

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی در تونلسازی مکانیزه در نواحی شهری -  
مطالعه‌ی موردی: تونل متروی خط ۱ تبریز

عارف فاقدی

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر شکرا... زارع

شهریور ۱۳۹۲

## چکیده:

اجرای مکانیزه تونل، پیشرفت و گسترش صنعت تونلسازی را سرعت بخشیده است. با این حال پروژه‌های تونلسازی به دلیل عدم قطعیت‌های مرتبط با آنها همواره با درصد بالایی از ریسک همراه می‌باشند. بنابراین و با توجه به هزینه و زمان زیاد در خصوص انجام پروژه‌های حفاری مکانیزه، شناسایی و رتبه‌بندی ریسک ماشین حفاری ضرورت دارد. لذا در این تحقیق ارزیابی، برآورد و رتبه‌بندی مخاطرات محتمل ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی در تونلسازی مکانیزه در نواحی شهری مد نظر قرار گرفته است.

در این تحقیق ابتدا با بررسی روش‌های مدیریت ریسک، روش‌های مناسبی برای رتبه‌بندی ریسک انتخاب شده است. در ادامه مهمترین مخاطرات زمین‌شناسی موجود در حفاری مکانیزه در نواحی شهری معرفی و بررسی شده است. مهمترین مخاطرات زمین‌شناسی موجود در مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز شناسایی شده و پس از بررسی کیفی این مخاطرات، اقدام به رتبه‌بندی ریسک این مخاطرات با استفاده از دو روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) شده است. نتایج حاصل از رتبه‌بندی ریسک هماهنگی مناسبی با نتایج حفاری واقعی مسیر تونل دارند.

**کلمات کلیدی:** تونلسازی مکانیزه، عدم قطعیت، مخاطرات زمین‌شناسی، رتبه‌بندی ریسک، تونل

خط ۱ متروی تبریز، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ارایه مقاله با عنوان بررسی مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز در اولین کنفرانس بین‌المللی معدن (زنجان)، شهریور ۱۳۹۲
- ارایه مقاله با عنوان بررسی پتانسیل چسبندگی زمین در نواحی شهری برای حفاری با ماشین EPB-TBM در هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران (دانشگاه فردوسی مشهد)، آبان ۱۳۹۲

## فهرست مطالب

|   |    |
|---|----|
| فصل ۱. مقدمه .....  | ۲  |
| ۱-۱ کلیات .....   | ۳  |
| ۲-۱ اهداف و ضرورت انجام تحقیق .....                                 | ۳  |
| ۳-۱ روش انجام تحقیق .....   | ۴  |
| ۴-۱ ساختار پایان نامه .....   | ۵  |
| فصل ۲. مدیریت ریسک و روش های رتبه بندی آن .....                     | ۶  |
| ۱-۲ مقدمه .....   | ۷  |
| ۲-۲ ریسک و مدیریت ریسک .....  | ۷  |
| ۱-۲-۲ ریسک .....  | ۷  |
| ۲-۲-۲ مدیریت ریسک .....   | ۹  |
| ۳-۲-۲ فرآیند مدیریت ریسک .....                                      | ۱۰ |
| ۳-۲ روش های ارزیابی و رتبه بندی ریسک .....                          | ۱۴ |
| ۱-۳-۲ درخت خطا .....  | ۱۴ |
| ۲-۳-۲ درخت رویداد .....   | ۱۵ |
| ۳-۳-۲ تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن .....                     | ۱۶ |
| ۴-۳-۲ روش های فازی .....  | ۱۷ |
| ۵-۳-۲ شبیه سازی مونت کارلو .....                                    | ۱۸ |
| ۶-۳-۲ روش های تصمیم گیری چند معیاره .....                           | ۱۸ |
| ۴-۲ روش های رتبه بندی ریسک مورد استفاده در تحقیق .....              | ۱۹ |
| ۱-۴-۲ انتخاب روش رتبه بندی مناسب .....                              | ۱۹ |
| ۲-۴-۲ روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) .....                            | ۲۰ |
| ۳-۴-۲ روش شباهت به گزینه ایده آل (TOPSIS) .....                     | ۲۳ |
| ۵-۲ سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه ارزیابی و رتبه بندی ریسک ..... | ۲۶ |
| ۵-۲ جمع بندی .....  | ۳۰ |
| فصل ۳. مخاطرات ژئوتکنیکی در تونلسازی مکانیزه در نواحی شهری .....    | ۳۱ |
| ۱-۳ مقدمه .....   | ۳۲ |
| ۲-۳ جبهه کار مختلط .....  | ۳۳ |
| ۱-۲-۳ مشکلات ناشی از جبهه کار مختلط .....                           | ۳۴ |
| ۲-۲-۳ راهکارهای پیش بینی و شناسایی جبهه کار مختلط .....             | ۳۴ |
| ۳-۳ وجود بولدر در مسیر تونل .....                                   | ۳۵ |

|    |       |  |
|----|-------|--|
| ۳۶ | ..... | ۱-۳-۳ مشکلات ناشی از وجود بولدر در مسیر                                      |
| ۳۸ | ..... | ۲-۳-۳ راهکارهای پیش‌بینی و شناسایی بولدر                                     |
| ۴۰ | ..... | ۴-۳ نشست سطح زمین  |
| ۴۱ | ..... | ۱-۴-۳ حداکثر نشست مجاز سازه‌ها   |
| ۴۲ | ..... | ۵-۳ تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی                                      |
| ۴۲ | ..... | ۱-۵-۳ مشکلات ناشی از نفوذپذیری بالا و آب زیرزمینی                            |
| ۴۳ | ..... | ۲-۵-۳ روش‌های تعیین نفوذپذیری خاک  |
| ۴۴ | ..... | ۶-۳ انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش                                    |
| ۴۵ | ..... | ۱-۶-۳ مشکلات ناشی از چسبندگی زمین  |
| ۴۶ | ..... | ۲-۶-۳ عوامل و فاکتورهای موثر بر چسبندگی زمین                                 |
| ۴۸ | ..... | ۷-۳ ساینده‌های زمین  |
| ۴۹ | ..... | ۱-۷-۳ مشکلات ناشی از زمین‌های ساینده   |
| ۴۹ | ..... | ۲-۷-۳ روش‌های شناسایی ساینده‌های زمین  |
| ۵۱ | ..... | ۸-۳ تورم زمین  |
| ۵۱ | ..... | ۱-۸-۳ مشکلات ناشی از زمین‌های تورمی  |
| ۵۲ | ..... | ۲-۸-۳ روش‌های شناسایی زمین‌های تورمی   |
| ۵۴ | ..... | ۹-۳ فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل   |
| ۵۴ | ..... | ۱-۹-۳ مشکلات ناشی از فقدان مصالح ریزدانه                                     |
| ۵۵ | ..... | ۲-۹-۳ روش‌های تعیین میزان خطر ناشی از فقدان مصالح ریزدانه                    |
| ۵۶ | ..... | ۱۰-۳ روانگرایی خاک   |
| ۵۷ | ..... | ۱-۱۰-۳ مشکلات ناشی از روانگرایی  |
| ۵۷ | ..... | ۲-۱۰-۳ روش‌های برآورد پتانسیل روانگرایی                                      |
| ۶۳ | ..... | ۱۱-۳ جمع‌بندی  |
| ۶۴ | ..... | <b>فصل ۴: معرفی پروژه تونل خط ۱ متروی تبریز و بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی آن</b> |
| ۶۵ | ..... | ۱-۴ مقدمه  |
| ۶۵ | ..... | ۲-۴ معرفی طرح قطار شهری تبریز  |
| ۶۷ | ..... | ۱-۲-۴ موقعیت و محل پروژه قطار شهری تبریز                                     |
| ۶۷ | ..... | ۲-۲-۴ زمین‌شناسی عمومی منطقه   |
| ۶۹ | ..... | ۳-۴ مطالعات ژئوتکنیک   |
| ۷۰ | ..... | ۱-۳-۴ عملیات حفاری گمانه‌های اکتشافی   |
| ۷۱ | ..... | ۲-۳-۴ آزمایش‌های صحرایی  |
| ۷۱ | ..... | ۳-۳-۴ آزمون‌های آزمایشگاهی   |
| ۷۲ | ..... | ۴-۳-۴ نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی                                   |

|                 |   |
|-----------------|---|
| ۷۵.....         | ۴-۴ روش حفاری .....   |
| ۷۶.....         | ۵-۴ بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز .....                                  |
| ۷۸.....         | ۴-۵-۱ نشست سطح زمین .....   |
| ۷۹.....         | ۴-۵-۲ تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی .....   |
| ۸۰.....         | ۴-۵-۳ جبهه کار مختلط .....  |
| ۸۰.....         | ۴-۵-۴ گل گرفتگی و انسداد کاترهد و ابزار برش .....   |
| ۸۱.....         | ۴-۵-۵ سایندگی زمین .....  |
| ۸۴.....         | ۴-۵-۶ وجود بولدر و قطعات سنگی در مسیر تونل .....  |
| ۸۵.....         | ۴-۵-۷ تورم (آماس) زمین .....  |
| ۸۷.....         | ۴-۵-۸ فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل .....  |
| ۸۸.....         | ۴-۵-۹ پتانسیل روانگرایی مسیر تونل .....   |
| ۹۱.....         | ۴-۶ جمع‌بندی .....  |
| <b>۹۲.....</b>  | <b>فصل ۵: رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز .....</b>               |
| ۹۳.....         | ۵-۱ مقدمه .....   |
| ۹۳.....         | ۵-۲ رتبه‌بندی مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز .....                              |
| ۹۵.....         | ۵-۲-۱ رتبه‌بندی مخاطرات ژئوتکنیکی خط ۱ متروی تبریز با روش کلاسیک .....                        |
|                 | ۵-۲-۲ رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی تونل خط ۱ متروی تبریز با استفاده از روش تحلیل سلسله    |
| ۹۶.....         | مراتبی (AHP) .....  |
|                 | ۵-۲-۳ رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی تونل خط ۱ متروی تبریز با استفاده از روش شباهت به گزینه |
| ۱۰۲.....        | ایده‌آل (TOPSIS) .....  |
| ۱۰۶.....        | ۵-۳ مقایسه نتایج رتبه‌بندی با نتایج واقعی حاصل از حفاری تونل .....                            |
| ۱۱۰.....        | ۵-۴ جمع‌بندی .....  |
| <b>۱۱۲.....</b> | <b>فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات .....</b>  |
| ۱۱۳.....        | ۶-۱ مقدمه .....   |
| ۱۱۳.....        | ۶-۲ جمع‌بندی مطالب ارائه شده در پایان‌نامه .....  |
| ۱۱۷.....        | ۶-۳ پیشنهادات .....   |
| ۱۱۸.....        | مراجع: .....  |
| ۱۲۲.....        | پیوست: .....  |

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه ..... ۹
- شکل (۱-۳): جبهه کار مختلط (وجود قلوه سنگ در ماتریس خاک) ..... ۳۴
- شکل (۲-۳) نمونه‌ای از مغزه‌های گرفته شده از محیط دارای شرایط جبهه کار مختلط ..... ۳۵
- شکل (۳-۳) وجود بولدر در مسیر حفاری تونل ..... ۳۷
- شکل (۴-۳) ریسک انسداد و توقف روش‌های حفاری مختلف با توجه به اندازه نسبی بولدر ..... ۳۹
- شکل (۵-۳) محدوده کاربرد EPB و SPB بر اساس نفوذپذیری خاک ..... ۴۴
- شکل (۶-۳) گل‌گرفتگی دهانه اسکریپر (راست) و دیسک (چپ) (دید از داخل کله حفار) ..... ۴۵
- شکل (۷-۳) نمودار خطر گل‌گرفتگی برای ماشین به سبب کانی‌های رسی ..... ۴۸
- شکل (۸-۳) نمودار حوزه‌های دانه‌بندی مسیر تونل برای کار با ماشین حفاری مدل EPB ..... ۵۵
- شکل (۹-۳) معیار ارزیابی پتانسیل روانگرایی برای خاک‌های ریزدانه ..... ۶۲
- شکل (۱-۴) طرح خطوط متروی تبریز ..... ۶۶
- شکل (۲-۴) نقشه محل پروژه ..... ۶۷
- شکل (۳-۴) وضعیت زمین‌شناسی تبریز و ساختار قطار شهری تبریز ..... ۶۹
- شکل (۴-۴) مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل ..... ۷۲
- شکل (۵-۴) منحنی‌های دانه‌بندی رسوبات آبرفتی مسیر تونل ..... ۷۳
- شکل (۶-۴) دستگاه‌های حفاری EPB-TBM استفاده شده در خط ۱ متروی تبریز ..... ۷۶
- شکل (۷-۴) مقطع میکروسکوپی نمونه ماسه‌ای ..... ۸۳
- شکل (۸-۴) نمونه‌ای از مواد حفاری شده در زون A ..... ۸۵
- شکل (۹-۴) گستره‌ی دانه‌بندی خاک مسیر تونل ..... ۸۸
- شکل (۱۰-۴) ضریب اطمینان روانگرایی برای برخی از گمانه‌های مسیر تونل ..... ۹۰
- شکل (۱-۵) نمودار ستونی میزان ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز ..... ۹۶
- شکل (۳-۵) شکل شماتیک رده‌ی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون A ..... ۱۰۰
- شکل (۴-۵) شکل شماتیک رده‌ی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون B ..... ۱۰۱
- شکل (۵-۵) نتایج رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون A با استفاده از روش TOPSIS ..... ۱۰۴
- شکل (۶-۵) نتایج رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون B با استفاده از روش TOPSIS ..... ۱۰۶



