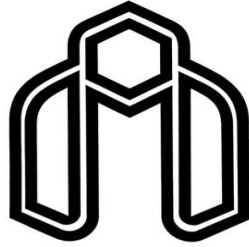


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی ریسک زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های
تصمیم‌گیری چند معیاره در

تونل‌سازی مکانیزه (مطالعه موردی تونل انتقال آب
نوسود)

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر حسین میرزایی نصیرآباد

نگارنده:

سید رسول رمضان‌نیا طلوتی

بهمن ۱۳۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی

بسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

۴۲/۱۲/۳
۴۲/۱۲/۳

فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای سید رسول رمضان نیا، رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان ارزیابی ریسک زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در تونل‌سازی مکانیزه (مطالعه موردی تونل انتقال آب نوسود) که در تاریخ ۹۲/۱۱/۱۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار امتیاز (۱-)) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸-۱۷)

۳- خوب (۱۶-۱۵)

۴- قابل قبول (۱۴-۱۳)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد عطایی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر حسین میرزایی نهرآباد	استاد	
۳- استاد مشاور	مسعود بیاتی	-	-
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد کارآموزیان	استاد	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر رحمان ترابی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر رضا خالوکاکی	استاد	

رئیس دانشکده: رضا قوامی ریایی



تعهد نامه

اینجانب سیدرسول رمضان نیا طلوتی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی ریسک زمین شناسی با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره در تونل سازی مکانیزه (مطالعه موردی تونل انتقال آب نوسود) تحت راهنمایی پروفیسور محمد عطایی و دکتر حسین میرزایی نصیر آباد 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » 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 صنعتی 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.

تقدیم به

پدرم که دنیای آسایش و مادرم که معنای آرامش است

اگر فردا نباشد که دنیا را فدا باشد

پدر و مادر من را بهشت اولیا باشد

۱۳۹۲/۱۱/۱۱

تشکر و قدردانی

پیش از هر کلامی باید خداوند منان را شاکر باشیم که لطف و مرحمتشان شالوده‌ی راهمان بوده است، سپس از راهنمایی‌های حکیمانه و مستمر اساتید محترم دکتر عطایی و دکتر میرزایی که مساعدت همه جانبه‌ی آنها موجب تقویت انگیزه و ثمربخشی کوششمان گردیدند، کمال تشکر را داشته باشیم.

همچنین از همه کسانی که در این دوره پایان‌نامه ما را یاری نموده‌اند، اعم از:

- مدیر پروژه شرکت جهاد توسعه منابع آب ایران در پروژه نوسود، آقای مهندس بیاتی
- مدیران، کارشناسان و سایر کارکنان کارگاه شرکت جهاد توسعه منابع آب ایران در پروژه نوسود
- کارکنان دفتر فنی شرکت رهاب
- آقایان مهندس معظمی‌نژاد، مهندس افتخاری، مهندس حیدریان، مهندس عفیفی، مهندس گلیان

که همگی کمک شایانی در گذراندن این دوره پایان‌نامه به ما نموده‌اند، تشکر و قدردانی داشته باشیم. در انتها سپاسی بی‌کران را تقدیم به همه دوستان و بزرگوارانی می‌کنیم که پایان‌نامه را با مساعدت و یاری آنان به انجام رسانیدیم ولی نامشان از خاطرمาน دور مانده است.

چکیده

پروژه‌های زیرزمینی و زیرساختی عموماً پروژه‌های پیچیده با متغیرهای زیادی از جمله شرایط متغیر و نامطمئن زمین و آب‌های زیرزمینی هستند و اطلاعات حاصله اکثراً به صورت غیرمستقیم به دست می‌آیند. این شرایط ریسک‌های قابل توجهی را بر تمام اجزای پروژه حتی قسمت‌هایی که به صورت غیرمستقیم با پروژه در ارتباط می‌باشند، وارد آورده و منجر به صرف هزینه‌های زیاد و تأخیرات زمانی در انجام پروژه می‌گردد. مدیریت درست و به موقع این ریسک‌ها موجب حداقل کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه می‌شود. رتبه‌بندی با فراهم آوردن امکان پاسخ‌دهی به موقع به همه‌ی ریسک‌ها، کمک شایانی به انجام هرچه موفق‌تر فرآیند مدیریت ریسک می‌نماید.

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 و به منظور دست یافتن به نظری واحد از استراتژی اولویت‌بندی استفاده شده است. به منظور این اولویت‌بندی ابتدا ریسک‌های زمین‌شناسی شناسایی و عوامل مؤثر بر آن تعیین شده است. این محاسبات در ۱۹ پهنه به صورت مجزا انجام و در نهایت ۳ ریسک به عنوان ریسک بالا (اصلی) در هر پهنه مشخص شده است. نتایج تحلیل‌ها طبق روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی در پهنه‌های مختلف نشان می‌دهد که نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها و نشت و هجوم آب به داخل تونل به ترتیب مهمترین مخاطره موجود در تونل بلند زاگرس می‌باشند و ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی به همراه پدیده‌ی لهیدگی با شاخصی برابر در رده‌ی بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است نتایج تحلیل‌ها طبق روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی نزدیک به روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی می‌باشد با این تفاوت که پدیده‌ی لهیدگی جای خود را به برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله خواهد داد. تکنیک ادغام نیز نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها، نشت و هجوم آب به داخل تونل و برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله را در پهنه‌های مختلف به عنوان مهمترین مخاطرات موجود در این تحقیق

معرفی می‌نماید که این تحلیل مشابه نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی می‌باشد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی بر صحت و نزدیکی محاسبات با واقعیت تاکید دارد.

واژگان کلیدی: پروژه، ریسک، مدیریت ریسک، اولویت‌بندی ریسک، تونل‌سازی مکانیزه، شباهت به

گزینه ایده‌آل فازی، تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی، استراتژی اولویت‌بندی، ریسک‌های زمین‌شناسی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- اراییه‌ی مقاله‌ای با عنوان اولویت‌بندی ریسک در تونل‌سازی مکانیزه - مطالعه موردی تونل زاگرس در نشریه‌ی علمی - پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی دانشگاه صنعتی شاهرود (تحت داوری)

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول : کلیات و مقدمه

۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تعریف مساله	۳
۱-۳- ضرورت انجام تحقیق	۳

۴-۱- اهداف تحقيق..... ۴

۵-۱- ساختار پايان نامه..... ۵

فصل دوم : مدیریت ریسک

۱-۲- مقدمه..... ۸

۲-۲- پروژه و مدیریت پروژه..... ۹

۱-۲-۲- پروژه..... ۹

۲-۲-۲- مدیریت پروژه..... ۱۱

۱-۳-۲- عدم قطعیت و ریسک..... ۱۴

۱-۳-۲-۱- عدم قطعیت..... ۱۴

۲-۳-۲-۱- ریسک..... ۱۵

۲-۳-۲- مدیریت ریسک..... ۱۸

۳-۳-۲- چرخه‌ی فرآیند مدیریت ریسک..... ۲۱

۴-۳-۲- مروری بر فرایند مدیریت ریسک پروژه در راهنمای PMBOK..... ۲۲

۵-۳-۲- روش‌های ارزیابی ریسک..... ۳۲

۱-۵-۳-۲- درخت خطا..... ۳۲

۲-۵-۳-۲- تحلیل درخت رویداد..... ۳۳

۳-۵-۳-۲- تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن..... ۳۴

۴-۵-۳-۲- روش‌های فازی..... ۳۵

۵-۵-۳-۲- شبیه‌سازی مونت کارلو..... ۳۶

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۶-۵-۳-۲- روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره..... ۳۷

۴-۲- نتیجه‌گیری..... ۳۸

فصل سوم : پیشینه‌ی تحقیق

۱-۳- مقدمه..... ۴۰

۴۱	۲-۳- مدیریت ریسک در تونل سازی
۴۴	۳-۳- سابقه‌ی تحقیق
۵۲	۵-۳- نتیجه‌گیری

فصل چهارم : کلیاتی در مورد تصمیم‌گیری چند معیاره و تصمیم‌گیری چند معیاره فازی

۵۶	۱-۴- مقدمه
۵۷	۲-۴- روش‌های تصمیم‌گیری
۵۷	۳-۴- تصمیم‌گیری چند معیاره
۵۹	۴-۴- تصمیم‌گیری چند معیاره فازی
۵۹	۱-۴-۴- مجموعه‌های فازی و درجه‌ی عضویت
۶۰	۲-۴-۴- اعداد فازی
۶۳	۵-۴- روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی
۶۲	۱-۵-۴- تشکیل ماتریس تصمیم
۶۲	۲-۵-۴- تعیین ماتریس وزن معیارها
۶۳	۳-۵-۴- بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم فازی
۶۳	۴-۵-۴- تعیین ماتریس تصمیم فازی وزن دار
۶۴	۵-۵-۴- یافتن گزینه ایده‌آل فازی و گزینه ضد ایده‌آل فازی
۶۴	۶-۵-۴- محاسبه‌ی فاصله از گزینه ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی
۶۵	۷-۵-۴- محاسبه‌ی شاخص شباهت
۶۵	۸-۵-۴- رتبه‌بندی گزینه‌ها

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۶-۴- روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی	۶۷
۱-۶-۴- نظرسنجی از متخصصان	۶۶
۲-۶-۴- محاسبه اعداد فازی	۶۶
۳-۶-۴- تشکیل ماتریس معکوس فازی	۶۷

۶۸.....	۴-۶-۴- محاسبه‌ی وزن فازی نسبی پارامترها.....
۶۸.....	۴-۶-۵- غیر فازی کردن وزن پارامترها.....
۷۰.....	۴-۷-۷- استراتژی‌های اولویت‌بندی.....
۶۹.....	۴-۷-۱- روش میانگین رتبه‌ها.....
۶۹.....	۴-۷-۲- روش بردا.....
۷۰.....	۴-۷-۳- روش کپ‌لند.....
۷۰.....	۴-۷-۴- مرحله‌ی ادغام.....
۷۲.....	۴-۸- نتیجه‌گیری.....

فصل پنجم: چالش‌های زمین‌شناسی تونل‌سازی مکانیزه در نواحی کوهستانی (محیط‌های سنگی)

۷۵.....	۵-۱- مقدمه.....
۷۶.....	۵-۲- چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی در نواحی کوهستانی.....
۷۵.....	۵-۲-۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله.....
۷۶.....	۵-۲-۱-۱- مشکلات ناشی از برخورد با زون‌های خرد شده و گسله.....
۷۷.....	۵-۲-۱-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی زون‌های خرد شده و گسله.....
۷۸.....	۵-۲-۱-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با زون‌های خرد شده و گسله.....
۷۸.....	۵-۲-۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی.....
۷۹.....	۵-۲-۲-۱- مشکلات ناشی از ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی.....
۸۰.....	۵-۲-۲-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی.....

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۸۱.....	۵-۲-۲-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی.....
۸۱.....	۵-۲-۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل.....
۸۴.....	۵-۲-۳-۱- مشکلات ناشی از نشت و هجوم آب به داخل تونل.....
۸۴.....	۵-۲-۳-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی نشت و هجوم آب به داخل تونل.....

۸۷.....	۵-۲-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با نشت و هجوم آب به داخل تونل
۸۸.....	۵-۲-۴- سینه‌کار مختلط (جبهه‌کار مختلط)
۸۸.....	۵-۲-۴-۱- مشکلات ناشی از سینه‌کار مختلط
۸۹.....	۵-۲-۴-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی سینه‌کار مختلط
۹۰.....	۵-۲-۴-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با سینه‌کار مختلط
۹۰.....	۵-۲-۵- تورم سازندهای شیلی و مارنی
۹۲.....	۵-۲-۵-۱- مشکلات ناشی از تورم سازندهای شیلی و مارنی
۹۳.....	۵-۲-۵-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی تورم سازندهای شیلی و مارنی
۹۵.....	۵-۲-۵-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با تورم سازندهای شیلی و مارنی
۹۵.....	۵-۲-۶- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)
۹۶.....	۵-۲-۶-۱- مشکلات ناشی از پدیده‌ی لهیدگی
۹۶.....	۵-۲-۶-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی پدیده‌ی لهیدگی
۹۸.....	۵-۲-۶-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با پدیده‌ی لهیدگی
۹۹.....	۵-۲-۷- تشکیل گل (انسداد)
۱۰۰.....	۵-۲-۷-۱- مشکلات ناشی از تشکیل گل
۱۰۱.....	۵-۲-۷-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی تشکیل گل
۱۰۲.....	۵-۲-۷-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با تشکیل گل
۱۰۳.....	۵-۲-۸- پتانسیل کارست
۱۰۶.....	۵-۲-۸-۱- مشکلات ناشی از پتانسیل کارست

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱۰۶.....	۵-۲-۸-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی پتانسیل کارست
۱۰۸.....	۵-۲-۸-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با پتانسیل کارست
۱۰۸.....	۵-۲-۹- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
۱۱۰.....	۵-۲-۹-۱- مشکلات ناشی از نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

- ۵-۲-۹-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها..... ۱۱۰
- ۵-۲-۹-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها..... ۱۱۱

فصل ششم: ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود

- ۶-۱- مقدمه ۱۱۷
- ۶-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه و راه‌های دسترسی به منطقه..... ۱۱۸
- ۶-۳- زمین‌شناسی عمومی منطقه‌ی مورد مطالعه..... ۱۱۹
- ۶-۴- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل..... ۱۲۲
- ۶-۴-۱- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی..... ۱۱۹
- ۶-۴-۲- تشریح ویژگی‌های توده سنگ‌های مسیر تونل..... ۱۲۰
- ۶-۵- بررسی چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود..... ۱۲۶
- ۶-۵-۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله..... ۱۲۴
- ۶-۵-۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی..... ۱۲۶
- ۶-۵-۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل..... ۱۲۹
- ۶-۵-۴- سینه‌کار مختلط..... ۱۳۲
- ۶-۵-۵- تورم سازندهای شیلی و مارنی..... ۱۳۳
- ۶-۵-۶- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)..... ۱۳۴
- ۶-۵-۷- تشکیل گل (انسداد)..... ۱۳۵
- ۶-۵-۸- پتانسیل کارست..... ۱۳۶
- ۶-۵-۹- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها..... ۱۳۸

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

- ۶-۶- ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود..... ۱۴۳
- ۶-۶-۱- رتبه‌بندی ریسک با روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی..... ۱۴۲
- ۶-۶-۲- رتبه‌بندی ریسک با روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی..... ۱۵۳
- ۶-۶-۳- استراتژی اولویت‌بندی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی..... ۱۷۴

۱۸۲.....	۷-۶- مقایسه‌ی نتایج رتبه‌بندی ریسک با نتایج واقعی حاصل از حفاری
۱۷۹.....	۶-۷-۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
۱۸۰.....	۶-۷-۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
۱۸۱.....	۶-۷-۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل
۱۸۲.....	۶-۷-۴- سینه‌کار مختلط
۱۸۳.....	۶-۷-۵- تورم سازندهای شیلی و مارنی
۱۸۳.....	۶-۷-۶- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)
۱۸۳.....	۶-۷-۷- تشکیل گل (انسداد)
۱۸۴.....	۶-۷-۸- پتانسیل کارست
۱۸۵.....	۶-۷-۹- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
۱۹۱.....	۶-۸- نتیجه‌گیری

فصل هفتم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۹۵.....	۷-۲- نتیجه‌گیری
۱۹۸.....	۷-۳- پیشنهادات
۱۹۹.....	مراجع

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۲.....	شکل (۱-۲) مراحل انجام فعالیت‌های پروژه
۱۳.....	شکل (۲-۲) فرآیند دستیابی به اهداف پروژه
۱۶.....	شکل (۳-۲) ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه
۲۰.....	شکل (۴-۲) تاکید بر پیوستگی، روبه جلو بودن چرخه‌ی مدیریت ریسک، در تمام طول پروژه
۲۱.....	شکل (۵-۲) چرخه‌ی عملیات مدیریت ریسک

شکل (۶-۲) مدل مدیریت ریسک روری بورک.....	۲۱
شکل (۷-۲) فرآیند مدیریت ریسک جان رافتری.....	۲۲
شکل (۸-۲) فرآیند مدیریت ریسک PMBOK.....	۲۲
شکل (۱-۳) جریان فعالیت مدیریت ریسک در طول اجرای پروژه‌های تونل‌سازی.....	۴۲
شکل (۱-۴) تقسیم‌بندی کلی مسائل چند معیاره.....	۵۹
شکل (۱-۵) روند اجرای روش پیشگویی لرزه‌ای تونل.....	۸۰
شکل (۲-۵) بلوک‌های بزرگ جدا شده از سینه‌کار تونل.....	۸۳
شکل (۳-۵) نمونه‌ای از هجوم آب به داخل تونل.....	۸۵
شکل (۴-۵) نمونه‌ای از هجوم آب به داخل تونل.....	۸۶
شکل (۵-۵) معرفی پارامترهای به کار رفته در روابط تحلیلی.....	۸۸
شکل (۶-۵) رابطه‌ی تجربی میان متوسط جریان آب ورودی به تونل در حالت پایدار و تراوایی معادل توده سنگ.....	۸۹
شکل (۷-۵) نمایی از یک تیغه‌ی شکسته شده و جبهه‌کار مختلط.....	۹۲
شکل (۸-۵) نمودار پتانسیل تورم.....	۹۵
شکل (۹-۵) نمایی از گل‌گرفتگی کله‌ی حفاری.....	۱۰۲
شکل (۱۰-۵) اندر کنش‌های مکانیزم موثر منفرد.....	۱۰۳
شکل (۱۱-۵) نمودار ارزیابی خطر انسداد کانی‌های رسی.....	۱۰۵
شکل (۱۲-۵) نمونه‌ای از حفرات کارستی و پدیده‌ی کارستیفیکاسیون در تشکیلات آهکی.....	۱۰۷
شکل (۱-۶) موقعیت کل مسیر تونل نوسود (خط چین سیاه رنگ) و راه‌های اصلی مرتبط با آن.....	۱۱۹

فهرست اشکال

صفحه

عنوان

شکل (۲-۶) نمایی از واحد شیلی SH-LS3.....	۱۲۵
شکل (۳-۶) مرز گسله‌ی بین واحد SH-ML1 و ML-SH1.....	۱۲۹
شکل (۴-۶) نمایی از واحد شیلی SH-LS1 با خصوصیات مهندسی ضعیف و دارای پتانسیل تورم.....	۱۳۷
شکل (۵-۶) غارچه‌های انحلالی در مسیر تونل نوسود.....	۱۴۰
شکل (۶-۶) وجود حفره‌های اکسید آهن در سطح آهک‌های تاق‌دیس اسپر.....	۱۴۱

شکل (۷-۶) ساختار سلسله مراتبی برای رتبه‌بندی ریسک‌های تونل‌سازی در محیط‌های سنگی.....	۱۴۴
شکل (۸-۶) اولویت‌بندی ریسک زمین‌شناسی با روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی برای پهنه‌ی اول.....	۱۴۸
شکل (۹-۶) اولویت‌بندی ریسک زمین‌شناسی با روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی برای پهنه‌ی اول.....	۱۶۹
شکل (۱۰-۶) نمایی از هجوم آب در هنگام تخلیه‌ی نخاله‌ی حاصل از حفاری بر روی نوار نقاله.....	۱۸۶
شکل (۱۱-۶) هجوم آب به داخل تونل و بالا آمدن سطح آب در محدوده‌ی ریل‌گذاری.....	۱۸۶
شکل (۱۲-۶) گل‌گرفتگی و انسداد دیسک‌ها.....	۱۸۸
شکل (۱۳-۶) تأثیرات مخرب گاز سولفید هیدروژن بر سیم بکسل‌های نگهدارنده‌ی داکت هوا.....	۱۹۰
شکل (۱۴-۶) شرایط کار سخت در تونل و استفاده از ماسک برای جلوگیری از خفگی.....	۱۹۰

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) ماتریس احتمال - اثر بر اساس PMBOK.....	۲۶
جدول (۱-۳) سابقه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ارزیابی ریسک.....	۴۴
ادامه‌ی جدول (۱-۳) سابقه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ارزیابی ریسک.....	۴۵
جدول (۲-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی.....	۴۶
ادامه‌ی جدول (۲-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی.....	۴۷

ادامه‌ی جدول (۲-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی.....	۴۸
ادامه‌ی جدول (۲-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی.....	۴۹
ادامه‌ی جدول (۲-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی.....	۵۰
جدول (۱-۴) تفاوت‌های مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه و چند هدفه.....	۵۹
جدول (۱-۵) مثال‌هایی از برخورد جبهه پیشروی تونل با هجوم آب زیرزمینی.....	۸۶
جدول (۲-۵) معادله‌های تحلیلی در برآورد میزان هجوم آب.....	۸۸
جدول (۳-۵) روش‌های بررسی پدیده تورم در محیط‌های درون‌گیر تونل‌ها.....	۹۶
جدول (۴-۵) روش‌های شناسایی و پیش‌بینی پدیده‌ی لهیدگی.....	۱۰۰
جدول (۵-۵) پتانسیل لهیدگی بر مبنای معیارهای تجربی سینگ و گوئل.....	۱۰۰
جدول (۶-۵) پتانسیل لهیدگی بر مبنای معیار جتوا و همکاران.....	۱۰۱
جدول (۷-۵) پیش‌بینی لهیدگی بر مبنای معیار هوک و مارینوس.....	۱۰۱
جدول (۸-۵) پتانسیل لهیدگی بر مبنای روش بارلا و ISRM.....	۱۰۱
جدول (۹-۵) خلاصه‌ی مشخصات گازهای مضر در تونل‌ها.....	۱۱۲
جدول (۱۰-۵) مخاطرات زمین‌شناسی و خلاصه‌ای از راهکارهای پیش‌بینی و مقابله با آن.....	۱۱۵
جدول (۱-۶) واحدهای سنگی شناسایی شده در گستره‌ی مورد بررسی و ضخامت هر یک از آنها.....	۱۱۷
جدول (۲-۶) مجموعه‌های لیتولوژیکی شناسایی شده در مسیر تونل.....	۱۲۳
جدول (۳-۶) پهنه‌بندی مسیر تونل بر اساس هیدروژئولوژی.....	۱۲۳
جدول شماره (۴-۶) مشخصات زون‌های خرد شده و شکسته شده مسیر تونل.....	۱۲۸

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۵-۶) پیش‌بینی وضعیت پایداری تونل به روش اتریشی.....	۱۳۱
جدول (۶-۶) نتایج طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ برای واحدهای مختلف.....	۱۳۱
جدول (۷-۶) مشخصات واحدهای دارای پتانسیل ورود آب به درون تونل.....	۱۳۳
جدول (۸-۶) مقادیر تخمینی دبی آب ورودی به پهنه‌های مختلف در طول مسیر تونل.....	۱۳۴
جدول (۹-۶) واحدهای دارای پتانسیل تورم و آماس.....	۱۳۶

جدول (۶-۱۰) نتایج بررسی وضعیت لِهیدگی تونل در قسمتی از محدوده‌ی مورد مطالعه با روش‌های مختلف.....	۱۳۸
جدول (۶-۱۱) موقعیت واحدهای دارای پتانسیل تشکیل گل.....	۱۳۹
جدول (۶-۱۲) اهمیت معیارها نسبت به هدف.....	۱۴۵
جدول (۶-۱۳) اهمیت گزینه‌ها نسبت به معیارها.....	۱۴۵
جدول (۶-۱۴) نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان برای وزن معیارها.....	۱۴۶
جدول (۶-۱۵) نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان برای تشکیل ماتریس تصمیم فازی.....	۱۴۶
جدول (۶-۱۶) ماتریس تصمیم فازی.....	۱۴۶
جدول (۶-۱۷) وزن فازی معیارها.....	۱۴۷
جدول (۶-۱۸) ماتریس تصمیم فازی بی مقیاس شده.....	۱۴۷
جدول (۶-۱۹) ماتریس بی‌مقیاس شده وزن‌دار.....	۱۴۷
جدول (۶-۲۰) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت.....	۱۴۸
جدول (۶-۲۱) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۲.....	۱۴۹
جدول (۶-۲۲) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۳.....	۱۴۹
جدول (۶-۲۳) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۴.....	۱۴۹
جدول (۶-۲۴) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۵.....	۱۵۰
جدول (۶-۲۵) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۶.....	۱۵۰
جدول (۶-۲۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۷.....	۱۵۰
جدول (۶-۲۷) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۸.....	۱۵۱

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۶-۲۸) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۹.....	۱۵۱
جدول (۶-۲۹) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۰.....	۱۵۱
جدول (۶-۳۰) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۱.....	۱۵۲
جدول (۶-۳۱) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۲.....	۱۵۲
جدول (۶-۳۲) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۳.....	۱۵۲

جدول (۳۳-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۴.....	۱۵۳
جدول (۳۴-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۵.....	۱۵۳
جدول (۳۵-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۶.....	۱۵۳
جدول (۳۶-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۷.....	۱۵۴
جدول (۳۷-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۸.....	۱۵۴
جدول (۳۸-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۹.....	۱۵۴
جدول (۳۹-۶) ریسک‌های اصلی در هر پهنه.....	۱۵۵
جدول (۴۰-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص اول.....	۱۵۶
جدول (۴۱-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص دوم.....	۱۵۶
جدول (۴۲-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص سوم.....	۱۵۷
جدول (۴۳-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص چهارم.....	۱۵۷
جدول (۴۴-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص پنجم.....	۱۵۷
جدول (۴۵-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص اول.....	۱۵۷
جدول (۴۶-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص دوم.....	۱۵۸
جدول (۴۷-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص سوم.....	۱۵۸
جدول (۴۸-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص چهارم.....	۱۵۸
جدول (۴۹-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص پنجم.....	۱۵۹
جدول (۵۰-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر از دیدگاه متخصص اول.....	۱۵۹

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۵۱-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر از دیدگاه متخصص دوم.....	۱۵۹
جدول (۵۲-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر از دیدگاه متخصص سوم.....	۱۶۰
جدول (۵۳-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر از دیدگاه متخصص چهارم.....	۱۶۰
جدول (۵۴-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر از دیدگاه متخصص پنجم.....	۱۶۰
جدول (۵۵-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص اول.....	۱۶۱

جدول (۵۶-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص دوم.....	۱۶۱
جدول (۵۷-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص سوم.....	۱۶۱
جدول (۵۸-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص چهارم.....	۱۶۲
جدول (۵۹-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص پنجم.....	۱۶۲
جدول (۶۰-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص اول.....	۱۶۲
جدول (۶۱-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص دوم.....	۱۶۳
جدول (۶۲-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص سوم.....	۱۶۳
جدول (۶۳-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص چهارم.....	۱۶۳
جدول (۶۴-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص پنجم.....	۱۶۴
جدول (۶۵-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها.....	۱۶۴
جدول (۶۶-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع.....	۱۶۴
ادامه‌ی جدول (۶۷-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع.....	۱۶۵
جدول (۶۸-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر.....	۱۶۵
ادامه‌ی جدول (۶۹-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر.....	۱۶۵
جدول (۷۰-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین.....	۱۶۶
ادامه‌ی جدول (۷۱-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین.....	۱۶۶
جدول (۷۲-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک.....	۱۶۶
ادامه‌ی جدول (۷۳-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک.....	۱۶۷

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۷۴-۶) تعیین وزن معیارها.....	۱۶۷
جدول (۷۵-۶) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع.....	۱۶۷
جدول (۷۶-۶) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر.....	۱۶۸
جدول (۷۷-۶) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین.....	۱۶۸
جدول (۷۸-۶) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک.....	۱۶۸

جدول (۶-۷۹) تعیین وزن نهایی برای رتبه‌بندی ریسک.....	۱۶۹
جدول (۶-۸۰) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۲.....	۱۷۰
جدول (۶-۸۱) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۳.....	۱۷۰
جدول (۶-۸۲) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۴.....	۱۷۰
جدول (۶-۸۳) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۵.....	۱۷۱
جدول (۶-۸۴) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۶.....	۱۷۱
جدول (۶-۸۵) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۷.....	۱۷۱
جدول (۶-۸۶) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۸.....	۱۷۲
جدول (۶-۸۷) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۹.....	۱۷۲
جدول (۶-۸۸) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۰.....	۱۷۲
جدول (۶-۸۹) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۱.....	۱۷۳
جدول (۶-۹۰) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۲.....	۱۷۳
جدول (۶-۹۱) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۳.....	۱۷۳
جدول (۶-۹۲) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۴.....	۱۷۴
جدول (۶-۹۳) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۵.....	۱۷۴
جدول (۶-۹۴) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۶.....	۱۷۴
جدول (۶-۹۵) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۷.....	۱۷۵
جدول (۶-۹۶) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۸.....	۱۷۵

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۶-۹۷) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۹.....	۱۷۵
جدول (۶-۹۸) ریسک‌های اصلی در هر پهنه.....	۱۷۶
جدول (۶-۹۹) قاعده‌ی اکثریت.....	۱۷۷
جدول (۶-۱۰۰) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک.....	۱۷۷
جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک.....	۱۷۸

- ادامه‌ی جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک..... ۱۷۹
- ادامه‌ی جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک..... ۱۸۰
- ادامه‌ی جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک..... ۱۸۱
- ادامه‌ی جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک..... ۱۸۲
- جدول (۶-۱۰۲) رتبه‌بندی ریسک‌های اصلی در هر پهنه..... ۱۸۳

فصل اول: کلیات و مقدمه

۱-۱- مقدمه

ریسک پروژه‌های تونل‌سازی همواره قابل توجه بوده و از طریق مدیریت مناسب می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آنها را کم کرد. از جمله علل اصلی طولانی‌تر شدن و افزایش هزینه‌های پروژه‌های تونل‌سازی، مدیریت ناقص و ضعیف به ویژه ضعف در مدیریت ریسک گزارش شده است. مدیریت ریسک به عنوان یکی از سطوح اصلی دانش مدیریت، هنر و علم تشخیص، تعیین و واکنش به ریسک در چرخه‌ی عمر یک پروژه برای حفظ روند رسیدن به اهداف است. ارزیابی ریسک‌های پروژه یکی از بخش‌های اصلی فرایند مدیریت ریسک بوده و هدف اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های گوناگونی از قبیل میزان تأثیر و احتمال وقوع است.

در واقع درک ریسک و مدیریت آن، اهمیت بیشتری نسبت به کاهش و یا حذف آن پیدا کرده و بر خلاف نگرش غلط گذشته مدیران صنعت نسبت به لوکس و بی‌فایده بودن این‌گونه فعالیت‌ها، استقبال روزافزون آنها برای سرمایه‌گذاری در زمینه مدیریت ریسک و فعالیت‌های مرتبط با آن به امید رسیدن به سوددهی بیشتر، قابل توجه می‌باشد.

۱-۲- تعریف مساله

پروژه‌های تونل‌سازی به دلیل ماهیت ساختارشان (عدم شناخت کافی از وضعیت زمین و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن که در بسیاری موارد منجر به خسارت‌های سنگینی می‌شود) در مقایسه با پروژه‌های مشابه، همواره با درصد بالایی از ریسک همراه می‌باشند. مدیریت درست و به موقع این ریسک‌ها موجب حداقل کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه می‌شود.

یکی از گام‌های اصلی در مدیریت ریسک، ارزیابی ریسک بوده و رتبه‌بندی ریسک‌ها به نوبه‌ی خود، یکی از مهم‌ترین بخش‌های ارزیابی ریسک می‌باشد. به دلیل محدودیت‌های زمانی و مالی و غیره در پاسخ‌دهی و واکنش همزمان به همه ریسک‌ها، رتبه‌بندی با فراهم آوردن امکان پاسخ‌دهی به موقع و درست به آنها در جهت ارایه راهکارهای سودمند، کمک شایانی به انجام هرچه موفق‌تر فرایند مدیریت ریسک می‌نماید. در واقع هدف از رتبه‌بندی ریسک‌ها پرداختن به مهم‌ترین آنها با توجه به محدود بودن منابع می‌باشد.

رتبه‌بندی ریسک‌های یک پروژه را می‌توان به روش‌های مختلف کمی و کیفی انجام داد. از آنجایی که ارزیابی ریسک در پروژه‌های پر مخاطره نظیر پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه از جمله اقدامات ضروری برای مدیریت ریسک می‌باشد لذا در این تحقیق ارزیابی، برآورد و رتبه‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی در تونل‌سازی مکانیزه مد نظر خواهد بود.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

پروژه‌های زیرزمینی و زیرساختی عموماً پروژه‌های پیچیده با متغیرهای زیادی از جمله شرایط متغیر و نامطمئن زمین و آب‌های زیرزمینی می‌باشند و اطلاعات حاصله در مورد آنها، محدود به اطلاعات گرافیکی یا عددی بسیار کمی بوده که اکثراً به صورت غیرمستقیم حاصل می‌گردند. این شرایط ریسک‌های قابل توجهی را بر

تمام اجزای پروژه حتی قسمت‌هایی که به صورت غیرمستقیم با پروژه در ارتباط می‌باشند، وارد آورده و منجر به صرف هزینه‌های زیاد و تاخیرات زمانی در انجام پروژه می‌گردد.

همچنین در این‌گونه پروژه‌ها پتانسیل رخ دادن حوادث بزرگ در طول کار در داخل تونل همچون ریزش، بسیار بالا می‌باشد. به علاوه، برای تونل‌هایی که در مناطق شهری قرار دارند، ریسک احتمال آسیب رسیدن به مردم و ساختمان‌های اطراف تونل وجود دارد که این مسئله به خصوص در مناطقی که آثار باستانی و ساختمان‌های تاریخی قرار دارند اهمیت به خصوصی پیدا می‌کند. در نهایت به دلیل مشکلاتی که یک پروژه تونل‌سازی برای عموم ایجاد می‌نماید، احتمال بروز اعتراض‌های عمومی وجود دارد که می‌تواند بر جریان پروژه تأثیرگذار باشد.

بنابراین استفاده از مدیریت ریسک از همان مراحل ابتدایی پروژه، یعنی در مرحله تصمیم‌گیری‌های اساسی همچون انتخاب مسیر و انتخاب روش‌های اجرا که می‌توانند تحت تأثیر قرار گیرند، بسیار مهم است. برای مدیریت ریسک موثر یک پروژه تونل‌سازی حیاتی است که مدیریت پروژه در اولین فرصت ممکن، ترجیحاً در طول مطالعات امکان‌سنجی و مراحل پیش از طراحی پروژه آغاز گردد. لازم به ذکر است موفقیت و مزایای اجرای یک مدیریت ریسک موثر به کیفیت فعالیت‌های تعریف شده برای کاهش ریسک بستگی دارد.

۱-۴- اهداف تحقیق

با توجه به رشد بسیار سریع فناوری ساخت ماشین‌های حفار تمام مقطع (TBM) بزرگ‌تر و پیچیده‌تر و همچنین مشکلات زمین‌شناسی؛ مدیریت پروژه‌های تونل‌سازی با چالش فراوانی همراه شده است. با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع توجه به مدیریت ریسک این پروژه‌ها دارای اهمیت انکارناپذیری است.

حفاری در زمین‌های مشکل‌دار نظیر نواحی گسله با حجم بالای جریان آب زیرزمینی، تشکیلات گازدار و ... منجر به توقف‌های طولانی و در نتیجه کاهش راندمان دستگاه و در نهایت تحمیل هزینه اضافی به پروژه خواهد شد. وجود این شرایط در اکثر پروژه‌های تونل‌سازی اجتناب‌ناپذیر است.

فرایند مدیریت ریسک یکی از مهم‌ترین و شاید ضروری‌ترین بخش مدیریت پروژه است، به طوری که برخی تفکرها و نگرش‌های نوین، مدیریت ریسک را اساس و جوهره‌ی مدیریت پروژه دانسته‌اند. مدیریت درست و به موقع این ریسک‌ها موجب حداقل کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه می‌شود. در این تحقیق به شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها و چالش‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حقوقی در پروژه‌های تونل‌سازی و چگونگی کاهش اثرات منفی آنها برای مدیریت بهتر در پروژه‌های تونل‌سازی پرداخته می‌شود. بنابراین با توجه به هزینه و زمان زیاد در خصوص انجام پروژه‌های حفاری مکانیزه، شناسایی و رتبه‌بندی ریسک برای مدیریت ریسک به هنگام، انکارناپذیر است.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

این تحقیق شامل هفت فصل می‌باشد.

- در فصل اول به بیان مسئله، ضرورت تحقیق و اهداف تحقیق پرداخته شده است.
- در فصل دوم اصول و مفاهیم اولیه پروژه و مدیریت پروژه، ریسک، عدم قطعیت، مدیریت ریسک، فرآیند مدیریت ریسک از دیدگاه استاندارد بین‌المللی دانش مدیریت پروژه و روش‌های ارزیابی ریسک بیان شده است.
- در فصل سوم ضمن بیان مدیریت ریسک در تونل‌سازی، پیشینه‌ی کار گذشتگان در زمینه‌ی ارزیابی و مدیریت ریسک مرور شده است.

- در فصل چهارم کلیاتی در مورد روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و چند معیاره‌ی فازی از جمله روش‌های شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی توضیح داده شده و استراتژی‌های اولویت‌بندی بیان شده است.

- در فصل پنجم چالش‌های زمین‌شناسی تونل‌سازی مکانیزه در نواحی کوهستانی (محیط‌های سنگی) شناسایی و به طور کامل توضیح داده شده است.

- در فصل ششم پس از بررسی منطقه‌ی مورد مطالعه و ارزیابی چالش‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود با استفاده از روش‌های شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی به رتبه‌بندی ریسک زمین‌شناسی تونل نوسود پرداخته و از استراتژی اولویت‌بندی جهت دست یافتن به نظری واحد استفاده شده است و در نهایت نتایج محاسبات با نتایج ثبت شده‌ی بعد از حفاری مقایسه شده است.

- در فصل هفتم نتایج به دست آمده و پیشنهاداتی ارائه شده در راستای اهداف این پژوهش ارائه شده است.

فصل دوم: مدیریت ریسک

۲-۱- مقدمه

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 می‌گردند. 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 روی داد این خطر و عواقب پیرامون آن باعث می‌شود سازمان‌ها و کارخانجات منابع خود را به نحو موثر 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 اغلب پروژه‌هایی که با موفقیت همراه شده است مدیران آن دو عامل ذیل را در نظر گرفته‌اند:

- شناسایی فعالیت‌ها و استفاده از دروس آموخته از پروژه‌های پیشین و ممانعت از بروز برخی مشکلات

- برنامه‌ریزی صحیح پروژه قبل از اجرای پروژه، برای شناسایی مشکلات پیش روی و راهکارهای لازم برای مقابله با آن

مدیریت ریسک موثر پروژه، بر هر دوی این رویکردها تکیه می‌کند. با نگاه به پشت، مدیران می‌توانند از شکست‌های گذشته اجتناب کنند و با نگاه به آینده از طریق برنامه‌ریزی می‌توانند بسیاری از مشکلات بالقوه را شناسایی کرده، آنها را حذف کنند و یا اثر آنها را به کمینه برسانند.

در این فصل اصول و مفاهیم اولیه پروژه، مدیریت پروژه، ریسک و مدیریت ریسک بیان شده است.

۲-۲- مدیریت پروژه

۲-۲-۱- پروژه

انجمن مدیریت پروژه (PMI)^۱، پروژه را « تلاشی موقت برای تولید یک محصول، خدمات و یا نتیجه‌ی منحصر به فرد» تعریف می‌نمایند، عبارت موقتی بدان معنا است که هر پروژه‌ای آغاز و پایان مشخصی دارد و منحصر به فرد بدان معنا است که محصول یا خدمات از جهاتی از سایر محصولات یا خدمات متمایز می‌باشد [۱]. استاندارد PRINCE2^۲ دو تعریف را برای پروژه ارائه داده است که اولی به اهداف پروژه و دیگری به ویژگی‌های پروژه توجه دارد. این استاندارد از جهت اهداف، پروژه را یک محیط مدیریتی که به منظور تحویل یک یا چند محصول تجاری مطابق با یک موقعیت تجاری مشخص ایجاد شده است تعریف می‌کند و در جای دیگر و با توجه به ویژگی‌های پروژه آن را یک سازمان موقتی که باید یک نتیجه‌ی منحصر به فرد و از پیش تعیین شده را با یک زمان از قبل تعیین شده و منابع مشخص، ایجاد کند می‌داند [۲].

1 - Project Management Institute

2 - Project in Controlled Environments

بر اساس تعریف استاندارد ICB^۱ پروژه یک عملکرد محدود شده توسط زمان و هزینه برای دستیابی به تحویل‌شدنی‌های تعریف شده (محدوده‌ی تعریف شده برای برآوردن موضوعات پروژه) بر اساس استانداردهای کیفیت و الزامات است [۳].

پروژه طبق تعریف دسته‌ی^۲ مدیریت پروژه به صورت مجموعه‌ای از فعالیت‌های مرتبط، با تعریف واضح نقطه‌ی شروع و نقطه‌ی پایان که به طور سازمان یافته انجام می‌پذیرد، برای رسیدن به نتایج مورد نظر که نیازهای یک سازمان را برآورده می‌کند تعریف می‌شود [۴].

قابل توجه است که همه‌ی این استانداردها محدودیت زمان، هزینه (منابع) و موقتی بودن را در کنار تولید یک محصول مشخص و منحصر به فرد مورد توجه قرار داده‌اند. پروژه در فرهنگ لغات کشورهای گوناگون معنای مختلفی دارد، در این قسمت سه تعریف از سه فرهنگ لغت آورده شده است [۵]:

آلمانی: Projekt – تعهد بزرگ عمومی، برنامه‌ریزی‌شده و یا در حال حاضر آغاز شدن

فرانسه: Projet – اولین طرح، توصیف اولیه‌ای از تعهد

انگلیسی: Project – برنامه‌ریزی برای یک طرح و یا تعهد

ویژگی‌های یک پروژه می‌تواند شامل موارد زیر باشد [۵]:

- پروژه‌ها با کارهای معمولی متفاوت می‌باشند. آنها برای تغییر چیزهایی در نظر گرفته شده‌اند.
- پروژه‌ها یک بازه‌ی زمانی مشخص دارند با یک زمان شروع و یک زمان پایان.
- پروژه‌ها برنامه‌ریزی می‌شوند.
- پروژه‌ها از منابع استفاده کرده و نیاز به یک بودجه دارند.
- پروژه‌ها به ارزیابی نیاز دارند، معیارهای ارزیابی باید از همان ابتدا در نظر گرفته شود.

1- IPMA Competence Baseline

2- Handbook

- پروژه‌ها دارای نتایج می‌باشند، نه اینکه لزوماً در ابتدا شناخته شده باشند.
- نتیجه گاهی اوقات تولید از چیزی است.
- در پایان یک پروژه، باید تصمیماتی در مورد نتایج به دست آمده برای استفاده از آن گرفته شود.
- پروژه‌ها با مردم سروکار دارند.

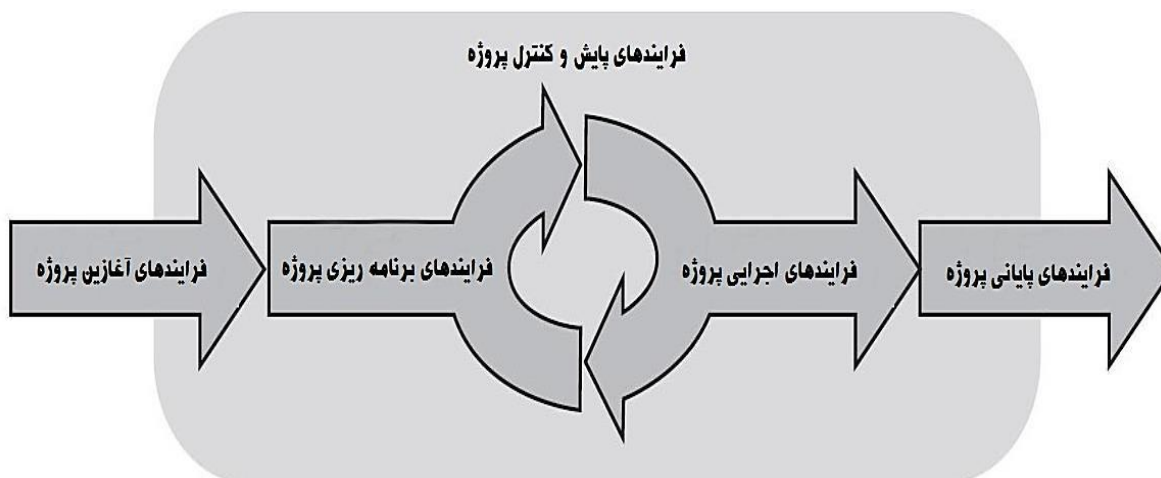
۲-۲-۲- مدیریت پروژه

انجمن مدیریت پروژه (PMI)، تعریف خود را از مدیریت پروژه این‌گونه بیان کرده است: «به کارگیری دانش، مهارت، ابزارها و تکنیک‌های لازم تا فعالیت‌های پروژه را به نیازهای اصلی (اهداف) پروژه برساند» [۱].

دستینه‌ی مدیریت پروژه، مدیریت پروژه را به عنوان «یک فرآیند پویا با بهره‌گیری از منابع مناسب و در دست کنترل و نحوه‌ی ساختارمند برای دستیابی به برخی از اهداف تعریف شده به عنوان نیازهای استراتژیک شناخته می‌شود» معرفی می‌کند. مدیریت پروژه به وضوح در داخل یک محیط با مجموعه از محدودیت‌ها به اجرا در می‌آید [۴].

انجمن مدیریت پروژه انگلستان (APM)^۱، مدیریت پروژه را این‌گونه تعریف می‌کند: «برنامه‌ریزی، نظارت، کنترل و تحویل به طوری که منافع مورد توافق تحقق یابد» [۶].

در استاندارد PMBOK به عنوان پرتفردارترین استاندارد مدیریت پروژه مراحل انجام فعالیت‌های پروژه به ۵ مرحله‌ی اصلی تقسیم می‌شود. این مراحل در شکل (۲-۱) ترسیم شده‌اند [۱]:



شکل (۱-۲) مراحل انجام فعالیت‌های پروژه [۱]

اساساً، اهداف مدیریت پروژه به صورت زیر است [۶]:

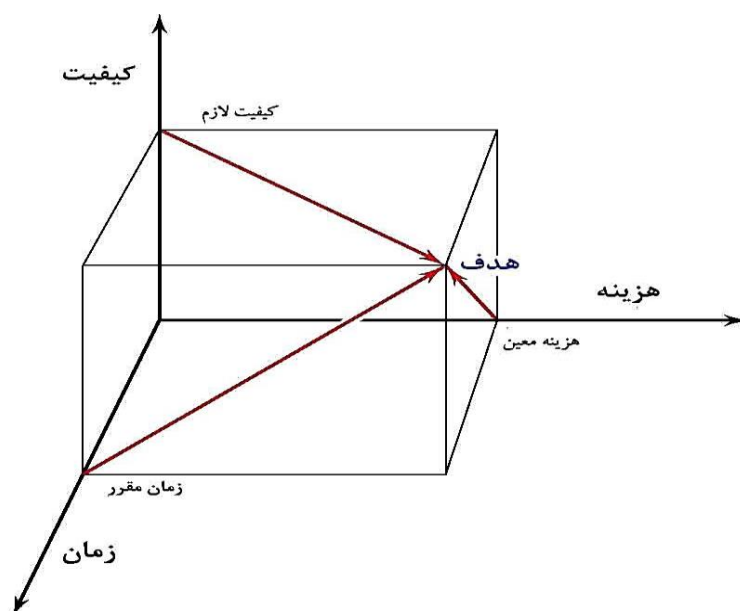
- درک نیاز، مشکل و یا فرصتی است که پروژه به آنها خواهد پرداخت.
- تعیین وضعیت کسب‌وکار، معیارهای موفقیت و منافع حاصل از طرح پیشنهادی.
- تعریف آنچه را که باید انجام و تحویل داده شود، به طور معمول از نظر محدوده، زمان، هزینه و کیفیت.
- توسعه یک برنامه برای دستیابی به قابلیت تحویل و پس از آن اجرای این طرح و اطمینان حاصل کردن از پیشرفت در مسیر حفظ اهداف پروژه.
- استفاده از منابع مورد نیاز و به هنگام در محیط یک تیم پروژه، زیر نظر مدیر پروژه برای تحویل موفقیت‌آمیز پروژه از نظر زمان، هزینه و کیفیت.
- اطمینان حاصل شود که ضامن پاسخگویی برای دستیابی به منافع تعریف شده است.
- استفاده از مکانیسم‌های مناسب، ابزارها و تکنیک‌ها.

بر اساس استاندارد PMBOK مدیریت پروژه به حوزه‌های ۱۰ گانه تقسیم می‌شود که لازم است برنامه‌ریزی پروژه در همه‌ی این حوزه‌ها انجام شده تا بتوان یک برنامه کامل و جامع از پروژه در اختیار داشت که این حوزه‌ها عبارت‌اند از [۷]:

- مدیریت یکپارچگی پروژه
- مدیریت محدوده‌ی پروژه
- مدیریت زمان پروژه
- مدیریت هزینه‌ی پروژه
- مدیریت کیفیت پروژه
- مدیریت منابع انسانی پروژه
- مدیریت ارتباطات پروژه
- مدیریت ریسک پروژه
- مدیریت تدارکات پروژه
- مدیریت ذینفعان پروژه

معمولاً اهداف اصلی در هر پروژه هماهنگی بین هزینه، زمان و کیفیت (معیارهای عملکرد) پروژه می‌باشد

[۸]. شکل (۲-۲)



شکل (۲-۲) فرآیند دستیابی به اهداف پروژه [۸]

۲-۳- ریسک و مدیریت ریسک

۲-۳-۱- 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 [۹].

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 [۱۰].

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

۲-۳-۱-۱- 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 بر می‌گیرد 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 [۱۱].

وضعیتی که عدم قطعیت در تصمیم‌گیری به وجود می‌آورد، باعث ایجاد انحرافات مثبت (شانس) و منفی (تهدید) در نتایج مورد انتظار می‌شود [۱۲]. 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 گردد، عدم قطعیت در این است که تصمیم‌گیرنده نمی‌داند کدام موقعیت طبیعی رخ می‌دهد [۱۳]. 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 می‌گردد [۱۴].

در بحث مربوط به عدم قطعیت سه سطح از عدم قطعیت وجود دارد [۹]:

– **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 یا انجام برخی فعالیت‌ها شناخته می‌شوند. این فعالیت‌ها دارای ریسک هستند و ریسک آنها با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند.

– **عدم قطعیت غیرقابل 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 [۹].

۲-۳-۱-۲- ریسک

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

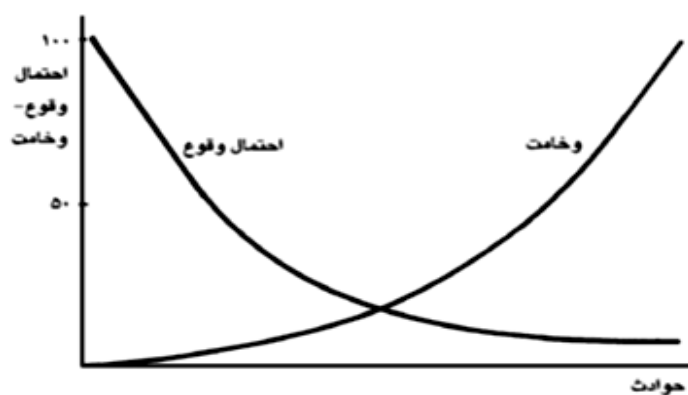
انجمن مدیریت پروژه (PMI)، ریسک را این‌گونه تعریف می‌نماید: « یک رویداد یا وضعیت غیر قطعی است که در صورت وقوع، اثری مثبت یا منفی بر اهداف پروژه خواهد داشت » در این تعریف به ریسک نه به عنوان خطر بلکه به صورت عدم قطعیت نگریسته شده است که دارای دو جنبه مثبت (فرصت) و منفی (تهدید) می‌باشد [۱].

انجمن مدیریت پروژه انگلستان (APM)، ریسک را این گونه تعریف می کند: «رویداد ریسک یک رویداد نامطمئن و یا زمانی که مجموعه ای از شرایط رخ می دهد، بر روی دستیابی به یک یا تعداد بیشتری از اهداف پروژه تأثیر می گذارد» [۶].

دستینه ی مدیریت ریسک، ریسک را « تأثیر آینده یک خطر در نتیجه ی عدم حذف و کنترل آن » معرفی می نماید [۱۵].

دستینه ی مدیریت پروژه، ریسک را رویدادی بیان می دارد که در صورت وقوع به عنوان تهدید بالقوه برای یکپارچگی پروژه شناخته می شود [۴].

از دیدگاه بیچر^۱، احتمال منجر شدن یک خطر به حادثه یا سانحه ریسک گفته می شود. در واقع ریسک ترکیبی از احتمال وقوع و وخامت عواقب ناشی از حادثه یا سانحه است. شکل (۳-۲) ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه را نشان می دهد بدین صورت که اگر احتمال رخداد یک حادثه پیش بینی گردد وخامت عواقب حاصله کمترین مقدار را خواهد داشت و بالعکس [۱۶].



شکل (۳-۲) ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه [۱۶]

کرزنر^۲ ریسک را، اندازه گیری احتمال و شدت پیامد بیان می دارد نه دستیابی به تعریف اهداف پروژه [۱۷].

1- Baecher
1- Kerzner

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

می‌نماید [۱۸]:
$$\text{ریسک} = \text{میزان تأثیر} \times \text{احتمال وقوع}$$

سه نوع کلی از ریسک موجود در ایجاد و مدیریت یک سیستم عبارت‌اند از [۱۹]:

- **ریسک ذاتی:** سطحی از ریسک است که در پیاده‌سازی سیستم مورد نظر به صورت بالقوه وجود دارد و باید برای کاهش آن چاره‌ای اندیشید.

- **ریسک باقیمانده:** سطحی از ریسک است که علی‌رغم ایجاد عوامل کنترلی و سعی در کاهش ریسک هنوز وجود دارد.

- **ریسک قابل قبول:** سطحی از ریسک باقیمانده است که اگر چه وجود دارد، اما مانعی جدی بر سر راه رسیدن به اهداف و یا مأموریت‌های سازمان ایجاد نمی‌کند.

لازم به ذکر است ریسک در دو نوع اصلی به صورت ذیل ارایه شده است [۲۰، ۱]:

- **ریسک واقعی:** ریسکی است که در آن احتمال زیان وجود دارد ولی احتمال سود وجود ندارد. مانند احتمال تصادف با اتومبیل. این نوع ریسک همیشه ناخوشایند است.

- **ریسک سوداگرانه:** در طول اجرای پروژه، برخی از ریسک‌ها ممکن است با اثرات مثبت یا منفی بر ذخیره‌های احتیاطی زمانی یا بودجه اتفاق بیافتند. آن دسته از ریسک‌ها که اثر مثبت بر موارد ذکر شده دارند، به عنوان ریسک سوداگرانه شناخته می‌شوند. در این نوع ریسک علاوه بر شانس خسارت (زیان)، شانس سود هم وجود دارد. مانند توسعه کارخانه. این نوع ریسک دارای جنبه‌هایی از جذابیت نیز است.

در دسته‌بندی دیگری، ریسک به سه نوع ذیل تقسیم می‌شود [۲۱]:

- **ریسک کسب و کار:** هزینه یا کاهش در آمد و سرمایه‌ایست که در اثر خرابی و ضعف عملیات معمول کسب و کار به وجود می‌آید مانند از کار افتادگی یک دستگاه.

- **ریسک سازمانی:** خسارت مستقیم و یا غیر مستقیم ناشی از یک یا چند مورد زیر:

- فرایندهای داخلی ناقص و یا مردود

- افراد

- سیستم‌ها

- وقایع خارجی

- **ریسک فناوری اطلاعات:** عبارت است از عدم وجود سیستم‌های خودکار، شبکه یا منابع اصلی دیگر فناوری اطلاعات که روی فرآیندهای کسب و کار تأثیر منفی می‌گذارد.

۲-۳-۲- مدیریت ریسک

برای مدیریت ریسک همانند واژه‌ی ریسک، تعاریفی بسیار زیادی ارایه شده که همگی آنها دربرگیرنده‌ی مفهومی یکسانی می‌باشند و تمرکز روی فرایند مدیریت ریسک خواهند داشت که برخی از مهم‌ترین تعاریف مدیریت ریسک در ادامه بیان شده است:

طبق تعریف موسسه مدیریت پروژه (PMI)، 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 یاد شده با یکدیگر هم‌پوشانی داشته و در تعامل هستند [۱].

از نظر انجمن مدیریت پروژه انگلستان (APM)، مدیریت ریسک «یک فرآیند ساختارمند است که اجازه می‌دهد تا رویدادهای انفرادی ریسک و ریسک کلی پروژه به خوبی درک شود و راهکارهای پیشگیرانه با به حداقل رساندن تهدیدها و حداکثر رساندن فرصت‌ها برای مدیریت بهتر پروژه صورت پذیرد» [۶].

مدیریت ریسک فرآیند شناسایی ریسک، کاهش آن تا سطحی قابل قبول و در نهایت ارزیابی نتایج روی سیستم است [۲۲].

ویلیامز و هینز^۱، مدیریت ریسک را به صورت زیر تعریف می‌کنند [۲۰]:

مدیریت ریسک، فرایند شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌های اتفاقی 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.

مدیریت ریسک در واقع همان فرایندها و فعالیت‌هایی هستند که با روشی از پیش تعیین شده، ریسک‌های موجود در پروژه (در طول تمام شریان‌ها) را تشخیص داده، پس از رتبه‌بندی اقدام به مدیریت آنها می‌کند [۲۳].

کرزنر مدیریت ریسک را «فعالیت یا کوشش در جهت پرداختن به ریسک» معرفی می‌کند [۱۷].

مدیریت ریسک در واقع روند کنترل ریسک و تعدیل اثرات آن می‌باشد. مدیریت ریسک یک مسیر سیستماتیک برای تعیین، ارزیابی و واکنش به ریسک‌های یک پروژه می‌باشد [۲۴].

مدیریت ریسک پروژه، فعالیت مقیاس‌پذیری است و باید متناسب با اندازه و پیچیدگی پروژه اعمال شود. در نتیجه، فرآیند مدیریت ریسک پروژه باید برای هر مورد و یا پروژه‌ی خاص با توجه به آن پروژه باشد [۲۵].

اهداف مدیریت ریسک پروژه می‌تواند با توجه به افرادی که پروژه به آنها مربوط است متفاوت باشد [۲۶]:

1- Williams & Heins

- **مشتری (مالک):** تمرکز بر روی کیفیت نهایی پروژه (ساختمان، زیرساخت‌ها و غیره) و کم کردن هزینه‌های نهایی.

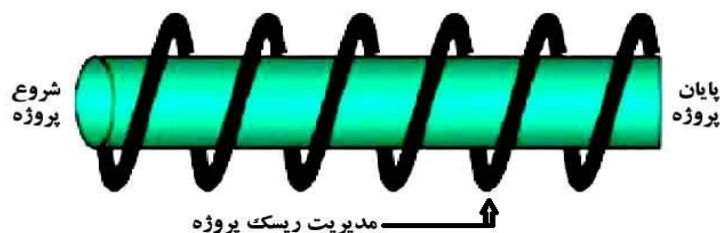
- **پیمانکار:** رسیدن به بهترین نتیجه‌ی مالی، ایمنی کارگران و تعامل با مشتری به خاطر احتمال استفاده از آنها در پروژه‌های آینده، تصویر مناسب خود در جامعه و ...

- **سایر ذینفعان (مشاوران، شرکت‌های بیمه، کاربران نهایی، اشخاص ثالث، و ...):** می‌توانند اهداف خود را از پروژه داشته باشند.

هدف از مدیریت ریسک، شناخت ریسک قبل از وقوع آن، اجرای راهبردهای مقابله‌ای با آن و در نظر گرفتن طرح‌های احتمالی در صورت وقوع ریسک می‌باشد تا اثرات احتمالی آنها را کاهش دهد [۲۷].

به طور کلی اهداف زیر همواره مد نظر مدیریت ریسک بوده است [۲۸]:

- ۱ - شناخت و تعریف ریسک پروژه و ارزیابی آنها به صورت کمی.
 - ۲ - حذف یا کاهش ریسک‌های پروژه، صرف نظر از اینکه کدام یک از اعضای پروژه مسوول ریسک است.
 - ۳ - توزیع و انتقال صحیح و عادلانه ریسک در بین اعضای پروژه.
- طبق اصول مدیریت ریسک، این الگوریتم یک مرحله‌ای نیست بلکه چرخه‌ی فرآیند آن تکرار می‌شود و در هر چرخه، بهبود حاصل شده و برنامه‌ی مدیریت ریسک بروز می‌شود در ضمن این فرآیند از ابتدا تا انتهای پروژه مورد نیاز می‌باشد که در شکل (۲-۴) نمایان است [۲۹].

