازی

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M7-1			0.671		0.671
M7-2			0.671		0.671
M7-3	0.643				0.643
M7-4			0.671		0.671
M7-5			0.671		0.671
M7-6			0.671		0.671
M7-8				0.82	0.82
M7-9			0.671		0.671
M7-10			0.671	0.82	1.491
M7-11			0.671		0.671
M7-12					0
M7-13					0
M7-14	0.643		0.671		1.314
M7-15			0.671		0.671
M7-16			0.671		0.671
M7-17			0.671		0.671

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M8-1	0.643	0.814	0.671		2.128
M8-2			0.671		0.671
M8-3	0.643	0.814			1.457
M8-4			0.671		0.671
M8-5			0.671		0.671
M8-6	0.643	0.814	0.671		2.128
M8-7	0.643	0.814	0.671		2.128
M8-9			0.671		0.671
M8-10		0.814	0.671	0.82	2.305
M8-11			0.671		0.671
M8-12					0
M8-13		0.814			0.814
M8-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M8-15	0.643	0.814	0.671		2.128
M8-16	0.643	0.814	0.671		2.128
M8-17	0.643	0.814	0.671		2.128

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M9-1	0.643	0.814	0.671		2.128
M9-2	0.643		0.671		1.314
M9-3	0.643	0.814			1.457
M9-4			0.671		0.671
M9-5			0.671		0.671
M9-6	0.643	0.814	0.671		2.128
M9-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M9-8	0.643	0.814		0.82	2.277
M9-10		0.814	0.671	0.82	2.305
M9-11	0.643	0.814	0.671		2.128
M9-12	0.643				0.643
M9-13	0.643	0.814			1.457
M9-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M9-15	0.643	0.814	1.671		3.128
M9-16	0.643	0.814	2.671		4.128
M9-17	0.643	0.814	3.671		5.128

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکره فازی

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M10-1	0.643				0.643
M10-2	0.643				0.643
M10-3	0.643	0.814			1.457
M10-4					0
M10-5			0.671		0.671
M10-6	0.643	0.814			1.457
M10-7	0.643	0.814			1.457
M10-8	0.643			0.82	1.463
M10-9	0.643				0.643
M10-11	0.643				0.643
M10-12	0.643				0.643
M10-13	0.643	0.814			1.457
M10-14	0.643	0.814	0.671		2.128
M10-15	0.643	0.814			1.457
M10-16	0.643	0.814	0.671		2.128
M10-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M11-1	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M11-2			0.671	0.82	1.491
M11-3	0.643	0.814		0.82	2.277
M11-4			0.671	0.82	1.491
M11-5			0.671	0.82	1.491
M11-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M11-7	0.643	0.814		0.82	2.277
M11-8	0.643	0.814		0.82	2.277
M11-9		0.814		0.82	1.634
M11-10		0.814	0.671	0.82	2.305
M11-12	0.643				0.643
M11-13		0.814		0.82	1.634
M11-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M11-15	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M11-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M11-17	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M12-1	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-2			0.671	0.82	1.491
M12-3	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-4			0.671	0.82	1.491
M12-5		0.814	0.671	0.82	2.305
M12-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-8	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-9		0.814	0.671	0.82	2.305
M12-10		0.814	0.671	0.82	2.305
M12-11		0.814	0.671	0.82	2.305
M12-13		0.814		0.82	1.634
M12-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-15	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M12-17	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکترون فازی

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M13-1	0.643		0.671	0.82	2.134
M13-2	0.643		0.671	0.82	2.134
M13-3	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M13-4	0.643		0.671	0.82	2.134
M13-5			0.671	0.82	1.491
M13-6	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M13-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M13-8	0.643		0.671	0.82	2.134
M13-9			0.671	0.82	1.491
M13-10			0.671	0.82	1.491
M13-11	0.643		0.671		1.314
M13-12	0.643		0.671		1.314
M13-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M13-15	0.643		0.671	0.82	2.134
M13-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M13-17	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M14-1				0.82	0.82
M14-2				0.82	0.82
M14-3				0.82	0.82
M14-4				0.82	0.82
M14-5				0.82	0.82
M14-6				0.82	0.82
M14-7		0.814		0.82	1.634
M14-8				0.82	0.82
M14-9				0.82	0.82
M14-10				0.82	0.82
M14-11					0
M14-12					0
M14-13					0
M14-15					0
M14-16				0.82	0.82
M14-17					0