## فهرست جداول

- جدول (۲-۱): طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها. ۲۱
- جدول (۲-۲): ماتریس مقایسه زوجی. ۲۱
- جدول (۲-۳): شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی. ۲۳
- جدول (۲-۴): تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونلسازی و فضاهای زیرزمینی. ۲۷
- جدول (۳-۱): رده‌بندی کیفی و کمی مسیر تونل بر اساس BVR. ۳۶
- جدول (۳-۲): توانایی تخمین و هزینه اجرایی نسبی روش‌های شناسایی بولدر. ۳۹
- جدول (۳-۳): دلایل و مکانیزم انواع نشست. ۴۰
- جدول (۳-۴): ماکزیمم نشست مجاز برای برخی سازه‌ها. ۴۱
- جدول (۳-۵): حداکثر نشست نسبی برای انواع ساختمان‌ها بر اساس آیین‌نامه (USSR). ۴۱
- جدول (۳-۶): طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس اندیس ساینده‌گی سرشار. ۴۹
- جدول (۳-۷): رده‌بندی پتانسیل ساینده‌گی خاک‌ها بر اساس عدد AVS. ۵۰
- جدول (۳-۸): رده‌بندی پتانسیل تورم خاک بر اساس روش USBR. ۵۳
- جدول (۳-۹): ارزیابی پتانسیل تورم خاک به روش داکشانمورتی و رامان. ۵۴
- جدول (۳-۱۰): استعداد روانگرایی نسبی نهشته‌های طبیعی به صورت تابعی از تراز آب زیرزمینی. ۵۹
- جدول (۳-۱۱): خلاصه مشکلات ناشی از مخاطرات ژئوتکنیکی و روش‌های شناسایی این مخاطرات. ۶۳
- جدول (۴-۱): سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده‌ی شهر تبریز. ۶۹
- جدول (۴-۲): زون‌بندی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز. ۷۷
- جدول (۴-۳): مشخصات ساختمان‌های واقع در محدوده تونل خط ۱ متروی تبریز. ۷۸
- جدول (۴-۴): پارامترهای ژئوتکنیکی نقاط مختلف مسیر تونل متروی تبریز. ۸۱
- جدول (۴-۵): نتایج آزمایش‌های سایش به روش سرشار بر روی قلوه‌سنگ‌ها و قطعه سنگ‌های مسیر تونل. ۸۲
- جدول (۴-۶): نتایج آزمایش‌های کانی‌شناسی بر روی خاک‌های ماسه‌ای. ۸۴
- جدول (۴-۷): پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز برای بررسی تورم‌پذیری خاک. ۸۶
- جدول (۴-۸): نتایج بررسی تورم‌پذیری خاک‌های مسیر تونل. ۸۷
- جدول (۴-۹): عمق تراز آب زیرزمینی و عمق تونل مسیر تونل در ایستگاه‌های مختلف. ۸۹
- جدول (۴-۱۰): بررسی روانگرایی زون B. ۸۹
- جدول (۵-۱): میانگین نتایج پرسشنامه برای زون A. ۹۴
- جدول (۵-۲): میانگین نتایج پرسشنامه برای زون B. ۹۴
- جدول (۵-۳): پارامترهای کمی معادل داده‌های کیفی. ۹۵
- جدول (۵-۴): میزان ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی به دست آمده طبق تعریف ریسک. ۹۶

- جدول (۵-۵): نتایج کمی پرسشنامه‌های زون A ..... ۹۸
- جدول (۵-۶): نتایج کمی پرسشنامه‌های زون B ..... ۹۹
- جدول (۵-۷): نتایج وزن‌دار و رده‌ی ریسک مخاطرات زون A نسبت به معیارهای مختلف ..... ۱۰۰
- جدول (۵-۸): نتایج وزن‌دار و رده‌ی ریسک مخاطرات زون B نسبت به معیارهای مختلف ..... ۱۰۱
- جدول (۵-۹): ماتریس بدون مقیاس زون A برای حل با روش TOPSIS ..... ۱۰۲
- جدول (۵-۱۰): ماتریس بدون مقیاس وزن‌دار زون A برای حل با روش TOPSIS ..... ۱۰۳
- جدول (۵-۱۱): فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل و شاخص شباهت برای زون A ..... ۱۰۳
- جدول (۵-۱۲): ماتریس بدون مقیاس زون B برای حل با روش TOPSIS ..... ۱۰۴
- جدول (۵-۱۳): ماتریس بدون مقیاس وزن‌دار زون B برای حل با روش TOPSIS ..... ۱۰۵
- جدول (۵-۱۴): فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل و شاخص شباهت برای زون B ..... ۱۰۵
- جدول (۵-۱۵): نتایج رتبه‌بندی ریسک‌ها با استفاده از هر سه روش ..... ۱۱۰
- جدول (۶-۱): نتایج رتبه‌بندی ریسک با استفاده از تعریف کلاسیک ریسک ..... ۱۱۴
- جدول (۶-۲): اولویت ریسک با استفاده از دو روش AHP و TOPSIS برای زون A ..... ۱۱۵
- جدول (۶-۳): اولویت ریسک با استفاده از دو روش AHP و TOPSIS برای زون B ..... ۱۱۵
- جدول (پ-۱): مشخصات گروه کارشناسان ..... ۱۲۲

## فصل ۱. مقدمه

## ۱-۱ کلیات

به دلیل رشد روزافزون جمعیت در مناطق شهری، نیاز به توسعه سیستم‌های خدمات‌رسانی از قبیل حمل و نقل، تاسیسات و ذخیره‌سازی، بیشتر احساس می‌شود. در همین راستا حفر تونل‌های کم‌عمق شهری توجه خاصی پیدا کرده است. سازگاری با محیط زیست و محیط شهری، مقاومت زیاد در برابر زلزله، استفاده‌های استراتژیک، سرعت و حجم بالای انتقال مسافر برخی از مزایای قطار شهری می‌باشد که باعث توسعه آن در جوامع امروزی شده است.

اجرای مکانیزه تونل، پیشرفت و گسترش صنعت تونل را سرعت بخشیده است. با این حال پروژه‌های تونلسازی به دلیل عدم قطعیت‌های مرتبط با آنها همواره با درصد بالایی از ریسک همراه می‌باشند. بنابراین و با توجه به هزینه و زمان زیاد در جهت انجام پروژه‌های حفاری مکانیزه، شناسایی و رتبه‌بندی ریسک ماشین حفاری ضرورت دارد. لذا در این تحقیق ارزیابی، برآورد و رتبه‌بندی مخاطرات محتمل ژئوتکنیکی در تونلسازی مکانیزه در نواحی شهری مد نظر قرار گرفته است. به این منظور پروژه خط ۱ قطار شهری تبریز مورد بررسی قرار گرفته و پس از مطالعه و تحقیق مهمترین مخاطرات ژئوتکنیکی در این پروژه شناسایی شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱-۲ اهداف و ضرورت انجام تحقیق

علی‌رغم جایگاه مهم مدیریت ریسک بعنوان یکی از مراحل مدیریت پروژه و علی‌رغم اهمیت آن از نظر نزدیک کردن مجریان پروژه‌ها به اهداف پروژه، در کشور ما به این موضوع اهمیت کمی داده شده است. بنابراین ایجاد فرهنگ نگاه علمی به مدیریت ریسک، معرفی علمی و جامع این فرآیند و در نهایت تطبیق فرآیند علمی با واقعیت‌های موجود در پروژه‌های عمرانی کشور باعث رسیدن به نتایج بهتر می‌شود.

ارزیابی ریسک یکی از ارکان مدیریت ریسک بوده و با توجه به ماهیت پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع، دارای اهمیت زیادی می‌باشد. هدف از ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف از قبیل میزان تاثیر 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 را مشخص می‌کند و در نتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک برنامه‌ریزی نماید.

تونل خط ۱ متروی تبریز نیز در ناحیه آبرفتی واقع شده است و ریسک‌های ناشی از پدیده‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی، این پروژه را تهدید می‌کند. لذا مطالعاتی برای شناسایی این مخاطرات لازم است، تا در مراحل بعدی مطالعات و اقدامات بیشتری برای مقابله با مخاطرات پیش‌بینی شده انجام شود.

هدف از مطالعه زمین‌شناسی و ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، شناسایی مخاطرات ناشی از پدیده‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در مسیر تونل می‌باشد. هدف از ارزیابی ریسک نیز تعیین احتمال وقوع و میزان تاثیر هر کدام از این مخاطرات به منظور رتبه‌بندی ریسک هر کدام از این مخاطرات می‌باشد.

### ۳-۱ روش انجام تحقیق

در این تحقیق ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای به منظور آشنایی با انواع مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک در محیط‌های آبرفتی انجام شده و مهمترین معیارهای رتبه‌بندی این مخاطرات شناسایی شده است. در مرحله بعد نتایج بررسی دانه‌بندی و آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌های حاصل از ۳۱ گمانه حفاری شده در مسیر تونل مورد ارزیابی قرار گرفته و پس از زون‌بندی مسیر، مخاطرات زمین‌شناسی محتمل در مسیر تونل تعیین شده است. در مرحله بعدی با استفاده از نظرات و تجارب

کارشناسان، احتمال وقوع و میزان تاثیر هرکدام از مخاطرات به منظور رتبه‌بندی ریسک‌ها به دست آمده و کار رتبه‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیک مسیر انجام شده است. در نهایت با بررسی نتایج حاصل از حفاری بخشی از مسیر تونل، اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، انجام شده است.

## ۴-۱ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر شامل ۶ فصل می‌باشد:

در فصل اول کلیات، اهداف و ضرورت پایان‌نامه و روش انجام تحقیق بیان شده است.

در فصل دوم مدیریت ریسک، انواع روش‌های رتبه‌بندی ریسک و دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)<sup>۱</sup> و روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)<sup>۲</sup> توضیح داده شده و مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت و رتبه‌بندی ریسک در فعالیت‌های تونل‌سازی ارایه شده است.

در فصل سوم مخاطرات زمین‌شناسی موجود در تونل‌سازی مکانیزه در نواحی شهری معرفی شده و مشکلات ناشی از این مخاطرات و روش‌های شناسایی آنها به صورت مختصر ارایه شده است.

در فصل چهارم پروژه تونل متروی خط ۱ تبریز معرفی شده و مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی آن بررسی شده است.

در فصل پنجم رتبه‌بندی ریسک مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تونل خط ۱ متروی تبریز انجام شده است.

در نهایت در فصل ششم نتایج به دست آمده به بحث گذاشته شده و پیشنهاداتی جهت ادامه مطالعات ارایه شده است.

---

<sup>۱</sup> Analytical Hierachy Process

<sup>۲</sup> Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution

## **فصل ۲. مدیریت ریسک و روش‌های رتبه‌بندی آن**

## ۲-۱ مقدمه

ریسک و مدیریت آن در چند سال اخیر به موضوعی حساس و ضروری برای سازمان‌ها و قشر مدیران تبدیل شده است و با رشد تئوری‌های مدیریت و برنامه‌ریزی و گسترش به کارگیری آنها، لزوم استفاده از ابزارهای مدیریت ریسک به خصوص در محیط‌های پروژه‌محور به شدت احساس می‌شود. در این راستا تلاش برای شناسایی، آموزش و به کارگیری ابزارها و تکنیک‌های مدیریت ریسک پروژه طی سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای داشته است.

در ادامه ریسک و مدیریت آن تشریح شده و برخی از روش‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک معرفی شده است. در انتهای فصل نیز کارهای انجام شده در زمینه ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک به صورت مختصر ارایه شده است.

## ۲-۲ ریسک و مدیریت ریسک

ریسک مفهومی از رخداد‌های نامعلوم و مهمی است که سطح دست یافتن به عملکردهای مورد انتظار پروژه را مشخص می‌کند و می‌تواند روی زمان، بهره‌وری، کیفیت و بودجه‌ی لازم برای پروژه اثر بگذارد. مدیریت ریسک مجموعه فرآیندهای مورد نیاز برای شناسایی، تجزیه و تحلیل و واکنش در مقابل آن، به منظور پیشینه نمودن نتایج وقایع مثبت و کمینه نمودن پیامدهای وقایع ناگوار است. مدیریت ریسک پروژه، هنر و علم تشخیص، تعیین و واکنش به وقایع ناگوار در سرتاسر طول عمر یک پروژه برای حفظ روند رسیدن به اهداف آن می‌باشد [۱].