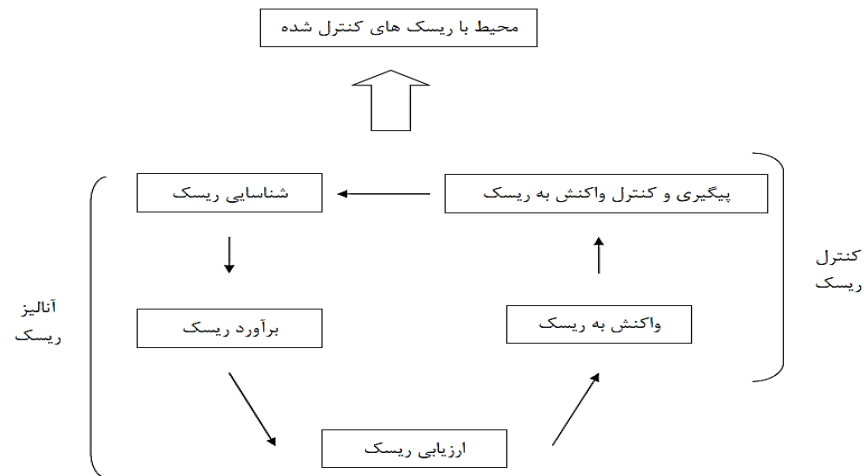


شکل (۲-۴) تاکید بر پیوستگی، روبه جلو بودن چرخه‌ی مدیریت ریسک، در تمام طول پروژه [۲۹]

۲-۳-۳- چرخه‌ی فرآیند مدیریت ریسک

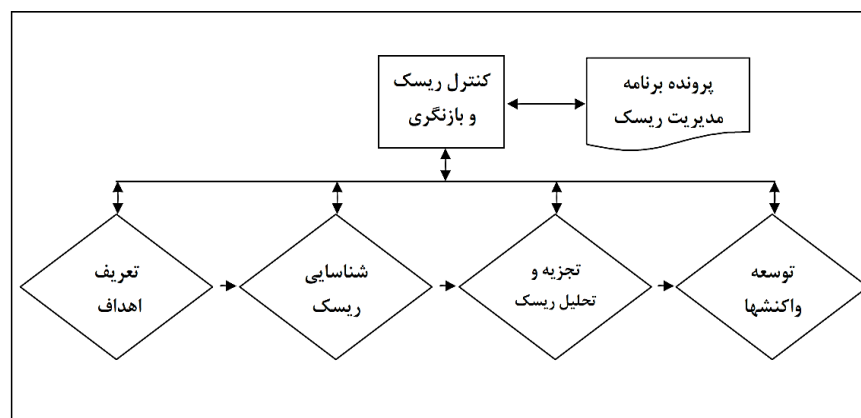
در منابع مختلف فرآیند مدیریت ریسک به گونه‌های مختلفی تعریف شده است، در زیر به برخی از این منابع اشاره شده است.

- چرخه‌ی عملیات مدیریت ریسک چاپمن^۱ در شکل (۵-۲) نشان داده شده است [۳۰].



شکل (۵-۲) چرخه‌ی عملیات مدیریت ریسک [۳۰]

- مدل مدیریت ریسک روری بورک^۲ مطابق شکل (۶-۲) تعریف می‌شود [۳۱].

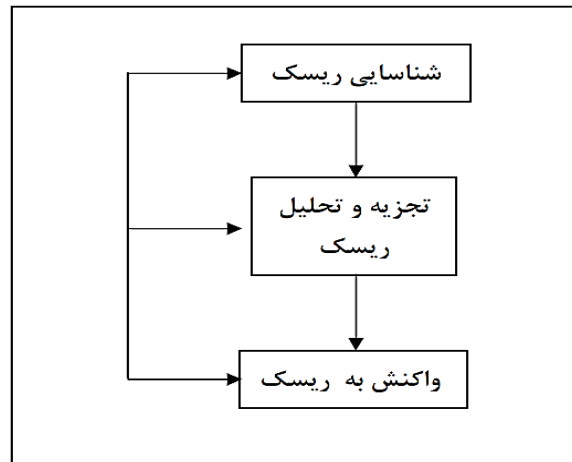


شکل (۶-۲) مدل مدیریت ریسک روری بورک [۳۱]

1- Chapman

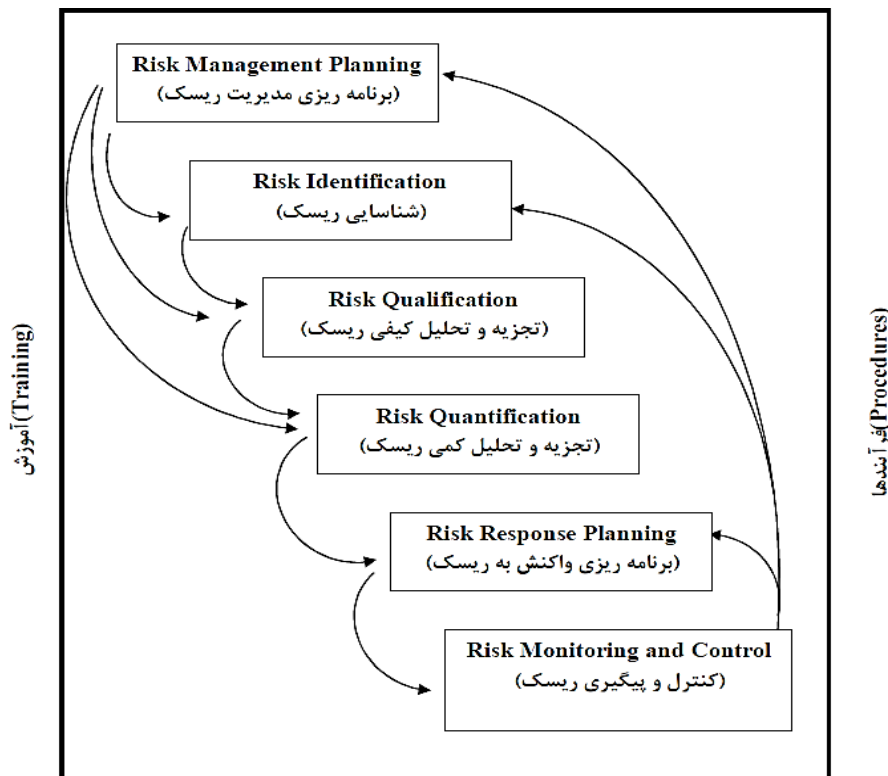
2- Burke

- مدل مدیریت ریسک جان رافتری^۱ مطابق شکل (۷-۲) تعریف می‌شود [۳۲].



شکل (۷-۲) فرآیند مدیریت ریسک جان رافتری [۳۲]

- فرآیند مدیریت ریسک بر اساس الگوی PMBOK در شکل (۸-۲) آمده است [۳۳].



شکل (۸-۲) فرآیند مدیریت ریسک PMBOK [۳۳]

1- John Raftery

از بین مدل‌هایی که برای مدیریت ریسک ارایه گردیده، مدل PMBOK از طرفداران بیشتری برخوردار است و به عنوان استاندارد مدیریت پروژه در اکثر ارگان‌هایی که با ریسک دست و پنجه نرم می‌کنند مورد استفاده قرار می‌گیرد، در ادامه شرح مختصری از فرآیند این استاندارد بین‌المللی بیان خواهد شد.

۲-۳-۴- مروری بر فرایند مدیریت ریسک پروژه در راهنمای PMBOK

طبق استاندارد PMBOK فرایند مدیریت ریسک دارای شش مرحله به شرح زیر است. فرایندهای مذکور با یکدیگر و با سایر فرایندهای موجود در سایر زمینه‌های دانش مدیریت پروژه در تعامل می‌باشند [۹، ۱].

۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک

برنامه‌ریزی ریسک، شالوده‌ی 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 اصول یکسان و مورد توافق به منظور ارزیابی ریسک‌ها، دارای اهمیت فراوانی است. در برنامه‌ی مدیریت ریسک در استاندارد PMBOK مواردی همچون روش‌شناسی مدیریت ریسک، نقش‌ها و مسوولیت‌ها، بودجه و زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت‌های مدیریت ریسک، دسته‌های ریسک، ماتریس شدت اثر ریسک و غیره لحاظ می‌شود [۹].

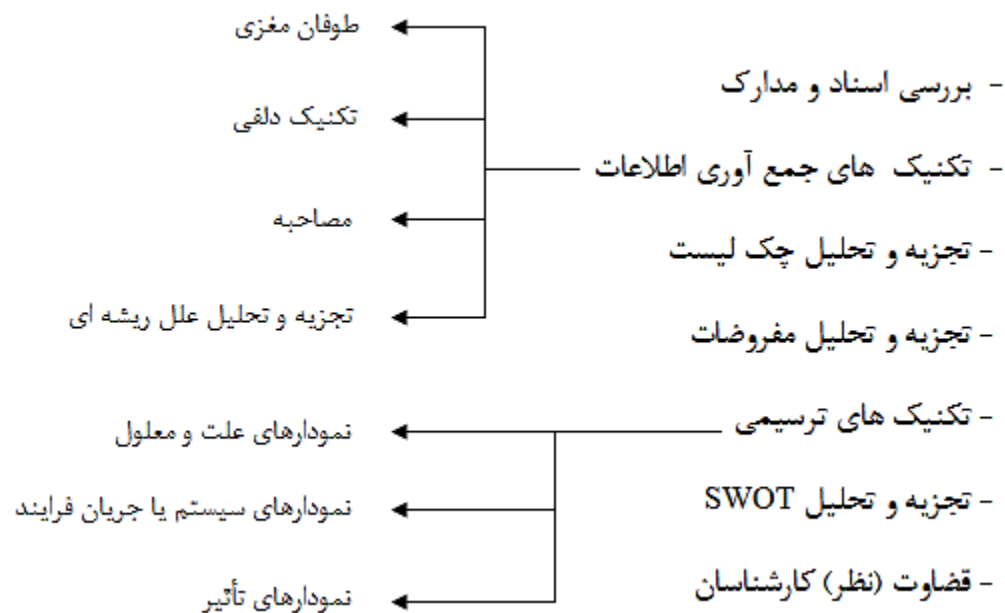
۲- شناسایی ریسک

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 گه‌گاه 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 طاقت‌فرسا می‌باشد. در صورتی‌که رویه‌ی شناخت ریسک مشخص شده باشد، مدیریت آنها راحت‌تر خواهد شد [۹].

نتایج این مرحله، عبارت‌اند از: شناسایی ریسک‌ها و منابع ریسک‌ها، شناسایی ریسک‌های بالقوه، شناسایی علائم ریسک و شناسایی ورودی سایر فرایندها در سایر محدوده‌های مدیریت پروژه [۱].

ابزارها و تکنیک‌های مختلفی برای شناسایی ریسک وجود دارند که در ادامه به آنها اشاره شده است [۱]:



۳- تجزیه و تحلیل کیفی ریسک

پس از لیست کردن کلیه‌ی 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 اثرگذاری آنها بر روی پروژه، از مقادیر کیفی برای بررسی ریسک استفاده می‌شود. از آنجایی‌که 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 رتبه‌ی احراز شده برای هر ریسک، نسبت به برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات آنها، اقدام نمود [۹].

تجزیه و تحلیل کیفی ریسک سریع و مقرون به صرفه است و برای اولویت‌بندی ریسک و برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک کاربرد دارد و پایه و اساسی را برای انجام تجزیه و تحلیل کمی ریسک، مهیا می‌کند [۱].

از این رو تجزیه و تحلیل کیفی ریسک را می‌توان در سه گام خلاصه کرد [۹]:

- فیلتر کردن ریسک‌ها برای تعیین اینکه آیا واقعاً برای پروژه‌ی فعلی ایجاد مشکل می‌کنند یا خیر؟

- تعیین احتمال وقوع ریسک

- رتبه‌بندی ریسک

ابزار و تکنیک‌های تجزیه و تحلیل کیفی ریسک عبارت‌اند از [۲۸، ۱]:

- **ارزیابی احتمال و تأثیر ریسک**^۱: توصیف احتمال رخداد ریسک و عواقب حاصل از آن ممکن است با استفاده از واژگان کیفی نظیر (خیلی کم، کم، زیاد و ...) صورت پذیرد. احتمال ریسک به شانس رخداد یک ریسک اطلاق می‌شود و عواقب ریسک به میزان تأثیر ریسک بر اهداف پروژه در صورت وقوع گفته می‌شود. این دو بعد از ریسک تنها برای وقایع ریسک مشخص و نه تمام آنها، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- **ماتریس رتبه‌بندی احتمال - تأثیر ریسک**^۲: ممکن است ماتریسی تشکیل شود که در آن، درجات ریسک بر مبنای ترکیب مقادیر احتمال و میزان تأثیر آن، به موقعیت‌های مختلف و یا ریسک‌های پروژه تخصیص داده شود. فرآیند رتبه‌بندی ریسک با استفاده از یک ماتریس و اختصاص مقادیری به هر یک از ریسک‌ها تکمیل می‌شود. میزان تأثیر یک ریسک منعکس‌کننده‌ی شدت اثر آن بر اهداف پروژه می‌باشد.

1- Risk Probability and Impact Assessment

2- Probability and Impact Matrix

در این ماتریس، احتمالات در یک سمت و تأثیر آن بر هر یک از اهداف پروژه در سمت دیگر قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از این ماتریس (که هر سلول برابر حاصل ضرب اثر در احتمال می‌باشد) می‌توان ریسک‌های مختلف را اولویت‌بندی کرد. در جدول (۱-۲) نمونه‌ای از ماتریس احتمال - اثر ارائه شده است.

جدول (۱-۲) ماتریس احتمال - اثر بر اساس PMBOK [۱]

ماتریس اثر و احتمال										
احتمال	تهدید					فرصت				
0.90	0.05	0.09	0.18	0.36	0.72	0.72	0.36	0.18	0.09	0.05
0.70	0.04	0.07	0.14	0.28	0.56	0.56	0.28	0.14	0.07	0.04
0.50	0.03	0.05	0.10	0.20	0.40	0.40	0.20	0.10	0.05	0.03
0.30	0.02	0.03	0.06	0.12	0.24	0.24	0.12	0.06	0.03	0.02
0.10	0.01	0.01	0.02	0.04	0.08	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01
	0.05	0.10	0.20	0.40	0.80	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05
اثر منفی					اثر مثبت					

در نتیجه انجام این کار، لیست ریسک‌های پروژه بروز رسانی شده و مقادیر احتمال و شدت اثر ریسک نیز به آن افزوده شده و اولویت ریسک‌ها مشخص می‌شود. با رتبه‌بندی ریسک‌ها، تجزیه و تحلیل‌های مورد نیاز بعدی مشخص گشته و حدود کار تعیین می‌گردد.

- **آزمون فرضیات پروژه^۱:** فرضیات شناسایی شده همواره می‌بایست از دو جنبه مورد ارزیابی و آزمون قرار گیرند، ثبات فرضیات و عواقب این فرضیات برای پروژه در صورت نادرستی آنها.

- **ارزیابی کیفیت داده‌های ریسک^۲:** تجزیه و تحلیل کیفی ریسک نیازمند داده‌های دقیق و بی‌طرفانه می‌باشد لذا این تکنیک با بررسی داده‌ها مشخص می‌کند که به چه میزان برای مدیریت ریسک مفید می‌باشند. استفاده از اطلاعات با کیفیت پایین سبب می‌شود تا نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل کیفی، کاربرد کمی برای پروژه داشته باشد.

1- Project Assumptions Testing
2- Risk Data Quality Assessment

- طبقه‌بندی ریسک^۱: ریسک‌های پروژه را می‌توان بر اساس منابع ریسک، فعالیت‌هایی از پروژه که تحت تأثیر ریسک می‌باشد و فاز پروژه طبقه‌بندی کرد. در نتیجه نواحی و فعالیت‌هایی از پروژه که تحت تأثیر ریسک و عدم قطعیت می‌باشد، مشخص می‌گردد. گروه‌بندی ریسک‌ها بر اساس علت‌های اصلی آنها منجر به واکنش‌های موثری می‌گردد.

- ارزیابی ریسک‌های اضطراری^۲: ریسک‌هایی که نیازمند واکنش‌های سریع می‌باشند، بایستی مشخص گردند. اولویت‌بندی ریسک‌ها می‌تواند بر اساس زمان پاسخ به ریسک، علائم و نشانه‌های خطر و اندازه ریسک انجام گیرد.

۴- تجزیه و تحلیل کمی ریسک

هدف از تجزیه و تحلیل کمی ریسک تحلیل عددی احتمال وقوع یک یا چند ریسک و پیامدهای آن بر اهداف پروژه می‌باشد. با استفاده از تجزیه و تحلیل کمی ریسک می‌توان به موارد زیر دست یافت [۳۴]:

- ریسک‌های 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 دست‌یافتنی پروژه را تعیین کرد
- در این مرحله تحلیل عددی موارد ریسک و پیامدهای وقوع آنها بر اهداف پروژه محاسبه می‌شود. موارد ذیل طی مرحله تحلیل کمی معین می‌شوند [۳۴]:

- 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 حوزه‌ی کاری واقعی و قابل دسترس ریسک

1- Risk Categorization
2- Risk Urgency Assessment

تکرار و یا اشاره به ریسک از طرف مجموعه‌ی پروژه در مرحله‌ی تحلیل کمی، به خصوص وقتی مرحله‌ی فوق در طول مدت پروژه تکرار می‌شود، نشان‌دهنده‌ی لزوم داشتن واکنش بیشتر یا کمتر در پاسخ‌گویی به ریسک می‌باشد. تکنیک‌هایی که در این مرحله معمول است، بر حسب خصوصیت آن ریسک خاص و یا محدوده کار مورد ارزیابی می‌باشد. تجزیه و تحلیل کمی، با آنکه به صورت همزمان هم ممکن است، ولی معمولاً بعد از تجزیه و تحلیل کیفی و در ادامه آن انجام می‌پذیرد [۳۴].

۵- برنامه‌ریزی واکنش در مقابل ریسک

برنامه‌ریزی واکنش به ریسک فرآیند افزایش مداوم فرصت‌ها از طریق واکنش مناسب به ریسک‌ها و تهدیدها می‌باشد. برنامه‌ریزی واکنش به ریسک بایستی متناسب با شدت ریسک، هزینه زمان واقعی با تعریف پروژه مورد توافق تمام متولیان و متصدیان پروژه باشد. همچنین بایستی نحوه‌ی تخصیص ریسک‌ها به افراد و گروه‌ها در این برنامه مشخص گردد [۳۴].

برنامه‌ریزی واکنش در مقابل ریسک به شناسایی بیشتر ریسک‌ها و تخصیص افراد برای به عهده گرفتن مسئولیت هر واکنش می‌پردازد. انواع راهکارهای قابل انتخاب برای مقابله با ریسک‌ها بسته به فرصت یا تهدید بودن ریسک متفاوت است. راهکارهای مختلفی برای واکنش در برابر ریسک‌ها توسعه داده شده است. این راهکارها در مورد ریسک‌های منفی و مثبت متفاوت می‌باشد. برای مقابله با ریسک‌هایی که می‌توانند اثر منفی بر روی پروژه بگذارند یا تهدیدی برای پروژه باشند چهار راهکار وجود دارد [۳۵, ۳۴, ۹, ۱].

– **اجتناب از ریسک^۱:** اجتناب از ریسک به معنای جلوگیری از وقوع رویدادهای بالقوه‌ی مخاطره‌آمیز است که از طریق تغییر در برنامه‌ی پروژه عملاً ریسک و شرایط بروز آن محو و در نتیجه اهداف پروژه از نتایج احتمالی منفی مصون می‌ماند. تکنیک‌های مختلفی در این استراتژی به کار می‌رود، متداول‌ترین

1- Risk Avoidance

روش برای اجتناب از وقوع یک ریسک عبارت است از لحاظ کردن راه‌حل‌های جایگزین به گونه‌ای که دارای ریسک کمتری باشند و یا اصلاً ریسکی در بر نداشته باشند.

- **انتقال ریسک^۱**: راهکار انتقال ریسک اغلب در پروژه‌هایی که به صورت گروهی و یا توسط پیمانکاران انجام می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش می‌توان ریسک و یا اثرات ناشی از آن را به شخص سوم منتقل کرده و بدین وسیله مسوولیت رفع آن ریسک به شخصی خارج سازمان منتقل می‌شود. این روش در مقابله با ریسک‌های مالی بسیار کارآمد است.

- **کاهش اثر ریسک^۲**: کاهش اثر ریسک عبارت است از کنترل رویداد ریسک به گونه‌ای که شدت اثر و یا احتمال وقوع آن کاهش پیدا کند. در این روش با کاهش میزان شدت اثر ریسک، مانند هزینه و مدت زمان تحمیل شده به پروژه و یا کاهش احتمال وقوع ریسک، می‌توان اثر کلی ریسک بر روی پروژه را کاهش داد. معمولاً با استفاده از منابع بیشتر و یا نیروی انسانی کارآزموده‌تر می‌توان اثرات ریسک را در پروژه‌ها کاهش داد. همچنین استفاده از فناوری‌های آزمایش شده به جای فناوری‌های جدید و آزمایش نشده نیز می‌تواند برای کاهش اثر ریسک مفید باشد. کاهش اثر ریسک، به نوعی پذیرش ریسک می‌باشد. به این معنا که ریسک پذیرفته شده و وقوع آن مورد قبول می‌باشد.

- **پذیرش ریسک^۳**: به علت عدم امکان تغییر در برنامه‌ی پروژه با استراتژی پذیرش، احتمال وقوع ریسک‌ها و اثرات آنها قبول می‌شود. پذیرش ریسک ساده‌ترین روش در رویارویی با ریسک می‌باشد. در این شرایط، احتمال وقوع ریسک وجود داشته و میزان تأثیر ریسک بر روی پروژه در حدود تحمل تیم پروژه و سازمان می‌باشد.

1- Risk Transfer
2- Risk Mitigation
3- Risk Acceptance

برای مقابله با ریسک‌هایی که می‌توانند اثر مثبت بر روی پروژه بگذارند یا تبدیل به فرصت شوند نیز چند راهکار وجود دارد [۹، ۱]:

- **بهره‌برداری از ریسک^۱:** در این راهکار، تلاش می‌شود تا با بررسی عوامل ایجاد ریسک مثبت، از این عوامل برای ایجاد بهبود در پروژه جاری و یا پروژه‌های بعدی استفاده کرد.

- **سهیم کردن دیگران در ریسک^۲:** سهیم کردن ریسک عبارت است از به اشتراک گذاشتن ریسک مثبت یا فرصت با اشخاص حقیقی و حقوقی خارج از سازمان به گونه‌ای که این اشخاص بتوانند با استفاده بهتر از این ریسک، در بهره‌برداری بیشتر از آن در پروژه شرکت کنند.

- **ارتقا ریسک^۳:** در این راهکار تلاش می‌شود تا با افزایش اثرات ریسک بر روی پروژه و یا افزایش احتمال وقوع آن در طول چرخه‌ی حیات پروژه میزان تأثیرگذاری آن در پروژه را افزایش داد.

- **پذیرش ریسک:** این راهکار به این معناست که تیم پروژه تصمیم می‌گیرند که هیچ تغییری در پروژه برای حذف یا کاهش اثر یک ریسک ایجاد نکنند و در صورت وقوع خود را با آن ریسک وفق دهند.

علاوه بر موارد فوق می‌توان از اقدامات اقتضایی در برابر ریسک‌ها استفاده کرد. برای این منظور تیم پروژه تنها در صورت رخ دادن ریسک، برخی اقدامات را انجام می‌دهد. با برگزاری جلسات مختلف و نیز مصاحبه و اخذ نظر کارشناسان می‌توان از راهکارهای فوق برای هر یک از ریسک‌ها استفاده کرده و بهترین واکنش برای هر ریسک را تعیین نمود. در ضمن می‌توان برای هر ریسک، مسوول مربوط به اجرای راهکار واکنش در برابر ریسک را مشخص نمود. این موارد را می‌توان در لیست ریسک‌های پروژه به‌روزرسانی نمود. در صورت لزوم در برخی موارد نیز می‌توان نسبت به عقد قرارداد با شخص ثالث وارد عمل شد.

۶- پایش و کنترل ریسک

1- Risk Exploit

2- Risk Sharing (Risk Facilitating)

3- Risk Enhancement

کنترل ریسک فرآیندی است که به منظور اطمینان کامل از اجرای برنامه‌های مدیریت ریسک و اثربخشی تحقق این برنامه‌ها در کاهش ریسک‌های پروژه انجام می‌گیرد. در این فرآیند علاوه بر پیگیری ریسک‌های شناسایی شده، کنترل ریسک‌های باقیمانده و نیز شناسایی ریسک‌های جدید در طول چرخه‌ی حیات پروژه نیز مد نظر می‌باشد. پس از آنکه اقدامات و راهکارهای مورد نظر برای رویارویی با ریسک تعیین گردید، باید نسبت به اجرای این راهکارها اقدام نمود. برای این کار باید رویه‌های پایش ریسک به گونه‌ای باشد که بتواند تیم پروژه را از ریسک‌های ناگهانی مطلع نماید [۳۵،۹].

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 پذیرد. به علاوه باید در خلال این مرحله بررسی‌های لازم در مورد ریسک‌های شناسایی شده در پروژه نیز به عمل آید و در صورت نیاز استراتژی‌های مرتبط برای رویارویی با آن نیز تعیین شود. از آنجایی که مسوولیت نهایی برنامه‌ی ریسک پروژه بر عهده مدیر پروژه می‌باشد. وی باید یکی از اعضای تیم پروژه را در محدوده‌ی فنی پروژه برای پایش ریسک‌هایی که احتمال وقوع دارند بگمارد [۹].

در یک نگاه کلی فرآیند پایش و کنترل ریسک به انجام این اقدامات در پروژه می‌پردازد [۲۸]:

- انتخاب استراتژی‌های جایگزین واکنش در برابر ریسک
- اجرای برنامه‌های اقتضایی
- انجام اقدامات اصلاحی
- برنامه‌ریزی مجدد پروژه

در نتیجه این بررسی‌ها، ممکن است لازم باشد تا برنامه پروژه مجدداً اصلاح گردد. مخصوصاً در مواقعی که راهکارهای رویارویی با ریسک ناموثر بوده و یا فرضیات اولیه صحیح نبوده‌اند.

با توجه به توضیحات فوق می‌توان دریافت که ارزیابی ریسک قسمت مهمی از فرآیند مدیریت ریسک پروژه می‌باشد که در جهت شناسایی ریسک‌های با اهمیت بالاتر برای واکنش به هنگام در مقابله با ریسک به وجود آمده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی ریسک، روش‌های مختلفی معرفی شده است. مختصراً مهم‌ترین روش‌های موجود برای ارزیابی ریسک در زیر بیان شده‌اند:

۲-۳-۵- روش‌های ارزیابی ریسک

۲-۳-۵-۱- تحلیل درخت خطا^۱

به طور کلی می‌توان گفت روش ارزیابی درخت خطا عبارت است از [۳۶]:

مدلی منطقی - دیداری که از آن برای شرح چگونگی وقوع وقایع 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 دو صورت با یا بدون کمیت احتمال وقایع می‌توان به کار گرفت و ساختار مسائل پیچیده‌ای را که رویدادهای متعددی در آنها دخیل می‌باشند بنا نهاد.

تحلیل درخت خطا بیشترین توانایی را برای شناسایی ریشه‌های وقوع ریسک‌های عمده را دارد و از این جهت یک ابزار قدرتمند محسوب می‌شود. توانایی دیگری که از این ابزار در ارزیابی ریسک می‌توان انتظار داشت، تحلیل حساسیت ریسک‌های اصلی نسبت به حوادث پایه خود می‌باشد، که این امر نیز می‌تواند به تمرکز بر رو حوادثی که بیشترین تأثیر را بر وقوع ریسک اصلی دارند منجر گردد [۳۷].

1- Fault Tree Analysis (FTA)

اولین گام در تجزیه و تحلیل درخت خطا شناخت کامل و دقیق سیستم است. همان طور که در ابتدا شرح داده شد پس از شناسایی ریسک‌های خاص پروژه‌های احداث تونل با تمرکز کردن بر روی یکایک این ریسک‌ها علل ریشه‌ای هر کدام شناسایی شده و با استفاده از درخت خطا به شیوه‌های ملموس رتبه‌بندی شده‌اند. روش درخت خطا برای تحلیل مسیرهای با پیچیدگی‌های بالا، که در آن خروجی‌های مربوط به یک ترکیب یا چندین ترکیب از وقایع غیر بحرانی ممکن است یک واقعه بحرانی نامطلوب را ایجاد کند، مفید می‌باشد. درخت خطا، توصیفی ثانوی و منظم از ترکیبات مختلف مربوط به رخداد‌های ممکن در درون، مستلزم صرف زمان مهندسی قابل توجه است. FTA سیستمی فراهم می‌سازد که می‌تواند منجر به واقعه خروجی بحرانی از پیش تعیین شده شود. کارآیی روش و کیفیت نتایج به اعتبار داده‌های ورودی و دقت منطق درخت خطا بستگی دارد. این روش می‌تواند در اوایل فاز طراحی اولیه به انجام رسد و به تدریج تعالی یافته و به‌روز شود تا همزمان که طرح رشد می‌کند احتمال یک واقعه نامطلوب را ردگیری نماید [۳۷].

۲-۳-۵-۲- تحلیل درخت رویداد^۱

تشریح توسعه ریسک از رویداد اولیه تا حالت نهایی از طریق نتایج ممکن، توسط روش تحلیل درخت رویداد قابل اجرا می‌باشد. در این روش با استفاده از ارزیابی احتمالات برای خروجی‌های مختلف، تحلیل کمی ریسک حاصل می‌گردد [۳۶].

درخت رویداد عبارت است از یک تکنیک مدل‌سازی قیاسی که با ایجاد دو شاخه‌ی موفقیت و نقص به طور همزمان به ارزیابی علل یک رویداد منفرد می‌پردازد. این تکنیک پاسخ‌های سیستم در برابر یک چالش شروع کننده را تشریح کرده و ارزیابی احتمال یک پیامد مطلوب و یا نامطلوب را فراهم می‌سازد [۳۸].

چالش سیستم می‌تواند یک نقص، خطا، رویداد نامطلوب و حتی یک دستور عملیاتی طبیعی سیستم باشد. یک درخت رویداد عمومی کلیه مسیرهای محتمل از عملیات مختلف سیستم را از رویداد شروع کننده

1- Event Tree Analysis (ETA)

به تصویر می‌کشد. یک درخت رویداد مبتنی بر مدل برنولی برای نشان دادن حالات نقص یا موفقیت سیستم از یک گره منطقی آن از شاخه‌های دوگانه استفاده می‌کند. یک درخت تصمیم‌گیری نوع اختصاصی از درخت خطا است که در آن احتمال نتیجه سیستم برابر واحد است. بایستی به خاطر داشت که بسیاری از تکنیک‌های مورد استفاده در ایمنی سیستم به جای جایگزین هم بودن مکمل یکدیگر می‌باشند. دلیل امر این است که هر کدام از تکنیک‌ها سیستم مورد تحلیل را به شکل خاص و از دیدگاه خود مورد تحلیل قرار می‌دهند. امروز ثابت شده است که تقریباً تکنیکی وجود ندارد که بتواند به عنوان تکنیک همه‌کاره به همه‌ی سوالات پاسخ داده و برای کلیه‌ی شرایط مناسب باشد [۳۸].

۲-۳-۵-۳- تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن^۱

متدولوژی یا روشی سیستماتیک است که به دلایل زیر به کار می‌رود [۳۹]:

- شناسایی و اولویت‌بندی حالات بالقوه خرابی در یک سیستم، محصول یا فرآیند
- تعریف و اجرای اقداماتی به منظور حذف یا کاهش میزان وقوع حالات بالقوه خرابی
- ثبت نتایج تحلیل‌های انجام شده به منظور فراهم کردن مرجعی کامل برای حل مشکلات در آینده

FMEA در شرایط زیر اجرا می‌شود [۳۹]:

- 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
- قرار گرفتن فرآیندهای تولید یا مونتاژ و یا یک محصول در محیطی جدید و یا شرایط کاری جدید
- برنامه‌های بهبود مستمر

1- Failure Mode and Effective Analysis (FMEA)

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. به بیانی دیگر یکی از تفاوت‌های اساسی FMEA با سایر تکنیک‌های کیفی این است که یک اقدام کنشی است نه واکنشی. در بسیاری از موارد وقتی با مشکلی روبه‌رو می‌شویم ممکن است برای حذف آن اقدامات اصلاحی تعریف و اجرا شود. این اقدامات واکنشی است در برابر آنچه اتفاق افتاده است. در چنین مواردی حذف همیشگی مشکل، به هزینه و منابع نیاز دارد، اما 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. برخورد پیشگیرانه کنشی است در برابر آنچه ممکن است در آینده رخ دهد و مسلماً اعمال اقدامات اصلاحی در مراحل اولیه‌ی طراحی محصول یا فرآیند، هزینه و زمان کمتری در بر خواهد داشت. علاوه بر این، هر تغییری در این مرحله یا فرآیند به راحتی انجام شده و در نتیجه احتمال نیاز به تغییرات بحرانی در آینده را حذف می‌کند یا کاهش خواهد داد [۳۹].

۲-۳-۵-۴ - روش‌های فازی^۱

منطق فازی در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی علی عسگرزاده پروفیسور علوم کامپیوتر دانشگاه برکلی کالیفرنیا ارائه شد. به صورت مفهومی منطق فازی، چند ارزشی است و اجازه می‌دهد که ارزش‌هایی را بین دو ارزش‌هایی مثل "درست / نادرست"، "بله / خیر"، "یا" / "بالا / پایین" و ... را 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

1- Fuzzy Set

فرض می‌کند. می‌توان مفاهیمی چون "خیلی"، "نسبتاً"، "تقریباً" و ... را که از پایه‌های اندیشه و استدلال‌های معمولی انسان می‌باشند، به صورت ریاضی درآورد تا به وسیله‌ی کامپیوتر قابل فهم باشند و از این طریق بتوان برنامه‌های کامپیوتری که به منطق و تفکر انسان نزدیک‌ترند را به وجود آورد [۴۰].

به طور کلی در منطق فازی دانستن سه چیز، اول تعریف یا مدلی برای متغیرها، دوم چگونگی ارتباط متغیرها (اگر چند ورودی داشته باشیم) و سوم چگونگی نتیجه‌گیری ضروری می‌باشد. در واقع هدف نهایی منطق فازی ایجاد یک نظریه برای استدلال در مورد گزاره‌هایی است که درستی یا نادرستی آنها به صورت قطعی مشخص نیست. به این نوع استدلال، استدلال تقریبی نیز گفته می‌شود. در منطق فازی درستی گزاره می‌تواند هر مقداری در بازه [۰,۱] اختیار کند [۴۰].

در فصل بعدی این روش با بیانی شیواتر توضیح داده خواهد شد.

۲-۳-۵- شبیه‌سازی مونتکارلو^۱

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 این‌گونه موارد با استفاده از شبیه‌سازی‌ها، از جمله شبیه‌سازی مونت‌کارلو که به صورت وسیعی در پروژه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، راه‌حلی 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 می‌گردد. هرچه تعداد شبیه‌سازی بیشتر باشد، نتیجه

1- Monte Carlo Simulation

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 [۳۶].

۲-۳-۵- روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره^۱

به مجموعه فنونی اطلاق می‌شود که به دنبال ارزیابی راه‌حل‌های ممکن موجود 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^۲ و تصمیم‌گیری چند شاخصه^۳ تقسیم می‌شوند که MODM به منظور طراحی و MADM برای انتخاب گزینه برتر استفاده می‌شوند [۴۱، ۲۸].

– 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 مسئله چند هدف به طور همزمان تأمین شود. برای حل این‌گونه 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.

– 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 شمارشی از گزینه‌های از پیش تعیین شده وجود دارد. به طور کلی فنون تصمیم‌گیری چند شاخصه به دو دسته کلی

1 - Multi Criteria Decision Making (MCDM)

2 - Multi Objective Decision Making (MODM)

3 - Multiple Attribute Decision Making (MADM)

جبرانی و غیر جبرانی تقسیم می‌شود و در میان روش‌های موجود تنها می‌توان از روش‌های جبرانی در مساله رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده نمود چرا که در مسئله رتبه‌بندی ریسک‌های پروژه، شاخص‌های مختلف بر یکدیگر تأثیر دارند. از مهم‌ترین فنون جبرانی روش میانگین وزنی ساده^۱، LINMAP^۲، TOPSIS^۳، MRS^۴، MDS^۵، ELECTRE^۶، تخصیص خطی^۷ می‌باشند [۴۱]. در فصل بعدی این روش به بیانی شیواتر توضیح داده خواهد شد.

۲-۴ - نتیجه‌گیری

در این فصل اصول و مفاهیم اولیه پروژه و مدیریت پروژه، ریسک، عدم قطعیت و مدیریت ریسک از دیدگاه افراد و کتب مرجع بیان شده است. فرآیند مدیریت ریسک با توجه به منابع مختلف تشریح و از دیدگاه استاندارد بین‌المللی دانش مدیریت پروژه به صورت کامل توضیح داده شده است و روش‌های ارزیابی ریسک با توجه به اهمیت آنها در امر مدیریت ریسک ارایه گردیده است.

-
- 1- Simple Additive Weighting (SAW)
 - 2- Linear Programming for Multidimensional Analysis of Preferences
 - 3- Technique for order Preference by Similarity to Ideal Solution
 - 4- Marginal Rate of Substitution of Attributes
 - 5- Multidimensional Scaling With Ideal Point
 - 6- Eliminationet Choice Translating Reality
 - 7- Linear Assignment (LA)

فصل سوم: پیشینه‌ی تحقیق

۳-۱- مقدمه

ریسک پروژه‌های تونل‌سازی (خصوصاً تونل‌های آبرسان به دلیل طول عمر بسیار زیاد) همواره قابل توجه بوده و از طریق مدیریت مناسب می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آنها را کاهش داد. از جمله علل اصلی طولانی‌تر شدن و افزایش هزینه‌های پروژه‌های تونل‌سازی، مدیریت ناقص و ضعیف، به ویژه ضعف در مدیریت ریسک گزارش شده است [۱۸]. مدیریت ریسک به عنوان یکی از سطوح اصلی دانش مدیریت، هنر و علم تشخیص، تعیین و واکنش به ریسک در چرخه‌ی عمر یک پروژه برای حفظ روند رسیدن به اهداف است [۱].

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 دست‌اندرکاران توسعه چنین پروژه‌هایی با انواع ریسک مواجه هستند. همچنین در کنار پیشرفت‌هایی که در ساخت فضاها و زیرزمینی در چند دهه‌ی اخیر به وجود آمده است، طراحان تونل هنوز نگران ریسک‌هایی هستند که تونل‌سازی را در بر می‌گیرد [۴۲].

امروزه مدیریت ریسک بخش مهم و مستقل در طراحی و ساخت هر سازه‌ی زیرزمینی بزرگ است و مزایای ناشی از آن نیز در سیستم مدیریت پروژه و طرح‌های فاقد این بخش مشخص شده است. ارزیابی ریسک یکی از ارکان مدیریت ریسک بوده و با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه‌ی منابع، دارای اهمیت زیادی است. هدف از ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف از

قبیل میزان تأثیر و احتمال وقوع می‌باشد. رتبه‌بندی ریسک‌ها، قسمت کلیدی این فرایند به شمار می‌رود زیرا با انجام رتبه‌بندی، ارجحیت هر ریسک در مقابل سایر ریسک‌ها مشخص و در نتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک برنامه‌ریزی نماید [۴۳].

در این فصل ضمن مرور مدیریت ریسک و تحقیقات انجام شده در خصوص ارزیابی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی، نقاط قوت و ضعف آنها جمع‌بندی شده است.

۳-۲- مدیریت ریسک در تونل‌سازی

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 [۱].

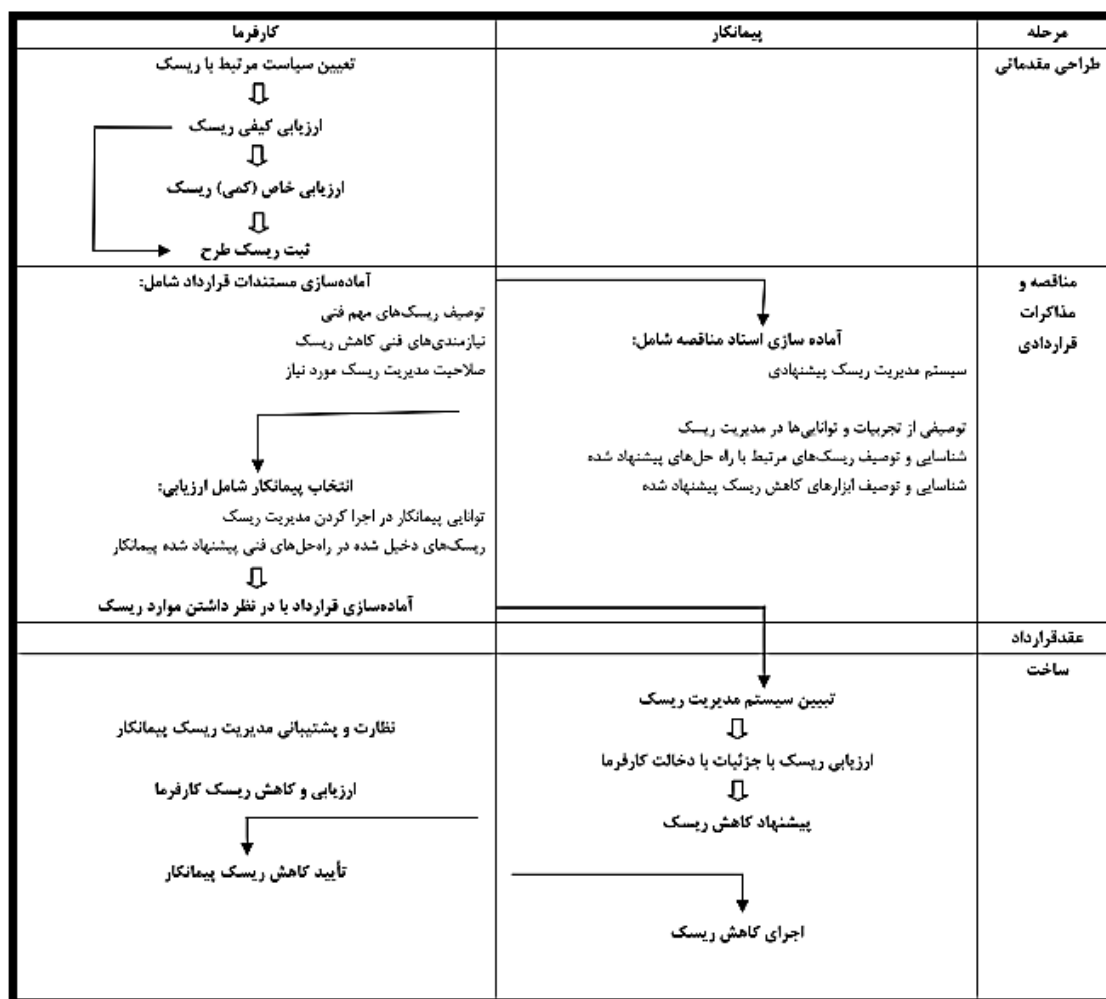
در کتاب‌های مختلف تعریف‌های مختلفی برای مدیریت ریسک و مراحل آن ارائه شده است، لیکن در تمامی آنها می‌توان سه بخش اصلی شناسایی، ارزیابی و کنترل را مشاهده کرد. در سیستم‌های مدیریت ریسک تدوین شده برای محیط‌های دارای عدم قطعیت زیاد، مخصوصاً در ارتباط با زمین و فعالیت‌های مهندسی تأکید عمده بر مراحل شناسایی و کنترل ریسک می‌باشد. اجرای روش ارزیابی ریسک کیفی در ابتدای کار این مزیت اساسی را به همراه دارد که از اتلاف هزینه و زمان در مراحل بعدی ارزیابی ریسک جلوگیری می‌کند. به طور کلی هدف از طبقه‌بندی اولیه ریسک‌ها تهیه چارچوبی برای ارزیابی‌های کمی‌تر و پرهزینه‌تر ریسک‌ها می‌باشد.

مدیریت و کنترل ریسک در سه فاز پروژه انجام‌پذیر است که در شکل (۳-۱) آمده است [۴۴]:

- برنامه‌ریزی و طراحی

- آماده‌سازی قرارداد و اسناد مناقصه

- فاز ساخت و اجرایی



شکل (۳-۱) جریان فعالیت مدیریت ریسک در طول اجرای پروژه‌های تونل‌سازی [۴۵]

برای ارزیابی و کنترل هر یک از این نوع ریسک‌ها نیز ابزارها و روش‌های متفاوتی وجود دارد.

ریلی و براون^۱ در سال ۲۰۰۴ ریسک‌های مرتبط با طرح‌های تونل‌سازی را این‌چنین برشمرده‌اند [۴۴]:

1- Reilly & Brown

- ریسک آسیب یا نقصان‌هایی با پتانسیل مرگ و جراحت کارکنان، خطرات اقتصادی و تجهیزاتی زیاد و از دست دادن اعتبار برای افراد درگیر

- ریسک عدم دستیابی به استانداردها و معیارهای تعیین شده در طراحی، عملیات، پشتیبانی و کیفیت

- ریسک‌های یک تأخیر مهم در اتمام پروژه و آغاز عملیات درآمدزایی آن

- ریسک‌های افزایش جدی در هزینه‌های پروژه و پشتیبانی آن

واگنر^۱ در تقسیم‌بندی خود ۴ نوع ریسک را برای پروژه‌های تونل‌سازی شناسایی می‌کند که شامل [۱۸]:

- ریسک‌های ساخت و طراحی

- ریسک‌های درآمد و تقاضا

- ریسک‌های عملیات و نگهداری

- دیگر ریسک‌ها (مانند: تغییرات در قانون، مالیات و...)

در بحث مدیریت ریسک نکته حائز اهمیت در ابتدا تعریف ریسک‌ها و طبقه‌بندی آنها می‌باشد. با این‌کار حوزه‌ی مدیریت آنها نیز مشخص می‌شود. با توجه به گستردگی انواع ریسک‌ها، مدیریت آنها نیز بسیار متنوع خواهد بود. ریسک‌های پروژه در یک نگرش کلان و در ارتباط با مسائلی همچون زمان و هزینه پروژه تعریف می‌شوند در صورتی که پس از تعریف و طراحی طرح و در حین اجرا بیشتر ریسک‌های فنی مدنظر است [۴۵].

راهنمای مدیریت ریسک انجمن جهانی تونل نیز انواع ریسک را بر اساس فازهای پیشرفت یک پروژه تعریف کرده و مدیریت تمامی ریسک‌های پروژه را مد نظر قرار داده است. در این راهنما تاکید عمده بر روی

حوزه‌ی مدیریت ریسک‌هاست به این معنی که در هر مرحله کدام یک از نهادهای درگیر در پروژه (کارفرما یا پیمانکار) مسوول مدیریت ریسک‌ها می‌باشند [۴۵].

بنابراین استفاده از مدیریت ریسک از همان مراحل ابتدایی پروژه، یعنی در مرحله‌ی تصمیم‌گیری‌های اساسی همچون انتخاب مسیر و انتخاب روش‌های اجرا که می‌توانند تحت تأثیر قرار گیرند، بسیار مهم است. برای مدیریت ریسک موثر یک پروژه تونل‌سازی حیاتی است که مدیریت پروژه در اولین فرصت ممکن، ترجیحاً در طول مطالعات امکان‌سنجی و مراحل پیش از طراحی پروژه آغاز گردد.

۳-۳- سابقه‌ی تحقیق

ارزیابی ریسک یکی از قسمت‌های اصلی فرآیند مدیریت ریسک بوده و در نتیجه‌ی این ارزیابی، رتبه‌بندی جامع ریسک‌های پروژه به دست آمده و ریسک‌های با اولویت بالاتر برای واکنش سریع‌تر مشخص می‌گردند تا با مدیریت درست و به هنگام از عواقب این ریسک‌ها (در جهت مقابله یا کاهش) بر فرآیند پروژه جلوگیری به عمل آید. با رتبه‌بندی ریسک‌ها، تجزیه و تحلیل‌های مورد نیاز بعدی مشخص گشته و حدود کار تعیین می‌گردد.

محققان مختلفی به منظور ارزیابی ریسک از روش‌های بیان شده در فصل گذشته استفاده نموده‌اند. جدول (۱-۳) تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی ارزیابی ریسک در علوم مختلف را بیان می‌دارد.

جدول (۱-۳) سابقه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ارزیابی ریسک

روش	توضیحات	نویسندگان [مرجع]	سال
۶- —	استفاده از روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی برای ارزیابی ریسک پل	[46] Wang & Elhag	2006

2008	[47] Chen & Chen	تحلیل ریسک فازی بر اساس اندازه‌گیری شباهت بین فاصله مقدار عدد فازی	
2008	[48] Lee & Chen	تحلیل ریسک فازی بر اساس عدد فازی با اشکال مختلف و انحراف متفاوت	
2009	[49] Chen & Wang	تحلیل ریسک فازی بر اساس رتبه‌بندی اعداد فازی با استفاده از برش آلفا و نسبت سیگنال/ نویز	
2009	[50] Feng & Luo	تجزیه و تحلیل ریسک فازی طوفان دریایی در استان ژجیانگ چین	
2009	[51] Elsayed	سیستم استنتاج فازی برای ارزیابی ریسک گاز طبیعی مایع	
2009	[52] Wang & Lee	توسعه روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی بر اساس وزن‌های موضوعی و وزن اهداف	
2010	[53] Xu et al.	روشی برای تجزیه و تحلیل ریسک فازی بر اساس شباهت‌های جدید از عدد فازی دوزنقه‌ای	
2010	[54] Kaya & Kahraman	توسعه شاخص دقت و صحت فرایند فازی برای مشکلات تصمیم‌گیری	
2011	[55] Chen & Sanguansat	تجزیه و تحلیل ریسک فازی بر اساس روش جدید رتبه‌بندی فازی بین اعداد فازی تعمیم‌یافته	
2011	[56] Idrus et al.	توسعه مدل برآورد احتمالی هزینه‌های پروژه با استفاده از تحلیل ریسک و سیستم خبره فازی	
2011	[57] Hejazi et al.	بهبود تجزیه و تحلیل ریسک فازی بر اساس معیارهای شباهت‌های جدید از عدد فازی تعمیم‌یافته	
2011	[58] Nieto Morote & Ruz Vila	استفاده از تحلیلی سلسله مراتبی فازی برای ترکیب سرمایه‌ش، گرمایش و سیستم‌های تولید نیرو	
2012	[59] Fouladgar et al.	ارزیابی ریسک تونل انتقال آب قمرود با روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی	ارزیابی ریسک فازی
1994	[60] Burmaster & Anderson	اصول تمرین مناسب برای سلامت انسان با روش مونت کارلو و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی	
2001	[61] Greenland	تحلیل حساسیت، تحلیل ریسک مونت کارلو و ارزیابی عدم قطعیت‌ها	
2007	[62] Rezaie et al.	استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو توسعه یافته برای بهبود مدیریت ریسک با در نظر گرفتن روابط بین عدم قطعیت‌ها	
2008	[63] Wu	تکنیک‌های نمونه‌گیری همبسته در شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی ریسک	
2009	[64] Carmel et al.	ارزیابی خطر آتش‌سوزی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو	
2009	[65] Stroeve et al.	ارزیابی ریسک تصادف سیستماتیک در ترافیک هوایی با شبیه‌سازی مونت کارلو	
2010	[66] Smid et al.	نقاط قوت و ضعف مدل‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و شبکه‌های بیز در ارزیابی ریسک میکروبی‌ها	
2011	[67] Amigun et al.	ارزیابی ریسک اقتصادی روند فناوری‌های پیشرفته برای تولید بیواتانول در آفریقای جنوبی با روش مونت کارلو	
2001	[68] Lambert et al.	شناسایی، رتبه‌بندی و مدیریت ریسک برای استفاده در قسمت اصلی سیستم	
2002	[69] Linares	تصمیم‌گیری چند معیاره و تحلیل ریسک به عنوان ابزار مدیریت ریسک برای برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی	تصمیم‌گیری فازی
2005	[70] Levy	تصمیم‌گیری چند معیاره و پشتیبانی تصمیم‌گیری برای مدیریت ریسک سیل	
2006	[71] Linkov et al.	ارزیابی ریسک مقایسه‌ای برای تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره و مدیریت سازگاران	
2007	[72] Wang & chang	استفاده از روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل در ارزیابی هواپیمای آموزشی در یک محیط فازی	
2007	[73] Linkov et al.	تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی برای مواد نانو	
2008	[74] Kull & Talluri	مدل کاهش ریسک منبع با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره	
2010	[75] Vaidogas & Sakenaite	حفاظت از اموال در مقابل حوادث آتش‌سوزی به وسیله‌ی تصمیم‌گیری چند شاخصه	

ادامه‌ی جدول (۳-۱) سابقه‌ی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ارزیابی ریسک

روش	توضیحات	نویسندگان [مرجع]	سال
۲۰۰۹	تجزیه و تحلیل درخت خطا برای تجزیه و تحلیل ریسک یکپارچه و احتمالاتی سیستم‌های آب شرب	[76] Lindhe et al.	2009

2009	[77] Ferdous et al.	روش تجزیه و تحلیل درخت خطا فازی به کمک کامپیوتر	روش تجزیه و تحلیل
2010	[78] Vaurio	اندیشه‌ها و تحولات در اهمیت اندازه‌گیری و تکنیک‌های درخت خطا برای قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک	
2011	[79] Rodak et al.	معیارهای قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری برای ارزیابی ریسک‌های سلامتی انسان	
2011	[80] Farret et al.	طراحی درختان خطا به عنوان یک روش عملی برای تجزیه و تحلیل ریسک جذب و ذخیره‌سازی کربن	
2011	[81] Mentis & Helvacioğlu	کاربرد تجزیه و تحلیل درخت خطا فازی برای گسترش سیستم‌های پهلویی (لنگرها)	
1987	[82] Linder et al.	کاربرد تجزیه و تحلیل ریسک درخت رویداد برای مدیریت شیلات	روش تجزیه و تحلیل
2002	[83] Cho et al.	ارزیابی ریسک برای ترکیب عدم قطعیت‌ها با استفاده از مفاهیم فازی	
2004	[84] Wreathall & Nemeth	نقش ارزیابی ریسک احتمالاتی در بهبود ایمنی بیماران	
2004	[85] Xu & Dugan	ترکیب درخت خطا پویا و درخت رویداد برای ارزیابی ریسک احتمالاتی	
2008	[86] Neri et al.	توسعه‌ی درخت رویداد برای خطر احتمالاتی و ارزیابی ریسک در کوه‌های آتشفشانی	
2011	[87] Ferdous et al.	تجزیه و تحلیل درخت خطا و رویداد برای پردازش سیستم‌های تحلیل ریسک: عدم قطعیت سیستم‌های انتقال مواد	روش تجزیه و تحلیل
2011	[88] Vilchez et al.	درختان رویداد عمومی و احتمالاتی برای انتشار انواع مختلف مواد خطرناک	
2001	[89] Franceschini & Galetto	روش جدید برای ارزیابی اولویت‌های ریسک حالت شکست در روش FMEA	
2002	[90] Xu et al.	ارزیابی فازی روش تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن برای سیستم‌های موتور	
2003	[91] Marx & Slonim	ارزیابی ریسک و ایمنی بیمار قبل از آسیب: مدل‌سازی اجتماعی ریسک احتمالی در مراقبت‌های بهداشتی	
2004	[92] Carlsson	تجزیه و تحلیل ریسک اولیه از حالت‌های پتانسیل شکست	روش تجزیه و تحلیل
2009	[93] Wang et al.	ارزیابی ریسک در حالت شکست و تجزیه و تحلیل اثرات با استفاده از میانگین هندسی وزن فازی	
2009	[94] Van Leeuwen et al.	تجزیه و تحلیل ریسک با روش FMEA به عنوان یک عنصر اعتبارسنجی تحلیلی	
2010	[95] Abdelgawad et al.	مدیریت ریسک در صنعت ساخت‌وساز با استفاده از ترکیب روش FMEA فازی و AHP فازی	
2011	[96] Zhang et al.	اولویت‌بندی ریسک در حالت شکست و تجزیه و تحلیل اثرات آن تحت عدم قطعیت	
2011	[97] Xiao et al.	تکثیر تجزیه و تحلیل حالات شکست و ارزیابی عدد اولویت ریسک وزن دار در FMEA	روش تجزیه و تحلیل

به علت اهمیت ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی، برخی از

تحقیقات انجام شده در این زمینه در جدول (۲-۳) ارائه شده است.

جدول (۲-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

نویسندگان	توضیحات	سال	مرجع
احمدی‌نژاد و همکاران	در این مقاله از روش مونت‌کارلو برای ارزیابی ریسک استفاده شده است	۱۳۸۲	[۹۸]

جعفری و همکاران	۱۳۸۵	[۹۹]	در این مقاله ضمن ارایه تقسیم‌بندی‌های مختلف از ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی، مناسب‌ترین تقسیم‌بندی، انتخاب و نحوه‌ی تأثیرگذاری آنها در فازهای مختلف یک پروژه تونل‌سازی بررسی شده است. برای شناسایی ریسک‌ها؛ از روش‌های طوفان ذهنی و مصاحبه استفاده شده است و برای ارزیابی آنها استفاده از ماتریس ریسک توصیه شده است.
حبیب‌الله شیخی و همکاران	۱۳۸۵	[۱۰۰]	این مقاله فرآیندهای مدیریت ریسک موجود را که می‌توان در قراردادهای پروژه‌های تونلی به کاربرد را معرفی می‌نماید و راهنمایی‌هایی در مورد وظایف هر یک از متصدیان این پروژه‌ها در مراحل مختلف پروژه ارایه می‌کند.
مرتضوی و فتحی	۱۳۸۷	[۱۰۱]	در این مقاله ضمن ارایه تقسیم‌بندی‌های مختلف از ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی شهری، مهم‌ترین و مناسب‌ترین تقسیم‌بندی انتخاب و تأثیر آنها در فازهای مختلف یک پروژه تونل‌سازی شهری بررسی شده است.
موسوی و قربانی کیا	۱۳۸۸	[۱۰۲]	هدف اصلی در این مقاله، شناسایی ریسک‌های موجود در تأمین و تدارکات پروژه‌های احداث و ارایه چارچوبی مناسب برای تحلیل ریسک‌ها می‌باشد. در این راستا، از تکنیک توانمند LINMAP، ریسک‌ها در محیط عدم قطعیت این پروژه‌ها، ارزیابی و تحلیل می‌شوند.
صیادی و همکاران	۱۳۸۸	[۱۰۳]	در این مقاله برای ارزیابی ریسک از روش FMEA و منطق فازی استفاده شده است. پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، وخامت، رخداد و کشف می‌باشد.
صیادی و رجب‌زاده	۱۳۸۸	[۱۰۴]	در این تحقیق امکان‌پذیری استفاده از روش تصمیم‌گیری TOPSIS (شباهت به گزینه ایده‌آل) در رتبه‌بندی ریسک تونل‌سازی خط سه مترو تهران مورد بررسی قرار گرفته است.
قرباغی و همکاران	۱۳۸۹	[۱۰۵]	در این مقاله بر اساس طرح مدیریت ریسک با بررسی ماشین TBM، سعی گردیده مبنایی از ریسک‌های محتمل در حفاری، ریسک‌های پیش روی پروژه مشخص و اقداماتی برای کاهش و ایجاد شرایط ایمن برای طراحی و اجرا اتخاذ گردد.
صیادی و همکاران	۱۳۹۰	[۱۰۶]	در این پژوهش مجموعه نسبتاً کاملی از معیارها، جهت استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه معرفی و ریسک‌های مرتبط با عملیات تونل‌سازی سد سیمره در جنوب غرب ایران، ارزیابی و رتبه‌بندی شده است. جهت تعیین رتبه ریسک‌ها از روش‌های تخصیص خطی، شباهت به گزینه ایده‌آل و میانگین وزنی ساده استفاده شده است.