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M15-1	0.643		0.671	0.82	2.134
M15-2			0.671	0.82	1.491
M15-3	0.643	0.814		0.82	2.277
M15-4			0.671	0.82	1.491
M15-5			0.671	0.82	1.491
M15-6		0.814	0.671	0.82	2.305
M15-7	0.643	0.814		0.82	2.277
M15-8				0.82	0.82
M15-9	0.643			0.82	1.463
M15-10		0.814	0.671	0.82	2.305
M15-11			0.671		0.671
M15-12					0
M15-13				0.82	0.82
M15-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M15-16	0.643	1.814		0.82	3.277
M15-17	0.643	2.814	0.671	0.82	4.948

✓ مجموعه‌های موافقت C تشکیل شده در روش الکره فازی

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M16-1	0.643			0.82	1.463
M16-2				0.82	0.82
M16-3	0.643	0.814		0.82	2.277
M16-4				0.82	0.82
M16-5				0.82	0.82
M16-6		0.814		0.82	1.634
M16-7	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M16-8				0.82	0.82
M16-9				0.82	0.82
M16-10				0.82	0.82
M16-11					0
M16-12					0
M16-13		0.814			0.814
M16-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M16-15					0
M16-17	0.643	0.814			1.457

	C1	C2	C3	C4	مجموع
M17-1	0.643		0.671	0.82	2.134
M17-2			0.671	0.82	1.491
M17-3	0.643	0.814		0.82	2.277
M17-4				0.82	0.82
M17-5			0.671	0.82	1.491
M17-6		0.814		0.82	1.634
M17-7	0.643	0.814		0.82	2.277
M17-8				0.82	0.82
M17-9				0.82	0.82
M17-10			0.671	0.82	1.491
M17-11					0
M17-12					0
M17-13		0.814		0.82	1.634
M17-14	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948
M17-15				0.82	0.82
M17-16	0.643	0.814	0.671	0.82	2.948