## ۲-۲-۱ ریسک

ریسک تابعی است که احتمال و اندازه خسارت را تعیین می‌کند. در منابع مختلف تعاریف متعددی برای ریسک ارایه شده که در ادامه به چند مورد از این تعاریف اشاره شده است:



انجمن مدیریت پروژه<sup>۱</sup> (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 نگاه شده است که دارای دو جنبه مثبت (فرصت) و منفی (تهدید) می‌باشد [۲].

انجمن مدیریت پروژه انگلستان<sup>۲</sup> (APM)، ریسک را این‌گونه تعریف می‌کند: « رویداد ریسک یک رویداد نامطمئن است و زمانی که مجموعه‌ای از شرایط رخ می‌دهد، بر روی دستیابی به یک یا تعداد بیشتری از اهداف پروژه تاثیر می‌گذارد » [۳].

هندبوک مدیریت ریسک، آن را « تاثیر آینده یک خطر در نتیجه عدم حذف و کنترل آن » معرفی می‌نماید [۴].

هندبوک مدیریت پروژه، آن را رویدادی بیان می‌کند که در صورت وقوع به عنوان تهدید بالقوه برای یکپارچگی پروژه شناخته می‌شود [۵].

از دیدگاه بیچر<sup>۳</sup>، احتمال منجر شدن یک خطر به حادثه یا سانحه ریسک گفته می‌شود. در واقع ریسک ترکیبی از احتمال وقوع و وخامت عواقب ناشی از حادثه یا سانحه است (شکل ۲-۱) [۶].

کرزرنر<sup>۴</sup> ریسک را برآورد احتمال و شدت پیامد بیان می‌داند [۷].

انجمن بین‌المللی تونل جهت ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل‌سازی از تعریف مرسوم ریسک استفاده می‌نماید [۸]:

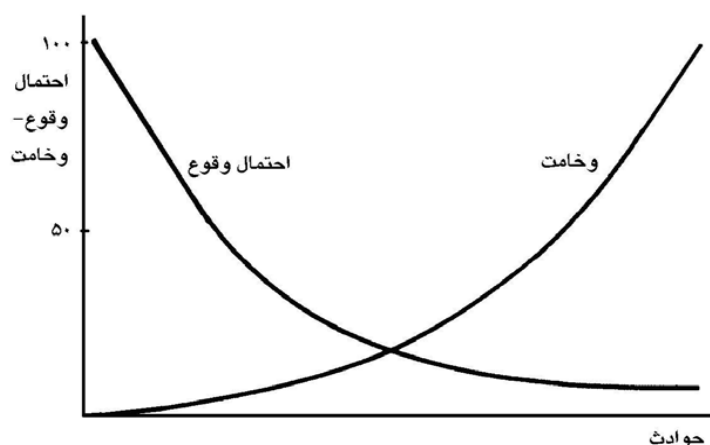
$$\text{ریسک} = \text{تاثیر} \times \text{احتمال وقوع}$$

<sup>۱</sup> Project Management Institute

<sup>۲</sup> Association for Project Management

<sup>۳</sup> Beacher

<sup>۴</sup> Kerzner



شکل (۱-۲) ارتباط بین احتمال وقوع و وخامت عواقب یک حادثه [۶]

## ۲-۲-۲ مدیریت ریسک

برای مدیریت ریسک نیز مانند واژه ریسک، تعاریفی ارائه شده است که البته همه در برگیرنده مفهومی یکسان هستند و تمرکز روی فرآیند مدیریت ریسک دارند:

طبق تعریف موسسه مدیریت پروژه، مدیریت ریسک شامل فرآیندهای برنامه‌ریزی، شناسایی، تحلیل، برنامه‌ریزی پاسخ و کنترل ریسک پروژه است. در واقع می‌توان هدف از مدیریت ریسک را افزایش احتمال و اثر وقایع مثبت و کاهش احتمال و اثر وقایع منفی در پروژه دانست. لازم به ذکر است فرآیندهای یادشده با یکدیگر هم‌پوشانی داشته و در تعامل هستند [۵].

از نظر انجمن مدیریت پروژه انگلستان، مدیریت ریسک «یک فرآیند ساختارمند است که اجازه می‌دهد تا رویدادهای انفرادی ریسک و ریسک کلی پروژه به خوبی درک شود و کارهای پیش‌گیرانه با به حداقل رساندن تهدیدها و حداکثر کردن فرصت‌ها برای مدیریت بهتر پروژه صورت پذیرد» [۳].

طبق نظر ویلیامز و هینز<sup>۱</sup>، مدیریت ریسک، فرآیند شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌های بالقوه‌ای است که مشخصاً پیامدهای ممکن آن خسارت یا عدم تغییر در وضع موجود می‌باشد. مدیریت ریسک،

<sup>۱</sup> Williams & Heins

ریسک‌ها را به وسیله کنترل آنها و تامین مالی خسارت‌هایی که به رغم تلاش‌های کنترل خسارت، اتفاق افتاده‌اند، اداره می‌کند [۹].

کرژنر مدیریت ریسک را «فعالیت یا کوشش در جهت پرداختن به ریسک» معرفی می‌کند [۷].

از بین تعاریف ذکرشده برای ریسک و مدیریت ریسک، تعاریف ارائه شده توسط انجمن مدیریت پروژه از جامعیت بیشتری برخوردارند.

## ۲-۲-۳ فرآیند مدیریت ریسک

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

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

فرآیندهای مذکور با یکدیگر و با سایر فرآیندهای موجود در سایر زمینه‌های دانش مدیریت پروژه در تعامل می‌باشند [۲]. در ادامه فرآیندهای مذکور تشریح می‌شود.

### I- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک

برنامه‌ریزی مدیریت ریسک، شالوده فعالیت‌های آتی را تشکیل می‌دهد. برنامه‌ریزی مدیریت ریسک پروژه عبارت است از فرآیند تصمیم‌گیری در مورد چگونگی هدایت فعالیت‌های مدیریت ریسک در پروژه. این فرآیند برای تدارک زمان و منابع لازم برای فعالیت‌های مدیریت ریسک و همچنین تعیین اصول یکسان و مورد توافق به منظور ارزیابی ریسک‌ها، دارای اهمیت فراوانی است. در برنامه

مدیریت ریسک در استاندارد PMBOK مواردی همچون روش‌شناسی مدیریت ریسک، نقش‌ها، بودجه و زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت‌های مدیریت ریسک، دسته‌های ریسک، ماتریس شدت اثر ریسک و... لحاظ می‌شود [۱۰].

## II- شناسایی ریسک

در این بخش از فرآیند ایجاد سیستم مدیریت ریسک، کل تیم پروژه برای بحث و شناسایی ریسک‌های مربوط به پروژه گرد هم می‌آیند. پیشنهاد می‌شود در این جلسات، تمرکز تیم تنها بر ریسک باشد. تمرکز بر روی ریسک در این جلسات، باعث می‌شود که کل تیم به اهمیت ریسک در پروژه پی برده و همه به ریسک‌های موجود در پروژه فکر کنند. به دلیل مشکل بودن این بخش، شناسایی و مدیریت ریسک در پروژه‌ها به خوبی انجام نمی‌شود. از آنجایی که ریسک یک رخداد عدم قطعی و تا حدودی ناشناخته می‌باشد، فرآیند مدیریت ریسک نسبت به سایر فرآیندهای مهندسی، امری غریب به نظر می‌رسد. به همین دلیل شناسایی ریسک برای بسیاری از مدیران پروژه امری سخت و طاقت‌فرسا می‌باشد. در صورتی که رویه شناخت ریسک مشخص شده باشد، مدیریت آنها راحت‌تر خواهد بود [۱۰].

## III- تجزیه و تحلیل کیفی ریسک

پس از لیست کردن کلیه ریسک‌های بالقوه پروژه، نوبت به تجزیه و تحلیل کیفی ریسک می‌رسد. در تجزیه و تحلیل کیفی، با توجه به کمبود اطلاعات دقیق در مورد ریسک‌های پروژه و میزان اثرگذاری آنها بر روی پروژه، از مقادیر کیفی برای بررسی ریسک استفاده می‌شود. با توجه به محدودیت‌های زمانی و بودجه‌ای امکان بررسی و پرداختن به کلیه ریسک‌های بالقوه پروژه، عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا لازم است که ریسک‌های شناخته‌شده پروژه رتبه‌بندی شده و بر اساس رتبه احراز شده برای هر ریسک، نسبت به برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات آنها، اقدام نمود [۱۰].

تجزیه و تحلیل کیفی ریسک سریع و مقرون به صرفه است و برای اولویت‌بندی و برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک کاربرد دارد و پایه و اساسی را برای تجزیه و تحلیل کمی ریسک، فراهم می‌کند [۲].

#### IV- تجزیه و تحلیل کمی ریسک

هدف از تجزیه و تحلیل کمی ریسک آنالیز عددی احتمال وقوع یک یا چند ریسک و پیامدهای آن بر اهداف پروژه می‌باشد. با استفاده از تجزیه و تحلیل کمی می‌توان به موارد زیر دست یافت [۱۰]:

- 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 دست یافتنی پروژه را تعیین

کرد

در این مرحله آنالیز عددی موارد ریسک و پیامدهای وقوع آنها بر اهداف پروژه محاسبه می‌شود.

موارد ذیل طی مرحله آنالیز کمی معین می‌شوند [۱۰]:

- تعیین احتمال کسب هدف مشخصی در پروژه

- مشخص نمودن مقدار واکنش مورد نیاز برای ریسک بر اساس مقدار اثر آن بر پروژه

- مشخص نمودن مقدار هزینه، زمان و حوزه کاری واقعی و قابل دسترس ریسک

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

فوق در طول مدت پروژه تکرار می‌شود، نشان‌دهنده لزوم داشتن واکنش بیشتر یا کمتر در پاسخگویی

به ریسک می‌باشد [۱۰].

## ۷- 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 و زمان واقعی تعریف‌شده توسط تمام متولیان و دست‌اندرکاران پروژه باشد. همچنین بایستی نحوه تخصیص ریسک‌ها به افراد و گروه‌ها در این برنامه مشخص شود [۱۰].

برنامه‌ریزی واکنش در مقابل ریسک به شناسایی بیشتر ریسک‌ها و تخصیص افراد برای به عهده گرفتن مسوولیت هر واکنش می‌پردازد. همیشه باید بهترین واکنش را از بین گزینه‌های مختلف انتخاب کرد. انواع راهکارهای قابل انتخاب برای مقابله با ریسک‌ها بسته به فرصت یا تهدید بودن ریسک متفاوت است. راهکارهای مختلفی برای واکنش در برابر ریسک‌های مختلف توسعه داده شده است. این راهکارها در مورد ریسک‌های منفی و مثبت متفاوت می‌باشد [۱۰].

## ۶- پایش و کنترل ریسک

کنترل ریسک فرآیندی است که به منظور اطمینان کامل از اجرای برنامه‌های مدیریت ریسک و اثربخشی تحقق این برنامه‌ها در کاهش ریسک‌های پروژه انجام می‌شود. در این فرآیند علاوه بر پیگیری ریسک‌های شناسایی شده، کنترل ریسک‌های باقیمانده و نیز شناسایی ریسک‌های جدید در طول چرخه حیات پروژه نیز مد نظر می‌باشد. پس از آنکه اقدامات و راهکارهای مورد نظر برای رویارویی با ریسک تعیین شد، باید نسبت به اجرای این راهکارها اقدام نمود. برای این کار رویه‌های پایش ریسک باید به گونه‌ای باشد که بتواند تیم پروژه را از ریسک‌های ناگهانی مطلع نماید [۱۰].

پایش ریسک تنها به بررسی رخداد یا عدم رخداد ریسک محدود نمی‌شود، بلکه بایستی در همین حین، بررسی‌های لازم در مورد کفایت اقدامات استراتژیک پیش‌بینی شده برای رویارویی با ریسک و

در صورت نیاز تعیین اقدامات اضافی برای مقابله با آن نیز صورت گیرد. به علاوه باید در خلال این مرحله بررسی‌های لازم در مورد ریسک‌های شناسایی‌شده در پروژه نیز انجام شود و در صورت نیاز استراتژی‌های مرتبط برای رویارویی با آن نیز تعیین شود [۱۰].

## ۲-۳ روش‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک

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

جهت ارزیابی ریسک روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله مهمترین آنها می‌توان به روش‌های درخت خطا<sup>۱</sup> (FTA)، درخت رویداد<sup>۲</sup> (ETA)، تجزیه تحلیل حالات شکست و اثرات آن<sup>۳</sup> (FMEA)، روش‌های فازی<sup>۴</sup>، شبیه سازی مونت کارلو<sup>۵</sup>، و روش‌های تصمیم گیری چند معیاره<sup>۶</sup> اشاره کرد. در ادامه ویژگی‌ها و حوزه‌های مناسب برای استفاده از این روش‌ها به صورت مختصر توضیح داده شده است.