ادامه‌ی جدول (۲-۳) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

نویسندگان	توضیحات	سال	مرجع
-----------	---------	-----	------

صیادی و همکاران	۱۳۹۰ [۱۰۷]	در این تحقیق از روش تصمیم‌گیری گروهی و میانگین وزنی جهت جمع‌آوری و تجمیع نظر خبرگان و از روش تخصیص خطی برای تعیین رتبه‌ی ریسک‌ها استفاده شده است. شاخص‌های رتبه‌بندی در دو دسته تقسیم شده‌اند که شاخص اولیه بر مبنای احتمال و میزان اثرگذاری ریسک‌ها بر اهداف پروژه و شاخص دوم شامل اثرات اجتماعی-اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی، نزدیکی زمان وقوع ریسک، میزان مواجهه با ریسک، عدم اطمینان تخمین و میزان مدیریت پذیری ریسک است.
جعفری و حسامی	۱۳۹۰ [۱۰۸]	در این مقاله تونل سرریز سد هراز با استفاده از روش ریسک سوداگرانه مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که کاهش قابل توجه در زمان و به طور غیر مستقیم در هزینه پروژه به وجود آمده است.
حیاتی و صیادی	۱۳۹۰ [۱۰۹]	در این مقاله از روش ماتریس احتمال- اثر ریسک که یکی از مهم‌ترین ابزارها برای ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی است، استفاده شده است. تعیین فاکتورهای ورودی (میزان احتمال وقوع و میزان اثرگذاری ریسک بر اهداف اصلی پروژه) در این روش توسط خبرگان صورت گرفته و در این تحقیق از منطق فازی به عنوان ابزاری مکمل برای انجام یک تجزیه و تحلیل سازگار و منطقی ریسک استفاده شده است.
نیک‌نیا و همکاران	۱۳۹۰ [۱۱۰]	در این مقاله به شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها و چالش‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حقوقی تونل انتقال آب ایبورد و اثرات منفی آنها و تبدیل آنها به فرصت در پروژه‌های تونل‌سازی پرداخته شده است.
نظارت و همکاران	۱۳۹۱ [۱۱۱]	با توجه به اهمیت موضوع مخاطرات زمین‌شناسی و هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در این مقاله ابتدا به بررسی مشکلات ناشی از ریسک‌های مذکور پرداخته شده و سپس راهکارهای پیشگیری و مقابله با هر ریسک ارائه شده است.
قاسمی و همکاران	۱۳۹۱ [۱۱۲]	در این مقاله ریسک‌ها و علل ریشه‌ای آنها در پروژه‌های احداث تونل به دقت شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای کارآمد بودن ارزیابی‌ها استفاده از درخت خطا جهت شناسایی علل ریشه‌ای وقوع ریسک‌ها و نمایش آنها و در نهایت تحلیل کمی ریسک توصیف شده است.
باقری و یوسفی	۱۳۹۱ [۱۱۳]	مقاله‌ی حاضر در جهت مطالعه ریسک‌های احداث تونل شهری نیایش با رویکرد شناسایی ریسک‌ها، منشأ و اثرات آنها است و ضمن بررسی تقسیم‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی شهری، مناسب‌ترین تقسیم‌بندی انتخاب شده است.

ادامه‌ی جدول (۳-۲) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

نویسندگان	توضیحات	سال	مرجع
Einstein	در تحقیق خود ریسک و تحلیل آن را به روش‌های سنتی در پروژه‌های تونل‌سازی بررسی کرده است.	1996	[114]
Sturk et al.	در تحقیقات خود مدلی برای تصمیم‌گیری در پروژه‌های زیرزمینی بر مبنای تحلیل ریسک ارائه کرده‌اند. برای ارزیابی ریسک از روش‌های تحلیل کیفی، AHP، FTA و ماتریس احتمال - اثر ریسک استفاده شده است.	1996	[115]
Kalamaras	در تحقیق خود به بررسی کیفی عدم قطعیت‌ها و ریسک و چگونگی تحلیل حساسیت پارامترها در پروژه‌های تونل‌سازی پرداخته است.	1996	[116]
Weger et al.	مدلی را برای ارزیابی ریسک مربوط به عوامل داخلی به منظور کاهش اثرات ریسک ارائه کرده‌اند.	2001	[117]
Chou et al.	ریسک جریان مواد به داخل تونل را معرفی کرده و برای ارزیابی ریسک آن از طریق روش مرسوم ماتریس ریسک استفاده شده است.	2001	[118]
Isaksson	در تحقیق خود به ارائه مدلی برای تخمین زمان و هزینه‌ی یک پروژه تونل‌سازی بر اساس ارزیابی ریسک پرداخته است.	2002	[119]
Grasso et al.	برای ارزیابی ریسک، روش متداول ماتریس ریسک را با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمالاتی زمان و هزینه برای فعالیت‌ها بررسی کرده‌اند.	2002	[120]
Ng et al.	مدلی را بر اساس فرایند مدیریت ریسک (شناسایی، اندازه‌گیری، ارزیابی، کنترل و پایش ریسک) به منظور مدیریت نگهداری و تعمیر جاده و تونل در هنگ‌کنگ و با هدف افزایش سیستم روشنایی تونل برای جلوگیری از حوادث مربوطه ارائه کرده‌اند.	2003	[121]
Reilly and Brown	با شناسایی برخی از ریسک‌های بالقوه با اثرات مثبت و منفی در پروژه‌های تونلی و زیرساختی، از توزیع احتمالاتی، روش مرسوم احتمال و اثر به منظور تخمین دقیق‌تر زمان و هزینه‌ی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، برای ارزیابی ریسک استفاده کرده‌اند.	2004	[44]
Petrov and Galloway	ضمن بررسی مدیریت ریسک در پروژه‌های زیرزمینی راه‌هایی را برای شناسایی و مدیریت بهتر ریسک‌ها (در طول پروژه) توسط کارفرما و مشاور به منظور جلوگیری از اثرگذاری منفی ریسک‌ها بر زمان و هزینه پروژه و موفقیت آن ارائه کرده‌اند.	2004	[122]
Arendsb et al.	برای مدیریت ریسک در پنج فاز اصلی پروژه‌های زیرزمینی، روش کیفی تحلیل ریسک را بررسی کرده‌اند.	2004	[123]

ادامه‌ی جدول (۳-۲) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

نویسندگان	توضیحات	سال	مرجع
Eskesen et al.	رهنمودهایی را از منظر کارفرما و مشاور برای ارزیابی و مدیریت ریسک در کل محدوده عملکردی پروژه‌های تونل‌سازی ارائه کرده و ماتریس احتمال- اثر ریسک را برای ارزیابی و اولویت‌بندی پاسخ به ریسک‌ها معرفی نموده‌اند.	2004	[124]
Arends et al.	ضمن ارائه‌ی رویکردی برای ارزیابی ایمنی در تونل، یک مدل احتمالاتی برای قضاوت‌های شخصی، ریسک‌های اجتماعی و اقتصادی مربوط به عملیات تونل‌سازی را نیز ارائه کرده‌اند.	2005	[125]
You et al.	با توجه به عدم قطعیت‌های فراوان در خصوص پارامترها و ویژگی‌های زمین اطراف با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک توزیع احتمالاتی برای ضریب ایمنی تونل به دست آورده‌اند.	2005	[42]
Isaksson and Stille	عوامل ریسک در ماشین تونل‌زنی و تاثیر آن بر زمان و هزینه را مورد بررسی قرار داده و در ادامه یک مدل احتمالاتی برای تخمین هزینه و زمان پروژه‌های تونل‌سازی ارائه کرده‌اند.	2005	[126]
Silverton et al.	در این تحقیق مراحل انجام مدیریت ریسک در تونل SDSU در کالیفرنیا ارائه گردیده که نماینده طراح برای کمک به تیم اجرایی در کارگاه حضور داشته و نتایج حاصل از ابزاربندی تونل و زمین در طی جلسات روزانه بازبینی و اقدامات پشتیبانی لازم برای روز بعد تصویب شده است.	2005	[127]
Kwong	ضمن ارائه‌ی پلان مدیریت ریسک در عملیات حفاری تونلی در هنگ‌کنگ، به بررسی ریسک نشست سطح زمین و بیان مهم‌ترین عوامل موثر بر آن پرداخته‌اند.	2006	[128]
ITIG	در گزارش خود به بیان فرایند مدیریت ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی پرداخته‌اند و برای ارزیابی ریسک روش مرسوم احتمال و اثر ریسک را بررسی کرده‌اند.	2006	[129]
Herrenknecht and Bappler	پاسخ به ریسک‌ها را تحت شرایط پیچیده‌ی زمین برای کنترل و مدیریت آنها در عملیات حفاری تونل در مرکز شهر بررسی کرده‌اند.	2006	[130]
Reilly and Parker	در این تحقیق مدل ضریب همبستگی و عدم وابستگی متغیرها که ریسک‌های مختلف می‌باشند بررسی شده و از دو شاخص مرسوم احتمال و اثر ریسک به منظور ارزیابی ریسک مطرح شده است.	2007	[131]
Thomas and Banyai	این تحقیق در مورد ریسک‌های تونل‌هایی که از طریق TBM ایجاد می‌شوند بحث کرده و در مورد نحوه مدیریت ریسک آن صحبت می‌کند.	2007	[132]
Osama A. Jannadi	ضمن تشریح انواع ریسک‌های بالقوه در پروژه‌های حفاری در عربستان فقط به بررسی کیفی ریسک و ارزیابی آن در این پروژه‌ها پرداخته شده است.	2007	[133]

ادامه‌ی جدول (۳-۲) تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

نویسندگان	توضیحات	سال	مرجع
Shahriar et al.	رویکرد جدیدی برای به حداقل رساندن ریسک‌های ژئوتکنیکی با استفاده از درخت تصمیم‌گیری ارائه داده‌اند و از تعریف مرسوم ریسک یعنی حاصل ضرب احتمال در اثر یک رخداد به منظور ارزیابی ریسک بهره برده‌اند.	2008	[134]
Rezaie et al.	در تحقیق خود از روش FMEA برای شناسایی و ارزیابی ریسک در پروژه خط ۳ متروی تهران استفاده کرده و روند و نتیجه کار خود را به صورت یک الگوریتم ارائه کرده‌اند.	2009	[135]
Hong et al.	در این تحقیق برای ارزیابی ریسک در مرحله مقدماتی و ساخت‌وساز یک تونل زیر سطح آب زیرزمینی از درخت رویداد بهره برده‌اند.	2009	[136]
Yan-hui et al.	برای پیش‌بینی و جلوگیری از هجوم آب در هنگام احداث تونل از مدل فازی برای تشخیص خطرات بالقوه و اندازه‌گیری ریسک استفاده کرده‌اند.	2009	[137]
Hamidi et al.	با توجه به عوامل و ریسک ژئوتکنیکی برای انتخاب دستگاه حفاری از روش AHP فازی به عنوان یک ابزار مهم در تصمیم‌گیری استفاده شده است.	2010	[138]
Beard	چگونگی طراحی و ارزیابی ریسک تونل را مطرح کرده و در مورد پذیرش ریسک و مدیریت ایمنی و اتخاذ تصمیم مناسب و اینکه چه معیارهایی برای پذیرش ریسک مناسب‌ترند را مورد بررسی قرار داده است.	2010	[139]
Aliahmadi et al.	برای مدیریت ریسک در طراحی تونل رسالت از روش‌های نظریه بازی و AHP فازی استفاده شده است.	2011	[140]
Fouladgar et al.	با توجه به اینکه منطق فازی یک ابزار مفید در حضور عدم قطعیت‌هاست در این تحقیق از TOPSIS فازی برای رتبه‌بندی ریسک پروژه انتقال آب دشت ذهاب استفاده شده است.	2011	[141]
Špačková and Straub	در این تحقیق یک مدل برای ارزیابی احتمالاتی بر اساس شبکه بیز ارائه شده است. تأثیر پارامترهای مدل اصلی و فرضیات (کیفیت و ...) از طریق تحلیل حساسیت بررسی شده است.	2011	[142]

۳-۵- نتیجه‌گیری

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 تاثیر» 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.

ماتریس احتمال – اثر ریسک نتایج قابل اعتمادی به دست نمی‌دهد، برخی از محققین نیز بر غیر قابل اطمینان بودن این رویه تاکید کرده‌اند [۱۴۳]. یکی دیگر از مشکلات استفاده از ماتریس احتمال – اثر ریسک این است که در آن ممکن است اهمیت ریسک‌های با احتمال کم و اثرگذاری زیاد نادیده گرفته شود، چرا که طی این تکنیک، ریسک‌هایی که احتمال زیاد و اثرگذاری کمی دارند با ریسک‌هایی که احتمال کم و اثر مهم دارند معادل فرض شوند که این لزوماً نظر تصمیم‌گیرنده نیست [۱۴۴].

این در حالی است که برای ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک در سایر پروژه‌ها، شاخص‌های دیگری نظیر «توانایی سازمان در واکنش به ریسک» [۱۴۵] و «عدم اطمینان» [۱۴۶]، نیز مطرح شده‌اند. سید نقوی و تیموری در مقاله‌ی خود علاوه بر تعیین دو عامل احتمال و اثر ریسک، چهار عامل اصلی، زمان، هزینه، کیفیت و محدوده را نیز برای تجزیه و تحلیل‌ها در نظر گرفته‌اند [۱۴۷].

لامبرت و همکارانش علاوه بر احتمال وقوع و میزان تأثیر، سرعت مقابله با ریسک را بیان کرده‌اند [۶۸]. معیارهای تکمیلی دیگری نظیر مدیریت‌پذیری و نزدیکی وقوع ریسک پروژه در برخی از پژوهش‌های دیگر مورد توجه واقع شده‌اند [۱۴۸]. یکی دیگر از مشکلات استفاده از ماتریس احتمال – اثر ریسک عدم امکان تخصیص وزن‌های متفاوت برای معیارها است که برای این منظور روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه با استفاده از نظر خبرگان پیشنهاد می‌شود.

استفاده از هر کدام از ابزارها در ارزیابی ریسک دارای معایب و مزایایی است. اما نکته قابل تأمل این است که هیچ‌کدام از ابزارهای بالا قدرت دقیق شدن بر روی یک ریسک خاص را ندارد. راه عملی در کنترل و جلوگیری از وقوع ریسک‌ها و حوادث با شدت و تکرار بالا، کنترل علل ریشه‌ای وقوع آنهاست.

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 کم‌اهمیت اقدام نمود. رتبه‌بندی ریسک گامی مهم در برآورده کردن هرچه بهتر این نیاز است.

فصل چهارم: کلیاتی در مورد تصمیم‌گیری چندمعیاره و تصمیم‌گیری

چندمعیاره‌فازی

۴-۱- مقدمه

انسان در زندگی روزمره خود تصمیمات بسیاری می‌گیرد، این تصمیمات از مسائل شخصی و فردی تا مسائل بزرگ و کلان را شامل می‌شود. در اکثر مسائل تصمیم‌گیری عموماً اهداف و عوامل متعددی مطرح است و فرد تصمیم‌گیرنده سعی می‌کند که بین چند گزینه موجود (محدود یا نامحدود) بهترین گزینه را انتخاب نماید. لذا در می‌یابیم که تصمیم‌گیری چند معیاره در زندگی بشر کاربرد زیادی دارد و انسان به طور ناخواسته در شبانه‌روز تعداد زیادی از این‌گونه تصمیمات می‌گیرد که برخی از آنها نیاز به بررسی و دقت بیشتری دارد چون خطا در آنها هزینه بالایی خواهد داشت [۱۴۹].

در گذشته، فارغ از درست یا غلط بودن، تصمیم‌ها توسط یک نفر (رییس) گرفته می‌شد و کار تصمیم‌گیری آسان بوده است. اما امروزه، وضعیت متفاوت شده است. وقتی تصمیم‌های

مهم توسط افراد مختلف گرفته می‌شود، نقش روشی که به کمک آن تصمیم‌ها ایجاد و گرفته شود، برجسته‌تر خواهد بود [۱۵۰].

۴-۲- روش‌های تصمیم‌گیری

انسان عموماً برای اجرای تصمیم‌گیری یکی از دو روش زیر را به کار می‌برد [۱۴۹]:

- روش آزمون و خطا

- روش مدل‌سازی

در روش آزمون و خطا تصمیم‌گیرنده با واقعیت برخورد می‌کند بدین ترتیب که یکی از گزینه‌ها را انتخاب کرده و نتیجه را مشاهده می‌کند، چنانچه خطای تصمیم زیاد بوده و مشکلاتی بروز کند تصمیم را عوض کرده و گزینه‌ای دیگر را انتخاب می‌کنند.

در روش مدل‌سازی، تصمیم‌گیرنده مساله‌ی واقعی را مدل‌سازی نموده، عناصر آن و تأثیر آنها بر یکدیگر را مشخص می‌نماید و به تجزیه و تحلیل مدل و پیش‌بینی عملکرد مساله واقعی می‌پردازد.

۴-۳- تصمیم‌گیری چند معیاره

لازم به ذکر می‌باشد این روش به صورت مختصر در فصل گذشته بیان شده است لذا از تکرار مطالب پرهیز می‌نماییم. برای تحلیل یک سیستم چند معیاره باید عناصر آن را به خوبی شناخت و آنها را به طور دقیق تعریف کرد و سپس به مدل‌سازی و

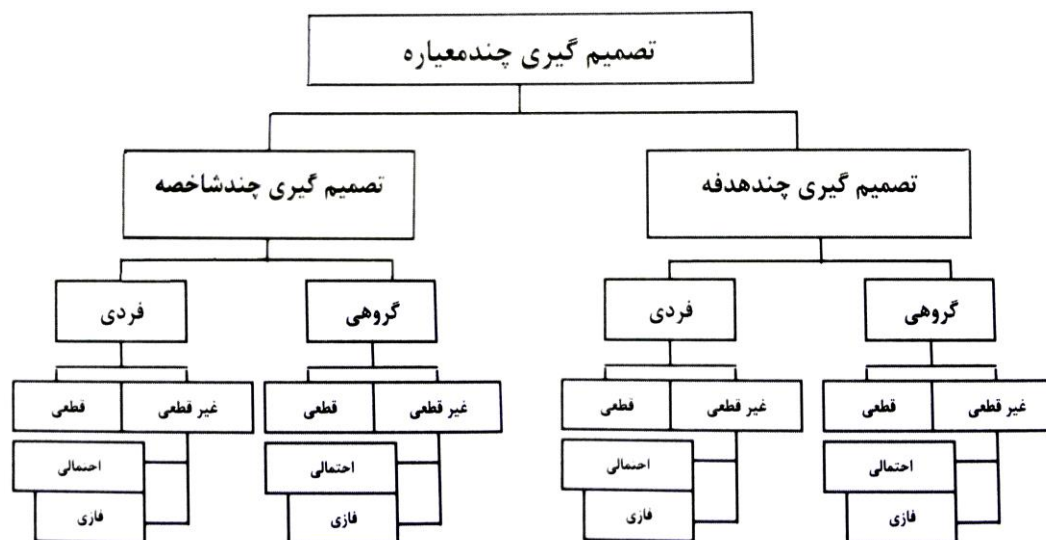
تجزیه و تحلیل آن پرداخت. به طور کلی می‌توان گفت مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره شامل ۶ مؤلفه می‌باشند [۴۱]:

- ۱- یک هدف یا مجموعه‌ای از اهداف
 - ۲- تصمیم‌گیرنده^۱ یا گروهی از تصمیم‌گیران
 - ۳- مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی
 - ۴- مجموعه‌ای از گزینه‌های تصمیم
 - ۵- مجموعه‌ای از متغیرهای مجهول یا متغیرهای تصمیم
 - ۶- مجموعه‌ای از نتایج حاصل شده از هر زوج گزینه - معیار
- عنصر مرکزی این ساختار، یک ماتریس تصمیم است که شامل مجموعه‌ای از سطرها و ستونهاست. این ماتریس نتایج تصمیم را برای مجموعه‌ای از گزینه‌ها و معیارهای ارزیابی بیان می‌کند.
- مسائل تصمیم‌گیری پیچیده عموماً از تعدادی تصمیم‌گیرنده تشکیل شده که به آنها گروه‌های ذینفع نیز گفته می‌شود. تصمیم‌گیرنده می‌تواند یک نفر یا گروهی از مردم از قبیل دولت یا نهادهای حقوقی باشد که این افراد با اولویت‌های منحصر به فرد خود مشخص می‌شوند. که اولویت‌ها بر اساس اهمیت نسبی معیارها و گزینه‌های تصمیم می‌باشند. همچنین اولویت‌ها می‌توانند به صورت وزن‌های اختصاص داده شده برای معیارهای ارزیابی مورد استفاده قرار گیرند. با اولویت‌بندی نتایج تصمیم می‌توان بهترین گزینه را انتخاب نمود.
- همان‌گونه که در فصل پیشین اشاره شده است روش‌های چند معیاره به دو دسته‌ی چند شاخصه و چند هدفه تقسیم می‌شوند که تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. در جدول (۴-۱) این تفاوت‌ها قید شده است.

جدول (۱-۴) تفاوت‌های مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه و چند هدفه [۱۵۱]

محورها	مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه	مدل‌های تصمیم‌گیری چند هدفه
اساس تعریف معیارها	شاخص‌ها	اهداف
هدف‌ها	غیر صریح و مبهم	واضح و روشن
شاخص‌ها	واضح و روشن	غیر صریح و مبهم
محدودیت‌ها	غیر الزام‌آور	الزام‌آور
تعداد راهکارها	متناهی (متناظر با اعداد صحیح)	نامتناهی (متناظر با اعداد پیوسته)
موارد استفاده	انتخاب و ارزیابی	طراحی

در حالت کلی مسائل چند معیاره به صورت شکل (۱-۴) تقسیم‌بندی می‌شوند.



شکل (۱-۴) تقسیم‌بندی کلی مسائل چند معیاره [۱۵۱]

۴-۴- تصمیم‌گیری چند معیاره فازی

در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره کلاسیک سعی می‌شود که تأثیر عوامل مختلف در تصمیم‌گیری با استفاده از مفاهیم ریاضی محاسبه شود. اما بیان بسیاری از عوامل با منطق ریاضی کلاسیک امکان‌پذیر نیست.

از طرف دیگر همیشه در دنیای واقعی عدم قطعیت وجود داشته و همواره در مراحل مختلف مطالعه و بررسی یک مساله وجود دارد. بنابراین در بسیاری از موارد، تمام و یا قسمتی از داده‌های یک مساله‌ی تصمیم‌گیری چند معیاره، فازی هستند و اگر مساله با استفاده از داده‌های قطعی مدل و فرموله شود جواب درست و دقیقی به دست نخواهد آمد. لذا از نظریه‌ی فازی برای مدل کردن عدم قطعیت در تصمیم‌گیری استفاده می‌گردد [۴۰].

اساس تصمیم‌گیری فازی بر منطق فازی است. منطق فازی و به دنبال آن مجموعه‌های فازی درصد توصیف پدیده‌های فازی هستند. هر پدیده فازی یا از نوع مبهم^۱ و یا از نوع سربسته^۲ می‌باشد. پدیده‌ی مبهم پدیده‌ای است که حد و مرز آن مشخص نیست. واژگانی چون تقریباً، حدوداً و ... از نوع پدیده‌های مبهم هستند و مفهومی که درک معنی آن نیازمند توضیح باشد از نوع سربسته است، مانند مدیر خوب، کیفیت کار عالی و ... از این نوع هستند. این دو مفهوم، مفاهیمی فازی هستند که نظریه‌ی مجموعه‌های فازی درصد توصیف آنهاست. به عبارتی دیگر، منطق فازی، منطقی است که تکمیل کننده‌ی منطق کلاسیک (ارسطویی) است [۱۵۲].

تصمیم‌گیری چند معیاره فازی به خاطر محد و دیت‌ها یی که در روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره کلاسیک وجود دارد معرفی شده است.

۴-۴-۱- مجموعه‌های فازی و درجه‌ی عضویت

اگر X مجموعه‌ی مرجع باشد، هر مجموعه‌ی فازی A در X به صورت زوج مرتب‌های $(x, \alpha_A(x))$ نشان داده می‌شود [۱۵۳، ۱۵۴].

$$A = \{(x, \alpha_A(x) \mid x \in X)\}$$

1- Vague

2- Ambiguity

(۱-۴)

که $\alpha_A(x)$ تابع عضویت برای یک مجموعه‌ی فازی A به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (۲-۴)$$

تابع عضویت در واقع نشان دهنده‌ی درجه‌ی سازگاری x در A یا درجه‌ی تعلق x به A می‌باشد. مقدار معمول استفاده شده برای تابع عضویت در فاصله $[0,1]$ است. تفاوت اساسی مجموعه‌های معمولی با مجموعه‌های فازی در توابع عضویتشان می‌باشد. یک مجموعه‌ی معمولی فقط دارای یک تابع مشخصه است که نشان دهنده‌ی عضویت یا عدم عضویت اعضای آن به مجموعه می‌باشد [۱۵۵].

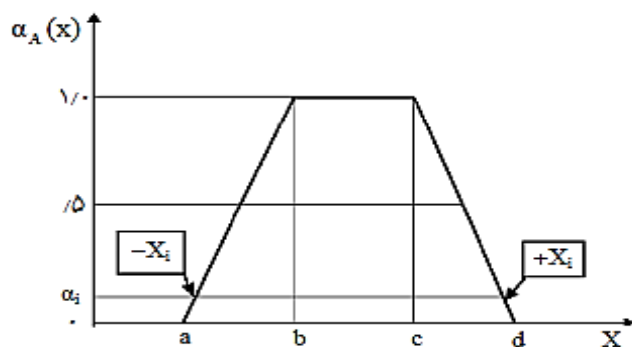
۴-۲-۴-۴ اعداد فازی

هر عدد فازی یک مجموعه فازی می‌باشد که شکل تابع عضویت آن محدب و حداقل دارای یک مقدار با درجه عضویت ۱ باشد. معمول‌ترین نوع اعداد فازی مورد استفاده اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای می‌باشند. اگر شکل تابع عضویت ذوزنقه‌ای باشد، عدد فازی ذوزنقه‌ای نامیده می‌شود و با چهار پارامتر به صورت زیر نشان داده می‌شود [۱۵۴, ۱۵۶].

$$\alpha(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{x-d}{c-d} & c \leq x \leq d \\ 0 & d < x \end{cases} \quad (۳-۴)$$

که a و d بیانگر کران بالا و پایین مقادیر x در $\alpha = 0$ و b , c مقادیر x متناظر با $\alpha = 1$ می‌باشند که در

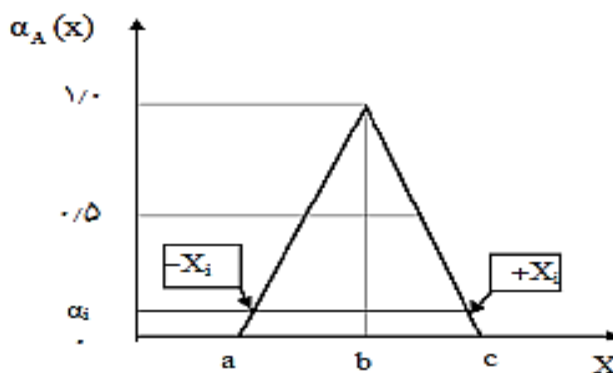
شکل (۲-۴) به تصویر کشیده شده است.



شکل (۲-۴) نمایش عدد فازی ذوزنقه‌ای برای پارامتر X [۱۵۳]

عدد فازی مثلثی هم حالت خاصی از عدد فازی ذوزنقه‌ای است که توسط سه پارامتر مینیمم، مد و

$$\alpha(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c} & b \leq x \leq c \\ 0 & c < x \end{cases} \quad \text{شکل (۳-۴) نمایش داده شده است [۱۵۴].} \quad (۴-۴) \quad a \leq b \leq c$$



شکل (۳-۴) نمایش عدد فازی مثلثی برای پارامتر X [۱۵۶]

لازم به ذکر می‌باشد در این تحقیق از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. در ادامه به صورت مختصر به

توضیح دو روش از روش‌های فازی خواهیم پرداخت که برای حل مسئله از این روش‌ها استفاده شده است.

۴-۵- روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی^۱

شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که مبنای این روش، انتخاب گزینه‌ای است که کمترین فاصله را از جواب ایده‌آل مطلوب و بیشترین فاصله را از جواب ایده‌آل نامطلوب دارد. از آنجایی که دسترسی و جمع‌آوری داده‌های صحیح و قابل استناد مشکل می‌باشد، به نظر می‌رسد برای کار با داده‌های غیرقطعی و یا بازه‌ای از داده‌ها، باید روش‌های ویژه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. از این رو، می‌توان از منطق فازی در تکنیک‌های تصمیم‌گیری مختلف استفاده نمود و از مزایای آن بهره برد، یکی از این تکنیک‌ها، تکنیک شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل می‌باشد که با کاربرد منطق فازی در آن، به تکنیک شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی تبدیل می‌شود که با روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل متفاوت دارد. واضح است که منطق اصلی استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری به صورت فازی، تأثیرگذاری عدم قطعیت همزمان با تفکرات آدمی، در تصمیم‌گیری‌ها می‌باشد [۱۵۷]. برای حل یک مساله تصمیم‌گیری چند معیاره با تکنیک شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی مراحل ذیل طی می‌شود [۱۵۸]:

۴-۵-۱- تشکیل ماتریس تصمیم

با توجه به n معیار و m گزینه و ارزیابی همه‌ی گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mm} \end{bmatrix} \quad \text{صورت زیر تشکیل می‌شود.} \quad (۵-۴)$$

در صورتی که در مساله از اعداد فازی مثلثی استفاده شود در این صورت $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ می‌باشد. اگر ارزیابی گزینه‌ها بر مبنای معیارها، به وسیله‌ی نظرخواهی از یک گروه دارای k عضو انجام گیرد و

1- Fuzzy Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solution (FTOPSIS)

$$a_{ij} = \min_k \{a_{ijk}\} \quad b_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^k b_{ijk}}{k} \quad c_{ij} = \max_k \{c_{ijk}\}$$

ارزیابی فازی k امین تصمیم گیرنده $\tilde{x}_{ijk}=(a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk})$ باشد با توجه به معیارهای رتبه بندی فازی ترکیبی، گزینه ها را می توان بر اساس روابط زیر در نظر گرفت. به ازای $(i=1,2,3,\dots,m)$ و $(j=1,2,3,\dots,n)$

(۶-۴)

۴-۵-۲- تعیین ماتریس وزن معیارها

در این صورت ضریب اهمیت معیارهای مختلف به صورت زیر است:

$$\tilde{w} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad (۷-۴)$$

در صورتی که از اعداد فازی مثلثی استفاده شود هر یک از مؤلفه های w_j به صورت $\tilde{w}_j=(w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$ تعریف می شود. در صورتی که وزن معیارها از گروه خبرگان به دست آید برای میانگین گیری نظر گروه می توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$w_{j1}=\min_k\{w_{jk}\} \quad w_{j2}=\frac{\sum_{k=1}^k w_{jk}}{k} \quad w_{j3}=\max_k\{w_{jk}\} \quad (۸-۴)$$

۴-۵-۳- بی مقیاس کردن ماتریس تصمیم

در این روش، برای بی مقیاس کردن مقادیر ماتریس تصمیم فازی، از تغییر مقیاس خطی برای تبدیل معیارهای مختلف به مقیاس قابل مقایسه استفاده می شود. در این صورت با توجه به اینکه x_{ij} ها به صورت فازی هستند مسلماً r_{ij} ها نیز فازی خواهد بود. اگر اعداد فازی به صورت مثلثی باشند درایه های ماتریس تصمیم برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط زیر محاسبه می شود.

$$\tilde{r}_{ij}=\left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*}\right) \quad \text{و} \quad \tilde{r}_{ij}=\left(\frac{\bar{a}_j}{c_{ij}}, \frac{\bar{a}_j}{b_{ij}}, \frac{\bar{a}_j}{a_{ij}}\right) \quad (۹-۴)$$

$$c_j^*=\max_i\{c_{ij}\} \quad \text{و} \quad \bar{a}_j=\min_i\{a_{ij}\} \quad (۱۰-۴)$$

۴-۵-۴- تعیین ماتریس تصمیم فازی وزن دار

با توجه به وزن معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم فازی وزن دار از ضرب کردن ضریب اهمیت مربوط به هر معیار در ماتریس بی‌مقیاس شده فازی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{w}_j \quad (11-4)$$

که $\tilde{w}_j$ بیان کننده‌ی اهمیت معیار c_j می‌باشد. ماتریس تصمیم فازی وزن دار به صورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{11} & \dots & \tilde{v}_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{v}_{m1} & \dots & \tilde{v}_{mn} \end{bmatrix} \quad (12-4)$$

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

$$\xrightarrow{\text{معیارهای مثبت}} \tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{w}_j = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right) \cdot (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}) \quad (13-4)$$

$$\xrightarrow{\text{معیارهای منفی}} \tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{w}_j = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right) \cdot (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}) \quad (14-4)$$

۴-۵-۵- یافتن گزینه ایده‌آل فازی و گزینه ضد ایده‌آل فازی

برای حل ایده‌آل فازی و حل ضد ایده‌آل فازی روابط ذیل ارائه گردیده است:

$$A^* = \{\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*\} \quad (15-4)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\} \quad (16-4)$$

که $\tilde{v}_1^*$ بهترین مقدار i از بین تمام گزینه‌ها و $\tilde{v}_1^-$ بدترین مقدار i از بین تمام گزینه‌ها می‌باشد، که از روابط

ذیل محاسبه می‌شوند.

$$\tilde{v}_j^* = \max_i \{\tilde{v}_{ij}\} \quad (17-4)$$

$$\tilde{v}_j^- = \min_i \{\tilde{v}_{ij}\} \quad (18-4)$$

۴-۵-۶- محاسبه فاصله از گزینه ایده آل و ضد ایده آل فازی

در این مرحله فاصله‌ی هر گزینه از حل ایده آل و ضد ایده آل فازی به دست می‌آید:

$$S_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*) \quad (19-4)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (20-4)$$

اگر اعداد فازی به صورت مثلثی باشد فاصله‌ی دو عدد مثلثی (a_1, b_1, c_1) و (a_2, b_2, c_2) به صورت

زیر به دست می‌آید:

$$d_v(\tilde{M}_1, \tilde{M}_2) = \sqrt{\frac{1}{3} [(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2]} \quad (21-4)$$

۴-۵-۷- محاسبه‌ی شاخص شباهت

شاخص شباهت از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad (22-4)$$

۴-۵-۸- رتبه‌بندی گزینه‌ها

در این مرحله با توجه به مقدار شاخص شباهت گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند به طوری که گزینه‌هایی که

شاخص شباهت بیشتری دارند رتبه بالاتری به دست می‌آورند.

۴-۶- روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فاز ۱^۱

روش دلفی فاز ۱ در سال ۱۹۸۸ میلادی توسط کافمن و گوپتا^۲ ابداع شد. کاربرد این روش به منظور تصمیم‌گیری و اجماع بر مسائلی که اهداف و پارامترها به صراحت مشخص نیستند، منجر به نتایج بسیار ارزنده‌ای می‌شود. ویژگی این روش، ارایه چارچوبی انعطاف‌پذیر است که بسیاری از موانع مربوط به عدم دقت و صراحت را تحت پوشش قرار می‌دهد. بسیاری از مشکلات در تصمیم‌گیری‌ها مربوط به اطلاعات ناقص و نادقیق است. همچنین تصمیم‌های اتخاذ شده خبرگان بر اساس صلاحیت فردی آنان بوده و به شدت ذهنی است. اغلب عدم قطعیت در نظرات خبرگان وجود دارد. بنابراین بهتر است داده‌ها به جای اعداد قطعی با اعداد فازی نمایش داده شوند و از مجموعه‌های فازی برای تحلیل نظرات خبرگان استفاده گردد. مراحل روش دلفی در واقع ترکیبی از اجرای روش دلفی و انجام تحلیل‌ها بر روی اطلاعات با استفاده از تعاریف نظریه مجموعه‌های فازی است. الگوریتم اجرای روش دلفی فاز ۱ در شکل (۴-۴) نمایش داده شده است [۴۰].

مراحل اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فاز ۱ به شرح زیر است:

۴-۶-۱- نظرسنجی از متخصصان

در این مرحله ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای مؤثر بر یک پدیده یا تصمیم به صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظرسنجی به عمل می‌آید [۴۰].

۴-۶-۲- محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی ($\tilde{a}_{ij}$) نظرهای حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرند. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر اساس توابع عضویت مختلف همچون روش مثلثی و یا حالت

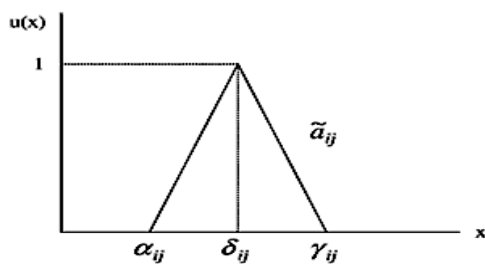
1- Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Process (FDAHP)
2- Kaufman & Gupta

انتخاب خبرگان و تشریح مساله برای آنها

تهیه پرسشنامه و ارسال آن به خبرگان

دوزنقه‌ای محاسبه کرد. با توجه به کاربرد زیاد و سهولت محاسبه روش مثلثی، محاسبه اعداد فازی در شکل (۵-۴) نشان داده شده است [۱۵۹].

شکل (۴-۴) مراحل اجرای روش دلفی فازی [۴۰]



شکل (۵-۴) تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی [۱۵۹]

در روش فازی دلفی یک عدد فازی به صورت روابط (۲۳-۴) تا (۲۶-۴) تعریف می‌شود:

$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (۲۳-۴)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (24-4)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (25-4)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (26-4)$$

در روابط فوق β_{ijk} نشان دهنده‌ی اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام است و γ_{ij} و α_{ij} به ترتیب حد بالا و پایین نظرهای پرسش‌شوندگان و δ_{ij} میانگین هندسی نظرهای پرسش‌شوندگان است. بدیهی است که مؤلفه‌های عدد فازی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که: $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$. در ضمن مقادیر این مؤلفه‌ها در بازه $[1/9, 9]$ تغییر می‌کنند [۴۰].

۴-۶-۳- تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترهای مختلف به شرح رابطه (۴-۲۷) تشکیل می‌شود [۱۵۹].

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}], \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (27-4)$$

یا به صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\delta_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1,1,1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (1/\gamma_{13}, 1/\delta_{13}, 1/\alpha_{13}) & (1/\gamma_{23}, 1/\delta_{23}, 1/\alpha_{23}) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

۴-۶-۴- محاسبه‌ی وزن فازی نسبی پارامترها

وزن فازی نسبی پارامترها از روابط (۴-۲۸) و (۴-۲۹) محاسبه می‌شوند [۱۵۹]:

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n} \quad (28-4)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (29-4)$$

که در آن $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ بوده و $\otimes$ نماد ضرب اعداد فازی و $\oplus$ نماد جمع اعداد فازی است. $\tilde{W}_i$ یک بردار سطری است که نشان دهنده‌ی وزن فازی پارامتر i ام می‌باشد.

۴-۶-۵- غیر فازی کردن وزن پارامترها

به منظور غیر فازی کردن وزن پارامترها، طبق رابطه (۴-۳۰) میانگین هندسی مؤلفه‌های عدد فازی وزن پارامترها به دست می‌آید و بدین ترتیب وزن پارامترها به صورت یک عدد قطعی بیان می‌شوند [۱۵۹].

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^3 w_{ij} \right)^{1/3} \quad (30-4)$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، از آنجایی که تکنیک فازی دلفی بر مبنای تجربیات و نظرات تعدادی از متخصصان یک علم استوار است، لذا به نظر می‌رسد نتایج به دست آمده از این روش می‌تواند رهیافت مناسبی برای ارزیابی اهمیت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده و یک مفهوم باشد.

۴-۷- استراتژی‌های اولویت‌بندی

تکنیک‌های مختلفی به منظور اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی در محیط‌های سنگی وجود دارد و ممکن است نتایج حاصل از این رتبه‌بندی‌ها توسط روش‌های مختلف متفاوت باشد، لذا در این‌گونه مسائل، عدم توافقی در انتخاب گزینه درست به وجود می‌آید. به منظور رفع تعارض بین رتبه‌بندی‌های گوناگون و برای

رسیدن به اجماع در رتبه‌بندی، می‌بایست از روش‌های ادغام^۱، که شامل روش میانگین رتبه‌ها^۲، روش بردا^۳، روش کپ لند^۴ و مرحله‌ی ادغام است، استفاده کرد. در ادامه روش‌های بیان شده به اختصار شرح داده می‌شود.

۴-۷-۱- روش میانگین رتبه‌ها

در این روش میانگین حسابی رتبه‌های به دست آمده برای گزینه‌ها با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره تعیین شده و بر اساس آن گزینه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. لازم به ذکر است گزینه‌های با میانگین حسابی پایین‌تر در اولویت خواهند بود.

۴-۷-۲- 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 گزینه‌ی دیگر بیش از تعداد مغلوب شدن آن گزینه بر گزینه دیگری باشد در ماتریس مقایسه زوجی عدد ۱ (M) گذاشته می‌شود و در صورتی که رأی اکثریت وجود نداشت و یا آرا با هم مساوی باشد در ماتریس مقایسه زوجی عدد صفر (X) 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. هر مقایسه زوجی به صورت جداگانه بررسی می‌شود و تعداد آن برابر $\frac{m(m-1)}{2}$ است که m نشان دهنده‌ی تعداد گزینه‌ها می‌باشد. مجموع عناصر هر سطر تعداد مسلط شدن هر گزینه را نشان می‌دهد و گزینه‌ها بر اساس تعداد مسلط شدن اولویت‌بندی می‌شوند [۱۵۱].

1- Partially Ordered Set (POSET)

2- Ranks Mean

3- Borda Method

4- Copeland Method

۴-۷-۳- روش کپ‌لند

روش کپ‌لند با پایان روش بردا شروع می‌شود. در این روش نه تنها تعداد بردهای (مسلط شدن) گزینه مورد توجه قرار می‌گیرد، بلکه تعداد باخت‌های (مغلوب شدن) گزینه (تعداد M در ستون‌ها) نیز محاسبه می‌شود. امتیازی که این روش به هر گزینه می‌دهد با کم کردن تعداد باخت‌ها از تعداد بردها به دست می‌آید [۱۶۰].

۴-۷-۴- مرحله‌ی ادغام

پس از آنکه رتبه‌بندی عوامل توسط هر سه روش میانگین، بردا و کپ‌لند به دست آمد، نوبت به این می‌رسد که نتایج این سه روش با یکدیگر تلفیق شوند تا رتبه‌بندی واحدی برای عوامل به دست آید، که به این تکنیک روش ادغام گفته می‌شود. برای ادغام سه روش فوق از رتبه‌های به دست آمده برای هر عامل میانگین گرفته می‌شود [۱۶۰].

۴-۸- نتیجه‌گیری

در این فصل مبانی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و تصمیم‌گیری چند معیاره فازی ارایه شده است. از میان روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی، روش‌های شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی به منظور رتبه‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی در تونل‌سازی مکانیزه به طور کامل توضیح داده شده است. به منظور رفع تعارض بین رتبه‌بندی‌های گوناگون و برای رسیدن به اجماع در رتبه‌بندی، روش‌های ادغام نیز مد نظر خواهد بود که در فصل ششم نحوه‌ی محاسبات و رتبه‌بندی ریسک‌ها بیان شده است.

فصل پنجم: چالش‌های زمین‌شناسی تونل‌سازی کانیزه

در نواحی کوهستانی (محیط‌های سنگی)

۵-۱- مقدمه

عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی و شرایط غیر قابل پیش‌بینی زمین همیشه دو عامل اساسی در طراحی و ساخت فضاهای زیرزمینی است که علی‌رغم تلاش‌های فراوان، کماکان عوامل اصلی در تغییرات طراحی و در نتیجه تحمیل تاخیرات و هزینه‌های اضافی به پروژه است. به دلیل تغییرات زیاد شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در زیر سطح زمین و ناشناخته بودن این شرایط در بسیاری از پروژه‌ها، طراحی سازه‌های زیرزمینی، به ویژه تونل‌های بلند با طراحی سایر سازه‌های سطحی که در آنها شرایط بارگذاری و خواص مصالح معلوم است، قابل مقایسه نمی‌باشد.

لزوم ساخت تونل‌های مختلف با اهداف خاص، انتخاب مسیرهایی با شرایط زمین‌شناسی پیچیده و دشوار را در برخی موارد اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در حفاری مکانیزه، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌باشد که این مساله تنها به واسطه سرعت بالای حفاری ماشین TBM قابل توجیه بوده ولی هر گونه پدیده‌ای که به صورت پیش‌بینی نشده پیشروی ماشین را دچار توقف کند و بهره‌وری ماشین را کاهش دهد، ممکن است استفاده از TBM را از نظر اقتصادی توجیه‌ناپذیر نماید.

لذا با بررسی، شناخت و پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی در حفاری مکانیزه می‌توان در عین بهره‌گیری از سرعت بالای TBM در حفاری، هزینه زیاد استفاده از این ماشین را با جلوگیری از توقف‌های زیاد و خطرات ناشی از حفاری توجیه نمود.

برای رویارویی بهتر و مقابله با این چالش‌ها نیاز به آگاهی از این مخاطرات وجود دارد. از این رو در این فصل به معرفی انواع چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی تونل‌سازی مکانیزه در نواحی کوهستانی پرداخته شده و روش‌های پیش‌بینی و نیز مقابله با این چالش‌ها ارائه می‌گردد.

۵-۲- چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی در نواحی کوهستانی

مخاطرات به هر نوع عکس‌العمل 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 [۱۶۱].

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 جبران‌ناپذیری بر روند عملیات تونل‌سازی داشته باشد. اگر پتانسیل بروز این مخاطرات قبل از شروع عملیات حفاری به درستی ارزیابی شود، به‌کارگیری اقدامات پیشگیرانه در هنگام ساخت ماشین تا حد زیادی شدت مخاطرات و ریسک ناشی از آن را کاهش می‌دهد [۱۶۲].

به طور کلی مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی را می‌توان به دو گروه مخاطرات درون تونل و مخاطرات بیرون تونل تقسیم کرد. مخاطرات بیرون تونل عموماً شامل افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین است که حالت دوم در تونل‌های سنگی و عمیق به ندرت اتفاق می‌افتد. حالت اول نیز به دلیل ایجاد مشکلات زیست‌محیطی، در اغلب متون علمی از آن به عنوان مخاطرات زیست‌محیطی نام برده می‌شود. در این فصل به مخاطرات درون تونل اشاره شده است [۱۶۱].

پس از مطالعه مقالات مرتبط و تحقیق و کاوش در زمینه‌ی مخاطرات زمین‌شناسی در نواحی کوهستانی موارد زیر به عنوان مخاطرات اصلی در این نواحی شناسایی و تعیین گردیدند که به شرح ذیل می‌باشند:

- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی^۱
- نشست و هجوم آب^۲ به داخل تونل
- سینه‌کار مختلط^۳
- تورم^۴ سازندهای شیلی و مارنی
- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)^۵
- تشکیل گل (انسداد)^۶
- پتانسیل کارست
- نشست گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

در ادامه هر یک از موارد فوق تشریح شده است.

1- Ravelling & Rockfall
2- Water Inrush
3- Mixed Face
4- Swelling
5- Squeezing
6- Clogging

۵-۲-۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله

از عواملی که باعث ناپیوسته بودن محیط‌های سنگی می‌شوند درزه‌ها و گسل‌ها می‌باشند. گسل‌ها از جمله ناپیوستگی‌های زمین هستند که باعث ناپایداری فضاهای زیرزمینی می‌شوند، لذا شناخت تأثیر هر یک از پارامترهای آن در پایداری تونل می‌تواند کمک شایانی را در درک تأثیر گسل‌ها در پی داشته باشد. این خصوصیات شامل زاویه گسل، مقاومت برشی و موقعیت آن نسبت به فضای زیرزمینی حفر شده است. مبنای تأثیر این پارامترها بر روی تونل، زون پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل و حداکثر جابجایی رخ داده در توده سنگی خواهد بود [۱۶۳].

ضرورت بررسی اثر گسل متقاطع با تونل انتقال آب به لحاظ ارایه راهکار مناسب برای پایداری تونل امری اجتناب‌ناپذیر است. به طور کلی گسل دارای دو عملکرد اصلی شامل رفتار نرمال و رفتار برشی است. رفتار نرمال شامل بازشدگی و بسته‌شدگی آن و رفتار برشی شامل حرکت یکی از جداره‌های گسل نسبت به جداره دیگر است. رفتار پیچشی و اتساعی^۱ گسل نیز به ترتیب وابسته به رفتار نرمال و برشی گسل می‌باشند [۱۶۴].

بسیاری از سازه‌های زیرزمینی به خصوص تونل‌ها دارای تقاطع‌هایی با گسل می‌باشند که این امر باعث آسیب‌پذیری آنها بر اثر حرکت گسل می‌گردد. لذا در حین بررسی‌های ساختگاه برای ساخت سازه‌های زیرزمینی باید به وجود گسل‌ها توجه خاصی مبذول شود تا بتوان با شناخت کامل آنها، پیش‌گیری‌های لازم را در جهت کاهش میزان صدمات ناشی از گسلش انجام داد.

به نظر سینه‌ها^۲ زون گسلی بر اساس عرض آن به سه دسته‌ی زیر تقسیم می‌شود [۱۶۵]:

۱- منطقه‌ی گسلی به عرض کمتر از ۰/۹ متر

۲- منطقه‌ی گسلی با عرضی بین ۰/۹ تا ۹ متر

1- Dilation

2- Sinha

۳- منطقه‌ی گسلی به عرض بیش از ۹ متر

سینها معتقد است که ماشین تونل‌زنی باز می‌تواند از منطقه‌ی گسلی با عرض کمتر از ۰/۹ متر عبور کند و در عبور از منطقه‌ی گسلی با عرضی بین ۰/۹ تا ۹ متر مشکل خواهد داشت و در منطقه‌ی گسلی به عرض بیش از ۹ متر، عبور ماشین غیر ممکن است.

۵-۲-۱-۱- مشکلات ناشی از برخورد با زون‌های خرد شده و گسله

وجود شبکه‌ی در هم تنیده‌ای از گسل‌های معکوس متقاطع نسبت به امتداد تونل، حفر تونل را با خطرات بی‌شماری روبرو خواهد ساخت که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از [۱۶۷، ۱۶۶]:

- عدم توانایی دستگاه TBM برای گذر مطمئن از مرزهای گسله
- هجوم آب از منافذ کارستیک و زون‌های گسله در حین حفاری
- عدم امکان پیشروی با دستگاه TBM

عبور از نواحی گسلی در عملیات تونل‌زنی در حالت کلی بیانگر یک رویداد مشکل‌ساز بوده و اغلب با نرخ پیشروی پایین همراه است. اگر ماشین نوع باز بدون انجام عملیات گمانه‌زنی اکتشافی با این شرایط مواجه شود، شرایط ممکن است برای مقابله با این مشکل بسیار وخیم باشد اما هنگامی که با یک ماشین سپری (تک سپر یا تلسکوپی)^۱ به یک گسل مشابه برخورد شود، اگرچه امکان ادامه حفاری وجود ندارد، ولی عملیات بهسازی در ناحیه گسلی از داخل سپر امکان‌پذیر بوده و همزمان با آن ماشین ممکن است از مدفون شدن کامل محافظت شود [۱۶۸].

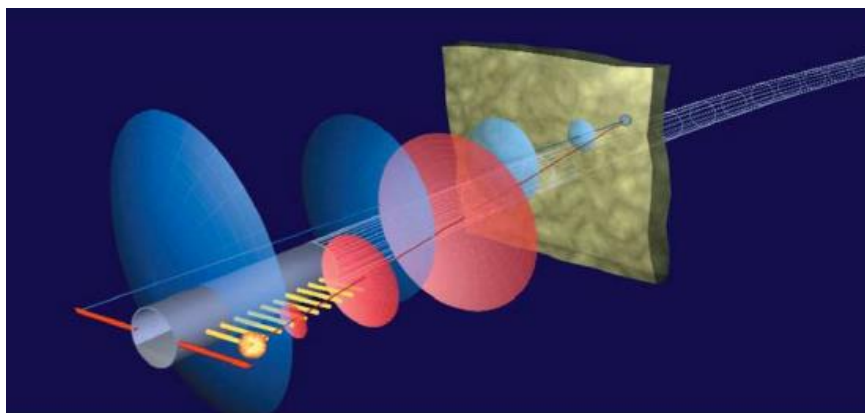
از دیگر مشکلات لازم به ذکر، انحراف دستگاه در جهت قائم و افقی و ورود دستگاه در محیط ریزشی در اثر برخورد با زون‌های خرد شده و گسله می‌باشد [۱۶۹].

1- Double Shield

۵-۲-۱-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی زون‌های خرد شده و گسله

پیشگویی لرزه‌ای تونل^۱ که به اختصار TSP نامیده می‌شود، با ایجاد امواج لرزه‌ای حاصل از مقدار کمی مواد ناریه در جداره تونل (مجاور جبهه کار) و دریافت انعکاس امواج لرزه‌ای S و P ناشی از تغییرات خواص الاستیک سنگ و تحلیل آنها به عنوان یکی از روش‌های ژئوفیزیک برای تشخیص موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی، زون‌های گسله و ناپیوستگی‌ها، غارهای کارستی و زون‌های آبدار در طول ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از پیشانی جبهه کار بدون نیاز به حفر گمانه‌ی پیشاهنگ، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایده‌ی به‌کارگیری طرح از طرف کارشناسان شرکت سوئدی آمبرگ^۲ بوده که تاکنون در تونل‌های راه و راه‌آهن استرالیا، چین، آلمان، سوئد، سوئیس و تونل‌های انتقال آب ایتالیا، آفریقای جنوبی، ژاپن، هند با نتایج خوب و موفقیت‌آمیز به کار گرفته شده است [۱۷۰].

در این روش امواج لرزه‌ای به وسیله‌ی خرج انفجاری تولید و امواج ناشی از انفجار و امواج بازگشتی ناشی از برخورد به موانع، توسط گیرنده موج در سه جهت x و y و z دریافت می‌شود. دریافت موج برای هر مرحله انفجار (انفجار یک چال) و تجزیه و تحلیل امواج رسیده و ثبت آنها طی فرآیندی مرحله‌ای توسط نرم‌افزار Tspwin و Tough Book PC صورت می‌گیرد [۱۷۰]. نمایی از روند روش TSP در شکل (۵-۱) آمده است.



شکل (۵-۱) روند اجرای روش پیشگویی لرزه‌ای تونل [۱۷۰]

1- Tunnel Seismic Prediction

2- Amberg

۵-۲-۱-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با زون‌های خرد شده و گسله

به منظور پیش‌گیری از بروز مشکلات برخورد با زون‌های خرد شده و گسله می‌توان از تمهیدات زیر بهره برد [۱۶۹]:

- کم کردن میزان حفاری در کورس‌های حفاری برای کاهش تأخیر زمانی
- تزریق مواد روان کننده برای کاهش ضریب اصطکاک بین سپر و سنگ‌های اطراف
- استفاده از اپراتورهای مجرب برای عملیات حفاری
- استفاده از پرسنل کاری ماهر برای نصب درست قطعات نگهداری و نصب سریع سیستم نگهداری قبل از بروز ریزش‌های عمده

لازم به ذکر است استفاده از گمانه پیش‌آهنگ برای شناسایی و گریپ نکردن در مناطق سست، می‌توانند راهکارهای دیگری به منظور پیش‌گیری از بروز مشکلات برخورد با زون‌های خرد شده و گسله باشند.

۵-۲-۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی

سنگ‌ها در اثر تقاطع ناپیوستگی‌های مختلفی چون لایه‌بندی، درزه و گسل به قطعات (بلوک‌های) مجزا تبدیل می‌شوند. در چنین شرایطی، بلوک‌هایی که از کمترین سطح تکیه‌گاهی برخوردارند، بحرانی‌ترین وضعیت را خواهند داشت. جابجایی بلوک‌های بحرانی باعث سست شدن بلوک‌های مجاور گردیده و سقوط و لغزش این بلوک‌ها می‌تواند گسیختگی‌های کلی را به همراه داشته باشد [۱۷۱].

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

هنگامی که وضعیت شکستگی و یا هوازدگی توده سنگ 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 محدودکننده برای عملکرد ماشین‌های سپری برای سنگ امکان‌پذیر است [۱۷۲].

در بیشتر تونل‌های سنگی احتمال وقوع دو نوع ناپایداری در جداره‌های تونل وجود دارد که شامل [۱۷۳]:

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

از جمله موارد ناپایداری سینه‌کار و دیواره تونل در کشور می‌توان به قطعات سوم و چهارم تونل انتقال آب قم‌رود که در میان توده‌سنگ‌های شدیداً متورق و شیبستوز از جنس اسلیت، فیلیت و شیست‌های گرافیتی و کوارتزار، حفر شده است اشاره نمود. همچنین ریزش متعدد سینه‌کار و جداره‌های تونل در پروژه البرز نیز روی داده است [۱۷۴، ۱۷۳]. شکل (۵-۲) ریزش بلوک از سینه‌کار تونل لوشبرگ در سوئیس را نشان می‌دهد.

۵-۲-۱- مشکلات ناشی از ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی

ریزش در سینه‌کار و در نتیجه گیر کردن و توقف تجهیزات انتقال و سیستم نوار نقاله ممکن است از یک مشکل فراتر رود. توقف کاری برای چندین بار در یک شیفت برای خارج ساختن قطعات درشت بلوکی سنگ ممکن است منجر به کاهش نرخ‌های پیشروی و بهره‌وری ماشین شود. همچنین ناپایداری در سینه‌کار می‌تواند باعث صدمه رسیدن به دیسک‌ها، گیر کردن مجرای بارگیری و مشکلات مربوط به تعویض دیسک‌ها شود [۱۷۲].

ناپایداری دیواره‌های تونل به طور مستقیم تأثیر چندانی در حفر تونل با ماشین سپردار نخواهد داشت، لیکن در ماشین سپردار تلسکوپی در صورت عدم امکان به‌کارگیری گریپر‌ها به دلیل سست بودن دیواره‌ها، نرخ پیشروی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۷۵].

انواع و گستره‌ی ناپایداری‌هایی که ممکن است در اثر عبور از نواحی گسلی رخ دهد شامل ریزش سینه‌کار تونل است و همزمان با آن ممکن است که جریان پرفشار آب به داخل تونل و هجوم مواد دانه‌ریز آبدار رخ داده و سبب تشکیل حفراتی در قسمت تاج تونل و یا در جلو ماشین شود [۱۶۸].



شکل (۲-۵) بلوک‌های بزرگ جدا شده از سینه‌کار تونل [۱۷۳]

۵-۲-۲-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی

روش‌های شناسایی و پیش‌بینی قبل از اجرا را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد [۱۷۳]:

- شناسایی زون‌های گسله از طریق بررسی لوگ گمانه‌ها
- مطالعه وضعیت خردشدگی سنگ‌ها
- بررسی شرایط تنش در منطقه

به غیر از موارد ذکر شده می‌توان از روش‌های عددی مانند روش اجزای مجزا و روش‌های تجربی مانند روش اتریشی برای تحلیل پایداری بهره جست.

۵-۲-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی

به منظور پیش‌گیری و مقابله با ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی موارد زیر مدنظر قرار می‌گیرد [۱۷۳]:

- کاهش دور کاترهد برای کاهش گسترش ریزش
 - انجام عملیات پیش تزریق
 - حفظ تماس کاترهد با سینه‌کار به هنگام توقف به منظور جلوگیری از ریزش بلوک‌ها
 - خرد کردن بلوک‌های سنگی جدا شده از سینه‌کار
 - گریپ نکردن در مناطق سست
- به منظور رفع مشکلات ناپایداری سینه‌کار در تونل‌سازی با سپر می‌توان ملاحظات زیر را در طراحی ماشین در نظر گرفت [۱۷۵]:

- ایجاد قابلیت انعطاف در ممان پیشانی برش در شروع و طول مدت حفاری
- ایجاد قابلیت تغییر سرعت دوران صفحه‌ی حفر

۵-۲-۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل

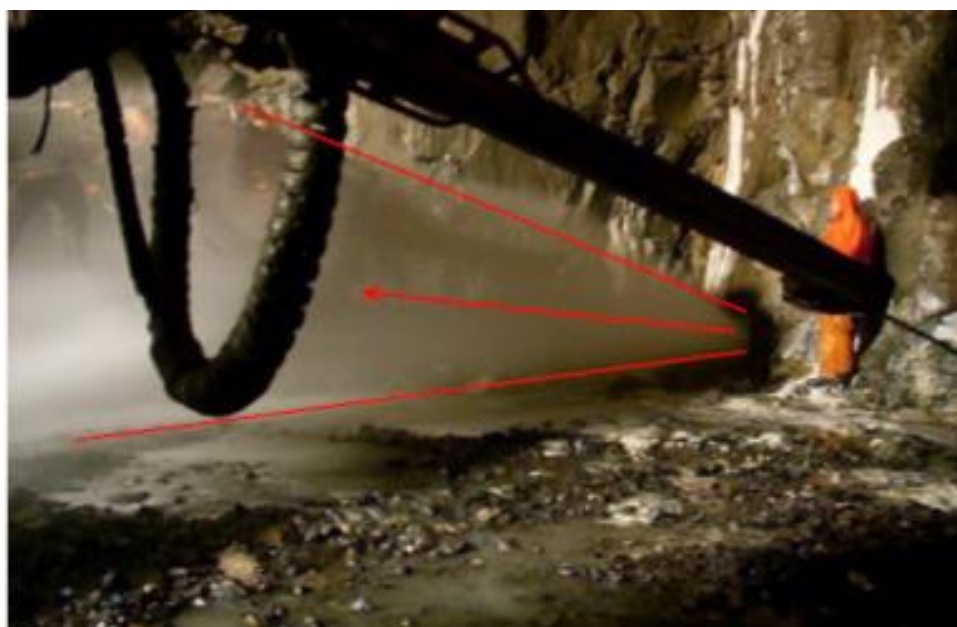
وجود آب زیرزمینی در توده سنگ‌های دربرگیرنده تونل همواره منجر به مشکلات زیادی شده است. ورود ناگهانی حجم زیاد آب به درون تونل به صورت هجوم آب یا انفجار آب^۱ یکی از مهم‌ترین و پرمخاطره‌ترین مشکلات حفاری تونل در محیط‌های آبدار می‌باشد. هجوم آب به مواردی اطلاق می‌گردد که مقدار آب ورودی به درون تونل به صورت 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 [۱۷۶]. نمونه‌هایی از هجوم آب به داخل تونل در شکل‌های (۵-۳) و (۵-۴) آمده است.