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الکره فازی

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.061204	0.0343	0.0142	0.0083	0.061204	0.061204	1	M1-2
0.013813	0.026	0.0497	0.0027	0.0497	0.0497	1	M1-3
0.101927	0.1377	0.0214	0	0.1377	0.1377	1	M1-4
0.129076	0.1846	0.0567	0.0065	0.1846	0.1846	1	M1-5
0.027149	0.0603	0.0214	0	0.027149	0.0603	0.45023	M1-6
0.006906	0.1378	0.0283	0.1905	0.0283	0.1905	0.148556	M1-7
0.027149	0	0.0355	0.1922	0.0355	0.1922	0.184703	M1-8
0.088353	0.0171	0.0283	0.1823	0.0283	0.1823	0.155239	M1-9
0.095259	0.0088	0.0356	0.1922	0.095259	0.1922	0.495626	M1-10
0.04763	0.0171	0.0214	0.0128	0.04763	0.04763	1	M1-11
0.033817	0.1205	0.0497	0.0306	0.1205	0.1205	1	M1-12
0.081447	0.026	0.0569	0.0056	0.081447	0.081447	1	M1-13
0.06811	0.1035	0.0711	0.0027	0.0027	0.1035	0.026087	M1-14
0.013574	0.0088	0.0214	0.0056	0.0214	0.0214	1	M1-15
0	0.026	0.0639	0.0027	0.0639	0.0639	1	M1-16
0	0.026	0.0072	0.0056	0.026	0.026	1	M1-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.061204	0.034369	0.014166	0.008337	0.014166	0.061204	0.231455	M2-1
0.075017	0.060296	0.063869	0.011032	0.063869	0.075017	0.851397	M2-3
0.040723	0.103408	0.035538	0.008249	0.103408	0.103408	1	M2-4
0.067872	0.060296	0.042497	0.00184	0.067872	0.067872	1	M2-5
0.034055	0.094665	0.035538	0.008249	0.035538	0.094665	0.375407	M2-6
0.06811	0.172146	0.042497	0.182222	0.06811	0.182222	0.373777	M2-7
0.034055	0.034369	0.049704	0.18391	0.049704	0.18391	0.270263	M2-8
0.027149	0.017184	0.042497	0.173973	0.042497	0.173973	0.244274	M2-9
0.034055	0.043112	0.021373	0.18391	0.034055	0.18391	0.185173	M2-10
0.013574	0.017184	0.035538	0.021105	0.035538	0.035538	1	M2-11
0.027387	0.086224	0.063869	0.038938	0.086224	0.086224	1	M2-12
0.020243	0.060296	0.071076	0.013931	0.071076	0.071076	1	M2-13
0.129314	0.137777	0.056911	0.011032	0.011032	0.137777	0.080071	M2-14
0.04763	0.043112	0.035538	0.013931	0.035538	0.04763	0.746132	M2-15
0.061204	0.060296	0.049704	0.011032	0.011032	0.061204	0.180249	M2-16
0.061204	0.060296	0.021373	0.013931	0.021373	0.061204	0.349209	M2-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.013813	0.025927	0.049704	0.002695	0.025927	0.049704	0.521636	M3-1
0.075017	0.060296	0.063869	0.011032	0.075017	0.075017	1	M3-2
0.11574	0.163704	0.028331	0.002783	0.163704	0.163704	1	M3-4
0.142889	0.120593	0.106366	0.009192	0.142889	0.142889	1	M3-5
0.040961	0.034369	0.028331	0.002783	0.040961	0.040961	1	M3-6
0.006906	0.11185	0.021373	0.193255	0.006906	0.193255	0.035737	M3-7
0.040961	0.025927	0.014166	0.194942	0.040961	0.194942	0.210121	M3-8
0.102166	0.043112	0.021373	0.185005	0.102166	0.185005	0.552231	M3-9
0.109072	0.017184	0.085242	0.194942	0.109072	0.194942	0.559509	M3-10
0.061442	0.043112	0.028331	0.010072	0.061442	0.061442	1	M3-11
0.04763	0.14652	0	0.027905	0.14652	0.14652	1	M3-12
0.095259	0	0.007207	0.002899	0.095259	0.095259	1	M3-13
0.054298	0.077481	0.12078	0		0.12078	0	M3-14
0.027387	0.017184	0.028331	0.002899	0.027387	0.028331	0.966681	M3-15
0.013813	0	0.113573	0	0.013813	0.113573	0.121619	M3-16
0.013813	0	0.042497	0.002899	0.013813	0.042497	0.325025	M3-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتمی فاز