### ۲-۳-۱ درخت خطا

به طور کلی می‌توان گفت روش ارزیابی درخت خطا عبارت از مدلی منطقی-دیداری است که از آن برای شرح چگونگی وقوع رویدادهای ناخواسته ویژه در یک سیستم که ممکن است به وسیله اثرات

---

<sup>۱</sup> Fault Tree Analysis

<sup>۲</sup> Event Tree Analysis

<sup>۳</sup> Failure Mode and Effective Analysis

<sup>۴</sup> Fuzzy set

<sup>۵</sup> Monte Carlo Simulation

<sup>۶</sup> Multi Criteria Decision Making

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 کارگرفت و ساختار مسایل پیچیده‌ای را که رویدادهای متعددی در آنها دخیل می‌باشند بنا نهاد [۱۱].

روش درخت خطا برای تحلیل مسیرهای با پیچیدگی‌های بالا، که در آن خروجی‌های مربوط به یک ترکیب یا چندین ترکیب از وقایع غیربحرانی ممکن است یک واقعه بحرانی نامطلوب را ایجاد کند، مفید می‌باشد. درخت خطا، توصیفی ثانوی و منظم از ترکیبات مختلف مربوط به رخدادها می‌تواند ممکن است که می‌تواند منجر به واقعه خروجی بحرانی از پیش تعیین شده، شود. این روش می‌تواند در اوایل فاز طراحی اولیه به انجام برسد و به تدریج به روز شده تا همزمان که طرح رشد می‌کند احتمال یک واقعه نامطلوب را ردگیری نماید. این روش بیشترین توانایی را برای شناسایی ریشه‌های وقوع ریسک‌های عمده دارد و از این جهت یک ابزار قدرتمند می‌باشد. توانایی دیگری که از این ابزار در ارزیابی ریسک می‌توان انتظار داشت، آنالیز حساسیت ریسک‌های اصلی نسبت به حوادث پایه خود می‌باشد، که این امر نیز می‌تواند به تمرکز بر روی حوادثی که بیشترین تاثیر را بر وقوع ریسک اصلی دارند منجر شود [۱۲].

## ۲-۳-۲ درخت رویداد

تشریح توسعه ریسک از رویداد اولیه تا حالت نهایی از طریق نتایج ممکن، توسط روش آنالیز درخت رویداد قابل اجرا می‌باشد. در این روش با استفاده از ارزیابی احتمالات برای خروجی‌های مختلف، تحلیل کمی ریسک حاصل می‌شود [۱۱].



درخت رویداد پاسخ‌های سیستم در برابر یک چالش شروع کننده را تشریح کرده و ارزیابی احتمال پیامد مطلوب و یا نامطلوب را فراهم می‌سازد. این روش کلیه مسیرهای محتمل از عملیات مختلف سیستم را از رویداد شروع کننده به تصویر می‌کشد. [۱۳].

## ۳-۳-۲ تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن

متدولوژی یا روشی سیستماتیک است که به دلایل زیر به کار می‌رود [۱۴]:

- شناسایی و اولویت بندی 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 برای حل مشکلات در آینده.

FMEA در شرایط زیر اجرا می‌شود [۱۴]:

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

در این روش هدف شناسایی، پیش بینی 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 طرح ریزی

شده که یک اقدام قبل از واقعه باشد نه یک تمرین بعد از آشکار شدن مشکلات. در اجرای FMEA با پیش بینی مشکلات بالقوه و محاسبه میزان ریسک پذیری آنها، اقداماتی در جهت حذف و یا کاهش میزان وقوع آنها تعریف و اجرا می شود. 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 می کند یا کاهش خواهد داد [۱۴].

## ۲-۳-۴ روش های فازی

منطق فازی در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی علی عسگرزاده پروفیسور علوم کامپیوتر دانشگاه برکلی کالیفرنیا ارایه شده است. به صورت مفهومی، منطق فازی منطقی چند ارزشی است و اجازه می دهد که ارزش هایی را بین دو ارزشی هایی مثل " درست / نادرست "، " بله / خیر " یا " بالا / پایین " و ... تعریف کرد. منطق فازی طیف نامحدودی از خاکستری بین سیاه و سفید در نظر می گیرد لذا منطق فازی را می توان منطق خاکستری نامید. منطق دو ارزشی، منطق خاکستری را نادیده می گیرد، آن را نفی می کند یا آن را به طور کامل سیاه و سفید فرض می کند. می توان مفاهیمی چون " خیلی "، " نسبتاً "، " تقریباً " و ... را که از پایه های اندیشه و استدلال های معمولی انسان می باشند، به صورت ریاضی درآورد تا بوسیله کامپیوتر قابل فهم باشند و از این طریق بتوان برنامه های کامپیوتری که به منطق و تفکر انسان نزدیک ترند را به وجود آورد [۱۵].

به طور کلی در منطق فازی احتیاج به دانستن سه چیز است، اول تعریف یا مدلی برای متغیرها، دوم چگونگی ارتباط متغیرها ( اگر چند ورودی داشته باشیم ) و سوم چگونگی نتیجه گیری می باشد. در واقع هدف نهایی منطق فازی ایجاد یک تئوری برای استدلال در مورد گزاره هایی است که درستی یا نادرستی آنها به صورت قطعی مشخص نیست. در منطق فازی درستی گزاره می تواند هر مقداری در بازه [۰,۱] اختیار کند [۱۵].

## ۲-۳-۵ شبیه سازی مونت کارلو

اغلب در پروژه‌های زیرزمینی تخمین‌ها متشکل از چندین متغیر تصادفی می‌باشند. راه‌حل‌های تحلیلی برای این نوع مسایل حتی اگر عبارت تحلیلی نیز برقرار باشد، بسیار پیچیده است. در این گونه موارد با استفاده از شبیه‌سازی‌ها، از جمله شبیه‌سازی مونت کارلو که به صورت وسیعی در پروژه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، راه‌حلهایی را به صورت تقریبی می‌توان محاسبه نمود. معادله، متشکل از متغیرهای تصادفی و ثابت می‌باشد و توزیع متغیرهای تصادفی مربوطه و ارتباط مابین متغیرها مشخص است. در این صورت نتیجه تقریبی معادله قابل شبیه سازی می‌باشد. در هر مرحله از شبیه‌سازی، معادله به صورت انتخاب یک نمونه تصادفی از بین متغیرهای تصادفی و رابطه‌های دیگر محاسبه می‌شود.

هرچه تعداد شبیه‌سازی بیشتر باشد، نتیجه مناسب‌تر می‌باشد. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل به صورت توزیع عدم قطعیت، می‌توان هیستوگرام‌ها، میانگین، انحراف معیار استاندارد و دیگر پارامترهای استاتیکی را تعیین نمود [۱۶].

## ۲-۳-۶ روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

به مجموعه فنونی اطلاق می‌شود که به دنبال ارزیابی راه‌حل‌های ممکن بر اساس بیش از یک معیار (چند معیار)، برای انتخاب بهترین راه‌حل می‌باشند. فنون تصمیم‌گیری چند معیاره خود به دو دسته تصمیم‌گیری چند هدفه (MODM) و تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM) تقسیم می‌شوند که MODM به منظور طراحی و MADM برای انتخاب گزینه برتر انتخاب می‌شوند [۱۵].

## ۴-۲ روش‌های رتبه‌بندی ریسک مورد استفاده در تحقیق

### ۴-۲-۱ انتخاب روش رتبه‌بندی مناسب

در این تحقیق به دلیل مناسب بودن روش‌های چندمعیاره نسبت به سایر روش‌های آرایه شده، از روش مذکور جهت رتبه‌بندی ریسک استفاده شده است. دلایل عدم انتخاب سایر روش‌ها در ادامه شرح داده شده است.

درخت خطا: این روش بیشتر برای شناسایی ریشه‌های وقوع ریسک و آنالیز حساسیت این ریسک‌ها نسبت به علل آنها مناسب است.

درخت رویداد: این روش بیشتر به ارزیابی علل یک رویداد منفرد پرداخته و پاسخ‌های سیستم در برابر یک چالش را به صورت کمی ارزیابی می‌کند و از این رو مناسب برای رتبه‌بندی ریسک به خصوص به صورت کیفی نیست.

تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن : از این روش بیشتر جهت شناسای ریسک و در نتیجه در مراحل طراحی استفاده می‌شود.

روش‌های فازی: این روش جزو روش‌های مناسب جهت رتبه‌بندی ریسک می‌باشد ولی در این تحقیق به دلیل وجود محدودیت در به دست آوردن ورودی‌های مورد نیاز برای این روش از آن استفاده نشده است.

شبیه سازی مونت کارلو: این روش برای مواردی که تعداد داده‌های ورودی آن زیاد باشد مناسب است. با توجه به کم بودن تعداد کارشناسان مجرب جهت پر کردن پرسشنامه‌ها، در این تحقیق استفاده از این روش مناسب نیست.

با توجه به مطالب ذکرشده، روش‌های چندمعیاره برای رتبه‌بندی ریسک در این تحقیق مناسب‌تر از سایر روش‌ها می‌باشند که از میان این روش‌ها نیز دو روش AHP و TOPSIS انتخاب شده‌اند. در ادامه این دو روش توضیح داده شده‌اند.

## ۲-۴-۲ روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

یکی از کارآمدترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل سلسله مراتبی است که برای اولین بار توسط توماس ساعتی در سال ۱۹۸۰ مطرح شد. این تکنیک بر اساس مقایسه زوجی بنا نهاده شده و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران می‌دهد [۱۷].

مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی به شرح زیر است [۱۷]:

### مرحله اول: تشکیل سلسله مراتب

اولین گام در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ایجاد یک نمایش گرافیکی از مساله می‌باشد که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. سطح یک در سلسله مراتبی هدف را نشان می‌دهد. در سطح دوم معیارهای مساله مطرح شده و در سطح آخر نیز گزینه‌ها نشان داده می‌شوند.

روش ساختن فرآیند سلسله مراتبی بستگی به نوع تصمیم اتخاذ شده دارد و به صورت مختلفی ساخته می‌شود. در یک سلسله مراتبی محدودیتی برای تعداد سطوح وجود ندارد. زیرمعیارهای هر معیار ممکن است به صورت فاصله‌های عمودی و یا پارامترهای کیفی مانند زیاد، متوسط و کم باشند.

### مرحله دوم: محاسبه وزن عناصر در AHP

محاسبه وزن در AHP به دو صورت می‌باشد:

وزن نسبی<sup>۱</sup>

وزن نهایی<sup>۲</sup>

### الف - محاسبه وزن‌های نسبی

در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی عناصر هر سطح نسبت به عنصر سطح بالاتر مربوطه خود مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌شود. تخصیص امتیازات عددی مربوط به مقایسه زوجی اهمیت‌های دو گزینه یا دو شاخص بر اساس جدول (۱-۲) صورت می‌گیرد.

جدول (۱-۲): طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها [۱۷].

| امتیاز عددی | مقایسه نسبی شاخص‌ها (قضاوت شفاهی) |
|-------------|-----------------------------------|
| ۹           | اهمیت مطلق                        |
| ۷           | اهمیت خیلی قوی                    |
| ۵           | اهمیت قوی                         |
| ۳           | اهمیت ضعیف                        |
| ۱           | اهمیت یکسان                       |
| ۸، ۶، ۴، ۲  | ترجیح بین فواصل                   |

یک ماتریس مقایسه زوجی به صورت جدول (۲-۲) نشان داده می‌شود که در آن  $(a_2/a_1)$  ترجیح معیار دوم نسبت به معیار اول است.

جدول (۲-۲): ماتریس مقایسه زوجی [۱۷].

|            | Criterion1 | Criterion2 | ... | Criterion n |
|------------|------------|------------|-----|-------------|
| Criterion1 | $a_1/a_1$  | $a_1/a_2$  | ... | $a_1/a_n$   |
| Criterion1 | $a_2/a_1$  | $a_2/a_2$  | ... | $a_2/a_n$   |
| .          | .          | .          | .   | .           |
| .          | .          | .          | .   | .           |
| .          | .          | .          | .   | .           |
| Criterion1 | $a_n/a_1$  | $a_n/a_2$  | ... | $a_n/a_n$   |

<sup>۱</sup> Local Priority

<sup>۲</sup> Overall Priority

سپس با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی وزن نسبی عناصر محاسبه می‌شود. روش‌های مختلفی

برای محاسبه وزن نسبی بر اساس ماتریس مقایسه زوجی وجود دارد که اهم آنها عبارتند از [۱۸]:

✓ روش حداقل مربعات معمولی

✓ روش حداقل مربعات لگاریتمی

✓ روش بردار ویژه

✓ روش تقریبی

از بین این روش‌ها روش حداقل مربعات معمولی برای محاسبه وزن نسبی بر اساس ماتریس

مقایسه زوجی در این تحقیق انتخاب شده است.