1- Water Burst

ورود آب زیرزمینی به درون تونل‌های سنگی در زمان ساخت مشکلات متعددی را درون تونل و در سطح زمین به وجود می‌آورد. درجه‌ی این مشکلات بستگی به میزان آمادگی سازندگان تونل برای برخورد با آنها دارد. این پدیده مراحل ساخت و پایداری تونل را به مخاطره می‌اندازد. در نتیجه جان افراد را تهدید کرده، زمان پروژه را به تأخیر می‌اندازد و باعث هدر رفتن سرمایه‌ها و افزایش قابل ملاحظه‌ی هزینه‌ها می‌گردد [۱۷۷].

به طور کلی مخاطرات ناشی از ورود آب به درون تونل را می‌توان به شرایط یا عوامل بالقوه زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی اطلاق کرد که توانایی و پتانسیل ایجاد خسارت زمانی، مالی و جانی و تخریب محیط کار و محیط زیست یا ترکیب آنها را با هم داشته باشد. در صورتی که قبل از حفاری تونل این مخاطرات پیش‌بینی نشده باشد و تمهیدات لازم برای مقابله با آنها در نظر گرفته نشود، پیامدهای جدی و جبران‌ناپذیری در حین حفاری به دنبال خواهد داشت [۱۷۶].

جدول (۵-۱) نمونه‌هایی از حفاری را نشان می‌دهد که در آن برخورد با آب زیرزمینی با حجم و فشار زیاد، موجب تأخیر در اجرا و افزایش هزینه شده است [۱۷۸].



شکل (۵-۳) نمونه‌ای از هجوم آب به داخل تونل [۱۷۹]

جدول (۱-۵) مثال‌هایی از برخورد جبهه پیشروی تونل با هجوم آب زیرزمینی [۱۷۸]

مکان	نام پروژه	فشار استاتیکی آب زیرزمینی (بار)	شدت جریان (m^3/min)	طول قسمتی که با مشکل مواجه بود (m)
تایوان	Pinglin	۲۰	۱۱	۱۲/۸
تایوان	Yung-Chuen	۳۵	۶۸	۴/۴
تایوان	Central (E Portal)		۱۸/۶	۸
ژاپن	Seikan		۶۷/۸	۵۳/۸
استرالیا	Semmering pilot		۲۱	۱۰
سوئیس	Gotthard Piora pilot	۹۰	۲۴	۵/۵
ایسلند	Isafjordur	۶-۱۲	۱۸۰	۹
ژاپن	Abou	۲۲	۱۸۰	۴/۶
تایوان	Lungchien tailrace		۸۱	۰/۸
هند	NW Himalaya		۷۲	۱۰
نروژ	Oyestol access	۵۰	۵	
نروژ	Kjela	۲۳	۱۵	
نروژ	Ulla forse	۲۰	۴۰	



شکل (۴-۵) نمونه‌ای از هجوم آب به داخل تونل [۱۷۹]

۵-۲-۳-۱- مشکلات ناشی از نشت و هجوم آب به داخل تونل

حفر تونل در زمین‌های آبدار مشکلات زیادی را به دنبال دارد که از جمله‌ی این مشکلات و مسائل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۸۰]:

کاهش ضریب پایداری ساختاری در توده سنگ‌های اطراف تونل (شستگی پرشدگی درزه‌ها)، تأثیر بر خواص ژئومکانیکی سنگ، تأثیر بر پارامترهای مقاومتی سنگ بکر، هجوم شدید آب در سینه‌کار تونل و توقف کامل عملیات تونل‌سازی، فرسایش یا تخریب بتن تازه‌ای که به عنوان پوشش نهایی به کار رفته است، ایجاد فشار آب اضافه روی سیستم نگهدارنده دائم و موقت، سختی کار برای پرسنل.

با بررسی شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی مسیر تونل، امکان رخداد مخاطرات احتمالی دیگری نیز وجود دارد که شامل موارد زیر می‌باشند [۱۷۶]:

- شستشوی مصالح دانه ریز و ریزش بلوک‌های سنگی
- گیرکردن سپرها و کاترهد
- آب‌گرفتگی ریل‌ها و تجهیزات پشتیبانی
- اتصال سیستم‌های برقی و خطر برق‌گرفتگی
- افت سطح آب زیرزمینی و خشک شدن چشمه‌ها
- ریزش مصالح اشباع از روی نوار نقاله

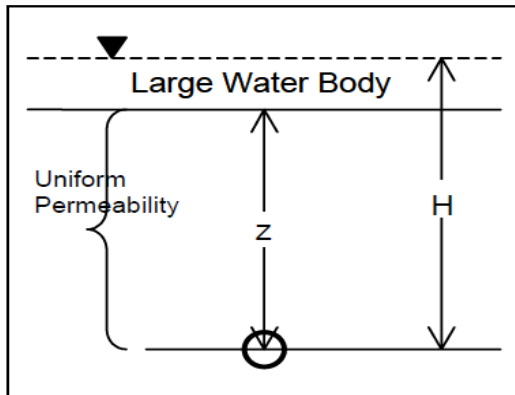
۵-۲-۳-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی نشت و هجوم آب به داخل تونل

در طراحی تونل‌های سنگی روش‌های متعددی از قبیل روش‌های تحلیلی، تجربی، نیمه‌تجربی و عددی برای پیش‌بینی ورود آب زیرزمینی وجود دارد [۱۷۷]. از جمله روش‌های تحلیلی می‌توان به روش‌های بیان شده در جدول (۵-۲) اشاره کرد که پارامترهای به کار رفته در آنها به صورت شماتیک در شکل (۵-۵) آمده است.

جدول (۲-۵) معادله‌های تحلیلی در برآورد میزان هجوم آب [۱۸۱]

ردیف	روش	فرمول
۱	Goodman	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2z}{r})}$
۳	Karlsruod	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2h}{r} - 1)}$
۴	Lei & Rat	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{h}{r} + \sqrt{(\frac{h}{r})^2 - 1})}$
۵	El Tani-1	$Q = 2\pi K \frac{1 - 3(\frac{r}{2h})^2}{[1 - (\frac{r}{2h})^2] \ln(\frac{2h}{r} - (\frac{r}{2h})^2)}$
۶	El Tani-2	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\ln \lambda} \text{ \& } \lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}$

در معادلات جدول (۲-۵) پارامترهای مختلف عبارت‌اند از:



H: فاصله مرکز تونل تا سطح ایستایی

Z: فاصله مرکز تونل تا سنگ روباره

r: شعاع تونل

K: ضریب نفوذپذیری معادل در امتداد طول تونل

Q: میزان نفوذ آب در واحد طول تونل

شکل (۵-۵) معرفی پارامترهای به کار رفته در روابط تحلیلی [۱۸۲]

روش‌های تحلیلی از قوانین حاکم بر جریان آب در اطراف چاه‌ها تبعیت می‌کنند. از آنجا که تمامی این

روش‌ها مبنای تئوریک دارند نتایج به دست آمده در این روش‌ها نزدیک به هم می‌باشند [۱۷۷].

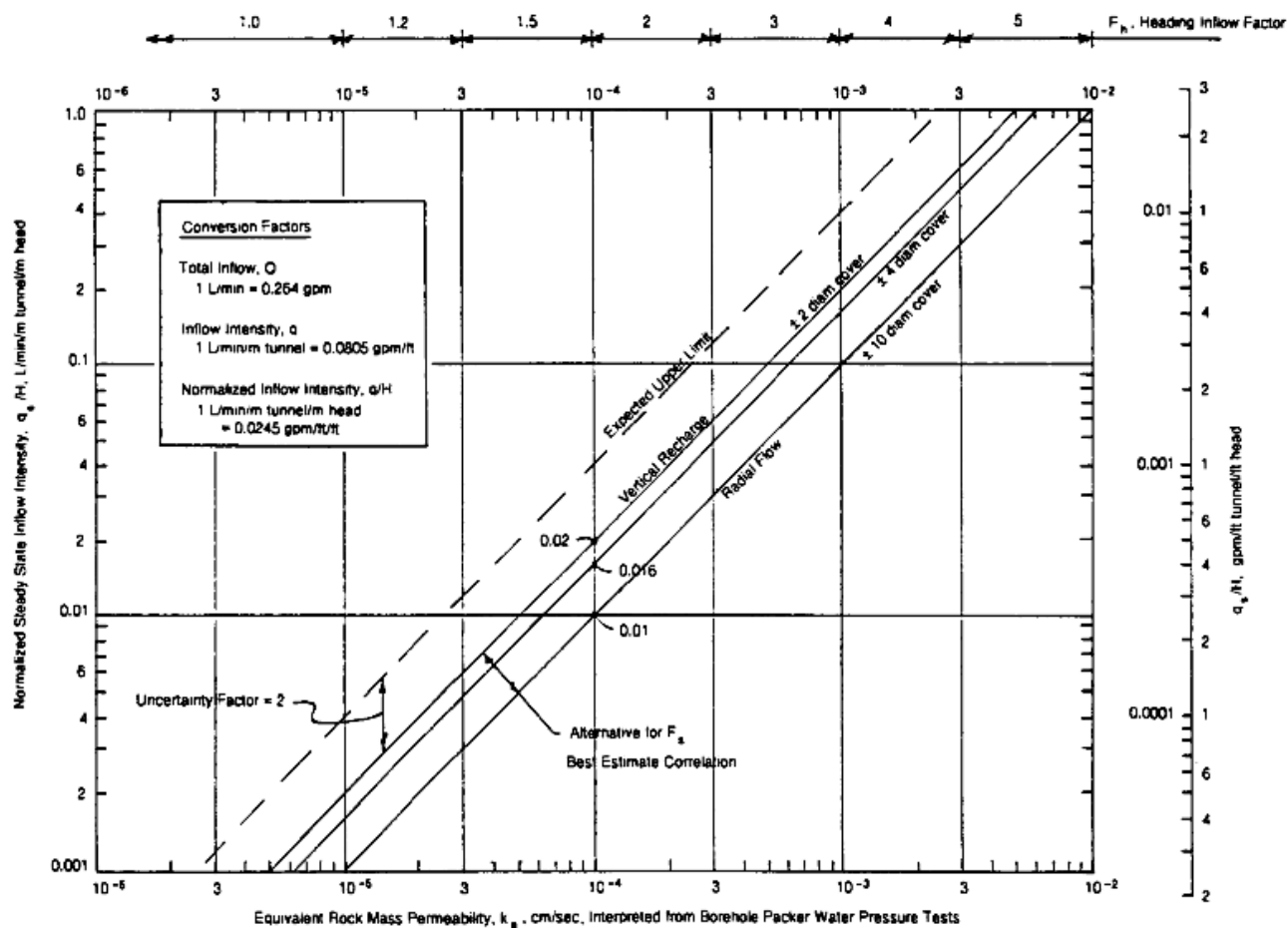
یکی از روش‌های تجربی برای پیش‌بینی میزان ورود آب به درون تونل‌های سنگی، روش هیوور^۱ است.

وی نشان داده است که مقدار آب ورودی به تونل‌های سنگی با نفوذپذیری ارتباط مستقیم دارد. بر اساس تجارب

1- Heuer

به دست آمده به نظر می‌رسد که مقدار جریان واقعی آب به سمت تونل تقریباً یک هشتم مقادیر جریان آب محاسبه شده از طریق روابط مورد نظر می‌باشد [۱۸۳].

برای رفع این مشکل در شکل (۵-۶) رابطه‌ای تجربی توسط هیوور بین متوسط جریان آب ورودی به تونل در حالت پایدار درازمدت و تراوایی (نفوذپذیری) معادل توده سنگ که از آزمایش‌های فشار آب استاندارد با پکر (آزمایش لوژان) به دست آمده است، پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که نمودار شکل (۵-۶)، رابطه تجربی میان جریان واقعی (اندازه‌گیری شده) آب به سمت تونل با نتایج آزمایش‌های فشار آب انجام شده در گمانه‌های اکتشافی، در پروژه‌های مختلف را نشان می‌دهد و مبنای تئوری ندارد [۱۸۳].



شکل (۵-۶) رابطه‌ی تجربی میان متوسط جریان آب ورودی به تونل در حالت پایدار و تراوایی معادل توده سنگ [۱۸۳]

مقایسه‌ی انجام شده توسط حسن‌پور نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از روش‌های تحلیلی و عددی دور از واقعیت است در حالی که نتایج پیش‌بینی میزان آب ورودی به تونل‌های سنگی که با روش‌های تجربی به دست آمده است همخوانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد [۱۸۴].

به غیر از توضیحات ذکر شده موارد زیر نیز برای شناسایی و پیش‌بینی نشت و هجوم آب به تونل قبل از اجرا مشکل‌گشا خواهد بود [۱۷۳]:

- شناسایی گسل‌ها با حفر گمانه‌های اکتشافی
- بررسی پتانسیل کارست
- اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی و نوسانات آن

۵-۲-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با نشت و هجوم آب به داخل تونل

موثرترین روش برای کاهش این مخاطرات، ممانعت از ورود آب به درون تونل می‌باشد. برای این منظور ابتدا باید با استفاده از روش‌های اکتشافی مانند گمانه‌های پیش‌رو یا ژئوفیزیک مانند (TSP) موقعیت، کمیت و کیفیت آب ورودی شناسایی گردد. روش‌های پیش تزریق یا انجماد می‌تواند ضمن پایداری سینه‌کار، در زمان حفاری از ورود آب به درون تونل جلوگیری نماید یا مقدار آن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. زهکشی زون آبدار نیز از دیگر روش‌های کاهش حجم آب ورودی به تونل می‌باشد. از طرف دیگر نصب سیستم‌های پمپاژ می‌تواند در تخلیه آب‌های ورودی به تونل کمک کند [۱۷۶].

به منظور بهسازی و کاهش مخاطرات روش‌های ذیل نیز پیشنهاد می‌شوند [۱۷۶]:

- پیش‌بینی نرخ ورود آب به درون تونل و تغییرات رژیم هیدروژئولوژیکی منطقه
- طراحی و نصب سیستم‌های نگهدارنده
- نصب دریچه‌های بازرسی بر روی سپرها

۵-۲-۴- سینه کار مختلط (جبهه کار مختلط)

یکی از مشکلاتی که معمولاً در تونل سازی با ماشین حفار تمام مقطع رخ می دهد و اغلب کمتر به آن پرداخته می شود، وجود تناوب سنگ های سخت و نرم در جبهه کار تونل می باشد [۱۸۵].

جبهه کار مختلط به شرایطی اطلاق می شود که دو یا تعداد بیشتری از سازندهای زمین شناسی به طور همزمان در سینه کار تونل حضور داشته باشد. عموماً این شرایط در اثر برخورد واحدهای سنگی با ویژگی های مکانیکی متفاوت و حضور رگه ها و دایک ها در سازندهای سنگی ایجاد می شود [۱۷۵].

شرایط جبهه کار مختلط با واحدهای سنگی متفاوت، تأثیر کمتری نسبت به توده سنگ متوسط تا کاملاً خرد شده بر عملکرد ماشین دارد. در یک توده سنگ خرد شده، بلوک های کوچک یا بزرگ از سینه کار سقوط کرده و موجب ایجاد فضای خالی در سینه کار می شود. این فضای خالی در هنگام عبور برش دهنده از آن به سنگ مجاور، موجب ایجاد ضربه به برش دهنده می شود. به طور تئوریک نسبت مقاومت فضای خالی به سنگ بسیار زیاد است. در این شرایط نیروی تراست می تواند ۸۵-۹۰٪ کاهش یابد. بنابراین شرایط جبهه کار ترکیبی، تنها در اثر وجود واحدهای سنگی متفاوت ایجاد نشده، بلکه خرد شدگی توده سنگ در اثر فشارهای تکتونیکی و یا گسل خوردگی نیز می تواند ایجاد کننده ی این شرایط باشد [۱۷۵].

۵-۲-۴-۱- مشکلات ناشی از سینه کار مختلط

هنگامی که سینه کار ترکیبی از سنگ مقاوم و ضعیف باشد، و اختلاف مقاومت دو واحد سنگی زیاد باشد، به هر برش دهنده در هنگام عبور از لایه ضعیف به لایه مقاوم یک ضربه وارد شده و نیروی وارد بر برش دهنده به بالاترین حد خواهد رسید. در این شرایط به یاتاقان و تیغه ها نیروی شوک بیشتر و بالاتری در دوران وارد شده و می تواند موجب شکستگی آنها شود و در کل مصرف برش دهنده افزایش یافته، بهره وری ماشین کاهش می یابد [۱۷۵].

در مواردی که سنگ‌های سخت در یک طرف و سنگ‌های نرم‌تر در سوی دیگر سینه‌کار قرار گیرند، ماشین حفار از مسیر خود تا حدی منحرف شده و نیاز به هدایت مداوم و کنترل مسیر دارد. علت این امر افزایش چشم‌گیر نیروهای غلطشی در یک سمت تونل و اثر تجمعی آنهاست که باعث اعمال نیروی جانبی زیادی به کله‌ی حفاری می‌شود که در نتیجه کله را به سمت عکس جهت دوران در سنگ سخت سوق می‌دهد [۱۷۳].

در صورت وجود این شرایط، افزایش لرزش ماشین، اپراتور را از وجود تناوب سنگ‌های سخت و نرم در سینه‌کار تونل آگاه می‌کند. در این صورت به منظور جلوگیری از شکستن سریع برش‌دهنده‌ها و آسیب رساندن به ماشین، میزان نیروی تراست و دور در دقیقه پیشانی برشی کاهش می‌یابد. در این صورت کاهش نرخ پیش روی ماشین اجتناب‌ناپذیر خواهد بود [۱۷۵]. در شکل (۷-۵) نمونه‌ای از یک تیغه که در اثر ضربات شدید دچار شکستگی شده نشان داده شده است.



شکل (۷-۵) نمایی از یک تیغه‌ی شکسته‌شده و جبهه‌کار مختلط [۱۸۵]

۵-۲-۴-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی سینه‌کار مختلط

در بعضی از دستگاه‌های جدید TBM، سیستمی برای تشخیص قطعات سنگی تعبیه شده است که با ارسال امواج و دریافت آنها، اطلاعاتی را از محدوده‌ی جبهه‌کار ارائه می‌کند که این اطلاعات به میزان قابل قبولی

شرایط زمین‌شناسی روبروی تونل را پیش‌بینی خواهد کرد. همچنین با استفاده از تکنیک‌های ژئوفیزیک و حفر ترانشه و گمانه می‌توان تا حدودی وضعیت زمین‌شناسی پیش روی جبهه کار تونل را پیش‌بینی کرد [۱۸۶].

۵-۲-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با سینه‌کار مختلط

در تونل‌سازی مکانیزه تغییر در آرایش دیسک‌های برنده و اصلاح مارپیچ انتقال مواد حفر شده در اتاقک حفاری به منظور جلوگیری از گیرکردن قطعات سنگی از راهکارهای اساسی محاسبه می‌شود. در کشور ژاپن، در زمین‌های مخلوط از دیسک‌های دوتایی و سه‌تایی در کله‌ی حفار استفاده می‌شود چون برای افزایش فضای خالی معمولاً تعداد دیسک‌های برنده کم شده و امکان استفاده از دیسک‌های مقاوم و بزرگتر وجود دارد [۱۸۶].

۵-۲-۵- تورم سازندهای شیلی و مارنی

تورم سنگ عموماً نتیجه نوعی واکنش فیزیکی شیمیایی در حضور آب است که معمولاً همراه با آزاد شدن تنش ناشی از حفاری می‌باشد. در حین تورم، حجم با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند، این مساله به طور همزمان، با رها شدن تنش ناشی از حفاری و یا پس از آن اتفاق می‌افتد [۱۸۷].

دو مکانیزم عمده در پدیده آماس وجود دارد [۱۷۳]:

- مکانیزم مکانیکی

- مکانیزم فیزیکوشیمیایی

مکانیزم مکانیکی 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 فیزیکوشیمیایی شامل واکنش شیمیایی بین آب و کانی‌های موجود در سنگ و خاک می‌گردد. این نوع آماس به وجود کانی‌های خاصی در زمین بستگی دارد.

زمین‌هایی که دارای پتانسیل رفتار آماسی هستند شامل موارد زیر می‌شوند [۱۷۳]:

- زمین‌هایی که در اثر تغییرات تنش، شل و سست شده‌اند.
- رس‌هایی که قابلیت انبساط دارند و دارای مقدار زیادی مونت‌موریلونیت یا ایلیت و مقدار کمتری کائولینیت هستند.
- شیل‌ها، گل سنگ‌ها و مارن‌های حاوی مواد دارای خاصیت آماسی نظیر مونت‌موریلونیت و ایلیت.
- انیدریت که در اثر هیدراسیون و تبدیل به ژیپس آماس می‌کند.
- مواد خرد شده گسلی، درزه‌های پر شده و مواد پرکننده درزه‌ها و سنگ‌های دگرسان شده که می‌توانند بر اثر هوازدگی و یخبندان آماس کنند.

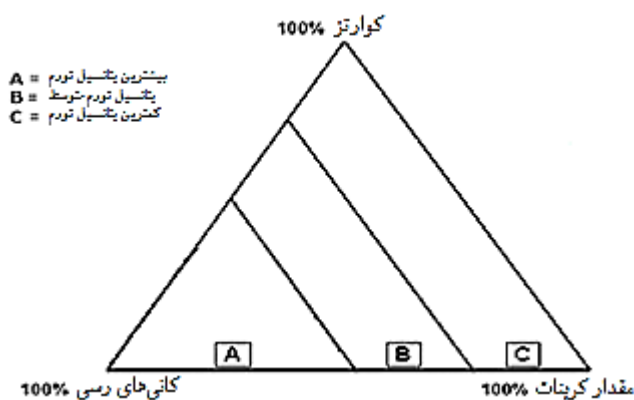
فربر^۱ و همکاران بیان نموده‌اند که عوامل متعددی از جمله رطوبت و نسبت تخلخل اولیه، نوع کانی‌های رسی، واحدهای درشت ساختاری^۲ و روباره‌ی موجود، در پتانسیل تورمی یک خاک متورم شونده نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند. تغییر حجم این‌گونه خاک‌ها عمدتاً تحت تأثیر مقدار و نوع کانی‌های رسی قرار دارد به طوری که تغییر حجم در مقیاس‌های زیاد همواره با وجود مقادیر بسیار زیادی از رس‌های فعال همراه می‌باشد. وقتی که این خاک‌ها در اثر کاهش رطوبت خشک می‌گردند، پدیده‌ی انقباض روی می‌دهد و افزایش رطوبت بعدی موجب تورم آنها، در نتیجه جذب آب حفره‌ای می‌گردد. این دو پدیده تحت عنوان سیکل یا چرخه‌ی تر و خشک شهرت دارد [۱۸۸].

ترکیب اصلی سنگ‌های مارنی، کربنات کلسیم و رس است. میزان تورم‌پذیری این سنگ‌ها تابع میزان رس موجود در آنهاست. با افزایش کربنات کلسیم، میزان رس سنگ‌های مارنی کاهش می‌یابد و در نتیجه از میزان تورم آن خواهد کاست [۱۸۹].

1- Ferber

2- Macro Structure

لازم به ذکر است طی فرایند طبیعی سخت‌شدگی در اثر وزن لایه‌های بالایی و سیمان‌شدگی، رس به شیل تبدیل می‌گردد. شیل به دلیل نرمی، تمایل به هوازدهی و تبدیل به رس، سنگ ساختاری بسیار ضعیفی است. در شکل (۵-۸) نمودار پتانسیل تورم آورده شده است.



شکل (۵-۸) نمودار پتانسیل تورم [۱۹۰]

۵-۲-۱-۵- مشکلات ناشی از تورم سازندهای شیلی و مارنی

بر اثر آماس و برآمدگی معمولاً مشکلاتی بروز می‌نماید که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۱۷۳]:

- 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 و نا کارآمدگی عملیات حفاری می‌گردد.
- زمانی که لایه حساس به تنش و آب در بین لایه‌های دیگری که تونل در آنها حفر شده است، قرار می‌گیرد، جذب آب موجب هم‌آمدن تونل و وارد آمدن خسارت موضعی به سیستم نگهداری می‌گردد.
- پدیده تورم در حالت بحرانی باعث افزایش خطر ریزش و اعمال بار اضافی بر سیستم نگهدارنده و سپرهای دستگاه می‌گردد.
- برآمدگی یا بالا آمدن سنگ‌های اطراف فضای حفر شده، کج‌شدگی کلی سیستم نگهداری را موجب می‌شود و باعث وارد آمدن خسارت به سیستم نگهداری در نقاط خاصی از تونل می‌گردد.

۵-۲-۵- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی تورم سازندهای شیلی و مارنی

در سال‌های اخیر روش‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری تورم گسترش چشم‌گیری داشته و روش‌های مختلف و دستگاه‌های پیشرفته‌ای در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است. به طور مثال بارلا^۱ از دستگاه‌های GDS و SRTA برای اندازه‌گیری کرنش‌های حجمی ناشی از تورم استفاده کرده است [۱۹۱].

می‌توان در جدول (۵-۳) روش‌های موجود برای بررسی پدیده‌ی تورم در محیط‌های درون‌گیر تونل‌ها و دسته‌بندی کلی آنها را خلاصه کرد:

جدول (۵-۳) روش‌های بررسی پدیده تورم در محیط‌های درون‌گیر تونل‌ها [۱۹۱]

روش‌ها	دسته‌بندی
تعیین تنش محوری ماکزیمم تعیین کرنش تورمی آزاد شعاعی و محوری تعیین تنش تورمی به صورت تابعی از کرنش تورمی آزمایش‌های سه محوره متداول آزمایش شاخص دوام - شکستگی ^۲	روش‌های آزمایشگاهی
روش‌های ترزاقی ^۳ (۱۹۴۶) و پک ^۴ (۱۹۶۹) برک و هاوارد ^۵ (۱۹۷۳) بارتون ^۶ و همکاران (۱۹۷۴)	روش‌های تجربی
مدل‌های بر پایه قانون تورم مدل‌های تغییر شکل ماده مدل‌های مکانیکی	روش‌های تحلیلی
تعیین مسیر تنش ^۷	روش‌های عددی

در ادامه روش دوام - شکستگی به اختصار توضیح داده می‌شود.

-
- 1- Barla
 - 2- SDI (Slake Durability Index)
 - 3- Terzaghi
 - 4- Peck
 - 5- Brekke & Howard
 - 6- Barton
 - 7- Stress Path

شاخص دوام - شکستگی یک معیار بسیار مناسب برای نشان دادن حساسیت سنگ در برابر سایش و تر و خشک شدن متوالی و تأثیرات شیمیایی آب است که روش آن توسط فرانکلین و چاندرا^۱ ارایه شد و در سال ۱۹۷۹ توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) توصیه و طبق (ASTM (1990 and 1998 به صورت استاندارد درآمد [۱۹۲].

در آزمایش دوام ترکیبی از سایش و تر و خشک شدن به منظور تسریع کردن فرآیند هوازدگی روی نمونه‌های سنگ اعمال می‌شود [۱۹۳].

از مزایای قابل توجه این آزمایش می‌توان عدم نیاز به نمونه‌گیری مشابه آنچه در آزمایش‌های تراکمی تک محوره نیاز است و هزینه‌ی بسیار پایین آزمایش در مقایسه با دیگر آزمایش‌ها را نام برد. نیاز به زمان بیش از ۱۶ ساعت برای خشک شدن نمونه‌ها و در نتیجه افزایش دوره‌ی زمانی انجام آزمایش از معایب بزرگ این آزمایش می‌باشد [۱۹۴].

برای انجام آزمایش‌های دوام - شکستگی مطابق استاندارد ISRM و ASTM ۱۰ نمونه سنگ به وزن ۴۰ تا ۶۰ گرم نیاز است. نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در داخل سبد دستگاه با سرعت ثابت ۲۰ دور در دقیقه و در داخل آب می‌چرخد. با مشخص بودن وزن خشک نمونه‌ها قبل و بعد از هر سیکل آزمایش، شاخص دوام - شکستگی از رابطه‌ی (۵-۱) به دست می‌آید. به منظور بررسی تأثیر تعداد سیکل بر شاخص دوام - شکستگی، آزمایش روی نمونه‌ها با توجه به تعداد لازم صورت می‌پذیرد [۱۹۴].

$$SDI = (C-D)/(A-D) \times 100 \quad \text{رابطه (۵-۱)}$$

در این رابطه D وزن سبد، C وزن ثانویه نمونه خشک و سبد، و A وزن اولیه نمونه و سبد می‌باشد.

۵-۲-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با تورم سازندهای شیلی و مارنی

میزان تورم علاوه بر خواص فیزیکی شیمیایی سنگ به میزان بارزدایی و جهت تنش‌های اصلی نیز بستگی دارد. هر چه سطوحی که در معرض بارزدایی قرار می‌گیرند، کوچک‌تر باشند میزان تورم کمتر خواهد بود. بر مبنای این مطالعات به خوبی روشن است که شکل مقطع حفاری که عامل اصلی توزیع مجدد تنش بعد از حفاری می‌باشد، نقش بسیار مهمی در کنترل فشارها و کرنش‌های ناشی از تورم را به عهده دارد [۱۹۵].

طراحی پوشش نگهداری موقت و دائم با در نظر گرفتن بار ناشی از تورم مصالح رسی نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد [۱۷۳].

۵-۲-۶- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)

اصطلاح سنگ مچاله‌شونده از نخستین روزهای احداث تونل در کوه‌های آلپ متداول شد و تاکنون برای آن تعاریف مختلفی ارایه شده است. به طور کلی مچاله‌شوندگی را می‌توان به صورت جابجایی و همگرایی ناشی از ایجاد و ترکیب تنش‌های القایی در ضمن حفاری تونل تعریف نمود. این پدیده زمانی روی می‌دهد که تنش‌های برشی القایی به وجود آمده در اثر حفاری بیشتر از مقاومت برشی توده سنگ‌های در برگیرنده حفره باشد [۱۹۶]. این پدیده با تغییر شکل‌های بزرگ و «همگرایی‌های وابسته به زمان» در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش‌های القایی، تنش موجود از حد مقاومت وابسته به زمان برشی سنگ تجاوز کرده و توده سنگ به داخل فضای حفاری شده رانده می‌شود. این تغییر شکل‌ها ممکن است در طی حفاری تونل یا در دوره‌ی زمانی طولانی مدت، ادامه داشته باشد. میزان همگرایی تونل، نرخ تغییر شکل‌ها و وسعت ناحیه پلاستیک در اطراف تونل به خواص زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه، تنش برجا، جریان آب، فشار آب حفره‌ای و خواص ژئوتکنیکی توده سنگ بستگی دارد [۱۹۷].

پدیده‌ی لهیدگی در توده‌های سنگی می‌تواند به صورت لهیدگی سنگ بکر، لهیدگی ناپیوستگی‌های پرشده سنگ و یا لهیدگی در طول سطوح لایه‌بندی، درزه‌ها و گسل‌ها بروز نماید. به طور کلی در مبحث لهیدگی باید فاکتورهای زیر را مورد توجه قرار گیرد [۱۹۸]:

نوع سنگ، مقاومت و خرد شدگی توده سنگ، امتداد یافتگی سازه‌ی سنگ، حالت تنش (روباره)، فشار آب، فرآیند ساخت و سیستم‌های نگهدارنده.

۵-۲-۶-۱- مشکلات ناشی از پدیده‌ی لهیدگی

برخی از آثار مهم این پدیده عبارت‌اند از: ناپایداری در سینه‌کار، شکست پوشش تونل تحت اثر بارهای زیاد، تغییر شکل مقطع تونل در اثر کرنش‌های زیاد، تورم و در نهایت خزش وابسته به زمان [۱۹۸].

از دیگر مشکلات ناشی از لهیدگی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۷۵]:

- عدم تغییرپذیری نسبی در شعاع حفاری
- مشکلات حاصل از کاهش بار محوری (تراست) به دلیل کاهش عملکرد گریپرها
- دشواری کنترل جهت حرکت ماشین، در زمین نرم یا ناهمگن

۵-۲-۶-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی پدیده‌ی لهیدگی

یکی از مهم‌ترین مسائل تونل‌سازی در زمین‌های مچاله‌شونده پیش‌بینی زمین مچاله‌شونده و شدت آن می‌باشد. به طور کلی برای پیش‌بینی پتانسیل و میزان لهیدگی روش‌های تجربی، نیمه‌تجربی و تئوری-تحلیلی وجود دارد که در جدول (۵-۴) به همراه نام طراحان آورده شده است [۱۹۹].

در ادامه برخی از این روش‌ها به صورت خلاصه شرح داده می‌شوند.

جدول (۴-۵) روش‌های شناسایی و پیش‌بینی پدیده‌ی لهیدگی

روش‌ها	اساس روش‌ها	طراحان
تجربی	بر پایه‌ی سیستم طبقه‌بندی توده سنگ و عمق تونل	سینگ ^۱ و همکاران (۱۹۹۲) گوئل ^۲ و همکاران (۱۹۹۵)
نیمه تجربی	با استفاده از تغییر قابل انتظار تونل در یک میدان تنش هیدروستاتیک. نقطه شروع در این روش‌ها شاخص فاکتور صلاحیت (نسبت مقاومت فشاری توده سنگ یا سنگ بکر به تنش برجا) است	جتوا ^۳ و همکاران (۱۹۸۴) آیدان ^۴ و همکاران (۱۹۹۳) هوک و مارینوس ^۵ (۲۰۰۰) بارلا (۱۹۹۵)
تئوری - تحلیلی	بر پایه‌ی پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ	انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM)

سینگ و همکاران با توجه به میزان روباره (H) و شاخص کیفیت تونل‌زنی (Q) و گوئل و همکاران با استفاده از پارامترهای عدد توده سنگ (N)، قطر دهانه تونل (B)، ارتفاع روباره (H)، رابطه‌ای برای بروز یا عدم بروز مچاله‌شوندگی ارائه داده‌اند که در جدول (۵-۵) آمده است [۲۰۱، ۲۰۰].

جدول (۵-۵) پتانسیل لهیدگی بر مبنای معیارهای تجربی سینگ و گوئل

روش	رابطه‌ی ارائه شده	شرایط لهیدگی	شرایط غیر لهیدگی
سینگ و همکاران	$H = 350 Q^{1/3}$	$H >> 350 Q^{1/3}$	$H << 350 Q^{1/3}$
گوئل و همکاران	$H = (275 N^{0.33})B^{-0.1}$	$H >> (275 N^{0.33})B^{-0.1}$	$H << (275 N^{0.33})B^{-0.1}$

در روش جتوا و همکاران، درجه لهیدگی (Nc) بر اساس پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (σ_{cm})، عمق تونل (H)، وزن واحد حجم توده سنگ (γ) و فشار روباره (P_0) می‌باشد. در جدول (۵-۶) پتانسیل مچاله‌شوندگی بر مبنای معیار جتوا و همکاران آمده است [۲۰۲].

1- Singh
2- Goel
3- Jetwa
4- Aydan
5- Hoek & Marinos

جدول (۵-۶) پتانسیل لهیدگی بر مبنای معیار جتوا و همکاران

روش	درجه لهیدگی	عدم لهیدگی	لهیدگی کم	لهیدگی متوسط	لهیدگی زیاد
جتوا و همکاران	$Nc = \frac{\sigma_{cm}}{P_0(\gamma.H)}$	> 2	$0.8 - 2$	$0.4 - 0.8$	< 0.4

در روش هوک و مارینوس با استفاده از نسبت کرنش تونل (ε_t) که معادل نسبت جابجایی شعاعی به شعاع تونل و نسبت مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ به فشار روباره است، میزان لهیدگی تعیین می‌گردد. میزان لهیدگی در این روش از جدول (۵-۷) قابل محاسبه است [۲۰۳].

جدول (۵-۷) پیش‌بینی لهیدگی بر مبنای معیار هوک و مارینوس

روش	عدم لهیدگی	لهیدگی کم	لهیدگی زیاد	لهیدگی خیلی زیاد	لهیدگی شدید
هوک و مارینوس	$\varepsilon_t \leq 1$	$1 < \varepsilon_t \leq 2.5$	$2.5 < \varepsilon_t \leq 5$	$5 < \varepsilon_t \leq 10$	$\varepsilon_t > 10$

در روش بارلا و ISRM با توجه به مقادیر تنش مماسی (σ_θ) و مقاومت فشاری تک محوری سنگ (σ_{cm})، پتانسیل مچاله‌شوندگی طبق جدول (۵-۸) پیش‌بینی می‌شود [۲۰۴].

جدول (۵-۸) پتانسیل لهیدگی بر مبنای روش بارلا و ISRM

روش	درجه لهیدگی	عدم لهیدگی	لهیدگی کم	لهیدگی متوسط	لهیدگی زیاد
بارلا	$(\sigma_{cm} / \gamma.h)$	> 1	$0.4 - 1$	$0.2 - 0.4$	< 0.2
ISRM	$(\sigma_\theta / \sigma_{cm})$	< 1	$2 - 1$	$4 - 2$	> 4

۵-۲-۶-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با پدیده‌ی لهیدگی

به منظور پیش‌گیری و مقابله با پدیده‌ی لهیدگی می‌توان تمهیدات زیر را در نظر گرفت [۱۷۳]:

- در نظر گرفتن بار وارده در طراحی پوشش نهایی تونل
- کاهش زمان توقفات ماشین
- تزریق مواد روان کننده به پشت سپرها برای کاهش اصطکاک
- افزایش اضافه حفاری با بستن دیسک کاترهای گیج^۱ در حاشیه بیرونی کاترهد

۵-۲-۷- تشکیل گل (انسداد)

وجود سازندهای شیلی، مارنی و به طور کلی سازندهای حاوی کانی‌های رسی (آرژیلیتی) در مسیر تونل باعث بروز مشکلاتی برای TBM می‌شود. یکی از مهم‌ترین خواص کانی‌های رسی و سنگ‌های حاوی آن، بروز رفتار چسبندگی در زمین‌های آبدار بوده که در عملیات حفاری با TBM در چنین زمین‌هایی ممکن است منجر به گرفتگی کله‌ی حفار، اسکرپپر و یا جام‌های ورود مصالح به داخل کله‌ی حفار شود [۱۶۲].

به طور کلی در چنین زمین‌هایی، همواره خطر گل گرفتگی و انسداد^۲، قسمت‌های مختلف ماشین حفاری مکانیزه را تهدید می‌نماید. در شکل (۵-۹) نمونه‌ای از گل گرفتگی کله‌ی حفاری نشان داده شده است.



شکل (۵-۹) نمایی از گل گرفتگی کله‌ی حفاری [۲۰۵]

1- Gauge Cutters
2- Blockage

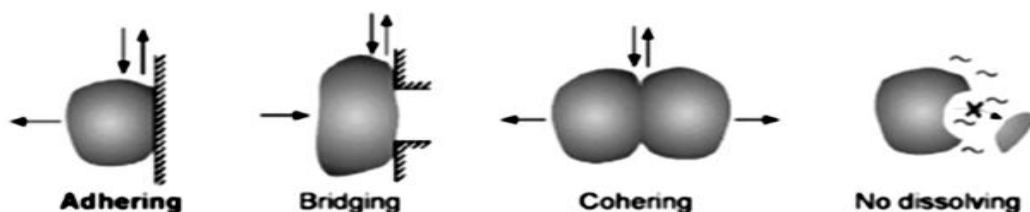
به منظور طبقه‌بندی تشکیلات خاکی رسی با در نظر گرفتن پتانسیل گل‌گرفتگی آنها، پژوهشی روی چسبندگی رس‌ها به سطح فولاد در مقیاس آزمایشگاهی توسط توویس و بارگر^۱ در سال ۲۰۰۵ صورت گرفت. پتانسیل گل‌گرفتگی رس‌ها به صورت اندرکنش ۴ مکانیزم موثر منفرد در این آزمایش تعریف می‌شود که در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است [۲۰۵]. در میان این ۴ مکانیزم، چسبندگی ذرات رس روی سطح اجزا، مهم‌ترین نوع مکانیزم چسبندگی می‌باشد که رفتار چسبندگی رس را به خوبی نشان می‌دهد.

۱- چسبندگی ذرات رس روی سطح اجزا^۲

۲- ایجاد پل در مسیر ورودی مربوط به انتقال مواد حفر شده^۳

۳- چسبندگی ذرات رس به یکدیگر^۴

۴- تمایل کم ذرات رس برای حل شدن در آب^۵



شکل (۵-۱۰) اندرکنش‌های مکانیزم موثر منفرد [۲۰۵]

۵-۲-۷-۱- مشکلات ناشی از تشکیل گل

مشکل چسبندگی و گل‌گرفتگی مربوط به رس غالباً منجر به هدایت‌پذیری سخت، نرخ پیشروی پایین و

تمیزکاری اضافه می‌گردد [۲۰۶].

گل‌گرفتگی و در نتیجه انسداد دهانه‌ی اسکریپرهای کله‌ی حفار باعث کاهش ظرفیت پذیرش حجم مصالح

حفاری به داخل کله‌ی حفار می‌شود. این امر سبب برهم زدن توازن بین حجم مصالح کنده شده از سینه‌کار و

1- Thewes & Burger

2- Adhering

3- Bridging

4- Cohering

5- No dissolving

حجم ورودی به کله‌ی حفار شده و حجم زیادی از مصالح حفاری بین سینه‌کار و کله‌ی حفار باقی می‌ماند و در نهایت باعث افزایش نیروی تراست و گشتاور ماشین خواهد شد. در این هنگام اپراتور مجبور به توقف ماشین و لذا تمیزکاری دریچه‌های اسکریپر می‌شود [۱۶۲].

از طرفی رس‌های چسبنده می‌توانند مانع چرخش آزاد دیسک‌های حفاری گردند و با باقیماندن آنها در یک حالت از یک سمت دچار ساییدگی بیشتر خواهند شد. بنابراین وجود مصالح رسی چسبنده در حضور رطوبت مناسب تأثیر مهمی بر عمر دیسک‌های برشی کله‌ی حفار دارد [۲۰۷].

مسأله محتمل دیگر در زمین‌های گلی تمایل دستگاه به حرکت به سوی پایین می‌باشد که به دلیل وزن زیاد ماشین و باربری اندک کف تونل ممکن است به وقوع بپیوندد. عدم کنترل مسیر حرکت TBM می‌تواند در حالت بحرانی باعث گیر افتادن دستگاه شود.

۵-۲-۷-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی تشکیل گل

به منظور ارزیابی پتانسیل انسداد خاک‌ها در تونل‌سازی مکانیزه، دو روش ذیل بیان شده است [۲۰۸].

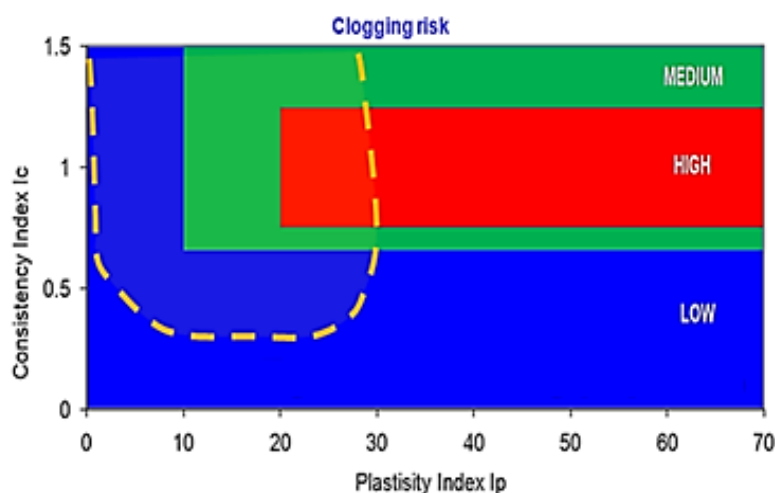
- تجزیه و تحلیل برجا رطوبت خاک با حدود آتربرگ^۱، شامل حد چسبندگی (آتربرگ، ۱۹۷۴)

- تجزیه و تحلیل رابطه‌ی بین استحکام خاک^۲ و حالت خمیری^۳ خاک (توویس و بارگر، ۲۰۰۴)

به منظور شناسایی رفتار چسبناکی کانی‌های رسی و ارزیابی خطر انسداد و گل گرفتگی در ماشین TBM پژوهش‌های دیگری نیز انجام شده که از آن جمله می‌توان به تحقیقات سازمان ژئودیتا^۴ (۱۹۹۵)، توویس (۱۹۹۹)، ساس و باربام^۵ (۲۰۰۸) اشاره نمود [۱۷۳].

1- Atterberg Limits
2- Soil Consistency
3- Soil Plasticity
4- GEODATA
5- Sass & Burbaum

ولی با این وجود، اطلاعات بسیار کمی درباره‌ی چگونگی شناسایی و ارزیابی این مخاطره در سنگ‌های رسی برای اهداف تونل‌سازی وجود دارد، زیرا بیشتر این تحقیقات بر روی خاک‌های چسبنده انجام شده است. در میان پژوهش‌های مختلف، نموداری که توسط توویس و بارگر (۲۰۰۴) برای ارزیابی خطر انسداد کانی‌های رسی ارائه شده در شکل (۵-۱۱) از مقبولیت بیشتری برخوردار بوده و علی‌رغم اینکه نمودار مذکور برای کانی‌های رسی در خاک تهیه شده، مرجع بسیاری از پژوهش‌های دیگر شده است [۲۰۹].



شکل (۵-۱۱) نمودار ارزیابی خطر انسداد کانی‌های رسی [۲۱۰]

۵-۲-۷-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با تشکیل گل

ایجاد فضای خالی کافی برای عبور گل، با شکلی که دهانه‌ی این بازشوها به سمت عقب گشادتر باشد می‌تواند از جمله تغییرات مفید در شکل مجموعه‌ی کله‌ی حفاری باشد [۲۰۵].

راهکارهای دیگری همانند موارد زیر، راه حلی برای مقابله و پیش‌گیری با این مخاطره می‌باشند [۲۰۹].

- می‌توان در مرحله انتخاب روش بهینه حفاری و همچنین طراحی و انتخاب ماشین مناسب با توجه به تجارب موجود، روش و ابزار مناسب‌تری با توجه به واقعیت زمین مسیر تونل برگزید. همچنین اصلاحات متناسب با شرایط چسبندگی را در کله‌ی حفاری اعمال نمود.

- با انجام مطالعات کافی می‌توان نوع و میزان مواد افزودنی مناسب (از جمله فوم، پلیمر یا هردو) برای کاهش دادن خصوصیت چسبندگی مصالح را تعیین نمود و سپس با توجه به خصوصیتی مانند ابعاد و مشخصات هندسی کله‌ی حفاری تعداد لازم و محل مناسب نازل‌های مربوط را در نظر گرفت.
- در مرحله‌ی ساخت ماشین سازندگان با آگاهی از احتمال بروز مشکل گل‌گرفتگی می‌توانند اصلاحات مفیدی را نسبت به دستگاه‌های رایج در نظر گیرند از جمله اینکه به منظور کاهش سطوح درگیر با مصالح حفاری و کاهش چسبندگی آنها از مواد مناسب و با حداقل زبری استفاده نمایند.
- امکان استفاده از تزریق هوای فشرده برای کاهش مشکل گل‌گرفتگی مورد بررسی قرار گیرد.

۵-۲-۸- 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 (ژپس و سنگ نمک) توسعه یابند [۲۱۱].

کارست، حاصل فرایندهای متنوعی است که در سنگ‌های انحلال‌پذیر مختلف و تحت شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی^۱ 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 [۲۱۲]. لازم به ذکر است سنگ‌های کربناته هرچه خالص‌تر (رس‌ها کمتر) باشند انحلال‌پذیری بیشتری دارند [۲۱۳].

اساس تشکیل مورفولوژی^۲ (ریخت‌شناسی) کارست به سنگ‌های کربناتی؛ خصوصیات شیمیایی؛ خصوصیات ساختمانی؛ شرایط اقلیمی و زمان بستگی دارد [۲۱۴]. نمونه‌ای از حفرات کارستی و پدیده‌ی کارستیفیکاسیون در شکل (۵-۱۲) آورده شده است.

1- Hydrogeology
2- Morphology



شکل (۵-۱۲) نمونه‌ای از حفرات کارستی و پدیده‌ی کارستی‌فیکاسیون در تشکیلات آهکی [۲۱۵]

نواحی کارستی دارای خصوصیات ویژه و اشکال زمین‌ریختی 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 می‌گردند. نشانه‌ها و عوارض کارستی معمولاً به صورت عوارض سطحی، زیرسطحی و عمقی یا درونی رده‌بندی می‌شوند [۲۱۴].

از نظر مورفولوژی و عوارض سطحی، کارست‌ها به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۲۱۴]:

- فرورفتگی‌های برجسته در ابعاد کوچک (دولین‌هایی^۱ یا فروچاله‌هایی با تنوع مختلف): این نوع فرورفتگی‌ها پایه و اساس ساخت‌های کارستی در نتیجه‌ی تأثیر شیمیایی آب بر سنگ‌های آهکی می‌باشند. از درون‌ریزی سقف مغارها و مجاری زیرزمینی کارست در اعماق کم، زیر سطح زمین، امکان تشکیل فروچاله‌ها وجود دارد.
- اشکال سطحی کارستی: اشکال با ابعاد کوچک که بر اثر حل شدن روی سطح سنگ‌ها دیده می‌شود.

1- Doline

- اشکال کارستی بر اثر رودخانه‌ها: به وسیله‌ی رودخانه‌ها روی سطح سنگ‌های کربناتی ایجاد می‌شوند.
- اشکال زیرزمینی کارستی: غارها و رسوبات داخل غارها می‌باشد.
- فرورفتگی‌ها شامل اشکال سطحی با منشأ مختلف می‌باشند.

یکی از عوامل بسیار مهمی که بر روی پتانسیل آبی سازندهای کربناته کارستی‌شونده تأثیرگذار است توسعه‌ی فرآیند کارستی‌شدگی می‌باشد که این پدیده وابستگی زیادی به لیتولوژی سنگ‌های کارستی‌شونده دارد. از نظر سنگ‌شناسی، سنگ‌های کربناته کارستی‌شونده از کانی‌های اصلی دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)، کلسیت (CaCO_3) و سیدریت (FeCO_3) و کانی‌های فرعی آنکريت ($\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$) و آراگونیت (گونه‌ی دیگر کانی کلسیت) (CaCO_3) تشکیل شده است. فرآیند کارستی‌شدن در کانی کلسیت و آراگونیت نسبت به کانی دولومیت و آنکريت به دلیل انحلال بیشتر یون کلسیم نسبت به منیزیم بالاتر است [۲۱۶].

پدیده‌ی کارستی‌شدن در مرحله‌ی اول با فعالیت شیمیایی و انحلال توده سنگ در امتداد بازشدگی‌ها، آغاز و با انتقال کربنات حل شده ادامه می‌یابد. همراه با توسعه و تجزیه سنگ‌ها، مجاری کارستی پدید می‌آیند که در مراحل اولیه باریک و کوچک‌اند ولی به تدریج افزایش می‌یابند. در مراحل کارستی‌شدن این مجاری، وجود جریان‌های آشفته و پر تلاطم باعث می‌شود حلالیت این نوع سنگ‌ها افزایش یابد. عمق کارستی‌شدن بر حسب نوع سنگ، وضع توپوگرافی دره‌ها، ساختار زمین‌شناسی و عوامل دیگر متغیر است [۲۱۴].

مطالعه سازندهای کارستی‌شونده به دلیل اینکه تقریباً ۲۰ درصد از سطح کره‌ی زمین بر روی سازندهای کربناته قرار گرفته و جمعیت قابل توجه‌ای از جهان یا بر روی منابع کارستی زندگی می‌کنند یا آب مورد نیاز خود را از آن تأمین می‌کنند دارای اهمیت فوق‌العاده زیادی است [۲۱۷].

در کشور ما حدود ۱۱ درصد از کل کشور (قسمت اعظم رشته‌کوه‌های زاگرس و کپه داغ) از سازندهای کارستی تشکیل شده است [۲۱۸].

۵-۲-۸-۱- مشکلات ناشی از پتانسیل کارست

مشکلات تونل‌سازی در مناطق کارستی در سه دسته مشکلات ناشی از آب، پرشدگی درزه و شکاف‌ها و حفره‌ها قرار می‌گیرند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۱۹]:

- مشکلات ناشی از آب شامل، ورود جریان آب به صورت گسترده و ناگهانی در خلال حفاری، خوردگی بتن، تأثیر بر میزان آبدهی چشمه‌های مجاور، تأثیر آن بر روی کیفیت آب چشمه‌های مجاور و نرخ زیاد خروجی آب در منطقه‌ی غیراشباع می‌باشند.
 - مشکلات ناشی از پرشدگی درزه و شکاف‌ها شامل، ناپایداری سینه‌کار، جریان واریزه‌ی ناگهانی رسوبات کارستی، مشکل در حفاری، مشکل پشتیبانی از دستگاه تونل‌زنی و مشکل به دلیل تورم مواد پرکننده‌ی درزه‌ها می‌باشند.
 - مشکلات ناشی از حفره‌ها شامل، ناپایداری دیواره، سقف و سینه‌کار، عدم اطمینان در مورد ضخامت سنگ پایدار در بالای تونل، مشکلات مهار دستگاه تونل‌زنی و انحراف آن می‌باشند.
- توقف عملیات حفاری، افزایش زمان و هزینه‌های ساخت از دیگر مشکلات تونل‌سازی در این مناطق است.

۵-۲-۸-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی پتانسیل کارست

روش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌ای، الکتریکی، مغناطیسی و گرانی‌سنجی به منظور شناسایی و پیش‌بینی پتانسیل کارست قابل استفاده می‌باشند [۱۶۱].

بررسی منطقه از نظر میزان بارندگی می‌تواند عاملی برای پیش‌بینی پتانسیل کارست باشد زیرا آب باران که حاوی اسید کربنیک است بر روی سنگ‌های کربناته تأثیر گذاشته و باعث انحلال آنها می‌شود که این عامل در تشکیل فضاها‌ی خالی در سنگ‌ها موثر است [۲۱۴].

بررسی ویژگی‌های آبخوان‌های دارای پتانسیل کارست از نظر درجه توسعه کارست و عمق توسعه کارست در منطقه نقش بسیار مهمی در شناسایی پتانسیل کارست در منطقه دارد [۱۷۳].

استفاده از داده‌های حاصل از دور سنجی^۱ و تلفیق با سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ مجموعه‌ای از آمارها را برای تحلیل توسعه کارست فراهم می‌آورد [۲۱۳].

بررسی فرآیندهای تکتونیکی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و تفسیر عکس‌های هوایی به منظور شناسایی مناطق مستعد کارستی حائز اهمیت است، زیرا درزه و شکاف‌هایی که به صورت یک شبکه گسترش می‌یابند، در شکل‌گیری و تشکیل اشکال زیرزمینی مانند مجاری به هم پیوسته و تشکیل آبخوان‌های کارستی نقش بسیار مهمی دارند. لازم به ذکر است در اثر درزه‌های کششی بلوک‌های سنگی از هم جدا می‌شوند. این درزه‌ها در تقادیس‌ها (در محل خمش لایه‌ها) و همچنین در بخش‌های عمیق ناودیس‌ها دیده می‌شوند [۲۱۴].

تعیین نفوذپذیری و امکان ورود جریان آب در سنگ‌های کربناتی به منظور شناسایی مناطق کارستی مفید است زیرا این عامل در افزایش قابلیت انحلال و ایجاد کارست تأثیرگذار است [۲۱۴].

بررسی ژئوشیمی سنگ‌های کربناته کارستی‌شونده و ارتباط آن با پدیده‌های ساختاری موجود در منطقه از جمله گسل‌ها در بررسی فرآیند کارستیفیکاسیون بایستی مد نظر قرار گرفته و در ابتدا مورد بررسی واقع شود و در ادامه پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست سطحی و عمقی در منطقه مورد بررسی قرار گیرد [۲۱۶].

بررسی منطقه از لحاظ فعالیت‌های آتشفشانی برای شناسایی مناطقی که امکان تشکیل حفرات انحلالی در آن وجود دارد زیرا سنگ‌های انحلال‌پذیری که در مجاورت این فعالیت‌ها قرار می‌گیرند به دلیل محلول‌های هیدروترمالی با خاصیت اسیدی باعث به وجود آمدن فضاهای خالی در آنها می‌شوند [۲۱۴].

1- Remote Sensing (RS)

2- Geospatial Information System (GIS)

بررسی و تحلیل هیدروگراف چشمه‌ها روشی برای دستیابی به ارزیابی کلی از بستر تغذیه و میزان کارستی بودن آن است. البته تعیین موقعیت مکانی چشمه‌ها با استفاده از GPS در عملیات صحرایی و تعیین تراکم چشمه‌ها در منطقه نیز می‌تواند مورد نظر قرار گیرد [۲۱۲].

۵-۲-۸-۳- راهکارهای پیش‌گیری و مقابله با پتانسیل کارست

حفر گمانه‌ی پیشرو به منظور شناسایی به موقع پتانسیل کارست در منطقه و استفاده از اپراتور متخصص برای کنترل دستگاه راهکارهایی مناسب به منظور پیش‌گیری و مقابله با این مخاطره می‌باشند.

۵-۲-۹- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

یکی از پارامترهایی که در مرحله‌ی ساخت تونل‌ها می‌تواند روند حفاری را مختل سازد برخورد به مخازن گازهای طبیعی و نشت آنها به فضای داخل تونل است. این موضوع به نوع گاز و مقدار آن نیز بستگی دارد. به طور کلی حوادث گاز در پروژه‌های تونلی را می‌توان به دو دسته، آتش‌سوزی و انفجار در اثر نشت گاز و مسمومیت‌های ناشی از گاز تقسیم نمود. از این رو برای ساخت تونل در زمین‌های گازدار قوانین و مقررات ایمنی مختلفی ارایه شده است که از آن جمله می‌توان به آیین‌نامه‌ی اوشا^۱ اشاره کرد. در این آیین‌نامه حداقل نیازها برای کار در شرایط گازهای قابل اشتعال یا سمی ارایه شده است. قوانین ایمنی از نظر برخورد به گاز در مرحله ساخت، تونل‌ها را به چهار رده به شرح زیر تفکیک می‌نماید [۲۲۰]:

- تونل‌های بدون گاز
- تونل‌های با پتانسیل گازداری
- تونل‌های گازدار خطرناک
- تونل‌های گازدار خیلی خطرناک

سازندهای سنگ آهکی نفوذپذیری و تخلخل بالا دارند و هنگامی که درون لایه‌های نفوذناپذیر مانند شیل یا ماسه‌سنگ آنها را قطع می‌کنند، یک تله‌ی مناسب برای انتقال گاز از سنگ مادر به سمت ترازهای بالا فراهم می‌آورند [۱۷۲].

در هنگام حفر فضاهای زیرزمینی عمرانی یا معدنی در بسیاری از سنگ‌های رسوبی ممکن است به گازهای سمی (نظیر هیدروژن سیانید (HCN)، متان (CH_4) و سولفید هیدروژن (H_2S)) برخورد شود. در بسیاری از مواقع، سولفید هیدروژن و دی اکسید سولفور (گوگرد) (SO_2) در درزه و شکاف‌های هر نوع سنگی که حاوی سولفیدهای آهن باشد، مشاهده می‌شود. این کانی‌های سولفیدی و مخصوصاً اکسید پیریت، به هنگام مواجهه با هوا، تولید گاز سولفید هیدروژن می‌کنند. سولفید هیدروژن گازی به شدت در آب انحلال‌پذیر است و اغلب با جریان‌ات آب به داخل فضاهای زیرزمینی راه می‌یابد. سولفید هیدروژن در مقدار زیاد و با سمیت بالا در میدان‌های نفتی و گاز طبیعی نیز وجود دارد که برای حفارها یک تهدید همیشگی است [۱۷۲].