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.101927	0.137777	0.021373	0	0	0.137777	0	M4-1
0.040723	0.103408	0.035538	0.008249		0.103408	0	M4-2
0.11574	0.163704	0.028331	0.002783	0.028331	0.163704	0.173062	M4-3
0.027149	0.043112	0.078035	0.006409	0.027149	0.078035	0.347907	M4-5
0.074779	0.198073	0	0		0.198073	0	M4-6
0.108834	0.275554	0.006959	0.190471	0.006959	0.275554	0.025255	M4-7
0.074779	0.137777	0.014166	0.192159	0.014166	0.192159	0.07372	M4-8
0.013574	0.120593	0.006959	0.182222	0.006959	0.182222	0.03819	M4-9
0.006668	0.14652	0.056911	0.192159		0.192159	0	M4-10
0.054298	0.120593	0	0.012856	0.012856	0.120593	0.106607	M4-11
0.06811	0.017184	0.028331	0.030688	0.030688	0.06811	0.450563	M4-12
0.020481	0.163704	0.035538	0.005682	0.035538	0.163704	0.217086	M4-13
0.170038	0.241185	0.092449	0.002783	0.002783	0.241185	0.011539	M4-14
0.088353	0.14652	0	0.005682	0.005682	0.14652	0.03878	M4-15
0.101927	0.163704	0.085242	0.002783	0.002783	0.163704	0.017	M4-16
0.101927	0.163704	0.014166	0.005682	0.005682	0.163704	0.034709	M4-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.129076	0.094665	0.056662	0.006497	0.056662	0.129076	0.438981	M5-1
0.067872	0.060296	0.042497	0.00184	0.042497	0.067872	0.626132	M5-2
0.142889	0.120593	0.106366	0.009192	0.106366	0.142889	0.744397	M5-3
0.027149	0.043112	0.078035	0.006409	0.078035	0.078035	1	M5-4
0.101927	0.154961	0.078035	0.006409	0.078035	0.154961	0.503577	M5-6
0.135983	0.232442	0.084993	0.184062	0.084993	0.232442	0.365652	M5-7
0.101927	0.094665	0.0922	0.18575	0.0922	0.18575	0.496366	M5-8
0.040723	0.077481	0.084993	0.175813	0.084993	0.175813	0.483428	M5-9
0.033817	0.103408	0.021124	0.18575	0.021124	0.18575	0.113723	M5-10
0.081447	0.077481	0.078035	0.019265	0.078035	0.081447	0.958112	M5-11
0.095259	0.025927	0.106366	0.037098	0.106366	0.106366	1	M5-12
0.04763	0.120593	0.113573	0.012091	0.113573	0.120593	0.941791	M5-13
0.197187	0.198073	0.014414	0.009192	0.009192	0.198073	0.046407	M5-14
0.115502	0.103408	0.078035	0.012091	0.078035	0.115502	0.675617	M5-15
0.129076	0.120593	0.007207	0.009192	0.009192	0.129076	0.071214	M5-16
0.129076	0.120593	0.063869	0.012091	0.063869	0.129076	0.494816	M5-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.027149	0.060296	0.021373	0	0.060296	0.060296	1	M6-1
0.034055	0.094665	0.035538	0.008249	0.094665	0.094665	1	M6-2
0.040961	0.034369	0.028331	0.002783	0.034369	0.040961	0.839054	M6-3
0.074779	0.198073	0	0	0.198073	0.198073	1	M6-4
0.101927	0.154961	0.078035	0.006409	0.154961	0.154961	1	M6-5
0.034055	0.077481	0.006959	0.190471	0.006959	0.190471	0.036536	M6-7
0	0.060296	0.014166	0.192159	0.060296	0.192159	0.313783	M6-8
0.061204	0.077481	0.006959	0.182222	0.077481	0.182222	0.4252	M6-9
0.06811	0.051553	0.056911	0.192159	0.06811	0.192159	0.354448	M6-10
0.020481	0.077481	0	0.012856	0.077481	0.077481	1	M6-11
0.006668	0.180889	0.028331	0.030688	0.180889	0.180889	1	M6-12
0.054298	0.034369	0.035538	0.005682	0.054298	0.054298	1	M6-13
0.095259	0.043112	0.092449	0.002783	0.002783	0.095259	0.029215	M6-14
0.013574	0.051553	0	0.005682	0.051553	0.051553	1	M6-15
0.027149	0.034369	0.085242	0.002783	0.034369	0.085242	0.403192	M6-16
0.027149	0.034369	0.014166	0.005682	0.034369	0.034369	1	M6-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم فازی