## ب- محاسبه وزن نهایی

وزن نهایی هر گزینه در یک فرآیند سلسله مراتبی از مجموع حاصل ضرب اهمیت معیارها در وزن

گزینه‌ها به دست می‌آید [۱۸].

## سازگاری سیستم

یک ماتریس ممکن است سازگار و یا ناسازگار باشد. در ماتریس سازگار، محاسبه وزن ساده بوده و

با استفاده از نرمال کردن تک تک ستون‌ها به دست می‌آید. در حالی که در ماتریس‌های ناسازگار

علاوه بر محاسبه وزن، محاسبه مقدار ناسازگاری نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. آقای ساعتی عدد

۰/۱ را به عنوان حد قابل قبول ارایه می‌نماید [۱۸].

شاخص ناسازگاری<sup>۱</sup> (I.I) سیستم با توجه به رابطه (۲-۱) محاسبه می‌شود:

---

<sup>۱</sup> Inconsistency Index

$$I.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1-2)$$

مقادیر شاخص ناسازگاری برای ماتریس‌هایی که اعداد آنها کاملاً تصادفی اختیار شده باشند محاسبه شده و به نام شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی<sup>۱</sup> (I.I.R) نامیده شده است که مقادیر آن برای ماتریس‌های n بعدی مطابق جدول (۳-۲) است [۱۸].

جدول (۳-۲): شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی [۱۸]

| n     | ۱ | ۲ | ۳    | ۴   | ۵    | ۶    | ۷    | ۸    | ۹    | ۱۰   |
|-------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| I.I.R | ۰ | ۰ | ۰/۵۸ | ۰/۹ | ۱/۱۲ | ۱/۲۴ | ۱/۳۲ | ۱/۴۱ | ۱/۴۵ | ۱/۴۵ |

برای هر ماتریس حاصل تقسیم شاخص ناسازگاری بر شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی هم بعدش نرخ ناسازگاری<sup>۲</sup> (I.R) نامیده می‌شود. چنانچه این عدد کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری سیستم قابل قبول است [۱۸].

## ۳-۴-۲ روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)

روش شباهت به گزینه ایده‌آل یکی از کاربردی‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه به صورت وزن‌دهی کمی می‌باشد. در این روش گزینه‌ها بر اساس شباهت به گزینه ایده‌آل مورد ارزیابی قرار گرفته و رتبه‌بندی می‌شوند، به طوری که هرچه یک گزینه شبیه‌تر به گزینه ایده‌آل باشد رتبه بیشتری دارد. به عبارت دیگر بهترین گزینه انتخابی باید دارای کم‌ترین فاصله از گزینه ایده‌آل و دورترین فاصله از گزینه ضد ایده‌آل باشد. در تعریف این روش از دو مفهوم «حل ایده‌آل» و «شباهت به حل ایده‌آل» استفاده شده است. حل ایده‌آل حلی است که از هر جهت بهترین باشد که عموماً در عمل وجود نداشته و در روش مذکور سعی بر آن است که نزدیک‌ترین جواب به آن پیدا شود. به

<sup>۱</sup> Random Inconsistency Index

<sup>۲</sup> Inconsistency Ratio



منظور اندازه‌گیری شباهت یک طرح (یا گزینه) به حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل، فاصله آن طرح (یا گزینه) از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل اندازه‌گیری می‌شود و گزینه‌ها بر اساس نسبت فاصله از حل ضد ایده‌آل به مجموع فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل ارزیابی و رتبه‌بندی می‌شوند [۱۵].

اگر در یک مساله تصمیم‌گیری چندشاخصه،  $n$  معیار و  $m$  گزینه وجود داشته باشد، مراحل انتخاب بهترین گزینه با استفاده از روش شباهت به حل ایده‌آل به شرح ذیل می‌باشد [۱۵]:

### مرحله اول: تشکیل ماتریس تصمیم

با توجه به تعداد معیارها و گزینه‌ها و ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم  $D$  به صورت  $X_{ij}$  تشکیل می‌شود که در آن عملکرد گزینه  $i$  ام ( $i=1, 2, \dots, m$ ) در رابطه با معیار  $j$  یا شاخص  $j$  ام ( $j=1, 2, \dots, n$ ) می‌باشد.

### مرحله دوم: بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم

در این مرحله سعی می‌شود معیارهای با ابعاد مختلف به معیارهای بدون بعد تبدیل شوند و ماتریس  $R$  به صورت  $r_{ij}$  تعریف می‌شود. روش‌های مختلفی برای بی‌بعد کردن ماتریس وجود دارد، اما در روش شباهت به گزینه ایده‌آل معمولاً از رابطه (۲-۲) استفاده می‌شود:

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

### مرحله سوم: تعیین ماتریس وزن معیارها

در این مرحله با توجه به ضریب اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم‌گیری، ماتریس وزن معیارها به صورت ماتریس  $W$  تعریف می‌شود. ماتریس  $W$  یک ماتریس قطری  $n \times n$  است که فقط عناصر روی قطر اصلی آن غیرصفر و مقدار این عناصر مساوی ضرایب اهمیت بردار مربوطه است.

### مرحله چهارم: تعیین ماتریس تصمیم وزن دار

ماتریس تصمیم وزن دار (V) از ضرب ماتریس تصمیم بدون مقیاس شده (R) در ماتریس وزن معیارها (W) طبق رابطه (۳-۲) به دست می‌آید:

$$V=R*W \quad (۳-۲)$$

### مرحله پنجم: پیدا کردن حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل

اگر حل ایده‌آل با  $A^*$  و حل ضد ایده‌آل با  $A^-$  نشان داده شود در این صورت طبق رابطه (۴-۲) داریم:

$$A^* = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_i^*, \dots, V_n^*\} \quad (۴-۲)$$

$$A^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_i^-, \dots, V_n^-\}$$

که در آن  $V_i^*$  بهترین مقدار  $i$  امین معیار از بین تمام گزینه‌ها و  $V_i^-$  بدترین مقدار  $i$  امین معیار از بین تمام گزینه‌ها می‌باشد. گزینه‌هایی که در  $A^*$  و  $A^-$  قرار می‌گیرند، به ترتیب نشان دهنده گزینه‌هایی کاملاً بهتر و کاملاً بدتر هستند.

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

در این مرحله برای هر گزینه، مقادیر فاصله از حل ایده‌آل و فاصله از حل ضد ایده‌آل به ترتیب از روابط (۵-۲) و (۶-۲) محاسبه می‌شوند:

$$S_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V_i^*)^2} \quad (۵-۲)$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V_i^-)^2} \quad (6-2)$$

در روابط فوق اندیس‌های  $i$  و  $j$  به ترتیب معرف معیار و گزینه مورد نظر می‌باشند.

### مرحله هفتم: محاسبه شاخص شباهت

در آخرین مرحله شاخص شباهت ( $G_j^*$ ) از رابطه (7-2) محاسبه می‌شود:

$$G_j^* = \frac{S_j^-}{S_j^* + S_j^-} \quad (7-2)$$

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

## ۲-۵ سابقه تحقیقات انجام شده در زمینه ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک

ارزیابی ریسک یکی از مراحل مدیریت ریسک بوده و با توجه به ماهیت پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع، دارای اهمیت زیادی می‌باشد. به علت اهمیت این ریسک‌ها در اجرای فضاهای زیرزمینی و پروژه‌های تونل‌سازی، محققان زیادی بر روی ارزیابی و اولویت بندی آنها تحقیق کرده‌اند. در جدول (۲-۴) به تعدادی از مطالعات انجام شده در داخل و خارج کشور در دو دهه اخیر به ترتیب سال اشاره می‌شود:

جدول (۲-۴): تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

| مرجع | سال  | توضیحات   | نویسندگان        |
|------|------|---|------------------|
| [۱۹] | 1996 | در تحقیق خود ریسک و تحلیل آن را به روش‌های سنتی در پروژه‌های تونل‌سازی بررسی کرده است.  | Einstein         |
| [۲۰] | 1996 | در تحقیقات خود مدلی جهت تصمیم‌گیری در پروژه‌های زیر زمینی بر مبنای تحلیل ریسک ارائه کرده‌اند. جهت ارزیابی ریسک از روش‌های آنالیز کیفی، AHP، FTA و ماتریس احتمال- اثر ریسک استفاده شده است.  | Sturk et al.     |
| [۲۱] | 2001 | مدلی را جهت ارزیابی ریسک مربوط به عوامل داخلی به منظور کاهش اثرات ریسک ارائه کرده‌اند.  | Wagner et al.    |
| [۲۲] | 2001 | ریسک جریان مواد به داخل تونل را معرفی کرده و برای ارزیابی ریسک آن از طریق روش مرسوم ماتریس ریسک استفاده شده است   | Chou et al.      |
| [۲۳] | 2002 | در تحقیق خود به ارائه مدلی جهت تخمین زمان و هزینه یک پروژه تونل‌سازی بر اساس ارزیابی ریسک پرداخته است.  | Isaksson         |
| [۲۴] | 2002 | جهت ارزیابی ریسک، روش متداول ماتریس ریسک را با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمالی زمان و هزینه برای فعالیت‌ها بررسی کرده اند.  | Grasso et al.    |
| [۲۵] | 2004 | با شناسایی برخی از ریسک‌های بالقوه با اثرات مثبت و منفی در پروژه‌های تونلی و زیر ساختی، از توزیع احتمالاتی، روش مرسوم احتمال و اثر به منظور تخمین دقیق تر زمان و هزینه‌ی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت-ها، جهت ارزیابی ریسک استفاده کرده‌اند. | Reilly and Brown |
| [۲۶] | 2004 | جهت مدیریت ریسک در پنج فاز اصلی پروژه‌های زیرزمینی، روش کیفی آنالیز ریسک را بررسی کرده اند.   | Arends et al.    |
| [۲۷] | 2004 | رهنمودهایی را از منظر کارفرما و مشاور جهت ارزیابی و مدیریت ریسک در کل محدوده عملکردی پروژه‌های تونل‌سازی ارائه کرده و ماتریس احتمال - اثر ریسک را برای ارزیابی و اولویت بندی پاسخ به ریسک‌ها معرفی نموده‌اند.                                   | Eskesen et al.   |
| [۲۸] | 2005 | با توجه به عدم قطعیت‌های فراوان در خصوص پارامترها و ویژگی‌های زمین اطراف با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو یک توزیع احتمالاتی برای ضریب ایمنی تونل بدست آورده‌اند.   | Yoo et al.       |
| [۲۹] | 2006 | ضمن ارائه پلان مدیریت ریسک در عملیات حفاری تونلی در هنگ کنگ، به بررسی ریسک نشست سطح زمین و بیان مهمترین عوامل موثر بر آن پرداخته‌اند.   | Kwong            |
| [۳۰] | 2006 | در گزارش خود به بیان فرایند مدیریت ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی پرداخته‌اند و جهت ارزیابی ریسک روش مرسوم احتمال و اثر ریسک را بررسی کرده‌اند.  | ITIG             |

ادامه جدول (۲-۴) تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

| مرجع | سال  | توضیحات  | نویسندگان                |
|------|------|--|--------------------------|
| [۳۱] | 2006 | پاسخ به ریسک‌ها را تحت شرایط پیچیده‌ی زمین جهت کنترل و مدیریت آنها در عملیات حفاری تونل در مرکز شهر بررسی کرده‌اند.  | Herrenknecht and Bappler |
| [۳۲] | 2007 | در این مدل ضریب همبستگی و عدم‌وابستگی متغیرها که ریسک‌های مختلف می‌باشند را بررسی کرده و همچنین تنها دو شاخص مرسوم احتمال و اثر ریسک را به منظور ارزیابی ریسک مطرح کرده‌اند.   | Reilly and Parker        |
| [۳۳] | 2008 | رویکرد جدیدی برای به حداقل رساندن ریسک‌های ژئوتکنیکی با استفاده از درخت تصمیم‌گیری ارائه داده‌اند و از تعریف مرسوم ریسک یعنی حاصلضرب احتمال در اثر یک رخداد به منظور ارزیابی ریسک بهره برده‌اند.   | Shahriar et al.          |
| [۳۴] | 2009 | در این تحقیق برای ارزیابی ریسک در مرحله مقدماتی و ساخت و ساز حفر یک تونل زیر سطح آب زیر زمینی از درخت رویداد بهره برده‌اند.  | Jung et al.              |
| [۳۵] | 2009 | به منظور طراحی تونل از روش آنالیز و تحلیل ریسک تحت شرایط پیچیده و دشوار تونلسازی استفاده کرده است  | Kim                      |
| [۳۶] | 2010 | 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 جهت پذیرش ریسک مناسب‌ترند را مورد بررسی قرار داده است.  | Beard                    |
| [۳۷] | 2011 | با توجه به اینکه منطق فازی یک ابزار مفید در حضور عدم قطعیت هاست در این تحقیق از TOPSIS فازی برای رتبه بندی ریسک پروژه انتقال آب دشت ذهاب استفاده شده است.  | Fouladgar et al.         |
| [۳۸] | ۱۳۸۲ | در این مقاله از روش مونت کارلو برای ارزیابی ریسک استفاده شده است   | احمدی نژاد و همکاران     |
| [۳۹] | ۱۳۸۵ | در این مقاله ضمن ارائه تقسیم بندی های مختلف از ریسک در پروژه های تونل سازی، مناسب ترین تقسیم بندی ، انتخاب و نحوه تاثیرگذاری آنها در فازهای مختلف یک پروژه تونل سازی بررسی شده است. برای شناسایی ریسک ها؛ از روش های طوفان ذهنی و مصاحبه استفاده شده است و برای ارزیابی آنها استفاده از ماتریس ریسک توصیه شده است. | جعفری و همکاران          |
| [۴۰] | ۱۳۸۸ | در این مقاله برای ارزیابی ریسک از روش FMEA و منطق فازی استفاده شده است. پارامترهای مورد مطالعه وخامت،رخداد و کشف می‌باشد.  | صیادی و همکاران          |