به طور کلی گازهای زیادی در تونل‌ها وجود دارند که تأثیر زیادی بر روند حفاری می‌گذارند. در ادامه مهم‌ترین گازهای خطرناک موجود در تونل‌ها به همراه برخی از خصوصیات آنها در جدول (۵-۹) ارایه شده است. لازم به ذکر است حد پایین انفجار در جدول با عبارت LEL بیان شده است.

جدول (۵-۹) خلاصه‌ی مشخصات گازهای مضر در تونل‌ها [۲۲۰]

گاز	علامت	وزن مخصوص	حد انفجار	آثار مضر	انحلال‌پذیری	بو	حد آستانه مجاز (ppm)
متان	CH_4	۰/۵۵	۵-۱۵٪	خفه‌کننده	کم	-	20% LEL
سولفید هیدروژن	H_2S	۱/۱۹	۴/۳-۴۵/۵٪	خیلی سمی	قابل انحلال	تخم‌مرغ گندیده	۱۰
دی‌اکسید گوگرد	SO_2	۲/۲۳	-	خیلی سمی	زیاد	گوگرد	۵
دی‌اکسید کربن	CO_2	۱/۵۳	-	خفه‌کننده	قابل انحلال	-	۵۰۰۰
مونواکسید کربن	CO	۰/۹۶	۱۲/۵-۷۴/۳٪	خیلی سمی	کم	-	۵۰
هیدروژن	H_2	۰/۰۷	۴-۷۴/۳٪	خفه‌کننده	-	-	-
رادون	Rn	۷/۵۲	-	رادیواکتیو	زیاد	-	-

۵-۲-۹-۱- مشکلات ناشی از نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

مشکلات ناشی از نشت گازهای سمی موجود در تونل‌ها می‌تواند شامل موارد زیر باشد [۱۷۳]:

- سختی عملیات و کاهش کارایی پرسنل به دلیل لزوم استفاده از ماسک و کپسول اکسیژن
 - تولید محلول‌های اسیدی به دلیل انحلال گاز در آب و ایجاد خوردگی در بخش‌های مختلف ماشین حفار و سیستم پشتیبان
 - احتمال خطر انفجار و آتش‌سوزی به دلیل افزایش غلظت گاز متصاعد شده بالاتر از حد مجاز
 - تعطیلی و کاهش اجباری ساعت شیفت‌های کاری برای مقابله با آثار مخرب گازهای داخل تونل
- همچنین به خطر انداختن سلامتی نیروی انسانی، تخریب سیستم‌های الکترونیکی، خوردگی سگمنت، خرابی و خوردگی قطعات فولادی مانند ریل‌های کف تونل، پوسیدگی ساپورت‌های فلزی روی دیواره‌ی تونل، قلاب‌ها و سیم بکسل‌های نگهدارنده‌ی داکت هوا، کاهش‌دهنده‌ی راندمان عملیات اجرایی می‌باشند [۲۲۱].

۵-۲-۹-۲- روش‌های شناسایی و پیش‌بینی نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

انجام عملیات حفاری اکتشافی، راهکاری برای شناسایی و پیش‌بینی نشت گاز در تونل می‌باشد [۱۷۳].

در ضمن استفاده از ابزارهای زیر برای شناسایی و پیش‌بینی نشت گاز در تونل پیشنهاد می‌گردند [۲۲۰]:

- سیستم‌های هشداردهنده: در مناطق گازدار بر روی ماشین‌های حفاری تونل، سیستمی برای سنجش گاز (به ویژه متان) نصب می‌شود. در این سیستم داده‌های ارسالی توسط PLC (واحد مرکزی کنترل‌کننده) دستگاه ارزیابی شده و بر روی صفحه‌ی موجود در اتاقک کنترل نمایش داده می‌شود. چنانچه تجمع گاز از میزان مجاز آن تجاوز نماید، این سیستم به طور اتوماتیک اعلام خطر می‌نماید.

- آشکارسازهای قابل حمل^۱: این ابزار توسط افراد، قابل حمل بوده و قابلیت سنجش یک یا چند گاز به صورت پیوسته و همزمان را دارا می‌باشند. از این وسایل به منظور شناسایی نوع و میزان گازهای محیط و اعلام خطر به اشخاص استفاده می‌شود. هرگاه عیار هر یک از این گازها از حد مجاز تجاوز نماید دستگاه آن را به صورت صوتی، بصری یا ویبره به فرد اعلام می‌کند.

۵-۲-۹-۳- راهکارهای پیشگیری و مقابله با نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

مهم‌ترین راهکارهای پیشنهادی به منظور مواجهه با گاز نفوذی و تأثیرات آن در تونل، عبارت‌اند از [۱۶۲]:

- استفاده از ماسک و کپسول‌های ضد گاز انفرادی
- تقویت سیستم تهویه به منظور ارسال هوای تازه کافی در سینه‌کار
- حفر چاه تهویه در مسیر تونل به منظور تقویت سیستم تهویه با افزایش پیشروی و طول تونل و بروز افت در هوا رسانی به سینه‌کار
- جلوگیری از ورود آب (آلوده به گاز) به داخل تونل با آب‌بندی سگمنت، تزریق فوم و غیره
- آبکشی و هدایت سریع آب خروجی از سینه‌کار از طریق مجاری بسته
- استفاده از سیستم‌های گازسنجی دقیق در موقعیت‌های مناسب در TBM
- استفاده از سیستم اطفاء حریق برای گازهای قابل انفجار
- خنثی‌سازی مواد شیمیایی و استفاده از مواد جاذب
- حفر چال‌های گازکشی در مناطق گازخیز به منظور تخلیه گاز از بالا

۵-۳- نتیجه گیری

در این فصل مهم ترین مخاطرات زمین شناسی در نواحی کوهستانی معرفی و راهکارهای پیش بینی و مقابله با این مخاطرات توضیح داده شده است. نتایج به صورت خلاصه در جدول (۵-۱۰) ارائه شده است.

جدول (۵-۱۰) مخاطرات زمین شناسی و خلاصه ای از راهکارهای پیش بینی و مقابله با آن

مخاطرات زمین شناسی	مشکلات ناشی از مخاطرات	راهکارهای پیش بینی	راهکارهای کنترل و مقابله
برخورد با زون خرد شده و گسله	انحراف دستگاه، عدم امکان پیشروی، هجوم آب از منافذ در چین حفاری، عدم توانایی دستگاه برای گذر مطمئن از مرزهای گسله	پیشگویی لرزه ای تونل	کم کردن میزان حفاری، استفاده از اپراتورهای مجرب، تزریق مواد روان کننده برای کاهش ضریب اصطکاک بین سپر و سنگ های اطراف
ریزش و سقوط بلوک ها	گیر کردن و توقف تجهیزات انتقال و سیستم نوار نقاله، توقف کاری، کاهش نرخ پیشروی، صدمه رسیدن به دیسک ها	مطالعه خردشدگی سنگ ها، بررسی تنش در منطقه، شناسایی زون های گسله از طریق بررسی لوگ گمانه ها	کاهش دور کاترهد، استفاده از گمانه ای پیشرو، انجام عملیات پیش تزریق، گریپ نکردن در مناطق سست، حفظ تماس کاترهد با سینه کار به هنگام توقف
نشت و هجوم آب به داخل تونل	گیر کردن سپرها و کاترهد، آب گرفتگی ریل ها و تجهیزات پشتیبانی، اتصال سیستم های برقی و خطر برق گرفتگی، خشک شدن چشمه ها	روش های تحلیلی، تجربی، نیمه تجربی و عددی، اندازه گیری تراز آب زیرزمینی و نوسانات آن، بررسی پتانسیل کارست	استفاده از روش های اکتشافی مانند گمانه های پیشرو یا ژئوفیزیک، روش های پیش تزریق یا انجماد، زهکشی زون آبدار، نصب سیستم های پمپاژ برای تخلیه آب
سینه کار مختلط	شکستگی برش دهنده ها، کاهش بهره وری ماشین، انحراف دستگاه، کاهش نرخ پیش روی	استفاده از تکنیک های ژئوفیزیک و حفر ترانشه و گمانه	تغییر در آرایش دیسک های برنده و اصلاح مارپیچ انتقال مواد حفر شده در اتاقک حفاری
تورم سازندهای شیلی و مارنی	هم آمدگی فضای حفر، افزایش خطر ریزش و اعمال بار اضافی بر سیستم نگهدارنده و سپرهای دستگاه، کج شدگی سیستم نگهداری	روش های آزمایشگاهی، روش های تجربی، روش های تحلیلی، روش های عددی	طراحی پوشش نگهداری موقت و دائم با در نظر گرفتن بار ناشی از تورم مصالح رسی، انتخاب شکل مقطع حفاری مناسب
پدیده ی لهیدگی	عدم تغییرپذیری نسبی در شعاع حفاری، مشکلات حاصل از کاهش بار محوری (تراست)، دشواری کنترل جهت حرکت ماشین	تجربی، نیمه تجربی، تئوری - تحلیلی	در نظر گرفتن بار وارده در طراحی پوشش نهایی تونل، کاهش زمان توقفات ماشین، تزریق مواد روان کننده به پشت سپرها برای کاهش اصطکاک، اضافه حفاری
تشکیل گل	هدایت پذیری سخت، نرخ پیشروی پایین، تمیزکاری اضافه، افزایش نیروی تراست و گشتاور ماشین، ساییدگی دیسک ها	تجزیه و تحلیل برجا رطوبت خاک با حدود آتربرگ، تجزیه و تحلیل رابطه ی بین استحکام خاک و حالت خمیری خاک	استفاده از فوم، پلیمر و یا هردو برای کاهش دادن خصوصیت چسبندگی مصالح، تزریق هوای فشرده، اصلاح دستگاه، طراحی و انتخاب ماشین مناسب
پتانسیل کارست	ورود جریان آب به صورت گسترده و ناگهانی در خلال حفاری، تأثیر بر آبدی چشمه های مجاور، مشکل مهار دستگاه، ناپایداری سینه کار	تلفیق دور سنجی با سیستم اطلاعات جغرافیایی، روش های ژئوفیزیکی لرزه ای، الکتریکی، مغناطیسی و گرانی سنجی	حفر گمانه ای پیشرو، استفاده از اپراتور متخصص برای کنترل دستگاه
نشت گازهای سمی	سختی عملیات و کاهش کارایی، خوردگی بخش های مختلف ماشین حفار و سیستم پشتیبان، احتمال خطر انفجار و آتش سوزی	سیستم های هشداردهنده، آشکارسازهای قابل حمل، شناسایی به هنگام با انجام عملیات حفاری اکتشافی	تقویت سیستم تهویه، حفر چاه تهویه در مسیر تونل، جلوگیری از ورود آب آلوده به گاز، خنثی سازی مواد شیمیایی، استفاده از سیستم های گازسنجی دقیق

فصل ششم: ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی

توئل انتقال آب نوسود

۶-۱- مقدمه

تونل نوسود به عنوان بخشی از طرح سیستم انتقال آب رودخانه‌ی مرزی سیروان در حوضه‌ی آبریز مرزی غرب در استان‌های کرمانشاه و کردستان در حال مطالعه و اجرا می‌باشد. بر اساس سیمای طرح سیروان قرار است آب رودخانه‌ی سیروان در پایین‌دست ایستگاه دوآب پس از ذخیره‌سازی توسط یک سد، از طریق تونل ۵۰ کیلومتری نوسود به دشت ذهاب و سایر دشت‌های گرمسیری غرب کشور انتقال یابد که طول کل مسیر انتقال آب حدود ۴۶۰ کیلومتر برآورد گردیده است. ورودی تونل در منطقه‌ی نوسود - پاوه و نزدیکی روستای هیروی دارای رقوم ارتفاعی ۶۴۰ متر از سطح دریا بوده و خروجی آن در شمال سرپل ذهاب در نزدیکی روستای ازگله دارای رقوم ارتفاعی ۶۰۰ متر می‌باشد. امتداد تونل در جهت شمال شرق به جنوب غرب و موازی مرز ایران و عراق بوده و در مسیر خود رودخانه‌های مره‌خیل، ليله، زمكان و کردی‌قاسمان (آب زرشک) را قطع می‌کند و قرار است بخشی از آب این رودخانه‌ها نیز توسط تونل مذکور دریافت و منتقل گردد. تونل نوسود در تمامی مسیر از زیر کوه‌های بلند مرز ایران و عراق عبور می‌کند و تنها در دره‌های ليله و مره‌خیل به سطح زمین می‌رسد. منطقه‌ای از طول تونل با حدود تقریبی ۲۶ کیلومتر در حد فاصل بین رودخانه‌ی ليله تا خروجی تونل در روستای ازگله به قطعه دوم تونل نوسود موسوم است که منطقه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق قسمتی از قطعه‌ی دوم تونل نوسود می‌باشد. موسسه مهندسی رهاب از قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیا (قرب قائم) به عنوان

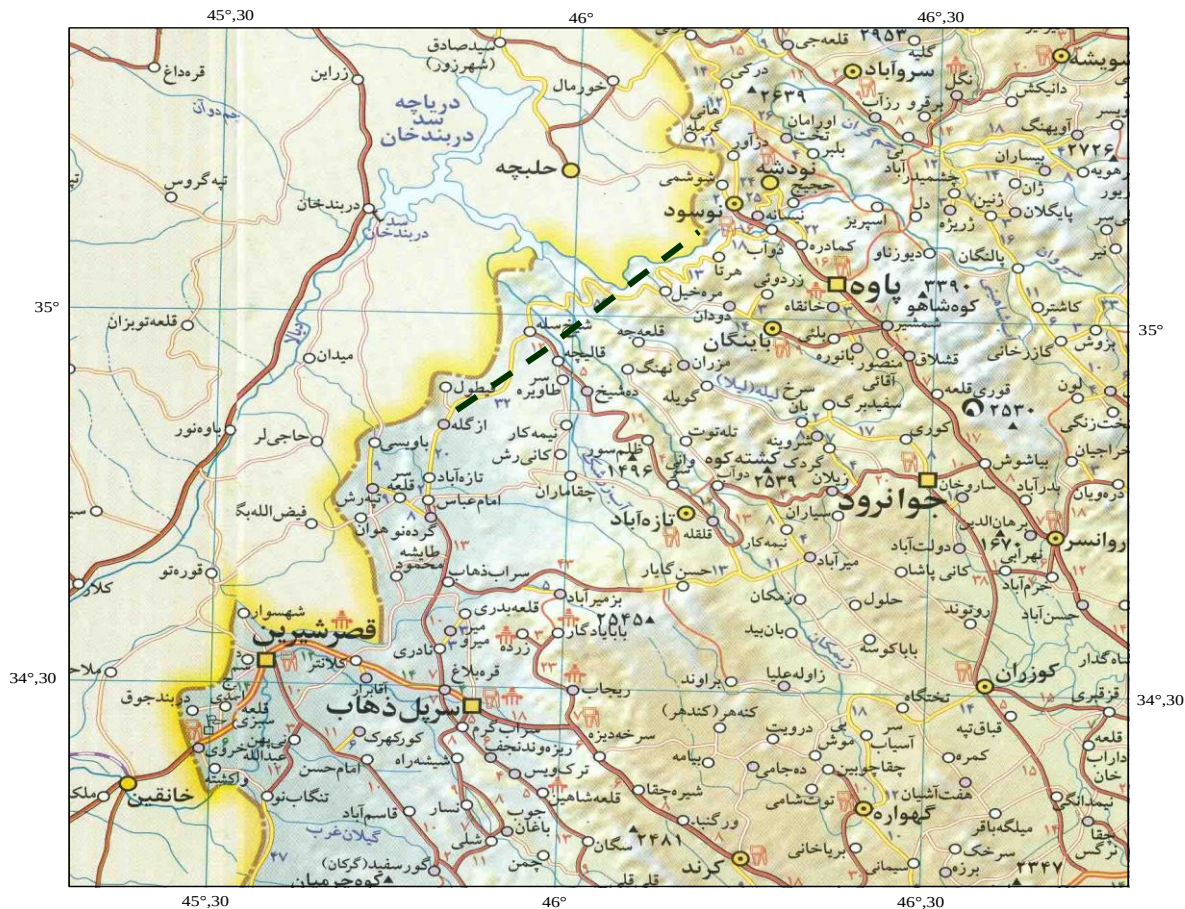
پیمان کار طرح و اجرا در این قطعه انتخاب گردیده است (اخیراً به موسسه فاطر واگذار شده است). عملیات اجرایی در این قطعه به روش حفاری مکانیزه با دستگاه TBM با سپر دوگانه (تلسکوپی) با قطری معادل ۶/۷۳ متر حفاری شده که قطر تمام شده ی تونل پس از نصب قطعات بتنی (سگمنت) به ۶ متر تقلیل می یابد.

در این فصل با بررسی منطقه ی مورد مطالعه، زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی تونل، ریسک های زمین شناسی تونل سازی مکانیزه در تونل نوسود با استفاده از روش های شباهت به گزینه ی ایده آل فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی رتبه بندی شده است.

۶-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه و راه های دسترسی به منطقه

دسترسی به منطقه از مسیر جاده ی کرمانشاه - سرپل ذهاب - ازگله و یا مسیر جاده روانسر - جوانرود امکان پذیر است. این دسترسی در مورد نقاط ابتدا و انتهای تونل به راحتی از طریق جاده های آسفalte میسر است اما در مورد نقاط میانی مسیر تونل به ویژه دره های ليله و زمكان و مناطق حد فاصل ازگله تا رودخانه زمكان دسترسی به محور تونل دشوار است [۲۲۲].

دسترسی به بخش ابتدایی محدوده از طریق جاده ی آسفalte ازگله به جوانرود و راه های خاکی روستاهای منطقه (ژاله کوسه، پشت اسپر، بانه گار) امکان پذیر است. همچنین برای دسترسی به بخشی از ابتدای مسیر، راه آسفalte ازگله به شیخ صله (جاده سنتو) و راه خاکی حد فاصل بین روستای بانه گار به روستای پشت اسپر به طول تقریبی ۵-۶ کیلومتر قابل استفاده است. برای دسترسی به قسمت های میانی مسیر می توان از راه خاکی که از حوالی روستای نیمه کار منشعب شده و تا نزدیکی روستای قالیچه ادامه دارد استفاده شود. قسمت های انتهایی مسیر از طریق جاده های خاکی روستاهای هماجگه و بانی لوان قابل دسترسی می باشد. نقشه ی موقعیت جغرافیایی منطقه و مسیر تونل و راه های دسترسی به منطقه در شکل (۶-۱) ارائه شده است [۲۲۳].



شکل (۶-۱) موقعیت کل مسیر تونل نوسود (خط چین سیاه رنگ) و راه‌های اصلی مرتبط با آن [۲۲۴]

۶-۳- زمین‌شناسی عمومی منطقه‌ی مورد مطالعه

مسیر تقریباً ۲۶ کیلومتری تونل انتقال آب نوسود از نظر تقسیم‌بندی زمین‌شناسی، در ناحیه لرستان کمر بند چین خورده - رانده زاگرس قرار دارد. از آنجا که منطقه‌ی مورد بررسی در این ناحیه قرار گرفته است، انتظار می‌رود که واحدهای سنگ‌شناسی آن از جنس واحدهای سنگی این بخش از زاگرس باشد. واحدهای سنگی موجود در مسیر تونل شامل واحدهای شیلی و آهک رسی از سازندهای پابده و گورپی مربوط به زمان‌های کرتاسه پسین و ترسیر پیشین (واحدهای PE_{Pd}^8 تا K_{Gu}^1) و لایه‌های عمدتاً آهکی کرتاسه می‌باشند (واحدهای K11 تا K15)، همچنین قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی در مسیر تونل، واحدهای تبخیری ژوراسیک می‌باشند (واحدهای J1، J2، J3)، که در جدول (۶-۱) ارایه شده است [۲۲۳].

جدول (۶-۱) واحدهای سنگی شناسایی شده در گستره‌ی مورد بررسی و ضخامت هر یک از آنها [۲۲۳]

نام سازند	نام واحد	توصیف سنگ‌شناسی
سازند پایده	واحد PE_{Pd}^8	تناوب آهک‌های رسی خاکستری روشن نازک لایه و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت کم (تا ۳۰ سانتیمتر)
	واحد PE_{Pd}^7	تناوب آهک‌های رسی خاکستری روشن ضخیم تا نازک لایه (۱ متر تا ۳۰ سانتیمتر) و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (۱ تا ۲ متر)
	واحد PE_{Pd}^6	تناوب آهک‌های رسی خاکستری روشن نازک تا متوسط لایه (۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر) و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (تا ۱۰ متر)
	واحد PE_{Pd}^5	تناوب آهک‌های رسی خاکستری روشن نازک لایه و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت کم (تا ۳۰ سانتیمتر)
	واحد PE_{Pd}^4	شیل خاکستری مایل به سبز با ضخامت زیاد و میان لایه‌های سیلت و ماسه سبز زیتونی و آهک ماری خاکستری نازک لایه
	واحد PE_{Pd}^{4a}	تناوب آهک‌های رسی خاکستری روشن نازک تا متوسط لایه (۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر) طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (۱ تا ۲ متر)
	واحد PE_{Pd}^3	تناوب آهک‌های رسی خاکستری روشن متوسط تا ضخیم لایه و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (۱ متر)
	واحد PE_{Pd}^2	تناوب آهک‌های رسی خاکستری روشن متوسط تا ضخیم لایه و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت کم تا متوسط (تا ۵۰ سانتیمتر)
مرز مشکوک پایده و گورپی	واحد PE_{Pd}^1	تناوب آهک شیلی خاکستری روشن ضخیم لایه و طبقات شیلی با ضخامت زیاد (تا ۱ متر)
سازند گورپی	واحد K_{Gu}^{5a}	تناوب شیل آهکی خاکستری و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (تا ۲ متر)
	واحد K_{Gu}^5	تناوب آهک رسی خاکستری روشن متوسط لایه و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (تا ۲ متر)
	واحد K_{Gu}^4	تناوب شیل آهکی خاکستری روشن ضخیم لایه و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (تا ۱ متر)
	واحد K_{Gu}^3	تناوب شیل آهکی خاکستری روشن متوسط لایه و طبقات شیلی خاکستری تیره با ضخامت زیاد (تا ۲ متر)
	واحد K_{Gu}^{2a}	شیل خاکستری تیره با ضخامت زیاد (تا ۱۰ متر) و بین لایه‌های سیلتی و رسی قهوه‌ای متوسط تا ضخیم لایه (۵/۰ تا ۲ متر)
	واحد K_{Gu}^2	شیل خاکستری تیره با ضخامت بسیار زیاد (تا ۱۰ متر) و بین لایه‌های ماسه‌سنگی سبز تیره با سطح هوازدۀ قهوه‌ای متوسط تا ضخیم لایه (۵/۰ تا ۲ متر)
	واحد K_{Gu}^1	تناوب سنگ آهک رسی خاکستری روشن نازک لایه و طبقات شیلی با ضخامت زیاد
واحدهای کریناته کر تاسه	واحد $Ki(Kl_5)$	سنگ آهک رسی خاکستری متوسط لایه با رگه‌های چرت رادیولاریتی خاکستری تیره
	واحد Kl_4c	سنگ آهک خاکستری تیره ستبر و صخره ساز
	واحد Kl_4b	سنگ آهک خاکستری تیره نازک تا متوسط لایه با رگه‌هایی از چرت رادیولاریتی خاکستری
	واحد Kl_4a	سنگ آهک خاکستری تیره ستبر و صخره ساز
		سنگ آهک خاکستری تیره که در بالا و کف آن سنگ آهک خاکستری ستبر و صخره ساز قرار گرفته است
	واحد Kl_3	سنگ آهک رسی خاکستری نازک تا متوسط لایه
	واحد Kl_2	سنگ آهک رسی خاکستری تیره ستبر و صخره ساز
	واحد Kl_1	سنگ آهک رسی خاکستری متوسط تا نازک لایه
	واحد J_3	تناوب آهک رسی خاکستری روشن ضخیم لایه و طبقات شیلی با ضخامت زیاد (تا ۱ متر)
	واحد J_2	سنگ آهک خاکستری تیره ستبر و صخره ساز
واحدهای زوراسیک	واحد J_1	تناوب سنگ آهک نازک تا متوسط لایه و طبقات ضخیم شیل و سنگ گچ نازک تا متوسط لایه

تکتونیک فعال زاگرس در زمان کرتاسه سبب شده است که در عمق و گسترش حوضه‌های رسوبی تغییرات زیادی ایجاد شود، به نحوی که ضخامت واحدهای سنگی چین‌های و گسترش جانبی رخساره‌های مختلف دچار تغییرات زیادی شده است. نمونه‌ای از تغییر رخساره در گستره‌ی مورد بررسی مابین واحد PE_{Pd}^{4a} در شمال خاور (شمال شرقی) و واحدهای PE_{Pd}^4 و PE_{Pd}^3 در جنوب باختر (جنوب غربی) می‌باشد که ارتباط بین انگشتی دارند، بدین معنی که به تدریج رخساره‌ی آهکی - شیلی واحدهای PE_{Pd}^4 و PE_{Pd}^3 به رخساره‌ی آهکی - ماسه‌سنگی تبدیل می‌شود. این تغییر رخساره به تغییرات جانبی رسوب‌گذاری در حوضه‌ی رسوب‌گذاری سازند پابده مرتبط می‌باشد. همچنین واحد K_{Gu}^2 که در پهلوی پیشانی تاقدیس ازگله دارای سنگ‌شناسی شیلی و ماسه‌سنگی می‌باشد در پهلوی خلفی این تاقدیس، لیتولوژی مارنی و شیلی دارد و K_{Gu}^{2a} نام‌گذاری شده است. واحد K_{Gu}^5 نیز که در جنوب باختری گستره‌ی مورد بررسی لیتولوژی شیلی و آهک رسی دارد، به سمت شمال خاور افزایش ضخامت داشته و لیتولوژی آن به تناوب شیل و شیل آهکی تغییر می‌نماید که K_{Gu}^{5a} نام‌گذاری شده است [۲۲۳].

گستره‌ی مورد بررسی تحت تأثیر حرکات تکتونیکی جوان زاگرس چین‌خورده و گسل‌خورده است. ساختارهای موجود در گستره‌ی مورد بررسی را می‌توان به دو دسته‌ی ساختارهای اصلی و ساختارهای فرعی طبقه‌بندی نمود. عمده چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های موجود در پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل، ساختارهایی اصلی محسوب می‌شوند. ساختارهای فرعی شامل گسل‌های کوچک دارای جابجایی در حد چند متر (بیشتر در واحدهای سازند پابده دیده می‌شوند)، گسل‌های نرمال و رگه‌های کلسیتی موجود در لایه‌های سازند گورپی می‌باشند. ساختارهای اصلی منطقه مورد بررسی شامل گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها می‌باشند. چین‌های موجود در واحدهای آهکی منطقه دارای طول موج طویل‌تری بوده و ساختارهای بزرگ‌تری را تشکیل داده‌اند در حالی که چین‌های موجود در سازندهای شکل‌پذیرتر پابده و گورپی دارای دامنه و طول موج کوتاه‌تری می‌باشند [۲۲۳].

چین خوردگی‌های موجود در منطقه شامل ۸ تاقدیس و ۹ ناودیس می‌شوند. گسل‌ها و پهنه‌های گسله گستره‌ی مورد بررسی شامل ۵ گسل امتدادلغز، ۳ گسل معکوس با جهت شیب به سمت جنوب باختر و ۱۳ گسل معکوس با جهت شیب به سمت شمال خاور و ۲ پهنه‌ی گسله معکوس می‌باشند [۲۲۳].

۶-۴- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

۶-۴-۱- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در مطالعات صحرایی، همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، توده‌های سنگی مسیر تونل به واحدهای مختلف تقسیم خواهد شد. مبنای تفکیک این واحدها، تفاوت خصوصیات لیتولوژیک لایه‌ها و تفاوت‌های ساختاری و در نتیجه خصوصیات ژئومکانیکی واحدها است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه مبنای تفکیک واحدهای زمین‌شناسی تفاوت‌های لیتولوژیک بوده است، می‌توان این واحدها را به عنوان مجموعه‌های سنگ‌شناسی^۱ در نظر گرفت. مجموعه‌های لیتولوژیکی دارای ترکیب، ساخت و بافت کاملاً همگن است ولی معمولاً حالت فیزیکی یکنواختی ندارد. از این رو مرز واحدهای زمین‌شناسی مهندسی عملاً بر مرز واحدهای زمین‌شناسی منطبق می‌باشد. واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در برش زمین‌شناسی مهندسی با علائمی مشخص می‌گردد که از حروف آغازین لیتولوژی آن مجموعه تشکیل می‌شود. این علائم شامل: LI نشانه‌ی Limestone (سنگ آهک)، SH نشانه‌ی Shale (شیل)، MA نشانه‌ی Marl (مارن)، LS نشانه‌ی Limy Shale (شیل آهکی)، ML نشانه‌ی Marly Limestone (آهک شیلی)، CZ نشانه‌ی Crushed Zone (پهنه‌ی خرد شده و گسله) و FZ نشانه‌ی Fractured Zone (پهنه‌ی شکسته‌شده) است. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته در مراحل مختلف و با در نظر گرفتن تکرار واحدها در قسمت‌های مختلف، مجموعاً در محدوده‌ی قطعه دوم تونل نوسود، ۲۱ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تفکیک است. خصوصیات این واحدها در جدول (۶-۲) به طور خلاصه ارائه شده است [۲۲۳].

1- Lithologic Assemblies

جدول (۶-۲) مجموعه‌های لیتولوژیکی شناسایی شده در مسیر تونل [۲۲۳]

ردیف	واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد چینه‌شناسی	توصیف
۱	SH-ML1	PE_{pd}^{4a}	نسبتاً ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۲	SH-ML2		بسیار ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و ناپایدار
۳	SH-ML3	PE_{pd}^6	بسیار ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و ناپایدار
۴	ML-SH1	PE_{pd}^5	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۵	ML-SH2	PE_{pd}^7	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه‌بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۶	ML-SH3	PE_{pd}^8	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه‌بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۷	ML-SH4	PE_{pd}^3	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۸	ML-SH5	PE_{pd}^2	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۹	SH-LS1	K_{Gu}^5, K_{Gu}^{5a}	نسبتاً ضعیف، لایه بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۱۰	SH-LS2	K_{Gu}^4	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۱۱	SH-LS3	K_{Gu}^3	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۱۲	SH-LS4	$K_{Gu}^{2a}, K_{Gu}^2, K_{Gu}^1$	ضعیف تا نسبتاً مقاوم، لایه بندی متوسط، شکسته شده، احتمالاً ناپایدار
۱۳	LI2	Ki	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۴	LI3	Kl4	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۵	LI4	Kl3	نسبتاً ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۱۶	LI5	Kl2-Kl1	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۷	LI6	J2	نسبتاً مقاوم، نسبتاً ضخیم لایه، نسبتاً خرد شده، پایدار
۱۸	LI-MA	J3	نسبتاً ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۱۹	LI-SH	J1	نسبتاً ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و تقریباً ناپایدار
۲۰	CZ	-	زون خرد شده گسلی
۲۱	FZ	-	بسیار ضعیف، لایه‌بندی نازک، شکسته شده و ناپایدار

۶-۴-۲- تشریح ویژگی‌های توده سنگ‌های مسیر تونل

واحدهای ابتدایی مسیر، خصوصاً واحدهایی که در سازند پابده واقع شده‌اند بیشتر شامل واحدهای متشکل از آهک، شیل و آهک رسی می‌باشند که بر اساس میزان شیل یا آهک موجود در آنها به واحدهای

مختلفی تفکیک شده‌اند. واحدهایی که دارای میزان رس و شیل بیشتری هستند یا دارای لایه‌بندی نازک‌تر و یا دارای تورق (شیل‌ها) می‌باشند باعث کاهش خصوصیات مهندسی توده‌های سنگی این واحدها گردیده است. همچنین به دلیل وجود کانی‌های رسی در ترکیب سنگ‌های تشکیل دهنده‌ی این واحدها نسبت به واحدهای دارای آهک، دارای خصوصیات مقاومتری ضعیف‌تری می‌باشند. واحدهای ML-SH2، ML-SH4، ML-SH5 که دارای درصد آهک بیشتری در ترکیب سنگ‌های خود می‌باشند، وضعیت مقاومتری بهتری را دارا هستند [۲۲۳].

به لحاظ توپوگرافی محدوده‌ی مورد مطالعه به دو بخش مشخص قابل تفکیک می‌باشد. بخش نخست به دلیل عدم مقاومت زیاد تحت تأثیر عوامل فرسایشی قرار گرفته و ریخت‌شناسی تپه ماهوری (تپه‌ی واقع در دامنه‌ی کوه‌ها) را ایجاد نموده است که این بخش از تونل بیشتر در واحدهای سازند پابده و گورپی واقع شده است و بخش دوم که دارای توپوگرافی خشن و نسبتاً مرتفعی می‌باشد، از واحدهای عمدتاً آهکی سازندهای کرتاسه و ژوراسیک تشکیل یافته است [۲۲۳].

در بخش کم ارتفاع و دارای توپوگرافی ملایم مسیر (تا بعد از روستای قالیچه) رخنمون‌های آهکی سازند ایلام در دو تاقدیس در روستای ژاله کوسه و نزدیکی روستای اسماعیل آقا رخنمون پیدا می‌کنند. این واحدها که از آهک‌های متوسط لایه تشکیل شده‌اند با توجه به خصوصیات مقاومتی سنگ بکر و همچنین ناپیوستگی‌های موجود در این واحدها، دارای وضعیت نسبتاً مناسبی هستند. با این وجود به دلیل قرارگیری این واحدها در ساختار تاقدیسی و همچنین وجود برخی گسل‌ها در این واحدها، به لحاظ وضعیت آب زیرزمینی در این بخش از تونل مشکلاتی بروز خواهد کرد. همچنین به دلیل مجاورت این آهک‌ها با شیل‌های حاوی مواد نفتی با نفوذپذیری بالا، سبب شده تا مقادیر زیادی مواد آلی و گاز در این آهک‌ها وجود داشته باشند که حضور این گازها هم به لحاظ ایمنی و هم به لحاظ مشکلات اجرایی مخاطره‌آمیز خواهد بود [۲۲۳].

با ورود به محدوده دارای توپوگرافی خشن (بعد از روستای قالیچه تا خروجی تونل)، عمده‌ی لیتولوژی تشکیل‌دهنده‌ی مسیر تونل شامل سنگ آهک می‌شود. بر اساس ضخامت لایه‌های آهکی همچنین وجود برخی

ناخالصی‌ها، آهک‌های این بخش از مسیر با نام واحدهای LI2, LI3, LI4, LI5 و LI6 قابل تفکیک می‌باشند. البته در هسته‌ی تاقدیس زیرمکان (روستای هماغه) رخنمون‌هایی از واحدهای شیلی، مارنی و حتی تبخیری به چشم می‌خورد که این واحدها نیز به صورت واحدهای LI-MA و LI-SH جدا شده‌اند. به طور کلی واحدهای آهکی این بخش از مسیر به لحاظ پارامترهای مقاومتی دارای وضعیت مناسبی می‌باشند (به غیر از زون‌های خرد شده و گسله) ولی به لحاظ وضعیت آب زیرزمینی و حفره‌دار بودن دارای پتانسیل خطر می‌باشند [۲۲۳].

واحدهای شیلی و تبخیری موجود در قسمت‌های انتهایی مسیر دارای کیفیت ضعیف توده سنگ می‌باشند. همچنین در محل محور تاقدیس نیز به دلیل خرد شدگی توده‌های سنگی و وجود زون‌های گسله متعدد واحدهای موجود دارای کیفیت بسیار پایینی می‌باشند. زون‌های گسله مسیر تونل دارای پایین‌ترین کیفیت توده سنگ هستند. این واحدها با توجه به RQD بسیار پایین و ناپیوستگی‌های بسیار ضعیف دارای بیشترین پتانسیل ریزش، هجوم آب زیرزمینی، لهیدگی و ... می‌باشند. شکل (۶-۲) نمایی از واحد شیلی مسیر تونل نوسود را نشان می‌دهد [۲۲۳].

همچنین با توجه به چین‌خورده بودن لایه‌های سنگی مسیر تونل در محل تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موجود به دلیل گسترش بیشتر شکستگی‌های سیستماتیک کیفیت توده سنگ کاهش می‌یابد. در چنین زون‌هایی احتمال ناپایداری‌های ساختاری و هجوم آب زیرزمینی افزایش می‌یابد [۲۲۳].



شکل (۶-۲) نمایی از واحد شیلی SH-LS3 [۲۲۳]

۶-۵- بررسی چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود

با توجه به بررسی نتایج حاصل از آزمایش روی نمونه‌های حاصل از حفاری، احتمال وقوع هر یک از این چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی تونل نوسود تعیین می‌گردد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق به منظور درک مناسب از شرایط مسیر قطعه‌ی دوم تونل نوسود، متر اژ ۰۰+۰۰۰ تا ۱۳+۲۹۰ طبق هیدروژئولوژی مسیر تونل به ۱۹ پهنه تقسیم شده است که در جدول (۶-۳) آمده است. در تفکیک و تعیین این پهنه‌ها معیارهایی چون تغییرات لیتولوژیک، تغییرات نفوذپذیری با توجه به مقدار لوژان در گمانه‌ها، تغییرات ارتفاع هیدرواستاتیکی آب زیرزمینی و غیره مد نظر قرار گرفته است.

جدول (۶-۳) پهنه‌بندی مسیر تونل بر اساس هیدروژئولوژی

شماره‌ی پهنه	نام پهنه	متر اژ پهنه	
		از کیلومتر	تا کیلومتر
۱	P1	۰۰+۰۰۰	۰۰+۷۵۵
۲	P2	۰۰+۷۵۵	۰۲+۰۱۵
۳	P3	۰۲+۰۱۵	۰۲+۰۷۰
۴	P4	۰۲+۰۷۰	۰۲+۲۶۵
۵	g1	۰۲+۲۶۵	۰۳+۷۱۵
۶	Ki1	۰۳+۷۱۵	۰۴+۰۰۰
۷	Ki2	۰۴+۰۰۰	۰۴+۷۱۵
۸	Ki3	۰۴+۷۱۵	۰۴+۷۳۵
۹	Ki4	۰۴+۷۳۵	۰۴+۹۵۰
۱۰	g2	۰۴+۹۵۰	۰۵+۸۵۵
۱۱	P5	۰۵+۸۵۵	۰۶+۱۱۰
۱۲	g3	۰۶+۱۱۰	۰۷+۲۳۵
۱۳	P6	۰۷+۲۳۵	۰۷+۳۵۰
۱۴	P7	۰۷+۳۵۰	۰۷+۳۷۰
۱۵	g4	۰۷+۳۷۰	۰۹+۴۱۵
۱۶	g5	۰۹+۴۱۵	۰۹+۹۱۰
۱۷	g6	۰۹+۹۱۰	۱۱+۷۱۵
۱۸	P8	۱۱+۷۱۵	۱۲+۲۰۵
۱۹	g7	۱۲+۲۰۵	۱۳+۲۹۰

۶-۵-۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله

محدوده‌ی مورد مطالعه در یک زون چین‌خورده و گسله واقع شده است و در مسیر تونل چند گسل شناسایی شده است که زون‌های خرد شده‌ای را در اطراف خود ایجاد نموده‌اند. زون‌های خرد شده ایجاد شده در سنگ‌های شیلی و شیل‌های آهکی دارای پهنای تقریبی ۲۰ الی ۲۵ متر می‌باشند. خرد شدگی توده‌های سنگی زون‌های گسله موجود در واحدهای آهکی نسبت به واحدهای شیلی مشخص‌تر است. بدین معنی که شکل‌پذیری بیشتر واحدهای شیلی باعث شده تا اثر گسل‌ها به صورت درهم پیچیده شدن لایه‌ها، ریزچین‌های بسیار و گسله‌های کوچک فراوان خود نمایی کند، در حالی که در واحدهای آهکی و آهک رسی، گسل‌ها باعث به وجود آمدن زون‌های خرد شده دارای شکستگی‌های فراوان و مشخص شده است که این زون‌های خرد شده معمولاً دارای پهنای بیشتری نسبت به واحدهای شیلی هستند. نفوذپذیری واحدها هم در سطوح گسله و هم در محدوده‌ی زون‌های خرد شده بالاست. از دیگر خصوصیات زون‌های خرد شده در واحدهای آهکی پرشدگی آهکی ناپیوستگی‌هاست که اکثراً مورد انحلال و شستشو قرار گرفته‌اند. گسترش زون خرد شده باعث گردیده است تا ناپیوستگی‌های مختلفی با خصوصیات هندسی متفاوتی توده‌های سنگی را تحت تأثیر قرار دهند. عملکرد این گسله‌ها باعث کاهش RQD و افزایش بازشدگی درزه‌ها، همچنین به وجود آمدن ظاهر کاملاً به هم ریخته در توده‌های سنگی اطراف شده است. خرد شدگی سنگ‌ها در زون‌های گسله می‌تواند ضمن زهکش نمودن آب‌های زیرزمینی به سمت تونل، ریزش‌هایی را در تونل باعث گردد. شکل (۶-۳) مرز گسله‌ی بین دو واحد زمین‌شناسی مهندسی را نشان می‌دهد.

در برخی قسمت‌های مسیر تونل، به دلیل چین‌خوردگی شدید لایه‌ها در محل محور چین‌ها شاهد تمرکز شکستگی‌ها و سیستم‌های ناپیوستگی خواهیم بود که نسبت به سایر قسمت‌ها توده‌های سنگی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. این زون‌ها به دلیل افزایش محسوس شکستگی‌ها تحت عنوان زون‌های شکستگی نام‌گذاری می‌شوند. تفاوت این زون‌های شکستگی با زون‌های خرد شده گسلی در این است که در زون‌های گسلی به دلیل

خرد شدگی و به هم ریختگی شدید لایه‌ها، عمدتاً ناپیوستگی‌ها دارای حالت سیستماتیک نمی‌باشند و در جهات مختلف توده سنگ را متأثر نموده‌اند در حالی که در زون‌های شکسته شده با وجود فراوانی شکستگی‌ها نسبت به اطراف، ناپیوستگی‌ها حالت سیستماتیک دارند و می‌توان سیستم‌های مختلف ناپیوستگی را شناسایی نمود. خصوصیات این زون‌ها با توجه به توده سنگ در برگیرنده و ناپیوستگی‌های موجود تعیین می‌گردد. چنین زون‌هایی شدیداً دارای پتانسیل ریزش می‌باشند. لازم به ذکر است احتمال وقوع ریزش‌های ساختاری هم در این زون‌ها وجود دارد. به لحاظ شرایط آب زیرزمینی نیز چنین زون‌هایی دارای پتانسیل ورود آب به درون تونل می‌باشند. البته در برخی نقاط بین دو زون گسله مجاور نیز محدوده‌هایی قرار دارد که به دلیل افزایش شکستگی ناشی از نزدیکی با دو زون گسله، به صورت زون شکسته‌شده نام‌گذاری شده‌اند. جدول (۴-۶) مشخصات زون‌های خرد شده و شکسته‌شده محدوده‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول شماره (۴-۶) مشخصات زون‌های خرد شده و شکسته شده مسیر تونل [۲۲۳]

مکانیسم خردشدگی	ضخامت در امتداد تونل (متر)	موقعیت تقریبی در مسیر تونل (متر)		زون خرد شده	شماره
		شروع	پایان		
گسل راندگی	۲۵	۶۱۵	۶۴۰	CZ	۱
زون گسلی رورانده	۱۰۰	۱۹۷۰	۲۰۷۰	CZ	۲
چین خوردگی در هسته ناودیس	۲۹۰	۲۷۸۰	۳۰۷۰	FZ	۳
گسل راندگی	۴۰	۴۷۲۰	۴۷۶۰	CZ	۴
گسل راندگی	۳۰	۶۰۹۵	۶۱۲۵	CZ	۵
زون شکستگی بین دو زون گسله	۱۰۰	۶۱۲۵	۶۲۲۵	FZ	۶
گسل راندگی	۳۰	۶۴۱۲	۶۴۴۲	CZ	۷
گسل راندگی	۴۰	۷۳۳۰	۷۳۷۰	CZ	۸
گسل راندگی	۳۰	۹۶۸۰	۹۷۱۰	CZ	۹
گسل راندگی	۱۰	۱۰۷۹۰	۱۰۸۰۰	CZ	۱۰



شکل (۳-۶) مرز گسله‌ی بین واحد SH-ML1 و ML-SH1 [۲۲۳]

۶-۵-۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی

در محدوده‌ی مورد مطالعه با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های مسیر تونل احتمال هر دو پدیده وجود دارد. در مجموع عملکرد ناپیوستگی‌ها در توده سنگ‌های مسیر تونل سبب شده است که دو مکانیسم گسیختگی متفاوت در مسیر تونل پتانسیل وقوع داشته باشد.

در واحدهای CZ به علت به هم ریختگی ساختاری واحدها، وجود درزه‌های فراوان سیستماتیک و غیر سیستماتیک با فاصله‌داری کم و لایه‌بندی نازک در توده سنگ، پتانسیل گسیختگی‌های ساختاری در توده سنگ محتمل نیست و بلوک‌های تشکیل شده بسیار کوچک هستند بنابراین ریزش‌های غیر ساختاری و روانه‌های گلی (روان شدن خاک و سنگ اشباع‌شده از آب در یک سراسیب) در این بخش‌ها از پتانسیل وقوع بیشتری برخوردار می‌باشند. در توده‌هایی با این شرایط تعیین جهت‌داری ناپیوستگی‌ها تقریباً بی‌معنی می‌باشد و موقعیت قرارگیری طرح از دیدگاه ساختار موجود در توده سنگ اهمیت چندانی ندارد. در لایه‌های ضخیم‌تر که دارای درزه‌های سیستماتیک می‌باشند به دلیل تشکیل بلوک‌های سنگی که ابعاد آنها با توجه به ضخامت لایه‌ها و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها متفاوت است، احتمال وقوع پدیده سقوط بلوک‌های سنگی وجود دارد.

با توجه به اینکه ماشین حفار مورد استفاده در این پروژه دارای سپر دوگانه بوده و با فاصله اندکی از سینه کار تونل قطعات بتنی را نصب می‌کند، قاعدتاً این دو پدیده در حالت عادی نمی‌توانند مشکلی را در حفاری تونل ایجاد نمایند.

پدیده‌ی اول هنگامی که توده سنگ خرد شده دارای گسترش زیادی بوده و حجم زیادی از مصالح خرد شده به صورت روباره اضافی بر روی دستگاه می‌ریزد می‌تواند باعث گیرافتادن دستگاه شود. چنین حالتی فقط در زون‌های خرد شده‌ای که زمان ایستایی بسیار کمی دارند قابل پیش‌بینی است. برای بقیه‌ی مسیر تونل با توجه به اینکه حجم زون‌های خرد شده قابل توجه نخواهد بود، احتمال بروز مشکل برای حرکت TBM ناچیز است. زمان ایستایی اندک توده سنگ 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. پیشروی ماشین در زون‌های گسله بدون پیش‌بینی تمهیدات لازم و عملیات تحکیم سبب گیر افتادن دستگاه خواهد شد.

لازم به ذکر است که زون‌های خرد شده بزرگ‌تر و با پهنای زیاد پتانسیل بیشتری را برای ریزش‌های غیر ساختاری دارا می‌باشند. همان‌گونه که در جدول (۴-۶) می‌توان مشاهده نمود، زون‌های خرد شده با گسترش زیاد (مانند کیلومترهای ۴/۷، ۷/۳) می‌توانند از این لحاظ مورد توجه خاص قرار گیرند. زون‌های شکسته شده FZ که دارای گسترش بیشتری نسبت به زون‌های CZ دارا می‌باشند نیز از این لحاظ باید مورد توجه قرار گیرند، البته چنین زون‌هایی بیشتر دارای پتانسیل ریزش‌های ساختاری می‌باشند.

در این تحقیق از روش اتریشی نیز برای تحلیل پایداری تونل و تأثیر رفتار توده سنگ بر عملکرد TBM در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شده است. در این روش، بر اساس طبقه‌بندی‌های RMR و Q توده‌های سنگی به هفت گروه تقسیم می‌شود که در جدول (۵-۶) ارائه شده است. نتایج طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ برای واحدهای مختلف مسیر تونل که شامل ۱۵ واحد می‌باشد در جدول (۶-۶) آمده است.

جدول (۵-۶) پیش‌بینی وضعیت پایداری تونل به روش اتریشی [۲۲۵]

رتبه و طبقه	تغییرات تقریبی Q	تغییرات تقریبی RMR	رفتار توده سنگ
F1	۱۰-۱۰۰	۶۵-۸۰	پایداری درازمدت
F2	۴-۱۰	۵۹-۶۵	ریزش موضعی
F3	۱-۴	۵۰-۵۹	ریزش مکرر سنگ در محل سر ماشین
F4	۰/۱-۱	۳۵-۵۰	ریزش مکرر سنگ در محل سر ماشین
F5	۰/۰۴-۰/۱	۲۷-۳۵	ریزش مکرر سنگ در محل سر ماشین بعد از هر مرحله پیشروی
F6	۰/۰۱-۰/۰۴	۲۰-۲۷	خردشدگی بیش از حد در محل سر ماشین بعد از هر مرحله پیشروی
F7	۰/۰۰۱-۰/۰۱	۵-۲۰	فاقد رفتار خود نگهدار

جدول (۶-۶) نتایج طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ برای واحدهای مختلف [۲۲۳]

شماره	واحد	RQD (%)	RMR	RMR اصلاح شده	Q	GSI	RMi	RSR
1	SH-ML1	50-75	45-50	35-40	3-3.5	35-45	0.5-1.5	37
2	SH-ML2	50-75	40-45	30-35	1.5-2	25-35	0.5-1	28
3	SH-ML3	50-75	40-50	30-40	2-2.5	40-45	1-2	38
4	ML-SH1	75-90	60-65	50-55	6-6.5	40-55	8-12	54
5	ML-SH2	50-75	45-50	35-40	2.5-3	45-50	2.5-3.5	46
6	ML-SH3	50-75	45-50	35-40	2-2.5	35-45	2-2.5	40
7	ML-SH4	50-75	50-55	40-45	3.5-4	40-45	4.5-5.5	45
8	ML-SH5	75-90	60-65	50-55	5-6	40-55	8-12	52
9	SH-LS1	50-75	40-45	30-35	2-3	35-40	0.5-1.5	37
10	SH-LS2	50-75	45-50	35-45	4-4.5	40-45	2.5-3	39
11	SH-LS3	50-75	45-50	35-40	2.5-3	35-40	1-2	37
12	SH-LS4	75-90	40-50	35-45	1.5-2	40-45	1-2	40
13	LI2	75-90	55-65	45-55	4-5	55-60	6-7	54
14	FZ	25-50	30-40	20-30	1-2	25-30	0.5-1	32
15	CZ	5-25	20-30	18-25	0.5-1	15-25	0.25-0.75	26

طبق نتایج طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ برای واحدهای مختلف و ارتباط آن با روش اتریشی می‌توان نتیجه گرفت که واحدهای CZ و FZ از پتانسیل بیشتری برای ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی برخوردار می‌باشند. البته در واحدهای SH-ML2، SH-ML3، SH-LS1 و SH-LS4 نیز احتمال برخورد با این مخاطره به میزان کمتری وجود دارد که باید مد نظر قرار گیرد.

۶-۵-۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل

واحدهای شیلی، مارنی سازندهای پابده و گورپی که بخش عمده‌ای از مسیر مورد مطالعه را تشکیل داده‌اند به عنوان واحدهای غیر قابل نفوذ یا با نفوذپذیری کم عمل می‌کنند (به دلیل نفوذناپذیری ذاتی سنگ و بسته بودن درزه‌ها در عمق) و با توجه به عدم وجود پتانسیل توسعه کارست در آنها به نظر می‌رسد احتمال زهکش آب از طریق آنها به داخل تونل اندک باشد. نتیجه‌ی تست‌های لوژان انجام شده در این سنگ‌ها مطلب فوق را تأیید می‌نماید. بنابراین انتظار می‌رود در حالت معمولی احتمال هجوم حجم غیر قابل کنترل آب در این واحدها منتفی باشد. با این حال لازم است در مورد زون‌های خرد شده و محل گسل‌ها که می‌توانند در ایجاد لایه‌های آبدار تحت فشار موثر باشند، با احتیاط بیشتری صحبت نمود، هر چند پیش‌بینی می‌شود به دلیل عدم توسعه‌ی پهنه‌های گسلی عریض در این واحدهای زمین‌شناسی مشکلی در این زمینه نیز وجود نداشته باشد. به طور کلی با توجه به ویژگی‌های هیدروژئولوژی مسیر تونل در واحدهای شیلی محدوده مورد مطالعه احتمال تشکیل سفره‌های آب زیرزمینی قابل توجه وجود ندارد و آبخوان‌های کوچک و فرعی تشکیل شده نیز نمی‌توانند تأمین کننده‌ی آب نفوذی قابل توجه به داخل تونل باشند.

واحدهای آهکی ایلام که بخش عمده‌ای از مسیر را تشکیل می‌دهند به دلیل تأثیر ناپیوستگی‌های بسیاری که این واحد را متأثر نموده‌اند و بازشدگی و پرکننده‌ی شسته شده، به عنوان واحد دارای نفوذپذیری بالا شناخته می‌شود. نتایج آزمایشات لوژان در گمانه‌ی BH-27 نیز نشان می‌دهد که در اعماق زیاد نیز نفوذپذیری توده‌های سنگی متوسط است. با توجه به این مطلب باید انتظار داشت در زون‌های خرد شده موجود در این واحد مقادیر آب ورودی به تونل نسبت به واحدهای دیگر افزایش یابد که این افزایش در حد جریان متوسط آب به درون تونل است. البته باید در نظر داشت که در قسمت‌های دیگر این واحد شرایط آب زیرزمینی در حد مرطوب و چکیدن است و حتی در برخی نقاط که درزه‌های انحلالی وجود دارد جریان آب نیز وجود خواهد داشت. البته باید مدنظر داشت که تعیین محل دقیق ورود آب به درون تونل در چنین واحدی امکان‌پذیر

نمی‌باشد از این رو باید در کل مسیر تونل در این واحد مساله‌ی ورود آب به تونل را به عنوان یک مشکل مدنظر قرار داد.

مساله‌ی مهم دیگری که در مورد بخش‌های آهکی باید مد نظر داشت، وضعیت آب زیرزمینی در مرز واحد آهکی با واحدهای شیلی گورپی است. به دلیل رژیم آب زیرزمینی در واحد آهکی و جهت جریان به حاشیه‌ی تقادیس‌های موجود در این واحد به نظر می‌رسد در مرز واحد آهکی با شیل‌های گورپی، ورود آب زیرزمینی به درون تونل افزایش یابد، به همین دلیل توصیه می‌گردد قبل از ورود به آهک‌ها و هنگام خروج از این واحد با انجام مطالعات دقیق‌تر از قبیل گمانه‌زنی پیشرو، محل دقیق این مرز و شرایط آب در آنها بررسی گردد.

در جدول زیر واحدهایی که با توجه به خصوصیات و شرایط بیان شده دارای پتانسیل بیشتر برای نفوذ آب به درون تونل می‌باشند نشان داده شده‌اند. جدول (۶-۷) مشخصات واحدهای دارای پتانسیل ورود آب به درون تونل را نشان می‌دهد.

جدول (۶-۷) مشخصات واحدهای دارای پتانسیل ورود آب به درون تونل [۲۲۳]

شماره	نام واحد	موقعیت تقریبی در مسیر تونل (متر)		ضخامت در امتداد تونل (متر)	پتانسیل خطر
		پایان	شروع		
۱	CZ	۲۰۷۰	۲۰۲۰	۵۰	متوسط
۲	LI2	۴۹۵۰	۳۷۲۰	۱۲۳۰	زیاد
۳	FZ	۶۱۱۵	۵۸۶۰	۲۵۵	متوسط
۴	CZ	۷۳۶۵	۷۳۵۵	۱۰	متوسط
۵	SH-LS1	۸۹۴۰	۸۰۸۰	۸۵۵	متوسط
۶	SH-LS4	۱۱۰۴۰	۹۹۲۰	۱۱۱۵	متوسط
۷	ML-SH5	۱۲۲۱۰	۱۱۷۲۰	۴۸۵	متوسط

لازم به ذکر است برای محاسبه‌ی دبی آب ورودی از دو روش تحلیلی لی و روش تجربی هیوور نیز استفاده شده است که نتایج محاسبه‌ی دبی آب ورودی به تونل با استفاده از دو روش در جدول (۶-۸) ارایه شده است.

جدول (۶-۸) مقادیر تخمینی دبی آب ورودی به پهنه‌های مختلف در طول مسیر تونل [۲۲۲]

نام پهنه	متراژ پهنه		متوسط نفوذپذیری سنگ (متر بر ثانیه)	متوسط بار آبی (متر)	دبی آب (لیتر در ثانیه بر متر) (روش تجربی Heuer)	دبی آب (لیتر در ثانیه بر متر) (روش تحلیلی Lei)
	از کیلومتر	تا کیلومتر				
P1	۰۰+۰۰۰	۰۰+۷۵۵	$1/5 \times 10^{-8}$	۴۵	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۰۱۳
P2	۰۰+۷۵۵	۰۲+۰۱۵	$2/5 \times 10^{-8}$	۷۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۸
P3	۰۲+۰۱۵	۰۲+۰۷۰	1×10^{-6}	۸۵	۰/۰۰۲۸	۰/۱۳۷
P4	۰۲+۰۷۰	۰۲+۲۶۵	$1/5 \times 10^{-8}$	۱۰۰	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲
g1	۰۲+۲۶۵	۰۳+۷۱۵	1×10^{-7}	۱۱۰	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶
Ki1	۰۳+۷۱۵	۰۴+۰۰۰	5×10^{-7}	۱۰۵	۰/۰۱۷	۰/۸
Ki2	۰۴+۰۰۰	۰۴+۷۱۵	1×10^{-6}	۱۲۵	۰/۰۴۲	۰/۱۸۴
Ki3	۰۴+۷۱۵	۰۴+۷۳۵	5×10^{-6}	۱۳۰	۰/۲۱۶	۰/۹۴۸
Ki4	۰۴+۷۳۵	۰۴+۹۵۰	5×10^{-7}	۱۴۵	۰/۰۲۴	۰/۱۰۳
g2	۰۴+۹۵۰	۰۵+۸۵۵	9×10^{-8}	۱۹۰	۰/۰۰۶	۰/۰۲۳
P5	۰۵+۸۵۵	۰۶+۱۱۰	$1/5 \times 10^{-8}$	۱۹۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴
g3	۰۶+۱۱۰	۰۷+۲۳۵	1×10^{-7}	۲۶۰	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۸
P6	۰۷+۲۳۵	۰۷+۳۵۰	$1/5 \times 10^{-8}$	۳۲۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
P7	۰۷+۳۵۰	۰۷+۳۷۰	5×10^{-7}	۳۳۰	۰/۰۵۵	۰/۱۹۶
g4	۰۷+۳۷۰	۰۹+۴۱۵	1×10^{-7}	۳۳۰	۰/۰۱۱	۰/۰۳۸
g5	۰۹+۴۱۵	۰۹+۹۱۰	8×10^{-8}	۲۶۰	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵
g6	۰۹+۹۱۰	۱۱+۷۱۵	$1/5 \times 10^{-7}$	۲۹۵	۰/۰۱۵	۰/۰۵۳
P8	۱۱+۷۱۵	۱۲+۲۰۵	$1/5 \times 10^{-8}$	۲۵۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵
g7	۱۲+۲۰۵	۱۳+۲۹۰	$1/5 \times 10^{-7}$	۲۲۵	۰/۰۱۱	۰/۰۴۳

نتایج نشان می‌دهند که اختلاف نسبتاً زیادی بین نتایج به دست آمده از دو روش بیان شده وجود دارد. تجربیات موجود نشان داده‌اند که جریان آب به سمت تونل در حالت پایدار درازمدت معمولاً خیلی کمتر از مقداری است که با فرض نفوذپذیری معادل حاصل از آزمایش‌های فشار آب و از طریق روابط تحلیلی محاسبه می‌شود. بر اساس محاسبات، نتایج حاصل از روش تجربی تقریباً یک دوم تا یک چهارم مقدار حاصل از روش تحلیلی می‌باشد. از طرف دیگر، اندازه‌گیری‌های به عمل آمده در ۲۰۰۰ متر خروجی تونل که حفاری شده است،

نشان می‌دهند که حجم آب ورودی به داخل تونل حدود ۶۰ لیتر در دقیقه در طول ۲۰۰۰ متر می‌باشد. چنانچه فرض کنیم این رقم در فصول تر به ۱۰۰ لیتر در دقیقه برسد، در این صورت دبی آب ورودی معادل حدود ۰/۰۵ لیتر در دقیقه در هر متر (۰/۰۰۰۸ لیتر در ثانیه بر متر) خواهد بود که این رقم به نتیجه حاصل از روش تجربی هیوور که در جدول ذکر شده است نزدیک‌تر است (۰/۰۰۰۷۵ لیتر در ثانیه بر متر).