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.006906	0.137777	0.028331	0.190559	0.190559	0.190559	1	M7-1
0.06811	0.172146	0.042497	0.182222	0.182222	0.182222	1	M7-2
0.006906	0.11185	0.021373	0.193255	0.193255	0.193255	1	M7-3
0.108834	0.275554	0.006959	0.190471	0.275554	0.275554	1	M7-4
0.135983	0.232442	0.084993	0.184062	0.232442	0.232442	1	M7-5
0.034055	0.077481	0.006959	0.190471	0.190471	0.190471	1	M7-6
0.034055	0.137777	0.007207	0.001688	0.137777	0.137777	1	M7-8
0.095259	0.154961	0	0.008249	0.154961	0.154961	1	M7-9
0.102166	0.129034	0.063869	0.001688	0.102166	0.129034	0.791772	M7-10
0.054536	0.154961	0.006959	0.203327	0.203327	0.203327	1	M7-11
0.040723	0.25837	0.021373	0.22116	0.25837	0.25837	1	M7-12
0.088353	0.11185	0.02858	0.196154	0.196154	0.196154	1	M7-13
0.061204	0.034369	0.099407	0.193255	0.193255	0.193255	1	M7-14
0.020481	0.129034	0.006959	0.196154	0.196154	0.196154	1	M7-15
0.006906	0.11185	0.0922	0.193255	0.193255	0.193255	1	M7-16
0.006906	0.11185	0.021124	0.196154	0.196154	0.196154	1	M7-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.027149	0	0.035538	0.192247	0.192247	0.192247	1	M8-1
0.034055	0.034369	0.049704	0.18391	0.18391	0.18391	1	M8-2
0.040961	0.025927	0.014166	0.194942	0.194942	0.194942	1	M8-3
0.074779	0.137777	0.014166	0.192159	0.192159	0.192159	1	M8-4
0.101927	0.094665	0.0922	0.18575	0.18575	0.18575	1	M8-5
0	0.060296	0.014166	0.192159	0.192159	0.192159	1	M8-6
0.034055	0.137777	0.007207	0.001688	0.001688	0.137777	0.012252	M8-7
0.061204	0.017184	0.007207	0.009937	0.017184	0.061204	0.280773	M8-9
0.06811	0.008743	0.071076	0	0.06811	0.071076	0.958275	M8-10
0.020481	0.017184	0.014166	0.205015	0.205015	0.205015	1	M8-11
0.006668	0.120593	0.014166	0.222848	0.222848	0.222848	1	M8-12
0.054298	0.025927	0.021373	0.197841	0.197841	0.197841	1	M8-13
0.095259	0.103408	0.106614	0.194942	0.194942	0.194942	1	M8-14
0.013574	0.008743	0.014166	0.197841	0.197841	0.197841	1	M8-15
0.027149	0.025927	0.099407	0.194942	0.194942	0.194942	1	M8-16
0.027149	0.025927	0.028331	0.197841	0.197841	0.197841	1	M8-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.088353	0.017184	0.028331	0.18231	0.18231	0.18231	1	M9-1
0.027149	0.017184	0.042497	0.173973	0.173973	0.173973	1	M9-2
0.102166	0.043112	0.021373	0.185005	0.185005	0.185005	1	M9-3
0.013574	0.120593	0.006959	0.182222	0.182222	0.182222	1	M9-4
0.040723	0.077481	0.084993	0.175813	0.175813	0.175813	1	M9-5
0.061204	0.077481	0.006959	0.182222	0.182222	0.182222	1	M9-6
0.095259	0.154961	0	0.008249		0.154961	0	M9-7
0.061204	0.017184	0.007207	0.009937	0.007207	0.061204	0.117754	M9-8
0.006906	0.025927	0.063869	0.009937	0.006906	0.063869	0.108132	M9-10
0.040723	0	0.006959	0.195078	0.195078	0.195078	1	M9-11
0.054536	0.103408	0.021373	0.212911	0.212911	0.212911	1	M9-12
0.006906	0.043112	0.02858	0.187904	0.187904	0.187904	1	M9-13
0.156463	0.120593	0.099407	0.185005	0.185005	0.185005	1	M9-14
0.074779	0.025927	0.006959	0.187904	0.187904	0.187904	1	M9-15
0.088353	0.043112	0.0922	0.185005	0.185005	0.185005	1	M9-16
0.088353	0.043112	0.021124	0.187904	0.187904	0.187904	1	M9-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم فازی