ادامه جدول (۲-۴) تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی

| مرجع | سال  | توضیحات  | نویسندگان       |
|------|------|--|-----------------|
| [۴۱] | ۱۳۹۰ | در این تحقیق از روش تصمیم‌گیری گروهی و میانگین وزنی جهت جمع‌آوری و تجمیع نظر خبرگان و از روش تخصیص خطی جهت تعیین رتبه 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 است. | صیادی و همکاران |
| [۴۲] | ۱۳۹۱ | 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.   | نظارت و همکاران |

در این تحقیقات عمدتاً از دو شاخص «احتمال وقوع» و «میزان تاثیر» ریسک در قالب ماتریس احتمال-اثر ریسک استفاده شده است. این روش نتایج قابل اعتمادی به دست نمی‌دهد. 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 محاسبه با این تکنیک، ریسک‌هایی که احتمال زیاد و اثرگذاری کمی دارند با ریسک‌هایی که احتمال کم و اثر مهم دارند معادل فرض شوند. تنها در کار آقای نظارت جهت ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک شاخص‌های دیگری نظیر «توانایی سازمان در واکنش به ریسک» و «اعتبار تخمین» نیز مطرح شده است.

در تحقیق حاضر نیز همانند روال کار آقای نظارت جهت تعریف معیارهای رتبه‌بندی، نخست حوزه اثرگذاری ریسک بر زمان، هزینه و کیفیت لحاظ شده است. سپس به منظور ارزیابی و رتبه‌بندی دقیق‌تر ریسک‌ها، شاخص‌ها تکمیلی توانایی سازمان در واکنش به ریسک و اعتبار تخمین نیز در نظر گرفته شده است.

## ۲-۵ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا تعاریف ریسک و فرآیند مدیریت ریسک از نظر کارشناسان و نهادهای مختلف مرتبط با زمینه‌های مدیریت ریسک ارائه شده است. سپس مهم‌ترین روش‌های ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک که شامل روش‌های درخت خطا (FTA)، درخت رویداد (ETA)، تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن (FME)، روش‌های فازی، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) می‌باشد، به صورت مختصر توضیح داده شده است. طبق ویژگی‌های ذکر شده برای هر کدام از این روش‌ها، دو روش چندمعیاره‌ی AHP و TOPSIS جهت رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی حفاری مکانیزه از بین روش‌های ارائه شده انتخاب شده و در انتهای فصل توضیح داده شده‌اند.

## **فصل ۳. مخاطرات ژئوتکنیکی در تونل‌سازی مکانیزه در نواحی شهری**



### ۳-۱ مقدمه

اگر چه در میان روش‌های متعدد اجرای فضا‌های زیرزمینی، حفاری تمام مکانیزه که با ماشین TBM<sup>۱</sup> انجام می‌شود، به دلیل سرعت و دقت قابل توجه خود در بسیاری از پروژه‌ها به عنوان گزینه‌ای مطلوب از نظر ایمنی، فنی و اقتصادی تلقی می‌شود، ولی حفاری مکانیزه علی‌رغم تمامی مزایایی که در بحث‌های ایمنی، فنی و اقتصادی دارد، دارای ضعف‌هایی نیز می‌باشد. در حفاری مکانیزه، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بطور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌باشد که این مساله تنها به واسطه سرعت بالای حفاری ماشین TBM قابل توجیه بوده و در نهایت امکان دستیابی به قیمت‌های تمام‌شده پایین تونل را میسر می‌نماید. ولی چنانچه هرگونه پدیده زمین‌شناسی که به صورت پیش‌بینی نشده، پیشروی ماشین را دچار توقف نماید و بهره‌وری ماشین را کاهش دهد، ممکن است استفاده از TBM را برای چنین زمین‌هایی از نظر فنی و اقتصادی توجیه ناپذیر نماید [۴۳].

مخاطرات محتمل و شرایط نامناسب زمین‌شناسی در مسیر تونل به شرح ذیل می‌باشد:

- ✓ جبهه کار مختلط<sup>۲</sup>
- ✓ وجود بولدر<sup>۳</sup> و قلوه‌سنگ در مسیر تونل
- ✓ نشست سطح زمین
- ✓ تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی
- ✓ انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش
- ✓ ساینده‌گی زمین
- ✓ بروز پدیده آماس زمین

---

<sup>۱</sup> Tunnel Boring Machine

<sup>۲</sup> Mixed face

<sup>۳</sup> Boulder

✓ فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل

✓ پتانسیل روانگرایی خاک

در ادامه به تشریح هر یک از موارد فوق پرداخته شده است:

### ۲-۳ جبهه کار مختلط

تنوع در فرآیندهای زمین‌شناسی مانند رسوب‌گذاری، سرد شدن ماگما و اختلاط تشکیلات مختلف زمین‌شناسی، ممکن است باعث ایجاد محیط‌های پیچیده مخلوط و ناهمگنی شود. نمونه‌های بارز این محیط‌ها در زمین‌های آبرفتی و رسوبی کنگلومراها، برش‌ها و ماسه‌سنگ‌ها و در تشکیلات آذرین توف‌ها، سنگ‌های آگلومرایی و ملانژهای تکتونیک است [۴۴].

دو تعریف مختلف برای جبهه کار مختلط وجود دارد. تعریف اول، جبهه کار مختلط را شرایطی از زمین بیان می‌کند که در آن توزیع دانه‌بندی مختلفی در سینه کار وجود دارد و قلوه‌سنگ‌هایی با ابعاد مختلف در داخل ماتریس خاک حضور دارند (شکل (۳-۱)) [۴۵].

تعریف دوم شرایط جبهه کار مختلط را به صورت تغییرات شرایط محیط از نظر خواص مقاومتی، لیتولوژی و دانه‌بندی در طول مسیر و یا در نقاط مختلف جبهه کار بیان می‌کند. این شرایط می‌تواند به دو صورت رخ دهد. حالت اول شرایطی است که در آن تناوبی از مصالح با خواص مقاومتی، نفوذپذیری، چسبندگی متفاوت در مسیر حفاری تونل وجود دارد. حالت دوم شرایطی است که در آن بر اثر عواملی مانند لایه‌بندی، پر کردن دستی، هوازدگی و ... خواص زمین به صورت قائم و با تغییر عمق تغییر می‌کند، و سبب وجود برخی خواص متغیر در قسمت‌های مختلفی از سینه کار در یک مقطع قائم می‌شود [۴۶].



شکل (۳-۱): جبهه کار مختلط (وجود قلوه سنگ در ماتریس خاک) [۴۵]

### ۳-۲-۱ مشکلات ناشی از جبهه کار مختلط

از جمله مشکلات ناشی از جبهه کار مختلط می‌توان به ساینده‌گی و آسیب رسیدن به ابزار برش در اثر برخورد با قلوه‌سنگ‌ها، لرزش و سروصدا در ماشین، تغییرات شرایط آب زیرزمینی، تغییرات ناگهانی فشار سینه کار و گیر کردن قلوه‌سنگ در داخل اتاقک فشار و یا نوار نقاله ماریچ دستگاه اشاره کرد که هرکدام از این مشکلات می‌توانند سبب کاهش بهره‌وری و ایجاد تاخیر در عملیات حفاری شوند [۴۵].

### ۳-۲-۲ راهکارهای پیش‌بینی و شناسایی جبهه کار مختلط

تنوع در فرایندهای زمین‌شناسی مانند رسوب‌گذاری، سرد شدن ماگما و اختلاط تشکیلات مختلف زمین‌شناسی، هوازدگی، محیط‌های پرشده دستی و ... از جمله عواملی هستند که سبب تشکیل چنین محیط‌هایی در زمین می‌شوند [۴۷].

در تونل‌های شهری که اغلب در اعماق کم حفاری می‌شوند نقش عواملی مانند رسوب گذاری، هوازدگی و محیط‌های پر شده دستی بیشتر از سایر عوامل در ایجاد محیط‌های مختلط است [۴۵].

بهترین راه مطالعه امکان بروز شرایط جبهه‌کار مختلط در تونل‌سازی مکانیزه، بررسی دانه‌بندی مسیر تونل، رخنمون‌ها و پروفیل زمین‌شناسی منطقه می‌باشد. گزارش‌های زمین‌شناسی نیز می‌تواند از طریق اکتشاف‌های ژئوفیزیکی یا حفاری گمانه در مسیر تونل حاصل شود. در صورت در دسترس نبودن و یا کم بودن اطلاعات ژئوتکنیک و زمین‌شناسی می‌توان با انجام عملیات ژئوفیزیکی و یا حفاری گمانه‌های اکتشافی این اطلاعات را از طریق بررسی مغزه‌های حاصل از این گمانه به دست آورد. در شکل (۲-۳) نمونه‌ای از مغزه‌های به دست آمده از یک محیط با جبهه‌کار مختلط نشان داده شده است [۴۵].



شکل (۲-۳) نمونه‌ای از مغزه‌های گرفته شده از محیط دارای شرایط جبهه‌کار مختلط [۴۵]

### ۳-۳ وجود بولدر در مسیر تونل

در تونل‌هایی که در خاک حفاری می‌شوند، به وفور مخاطرات برخورد با بولدرها و قطعات سنگی با ابعاد بزرگ گزارش شده است. بررسی کمیته ملی تکنولوژی آمریکا که بر روی بیش از یکصد تونل

انجام شده، نشان داده است که مشکل اصلی بیش از ۱۲ درصد از تونل‌هایی که در خاک حفر شده‌اند، مربوط به وجود بولدرهای سنگی بوده است [۴۸].

اندازه بولدرها و قطعات سنگی بزرگ می‌تواند در محدوده ۰/۱ متر تا ۱۰ متر باشد که به طور معمول در محدوده بین ۰/۱ متر تا ۱ متر رایج می‌باشد. هانت<sup>۱</sup> با بررسی بیش از ۵۱ پروژه در دنیا میزان وجود بولدر در این پروژه‌ها را با توجه به اندیس نسبت حجمی بولدر (BVR<sup>۲</sup>) مورد بررسی قرار داده و رده‌بندی نمود. اندیس نسبت حجمی بولدر بیان‌کننده نسبت حجم بولدر به حجم کل مواد موجود در طول مسیر تونل می‌باشد. نتایج رده‌بندی هانت در جدول (۱-۳) ارائه شده است [۴۸].

جدول (۱-۳): رده‌بندی کیفی و کمی مسیر تونل بر اساس BVR [۴۹]

| BVR (%) | رده‌بندی کیفی | میزان وقوع در پروژه‌ها (%) |
|---------|---------------|----------------------------|
| <۱      | ناچیز         | ۶۳                         |
| ۱-۲     | کم            | ۱۶                         |
| ۲-۵     | زیاد          | ۱۲                         |
| ۵-۱۰    | مکرر          | ۳                          |
| ۱۰-۵۰   | بسیار مکرر    | ۶                          |

قطعات سنگی به دو حالت می‌توانند در مسیر تونل وجود داشته باشند. در حالت اول می‌توانند به صورت تکی و منفرد وجود داشته باشند (شکل ۳-۳). در حالت دوم به صورت مختلط می‌باشد، یعنی تعداد زیادی قلوه‌سنگ در ماتریس خاک وجود دارد (مطابق شکل (۱-۳)). باید توجه داشت که این دو حالت می‌تواند به صورت هم‌زمان در مسیر اتفاق بیفتد [۴۹].