بر اساس این محاسبات پیش‌بینی می‌شود بیشترین ورودی آب به درون تونل در پهنه‌ی Ki3، اتفاق خواهد افتاد که ناشی از وجود زون گسلی و خرد شده و بالا بودن تراوایی توده سنگ در این مقطع می‌باشد. همچنین کمترین ورودی برآورد شده مربوط به زون‌های P1 و P2 یعنی دو کیلومتر اول حفاری شده می‌باشد که بین ۰/۰۰۰۷۵ تا ۰/۰۰۱ لیتر در ثانیه در متر محاسبه شده است و اگر در مجموع طول این دو پهنه (۲۰۱۵ متر) ضرب شود معادل ۱/۸ لیتر در ثانیه خواهد بود (۱۰۰ لیتر در دقیقه) که همخوانی خوبی با آنچه که در عمل اندازه‌گیری شده است، دارد.

۶-۵-۴- سینه‌کار مختلط

در این پروژه با توجه به اختلاف نه چندان زیاد در ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها احتمال برخورد با چنین مشکلی پیش‌بینی نمی‌شود. با این حال در برخی واحدها که متشکل از تناوب لایه‌های سخت آهکی با واحدهای نامقاوم شیلی و مارنی هستند، احتمال عملکرد چنین پدیده‌ای هر چند به صورت جزئی وجود دارد.

واحدهای سازند پابده به لحاظ تغییرات لیتولوژیکی بیشترین میزان تغییرات را دارا می‌باشند (شیل، آهک رسی، آهک و شیل آهکی)، البته این روند در واحدهای سازند گورپی نیز قابل مشاهده است. با وجود چنین تغییرات لیتولوژیکی، به دلیل اینکه میزان مقاومت این سنگ‌ها در بازه‌های نزدیک به هم می‌باشد و درصد کانی‌های ساینده در آنها نیز مشابه است می‌توان انتظار داشت که این تغییرات خطر چندان زیادی برای دستگاه ایجاد ننماید.

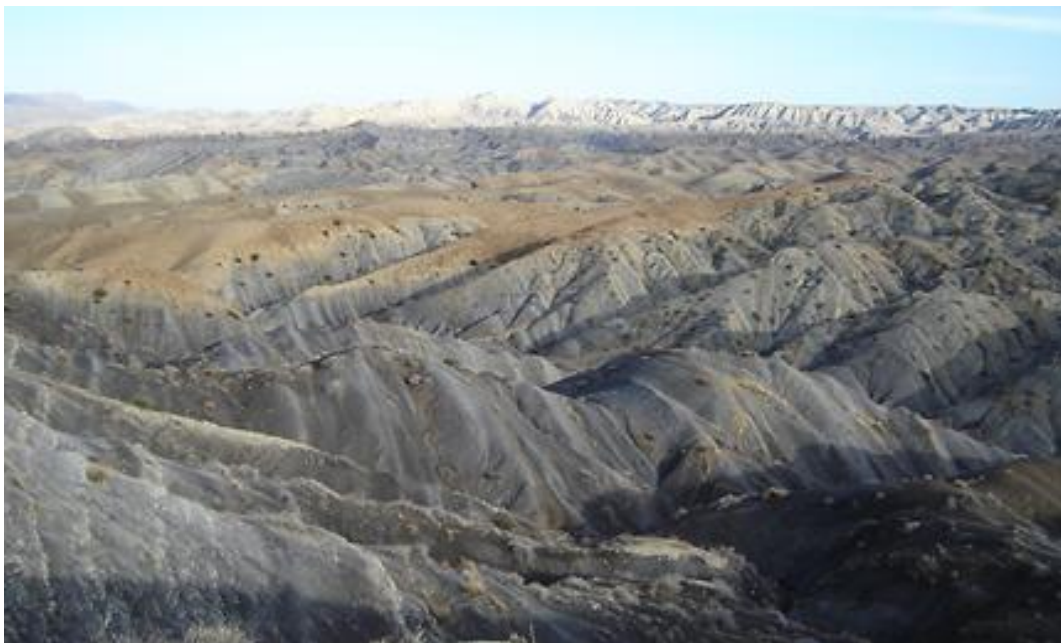
۶-۵-۵- تورم سازندهای شیلی و مارنی

بخش عمده‌ی لیتولوژی تشکیل دهنده‌ی مسیر مورد مطالعه از واحدهای شیلی تشکیل یافته است. اصولاً سنگ‌های مارنی و شیلی تحت تأثیر رطوبت و جذب آب به علت وجود کانی‌های رسی دارای خاصیت تورم و افزایش حجم می‌باشند. واحدهای تشکیل دهنده‌ی ساخت‌گاه نیز در بعضی واحدها عمدتاً از چنین سنگ‌هایی تشکیل یافته‌اند و به نظر می‌رسد بعد از عملیات حفاری تا حدی متورم گردیده و با افزایش حجم مشکلاتی را ایجاد نمایند. واحدهای SH-LS1 و SH-LS3 تماماً از سنگ‌های شیلی و مارنی تشکیل یافته‌اند و به نظر می‌رسد بیشترین پتانسیل تورم را دارا باشند که نمایی از شیل‌های مسیر تونل با پتانسیل تورم، در شکل (۶-۴) آمده است. پدیده‌ی تورم در حالت بحرانی باعث افزایش خطر ریزش و اعمال بار اضافی بر سیستم نگهدارنده و سپرهای دستگاه می‌گردد.

نتایج برخی آزمایشات می‌تواند تا حدودی به بررسی رفتار سنگ‌های مسیر تونل نسبت به رطوبت کمک نمایند. از جمله این آزمایشات، آزمایش دوام - شکستگی است که در فصل گذشته توضیح داده شده است. نتایج این آزمایش علاوه بر وابسته بودن به خصوصیات مقاومتی و هوازگی سنگ، به درصد و نوع کانی‌های رسی موجود در ساختار سنگ نیز وابسته است، از این‌رو می‌توان با توجه به نتایج این آزمایشات و همچنین نتایج آزمایشات درصد جذب آب، به طور نسبی، پتانسیل تورم و واکنش با آب سنگ‌های مسیر تونل را پیش‌بینی کرد. با توجه به مطالب بیان شده، واحدهای ارایه شده در جدول (۶-۹) دارای پتانسیل تورم می‌باشند.

جدول (۶-۹) واحدهای دارای پتانسیل تورم و آماس [۲۲۳]

نام واحد	لیتولوژی	درصد تشکیل دهنده مسیر تونل
SH-ML1,2	آهک رسی و شیل	۳/۲
SH-ML3	آهک رسی و شیل	۱/۵
SH-LS1	آهک رسی و شیل	۸/۵
SH-LS3	آهک رسی و شیل	۱۰



شکل (۴-۶) نمایی از واحد شیلی SH-LS1 با خصوصیات مهندسی ضعیف و دارای پتانسیل تورم [۲۲۲]

۶-۵-۶- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)

در این تحقیق از روش‌های سینگ، گوئل، جتوا و هوک و مارینوس در تعیین پتانسیل لهیدگی استفاده شده است. در جدول (۶-۱۰) نتایج تعیین پتانسیل لهیدگی سنگ‌های مسیر تونل در قسمتی از محدوده‌ی مورد مطالعه (به علت زیاد بودن واحدهای زمین‌شناسی مهندسی) با روش‌های مذکور ارایه شده است.

طبق جدول (۶-۱۰) و قضاوت مهندسی، می‌توان زون‌های خرد شده اطراف گسل‌ها را که دارای ضریب اطمینان کمتری هستند به عنوان زون‌های دارای پتانسیل اندک لهیدگی معرفی نمود. با توجه به اینکه در روش هوک و مارینوس پارامترهای توده سنگ و ماده سنگ هر دو لحاظ گردیده است و نتایج به دست آمده از این روش انطباق نسبتاً خوبی با نتایج سایر روش‌ها دارد توصیه می‌گردد از نتایج بدست آمده از این روش استفاده شود.

جدول (۶-۱۰) نتایج بررسی وضعیت لهیدگی تونل در قسمتی از محدوده‌ی مورد مطالعه با روش‌های مختلف [۲۲۶]

کیلومتر از انتهای تونل	واحد زمین‌شناسی مهندسی	میزان تغییر شکل محاسبه شده به روش هوک و مارینوس	روش گوئل		روش جتوا σ_{cm}/P_0 (لهیدگی بسیار زیاد) $0.4 >$ (لهیدگی متوسط) $0.8-0.4$ (لهیدگی کم) $2-0.8$ (عدم لهیدگی) < 2	روش سینگ ($H=350 Q^{1/3}$ روباره مجاز) (شرایط غیر لهیدگی) $H < 350 Q^{1/3}$ (شرایط لهیدگی) $H > 350 Q^{1/3}$		
			روباره مجاز (m)	ضخامت روباره (m)		روباره مجاز (m)	ضخامت روباره (m)	Q
3068-3720	SH-LS4	Very Low: <1%	260.48	140	(لهیدگی متوسط) 0.45	436.52	130	1.94
3720-4720	LI1	Very Low: <1%	281.71	130	(لهیدگی کم) 1.5	585.44	160	4.68
4720-4760	CZ3	High: 2.5-5%	376.71	160	(لهیدگی زیاد) 0.15	228.97	160	0.28
4760-4950	LI1	Very Low: <1%	148.73	160	(لهیدگی کم) 1.5	585.44	160	4.68
4950-5350	SH-LS4	Low: 1-2.5%	376.71	160	(لهیدگی زیاد) 0.33	436.52	170	1.94
5350-5457	SH-LS3	Low: 1-2.5%	281.71	170	(لهیدگی زیاد) 0.22	403.30	190	1.53
5457-5629	SH-LS2	Very Low: <1%	260.48	190	(لهیدگی متوسط) 0.45	511.97	200	3.13
5629-5842	SH-LS1	Very High: 5-10%	329.88	200	(لهیدگی زیاد) 0.08	396.15	250	1.45
5842-6095	ML-SH5	Very Low: <1%	255.90	250	(لهیدگی زیاد) 0.37	456.58	210	2.22
6095-6125	CZ4	Very High: 5-10%	294.52	210	(لهیدگی زیاد) 0.1	211.28	220	0.22
6125-6223	FZ2	Very High: 5-10%	137.35	220	(لهیدگی زیاد) 0.06	301.62	240	0.64
6223-6337	SH-LS2	Very Low: <1%	195.37	240	(لهیدگی زیاد) 0.36	511.97	260	3.13
6337-6412	SH-LS3	High: 2.5-5%	329.88	260	(لهیدگی زیاد) 0.16	420.16	260	1.73
6412-6442	CZ5	Very High: 5-10%	271.26	260	(لهیدگی زیاد) 0.04	253.51	260	0.38
6442-6762	SH-LS3	High: 2.5-5%	164.49	260	(لهیدگی زیاد) 0.15	420.16	260	1.73
6762-6850	SH-LS2	Low: 1-2.5%	271.26	260	(لهیدگی زیاد) 0.32	511.97	290	3.13

۶-۵-۷- تشکیل گل (انسداد)

در زمین‌هایی که سنگ‌های متشکله آن حاوی درصد زیادی کانی‌های رسی هستند (واحدهای شیلی، مارنی)، در صورت وجود آب، مصالح کنده شده به صورت گل در می‌آیند.

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته و نتایج حاصل از گمانه‌های اکتشافی، مواجهه با شرایط زمین چسبنده در سازند گورپی متشکل از تناوب لایه‌های شیلی و آهک رسی پیش‌بینی می‌شود اما

می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در اکثر قسمت‌های مسیر تونل خطر تشکیل گل وجود ندارد. لازم به ذکر است که زون‌های گسلی موجود در واحدهای شیلی نیز دارای پتانسیل گل می‌باشند و از این لحاظ این زون‌ها را نیز باید مدنظر قرار داد. در جدول (۶-۱۱) موقعیت واحدهایی که دارای پتانسیل تشکیل گل هستند مشخص شده است.

جدول (۶-۱۱) موقعیت واحدهای دارای پتانسیل تشکیل گل [۲۲۳]

شماره	نام واحد	موقعیت تقریبی در مسیر تونل (متر)		ضخامت در امتداد تونل (متر)
		پایان	شروع	
۱	CZ	۶۴۱۲	۶۴۴۲	۳۰
۲	CZ	۹۷۱۰	۹۶۸۰	۳۰
۳	CZ	۱۰۸۰۰	۱۰۷۹۰	۱۰

۶-۵-۸- پتانسیل کارست

بررسی عوامل مختلف موثر بر پدیده کارستی شدن نشان می‌دهد که دو عامل لیتولوژیکی - چینه‌شناسی و ضخامت لایه‌های کربناته در محدود شدن توسعه کارست منطقه بیش از عوامل دیگر نقش داشته‌اند. لیتولوژی غالب سازندهای آهکی منطقه طوری است که سنگ‌های کربناته اغلب همراه با ناخالصی‌های رسی و مارنی هستند و این امر باعث توقف و محدود شدن پدیده‌ی انحلال می‌شود. از نظر چینه‌شناسی هم، وجود میان لایه‌های شیلی، شیل آهکی، آهک رسی یا شیلی و بالاخره مارن در غالب سازندهای آهکی منطقه سبب جلوگیری از کانالیزه شدن جریان آب زیرزمینی در توده سنگ‌ها و عدم نفوذ و چرخش آب در توده‌های آهکی می‌شود. علاوه بر این، سازندهای نفوذناپذیر یا نیمه نفوذپذیر پابده - گورپی اغلب به عنوان سطح اساس فرسایش محلی عمل کرده و مانع گردش وسیع و عمقی در توده‌های آهکی می‌شوند.

ضخامت کم لایه‌های آهکی در منطقه نیز به عنوان عامل منفی در توسعه‌ی پدیده کارست عمل کرده است. هر چقدر ضخامت لایه‌های انحلال‌پذیر کم باشد، پدیده‌ی انحلال و توسعه‌ی کارست ضعیف عمل می‌کند.

غارچه‌ی آهکی از دیگر اشکال کارستی موجود در منطقه است که برخی از آنها ساختاری بوده و در نتیجه ریزش قطعات و بلوک‌های سنگی درز و شکاف‌دار به وجود آمده‌اند (مانند آنچه که در آهک‌های ایلام در تاقدیس اسپر مشاهده می‌شود). یکی از این غارچه‌ها در ارتفاعات دره‌ی اسپر مشاهده شده است که بنا به گفته افراد محلی فاقد عمق است. برخی از این غارچه‌ها انحلالی بوده ولی باز هم عمق چندانی ندارند. مهم‌ترین پدیده‌ی انحلالی موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه، غار شناسایی شده در واحد ایلام است. نمونه‌ای از غارچه‌های انحلالی در مسیر تونل در شکل (۵-۶) نمایش داده شده است.

منطقه از نظر بارندگی در شرایط نسبتاً مناسبی قرار گرفته به طوری که متوسط بارندگی در منطقه حدود ۶۵۰-۶۰۰ میلی‌متر در سال است که معمولاً برای انحلال سنگ‌های کربناته کافی است. با این حال عوامل دیگری نظیر پستی و بلندی و وضعیت چینه‌شناسی و لیتولوژی شرایط لازم و کافی برای توسعه پدیده‌ی کارست را در منطقه فراهم نکرده‌اند [۲۲۲].

با توجه به مشاهدات و بازدیدهای صحرایی در منطقه می‌توان گفت که اشکال و سیماهای کارستی چندانی (چه سطحی و چه عمقی) در منطقه وجود ندارد [۲۲۲].



شکل (۵-۶) غارچه‌های انحلالی در مسیر تونل نوسود [۲۲۲]

۶-۵-۹- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

به طور کلی پیش‌بینی نشت گاز به داخل تونل بدون وجود اطلاعات خاص و دقیق از شرایط زمین‌شناسی منطقه، کاری دشوار و در برخی موارد غیرممکن می‌باشد.

به نظر می‌رسد با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه دو گاز سولفید هیدروژن (H_2S) و منواکسیدکربن (CO) غلظت بیشتری در تونل داشته باشد.

یکی از پدیده‌های زمین‌شناسی که در آن گاز H_2S تولید می‌شود، اکسایش کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت می‌باشد. با توجه به وجود کانی پیریت در بین آهک‌ها و شیل‌های ایلام و واحدهای مجاور می‌توان وقوع این پدیده را در منطقه مورد بررسی قرار داد. پیریت یا سولفید آهن (FeS_2)، در محیط ته‌نشین می‌گردد و با حفاری تونل و قرارگیری در مجاورت هوا، اکسید شده و گاز سولفید هیدروژن را آزاد می‌نماید. زمانی که پیریت در مجاورت آب و هوا در حفاری‌های زمین قرار می‌گیرد، اسید سولفوریک نیز تشکیل می‌شود. وجود حفره‌های ناشی از فرسایش اکسید آهن در شکل (۶-۶) نشانه‌ای از انجام این واکنش در منطقه می‌باشد.



شکل (۶-۶) وجود حفره‌های اکسید آهن در سطح آهک‌های تاقدیس اسپر [۲۲۳]

وجود چشمه‌های گوگردی (که با تولید گاز H_2S و رسوب گوگرد در اطراف چشمه‌ها همراه است) و وجود توالی‌های رسوبی با ظرفیت سنگ مادر و سنگ مخزن در بخش چین‌خورده‌ی حوضه‌ی نفتی زاگرس دلیل کافی بر وجود منابع هیدروکربوری در منطقه می‌باشد. در واقع مواد آلی موجود در سنگ‌ها می‌تواند یکی از منابع اصلی برای تولید گاز H_2S و CO باشد. معمولاً در محیط‌هایی که این‌گونه مواد آلی حضور دارند، احتمال وجود گازهای همراه نیز وجود دارد.

در زمین‌شناسی زاگرس، سازندهایی مانند پابده - گورپی و ... به عنوان سنگ منشأ نفت شناخته می‌شوند. نفت خام بعد از تشکیل و تکامل در این سنگ‌ها به سمت واحدهای نفوذپذیرتر مهاجرت می‌کند و چنانچه ساختار مناسب برای به دام افتادن آن وجود داشته باشد، مخازن نفت تشکیل می‌شوند. در منطقه‌ی مورد مطالعه اگرچه سنگ منشأ نفت وجود دارد ولی به دلیل نبود ساختارهای مناسب برای تشکیل تله‌های نفتی بزرگ، مواد تشکیل شده ضمن مهاجرت به سمت بالا از بین رفته و فقط آثاری از آنها در سنگ‌های اطراف به صورت مایعات قیری سیاه رنگ و گاز وجود دارد.

با توجه به بالا رفتن میزان نشت گاز در آهک‌های ایلام به نظر می‌رسد مواد آلی به هنگام مهاجرت به بالا به دلیل وجود حفرات کافی در این سازند از تمرکز بیشتری برخوردار هستند. احتمالاً وجود لایه‌های نفوذناپذیرتر شیلی در ایجاد تله‌های کوچک گاز موثر بوده است.

گوگرد موجود در سیال‌های هیدروکربوری در شرایط احیا (اکسایش - کاهش) در زیرزمین به هیدروژن سولفور (H_2S) تبدیل می‌شود. این گاز طی عملیات حفاری به صورت آزاد و یا به صورت محلول در آب‌های زیرزمینی از منافذ توده سنگ‌ها به خارج راه می‌یابد. از سوی دیگر در منابع آب‌های کربناته کارستی در زیرزمین محلول بی‌کربنات کلسیم ($(HCO_3)_2Ca$) تولید می‌شود که این محلول به دلیل ناپایداری شیمیایی در شرایط نزدیک به سطح زمین به کربنات کلسیم تبدیل شده و در نتیجه مقادیر قابل توجهی گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید می‌گردد. این گاز در مجاورت H_2S به ویژه در بخش‌هایی که شرایط احیا بر آنها حاکم است، به

گاز مونواکسید کربن (CO) تبدیل می‌شود که گاز بسیار خطرناکی است. بدین ترتیب احتمال دارد دو گاز H_2S و CO در موقع حفاری همراه جریان آب‌های زیرزمینی به خارج جریان یافته و موجبات گازگرفتگی و خفگی پرسنل را فراهم سازند.

منشأ گازها در منطقه به احتمال زیاد مربوط به مخازن نفتی ترازهای بسیار پایین می‌باشند. آهک‌های ایلام به دلیل نفوذپذیری و تخلخل بالا (در اثر وجود درزه‌ها و شکستگی‌های ساختاری) و به دلیل وجود میان لایه‌های شیلی که می‌توانند نقش لایه‌های نفوذناپذیر را بازی کنند، محیط مناسبی را برای به دام افتادن گازهای در حال مهاجرت از منابع نفتی زیرین فراهم نموده‌اند. بنابراین پیش‌بینی می‌شود با پیشروی تونل در داخل آهک‌های ایلام، با برخورد به این تله‌های کوچک و موضعی نرخ تصاعد گاز به داخل تونل افزایش یابد.

پیش‌بینی می‌شود به دلیل اینکه محیط حفر تونل اشباع از آب می‌باشد، گازهای متصاعد شده‌ی موجود به صورت محلول در آب خواهند بود. بدیهی است غلظت گازهای متصاعد شده به داخل تونل نسبت مستقیم با حجم آب ورودی به تونل خواهد داشت.

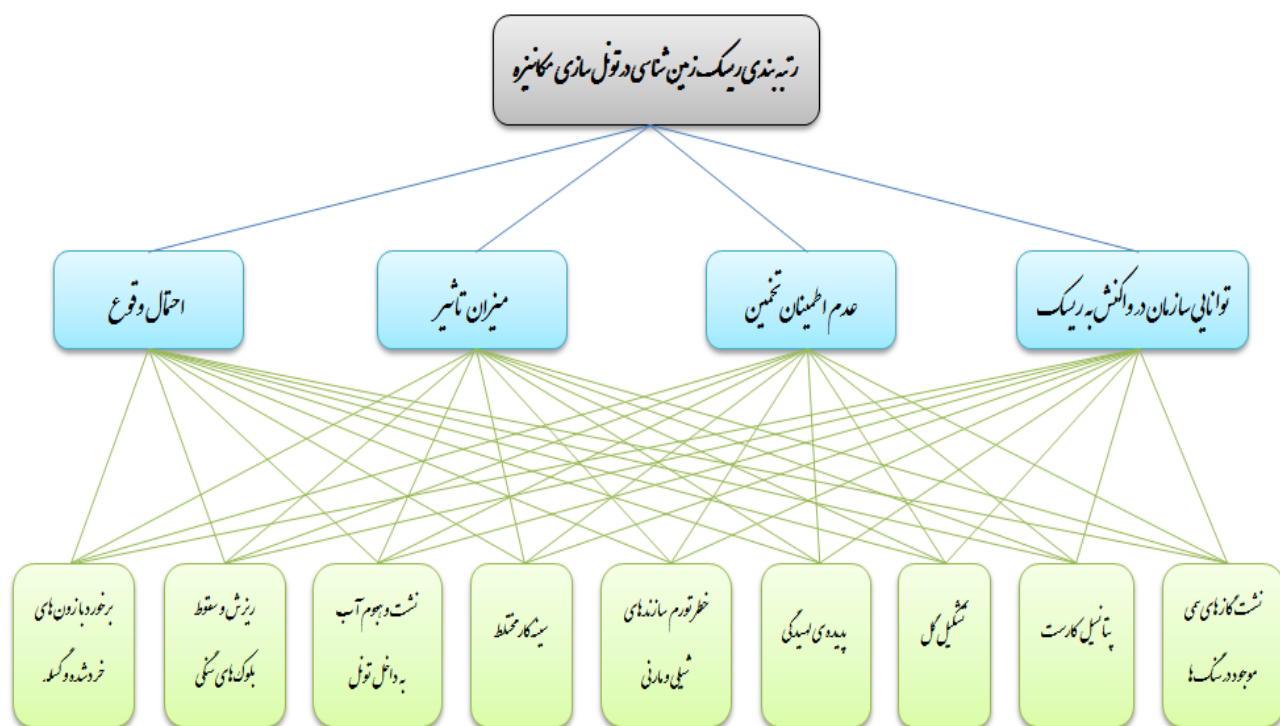
۶-۶- ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود

به منظور ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود طبق مطالعات، ۹ ریسک به عنوان مهم‌ترین ریسک‌های زمین‌شناسی در تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های سنگی تعیین گردیده که عبارت‌اند از: برخورد با زون‌های خرد شده و گسله (A1)، ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی (A2)، نشت و هجوم آب به داخل تونل (A3)، سینه‌کار مختلط (A4)، خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی (A5)، پدیده‌ی لهیدگی (A6)، تشکیل گل (A7)، پتانسیل کارست (A8) و نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها (A9).

در این تحقیق شاخص‌های تصمیم‌گیری تأثیرگذار بر ریسک‌های بیان شده، احتمال وقوع ریسک (C1)، میزان تأثیر (C2)، عدم اطمینان تخمین (C3) و توانایی سازمان در واکنش به ریسک (C4) می‌یاشند.

به منظور مشورت، هم فکری و استفاده از تجربیات صاحب‌نظران پروژه‌های تونل‌سازی کشور پرسشنامه‌ای با در نظر گرفتن ریسک‌ها و شاخص‌های تأثیرگذار روی آنها، برای نظرسنجی از خبرگان امر تونل‌سازی تدوین گردید تا هر خبره طبق تجربه کارگاهی خود به صورت مدون و دقیق به پرسش‌های مورد نظر پاسخ دهد. لازم به ذکر است به منظور کارشناسی، از ۵ خبره برای تکمیل پرسشنامه‌ها استفاده شده است که کارشناسان منتخب از شرکت‌های سپاسد، جهاد توسعه منابع آب ایران و ایمن‌سازان انتخاب گردیده‌اند.

برای تفهیم ارتباط شاخص‌ها با ریسک‌های معرفی شده در این تحقیق، ساختار سلسله مراتبی این مساله در شکل (۶-۷) به نمایش آمده است.



شکل (۶-۷) ساختار سلسله مراتبی برای رتبه‌بندی ریسک‌های تونل‌سازی در محیط‌های سنگی

در ادامه برای رتبه‌بندی و اولویت دادن به ریسک‌های ذکر شده در تونل انتقال آب نوسود از روش‌های شباهت به گزینه‌ای ایده‌آل فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی استفاده شده است.

۶-۶-۱- رتبه‌بندی ریسک با روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی

در این تحقیق طبق هیدروژئولوژی مسیر تونل متراژ ۰۰+۰۰۰ تا ۱۳+۲۹۰ به ۱۹ پهنه تقسیم شده که این تقسیم‌بندی در جدول (۳-۶) ارایه گردیده است. لازم به ذکر است از بین شاخص‌های تصمیم‌گیری فقط توانایی سازمان در واکنش به ریسک منفی می‌باشد و سایر شاخص‌ها مثبت در نظر گرفته می‌شوند.

برای ارزیابی اهمیت معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها طبق نظر تصمیم‌گیرندگان از متغیرهای زبانی استفاده شده که در جداول (۱۲-۶) و (۱۳-۶) ارایه شده است.

جدول (۱۲-۶) اهمیت معیارها نسبت به هدف [۴۰]

عدد فازی	اهمیت	
(۰/۱ و ۰/۳)	بسیار کم اهمیت (VLI)	Very Low Importance
(۰/۱ و ۰/۳ و ۰/۵)	کم اهمیت (LI)	Low Importance
(۰/۳ و ۰/۵ و ۰/۷)	با اهمیت برابر (E)	Equal
(۰/۵ و ۰/۷ و ۰/۹)	با اهمیت (I)	Important
(۰/۷ و ۰/۹ و ۱)	بسیار با اهمیت (VI)	Very Important

جدول (۱۳-۶) اهمیت گزینه‌ها نسبت به معیارها [۴۰]

عدد فازی	اهمیت	
(۱ و ۳)	خیلی کم (VL)	Very Low
(۱ و ۳ و ۵)	کم (L)	Low
(۳ و ۵ و ۷)	متوسط (M)	Medium
(۵ و ۷ و ۹)	زیاد (H)	High
(۷ و ۹ و ۱۱)	خیلی زیاد (VH)	Very High

با توجه به متغیرهای زبانی بیان شده هر متخصص پرسشنامه‌ی طرح شده را تکمیل نموده است. در ادامه روند حل مسئله برای پهنه‌ی اول به طور کامل توضیح داده خواهد شد که این روند برای ۱۸ پهنه‌ی دیگر به صورت مشابه صورت می‌پذیرد. نتایج نظرسنجی برای پهنه‌ی اول در جداول (۱۴-۶) و (۱۵-۶) آورده شده است.

جدول (۶-۱۴) نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان برای وزن معیارها

	C1	C2	C3	C4
کارشناس اول (E1)	I	VI	I	VI
کارشناس دوم (E2)	VI	I	I	VI
کارشناس سوم (E3)	VI	I	VI	VI
کارشناس چهارم (E4)	I	VI	I	I
کارشناس پنجم (E5)	I	VI	I	VI

جدول (۶-۱۵) نتایج حاصل از نظرسنجی از خبرگان برای تشکیل ماتریس تصمیم فازی

	C1					C2					C3					C4				
	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5
A1	H	VH	M	H	VH	VH	VH	H	H	VH	VL	L	L	M	H	M	M	L	L	M
A2	VH	VH	H	VH	H	H	VH	VH	M	VH	VL	L	VH	M	M	M	M	L	L	M
A3	L	M	M	M	L	H	M	VL	L	L	VL	VL	H	H	M	H	H	H	VH	M
A4	H	H	VH	M	L	M	H	H	L	L	VL	L	L	L	M	H	H	M	M	M
A5	VL	VL	M	M	M	M	H	VL	VL	VL	VL	L	L	VL	L	H	VH	VL	L	L
A6	H	M	H	VL	VH	M	M	L	L	H	VL	L	VH	H	VH	M	L	VL	M	L
A7	VL	VL	M	L	L	M	M	VL	VH	M	VL	L	L	M	VL	M	L	VL	L	L
A8	VL	VL	VL	VL	L	M	VL	L	VL	VL	VL	H	L	VL	VL	L	VL	L	L	VL
A9	VL	VL	L	L	VL	VH	H	L	VH	L	VL	L	VH	H	L	VL	L	VL	L	L

با توجه به نتایج به دست آمده از نظرسنجی ماتریس تصمیم فازی به صورت جدول (۶-۱۶) خواهد بود.

جدول (۶-۱۶) ماتریس تصمیم فازی

	C1			C2			C3			C4		
A1	3	7.4	9	5	8.2	9	1	3.8	9	1	4.2	7
A2	5	8.2	9	3	7.8	9	1	3.8	7	1	4.2	7
A3	1	4.2	7	1	3.8	9	1	4.2	9	3	7	9
A4	1	6.2	9	1	5	9	1	3	7	3	5.8	9
A5	1	3.4	7	1	3	9	1	2.2	5	1	4.6	9
A6	1	5.8	9	1	4.6	9	1	5.8	9	1	3.4	7
A7	1	2.6	7	1	5	9	1	2.6	7	1	3	7
A8	1	1.4	5	1	2.2	7	1	2.6	9	1	2.2	5
A9	1	2.2	5	1	6.2	9	1	4.6	9	1	2.2	5

با به دست آوردن برآیند نظرها، بردار وزن فازی معیارها به دست می‌آید که در جدول (۶-۱۷) آمده است.

جدول (۶-۱۷) وزن فازی معیارها

	C1			C2			C3			C4		
W	0.5	0.78	1	0.5	0.82	1	0.5	0.74	1	0.5	0.86	1

ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده در جدول (۶-۱۸) درج شده است.

جدول (۶-۱۸) ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده

	C1			C2			C3			C4		
A1	0.333	0.822	1	0.556	0.911	1	0.111	0.422	1	0.143	0.238	1
A2	0.556	0.911	1	0.333	0.867	1	0.111	0.422	0.778	0.143	0.238	1
A3	0.111	0.467	0.778	0.111	0.422	1	0.111	0.467	1	0.111	0.143	0.333
A4	0.111	0.689	1	0.111	0.556	1	0.111	0.333	0.778	0.111	0.172	0.333
A5	0.111	0.378	0.778	0.111	0.333	1	0.111	0.244	0.556	0.111	0.217	1
A6	0.111	0.644	1	0.111	0.511	1	0.111	0.644	1	0.143	0.294	1
A7	0.111	0.289	0.778	0.111	0.556	1	0.111	0.289	0.778	0.143	0.333	1
A8	0.111	0.156	0.556	0.111	0.244	0.778	0.111	0.289	1	0.2	0.455	1
A9	0.111	0.244	0.556	0.111	0.689	1	0.111	0.511	1	0.2	0.455	1

در جدول (۶-۱۹)، ماتریس بی‌مقیاس شده وزن‌دار تشکیل شده است.

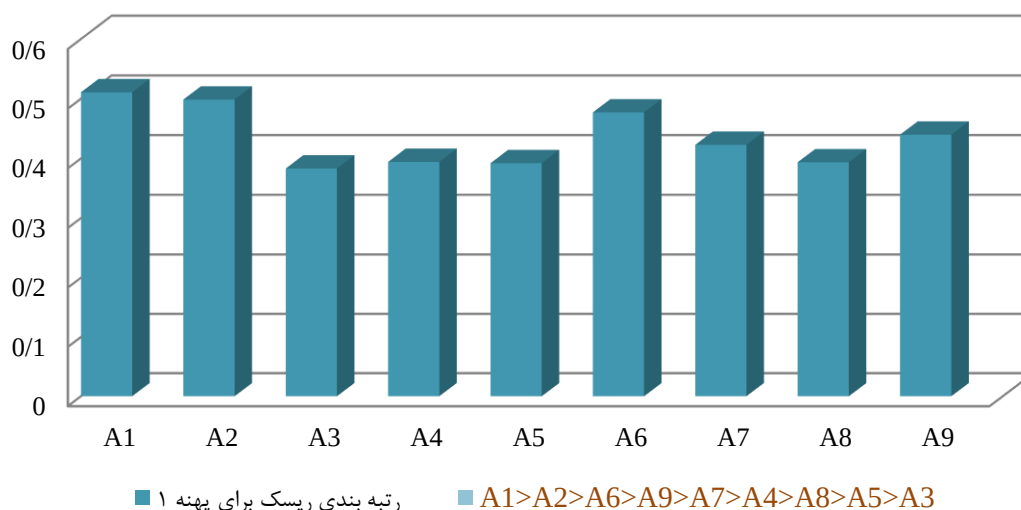
جدول (۶-۱۹) ماتریس بی‌مقیاس شده وزن‌دار

	C1			C2			C3			C4		
A1	0.167	0.641	1	0.278	0.747	1	0.056	0.312	1	0.071	0.205	1
A2	0.278	0.711	1	0.167	0.711	1	0.056	0.312	0.778	0.071	0.205	1
A3	0.056	0.364	0.778	0.056	0.346	1	0.056	0.345	1	0.056	0.123	0.333
A4	0.056	0.537	1	0.056	0.456	1	0.056	0.247	0.778	0.056	0.148	0.333
A5	0.056	0.295	0.778	0.056	0.273	1	0.056	0.181	0.556	0.056	0.187	1
A6	0.056	0.503	1	0.056	0.419	1	0.056	0.477	1	0.071	0.253	1
A7	0.056	0.225	0.778	0.056	0.456	1	0.056	0.214	0.778	0.071	0.287	1
A8	0.056	0.121	0.556	0.056	0.2	0.778	0.056	0.214	1	0.1	0.391	1
A9	0.056	0.191	0.556	0.056	0.565	1	0.056	0.378	1	0.1	0.391	1

در این مرحله پس از تعیین حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل و تعیین فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل (Si^*) و ضد ایده‌آل (Si^-)، شاخص شباهت (CCi) و رتبه برای گزینه‌های مختلف محاسبه و در جدول (۶-۲۰) و شکل (۶-۸) آورده شده است. نتایج حاصل از محاسبات برای پهنه‌ی اول نشان می‌دهد که برخورد با زون‌های خرد شده و گسله، ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی و پدیده‌ی لهیدگی سه ریسک اصلی در این پهنه می‌باشند.

جدول (۶-۲۰) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت

رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
1	0.5108	2.4499	2.3459	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.4985	2.3373	2.3509	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
9	0.3830	1.7593	2.8342	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.3941	1.8047	2.7748	A4	سینه‌کار مختلط
8	0.3919	1.8470	2.8661	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.4770	2.3418	2.5678	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.4227	2.0088	2.7432	A7	تشکیل گل
7	0.3934	1.8485	2.8505	A8	پتانسیل کارست
4	0.4397	2.0740	2.6432	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها



شکل (۶-۸) اولویت‌بندی ریسک زمین‌شناسی با روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی برای پهنه‌ی اول

به طور مشابه این فرآیند محاسباتی برای ۱۸ پهنه‌ی دیگر نیز صورت پذیرفته و ۳ ریسک اصلی (بالا) در هر پهنه تعیین و در جداول (۶-۲۱) تا (۶-۳۸) آورده شده است.

جدول (۶-۲۱) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۲

پهنه‌ی ۲					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.496	2.402	2.442	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
1	0.533	2.518	2.202	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
8	0.406	1.908	2.791	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
2	0.497	2.414	2.440	A4	سینه‌کار مختلط
4	0.475	2.335	2.583	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
5	0.472	2.323	2.603	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.456	2.262	2.697	A7	تشکیل گل
9	0.404	1.887	2.779	A8	پتانسیل کارست
6	0.460	2.207	2.596	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۲) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۳

پهنه‌ی ۳					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
1	0.524	2.494	2.261	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.493	2.308	2.371	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
5	0.459	2.287	2.693	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
4	0.469	2.243	2.543	A4	سینه‌کار مختلط
8	0.420	2.010	2.774	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.479	2.351	2.557	A6	پدیده‌ی لهیدگی
6	0.424	2.008	2.730	A7	تشکیل گل
9	0.376	1.724	2.859	A8	پتانسیل کارست
7	0.421	2.005	2.761	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۳) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۴

پهنه‌ی ۴					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
4	0.495	2.406	2.458	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.499	2.419	2.429	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
5	0.466	2.318	2.653	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.452	2.250	2.731	A4	سینه‌کار مختلط
9	0.368	1.704	2.921	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.496	2.387	2.427	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.438	2.128	2.729	A7	تشکیل گل
8	0.393	1.847	2.853	A8	پتانسیل کارست
1	0.538	2.529	2.175	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۴) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۵

پهنه‌ی ۵					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.415	1.981	2.797	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.491	2.402	2.491	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
4	0.471	2.341	2.632	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.462	2.291	2.664	A4	سینه‌کار مختلط
3	0.481	2.377	2.565	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
5	0.468	2.312	2.625	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.442	2.139	2.703	A7	تشکیل گل
8	0.418	1.993	2.779	A8	پتانسیل کارست
1	0.540	2.540	2.168	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۵) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۶

پهنه‌ی ۶					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
4	0.461	2.285	2.670	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
5	0.451	2.172	2.640	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.489	2.392	2.504	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
9	0.418	1.995	2.774	A4	سینه‌کار مختلط
7	0.427	2.097	2.815	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
6	0.446	2.165	2.684	A6	پدیده‌ی لهیدگی
8	0.420	2.004	2.762	A7	تشکیل گل
3	0.465	2.308	2.652	A8	پتانسیل کارست
1	0.523	2.480	2.259	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۷

پهنه‌ی ۷					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
4	0.468	2.308	2.624	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
8	0.422	2.009	2.757	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.489	2.388	2.500	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
9	0.391	1.842	2.867	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.437	2.126	2.737	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
5	0.439	2.072	2.644	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.431	2.107	2.785	A7	تشکیل گل
3	0.478	2.341	2.557	A8	پتانسیل کارست
1	0.508	2.444	2.372	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۷) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۸

پهنه‌ی ۸					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.469	2.317	2.626	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
8	0.419	1.997	2.773	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.499	2.418	2.432	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
5	0.445	2.167	2.698	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.441	2.139	2.713	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
9	0.394	1.849	2.846	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.440	2.133	2.719	A7	تشکیل گل
4	0.465	2.306	2.658	A8	پتانسیل کارست
1	0.517	2.476	2.312	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۸) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۹

پهنه‌ی ۹					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.478	2.353	2.573	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
9	0.393	1.848	2.854	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.499	2.419	2.428	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.442	2.148	2.709	A4	سینه‌کار مختلط
4	0.475	2.316	2.560	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
8	0.405	1.884	2.768	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.412	1.979	2.827	A7	تشکیل گل
5	0.460	2.223	2.612	A8	پتانسیل کارست
1	0.522	2.512	2.300	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۲۹) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۰

پهنه‌ی ۱۰					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.384	1.754	2.817	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
8	0.411	1.975	2.834	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.526	2.501	2.258	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.465	2.287	2.637	A4	سینه‌کار مختلط
3	0.475	2.326	2.570	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
7	0.414	1.979	2.802	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.468	2.313	2.632	A7	تشکیل گل
4	0.475	2.332	2.577	A8	پتانسیل کارست
2	0.501	2.433	2.427	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۳۰) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۱

پهنه‌ی ۱۱					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
8	0.421	2.007	2.763	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.504	2.432	2.392	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
3	0.493	2.407	2.479	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
9	0.380	1.736	2.837	A4	سینه‌کار مختلط
4	0.468	2.316	2.629	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
6	0.467	2.298	2.627	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.467	2.297	2.616	A7	تشکیل گل
7	0.422	2.002	2.740	A8	پتانسیل کارست
1	0.508	2.455	2.375	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۳۱) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۲

پهنه‌ی ۱۲					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
1	0.516	2.470	2.320	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.482	2.368	2.548	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
5	0.474	2.327	2.587	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
8	0.408	1.891	2.742	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.449	2.173	2.670	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.480	2.377	2.571	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.424	2.015	2.731	A7	تشکیل گل
9	0.351	1.586	2.934	A8	پتانسیل کارست
4	0.479	2.351	2.555	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۳۲) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۳

پهنه‌ی ۱۳					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
4	0.459	2.070	2.438	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
7	0.426	2.023	2.725	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.468	2.312	2.628	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
8	0.403	1.870	2.774	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.434	2.044	2.661	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.468	2.112	2.404	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.447	2.159	2.668	A7	تشکیل گل
9	0.359	1.613	2.881	A8	پتانسیل کارست
1	0.494	2.390	2.445	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۳۳-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۴

پهنه‌ی ۱۴					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
1	0.539	2.529	2.165	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
6	0.439	2.063	2.632	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
3	0.500	2.439	2.441	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
5	0.469	2.320	2.628	A4	سینه‌کار مختلط
7	0.431	2.040	2.699	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
9	0.378	1.729	2.846	A6	پدیده‌ی لهیدگی
4	0.496	2.382	2.424	A7	تشکیل گل
8	0.384	1.755	2.817	A8	پتانسیل کارست
2	0.527	2.499	2.241	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۳۴-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۵

پهنه‌ی ۱۵					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.360	1.615	2.869	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.534	2.537	2.217	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
4	0.494	2.385	2.447	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.442	2.137	2.703	A4	سینه‌کار مختلط
5	0.450	2.180	2.667	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
1	0.541	2.544	2.154	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.433	2.049	2.683	A7	تشکیل گل
8	0.367	1.637	2.817	A8	پتانسیل کارست
3	0.528	2.507	2.238	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۳۵-۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۶

پهنه‌ی ۱۶					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
4	0.474	2.339	2.591	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.475	2.126	2.345	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
3	0.475	2.353	2.597	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
8	0.411	1.970	2.824	A4	سینه‌کار مختلط
7	0.415	1.995	2.807	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
5	0.469	2.320	2.628	A6	پدیده‌ی لهیدگی
6	0.430	2.103	2.788	A7	تشکیل گل
9	0.345	1.569	2.976	A8	پتانسیل کارست
1	0.479	2.144	2.327	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۳۶) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۷

پهنه‌ی ۱۷					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
4	0.464	2.294	2.652	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
5	0.462	2.083	2.425	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.479	2.142	2.328	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
8	0.325	1.446	3.000	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.414	1.981	2.801	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
2	0.474	2.329	2.588	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.371	1.709	2.896	A7	تشکیل گل
9	0.321	1.434	3.036	A8	پتانسیل کارست
3	0.470	2.320	2.619	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۳۷) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۸

پهنه‌ی ۱۸					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.343	1.565	2.999	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
4	0.459	2.287	2.700	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.547	2.578	2.135	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
7	0.393	1.842	2.845	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.417	1.989	2.783	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.460	2.202	2.590	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.438	2.135	2.740	A7	تشکیل گل
8	0.348	1.575	2.954	A8	پتانسیل کارست
2	0.493	2.410	2.478	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۳۸) رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس شاخص شباهت برای پهنه‌ی ۱۹

پهنه‌ی ۱۹					
رتبه	CCi	Si-	Si*		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.319	1.431	3.057	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
4	0.475	2.329	2.570	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.522	2.505	2.290	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
5	0.463	2.290	2.660	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.432	2.116	2.777	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.487	2.362	2.483	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.397	1.852	2.814	A7	تشکیل گل
8	0.367	1.699	2.928	A8	پتانسیل کارست
2	0.504	2.435	2.397	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

پس از انجام محاسبات، سه ریسک اصلی در هر پهنه تعیین و در جدول (۶-۳۹) ارائه شده است.

جدول (۶-۳۹) ریسک‌های اصلی در هر پهنه

پهنه	اولویت‌بندی ریسک‌های زمین شناسی	پهنه	اولویت‌بندی ریسک‌های زمین شناسی	پهنه	اولویت‌بندی ریسک‌های زمین شناسی
پهنه ۲	۱- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	پهنه ۸	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۴	۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
	۲- سینه‌کار مختلط		۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل
پهنه ۳	۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله	پهنه ۹	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۵	۱- لهیدگی
	۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
	۳- لهیدگی		۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
پهنه ۴	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۰	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل	پهنه ۱۶	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها		۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
	۳- لهیدگی		۳- خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی		۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل
پهنه ۵	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۱	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۷	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل
	۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- لهیدگی
	۳- خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی		۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۳- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
پهنه ۶	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۲	۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله	پهنه ۱۸	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل
	۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۳- پتانسیل کارست		۳- لهیدگی		۳- لهیدگی
پهنه ۷	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۳	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۹	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل
	۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۳- پتانسیل کارست		۳- لهیدگی		۳- لهیدگی

۶-۶-۲- رتبه‌بندی ریسک با روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی

پس از تعیین پارامترهای (معیارها) موثر بر ریسک‌های زمین‌شناسی، به منظور تعیین وزن پارامترها و وزن ریسک‌های زمین‌شناسی از دیدگاه هر پارامتر، فرم‌های نظرسنجی جدیدی تهیه شده و برای تکمیل به کارشناسان برجسته‌ی تونل‌سازی مکانیزه که سابقه‌ی کارگاهی دارند ارسال گردیده است. لازم به ذکر است که کارشناسان در این نظرسنجی همان کارشناسانی هستند که فرم نظرسنجی پیشین را تکمیل نموده‌اند.

با توجه به فرم‌های نظرسنجی، ماتریس مقایسه‌ی زوجی متناظر با هر یک از پارامترها و ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از دیدگاه هر پارامتر از نظر متخصصان مختلف به صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. در ادامه روند حل مسئله برای پهنه‌ی اول به طور کامل توضیح داده خواهد شد که این روند برای ۱۸ پهنه‌ی دیگر به صورت مشابه صورت می‌پذیرد. نتایج نظرسنجی برای پهنه‌ی اول در جداول (۶-۴۰) تا (۶-۶۴) آورده شده است.

جدول (۶-۴۰) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص اول

	احتمال وقوع	میزان تأثیر	عدم اطمینان	توانایی سازمان
احتمال وقوع	1	0.143	3	0.111
میزان تأثیر	7	1	5	0.143
عدم اطمینان	0.333	0.2	1	0.333
توانایی سازمان	9	7	3	1

جدول (۶-۴۱) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص دوم

	احتمال وقوع	میزان تأثیر	عدم اطمینان	توانایی سازمان
احتمال وقوع	1	0.2	5	0.333
میزان تأثیر	5	1	9	0.2
عدم اطمینان	0.2	0.111	1	0.111
توانایی سازمان	3	5	9	1

جدول (۴۲-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص سوم

	احتمال وقوع	میزان تأثیر	عدم اطمینان	توانایی سازمان
احتمال وقوع	1	0.111	9	5
میزان تأثیر	9	1	7	0.111
عدم اطمینان	0.111	0.143	1	0.143
توانایی سازمان	0.2	9	7	1

جدول (۴۳-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص چهارم

	احتمال وقوع	میزان تأثیر	عدم اطمینان	توانایی سازمان
احتمال وقوع	1	3	0.111	5
میزان تأثیر	0.333	1	7	0.333
عدم اطمینان	9	0.143	1	9
توانایی سازمان	0.2	3	0.111	1

جدول (۴۴-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها از نظر متخصص پنجم

	احتمال وقوع	میزان تأثیر	عدم اطمینان	توانایی سازمان
احتمال وقوع	1	3	5	9
میزان تأثیر	0.333	1	0.111	3
عدم اطمینان	0.2	9	1	9
توانایی سازمان	0.111	0.333	0.111	1

جدول (۴۵-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص اول

نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
1	3	9	7	0.333	7	0.333	0.111	0.143
0.333	1	5	3	0.2	3	0.143	0.111	0.2
0.111	0.2	1	0.333	0.143	0.2	0.143	0.143	0.111
0.143	0.333	3	1	0.143	0.333	0.2	0.111	0.143
3	5	7	7	1	7	0.333	0.143	0.2
0.143	0.333	5	3	0.143	1	0.2	0.143	0.143
3	7	7	5	3	5	1	0.2	0.333
9	9	7	9	7	7	5	1	3
7	5	9	7	5	7	3	0.333	1

جدول (۴۶-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص دوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	5	7	7	0.2	5	0.2	0.111	0.143
نشت گاز	0.2	1	3	5	0.333	5	0.2	0.143	0.143
کارست	0.143	0.333	1	0.2	0.143	0.2	0.111	0.111	0.111
تشکیل گل	0.143	0.2	5	1	0.2	0.333	0.2	0.143	0.2
لهیدگی	5	3	7	5	1	5	0.333	0.111	0.143
تورم	0.2	0.2	5	3	0.2	1	0.111	0.111	0.2
سینه‌کار مختلط	5	5	9	5	3	9	1	0.2	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	9	7	9	7	9	9	5	1	5
زون خرد شده و گسله	7	7	9	5	7	5	7	0.2	1

جدول (۴۷-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص سوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.333	3	5	0.333	3	0.333	0.2	0.2
نشت گاز	3	1	7	7	0.2	0.333	0.2	0.14	0.143
کارست	0.333	0.143	1	0.2	0.143	0.333	0.143	0.11	0.143
تشکیل گل	0.2	0.143	5	1	0.143	0.2	0.143	0.11	0.111
لهیدگی	3	5	7	7	1	7	0.333	0.14	0.2
تورم	0.333	3	3	5	0.143	1	0.143	0.11	0.143
سینه‌کار مختلط	3	5	7	7	3	7	1	0.2	0.2
ریزش بلوک‌های سنگی	5	7	9	9	7	9	5	1	9
زون خرد شده و گسله	5	7	7	9	5	7	5	0.11	1

جدول (۴۸-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص چهارم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	5	7	0.333	0.333	0.333	3	0.2	0.2
نشت گاز	0.2	1	5	0.2	0.333	0.143	0.333	0.143	0.2
کارست	0.143	0.2	1	0.2	0.143	0.333	0.2	0.111	0.143
تشکیل گل	3	5	5	1	0.2	0.333	0.333	0.143	0.2
لهیدگی	3	3	7	5	1	0.2	0.333	0.143	0.111
تورم	3	7	3	3	5	1	0.111	0.143	0.2
سینه‌کار مختلط	0.333	3	5	3	3	9	1	0.2	0.333
ریزش بلوک‌های سنگی	5	7	9	7	7	7	5	1	0.333
زون خرد شده و گسله	5	5	7	5	9	5	3	3	1

جدول (۴۹-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع از دیدگاه متخصص پنجم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	9	7	3	3	0.2	0.333	0.2	0.143
نشت گاز	0.111	1	7	0.333	3	0.333	0.333	0.2	0.2
کارست	0.143	0.143	1	0.2	0.2	0.111	0.111	0.143	0.143
تشکیل گل	0.333	3	5	1	0.143	0.333	0.333	0.111	0.2
لهیدگی	0.333	0.333	5	7	1	0.333	0.2	0.111	0.333
تورم	5	3	9	3	3	1	0.2	0.143	0.333
سینه‌کار مختلط	3	3	9	3	5	5	1	0.333	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	5	5	7	9	9	7	3	1	0.2
زون خرد شده و گسله	7	5	7	5	3	3	7	5	1

جدول (۵۰-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تاثیر از دیدگاه متخصص اول

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.333	0.143	5	3	0.2	3	0.143	5
نشت گاز	3	1	3	9	3	3	0.333	0.2	0.143
کارست	7	0.333	1	0.111	0.111	0.2	3	3	0.143
تشکیل گل	0.2	0.111	9	1	3	0.2	5	0.2	0.111
لهیدگی	0.333	0.333	9	0.333	1	5	3	0.143	0.2
تورم	5	0.333	5	5	0.2	1	0.2	0.111	0.143
سینه‌کار مختلط	0.333	3	0.333	0.2	0.333	5	1	0.111	0.333
ریزش بلوک‌های سنگی	7	5	0.333	5	7	9	9	1	3
زون خرد شده و گسله	0.2	7	7	9	5	7	3	0.333	1

جدول (۵۱-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تاثیر از دیدگاه متخصص دوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	5	7	5	0.111	3	5	0.333	0.111
نشت گاز	0.2	1	9	9	3	3	0.111	0.143	0.2
کارست	0.14	0.111	1	0.2	0.143	0.333	3	0.2	3
تشکیل گل	0.2	0.111	5	1	0.333	0.143	0.143	0.333	0.143
لهیدگی	9	0.333	7	3	1	3	0.2	0.111	0.2
تورم	0.33	0.333	3	7	0.333	1	0.333	0.2	3
سینه‌کار مختلط	0.2	9	0.333	7	5	3	1	0.2	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	3	7	5	3	9	5	5	1	0.111
زون خرد شده و گسله	9	5	0.333	7	5	0.333	7	9	1

جدول (۵۲-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تاثیر از دیدگاه متخصص سوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	5	3	0.2	3	0.143	0.2	0.2	0.333
نشت گاز	0.2	1	9	5	0.111	3	0.333	0.14	3
کارست	0.333	0.111	1	3	0.143	3	3	0.2	0.143
تشکیل گل	5	0.2	0.333	1	0.143	5	0.111	0.11	0.2
لهیدگی	0.333	9	7	7	1	3	0.333	0.14	0.111
تورم	7	0.333	0.333	0.2	0.333	1	0.2	0.33	0.2
سینه‌کار مختلط	5	3	0.333	9	3	5	1	0.2	5
ریزش بلوک‌های سنگی	5	7	5	9	7	3	5	1	0.143
زون خرد شده و گسله	3	0.333	7	5	9	5	0.2	7	1

جدول (۵۳-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تاثیر از دیدگاه متخصص چهارم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.2	0.2	3	0.2	3	0.111	0.333	0.143
نشت گاز	5	1	0.111	5	0.2	0.333	0.143	3	3
کارست	5	9	1	3	5	5	3	0.111	0.2
تشکیل گل	0.333	0.2	0.333	1	3	0.111	3	0.333	3
لهیدگی	5	5	0.2	0.333	1	7	0.111	0.2	0.111
تورم	0.333	3	0.2	9	0.143	1	0.333	0.143	0.2
سینه‌کار مختلط	9	7	0.333	0.333	9	3	1	0.111	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	3	0.33	9	3	5	7	9	1	0.111
زون خرد شده و گسله	7	0.33	5	0.333	9	5	7	9	1

جدول (۵۴-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تاثیر از دیدگاه متخصص پنجم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.333	0.2	0.111	0.143	0.333	3	3	0.111
نشت گاز	3	1	0.143	3	0.143	0.2	0.143	0.111	0.143
کارست	5	7	1	0.2	0.111	3	0.111	0.2	3
تشکیل گل	9	0.333	5	1	0.143	0.2	0.2	0.143	0.333
لهیدگی	7	7	9	7	1	0.333	0.143	0.111	3
تورم	3	5	0.333	5	3	1	5	0.333	7
سینه‌کار مختلط	0.333	7	9	5	7	0.2	1	0.143	0.2
ریزش بلوک‌های سنگی	0.333	9	5	7	9	3	7	1	0.143
زون خرد شده و گسله	9	7	0.333	3	0.333	0.143	5	7	1

جدول (۵۵-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص اول

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.333	0.143	5	3	0.2	3	0.143	5
نشت گاز	3	1	9	9	3	3	0.111	0.143	0.2
کارست	7	0.111	1	5	0.2	7	0.333	0.111	5
تشکیل گل	0.2	0.111	0.2	1	0.2	0.333	5	0.143	0.2
لهیدگی	0.333	0.333	5	5	1	3	0.111	0.333	0.143
تورم	5	0.333	0.143	3	0.333	1	0.333	0.2	3
سینه‌کار مختلط	0.333	9	3	0.2	9	3	1	3	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	7	7	9	7	3	5	0.333	1	0.111
زون خرد شده و گسله	0.2	5	0.2	5	7	0.333	7	9	1

جدول (۵۶-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص دوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	5	3	5	0.2	7	0.333	0.143	0.2
نشت گاز	0.2	1	3	0.2	0.333	0.2	0.143	3	0.111
کارست	0.33	0.333	1	0.2	9	0.111	0.111	0.143	0.143
تشکیل گل	0.2	5	5	1	0.2	0.333	0.333	0.143	0.2
لهیدگی	5	3	0.111	5	1	5	9	0.2	5
تورم	0.14	5	9	3	0.2	1	3	0.111	0.333
سینه‌کار مختلط	3	7	9	3	0.111	0.333	1	0.111	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	7	0.333	7	7	5	9	9	1	3
زون خرد شده و گسله	5	9	7	5	0.2	3	7	0.333	1

جدول (۵۷-۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص سوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	9	5	5	0.2	0.143	3	0.11	0.143
نشت گاز	0.111	1	0.143	3	0.143	3	0.143	0.33	0.143
کارست	0.2	7	1	0.2	0.143	0.333	3	0.2	3
تشکیل گل	0.2	0.333	5	1	9	5	0.2	0.33	0.2
لهیدگی	5	7	7	0.111	1	7	0.143	0.11	0.333
تورم	7	0.333	3	0.2	0.143	1	0.111	0.14	0.2
سینه‌کار مختلط	0.333	7	0.333	5	7	9	1	0.2	5
ریزش بلوک‌های سنگی	9	3	5	3	9	7	5	1	0.111
زون خرد شده و گسله	7	7	0.333	5	3	5	0.2	9	1

جدول (۶-۵۸) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص چهارم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.14	0.2	3	0.111	9	0.333	0.111	0.2
نشت گاز	7	1	7	7	0.2	0.333	0.2	0.143	0.143
کارست	5	0.14	1	0.2	9	0.111	0.111	0.2	0.333
تشکیل گل	0.333	0.14	5	1	3	0.143	3	0.333	0.111
لهیدگی	9	5	0.111	0.333	1	7	5	0.143	5
تورم	0.111	3	9	7	0.143	1	0.111	7	3
سینه‌کار مختلط	3	5	9	0.333	0.2	9	1	9	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	9	7	5	3	7	0.143	0.111	1	7
زون خرد شده و گسله	5	7	3	9	0.2	0.333	7	0.143	1

جدول (۶-۵۹) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین از دیدگاه متخصص پنجم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	9	9	0.333	0.143	9	9	0.111	5
نشت گاز	0.111	1	3	0.111	9	7	5	3	3
کارست	0.111	0.333	1	0.2	0.143	0.333	0.143	0.333	0.143
تشکیل گل	3	9	5	1	7	0.2	0.333	0.111	0.2
لهیدگی	7	0.111	7	0.143	1	7	3	0.2	0.333
تورم	0.111	0.143	3	5	0.143	1	3	3	5
سینه‌کار مختلط	0.111	0.2	7	3	0.333	0.333	1	0.143	0.111
ریزش بلوک‌های سنگی	9	0.333	3	9	5	0.333	7	1	5
زون خرد شده و گسله	0.2	0.333	7	5	3	0.2	9	0.2	1

جدول (۶-۶۰) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص اول

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.2	0.111	0.333	5	0.143	3	0.111	3
نشت گاز	5	1	7	5	3	3	0.143	0.333	0.333
کارست	9	0.143	1	9	0.143	0.333	0.111	0.2	5
تشکیل گل	3	0.2	0.111	1	0.111	5	0.333	0.143	3
لهیدگی	0.2	0.333	7	9	1	7	0.2	0.111	0.2
تورم	7	0.333	3	0.2	0.143	1	5	0.2	0.143
سینه‌کار مختلط	0.333	7	9	3	5	0.2	1	3	0.111
ریزش بلوک‌های سنگی	9	3	5	7	9	5	0.333	1	0.2
زون خرد شده و گسله	0.333	3	0.2	0.333	5	7	9	5	1

جدول (۶-۶۱) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص دوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	9	7	3	3	0.2	0.333	0.2	0.143
نشت گاز	0.11	1	5	0.3333	0.111	7	0.143	0.2	0.2
کارست	0.14	0.2	1	0.2	0.143	3	0.2	0.333	0.143
تشکیل گل	0.33	3	5	1	5	0.2	0.143	0.111	0.111
لهیدگی	0.33	9	7	0.2	1	9	5	0.2	5
تورم	5	0.143	0.333	5	0.111	1	0.111	0.143	0.2
سینه‌کار مختلط	3	7	5	7	0.2	9	1	5	0.143
ریزش بلوک‌های سنگی	5	5	3	9	5	7	0.2	1	0.333
زون خرد شده و گسله	7	5	7	9	0.2	5	7	3	1

جدول (۶-۶۲) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص سوم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	0.143	9	5	0.111	7	3	3	0.111
نشت گاز	7	1	3	3	0.2	0.2	0.143	0.11	0.143
کارست	0.111	0.333	1	0.2	0.333	3	0.111	0.2	3
تشکیل گل	0.2	0.333	5	1	0.143	0.2	0.2	0.14	0.333
لهیدگی	9	5	3	7	1	7	5	0.33	0.111
تورم	0.143	5	0.333	5	0.143	1	0.111	0.14	0.2
سینه‌کار مختلط	0.333	7	9	5	0.2	9	1	3	7
ریزش بلوک‌های سنگی	0.333	9	5	7	3	7	0.333	1	0.143
زون خرد شده و گسله	9	7	0.333	3	9	5	0.143	7	1

جدول (۶-۶۳) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص چهارم

	نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	7	7	0.2	0.111	3	5	0.333	0.111
نشت گاز	0.143	1	3	9	3	3	0.111	0.143	0.2
کارست	0.143	0.33	1	0.2	0.143	0.333	3	0.2	3
تشکیل گل	5	0.11	5	1	0.333	0.2	3	5	0.2
لهیدگی	9	0.33	7	3	1	0.2	0.143	0.111	7
تورم	0.333	0.33	3	5	5	1	0.333	3	0.143
سینه‌کار مختلط	0.2	9	0.333	0.333	7	3	1	0.143	0.2
ریزش بلوک‌های سنگی	3	7	5	0.2	9	0.333	7	1	0.333
زون خرد شده و گسله	9	5	0.333	5	0.143	7	5	3	1

جدول (۶-۶۴) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک از دیدگاه متخصص پنجم

نشت و هجوم آب	نشت گاز	کارست	تشکیل گل	لهیدگی	تورم	سینه‌کار مختلط	ریزش بلوک‌های سنگی	زون خرد شده و گسله
نشت و هجوم آب	1	3	3	0.333	0.111	0.2	0.333	0.143
نشت گاز	0.333	1	3	0.143	7	0.2	3	3
کارست	0.333	0.333	1	0.2	0.2	0.111	0.111	9
تشکیل گل	0.143	0.2	5	0.143	0.333	0.2	0.2	0.143
لهیدگی	3	7	5	1	3	0.333	0.143	0.111
تورم	9	0.143	3	0.333	1	0.111	0.333	0.2
سینه‌کار مختلط	5	5	9	3	9	1	0.111	5
ریزش بلوک‌های سنگی	3	0.333	9	5	7	9	1	7
زون خرد شده و گسله	7	0.333	0.111	7	9	5	0.143	1

پس از نظرسنجی و ارزیابی نتایج، ماتریس مقایسه زوجی نهایی معیارها و گزینه‌ها از نظر معیارها شکل می‌گیرد که در جداول (۶-۶۵) تا (۶-۷۳) ارائه شده است.