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.095259	0.008743	0.035538	0.192247	0.192247	0.192247	1	M10-1
0.034055	0.043112	0.021373	0.18391	0.18391	0.18391	1	M10-2
0.109072	0.017184	0.085242	0.194942	0.194942	0.194942	1	M10-3
0.006668	0.14652	0.056911	0.192159	0.192159	0.192159	1	M10-4
0.033817	0.103408	0.021124	0.18575	0.18575	0.18575	1	M10-5
0.06811	0.051553	0.056911	0.192159	0.192159	0.192159	1	M10-6
0.102166	0.129034	0.063869	0.001688	0.063869	0.129034	0.494978	M10-7
0.06811	0.008743	0.071076	0	0.071076	0.071076	1	M10-8
0.006906	0.025927	0.063869	0.009937	0.063869	0.063869	1	M10-9
0.04763	0.025927	0.056911	0.205015	0.056911	0.205015	0.277594	M10-11
0.061442	0.129336	0.085242	0.222848	0.222848	0.222848	1	M10-12
0.013813	0.017184	0.092449	0.197841	0.197841	0.197841	1	M10-13
0.16337	0.094665	0.035538	0.194942	0.194942	0.194942	1	M10-14
0.081685	0	0.056911	0.197841	0.197841	0.197841	1	M10-15
0.095259	0.017184	0.028331	0.194942	0.194942	0.194942	1	M10-16
0.095259	0.017184	0.042745	0.197841	0.197841	0.197841	1	M10-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.04763	0.017184	0.021373	0.012768		0.04763	0	M11-1
0.013574	0.017184	0.035538	0.021105	0.017184	0.035538	0.483551	M11-2
0.061442	0.043112	0.028331	0.010072	0.028331	0.061442	0.4611	M11-3
0.054298	0.120593	0	0.012856	0.120593	0.120593	1	M11-4
0.081447	0.077481	0.078035	0.019265	0.081447	0.081447	1	M11-5
0.020481	0.077481	0	0.012856		0.077481	0	M11-6
0.054536	0.154961	0.006959	0.203327	0.006959	0.203327	0.034226	M11-7
0.020481	0.017184	0.014166	0.205015	0.014166	0.205015	0.069097	M11-8
0.040723	0	0.006959	0.195078	0.040723	0.195078	0.208754	M11-9
0.04763	0.025927	0.056911	0.205015	0.04763	0.205015	0.232323	M11-10
0.013813	0.103408	0.028331	0.017833	0.103408	0.103408	1	M11-12
0.033817	0.043112	0.035538	0.007173	0.035538	0.043112	0.824321	M11-13
0.11574	0.120593	0.092449	0.010072		0.120593	0	M11-14
0.034055	0.025927	0	0.007173		0.034055	0	M11-15
0.04763	0.043112	0.085242	0.010072		0.085242	0	M11-16
0.04763	0.043112	0.014166	0.007173		0.04763	0	M11-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.033817	0.120593	0.049704	0.030601		0.120593	0	M12-1
0.027387	0.086224	0.063869	0.038938	0.086224	0.086224	1	M12-2
0.04763	0.14652	0	0.027905		0.14652	0	M12-3
0.06811	0.017184	0.028331	0.030688	0.06811	0.06811	1	M12-4
0.095259	0.025927	0.106366	0.037098	0.095259	0.106366	0.89558	M12-5
0.006668	0.180889	0.028331	0.030688		0.180889	0	M12-6
0.040723	0.25837	0.021373	0.22116		0.25837	0	M12-7
0.006668	0.120593	0.014166	0.222848		0.222848	0	M12-8
0.054536	0.103408	0.021373	0.212911	0.054536	0.212911	0.256144	M12-9
0.061442	0.129336	0.085242	0.222848	0.061442	0.222848	0.275714	M12-10
0.013813	0.103408	0.028331	0.017833	0.013813	0.103408	0.133574	M12-11
0.04763	0.14652	0.007207	0.025006	0.04763	0.14652	0.325073	M12-13
0.101927	0.224001	0.12078	0.027905		0.224001	0	M12-14
0.020243	0.129336	0.028331	0.025006		0.129336	0	M12-15
0.033817	0.14652	0.113573	0.027905		0.14652	0	M12-16
0.033817	0.14652	0.042497	0.025006		0.14652	0	M12-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم فازی