### ۱-۳-۳ مشکلات ناشی از وجود بولدر در مسیر

بطور کلی در تونل‌هایی که به صورت مکانیزه و با ماشین تمام مقطع حفاری می‌شوند، حین برخورد به بولدر، ماشین با مصالح سختی مواجه می‌شود که در بسیاری از مواقع، خرد کردن آن بسیار

<sup>۱</sup> Hunt

<sup>۲</sup> Boulder Volume Ratio

مشکل است. برخورد با چنین شرایطی می‌تواند سبب بروز مشکلات بزرگی برای پروژه شود که از جمله عواقب این مشکلات می‌توان به افزایش گشتاور ماشین، توقف و کاهش نرخ پیشروی تونل، تحمیل هزینه اضافی بر پروژه و همچنین آسیب‌دیدگی و ساینده‌گی دیسک‌کاترها و دیگر ابزار حفاری

اشاره نمود [۴۳]



شکل (۳-۳) وجود بولدر در مسیر حفاری تونل [۵۰]

در اجرای تونل با روش‌های مکانیزه در محیط‌های حاوی قطعات سنگی، حالت‌های مختلفی ممکن است پیش آید. اگر قطعه سنگی چندان بزرگ نباشد، از درون کله حفار وارد اتاقک حفاری شده و از مارپیچ انتقال و نوار نقاله وارد واگن‌های تخلیه می‌شود. البته در مارپیچ انتقال نیز امکان گیر کردن قطعات سنگی وجود دارد. اگر قطعه سنگی به اندازه‌ای باشد که نتواند وارد کله حفار شود و ماتریس دربرگیرنده آن مقاومت نسبتاً بالایی داشته باشد، توسط کاترهد و دیسک‌های برنده تعبیه شده روی آن خرد شده و وارد دستگاه می‌شود. ولی اگر ماتریس زمینه ضعیف باشد، قطعه سنگی در جای خود ثابت باقی نمی‌ماند و جابجا می‌شود [۵۱ ۵۲].

### ۳-۲-۳ راهکارهای پیش‌بینی و شناسایی بولدر

از جمله روش‌های شناسایی بولدر می‌توان به روش‌های کرگیری (مغزه‌گیری)، ژئوفیزیکی، تصاویر زمین‌شناسی و بررسی رخنمون‌ها و ترانشه‌های حفاری شده در مسیر حفر تونل اشاره کرد. در این بررسی‌ها باید شش پارامتر مشخص شوند: (۱) فراوانی (۲) توزیع (۳) ابعاد (۴) اشکال (۵) ترکیبات سنگ (۶) ترکیبات خاک‌های دربرگیرنده (ماتریس) [۵۳].

روش‌های شناسایی با استفاده از کرگیری، تصاویر زمین‌شناسی و بررسی رخنمون و ترانشه جزو ضعیف‌ترین روش‌های شناسایی می‌باشند. زیرا از دقت بسیار پایینی جهت مطالعه وجود بولدر برخوردار می‌باشند.

مناسب‌ترین روش جهت مطالعه بولدر، روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشند که به سه حالت بررسی از سطح زمین، بررسی از داخل گمانه و نصب بر روی دستگاه حفار می‌توانند اجرا شوند [۵۴]. روش‌های بررسی سطحی به صورت برداشت‌های ژئوفیزیکی از روی سطح زمین و در طول مسیر حفاری تونل می‌باشند. روش‌های گمانه‌ای شامل قرار دادن دستگاه‌های ژئوفیزیکی در عمق خاصی از گمانه و بررسی از طریق آن می‌باشند [۵۵، ۵۶].

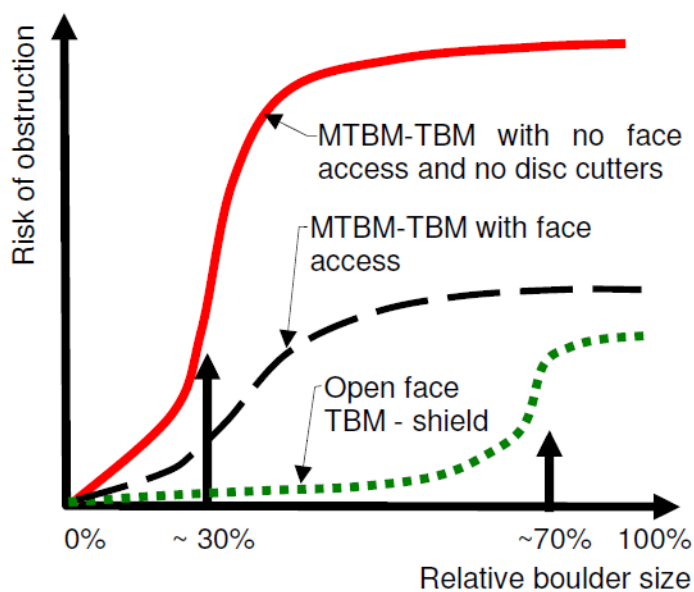
در روش‌های نصب بر روی دستگاه حفار نیز با نصب ابزار ژئوفیزیکی بر روی کله حفار به بررسی خواص ناحیه مقابل کله حفاری پرداخته می‌شود [۵۰].

در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود که ریسک توقف حفاری تونل با افزایش اندازه نسبی بولدر، افزایش می‌یابد. هزینه نسبی روش‌های شناسایی بولدر در مسیر تونل نیز با توجه به دقت اندازه‌گیری، توانایی برآورد اندازه، موقعیت و تناوب بولدر در جدول (۳-۲) ارایه شده است [۴۹].

جدول (۳-۲): توانایی تخمین و هزینه اجرایی نسبی روش‌های شناسایی بولدر [۴۹]

| روش شناسایی                    | تناوب بولدر | اندازه بولدر | موقعیت بولدر | هزینه نسبی        |
|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------------|
| مطالعات اسناد موجود قبلی       | +           | +            | +            | خیلی کم           |
| بررسی رخنمون                   | +           | +            | +            | خیلی کم           |
| آزمایش نفوذ استاندارد          | ۰           | -            | -            | کم                |
| آزمایش نفوذ نقطه‌ای            | ۰           | -            | -            | کم                |
| حفاری ضربه‌ای بکر <sup>۱</sup> | ۰           | +            | ۰            | کم                |
| حفاری روتوسونیک <sup>۲</sup>   | +           | +            | -            | کم                |
| مته حفاری قطر بزرگ             | +           | +            | +            | متوسط تا زیاد     |
| حفاری ترانشه                   | +           | +            | +            | متوسط تا زیاد     |
| GPR گمانه‌ای                   | ۰           | +            | ۰            | کم تا متوسط       |
| لرزه‌نگاری درون گمانه‌ای       | ۰           | +            | ۰            | کم تا متوسط       |
| حفاری‌های اکتشافی              | +           | +            | +            | زیاد تا خیلی زیاد |

توجه: + = روش موثر؛ ۰ = کمی موثر؛ - = روش غیر موثر



شکل (۳-۴) ریسک انسداد و توقف روش‌های حفاری مختلف با توجه به اندازه نسبی بولدر [۴۹]

<sup>۱</sup> Becker

<sup>۲</sup> Rotosonic



### ۳-۴ نشست سطح زمین

محیط زمین ابتدا تحت تنش ناشی از تنش‌های طبیعی زمین بوده که بر اثر حفر تونل، شرایط تنش در زمین به دلیل حذف توده‌ای از خاک و سنگ تغییر می‌کند. این امر موجب انقباض دهانه تونل و بوجود آمدن تغییر شکل‌هایی در مقطع زمین می‌شود، که در نهایت به نشست سطح زمین منجر می‌شود [۵۷].

نشست در سطح زمین، بویژه در مورد تونل‌های کم عمق حفر شده در مناطق شهری و به خصوص به هنگام عبور از زیر مناطق مسکونی از اهمیت زیادی برخوردار است. مساله نشست سطح زمین و تاثیر آن بر سازه‌های سطحی از مهمترین مخاطراتی است که به هنگام تونل‌سازی در نواحی کم عمق شهری و در زمین‌های نرم پدید می‌آید و نادیده گرفتن آن می‌تواند عواقب ناگواری را در بر داشته باشد [۵۸].

به طور کلی در حفاری با دستگاه<sup>۱</sup> EPB پنج نوع نشست اتفاق می‌افتد. در جدول (۳-۳) انواع نشست ایجاد شده در حفاری با دستگاه EPB، دلایل نشست‌ها، مکانیزم نشست‌ها و تغییرات اعمالی ناشی از مراحل مختلف نشست بر شرایط زمین ارایه شده است.

جدول (۳-۳): دلایل و مکانیزم انواع نشست [۵۹]

| نوع نشست            | دلایل  | تغییرات در شرایط زمین     | مکانیزم نشست                   |
|---------------------|--|---------------------------|--------------------------------|
| نشست اولیه          | کاهش تراز سطح آب                                       | افزایش فشار موثر زمین     | فشرده‌گی و نشست<br>تحکیمی      |
| نشست در جبهه‌کار    | فرو ریختن سینه‌کار، حفاری اضافی، فشار سینه‌کار نامناسب | آزاد شدن توزیع تنش زمین   | تغییر شکل الاستیک و<br>پلاستیک |
| نشست دنباله         | فشرده‌گی و به هم ریختگی زمین اطراف پوسته تونل          | دست خوردگی و به هم ریختگی | تراکم                          |
| نشست در حفره دنباله | ایجاد حفره در دنباله                                   | آزاد شدن توزیع تنش زمین   | تغییر شکل الاستیک و<br>پلاستیک |
| نشست نهایی          | همه دلایل اشاره شده در بالا                            | —                         | فشرده‌گی و نشست خزشی           |

<sup>۱</sup> Earth Pressure Balance

### ۳-۴-۱ حداکثر نشست مجاز سازه‌ها

در این بخش مقدار نشست مجاز سازه‌های سطحی از دیدگاه محققین و آیین‌نامه‌های مختلف بررسی می‌شود تا امکان مقایسه میزان خسارت وارده به سازه‌های سطحی فراهم آید (جدول ۳-۴).  
 مرور ادبیات فنی در این زمینه نشان می‌دهد که معمولاً مقدار حداکثر نشست مجاز، عمدتاً به سیستم سازه و شرایط بهره‌برداری از سازه بستگی دارد [۶۰].

جدول (۳-۴): ماکزیمم نشست مجاز برای برخی سازه‌ها [۶۱]

| نشست (میلیمتر) | نوع سازه   |                     |
|----------------|--|---------------------|
| ۷۵             | طول/ارتفاع > ۲/۵                                       | ساختمان‌های<br>آجری |
| ۱۰۰            | طول/ارتفاع < ۲/۵                                       |                     |
| ۱۰۰            | سازه‌های اسکلتی  |                     |
| ۱۵۰            | ساختمان‌های آجری مسلح و بتن‌های مسلح                   |                     |
| ۳۰۰            | سازه‌هایی با پی‌های بتنی مسلح مانند برج‌ها، پل‌ها و... |                     |

موقعیت سازه‌ها نسبت به گودی نشست، به میزان قابل توجهی روی حرکت ساختمان تاثیر قابل توجهی خواهد گذاشت. به طوری که اگر ساختمان در قسمت محدب گودی نشست باشد دچار کشش و بالا آمدگی می‌شود و اگر در قسمت مقعر گودی نشست باشد دچار فشارش می‌شود [۶۱].  
 مقادیر نشست مجاز پیشنهادی توسط آیین‌نامه (USSR) برای انواع سازه‌ها طبق جدول (۳-۵) می‌باشد:

جدول (۳-۵): حداکثر نشست نسبی برای انواع ساختمان‌ها بر اساس آیین‌نامه (USSR) [۶۱]

| سازه                             | بر روی رس<br>خمیری (متر) | بر روی ماسه با رس سخت<br>(متر) |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| قاب‌های فولادی و بتنی            | ۰/۰۰۲                    | ۰/۰۰۲                          |
| دیوار آجری چند طبقه L/H تا ۳     | ۰/۰۰۰۴                   | ۰/۰۰۰۳                         |
| دیوار آجری چند طبقه L/H بیش از ۵ | ۰/۰۰۰۷                   | ۰/۰۰۰۵                         |

## ۳-۵ تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی

نفوذپذیری خاک یکی از پارامترهای بسیار مهم در کنترل عملکرد ماشین در طی حفاری در زیر سطح ایستابی می‌باشد. علت این امر آن است که یک خاک ایده‌آل برای ماشین EPB، خاکی است که پس از حفاری و ورود به اتاقک فشار ماشین تبدیل به یک ماده پلاستیک و خمیری با قابلیت اعمال فشار به سینه کار، نفوذپذیری کم برای جلوگیری از زهکش شدن آب زیرزمینی و آب‌بند نمودن آن شود [۶۲].

## ۳-۵-۱ مشکلات ناشی از نفوذپذیری بالا و آب زیرزمینی

وجود آب در تونل می‌تواند بر روند فعالیت‌های تونلسازی بسیار موثر باشد. در تونلسازی مکانیزه حضور آب هم بر نرخ نفوذ و هم بر ضریب بهره‌وری دستگاه تأثیرگذار است. جریان آب به داخل تونل فاکتوری است که همیشه بایستی مد نظر قرار گیرد. جریان آب، پایداری سنگ‌های حساس به آب را با نرم کردن، شستشو و کاهش زبری سطح، کاهش می‌دهد. پرکننده‌های درزه‌ها در صورت حضور آب به یک فشار آماسی رسیده و این امر می‌تواند سبب از بین بردن تقویت‌کننده‌های تونل شود [۵۰].