جدول (۶-۶۵) ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها

توانایی	احتمال وقوع	میزان تأثیر	عدم اطمینان	توانایی
احتمال وقوع	1	1	1	9
میزان تأثیر	0.333	2.432	9	0.237
عدم اطمینان	0.111	0.34	9	0.809
توانایی	0.111	0.589	9	1

جدول (۶-۶۶) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع

نشت و هجوم آب	نشت گاز	پتانسیل کارست	تشکیل گل
نشت و هجوم آب	1	1	1
نشت گاز	0.339	3	1.476
پتانسیل کارست	0.161	0.333	0.222
تشکیل گل	0.143	0.333	1
لهیدگی	0.333	2.141	6.119
تورم	0.143	0.678	3.323
سینه‌کار مختلط	0.333	2.141	4.36
ریزش بلوک‌های سنگی	5	6.325	8.139
زون خرد شده و گسله	5	6.119	6.015

ادامه‌ی جدول (۶-۶۷) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع

زون خرد شده و گسله			ریزش بلوک‌های سنگی			سینه‌کار مختلط			تورم			لهیدگی		
0.2	0.163	0.143	0.2	0.158	0.2	3	0.467	0.2	7	1.476	0.2	3	0.467	0.2
0.2	0.175	0.143	0.2	0.145	0.2	0.333	0.229	0.143	5	0.75	0.143	3	0.421	0.2
0.143	0.129	0.111	0.143	0.123	0.143	0.2	0.138	0.111	0.333	0.218	0.111	0.2	0.152	0.143
0.2	0.166	0.111	0.143	0.123	0.143	0.333	0.229	0.143	0.333	0.301	0.2	0.2	0.163	0.143
0.333	0.184	0.111	0.143	0.129	0.143	0.333	0.301	0.2	7	1.748	0.2	1	1	1
0.333	0.194	0.143	0.143	0.129	0.143	0.2	0.148	0.111	1	1	1	5	0.572	0.143
0.333	0.214	0.143	0.333	0.222	0.333	1	1	1	9	6.766	5	5	3.323	3
9	1.552	0.2	1	1	1	5	4.514	3	9	7.74	7	9	7.740	7
1	1	1	5	0.644	5	7	4.663	3	7	5.165	3	9	5.431	3

جدول (۶-۶۸) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر

تشکیل گل			پتانسیل کارست			نشت گاز			نشت و هجوم آب					
5	1.108	5	7	0.654	0.143	5	0.889	0.2	1	1	1	نشت و هجوم آب		
9	5.711	3	9	1.31	0.111	1	1	1	5	1.125	0.2	نشت گاز		
3	0.525	0.111	1	1	1	9	0.763	0.111	7	1.528	0.143	پتانسیل کارست		
1	1	1	9	1.904	0.333	0.333	0.175	0.111	9	0.903	0.2	تشکیل گل		
7	1.748	0.333	9	3.801	0.2	9	2.036	0.333	9	2.036	0.333	لهیدگی		
9	3.16	0.2	5	0.803	0.2	5	0.889	0.333	7	1.635	0.333	تورم		
9	1.838	0.2	9	0.644	0.333	9	5.245	3	9	1	0.2	سینه‌کار مختلط		
9	4.904	3	9	3.272	0.333	9	3.743	0.333	7	2.537	0.333	ریزش بلوک‌های سنگی		
9	3.16	0.333	7	1.936	0.333	7	1.936	0.333	9	3.209	0.2	زون خرد شده و گسله		

ادامه‌ی جدول (۶-۶۹) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر

زون خرد شده و گسله			ریزش بلوک‌های سنگی			سینه‌کار مختلط			تورم			لهیدگی		
5	0.312	0.111	3	0.394	3	5	1	0.111	3	0.612	0.143	3	0.491	0.111
3	0.516	0.143	3	0.267	3	0.333	0.191	0.111	3	1.125	0.2	3	0.491	0.111
3	0.516	0.143	3	0.306	3	3	1.552	0.111	5	1.246	0.2	5	0.263	0.111
3	0.316	0.111	0.333	0.204	0.333	5	0.544	0.111	5	0.316	0.111	3	0.572	0.143
3	0.272	0.111	0.2	0.138	0.2	3	0.316	0.111	7	2.537	0.333	1	1	1
7	0.654	0.143	0.333	0.204	0.333	5	0.467	0.2	1	1	1	3	0.394	0.143
5	0.369	0.143	0.2	0.148	0.2	1	1	1	5	2.141	0.2	9	3.16	0.333
3	0.238	0.111	1	1	1	9	6.766	5	9	4.904	3	9	7.237	5
1	1	1	9	4.21	9	7	2.713	0.2	7	1.528	0.143	9	3.68	0.333

جدول (۶-۷۰) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین

تشکیل گل			پتانسیل کارست			نشت گاز			نشت و هجوم آب			
5	2.627	5	9	1.31	0.143	9	1.807	0.143	1	1	1	نشت و هجوم آب
9	1.332	0.111	9	2.408	0.143	1	1	1	7	0.553	0.111	نشت گاز
5	0.381	0.2	1	1	1	7	0.415	0.111	7	0.763	0.111	پتانسیل کارست
1	1	1	5	2.627	0.2	9	0.75	0.111	3	0.381	0.2	تشکیل گل
5	0.667	0.111	7	1.248	0.111	7	1.312	0.111	9	3.5	0.333	لهیدگی
7	2.29	0.2	9	2.532	0.143	5	0.75	0.143	7	0.573	0.111	تورم
5	1.246	0.2	9	3.554	0.333	9	3.38	0.2	3	0.644	0.111	سینه‌کار مختلط
9	5.245	3	9	5.431	3	7	1.748	0.333	9	8.139	7	ریزش بلوک‌های سنگی
9	5.624	5	7	1.579	0.2	9	3.743	0.333	7	1.476	0.2	زون خرد شده و گسله

ادامه‌ی جدول (۶-۷۱) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین

زون خرد شده و گسله			ریزش بلوک‌های سنگی			سینه‌کار مختلط			تورم			لهیدگی		
5	0.678	0.143	0.143	0.123	0.143	9	1.552	0.333	9	1.745	0.143	3	0.286	0.111
3	0.267	0.111	3	0.572	3	5	0.296	0.111	7	1.332	0.2	9	0.762	0.143
5	0.634	0.143	0.333	0.184	0.333	3	0.281	0.111	7	0.395	0.111	9	0.801	0.143
0.2	0.178	0.111	0.333	0.191	0.333	5	0.803	0.2	5	0.437	0.143	9	1.499	0.2
5	0.831	0.143	0.333	0.184	0.333	9	1.165	0.111	7	5.524	3	1	1	1
5	1.246	0.2	7	0.582	7	3	0.517	0.111	1	1	1	0.333	0.181	0.143
5	0.277	0.111	9	0.612	9	1	1	1	9	1.933	0.333	9	0.859	0.111
7	1.053	0.111	1	1	1	9	1.635	0.111	9	1.719	0.143	9	5.431	3
1	1	1	9	0.949	9	9	3.615	0.2	5	0.803	0.2	7	1.203	0.2

جدول (۶-۷۲) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک

تشکیل گل			پتانسیل کارست			نشت گاز			نشت و هجوم آب			
7	1.476	7	9	2.713	0.111	9	1.401	0.143	1	1	1	نشت و هجوم آب
9	2.954	0.333	7	3.936	3	1	1	1	7	0.714	0.111	نشت گاز
9	0.428	0.2	1	1	1	0.333	0.254	0.143	9	0.369	0.111	پتانسیل کارست
1	1	1	5	2.335	0.111	3	0.339	0.111	5	0.678	0.143	تشکیل گل
9	3.052	0.2	7	5.524	3	9	2.036	0.333	9	1.745	0.2	لهیدگی
5	2.371	0.2	5	1.38	0.333	5	0.408	0.143	9	1.719	0.143	تورم
7	2.809	0.333	9	4.139	0.333	9	6.882	5	5	0.803	0.2	سینه‌کار مختلط
9	3.38	0.2	9	5.078	3	9	3.16	0.333	9	2.667	0.333	ریزش بلوک‌های سنگی
9	3.16	0.333	7	0.444	0.111	7	2.809	0.333	9	4.21	0.333	زون خرد شده و گسله

ادامه‌ی جدول (۶-۷۳) ماتریس مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک

زون خرد شده و گسله			ریزش بلوک‌های سنگی			سینه‌کار مختلط			تورم			لهیدگی		
3	0.238	0.111	3	0.375	3	5	1.246	0.2	7	0.582	0.111	5	0.573	0.111
3	0.356	0.143	3	0.316	3	0.2	0.145	0.111	7	2.45	0.2	3	0.491	0.111
9	2.251	0.143	0.333	0.197	0.333	3	0.242	0.111	3	0.725	0.2	0.333	0.181	0.143
3	0.316	0.111	5	0.296	5	3	0.356	0.143	5	0.422	0.2	5	0.328	0.111
7	0.613	0.111	0.333	0.164	0.333	5	0.75	0.143	9	3.052	0.2	1	1	1
0.2	0.175	0.143	3	0.333	3	5	0.296	0.111	1	1	1	5	0.328	0.111
7	0.644	0.111	5	0.935	5	1	1	1	9	3.374	0.2	7	1.332	0.2
7	0.467	0.143	1	1	1	9	1.07	0.2	7	3.005	0.333	9	6.109	3
1	1	1	7	2.141	7	9	1.552	0.143	7	5.72	5	9	1.632	0.143

سپس در مرحله‌ی بعدی $\tilde{Z}$ و $\tilde{Z}_i$ و وزن فازی $(\tilde{W}_i)$ و غیر فازی (W) پارامترها محاسبه می‌گردد که در جداول (۶-۷۴) تا (۶-۷۸) ارائه شده است.

جدول (۶-۷۴) تعیین وزن معیارها

W	$\tilde{W}_i$			$\tilde{Z}_i$			$\tilde{Z}$			
0.2357	0.21588	0.28086	0.21588	3.94822	1.19740	0.19245	243	2.05567	0.00137	احتمال وقوع
0.2605	0.21588	0.28836	0.28412	3.94822	1.22937	0.253279	243	2.28418	0.00412	میزان تأثیر
0.1948	0.28412	0.12043	0.21588	5.19615	0.51344	0.19245	729	0.06949	0.00137	عدم اطمینان
0.2926	0.28412	0.31035	0.28412	5.19615	1.32310	0.253279	729	3.06455	0.00412	توانایی سازمان

جدول (۶-۷۵) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر احتمال وقوع

W	$\tilde{W}_i$			$\tilde{Z}_i$			$\tilde{Z}$			
0.06674	0.09598	0.06455	0.04798	2.24158	0.91707	0.48904	1428.84	0.45879	0.0016	نشت و هجوم آب
0.04006	0.06234	0.03885	0.02655	1.45596	0.55199	0.27058	29.4	0.00476	0.000008	نشت گاز
0.01394	0.01192	0.01406	0.01615	0.2785	0.19968	0.16464	0.00001	0.0000005	0.0000001	پتانسیل کارست
0.02755	0.03053	0.02781	0.02463	0.713	0.3951	0.25109	0.04762	0.00024	0.000004	تشکیل گل
0.06542	0.07391	0.07809	0.04850	1.72623	1.10936	0.49436	136.1111	2.54485	0.001764	لهیدگی
0.04843	0.06918	0.04751	0.03455	1.61562	0.67499	0.35216	75	0.02909	0.00008	تورم
0.12705	0.12044	0.13336	0.12769	2.81289	1.89457	1.30149	11025	314.48403	10.71429	سینه‌کار مختلط
0.30971	0.28279	0.33372	0.31477	6.60468	4.7411	3.20831	23914845	1210347.81	36015	ریزش بلوک‌های سنگی
0.28766	0.25291	0.26205	0.35918	5.90668	3.72281	3.66095	8751645	137353.28	118125	زون خرد شده و گسله

جدول (۶-۷۶) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر میزان تأثیر

W	$\tilde{w}_i$			$\tilde{Z}_i$			$\tilde{Z}$			
0.0868	0.10253	0.06212	0.10259	3.66095	0.66008	0.35248	118125	0.02379	0.00008	نشت و هجوم آب
0.0839	0.07871	0.07451	0.10062	2.81033	0.79175	0.34572	10935	0.12226	0.00007	نشت گاز
0.0776	0.10341	0.06734	0.06721	3.69239	0.71557	0.23091	127575	0.04919	0.000002	پتانسیل کارست
0.0562	0.06526	0.04694	0.05785	2.33013	0.49884	0.19875	2025	0.00191	0.0000005	تشکیل گل
0.0878	0.09583	0.09218	0.07665	3.42172	0.97958	0.26337	64297.8	0.83055	0.000006	لهیدگی
0.0804	0.094205	0.07206	0.07658	3.36369	0.7658	0.26313	55125	0.09058	0.000006	تورم
0.1059	0.11352	0.10318	0.10149	4.0532	1.09644	0.34869	295245	2.29017	0.000076	سینه‌کار مختلط
0.233	0.16995	0.25779	0.28857	6.06841	2.73936	0.99149	11160261	8686.52	0.92593	ریزش بلوک‌های سنگی
0.1719	0.17659	0.22389	0.12844	6.30532	2.37914	0.44131	15752961	2442.18	0.00063	زون خرد شده و گسله

جدول (۶-۷۷) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر عدم اطمینان از تخمین

W	$\tilde{w}_i$			$\tilde{Z}_i$			$\tilde{Z}$			
0.0882	0.08677	0.088	0.08997	3.4558	0.90337	0.28127	70296.43	0.40068	0.000011	نشت و هجوم آب
0.0875	0.12286	0.07373	0.07386	4.89295	0.75688	0.23091	1607445	0.08151	0.000002	نشت گاز
0.0617	0.08768	0.04636	0.05786	3.49183	0.47596	0.18089	77175	0.00125	0.000000	پتانسیل کارست
0.0623	0.05851	0.06031	0.06845	2.33013	0.61912	0.2139	2025	0.01337	0.000001	تشکیل گل
0.0987	0.09906	0.11287	0.08589	3.94518	1.1587	0.26852	231525	3.76482	0.000007	لهیدگی
0.0855	0.08768	0.07996	0.08909	3.49183	0.82088	0.2785	77175	0.16924	0.00001	تورم
0.1172	0.1375	0.10882	0.10754	5.47614	1.11708	0.3362	4428675	2.7086	0.000055	سینه‌کار مختلط
0.2213	0.16742	0.25845	0.25059	6.66747	2.65314	0.78338	26040609	6513.96	0.11111	ریزش بلوک‌های سنگی
0.1666	0.15252	0.1715	0.17674	6.07394	1.76061	0.55254	11252115	162.546	0.0048	زون خرد شده و گسله

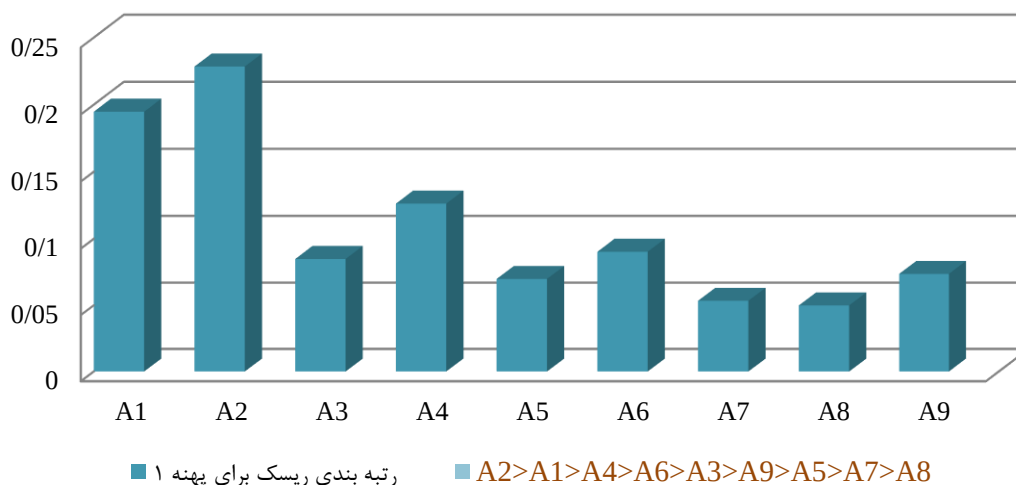
جدول (۶-۷۸) تعیین وزن گزینه‌ها از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک

W	$\tilde{w}_i$			$\tilde{Z}_i$			$\tilde{Z}$			
0.1004	0.11802	0.07952	0.108	4.5836	0.83965	0.35583	893025	0.20744	0.00009	نشت و هجوم آب
0.0867	0.07583	0.07744	0.11106	2.94512	0.8177	0.36591	16669.8	0.16344	0.00012	نشت گاز
0.049	0.0474	0.04124	0.06027	1.84106	0.43551	0.19857	243	0.00056	0.0000005	پتانسیل کارست
0.0689	0.0908	0.0486	0.07418	3.52661	0.51315	0.2444	84375	0.00247	0.000003	تشکیل گل
0.1119	0.1115	0.12673	0.09914	4.33069	1.33823	0.32664	535815	13.7647	0.00004	لهیدگی
0.0712	0.07593	0.05844	0.08143	2.94913	0.61707	0.26828	16875	0.01297	0.000007	تورم
0.1565	0.1465	0.168	0.15577	5.68993	1.77399	0.5132	6251175	174.001	0.00247	سینه‌کار مختلط
0.1762	0.17167	0.21053	0.15134	6.66747	2.2231	0.49861	26040609	1326.24	0.0019	ریزش بلوک‌های سنگی
0.1697	0.16235	0.18952	0.15881	6.30532	2.00124	0.52323	15752961	514.873	0.00294	زون خرد شده و گسله

در نهایت از ضرب وزن معیارها در وزن گزینه‌ها، وزن نهایی که همان رتبه‌ی هر گزینه می‌باشد به دست می‌آید که در جدول (۶-۷۹) و شکل (۶-۹۰) نمایش داده شده است.

جدول (۶-۷۹) تعیین وزن نهایی برای رتبه‌بندی ریسک

رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
2	0.1947	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
1	0.2284	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
5	0.0849	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
3	0.1262	A4	سینه‌کار مختلط
7	0.0699	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
4	0.0903	A6	پدیده‌ی لهیدگی
8	0.0534	A7	تشکیل گل
9	0.0499	A8	پتانسیل کارست
6	0.0737	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها



شکل (۶-۹۰) اولویت‌بندی ریسک زمین‌شناسی با روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی برای پهنه‌ی اول

نتایج حاصل از محاسبات برای پهنه‌ی اول نشان می‌دهد که ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی، برخورد با زون‌های خرد شده و گسله و سینه‌کار مختلط سه ریسک اصلی در این پهنه می‌باشند. به طور مشابه این فرآیند محاسباتی برای ۱۸ پهنه‌ی دیگر نیز صورت پذیرفته و ۳ ریسک اصلی (بالا) در هر پهنه تعیین و در جداول (۶-۸۰) تا (۶-۹۷) آورده شده است.

جدول (۶-۸۰) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۲

پهنه‌ی ۲			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.133331	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
1	0.159725	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
6	0.097086	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
2	0.137476	A4	سینه‌کار مختلط
4	0.106933	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
5	0.09879	A6	پدیده‌ی لهیدگی
8	0.072189	A7	تشکیل گل
9	0.070106	A8	پتانسیل کارست
7	0.090794	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۱) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۳

پهنه‌ی ۳			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
1	0.138345	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.130529	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
5	0.106051	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
4	0.11087	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.099871	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.116484	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.091829	A7	تشکیل گل
9	0.086469	A8	پتانسیل کارست
8	0.088312	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۲) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۴

پهنه‌ی ۴			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.132227	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.138742	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
5	0.099356	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.084698	A4	سینه‌کار مختلط
8	0.082727	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
4	0.122445	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.084044	A7	تشکیل گل
9	0.065487	A8	پتانسیل کارست
1	0.15393	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۳) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۵

پهنه‌ی ۵			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
7	0.089287	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
3	0.127834	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
4	0.113233	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
5	0.100348	A4	سینه‌کار مختلط
2	0.138743	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
6	0.090917	A6	پدیده‌ی لهیدگی
9	0.076279	A7	تشکیل گل
8	0.076901	A8	پتانسیل کارست
1	0.153956	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۴) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۶

پهنه‌ی ۶			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.115821	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
5	0.099678	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.127016	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
9	0.084477	A4	سینه‌کار مختلط
7	0.09319	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
6	0.094479	A6	پدیده‌ی لهیدگی
8	0.085908	A7	تشکیل گل
4	0.11788	A8	پتانسیل کارست
1	0.146965	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۵) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۷

پهنه‌ی ۷			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.115816	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
7	0.097209	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.126249	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
8	0.088798	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.100322	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
9	0.080379	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.103363	A7	تشکیل گل
4	0.111907	A8	پتانسیل کارست
1	0.140593	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۶) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۸

پهنه‌ی ۸			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.116477	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
9	0.081945	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.126992	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
5	0.106002	A4	سینه‌کار مختلط
7	0.096312	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
8	0.082894	A6	پدیده‌ی لهیدگی
6	0.102582	A7	تشکیل گل
4	0.114655	A8	پتانسیل کارست
1	0.142485	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۷) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۹

پهنه‌ی ۹			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
3	0.117132	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
8	0.086165	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
2	0.129095	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
5	0.107708	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.101279	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
9	0.081981	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.094357	A7	تشکیل گل
4	0.110259	A8	پتانسیل کارست
1	0.141135	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۸) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۰

پهنه‌ی ۱۰			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
8	0.08408	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
9	0.076912	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.151345	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.106728	A4	سینه‌کار مختلط
4	0.111395	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
7	0.087198	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.110199	A7	تشکیل گل
3	0.118802	A8	پتانسیل کارست
2	0.123345	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۸۹) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۱

پهنه‌ی ۱۱			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
6	0.091084	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.125039	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
3	0.12019	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
8	0.08666	A4	سینه‌کار مختلط
4	0.118638	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
5	0.111636	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.089128	A7	تشکیل گل
9	0.080737	A8	پتانسیل کارست
1	0.148167	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۰) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۲

پهنه‌ی ۱۲			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
1	0.137482	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
3	0.124491	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
5	0.105409	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
7	0.100746	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.102178	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
2	0.126253	A6	پدیده‌ی لهیدگی
8	0.086629	A7	تشکیل گل
9	0.076172	A8	پتانسیل کارست
4	0.110048	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۱) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۳

پهنه‌ی ۱۳			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
2	0.135041	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
8	0.084905	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
4	0.110188	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
7	0.09631	A4	سینه‌کار مختلط
5	0.097979	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
1	0.150429	A6	پدیده‌ی لهیدگی
6	0.097911	A7	تشکیل گل
9	0.081712	A8	پتانسیل کارست
3	0.114643	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۲) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۴

پهنه‌ی ۱۴			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
1	0.15118	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
7	0.089994	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
3	0.116754	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
5	0.103617	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.094358	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
8	0.087267	A6	پدیده‌ی لهیدگی
4	0.104863	A7	تشکیل گل
9	0.085905	A8	پتانسیل کارست
2	0.130605	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۳) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۵

پهنه‌ی ۱۵			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.079979	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
1	0.136981	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
4	0.111925	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
7	0.089948	A4	سینه‌کار مختلط
5	0.104061	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
2	0.136211	A6	پدیده‌ی لهیدگی
6	0.100912	A7	تشکیل گل
8	0.081919	A8	پتانسیل کارست
3	0.124972	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۴) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۶

پهنه‌ی ۱۶			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
4	0.115851	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
2	0.132119	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
3	0.121097	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
8	0.087691	A4	سینه‌کار مختلط
7	0.09358	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
5	0.110566	A6	پدیده‌ی لهیدگی
6	0.093656	A7	تشکیل گل
9	0.066619	A8	پتانسیل کارست
1	0.143875	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۵) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۷

پهنه‌ی ۱۷			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
5	0.107762	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
3	0.122887	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.142046	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
7	0.093737	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.095629	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
2	0.12849	A6	پدیده‌ی لهیدگی
8	0.085157	A7	تشکیل گل
9	0.079087	A8	پتانسیل کارست
4	0.11214	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۶) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۸

پهنه‌ی ۱۸			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.081005	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
3	0.130333	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.14454	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
6	0.089742	A4	سینه‌کار مختلط
5	0.096378	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
4	0.123644	A6	پدیده‌ی لهیدگی
7	0.089266	A7	تشکیل گل
8	0.082927	A8	پتانسیل کارست
2	0.131827	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

جدول (۶-۹۷) رتبه‌بندی ریسک بر اساس وزن نهایی برای پهنه‌ی ۱۹

پهنه‌ی ۱۹			
رتبه	وزن نهایی		ریسک‌های زمین‌شناسی
9	0.082366	A1	برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
4	0.115588	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
1	0.14627	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل
7	0.095775	A4	سینه‌کار مختلط
6	0.097497	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
3	0.115881	A6	پدیده‌ی لهیدگی
5	0.099483	A7	تشکیل گل
8	0.084527	A8	پتانسیل کارست
2	0.134397	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

پس از انجام محاسبات، سه ریسک اصلی در هر پهنه تعیین و در جدول (۶-۹۸) ارائه شده است.

جدول (۶-۹۸) ریسک‌های اصلی در هر پهنه

پهنه	اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی	پهنه	اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی	پهنه	اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی
پهنه ۲	۱- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	پهنه ۸	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۴	۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله
	۲- سینه‌کار مختلط		۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل
پهنه ۳	۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله	پهنه ۹	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۵	۱- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
	۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- لهیدگی
	۳- لهیدگی		۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
پهنه ۴	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۰	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل	پهنه ۱۶	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها		۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
	۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- پتانسیل کارست		۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل
پهنه ۵	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۱	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۷	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل
	۲- خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی		۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۲- لهیدگی
	۳- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۳- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
پهنه ۶	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۲	۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله	پهنه ۱۸	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل
	۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- لهیدگی		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی		۳- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی
پهنه ۷	۱- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	پهنه ۱۳	۱- لهیدگی	پهنه ۱۹	۱- نشت و هجوم آب به داخل تونل
	۲- نشت و هجوم آب به داخل تونل		۲- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۲- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها
	۳- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله		۳- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها		۳- لهیدگی

۶-۳- استراتژی اولویت‌بندی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی

به منظور دستیابی به نظری واحد در رتبه‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی با توجه به روش‌های ذکر شده از تکنیک استراتژی اولویت‌بندی استفاده می‌گردد. این تکنیک شامل روش‌های میانگین رتبه‌ها، بردا، کپلند و در نهایت مرحله‌ی ادغام است. نتایج حاصل از این روش‌ها برای پهنه‌ی اول با توجه به جدول (۶-۹۹) در جدول (۶-۱۰۰) ارائه شده است.

جدول (۶-۹۹) قاعده‌ی اکثریت

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	$\sum C$	$\sum C - \sum R$
A1	-	X	M	M	M	M	M	M	M	7	7
A2	X	-	M	M	M	M	M	M	M	7	7
A3	X	X	-	X	X	X	X	X	X	0	-4
A4	X	X	M	-	M	X	X	M	X	3	1
A5	X	X	X	X	-	X	X	X	X	0	-5
A6	X	X	M	X	M	-	M	M	M	5	3
A7	X	X	X	X	X	X	-	M	X	1	-3
A8	X	X	X	X	X	X	X	-	X	0	-6
A9	X	X	X	X	M	X	M	M	-	3	0
$\sum R$	0	0	4	2	5	2	4	6	3	-	-

جدول (۶-۱۰۰) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک

ادغام	روش			پهنه‌ی ۱			
	کپلند	بردا	میانگین رتبه	رتبه		مخاطرات زمین‌شناسی	
				FDAHP	FTOPSIS		
1.5	1.5	1.5	1.5	2	1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	A1
1.5	1.5	1.5	1.5	1	2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	A2
7.333333	7	8	7	5	9	نشت و هجوم آب به داخل تونل	A3
4.333333	4	4.5	4.5	3	6	سینه‌کار مختلط	A4
7.833333	8	8	7.5	7	8	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	A5
3.166667	3	3	3.5	4	3	پدیده لهیدگی	A6
6.166667	6	6	6.5	8	5	تشکیل گل	A7
8.333333	9	8	8	9	7	پتانسیل کارست	A8
4.833333	5	4.5	5	6	4	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	A9

بنابراین اولویت‌بندی برای پهنه‌ی اول به صورت $A1=A2>A6>A4>A9>A7>A3>A5>A8$ می‌باشد.

محاسبات مشابهی برای سایر پهنه‌ها صورت پذیرفته که در جدول (۶-۱۰۱) زیر ارائه شده است.

جدول (۶-۱۰) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک

مخاطرات زمین‌شناسی	رتبه‌ی FTOPSIS	رتبه‌ی FDAHP	میانگین رتبه	بردا	کپ‌لند	ادغام
A1	3	3	3	3	3	3
A2	1	1	1	1	1	1
A3	8	6	7	7.5	7	7.167
A4	2	2	2	2	2	2
A5	4	4	4	4	4	4
A6	5	5	5	5	5	5
A7	7	8	7.5	7.5	8	7.667
A8	9	9	9	9	9	9
A9	6	7	6.5	6	6	6.167
A1	1	1	1	1	1	1
A2	2	2	2	2	2	2
A3	5	5	5	5	5	5
A4	4	4	4	4	4	4
A5	8	6	7	7.5	7	7.167
A6	3	3	3	3	3	3
A7	6	7	6.5	6	6	6.167
A8	9	9	9	9	9	9
A9	7	8	7.5	7.5	8	7.667
A1	4	3	3.5	3.5	3.5	3.5
A2	2	2	2	2	2	2
A3	5	5	5	5	5	5
A4	6	6	6	6	6	6
A5	9	8	8.5	8.5	8.5	8.5
A6	3	4	3.5	3.5	3.5	3.5
A7	7	7	7	7	7	7
A8	8	9	8.5	8.5	8.5	8.5
A9	1	1	1	1	1	1
A1	9	7	8	8	8	8
A2	2	3	2.5	2.5	2.5	2.5
A3	4	4	4	4	4	4
A4	6	5	5.5	5.5	5.5	5.5
A5	3	2	2.5	2.5	2.5	2.5
A6	5	6	5.5	5.5	5.5	5.5
A7	7	9	8	8	8	8
A8	8	8	8	8	8	8
A9	1	1	1	1	1	1

ادامه‌ی جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک

مخاطرات زمین شناسی	رتبه‌ی FTOPSIS	رتبه‌ی FDAHP	میانگین رتبه	بردا	کپ‌لند	ادغام
A1 برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	4	3	3.5	3.5	3.5	3.5
A2 ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	5	5	5	5	5	5
A3 نشست و هجوم آب به داخل تونل	2	2	2	2	2	2
A4 سینه‌کار مختلط	9	9	9	9	9	9
A5 خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	7	7	7	7	7	7
A6 پدیده لهیدگی	6	6	6	6	6	6
A7 تشکیل گل	8	8	8	8	8	8
A8 پتانسیل کارست	3	4	3.5	3.5	3.5	3.5
A9 نشست گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	1	1	1	1	1	1
A1 برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	4	3	3.5	3.5	3.5	3.5
A2 ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	8	7	7.5	7	8	7.5
A3 نشست و هجوم آب به داخل تونل	2	2	2	2	2	2
A4 سینه‌کار مختلط	9	8	8.5	8.5	9	8.667
A5 خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	6	6	6	5.5	5.5	5.667
A6 پدیده لهیدگی	5	9	7	8.5	7	7.5
A7 تشکیل گل	7	5	6	5.5	5.5	5.667
A8 پتانسیل کارست	3	4	3.5	3.5	3.5	3.5
A9 نشست گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	1	1	1	1	1	1
A1 برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	3	3	3	3	3	3
A2 ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	8	9	8.5	8.5	8.5	8.5
A3 نشست و هجوم آب به داخل تونل	2	2	2	2	2	2
A4 سینه‌کار مختلط	5	5	5	5	5	5
A5 خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	6	7	6.5	6.5	6.5	6.5
A6 پدیده لهیدگی	9	8	8.5	8.5	8.5	8.5
A7 تشکیل گل	7	6	6.5	6.5	6.5	6.5
A8 پتانسیل کارست	4	4	4	4	4	4
A9 نشست گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	1	1	1	1	1	1
A1 برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	3	3	3	3	3	3
A2 ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	9	8	8.5	8.5	8.5	8.5
A3 نشست و هجوم آب به داخل تونل	2	2	2	2	2	2
A4 سینه‌کار مختلط	6	5	5.5	5.5	6	5.667
A5 خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	4	6	5	5.5	5	5.167
A6 پدیده لهیدگی	8	9	8.5	8.5	8.5	8.5
A7 تشکیل گل	7	7	7	7	7	7
A8 پتانسیل کارست	5	4	4.5	4	4	4.167
A9 نشست گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	1	1	1	1	1	1

ادامه‌ی جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک

مخاطرات زمین شناسی	رتبه‌ی FTOPSIS	رتبه‌ی FDAHP	میانگین رتبه	بردا	کپ‌لند	ادغام
بهنه‌ی ۱۰	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	9	8	8.5	8.5
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	8	9	8.5	8.5
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	1	1	1	1
	A4	سینه‌کار مختلط	6	6	6	6
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	3	4	3.5	3.5
	A6	پدیده‌ی لهیدگی	7	7	7	7
	A7	تشکیل گل	5	5	5	5
	A8	پتانسیل کارست	4	3	3.5	3.5
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	2	2	2	2
بهنه‌ی ۱۱	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	8	6	7	7
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	2	2	2	2
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	3	3	3	3
	A4	سینه‌کار مختلط	9	8	8.5	8.667
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	4	4	4	4
	A6	پدیده‌ی لهیدگی	6	5	5	5.167
	A7	تشکیل گل	5	7	6	6
	A8	پتانسیل کارست	7	9	8	8.167
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	1	1	1	1
بهنه‌ی ۱۲	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	1	1	1	1
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	2	3	2.5	2.5
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	5	5	5	5
	A4	سینه‌کار مختلط	8	7	7.5	7.333
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	6	6	6	6
	A6	پدیده‌ی لهیدگی	3	2	2.5	2.5
	A7	تشکیل گل	7	8	7.5	7.667
	A8	پتانسیل کارست	9	9	9	9
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	4	4	4	4
بهنه‌ی ۱۳	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	4	2	3	3.333
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	7	8	7.5	7.5
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	2	4	3	3.333
	A4	سینه‌کار مختلط	8	7	7.5	7.5
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	6	5	5.5	5.5
	A6	پدیده‌ی لهیدگی	3	1	2	1.667
	A7	تشکیل گل	5	6	5.5	5.5
	A8	پتانسیل کارست	9	9	9	9
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	1	3	2	1.667

ادامه‌ی جدول (۶-۱۰) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک

مخاطرات زمین شناسی	رتبه‌ی FTOPSIS	رتبه‌ی FDAHP	میانگین رتبه	بردا	کپ‌لند	ادغام
تهی‌ی ۱۴	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	1	1	1	1
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	6	7	6.5	6.5
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	3	3	3	3
	A4	سینه‌کار مختلط	5	5	5	5
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	7	6	6.5	6.5
	A6	پدیده لهیدگی	9	8	8.5	8.5
	A7	تشکیل گل	4	4	4	4
	A8	پتانسیل کارست	8	9	8.5	8.5
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	2	2	2	2
تهی‌ی ۱۵	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	9	9	9	9
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	2	1	1.5	1.5
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	4	4	4	4
	A4	سینه‌کار مختلط	6	7	6.5	6.5
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	5	5	5	5
	A6	پدیده لهیدگی	1	2	1.5	1.5
	A7	تشکیل گل	7	6	6.5	6.5
	A8	پتانسیل کارست	8	8	8	8
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	3	3	3	3
تهی‌ی ۱۶	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	4	4	4	4
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	2	2	2	2
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	3	3	3	3
	A4	سینه‌کار مختلط	8	8	8	8
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	7	7	7	7
	A6	پدیده لهیدگی	5	5	5	5
	A7	تشکیل گل	6	6	6	6
	A8	پتانسیل کارست	9	9	9	9
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	1	1	1	1
تهی‌ی ۱۷	A1	برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله	4	5	4.5	4.667
	A2	ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی	5	3	4.5	4.167
	A3	نشت و هجوم آب به داخل تونل	1	1	1	1
	A4	سینه‌کار مختلط	8	7	7.5	7.5
	A5	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	6	6	6	6
	A6	پدیده لهیدگی	2	2	2	2
	A7	تشکیل گل	7	8	7.5	7.5
	A8	پتانسیل کارست	9	9	9	9
	A9	نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها	3	4	3.5	3.167

ادامه‌ی جدول (۶-۱۰۱) استراتژی اولویت‌بندی برای به دست آوردن رتبه‌ای واحد برای اولویت‌بندی ریسک

مخاطرات زمین شناسی	رتبه‌ی FTOPSIS	رتبه‌ی FDAHP	میانگین رتبه	بردا	کپ‌لند	ادغام	
A1	9	9	9	9	9	9	پهنه‌ی ۱۸
A2	4	3	3.5	3.5	3.5	3.5	
A3	1	1	1	1	1	1	
A4	7	6	6.5	6.5	7	6.667	
A5	6	5	5.5	5	5	5.167	
A6	3	4	3.5	3.5	3.5	3.5	
A7	5	7	6	6.5	6	6.167	
A8	8	8	8	8	8	8	
A9	2	2	2	2	2	2	
A1	9	9	9	9	9	9	پهنه‌ی ۱۹
A2	4	4	4	4	4	4	
A3	1	1	1	1	1	1	
A4	5	7	6	6	6	6	
A5	6	6	6	6	6	6	
A6	3	3	3	3	3	3	
A7	7	5	6	6	6	6	
A8	8	8	8	8	8	8	
A9	2	2	2	2	2	2	

در نهایت با توجه به نتایج محاسبات، سه ریسک اصلی (بالا) در هر پهنه با روش‌های شباهت به گزینه‌ی

ایده‌آل فازی، تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و تکنیک ادغام تعیین گردیده است که در جدول (۶-۱۰۲) قابل مشاهده است.

جدول (۶-۱۰۲) رتبه‌بندی ریسک‌های اصلی در هر پهنه

پهنه	روش		استراتژی اولویت‌بندی (ادغام)
	شبهات به گزینه‌ی ایده‌آل فازی	تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی	
پهنه‌ی ۱	$A1 > A2 > A6$	$A2 > A1 > A4$	$A1 = A2 > A6 > A4$
پهنه‌ی ۲	$A2 > A4 > A1$	$A2 > A4 > A1$	$A2 > A4 > A1$
پهنه‌ی ۳	$A1 > A2 > A6$	$A1 > A2 > A6$	$A1 > A2 > A6$
پهنه‌ی ۴	$A9 > A2 > A6$	$A9 > A2 > A1$	$A9 > A2 > A1 = A6$
پهنه‌ی ۵	$A9 > A2 > A5$	$A9 > A5 > A2$	$A9 > A2 = A5 > A3$
پهنه‌ی ۶	$A9 > A3 > A8$	$A9 > A3 > A1$	$A9 > A3 > A1 = A8$
پهنه‌ی ۷	$A9 > A3 > A8$	$A9 > A3 > A1$	$A9 > A3 > A1 = A8$
پهنه‌ی ۸	$A9 > A3 > A1$	$A9 > A3 > A1$	$A9 > A3 > A1$
پهنه‌ی ۹	$A9 > A3 > A1$	$A9 > A3 > A1$	$A9 > A3 > A1$
پهنه‌ی ۱۰	$A3 > A9 > A5$	$A3 > A9 > A8$	$A3 > A9 > A5 = A8$
پهنه‌ی ۱۱	$A9 > A2 > A3$	$A9 > A2 > A3$	$A9 > A2 > A3$
پهنه‌ی ۱۲	$A1 > A2 > A6$	$A1 > A6 > A2$	$A1 > A2 = A6 > A9$
پهنه‌ی ۱۳	$A9 > A3 > A6$	$A6 > A1 > A9$	$A9 = A6 > A1 = A3 > A5 = A7$
پهنه‌ی ۱۴	$A1 > A9 > A3$	$A1 > A9 > A3$	$A1 > A9 > A3$
پهنه‌ی ۱۵	$A6 > A2 > A9$	$A2 > A6 > A9$	$A2 = A6 > A9 > A3$
پهنه‌ی ۱۶	$A9 > A2 > A3$	$A9 > A2 > A3$	$A9 > A2 > A3$
پهنه‌ی ۱۷	$A3 > A6 > A9$	$A3 > A6 > A2$	$A3 > A6 > A9$
پهنه‌ی ۱۸	$A3 > A9 > A6$	$A3 > A9 > A2$	$A3 > A9 > A2 = A6$
پهنه‌ی ۱۹	$A3 > A9 > A6$	$A3 > A9 > A6$	$A3 > A9 > A6$

۶-۷- مقایسه‌ی نتایج رتبه‌بندی ریسک با نتایج واقعی حاصل از حفاری

به منظور مقایسه‌ی نتایج رتبه‌بندی ریسک با نتایج واقعی حاصل از حفاری، گزارش پیشرفت کار ماهانه مترآژ (۰۲+۹۰۰ تا ۰۶+۸۵۰) مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه رویارویی با هر مخاطره و مقایسه‌ی آن با مطالعات و نتایج رتبه‌بندی بیان شده است. لازم به ذکر است مترآژی که برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است پهنه‌های ۵-۱۲ را شامل می‌شود.

۶-۷-۱- برخورد با زون‌های خرد شده و گسله

با توجه به نتایج گزارشات ارایه شده بعد از حفاری، در برخی قسمت‌های مسیر تونل، مانند مترآژ (۰۶+۰۵۰ تا ۰۶+۱۷۵) به دلیل چین‌خوردگی شدید لایه‌ها در محل محور چین‌ها سبب تمرکز شکستگی‌ها و سیستم‌های ناپیوستگی شده است. لازم به ذکر است که در فواصل مترآژ (۰۴+۵۹۰ تا ۰۶+۶۱۵) در سازندهای گورپی و ایلام با چندین زون خرد شده و گسله برخورد شده است که مشکلات زیادی مانند کم شدن نرخ پیشروی و انتقال آب از این زون‌های گسلی و منافذ کارستی به درون تونل را در جریان حفاری ایجاد کرده‌اند که برخی از آنها در بحث مطالعات شناسایی شده‌اند.

با مقایسه نتایج حاصل از حفاری و نتایج محاسبات انجام شده می‌توان به این نکته اشاره کرد که در پهنه‌های ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۲ این مخاطره در ردیف سه ریسک اول در ناحیه محاسبه شده است که با واقعیت تناسب مناسبی دارد.

۶-۷-۲- ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی

با توجه به نتایج گزارشات بعد از حفاری در مترآژ (۰۲+۹۱۰ تا ۰۳+۱۷۵) تونل نوسود با سقوط بلوک‌های بزرگ روبرو شده که این مسئله موجب مشکلات اندکی در این مترآژ شده است. در قسمتی از سازند ایلام این مشکل تکرار شده که با تمهیدات لازم عبور از ناحیه‌ی مورد نظر با اندکی تأخیر مواجه شده است. از طرفی در

واحدهایی که شامل زون‌های خرد شده و گسله می‌باشد حجم زیادی از مصالح خرد شده به صورت روباره اضافی بر روی دستگاه ریخته شده و باعث گیرافتادن دستگاه و کله‌ی حفار در این نواحی شده است. به عنوان مثال در متراژ (۰۵+۹۱۵) پروژه با مشکل جاری شدن زمین مواجه بوده که این مشکل باعث توقف چندین روزه‌ی عملیات حفاری شده است. لازم به ذکر است این ریزش‌ها در متراژ (۰۵+۹۱۰ تا ۰۶+۵۲۵) چندین بار اتفاق افتاده است که وقفه‌ای چند روزه در عملیات حفاری را موجب شده است.

لازم به ذکر است پهنه‌های ۵، ۱۱، ۱۲ در محاسبات مستعد ریزش محاسبه شده‌اند که در واقعیت نتایجی مشابه و نزدیک به هم داشته‌اند.

۶-۷-۳- نشت و هجوم آب به داخل تونل

طبق گزارشات، هجوم آب در متراژ (۰۲+۹۰۰ تا ۰۳+۷۱۵) با جریانی کم و متوسط همراه بوده است که این واحدها، واحدهای گورپی تشکیل دهنده‌ی مسیر تونل می‌باشند. در حالی که وقتی دستگاه حفاری تونل واحدهای شیلی متعلق به سازند گورپی را پشت سر نهاده و وارد تشکیلات آهکی ایلام گردید (متراژ ۰۳+۸۱۵ تا ۰۵+۰۸۵)، ناگهان حجم زیادی از آب همراه با گاز وارد تونل شده و حفاری در این متراژ را مختل کرده است. لازم به ذکر است که دبی آب خروجی در این نواحی ۱۲۲ تا ۴۰۶ لیتر بر ثانیه گزارش شده است. با غیر قابل کنترل بودن مشکل به وجود آمده وقفه‌ای چند ماهه روند حفاری را قطع کرده است. در ضمن می‌توان گفت در مابقی مسیر میزان آب ورودی قابل کنترل بوده است. شکل‌های (۶-۱۰) و (۶-۱۱) مشکل به وجود آمده در این ناحیه را به تصویر می‌کشند.

لازم به ذکر است که محاسبات به واقعیت نزدیک بوده و در اکثر پهنه‌ها به غیر از پهنه‌های ۵ و ۱۲ وجود آب به عنوان سه ریسک اصلی در هر پهنه مشخص شده است که این نشانه‌ی نزدیکی بسیار بالای محاسبات با واقعیت بوده است در حالی که دبی ورودی بسیار بالا با این شدت پیش‌بینی نشده است.



شکل (۶-۱۰) نمایی از هجوم آب در هنگام تخلیه‌ی نخاله‌ی حاصل از حفاری بر روی نوار نقاله



شکل (۶-۱۱) هجوم آب به داخل تونل و بالا آمدن سطح آب در محدوده‌ی ریل‌گذاری

۶-۷-۴- سینه‌کار مختلط

طبق گزارشات مترآژ (۰۲+۹۰۰ تا ۰۳+۷۹۵) که از سازند گورپی تشکیل شده است، سنگ‌های این نواحی از نظر مقاومتی نزدیک به هم می‌باشد و حفاری در این نواحی با چنین مشکلی مواجه نشده است. با تغییر در

برخی واحدها مانند ورود از سازند گورپی به ایلام و از سازند ایلام به گورپی که متشکل از تناوب لایه‌های سخت آهکی با واحدهای نامقاوم شیلی و مارنی می‌باشند، حفاری با این مشکل هر چند به صورت جزئی روبرو شده است که بر روند حفاری تأثیر به خصوصی نداشته است.

اگر ۹ ریسک معرفی شده را به ۳ دسته‌ی با اهمیت، کم اهمیت و با اهمیت متوسط تقسیم کنیم، با توجه به محاسبات، این مخاطره در پهنه‌های مختلف در دو دسته‌ی کم اهمیت و با اهمیت متوسط قرار گرفته است که نزدیکی جواب محاسبات به واقعیت را نشان می‌دهد.

۶-۷-۵- تورم سازندهای شیلی و مارنی

در ابتدای مسیر و پس از ورود آب به درون تونل که با آزادسازی تنش‌ها همراه بوده است پروژه با مشکل تورم روبرو شده که وقفه‌ای کوتاه در روند حفاری ایجاد کرده است. لازم به ذکر است با توجه به وجود سنگ‌های شیلی و مارنی، در مترژ (۰۵+۳۵۰ تا ۰۵+۴۵۷) و مترژ (۰۵+۶۲۹ تا ۰۵+۸۴۲) پدیده‌ی تورم در تونل رخ داده که این مشکل تأثیری چندانی بر حفاری نداشته و پروژه به کار خود با همان سرعت قبلی ادامه داده است.

در میان پهنه‌ها فقط دو پهنه‌ی ۵ و ۱۰ طبق محاسبات مستعد تورم می‌باشند و خود را در بین سه ریسک اصلی در پهنه معرفی کرده‌اند که این نتایج نزدیکی نسبتاً خوبی با واقعیت دارد.

۶-۷-۶- پدیده‌ی لهیدگی (مچاله‌شوندگی)

با توجه به گزارشات حفاری، پدیده‌ی لهیدگی در سازند گورپی که ابتدای مسیر حفاری را تشکیل می‌دهد بسیار کم رخ داده است و حفاری را با مشکل روبرو نکرده است ولی در مترژهای (۰۶+۱۹۰ تا ۰۶+۲۱۷) و (۰۶+۵۱۵ تا ۰۶+۵۳۵) به علت نزدیکی به گسل پدیده‌ی لهیدگی اتفاق افتاده است. با این حال در کل مسیر این مسئله مشکلات جدی را برای حفاری ایجاد ننموده است.

با توجه به محاسبات، فقط پهنه‌ی ۱۲ مستعد پدیده‌ی لهیدگی معرفی شده است که این مسئله در واقعیت هم اتفاق افتاده است که این خود دلیلی بر نزدیکی محاسبات به واقعیت بوده است.

۶-۷-۷- تشکیل گل (انسداد)

بر اساس گزارشات وجود سنگ‌های شیلی و ترکیبات آن در سازندهای پایده و گورپی مشکلات جدی برای پیشروی ماشین تونل‌زنی به وجود آورده است به طوری که چند ساعت از هر شیفت کاری صرف تمیزکاری کله‌ی حفار و اسکرپرها و ورود مصالح حفاری به داخل کاترهد شده است.

با توجه به محاسبات اهمیت این ریسک در پهنه‌ها در دسته‌ی کم اهمیت و با اهمیت متوسط قرار گرفته است و به عنوان سه ریسک اصلی در پهنه قرار نگرفته است در حالی که در واقعیت عکس این حالت اتفاق افتاده است و علت این تناقض عدم پیش‌بینی میزان دبی ورودی آب توسط کارشناسان بوده است که از حد پیش‌بینی فراتر رفته و این میزان آب ورودی تعادل در محاسبات را بر هم زده است. از طرفی عدم تخلیه به موقع آب در ناحیه و توقف حفاری سبب تشدید این موضوع شده است. شکل (۶-۱۲) مشکل گل‌گرفتگی دیسک‌ها در سازند گورپی را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۱۲) گل‌گرفتگی و انسداد دیسک‌ها

۶-۷-۸- پتانسیل کارست

هنگام حفاری در سازند ایلام در محدوده‌ی مورد مطالعه به غارچه‌های انحلالی برخورد شده است که سبب کانالیزه شدن جریان آب زیرزمینی در توده سنگ‌ها و نفوذ و چرخش آب در توده‌های آهکی شده است. این مشکل متراژ (۸۱۵+۰۳ تا ۵۵+۰۵) را شامل شده که خود شامل چندین غارچه‌ی انحلالی است که برخی از آنها در نتیجه ریزش قطعات و بلوک‌های سنگی درز و شکاف‌دار به وجود آمده‌اند. وجود این مشکل در مسیر حفاری در برخی نقاط موجب انحراف دستگاه شده که این موضوع بر سرعت پیشروی تأثیر منفی گذاشته است. با توجه به محاسبات، پهنه‌های ۶، ۷ و ۱۰ از نظر پتانسیل کارست در بین سه ریسک اصلی در پهنه قرار گرفته است که به واقعیت تا حدودی نزدیک می‌باشد.

۶-۷-۹- نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها

پس از اینکه دستگاه حفاری تونل در کیلومتر (۷۲۰+۰۳) واحدهای شیلی متعلق به سازند گورپی را پشت سر نهاده و وارد تشکیلات آهکی ایلام شده است با ورود گازهای سمی به داخل تونل مواجه گردیده است به طوری که آثار فیزیولوژیک آن در تعدادی از کارکنان تونل نمایان شده و برخی از آنها را روانه‌ی بیمارستان نموده است. گازهای سولفید هیدروژن، سیانید هیدروژن و متان به صورت مقطعی در تونل مشاهده شده که از میان آنها سولفید هیدروژن شایع‌ترین و مشکل‌سازترین گاز موجود در مسیر تونل بوده و به صورت محلول در آب در تونل مشاهده شده است. میزان این گاز در مسیر تونل تا مقدار ۳۰۰ ppm و متان تا ۱۰۰ ppm هم گزارش شده است. با حدود ۱۵۰ متر پیشروی و افزایش حجم آب‌های ورودی به تونل، غلظت گازها نیز افزایش یافته و بعد از چند روز چهار تن از کارکنان تونل را به کام مرگ کشانده است. گاز مسبب از کار افتادن سیستم‌های الکتریکی، الکترونیکی، خوردگی قطعات مختلف ماشین حفاری و سیم بکسل‌های نگهدارنده‌ی داکت هوا شده و ۶ ماه توقف اجباری برای تعمیر و تعویض قطعات را در پی داشته است. با راه‌اندازی مجدد دستگاه، هنوز هم حفاری با سرعت بسیار پایین در جریان است.

با توجه به محاسبات، همهی پهنه‌ها به غیر از پهنه‌ی ۱۲ از نظر نشت گاز در رده‌ی سه ریسک اول قرار دارد که این امر به واقعیت بسیار نزدیک است و نشان‌دهنده‌ی صحت محاسبات صورت پذیرفته در این تحقیق هست. شکل‌های (۱۳-۶) و (۱۴-۶) مشکلات ناشی از نشت گاز در تونل نوسود را به تصویر کشیده است.



شکل (۱۳-۶) تأثیرات مخرب گاز سولفید هیدروژن بر سیم بکسل‌های نگهدارنده‌ی داکت هوا



شکل (۱۴-۶) شرایط کار سخت در تونل و استفاده از ماسک برای جلوگیری از خفگی

۶-۸- نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا منطقه‌ی مورد مطالعه معرفی و از دیدگاه‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به وقوع مخاطرات در حین حفاری و اثرات آن، احتمال وقوع هر یک از این چالش‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی تونل نوسود تعیین گردیده است. به منظور درک مناسب از شرایط مسیر قطعه‌ی دوم تونل نوسود، مترائ ۰۰+۰۰۰ تا ۱۳+۲۹۰ طبق هیدروژئولوژی مسیر تونل به ۱۹ پهنه تقسیم شده است. در ادامه به منظور ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود طبق مطالعات انجام شده ۹ ریسک به عنوان مهم‌ترین ریسک‌های زمین‌شناسی در تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های سنگی معرفی شده است که عبارت‌اند از: برخورد با زون‌های خردشده و گسله (A1)، ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی (A2)، نشت و هجوم آب به داخل تونل (A3)، سینه‌کار مختلط (A4)، خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی (A5)، پدیده‌ی لهیدگی (A6)، تشکیل گل (A7)، پتانسیل کارست (A8) و نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها (A9).

لازم به ذکر است در این تحقیق شاخص‌های تصمیم‌گیری که بر ریسک‌های بیان شده تأثیر می‌گذارند، احتمال وقوع ریسک (C1)، میزان تأثیر (C2)، عدم اطمینان تخمین (C3) و توانایی سازمان در واکنش به ریسک (C4) می‌باشند. در ادامه برای رتبه‌بندی و اولویت دادن به ریسک‌های ذکر شده در تونل انتقال آب نوسود از روش‌های شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و به منظور دست یافتن به نظری واحد از استراتژی اولویت‌بندی استفاده شده است. این محاسبات در ۱۹ پهنه به صورت مجزا انجام و در نهایت ۳ ریسک به عنوان ریسک بالا (اصلی) در هر پهنه تعیین گردیده است.

نتایج تحلیل‌ها با توجه به تعدد تکرار در پهنه‌های مختلف طبق روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی نشان می‌دهد که نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها و نشت و هجوم آب به داخل تونل به ترتیب مهم‌ترین مخاطره موجود در تونل بلند نوسود می‌باشند و ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی به همراه پدیده‌ی لهیدگی با

شاخصی برابر در رده‌ی بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است نتایج تحلیل‌ها طبق روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی نزدیک به روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی می‌باشد با این تفاوت که پدیده‌ی لهیدگی جای خود را به برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله می‌دهد.

تکنیک ادغام نیز نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها، نشت و هجوم آب به داخل تونل و برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله را با توجه به تعدد تکرار در پهنه‌های مختلف به عنوان مهم‌ترین مخاطرات موجود در این تحقیق معرفی می‌نماید که این تحلیل مشابه نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی می‌باشد.

در صورت نیاز می‌توان با توجه به جداول ذکر شده نتایج حاصل از رتبه‌بندی ریسک‌های هر پهنه را با روش‌های بیان شده مشاهده نمود و مورد تحلیل و بررسی بیشتری قرار داد.