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.081447	0.025927	0.056911	0.005594	0.025927	0.081447	0.318336	M13-1
0.020243	0.060296	0.071076	0.013931	0.060296	0.071076	0.848336	M13-2
0.095259	0	0.007207	0.002899		0.095259	0	M13-3
0.020481	0.163704	0.035538	0.005682	0.163704	0.163704	1	M13-4
0.04763	0.120593	0.113573	0.012091	0.120593	0.120593	1	M13-5
0.054298	0.034369	0.035538	0.005682		0.054298	0	M13-6
0.088353	0.11185	0.02858	0.196154		0.196154	0	M13-7
0.054298	0.025927	0.021373	0.197841	0.025927	0.197841	0.131052	M13-8
0.006906	0.043112	0.02858	0.187904	0.043112	0.187904	0.229436	M13-9
0.013813	0.017184	0.092449	0.197841	0.017184	0.197841	0.08686	M13-10
0.033817	0.043112	0.035538	0.007173	0.043112	0.043112	1	M13-11
0.04763	0.14652	0.007207	0.025006	0.14652	0.14652	1	M13-12
0.149557	0.077481	0.127987	0.002899	0.002899	0.149557	0.019384	M13-14
0.067872	0.017184	0.035538	0	0.017184	0.067872	0.253188	M13-15
0.081447	0	0.12078	0.002899		0.12078	0	M13-16
0.081447	0	0.049704	0		0.081447	0	M13-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.06811	0.103408	0.071076	0.002695	0.103408	0.103408	1	M14-1
0.129314	0.137777	0.056911	0.011032	0.137777	0.137777	1	M14-2
0.054298	0.077481	0.12078	0	0.12078	0.12078	1	M14-3
0.170038	0.241185	0.092449	0.002783	0.241185	0.241185	1	M14-4
0.197187	0.198073	0.014414	0.009192	0.198073	0.198073	1	M14-5
0.095259	0.043112	0.092449	0.002783	0.095259	0.095259	1	M14-6
0.061204	0.034369	0.099407	0.193255	0.099407	0.193255	0.514383	M14-7
0.095259	0.103408	0.106614	0.194942	0.106614	0.194942	0.546901	M14-8
0.156463	0.120593	0.099407	0.185005	0.156463	0.185005	0.845725	M14-9
0.16337	0.094665	0.035538	0.194942	0.16337	0.194942	0.838042	M14-10
0.11574	0.120593	0.092449	0.010072	0.120593	0.120593	1	M14-11
0.101927	0.224001	0.12078	0.027905	0.224001	0.224001	1	M14-12
0.149557	0.077481	0.127987	0.002899	0.149557	0.149557	1	M14-13
0.081685	0.094665	0.092449	0.002899	0.094665	0.094665	1	M14-15
0.06811	0.077481	0.007207	0	0.077481	0.077481	1	M14-16
0.06811	0.077481	0.078283	0.002899	0.078283	0.078283	1	M14-17

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0.013574	0.008743	0.021373	0.005594	0.008743	0.021373	0.409066	M15-1
0.04763	0.043112	0.035538	0.013931	0.04763	0.04763	1	M15-2
0.027387	0.017184	0.028331	0.002899	0.028331	0.028331	1	M15-3
0.088353	0.14652	0	0.005682	0.14652	0.14652	1	M15-4
0.115502	0.103408	0.078035	0.012091	0.115502	0.115502	1	M15-5
0.013574	0.051553	0	0.005682	0.013574	0.051553	0.263309	M15-6
0.020481	0.129034	0.006959	0.196154	0.006959	0.196154	0.035477	M15-7
0.013574	0.008743	0.014166	0.197841	0.014166	0.197841	0.071603	M15-8
0.074779	0.025927	0.006959	0.187904	0.025927	0.187904	0.137982	M15-9
0.081685	0	0.056911	0.197841	0.081685	0.197841	0.412881	M15-10
0.034055	0.025927	0	0.007173	0.034055	0.034055	1	M15-11
0.020243	0.129336	0.028331	0.025006	0.129336	0.129336	1	M15-12
0.067872	0.017184	0.035538	0	0.067872	0.067872	1	M15-13
0.081685	0.094665	0.092449	0.002899		0.094665	0	M15-14
0.013574	0.017184	0.085242	0.002899	0.085242	0.085242	1	M15-16
0.013574	0.017184	0.014166	0		0.017184	0	M15-17

✓ مجموعه‌های مخالفت D تشکیل شده در روش الگوریتم فازی

C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0	0.025927	0.063869	0.002695	0.063869	0.063869	1	M16-1
0.061204	0.060296	0.049704	0.011032	0.061204	0.061204	1	M16-2
0.013813	0	0.113573	0	0.113573	0.113573	1	M16-3
0.101927	0.163704	0.085242	0.002783	0.163704	0.163704	1	M16-4
0.129076	0.120593	0.007207	0.009192	0.129076	0.129076	1	M16-5
0.027149	0.034369	0.085242	0.002783	0.085242	0.085242	1	M16-6
0.006906	0.11185	0.0922	0.193255		0.193255	0	M16-7
0.027149	0.025927	0.099407	0.194942	0.099407	0.194942	0.509931	M16-8
0.088353	0.043112	0.0922	0.185005	0.0922	0.185005	0.498365	M16-9
0.095259	0.017184	0.028331	0.194942	0.095259	0.194942	0.488654	M16-10
0.04763	0.043112	0.085242	0.010072	0.085242	0.085242	1	M16-11
0.033817	0.14652	0.113573	0.027905	0.14652	0.14652	1	M16-12
0.081447	0	0.12078	0.002899	0.12078	0.12078	1	M16-13
0.06811	0.077481	0.007207	0		0.077481	0	M16-14
0.013574	0.017184	0.085242	0.002899	0.085242	0.085242	1	M16-15
0	0	0.071076	0.002899	0.071076	0.071076	1	M16-17

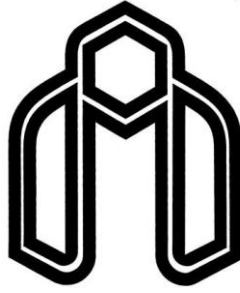
C1	C2	C3	C4	MAX LOSS	MAX ROW	LOSS/ROW	رویدادها
0	0.025927	0.007207	0.005594	0.025927	0.025927	1	M17-1
0.061204	0.060296	0.021373	0.013931	0.061204	0.061204	1	M17-2
0.013813	0	0.042497	0.002899	0.042497	0.042497	1	M17-3
0.101927	0.163704	0.014166	0.005682	0.163704	0.163704	1	M17-4
0.129076	0.120593	0.063869	0.012091	0.129076	0.129076	1	M17-5
0.027149	0.034369	0.014166	0.005682	0.027149	0.034369	0.789926	M17-6
0.006906	0.11185	0.027149	0.196154	0.027149	0.196154	0.138406	M17-7
0.027149	0.025927	0.027149	0.197841	0.027149	0.197841	0.137226	M17-8
0.088353	0.043112	0.021124	0.187904	0.088353	0.187904	0.470203	M17-9
0.095259	0.017184	0.042745	0.197841	0.095259	0.197841	0.481494	M17-10
0.04763	0.043112	0.014166	0.007173	0.04763	0.04763	1	M17-11
0.033817	0.14652	0.042497	0.025006	0.14652	0.14652	1	M17-12
0.081447	0	0.049704	0	0.081447	0.081447	1	M17-13
0.06811	0.077481	0.078283	0.002899		0.078283	0	M17-14
0.013574	0.017184	0.014166	0	0.017184	0.017184	1	M17-15
0	0	0.071076	0.002899		0.071076	0	M17-16

Abstract

Nowadays, technology advancement and the increasing population and on the other hand their needs for more services have caused the demand for public spaces. One of these underground spaces including tunnels which is used in various industries and sciences such as mining, roads and railways, dams, water transmission, urban sewages, metros, military and defense cases, petroleum storage and other uses. To run any of these tunnels, there may be some unexpected events such as: hazards, financial losses and human injuries, and each may likely to be occurred and can affects tunneling project, which is called and referred as Tunneling risks. Today, Risk management systems are an effective tool for serving different departments, organizations, managers and officials.

The Western Alborz tunnel on the Tehran-North Highway is one of the major road plans of the country, that according to schedule supposed to be implemented by the use of TBM and mechanized tunneling in a hard rock environment. In this thesis, 17 possible risks were estimated and evaluated by the help of multi criteria decision making methods by analyzing geological characteristics, geometric factors, investment, technical-environmental and political cases. To rank the hazards of mechanized tunneling in the Western Alborz tunnel, by TOPSIS , ELECTRE methods, both of methods have discussed ; fuzzy environment and classical case, also in order to achieve a united result, ranking strategys has been used. According to the mentioned methods, the results of the analyzes show that the experience of tunneling contractors for large diameter tunnels, toxic gas emissions and providing of TBM and related equipments, among 17 most likely risks, are the most important hazards in the Western Alborz tunnel with high risk respectively.

Keywords: *Mechanized tunneling, large-cross section tunnels, risk management, multi criteria decision making, hard rocks, TBM*



Shahrood University of Technology
Faculty of Mine, Petroleum and Geophysics Engineering
Department of Mine Engineering

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of
Science (M.Sc)

**Ranking of the risks in mechanized tunnelling of large cross
section tunnels in hard rocks
(Case study: Western Alborz Tunnel)**

By:

Ali Reza Akbari

Supervisors:

Dr.S.Zare

Dr.M.Ataei

January 2019