در نهایت برای اعتبارسنجی و مقایسه‌ی محاسبات انجام شده با واقعیت، گزارش پیشرفت کار ماهانه متراژ (۲۰۹۰۰ تا ۸۵۰+۰۶) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کلی از این مقایسه بر صحت و نزدیکی محاسبات با واقعیت تاکید دارد و فقط در محاسبات انسداد اختلافی روی داده است که علت این تناقض می‌تواند ناشی از عدم پیش‌بینی درست میزان دبی آب ورودی توسط کارشناسان باشد.

فصل ہفتم: نتیجہ گیری و پیشہادات

۷-۲- نتیجه‌گیری

تونل‌سازی و عملیات ساختمانی زیرزمینی در همه‌ی قسمت‌های درگیر در پروژه، تحت تأثیر ریسک هستند و عدم قطعیت‌های بی‌شماری طراحی سازه‌های زیرزمینی را احاطه نموده است. همچنین در کنار پیشرفت‌هایی که در ساخت فضاها، زیرزمینی در چند دهه‌ی اخیر به وجود آمده است، طراحان تونل هنوز نگران ریسک‌هایی هستند که عملیات تونل‌سازی را در بر می‌گیرد.

ارزیابی ریسک یکی از ارکان مدیریت ریسک بوده و با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه‌ی منابع، دارای اهمیت بسیار زیادی است. هدف از ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف از قبیل میزان تأثیر و احتمال وقوع آن می‌باشد. رتبه‌بندی ریسک‌ها، قسمت کلیدی این فرایند به شمار می‌رود زیرا با انجام رتبه‌بندی، ارجحیت هر ریسک در مقابل سایر ریسک‌ها مشخص و در نتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک برنامه‌ریزی نماید.

برای رتبه‌بندی ریسک از میان روش‌های موجود روش‌های شباهت به گزینه‌ای ایده‌آل فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی دلفی فازی انتخاب و مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده و استراتژی‌های اولویت‌بندی به منظور یکسان‌سازی نتایج مد نظر قرار گرفته است.

برای حل مسئله ابتدا چالش‌های زمین‌شناسی تونل‌سازی مکانیزه در نواحی کوهستانی (محیط‌های سنگی) شناسایی و مشکلات ناشی از آن و راه‌های پیشگیری و مقابله با آن به طور کامل توضیح داده شده است و پس از بررسی منطقه‌ی مورد مطالعه و ارزیابی چالش‌های زمین‌شناسی تونل انتقال آب نوسود که بر اساس مطالعات و نظر کارشناسان فن تونل‌سازی بوده است ۹ ریسک برخورد با زون‌های خردشده و گسله، ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی، نشت و هجوم آب به داخل تونل، سینه‌کار مختلط، خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی، پدیده‌ی لهیدگی، تشکیل گل، پتانسیل کارست و نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها به عنوان مهم‌ترین مخاطرات موجود و احتمال وقوع ریسک، میزان تأثیر، عدم اطمینان تخمین و توانایی سازمان در واکنش به ریسک، به عنوان عوامل موثر بر ریسک‌های بیان شده تعیین گردیده است.

با توجه به توضیحات بیان شده به منظور درک مناسب از شرایط مسیر قطعه‌ی دوم تونل نوسود، متراژ ۰۰+۰۰۰ تا ۱۳+۲۹۰ طبق هیدروژئولوژی مسیر تونل به ۱۹ پهنه تقسیم شده است و دو پرسشنامه برای دستیابی به نظرات کارشناسان تونل‌سازی طرح گردیده است تا با توجه به تجربیات کارگاهی خود این پرسشنامه‌ها را تکمیل نمایند. لازم به ذکر است که جامعه آماری در این تحقیق را ۵ نفر از خبرگان پروژه‌های تونل‌سازی تشکیل داده‌اند. پس از جمع‌آوری نتایج با استفاده از تکنیک‌های بیان شده رتبه‌بندی ریسک برای ۱۹ پهنه صورت پذیرفته و در نهایت ۳ ریسک به عنوان ریسک بالا (اصلی) در هر پهنه محاسبه شده و اولویت هر ریسک بر دیگر ریسک‌ها تعیین گردیده است.

طبق روش شباهت به گزینه‌ای ایده‌آل فازی نشت گازهای سمی موجود در سنگ‌ها و نشت و هجوم آب به داخل تونل به ترتیب مهم‌ترین مخاطره موجود در تونل بلند زاگرس می‌باشند و ریزش و سقوط بلوک‌های

سنگی به همراه پدیده‌ی لهیدگی با شاخصی برابر در رده‌ی بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. از طرفی دیگر نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی به روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی نزدیک است با این تفاوت که پدیده‌ی لهیدگی جای خود را به برخورد با پهنه‌های خرد شده و گسله خواهد داد.

در ضمن برای دست یافتن به نظری واحد استراتژی اولویت‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج حاصل از آن برای تعیین سه ریسک اصلی در کل پهنه‌ها مشابه نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی می‌باشد. در نهایت برای اعتبارسنجی و مقایسه‌ی محاسبات انجام شده با واقعیت، گزارش پیشرفت کار ماهانه متراژ (۲۰۹۰۰ تا ۸۵۰+۰۶) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کلی از این مقایسه بر صحت و نزدیکی محاسبات با واقعیت تاکید دارد و فقط در محاسبات انسداد (گل گرفتگی) اختلافی روی داده است که این تناقض می‌تواند ناشی از عدم پیش‌بینی درست میزان دبی آب ورودی توسط کارشناسان باشد.

لازم به ذکر است، استفاده از هر کدام از ابزارها در ارزیابی ریسک دارای معایب و مزایایی است و با توجه به اینکه، هیچ کدام از ابزارهای بیان شده قدرت دقیق شدن بر روی یک ریسک خاص را ندارند، راه عملی در کنترل و جلوگیری از وقوع ریسک‌ها و حوادث با شدت و تکرار بالا، کنترل علل ریشه‌ای وقوع آنهاست.

۷-۳- پیشنهادات

- رتبه‌بندی ریسک را به ریسک‌های زمین‌شناسی محدود نکرده و هر عاملی که بر روند پروژه تأثیرگذار است را تعیین نموده و رتبه‌بندی تجمیعی صورت پذیرد.
- شناسایی به موقع و به هنگام ریسک‌های پروژه تا در صورت وقوع، عملیات تونل‌سازی با وقفه همراه نشود مانند استفاده از گمانه‌های پیشرو.
- شناسایی و معرفی ریسک‌های موجود در منطقه توسط کارشناسان و طرح تفصیلی آن به کارکنان درگیر با پروژه برای آماده‌سازی ذهنی آنان در قبال ریسک به وجود آمده.
- رتبه‌بندی ریسک همزمان با اجرای پروژه و تخصیص منابع بیشتر تا در صورت وقوع، درصدد رفع یا کم رنگ کردن اثرات مخرب این ریسک‌ها بر اهداف پروژه باشند.
- مطالعه‌ی نتایج پروژه‌های مشابه در سراسر دنیا و مقایسه با پروژه‌ی مورد نظر تا بتوان از طریق نتایج آن برخی از مشکلات و راهکارهای استفاده شده را در صورت وقوع به هم تطبیق داد.
- رتبه‌بندی ریسک با سایر روش‌های رتبه‌بندی و مقایسه‌ی نتایج آنها با روش‌های استفاده شده تا مهر تأییدی بر روش انتخاب شده باشد.
- ارزیابی ریسک برای سایر ماشین‌های مکانیزه نظیر EPB, Slurry, Single Shield, Open TBM
- حفر گمانه‌های بیشتر در دوره‌ی مطالعات تا نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌ها نمود درستی از وضعیت زمین پیش روی تونل باشد.

- [1] Project Management Institute., (2008)," A Guide to the Project Management Body of Knowledge", fourth Edition, Pennsylvania, USA.
- [2] The Office of Government Commerce., (1996)," Project in Controlled Environments", Second Edition, Oxford, England.
- [3] International Project Management Association., (2006)," IPMA Competence Baseline",3rd Edition, Netherlands.
- [4] L Young T., (2007)," The Handbook of Project Management", Revised 2nd edition.
- [5] Heyworth F., (2002),"A Guide to Project Management".
- [6] Association For Project Management., (2006),"APM body of Knowledge".
- [7] STS Sauter Training & Simulation S.A., (2013)," Comparing PMBOK Guide 4th Edition , PMBOK Guide 5th Edition, and ISO21500" , Switzerland.
- [8] Meredith J.R., Mantel S.J., (2005)," Project Management: A Managerial Approach".
- [۹] ص. روزبهي، خ. جدا، مدیریت ريسک پروژه با استفاده از PertMaster، انتشارات کيان رایانه سبز، ۱۳۸۷.
- [10] Csiszar., (2008),"Managing Risk and Uncertainty", Business and Economic Review, 2008.
- [11] NRC (National Research Council -US) ., (2000),"Risk analysis and Uncertainty in Flood Reduction Studies", National Academic Press.
- [12] Ivanov D., Sokolov B., (2010)," Adaptive Supply Chain Management", Springer, viewed January26,2013<<http://books.google.com/books?id=njdbCtyMUVIC&printsec=frontcover#v=onepage&q=uncertainty&f=false>>.
- [13] Monahan G.E., (2000),"Management decision making: spreadsheet modeling, analysis, and application", Cambridge University Press, England.
- [14] You C., (2009)," On the convergence of uncertain sequences", Mathematical and Computer Modelling.
- [15] Federal Aviation Administration., (2009),"Risk Management Handbook".
- [16] Baecher G.B., Christian J.T., (2003)," Reliability and Statistics in geotechnical engineering", USA: John Wiley & Sons.
- [17] Kerzner H., (2009)," Project Management: A Systems Approach to Planning,Scheduling, and Controlling", John Wiley & Sons, New York.
- [18] Wagner H., (2006),"Risk Evaluation and Control in Underground Construction", International symposium on underground excavation and tunneling, Bangkok: Thailand.

[19] prince water house coopers (pwc)., (2005)," IT Risk Management".

[۲۰] س. ویلیامز, ج. هینز, "مدیریت ریسک", مترجمان: داور ونوس, حجت الله گودرزی, نشر نگاه دانش, ۱۳۸۲.

[21] Self J., (2004)," Risk Management Guide", office of information technology service (ITS).

[22] Stoneburner G., Goguen A., Feringa A., (2002)," Risk Management Guide for Information Technology Systems", National Institute of Standards and Technology.

[23] Eskesen S.D., (2009)," " Risk management before and during construction-Risk management and contracts for construction".

[24] Martin P., Tate K., (2001)," A Step-by-Step Approach to Risk Assessment", Martin Tate LLC.

[25] Mehdizadeh R., Breyse D., Chaplain M., Niandou H., (2010)," Methodology of Developing a Risk Breakdown Structure (RBS) For Risk Management of Infrastructure Projects", XXVIIIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, La Bourboule.

[26] Mehdizadeh R., (2012)," Dynamic and multi-perspective risk management of construction projects using tailor-made Risk Breakdown Structures".

[۲۷] ع. نظری, "ریسک و مدیریت آن در سیستم های حمل و نقل ریلی درون شهری (مترو)", نهمین همایش حمل و نقل ریلی, ۱۳۸۶.

[۲۸] ح.ر. نظارت, "رتبه بندی ریسک زمین شناسی در ماشین حفاری TBM با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره", پایان نامه ی کارشناسی ارشد دانشکده ی معدن, نفت و ژئوفیزیک, دانشگاه صنعتی شاهرود, ۱۳۹۱.

[29] Srinivasa R., Vinay B., (2004)," Integrated risk management in case of tightly coupl software/hardware projects",NOIDA.

[30] Chapman C.B. , Ward S., (1997)," Project Risk Management: Processes,Techniques and Insights", John Wiley and Sons, Chichster.

[31] Burke R., (1999),"Project Management Planning & Control Techniques",3Edition, John Wiley.

[32] Raftery J., (1994),"Risk Analysis in Project Management ", First Edition, London, E & FN Spon.

[33] Pritchard Carl L., (2001),"Risk Management Concepts and Guidance ", Second Edition, Virginia, ESI International.

[۳۴] ا.م. خامنه, "پیاده سازی کاربردی مدیریت ریسک در یک مناقصه بین المللی پروژه نیروگاهی", کنفرانس بین المللی مدیریت پروژه, ۱۳۸۸.

[۳۵] گ. خزائنی, ل. احمدی "مدیریت ریسک در پروژه های کلان با رویکرد BOT", دومین کنفرانس بین المللی مدیریت پروژه, ۱۳۸۴.

- [۳۶] م. قارونی نیک, "بررسی ریسک‌های موجود در پروژه‌های تونل‌سازی راه‌آهن و مدیریت آنها", نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران, ۲۱-۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۱.
- [۳۷] ی. قاسمی, ع. اردشیر, م. امیری, "ارزیابی ریسک در پروژه‌های احداث تونل شهری با استفاده از تحلیل فازی درخت خطا", دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران, ۱۳۹۱.
- [۳۸] گروه تحقیقاتی و پژوهشی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای ایران (اینترنت), (تاریخ مشاهده: ۱۲ بهمن ۱۳۹۱), قابل دسترسی از آدرس <<http://www.iohas.ir/post-277.aspx>>.
- [۳۹] م. جعفرزاده, "متدولوژی تطبیقی تکنیک‌های کاربردی تحلیل ریسک", نخستین کنگره بین‌المللی مدیریت ریسک, تهران, ۱۳۸۶.
- [۴۰] م. عطایی, "تصمیم‌گیری چند معیاره فازی", دانشگاه صنعتی شاهرود, ۱۳۸۸.
- [۴۱] م. اصغرپور, "تصمیم‌گیری‌های چند معیاره", تهران, انتشارات دانشگاه تهران, ۱۳۷۷.
- [42] You K., Park Y., Lee J., (2005), "Risk analysis for determination of a tunnel support pattern" Tunnelling and Underground Space Technology.
- [43] Ghosh, Jakkapan Jintanapakanont., (2004), "Identifying and assessing the critical risk factors in an underground rail project in Thailand: a factor analysis approach", International Journal of Project Management.
- [44] Reilly J., Brown J., (2004), "Management and Control of Cost and Risk for Tunneling and Infrastructure Projects", Tunnelling and Underground Space Technology.
- [45] International tunnel association working group No.2., (2002), "Guidelines for tunneling risk management ", ITA.
- [46] Wang Y.M., Elhag T.M.S., (2006, August), "Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment", Expert Systems with Applications, Volume 31, Issue 2, pp. 309-319.
- [47] Chen S.J., Chen S.M., (2008, April), "Fuzzy risk analysis based on measures of similarity between interval-valued fuzzy numbers", Computers & Mathematics with Applications, Volume 55, Issue 8, pp. 1670-1685.
- [48] Lee L.W., Chen S.M., (2008, May), "Fuzzy risk analysis based on fuzzy numbers with different shapes and different deviations", Expert Systems with Applications, Volume 34, Issue 4, pp. 2763- 2771.
- [49] Chen S.M., Wang C.H., (2009, April), "Fuzzy risk analysis based on ranking fuzzy numbers using alpha-cuts, belief features and signal/noise ratio", Expert Systems with Applications: An International Journal, Volume 36, Issue 3, pp. 5576-5581.

- [50] Feng L.H., Luo G.Y., (2009, July), "Analysis on fuzzy risk of landfall typhoon in Zhejiang province of China", *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 79, Issue 11, pp. 3258-3266.
- [51] Elsayed T., (2009) "Fuzzy inference system for the risk assessment of liquefied natural gas carriers during loading/offloading at terminals", *Applied Ocean Research*, Volume 31, Issue 3.
- [52] Wang T.C., Lee H.D., (2009), "Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights", *Expert Systems with Applications: An International Journal*, Volume 36, Issue 5, pp. 8980-8985.
- [53] Xu Z., Shang S., Qian W., Shu W., (2010, March), "A method for fuzzy risk analysis based on the new similarity of trapezoidal fuzzy numbers", *Expert Systems with Applications: An International Journal*, Volume 37, Issue 3, pp. 1920-1927.
- [54] Kaya İ., Kahraman C., (2010, March), "Development of fuzzy process accuracy index for decision Making problems", *Information Sciences: an International Journal*, Volume 180, Issue 6, pp. 861- 872.
- [55] Chen S.M., Sanguansat K., (2011, March), "Analyzing fuzzy risk based on a new fuzzy ranking method between generalized fuzzy numbers", *Expert Systems with Applications: An International Journal*, Volume 38, Issue 3, pp. 2163-2171.
- [56] Idrus A., Nuruddin M.F., Arif Rohman M., (2011, March), "Development of project cost contingency estimation model using risk analysis and fuzzy expert system", *Expert Systems with Applications: An International Journal*, Volume 38, Issue 3, pp. 1501-1508.
- [57] Hejazi S.R., Doostparast A., Hosseini S.M., (2011, August), "An improved fuzzy risk analysis based on a new similarity measures of generalized fuzzy numbers", *Expert Systems with Applications: An International Journal*, Volume 38 Issue 8, pp. 9179-9185.
- [58] Nieto Morote A.M., Ruz Vila F., (2011), "A Fuzzy AHP Multi Criteria Decision Making Approach Applied to Combined Cooling, heating, and Power Production Systems", *International Journal of Information Technology and Decision Making*, pp. 497-517.
- [59] Fouladgar M.M., Yazdani-Chamzini A., Zavadskas E.K., (2012, March), "Risk evaluation of tunneling projects", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 12, Issue 1, pp. 1-12.
- [60] Burmaster D.E., Anderson P.D., (1994, August), "Principles of Good Practice for the Use of Monte Carlo Techniques in Human Health and Ecological Risk Assessments", *Risk Analysis*, Volume 14, Issue 4, pp. 477- 481.
- [61] Greenland S., (2001, August), "Sensitivity Analysis, Monte Carlo Risk Analysis, and Bayesian Uncertainty Assessment", *Risk Analysis*, Volume 21, Issue 4, pp. 579-584.
- [62] Rezaie K., Amalnik M.S., Gereie A., Ostadi B., Shakhseeniaee M., (2007, Julay), "using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management: consideration of relationships between uncertainties", *Applied Mathematics and Computation*, Volume 190, Issue 2,

pp. 1492-1501.

- [63] Wu Y.F., (2008), "Correlated sampling techniques used in Monte Carlo simulation for risk assessment", *International Journal of Pressure Vessels and piping*, Volume 85, Issue 9, pp. 662-669.
- [64] Carmel Y., Paz S., Jahashan F., Shoshany M., (2009, January), "Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread", *Forest Ecology and Management*, Volume 257, Issue 1, pp. 370-377.
- [65] Stroeve S.H., Blom H.A.P., (Bert) Bakker G.J., (2009, February), "Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation", *Safety Science*, Volume 47, Issue 2, pp. 238-249.
- [66] Smid J.H., Verloo D., Barker G.C., Havelaar A.H., (2010, May), "Strengths and weaknesses of Monte Carlo simulation models and Bayesian belief networks in microbial risk assessment", *International Journal of Food Microbiology*, Volume 139, Supplement, pp. S57-S63.
- [67] Amigun B., Petrie D., Görgens J., (2011, November), "Economic risk assessment of advanced process technologies for bioethanol production in South Africa: Monte Carlo analysis", *Renewable Energy*, Volume 36, Issue 11, pp. 3178-3186.
- [68] Lambert J.H., Haimes Y.Y., Li D., Schooff R.M., Tulsiani V., (2001, June), "Identification, ranking, and management of risks in a major system acquisition", *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 72, Issue 3, pp. 315-325.
- [69] Linares P., (2002, August), "Multiple criteria decision making and risk analysis as risk management tools for power systems planning", *Power Systems*, Volume 17, Issue 3, pp. 895-900.
- [70] Levy J.K., (2005, December), "Multiple criteria decision making and decision support systems for flood risk management", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Volume 19, Issue 6, pp. 438-447.
- [71] Linkov I., Satterstrom F.K., Kiker G., Batchelor C., Bridges T., Ferguson E., (2006, December), "From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications", *Environment International*, Volume 32, Issue 8, pp. 1072-1093.
- [72] Wang T.C., Chang T.H., (2007, November), "Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment", *Expert Systems with Applications: An International Journal*, Volume 33, Issue 4, pp. 870-880.
- [73] Linkov I., Satterstrom F.K., J. Steevens, Ferguson E., Pleus R.C., (2007, August), "Multi-criteria decision analysis and environmental risk assessment for nanomaterials", *Journal of Nanoparticle Research*, Volume 9, Issue 4, pp. 543-554.
- [74] Kull T.J., Talluri S., (2008, August), "A Supply Risk Reduction Model Using Integrated Multicriteria Decision Making", *Engineering Management*, PP. 409- 419.
- [75] Vaidogas E.R., Šakėnaitė J., (2010), "Protecting built property against fire disasters: multi-attribute decision making with respect to fire", *International journal of strategic property management*, Volume 14, pp. 391- 407.

- [76] Lindhe A., Rosén L., Norberg T., Bergstedt O., (2009), "Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems", *Journal Article Research Support*, pp.1641-1653.
- [77] Ferdous R., Khan F., Veitch B., Amyotte P.R., (2009, July), "Methodology for computer aided fuzzy fault tree analysis", *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 87, Issue 4, pp. 217-226.
- [78] Vaurio J.K., (2010, February), "Ideas and developments in importance measures and fault-tree techniques for reliability and risk analysis", *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 95, Issue 2, pp. 99-107.
- [79] Rodak C.M., Silliman S.E., Bolster D., (2011, December), "Reliability, Resilience, and Vulnerability criteria for the evaluation of Human Health Risks", In *AGU Fall Meeting Abstracts* Vol. 1, pp. 01.
- [80] Farret R., Gombert P., Lahaie F., Cherkaoui A., Lafortune S., Roux P., (2011), "Design of fault trees as a practical method for risk analysis of CCS: Application to the different life stages of deep aquifer storage, combining long-term and short-term issues", *Energy Procedia*, pp. 4193-4198.
- [81] Montes A., Helvacioğlu I.H., (2011), "An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems", *Ocean Engineering*, pp.285-294.
- [82] Linder E., Patil G.P., Vaughan D.S., (1987), "Application of event tree risk analysis to fisheries management", *Ecological Modelling*, Volume 36, Issue1-2 , pp. 15-28.
- [83] Cho H.M., Choi H.H., Kim Y.K., (2002), "A risk assessment methodology for incorporating uncertainties using fuzzy concepts", *Reliability Engineering & System Safety* Volume 78, Issue 2, pp. 173-183.
- [84] Wreathall J., Nemeth C., (2004), "Assessing risk: the role of probabilistic risk assessment (PRA) in patient safety improvement", *Quality and Safety in Health Care*, Volume 13, Issue 3, pp. 206-212.
- [85] Xu H., Dugan J.B., (2004, January), "Combining dynamic fault trees and event trees for probabilistic risk assessment", In *Reliability and Maintainability, 2004 Annual Symposium-RAMS*, pp. 214-219, IEEE.
- [86] Neri A., Aspinall W.P., Cioni R., Bertagnini A., Baxter P.J., Zuccaro G., ... & Woo G., (2008), "Developing an event tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 178, Issue 3, pp. 397- 415.
- [87] Ferdous R., Khan F., Sadiq R., Amyotte P., Veitch B., (2011), "Fault and event tree analyses for process systems risk analysis: uncertainty handling formulations", *Risk Analysis*, Volume 31, Issue 1, pp. 86-107.
- [88] Vilchez J.A., Espejo V., Casal J., (2011), "Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 24, Issue 3, pp. 281-287.
- [89] Franceschini F., Galetto M., (2001), "A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA", *International Journal of Production Research*, Vol. 39, pp. 2991-3002.

- [90] Xu K., Tang L.C., Xie M., Ho S.L., Zhu M.L., (2002), "Fuzzy assessment of FMEA for engine systems", *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 75, Issue 1, pp.17-29.
- [91] Marx D.A., Slonim A.D., (2003), "Assessing patient safety risk before the injury occurs: an introduction to sociotechnical probabilistic risk modelling in health care", *Quality and Safety in Health Care*, ii33-ii38.
- [92] Carlsson B., (2004), "Initial Risk Analysis of Potential Failure Modes", *Performance and durability assessment: optical materials for solar thermal systems*, pp. 147-157.
- [93] Wang Y.M., Chin K.S., Poon G.K.K., Yang J.B., (2009), "Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean", *Expert Systems with Applications*, Volume 36, Issue 2, pp. 1195-1207.
- [94] Van Leeuwen J.F., Nauta M.J., De Kaste D., Odekerken-Rombouts Y.M.C.F., Oldenhof M.T., Vredenbregt M.J., Barends D.M., (2009) "Risk analysis by FMEA as an element of analytical validation", *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, Volume 50, Issue 5, pp. 1085-1087.
- [95] Abdelgawad M., Fayek A.R., (2010), "Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP", *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 136, Issue 9, pp. 1028-1036.
- [96] Zhang Z., Chu X., (2011), "Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty", *Expert Systems with Applications*, Volume 38, Issue 1, pp. 206-214.
- [97] Xiao N., Huang H.Z., Li Y., He L., Jin T., (2011), "Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA", *Engineering Failure Analysis*, pp. 1162-1170.
- [۹۸] م. احمدی نژاد، س.ع. قاضی تبریزی، ع. بابایی، "کاربرد روش شبیه‌سازی مونت کارلو در تونل‌سازی"، ششمین کنفرانس تونل ایران، ۱۳۸۲.
- [۹۹] ا. جعفری، ا. ختلان، ح. پشندی، "معرفی انواع ریسک‌های تونل‌سازی و آرایه یک سیستم برای مدیریت آنها"، هفتمین کنفرانس تونل ایران، ۱۳۸۵.
- [۱۰۰] ح.ا. شیخی، م. شریف زاده، ح. کنعانی مقدم، "کاربرد مدیریت ریسک در قراردادهای پروژه‌های زیرزمینی"، دومین همایش منطقه‌ای مهندسی معدن، ۱۳۸۵.
- [۱۰۱] م. مرتضوی، ز. فتحی، "معرفی و تقسیم ریسک‌های تونل‌سازی در اجرای تونل شهری (مطالعه موردی: تونل توحید)"، چهارمین کنگره مهندسی عمران، ۱۳۸۷.
- [۱۰۲] س.م. موسوی، ا. قربانی‌کیا، "مدیریت و تحلیل ریسک‌های تدارکات پروژه‌های احداث با استفاده از تکنیک LINMAP"، پنجمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه، ۱۳۸۸.
- [۱۰۳] ا.ر. صیادی، م. حیاتی، م. حسین‌پور سجیدان، "ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل‌سازی به کمک روش و منطق فازی FMEA"، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ۱۳۸۸.

- [۱۰۴] ا.ر. صیادی، ع. رجب زاده، "رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی به کمک روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل (TOPSIS)", مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، ۱۳۸۸.
- [۱۰۵] م. قرباغانی، ع. طالبی نژاد، م. عماد، ت. نعیمی، ا. اسدی، ع. پرورش، "ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیک در حفاری‌های تمام مقطع مکانیزه (TBM) تونل‌های مترو (مطالعه موردی: پروژه خط هفت مترو تهران)", کنگره و نمایشگاه بین‌المللی معدن، تهران، ۲۶ تا ۲۹ مهر ۱۳۸۹.
- [۱۰۶] ا.ر. صیادی، م. حیاتی، م. منجزی، "مدیریت ریسک ساخت تونل با استفاده از تکنیک‌های MADM"، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.
- [۱۰۷] ا.ر. صیادی، م. حیاتی، ع. آذر، "ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از روش تخصیص خطی" نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۱۳۹۰.
- [۱۰۸] ح.ا. جعفری، س. حسامی، "مدیریت ریسک سوداگرانه در سد سازی (بررسی موردی تونل سرریز سد هراز)", اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، ۱۳۹۰.
- [۱۰۹] م. حیاتی، ا.ر. صیادی، "ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل آبرسان به کمک منطق فازی (عملیات تونل‌سازی سد و نیروگاه سیمره)", اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، ۱۳۹۰.
- [۱۱۰] ن. نیک‌نیا، ح.ر. زرین‌خو، ح. بیاتی، ج. آزادی، "شناسایی و ارزیابی ریسک‌های تونل در پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای مطالعه موردی تونل انتقال آب ابیورد"، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، ۱۳۹۰.
- [۱۱۱] ح.ر. نظارت، ف. سرشکی، م. عطایی، "مدیریت ریسک تونل‌سازی مکانیزه با نگاهی بر عوامل زمین‌شناسی"، دومین همایش مدیریت بحران در صنعت ساختمان، سازه‌های زیرزمینی و شریان‌های حیاتی، ۱۳۹۱.
- [۱۱۲] ی. قاسمی، ع. اردشیر، م. امیری، "ارزیابی ریسک پروژه‌های عمرانی با استفاده از آنالیز درخت خطا (مطالعه موردی)", دومین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت ساخت، ۱۳۹۱.
- [۱۱۳] و. باقری، ف. یوسفی، "طبقه‌بندی و مدیریت ریسک در پروژه‌های احداث تونل شهری (مطالعه موردی تونل نیایش تهران)", سومین کنفرانس بین‌المللی صنعت احداث، ۱۳۹۱.
- [114] Einstein H.H., (1996), "Risk and risk analysis in rock engineering", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 11, pp. 141–155.
- [115] Sturk R., Olsson L., Johansson J., (1996), "Risk and decision analysis for large underground Projects", as applied to the Stockholm ring road tunnels. Tunnelling and Underground Space

Technology, vol. 11, pp. 157–164.

- [116] Kalamaras G.S., (1996), "A case method approach for interactive risk analysis of tunnel design for constructability concept", ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, pp.217.
- [117] Weger D., de Kruiskamp MM., Hoeksma J., (2001), "Road tunnel risk assessment in the Netherlands, TUNprim: a spreadsheet model for the calculation of the risks in road tunnels", In: Zio E, Demichela M, Piccinni N, editors. ESREL 2001, International Conference, Torino, Italy.
- [118] Chou H.S., Yang C.Y., Hsieh B.J., Chang S.S., (2001), "A study of liquefaction related damages on shield Tunnels", Tunneling and Underground Space Technology, vol. 16, pp. 185-193.
- [119] Isaksson T., (2002), " Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel Projects", Doctoral Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Dep. of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden, ISSN 1650–9501.
- [120] Grasso P., Mahtab M., Kalamaras G., Einstein H., (2002), "On the Development of a Risk Management Plan for Tunnelling", Proc. AITES-ITA Downunder 2002, World Tunnel Congress, Sydney.
- [121] M.F.NG., V.M. Rao Tummala., Richard C.M. Yam., (2003), " A risk-based maintenance management model for toll road/tunnel operations", Engineering Department, Rome 3106 (CPS) Company Limited, NT, HongKong, Construction Management and Economics.
- [122] Petrov M., Galloway P., (2004), "Problems in underground construction: lessons learned and methods developed for success", Tunnelling and Underground Space Technology.
- [123] Gerard Arendsb., Rolf Bielecki ., John Castlec., Stanislav Drabekc., Alfred Haack., Frantisek Nedbalc., Annica Nordmark., Ray Sterling., (2004), "Risk Budget management in progressing underground works International Society for Trenchless Technology (ISTT) and International Tunnelling Association (ITA) Joint Working Group Report", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 19.
- [124] Eskesen S.D., Tengborg P., Kampmann J., (2004), " Trine Holst Veicherts. Guidelines for Tunnelling Risk Management: International Tunnelling Association, Working Group No.2", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 19, pp. 217–237.
- [125] Arends BJ., Jonkman SN., Vrijling JK., Van Gelder P., (2005), " Evaluation of Tunnel Safety: Towards an Economic Safety Optimum", Reliability Engineering and System Safety, vol. 90, pp. 217–228.
- [126] Isaksson T, Stille H., (2005), "Model for Estimation of Time and Cost for Tunnel Projects Based on Risk Evaluation. Rock Mech", Rock Engng. Vol. 38, Issue 5, pp. 373–398.
- [127] Silverton T.R., Thomas A.H. , Powell D.B., (2005), "Risk-Based Design Using Numerical Modeling", Mott MacDonald Ltd, Croydon, UK.
- [128] Kwong A.K.L., (2006), "Risk management of SSDS stage I TunnelB – tunnelling under the eastern harbour crossing tunnel in Hong Kong", Tunnelling and Underground Space Technology 21 . 358.

- [129] A Code Of Practice For Risk Management Of Tunnel Works., (2006), Prepared by The International Tunnelling Insurance Group (ITIG).
- [130] Herrenknecht M., Bappler K., (2006)," Mastering risks during mechanized excavation in urban centers with highly complex ground conditions",Tunnelling and Underground Space Technology.
- [131] Reilly J.J. and Parker, H.W., (2007)," Benefits and Life-Cycle Costs of Underground Projects. Proceedings, AITES-ITA World Tunnel Congress, Prague. Vol. 1: 679–684.
- [132] Thomas A.H., Banyai J.P., (2007),"Risk Management of the construction of tunnels using Tunnel Boring Machines (TBMs)", Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds),Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-40807-3.
- [133] Osama A. Jannadi., (2008),"Risks associated with trenching works in Saudi Arabia", Building and Environment 43 . 776–781.
- [134] Shahriar K., Sharifzadeh M., Hamidi J.K., (2008),"Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions", Tunnelling and Underground Space Technology.
- [135] Rezaie et al., (2009),"Failure mode and effect analysis algorithm for tunneling projects", Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48513-5.
- [136] Eun-Soo Hong ., In-Mo Lee b., Hee-Soon Shin ., Seok-Woo Namc., Jung-Sik Kong., (2009)," Quantitative Risk Evaluation Based on Event Tree Analysis Technique: Application to the Design of Shield TBM", Tunnelling and Underground Space Technology 24.
- [137] Yan-hui G., Zhi-hua Y., Shu-cai L., Wei L., Qing-song Z., (2009),"Risk Measurement and Control of Water Inrush into Qiyue Mountain Tunnel", Springer.
- [138] Hamidi J.K., Shahriar K., Rezai B., Rostami J., Bejari H., (2010),"Risk Assessment Based Selection of Rock TBM for Adverse Geological Conditions using Fuzzy-AHP", Springer.
- [139] Alan N. Beard., (2010),"Tunnel Safety, Risk Assessment and Decision-Making", Tunnelling and Underground Space Technology 25.
- [140] Aliahmadi A., Sadjadi S.J., Jafari-Eskandari M., (2010),"Design a New Intelligence Expert Decision Making using Game Theory and Fuzzy AHP to Risk Management in Design", Construction, and Operation of Tunnel Projects (Case Studies: Resalat Tunnel), Springer-Verlag London Limited.
- [141] Fouladgar M.M., Chamzini A.Y., Basiri M.H., (2011),"Risk Evaluation Of Tunnelling Projects By Fuzzy Topsis", International Conference on Management (ICM).
- [142] Špačková o., Straub D., (2011),"Probabilistic Risk Assessment of Excavation Performance in Tunnel Projects using Bayesian Networks: a Case Study", Bundesanstalt für Wasserbau.
- [143] Chapman C.B.,Ward, S.C., (2003),"Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights", John Wiley, Chichester, UK, Second Edition.

- [144] Pipattanapiwong J., (2004), "Development of Multi-party Risk and Uncertainty Management Process for an Infrastructure Project", PhD Thesis, Kochi University of Technology.
- [145] McDermott R.E. et al., (1996), "The Basics of FMEA." Quality Resources, PP. 12.
- [146] Klein J.H. and Cork R.B., (1998) "An Approach to Technical Risk Assessment." International Journal of Project Management, Vol.16, No.6, PP. 345-351.
- [۱۴۷] م.ع. سیدنقوی، ا. تیموری، "تحلیل کیفی ریسک‌های پروژه به کمک مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره: مطالعه موردی پروژه تبدیل گاز طبیعی به مایعات هیدروکربوری"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه، تهران، ۱۳۸۶.
- [148] Pertmaster Software. Pertmaster Project Risk V7.5: Tutorial, Manual and Help, Available on: <http://www.pertmaster.com/>, 2002.
- [۱۴۹] س.ح. قدسی‌پور، "برنامه‌ریزی چندهدفه"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۷.
- [150] Triantaphyllou E., (2000), "Multi-criteria decision making methods: a comparative study", Kluwer.
- [۱۵۱] م. عطایی، "تصمیم‌گیری چندمعیاره"، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۸.
- [۱۵۲] ع. آذر، ع. رجب‌زاده، "تصمیم‌گیری کاربردی رویکرد MADM"، انتشارات نگاه دانش، ۱۳۹۱.
- [153] Dodagoudar G.R., (2000) "Reliability Analysis of Slopes Using Fuzzy Sets Theory", Computers and Geotechnics, Vol.27, pp.101-115.
- [154] Nguyen H.T., (2000), "A First Course in Fuzzy Logic", 2nd edition, Chapman & Hall /CRC, USA.
- [۱۵۵] م. ماشین‌چی، "مجموعه‌های مشکک"، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۷۹.
- [156] Juang C.H., (1998), "Stability Analysis of Existing Slopes Considering Uncertainty" Engineering Geology, Vol.49, pp.111-122.
- [157] Li x., Reeves G., (1999), "A Multiple Criteria Approach to Data Envelopment Analysis", European Journal of Operational Research, Vol.115, pp. 507-517.
- [158] Chen S., Hwang C., (1992), "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications", Springer Verlag Inc.
- [159] Liu Y-C. and Chen C-S., (2007), "A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment", Engineering Geology, Vol. 89, Issues 1-2, pp.129-143.
- [۱۶۰] ا. ملک‌اخلاق، م. رمضانیان، ف. رفیعی‌امام، "شناسایی و رتبه‌بندی عوامل موفقیت بانکداری الکترونیکی"، چشم انداز مدیریت صنعتی، صفحه ۷۱-۸۶، پاییز ۱۳۹۱.

- [۱۶۱] ع. ارومیه‌ای، ا. مظفری، م. شریف‌زاده، ح. زارعی، "چالش‌های زمین‌شناسی مهندسی برای تونل‌های سنگی در ایران"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۰ تا ۱۲ آبان ۱۳۹۰.
- [۱۶۲] ع. افتخاری، ج. خادمی حمیدی، "مخاطرات زمین‌شناسی در تونل‌زنی با TBM - با مطالعه موردی در تونل بلند زاگرس"، هشتمین کنفرانس تونل، ۱۳۸۸.
- [۱۶۳] ا.ر. محبوبی اردکانی، ع. الهویردیزاده، ا. علائی، م.ر. هژیری، "بررسی تاثیر خصوصیات گسل بر پایداری تونل با استفاده از روش اجزاء مجزا"، دومین همایش ملی سدسازی، اسفند ۱۳۸۸.
- [164] Ulusay R., Aydan Ö. and. Hamada M., (2001), "The Behavior of Structures Built on Active Fault Zones :Examples from the Recent Earthquake of Turkey", Seismic Fault-induced Failures.
- [165] Sinha R.S., (1989), "Underground structure design and instrumentation", Elsevier Sciencedirect Publisher, B.V.
- [166] Holter K.G., Johansen E.D., Hegrenaes A., (1996), "Tunneling through a sanzone; Ground treatment experiences from the Bjoroy subsea road tunnel", Proceedings of North American tunneling '96, vol. 1, pp249-256, Washington DC.
- [167] Shang Y., Wang S., Wu F., Yang Z., (2006), "Lessons from one Tunnel Boring Machine project in Kunming city", The Geological society of london. IAEG2006 paper number 717, China.
- [168] Barla G., Pelliza S., (2000), "TBM tunneling in difficult ground conditions", Geoeng, Melbourne, Australia.
- [۱۶۹] م. شریف‌زاده، ا. ترکمنی قطب، ج. خادمی حمیدی، ع. همتی شعبانی، "تاثیر زون‌های گسلی و خرد شده بر توقف دستگاه TBM در تونل انتقال آب قمرود"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، ۲۴ تا ۲۶ مهر ۱۳۸۶.
- [170] Amberg measuring technique, (2003), "TSP 203, Tunnel seismic prediction system catalogue"
- [۱۷۱] ح. مدنی، "تونل‌سازی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۳.
- [۱۷۲] م. رنجبر پاشاکلائی، ع. مهدی‌نژاد نوری، ج. خادمی حمیدی، "نقش پارامترهای زمین‌شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی در انتخاب ماشین تونل‌زنی"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۰ تا ۱۲ آبان ۱۳۹۰.
- [۱۷۳] ج. حسن‌پور، غ. شمسی، "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.
- [۱۷۴] ع. یساقی، ح. کنعانی مقدم، "ارزیابی خطرات زمین‌شناسی در ساخت تونل‌های بزرگ البرز، آزاد راه تهران- شمال"، ششمین کنفرانس تونل ایران، ۱۳۸۲.

- [۱۷۵] م. طارمی، م. سعیدی، "مخاطرات ژئوتکنیکی پیش روی تونل انتقال آب سبزکوه و راهکارهای مقابله با آن"، اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، ۱۳۹۰.
- [۱۷۶] ح.ر. زارعی، ع. ارومیه‌ای، م. شریف زاده، "شناسایی و طبقه‌بندی مخاطرات ناشی از ورود آب به درون تونل سبزکوه"، هشتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، مهر ۱۳۸۸.
- [۱۷۷] ح.ر. زارعی، ع. ارومیه‌ای، م. شریف زاده، "پیش‌بینی ورود آب زیرزمینی به درون تونل‌های سنگی با روش‌های تجربی و تحلیلی مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده (مطالعه موردی تونل سمنان)"، هشتمین کنفرانس تونل، اردیبهشت ۱۳۸۸.
- [۱۷۸] ر.ا. شریف‌نیا، ح. صمدی بروجنی، "تجارب در مورد حفر تونل‌های انتقال آب با روش TBM"، همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای، خرداد ۱۳۹۱.
- [179] Knut F.G., (2007), "Pre-Excavation Grouting in Tunneling", UGC International, Division of BASF Construction Chemicals, Switzerland.
- [۱۸۰] م. رمضانی، غ. لشکری‌پور، م. غفوری، ص. طریق‌ازلی، "تخمین آب ورودی به تونل با استفاده روش‌های تحلیلی و تجربی (مطالعه موردی: تونل انتقال آب از بند انحرافی چهل چای به پشت سد نرماب)"، دومین کنفرانس ملی سازه - زلزله - ژئوتکنیک، مازندران، آذر ۱۳۹۱.
- [181] El Tani M., (2003), "Circular tunnel in a semi-infinite aquifer", Tunneling and Underground Space Technology, pp. 49-55.
- [182] Raymer J.H., (2001), "Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: Estimating the high-end of the permeability distribution", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- [183] Heuer R., (1995), "Approche quantitative, théorique et empirique, del Ronald E.Heuer, sur le venues d'eu entunnel (A quantitative, empirical and theoretical approach on water flow into tunnels)", Rapid Excavation and Tunneling Conference, San Francisco, June 18-21.
- [۱۸۴] ج. حسن‌پور، ع. ارومیه‌ای، "ارزیابی اعتبار روش‌های مختلف تخمین جریان آب ورودی به تونل‌های سنگی (مطالعه موردی تونل قمرود)"، هفتمین کنفرانس تونل، دانشگاه صنعتی شریف، تیر ۱۳۸۵.
- [۱۸۵] م. صادقی، ا. فصیحی دستجردی، "اثر جبهه کار مختلط بر عملکرد دیسک‌های برشی در حفاری با TBM"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، ۲۴ تا ۲۶ مهر ۱۳۸۶.
- [186] Dowden P.B., Robinson R.A., (2002), "Coping with boulders in soft ground TBM tunneling", A Publication of Tunneling Machinery Consultant, Kirkland, Washington, USA.
- [187] Shina, (1989), "Underground structure", design and instrumentation, Elsiever.

- [188] Ferber V, Auriol JC, Cui YJ and Magnan JP, (2009), "The swelling potential of compacted high plasticity clays", Engineering Geology 104: 200-210.
- [۱۸۹] م. خامه‌چیان, ح. رضایی, م. ر. نیکودل, "بررسی پتانسیل تورم‌پذیری سنگ‌های مارنی سازند آب تلخ", چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران, ۱۳۷۹.
- [190] Barla M., (1999), "Tunnels in swelling ground, Simulation of 3D stress path By triaxial labrotary testing", PhD Thesis, Torino, Italy.
- [۱۹۱] م. بیاتی, ع. مرتضوی, ع. همتی‌شعبانی, "ارزیابی فشار تورمی و تأثیر آن بر پوشش تونل دشت ذهاب", سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران, ۲۴ تا ۲۶ مهر ۱۳۸۶.
- [۱۹۲] م. اشتری, م. خامه‌چیان, ح. ر. زارعی, "رابطه پارامترهای مقاومتی با سیکل دوم آزمایش دوام شکستگی در سنگ‌های مارنی", سی و یکمین گردهمایی علوم زمین, آذر ۱۳۹۱.
- [193] Koncagül E., and Santi P., (1999), "Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability", Shore hardness and rock structural properties, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 139-153.
- [۱۹۴] م. بشیرگنبدی, ع. ارومیه‌ای, م. ر. نیکودل, غ. ر. لشکری‌پور, "بررسی آزمایش‌های دوام و کارایی شاخص شکستگی دوام در برآورد مقاومت تراکمی تک‌محوره سنگ‌های سازند شمشک", فصل‌نامه زمین‌شناسی ایران, سال چهارم, شماره سیزدهم, بهار ۱۳۸۹.
- [195] Steiner W., (1993), "Swelling rock in tunnels", international journal of rock mechanics.
- [196] Barla G., (2002), "Tunnelling under squeezing rock conditions", Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino.
- [197] Barla G., (2001), "Tunneling under squeezing rock condition", Euro summer- School in Tunnel Mechanics, Innsbrock.
- [198] Steiner W., (1996), "Tunneling in squeezing rock: case history", Rock Mechanics and Rock Engineering, 211-246.
- [199] Barla G., (2000), "Tunnelling under squeezing rock conditions", Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino.
- [200] Singh B., Jethwa J.L., Dube A.K., Singh B., (1992), "Correlation between observed support pressure and rock mass quality", Tunnelling and Underground Space Technology, pp 59-74.
- [201] Goel R.K., Jethwa J.L. and Paithakan A.G., (1995), "Tunnelling through the young Himalayas - a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunne", Journal of Engineering Geology, pp 31-44.

- [202] Jethwa J.L., Singh B., Singh B., (1984), "Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions- a new approach", design and performance of underground excavations, ISRM Symposium, Cambridge, pp 231-238.
- [203] Hoek E., Marinos P., (2000), "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses-Part 2: Estimating tunnel squeezing problems", Journal of Tunnels and Tunneling International, pp 33-36.
- [204] Tzamos S., (2004), "Tunnel Assistant Quick Reference Guide", Athens, Greece. Embed.
- [205] Thewes M., Burger W., (2005), "Clogging of TBM drives in clay identification and mitigation of risks", Underground space use: Analysis of the past and lessons for the future, Taylor & Francis Group, V. 1-2, London.
- [206] Langmaack L., (2006), "TBM tunneling- chances and limits. International symposium on: Utilisation of underground space in urban areas", Sharm el-sheikh, Egypt.
- [207] Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J., Raleigh P., (2007), "New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling", In Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), pp 104-116.
- [208] Ball R.P.A., Young D.J., Isaacson J., Champa J., Gause C., (2009), "Research in Soil Conditioning for EPB Tunneling Through Difficult Soils", Rapid Excavation & Tunneling Conference (RETC), Las Vegas, USA, June 14-17.

[۲۰۹] ح. میرمحرابی، ص. طریق ازل، م. غفوری، غ.ر. لشکری پور، "بررسی خطر گل گرفتگی در سنگ‌های رسی (آرژیلیتی) تونل اسپر"، هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شهریور ۱۳۹۰.

- [210] Thewes M., Burger W., (2004), "Clogging risks for TBM drives in clay", Tunnels & Tunneling International.

[۲۱۱] م. جمالی، "بررسی ژئومورفولوژی اشکال کارستی پولیه ارژن"، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، آذر ۱۳۹۱.

[۲۱۲] م. مقصودی، ح. کریمی، ف. صفری، ذ.ا. چهارراهی، "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.

[۲۱۳] م. عباسی، م. گلیان، ا. شریفی تشنیزی، ا.ر. ایزدی، ع.ا. آغاسی، "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.

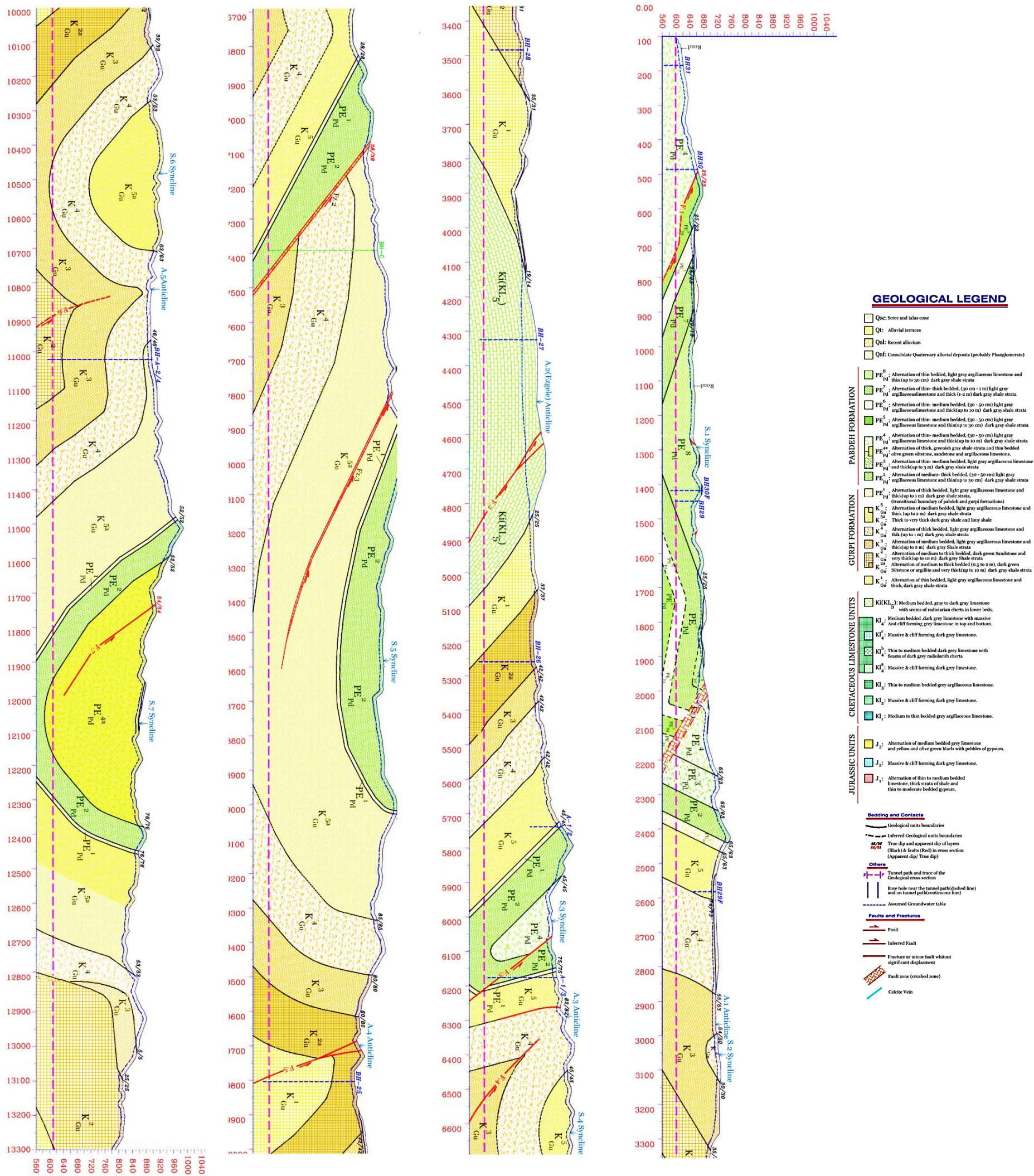
[۲۱۴] ه. مقیمی، "هیدرولوژی کارست"، انتشارات دانشگاه پیام نور، فروردین ۱۳۹۱.

[۲۱۵] س.ن. امامی، "چالش‌های زمین‌شناختی پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای (مطالعه موردی: طرح انتقال آب بهشت آباد به فلات مرکزی)"، همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها)، خرداد ۱۳۹۱.

- [۲۱۶] م. حیدری‌زاد، ح. محمدزاده، "بررسی ژئوشیمی و ژئومورفولوژی کارست در سازند مزدوران (مطالعه موردی: دره آل و اندرخ واقع در شمال مشهد)", سی‌امین گردهمایی علوم زمین، اسفند ۱۳۹۰.
- [217] La Moreaux P.E., (1991), "History of karst hydrogeological studies", proceeding of the international conference on Environmental changes in karst areas, Universita di padova, Italy, pp. 215-229.
- [۲۱۸] آ. افراسیابیان، "اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران", مجموعه مقالات دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی، کرمانشاه.
- [219] Laboratory of Engineering and Environmental Geology" Prediction of karst occurrences in underground engineering", Viewed November14,2013<http://geolep.epfl.ch/files/content/sites/geolep/files/shared/recherche/filipponi/Kalea_Ofrou_Tot_2009_05_15_PYJ.pdf>.
- [۲۲۰] ص. قیاسوند، "تونل‌سازی در زمین‌های گازدار (مسائل زمین‌شناسی - مخاطرات مهندسی)", پنجمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ۱۳۸۶.
- [۲۲۱] ق. ستاری، ش. آجودانی، ح.ر. بطحایی، "تونل‌سازی مکانیزه در شرایط بحران آب و گاز مطالعه موردی: تونل بلند زاگرس", نهمین همایش ملی تونل، ۱۳۹۰.
- [۲۲۲] مهندسین مشاورین ساحل، "هیدروژئولوژی مسیر تونل نوسود (قطعه دوم)", خدمات مهندسی تکمیلی تونل انتقال آب نوسود- قطعه ۲، ۱۳۸۵.
- [۲۲۳] مهندسین مشاورین ساحل، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل", خدمات مهندسی تکمیلی تونل انتقال آب نوسود- قطعه ۲، گزارش ۲۰۲۶، ۱۳۸۶.
- [۲۲۴] موسسه مهندسین مشاور ساحل، "گزارش مقدماتی مطالعات زمین‌شناسی مسیر تونل کیلومتر (۰۶+۸۵۰ تا ۰۲+۹۰۰)", خدمات مهندسی تکمیلی تونل انتقال آب نوسود- قطعه ۲، ۱۳۸۵.
- [225] Barton N., (2000), "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock", A.A. Balkema, Rotterdam.
- [۲۲۶] موسسه مهندسین مشاور ساحل، "گزارش نهایی مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل کیلومتر (۰۲+۹۰۰ تا ۰۶+۸۵۰)", خدمات مهندسی تکمیلی تونل انتقال آب نوسود- قطعه ۲، ۱۳۸۵.

پوستا

پیوست ۱: برش زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه (قطعه ۲ نوسود)



پوست ۲

پیوست ۲: پرسشنامه‌ی طراحی شده برای روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل فازی

گروه عامل	عوامل	احتمال وقوع	میزان تاثیر	عدم اطمینان تخمین	توانایی سازمان در واکنش به ریسک	توضیحات
زمین شناسی		خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
	برخورد با زون های خرد شده و گسله					
	ریزش و سقوط بلوک های سنگی					
	نشت و هجوم آب به داخل تونل					
	سینه کار مختلط					
	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی					
	پدیده لهیدگی					
	تشکیل گل					
	پتانسیل کارست					
	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها					

چه به تعداد مخاطرات موثر زمین شناسی در تونلسازی مکانیزه ، لذا خواهمشند
است اگر مخاطره ای از نظر دور مانده است ، نام آن مخاطره را در ستون
خالی آورده و سپس همانند پارامترهای مذکور، ستون های پرسشنامه را پر
نمایید.

[illegible]

پوست ۳

پیوست ۳: پرسشنامه‌ی طراحی شده برای روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی

معیار	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	معیار
توانایی سازمان در واکنش به ریسک	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	احتمال وقوع
توانایی سازمان در واکنش به ریسک	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	میزان تاثیر
توانایی سازمان در واکنش به ریسک	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	عدم اطمینان تخمین
احتمال وقوع	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	میزان تاثیر
احتمال وقوع	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	عدم اطمینان تخمین
میزان تاثیر	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	عدم اطمینان تخمین

نمونه‌ای از نحوه‌ی تکمیل نمودن پرسشنامه در جدول ذیل آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در سمت چپ و راست گزینه‌ها قرار دارند که به صورت زوجی با یکدیگر قیاس می‌شوند و بسته به اهمیت هر کدام نسبت به دیگری، به پرسشنامه پاسخ داده می‌شود.

به عنوان مثال: اولین گزینه (خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی) نسبت به پدیده لهیدگی ۵ برابر اهمیت دارد معادل (۱/۵) و یا خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی نسبت به تشکیل گل ۹ برابر اهمیت دارد معادل (۱/۹).

خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها

با توجه به توضیحات بیان شده فرم‌های نظرسنجی توسط کارشناسان تکمیل گردیده است.

ماتریس مقایسه زوجی از نظر احتمال وقوع										
گزینه	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	گزینه
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	ریزش و سقوط بلوک های سنگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
تشکیل گل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
تشکیل گل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پتانسیل کارست	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها

ماتریس مقایسه زوجی از نظر میزان تاثیر

گزینه	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	گزینه
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	ریزش و سقوط بلوک های سنگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
تشکیل گل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
تشکیل گل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پتانسیل کارست	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها

ماتریس مقایسه زوجی از نظر عدم اطمینان تخمین

گزینه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گزینه
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	ریزش و سقوط بلوک های سنگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سینه کار مختلط
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پدیده لهیدگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تشکیل گل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پتانسیل کارست
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سینه کار مختلط
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پدیده لهیدگی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تشکیل گل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پتانسیل کارست
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سینه کار مختلط
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پدیده لهیدگی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تشکیل گل
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پتانسیل کارست
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
سینه کار مختلط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
سینه کار مختلط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پدیده لهیدگی
سینه کار مختلط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تشکیل گل
سینه کار مختلط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پتانسیل کارست
سینه کار مختلط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پدیده لهیدگی
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تشکیل گل
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پتانسیل کارست
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پدیده لهیدگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	تشکیل گل
پدیده لهیدگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پتانسیل کارست
پدیده لهیدگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
تشکیل گل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	پتانسیل کارست
تشکیل گل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پتانسیل کارست	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها

ماتریس مقایسه زوجی از نظر توانایی سازمان در واکنش به ریسک

گزینه	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	گزینه
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	ریزش و سقوط بلوک های سنگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
برخورد با زون های خرد شده و گسله	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت و هجوم آب به داخل تونل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
ریزش و سقوط بلوک های سنگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	سینه کار مختلط
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
نشت و هجوم آب به داخل تونل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
سینه کار مختلط	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پدیده لهیدگی
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
خطر تورم سازندهای شیلی و مارنی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	تشکیل گل
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
پدیده لهیدگی	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
تشکیل گل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	پتانسیل کارست
تشکیل گل	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها
پتانسیل کارست	۱۹	۱۷	۱۵	۱۳	۱	۳	۵	۷	۹	نشت گازهای سمی موجود در سنگ ها

Abstract

Underground and infrastructure projects are generally complex project with many variables including ground and groundwater conditions are variable and uncertain. The data obtained are mostly indirect. These conditions infliction significant risks in all project components or parts that are indirectly related with the project, and has led to the high costs and time delays to the project. Correct and timely management of these risks causes minimize the probability of occurrence and or negative consequences effect on project objectives. Ranking by providing timely response to risk it all, helpful to the risk management process will be more successful.

In this study, prioritize risks are discussed in the mechanized tunneling to using Fuzzy Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solution (FTOPSIS) and Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Process (FDAHP) in Nosoud water transfer tunnel and in order To achieve the unified idea has been used prioritize strategy. initially In order to prioritize, identify the risks of geological and effective factors on that have been set. The calculations performed in 19 separate zone and ultimately three risk as the high risk (main) in each zone specified. The analysis results according to the method Fuzzy Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solution in different zones shows that leaks of toxic gases in rocks and water inrush and influx into the tunnel in this study are respectively most important risks And Ravelling & fall blocks of rock Along with the phenomena of squeezing with equal importance index are the next category. It is noted that the analysis results of the method of Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Process is similar to Fuzzy Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solution except that clash with the fault and crushed zones replaced the phenomena of squeezing. Merger technique also Defines leaks of toxic gases in rocks, water inrush and influx into the tunnel and clash with the fault and crushed zones in different zones as the most important risks in this research, That this analysis a similar of analysis results by Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Process. The results of validation insists the correctness of calculations closer to reality.

Keyword: Project, Risk, Risk management, Risk Prioritization, Mechanized Tunneling, FDAHP , FTOPSIS, Prioritize Strategy, Geological Risks.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Department of Mine Exploitation

Master's thesis

**Geological risk evaluation using a multi-criteria decision making methods in
mechanized tunneling - Case study : Nosoud water transfer tunnel**

Supervisor:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Hoseyn Mirzaei Nasirabad

By:

Seyed Rasol Ramezannia Toluti

February 2014