حضور آب در محیط‌های رس‌دار، می‌تواند باعث افزایش تولید گل و ایجاد مشکل در بارگیری مصالح‌کننده شده و تردد پرسنل شود که در مجموع کاهش بهره‌وری را به دنبال خواهد داشت. همچنین در تونلسازی مکانیزه در چنین زمین‌هایی، حضور آب باعث گل‌گرفتگی بخش‌های مختلف کله حفاری و دیسک‌کاترها و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ ماشین می‌شود. در صورتی که آب ورودی به تونل حاوی مقادیری گاز سمی محلول در آن نیز باشد مشکلات دوچندان خواهد شد [۵۰].

همانطور که اشاره شد مشکلات و حوادث ناشی از آب زیرزمینی در تونلسازی شهری متنوع بوده و در مراحل مختلف بروز می‌کنند. این مشکلات و حوادث عبارتند از:

۱. نشت و جریان آب به داخل تونل

۲. تاثیر بر خاک‌های اطراف تونل و ایجاد ناپایداری در آنها

۳. وجود حفره‌های طبیعی یا مصنوعی در محیط

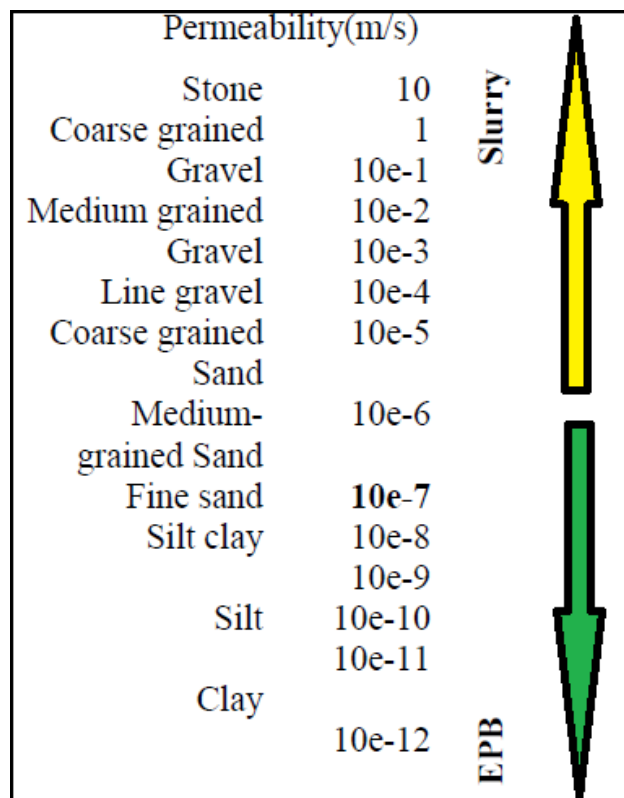
۴. اعمال فشار اضافی بر سیستم‌های نگهداری

۵. نشست زمین ناشی از زهکشی

### ۳-۵-۲ روش‌های تعیین نفوذپذیری خاک

انجام مطالعات هیدروژئولوژی به منظور شناخت پتانسیل وجود آب در مسیر تونل و بررسی وضعیت آبگذری و نفوذپذیری زمین از طریق حفر گمانه‌های کافی در مسیر تونل از راهکارهای اصلی برای پیش‌بینی میزان آب موجود در محیط اطراف تونل و نیز تعیین نفوذپذیری خاک می‌باشد [۵۰]. از جمله مهمترین روش‌های تعیین نفوذپذیری خاک می‌توان به آزمایش‌های لوفان و لوژان (بار افتان و بار ثابت) اشاره نمود که آزمایش‌های مذکور بر روی نمونه‌های حاصل از گمانه‌های حفاری شده در مسیر قابل انجام و اجرا می‌باشد.

بر اساس استانداردها و تجربیات موجود، نفوذپذیری مناسب برای ماشین EPB کمتر از  $10E-5$  متر بر ثانیه است (شکل ۳-۵). بنابراین چنانچه قسمت‌هایی از تونل دارای نفوذپذیری بالا باشند باید در طی مطالعات مشخص شود [۶۲].



شکل (۳-۵) محدوده کاربرد EPB و SPB بر اساس نفوذپذیری خاک [۶۳]

### ۳-۶ انسداد و گل گرفتگی کاترهد و ابزار برش

در تونل‌هایی که ماشین‌های حفر تونل برای حفاری در سنگ‌ها و یا خاک‌های رسی و چسبنده به کار گرفته می‌شوند، همواره خطر گل گرفتگی<sup>۱</sup> و انسداد<sup>۲</sup>، کله حفاری و ابزار برش را تهدید می‌نماید. معمولاً در چنین سنگ‌ها یا خاک‌هایی، چسبناکی کانی‌های رسی به سطوح فلزی ماشین سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در بهره‌وری ماشین حفاری می‌شود. مشکل چسبناکی و گل گرفتگی مربوط به رس غالباً منجر به هدایت‌پذیری سخت، نرخ پیشروی پایین و تمیزکاری اضافه می‌شود [۵۰].

<sup>۱</sup> Clogging

<sup>۲</sup> Blockage

### ۳-۶-۱ مشکلات ناشی از چسبندگی زمین

عملیات حفاری مکانیزه در زمین‌های رس‌دار و چسبنده ممکن است منجر به گرفتگی کله حفار، اسکریپر و یا جام‌های ورود مصالح به داخل کله حفار ماشین شود. همان گونه که در شکل (۳-۶) دیده می‌شود، گل گرفتگی و در نتیجه انسداد دهانه اسکریپرهای کله حفار باعث کاهش ظرفیت پذیرش حجم مصالح حفاری به داخل کله حفار می‌شود. این امر سبب برهم زدن توازن بین حجم مصالح کنده شده از سینه‌کار و حجم ورودی به کله حفار می‌شود. لذا حجم زیادی از مصالح حفاری بین سینه‌کار و کله حفار باقی مانده و در نهایت باعث افزایش نیروی تراست و گشتاور ماشین می‌شود. در این هنگام اپراتور مجبور به توقف ماشین و لذا تمیزکاری دريچه های اسکریپر می‌شود. هرچه فواصل زمانی بین توقف‌ها کاهش یابد، مدت زمان بیشتری صرف حفاری شده و در نهایت بهره‌دهی ماشین و نرخ پیشروی آن کمتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. برای بسیاری از ماشین‌های حفاری که در شرایط زمین‌های ضعیف و چسبنده کار می‌کنند، ظرفیت گشتاور دستگاه یک عامل محدود کننده برای نرخ نفوذ به شمار می‌آید. این مشکل با سرعت چرخش متغیر کله حفار و موتورهای قوی‌تر تا حدی برطرف خواهد شد. همچنین رس چسبنده ممکن است مانع از چرخش دیسک‌ها و از اینرو سبب قفل شدگی آن شود. این امر در نهایت ممکن است منجر به سایش یک طرفه دیسک‌ها شود [۶۴].



شکل (۳-۶) گل گرفتگی دهانه اسکریپر (راست) و دیسک (چپ) (دید از داخل کله حفار) [۶۴]

بطور کلی پیامدهای مواجهه با زمین‌های چسبنده عبارتند از:

- گل‌گرفتگی کله حفار ماشین حفاری موجب سنگین‌تر شدن آن و در نتیجه انحرافات ماشین در حین حفاری می‌شود.
- گل‌گرفتگی کله حفار منجر به افزایش گشتاور مورد نیاز ماشین شده و لذا با توجه به محدودیت اعمال گشتاور، منجر به توقف ماشین از سوی اپراتور می‌شود.
- گل‌گرفتگی و انسداد اسکرپرها و ورود مصالح حفاری باعث می‌شود که مصالح حفاری نتواند از سینه‌کار خارج شود. این امر از یک سو باعث افزایش نیروی پیشران ماشین بر اساس حفظ نرخ نفوذ معین شده و از سوی دیگر باعث سایش دیسک‌ها در زمین‌های ساینده می‌شود.
- چسبندگی مصالح حفاری باعث کلوخه‌ای شدن آن شده که این امر کار سیستم حمل مواد بر روی نوار نقاله را با مشکل مواجه می‌سازد
- در چنین زمین‌هایی، رس‌های چسبنده می‌توانند محل چرخش دیسک‌کاترها را مسدود نموده و سبب توقف چرخش بولبرینگ شوند.
- گل‌گرفتگی و در نتیجه انسداد دهانه اسکرپرها کله حفار باعث کاهش ظرفیت پذیرش حجم مصالح حفاری به داخل کله حفار می‌شود. این امر سبب برهم زدن توازن بین حجم مصالح کنده شده از سینه‌کار و حجم ورودی به کله حفار می‌شود [۶۴].

### ۳-۶-۲ عوامل و فاکتورهای موثر بر چسبندگی زمین

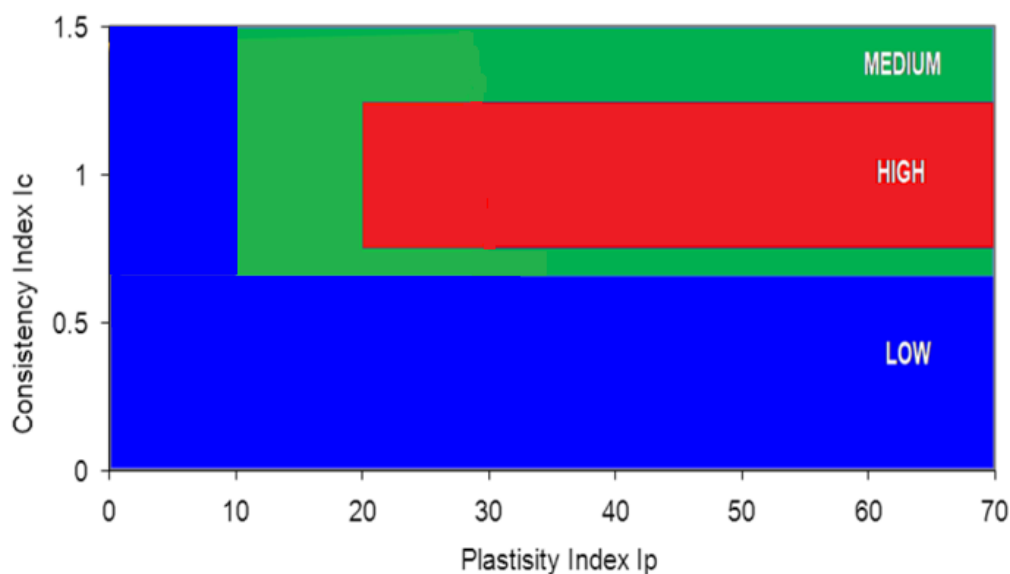
عوامل تعیین کننده برای بروز چسبناکی و انسداد، وجود آب و کانی‌های رسی تورم‌پذیر می‌باشد. وجود سازندهای شیلی، مارنی و بطور کلی سازندهای حاوی کانی‌های رسی در مسیر تونل باعث بروز رفتار چسبندگی می‌شود.

به منظور کاهش اثرات مخرب چسبندگی زمین، باید زمین‌های مستعد خطر چسبندگی در مسیر تونل‌سازی شناسایی شده و بر روی مغزه‌ها و نمونه‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی، آزمایشات لازم برای پیش‌بینی میزان چسبندگی این زمین‌ها انجام شود. در سال‌های اخیر به منظور شناسایی خطر چسبندگی زمین در حفاری مکانیزه، پژوهش‌هایی انجام شده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به کارهای توز و همکاران (۲۰۰۴) اشاره نمود. نموداری که توسط توز و بورگر ارائه شده از مقبولیت بیشتری برخوردار است (شکل ۳-۷) [۶۵].

درجه چسبندگی وابسته به شاخص استحکام (IC) است، بطوری که بر اساس این پارامتر و شاخص خمیری (PI) خطر انسداد ماشین به سه رده خطر بالا، خطر متوسط و خطر پایین تقسیم بندی شده است. شاخص استحکام، بر اساس حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)، شاخص خمیری (PI) و درصد رطوبت طبیعی محیط‌های رسی (W) محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۳-۲). از آنجایی که حد روانی و خمیری از جمله ویژگی‌های زمین‌شناسی و ذاتی کانی‌های رسی محسوب می‌شوند، شاخص خمیری برای یک کانی رسی مشخص، ثابت است. ولی چون درصد رطوبت طبیعی در بخش‌های مختلف تونل می‌تواند متفاوت باشد، بنابراین برای یک کانی رسی مشخص، شاخص استحکام و به تبع آن پتانسیل گل‌گرفتگی می‌تواند در قسمت‌های مختلف تونل متفاوت باشد [۶۵].

$$IC = \frac{LL-W}{LL-PL} = \frac{LL-W}{PI} \quad (۳-۲)$$





شکل (۳-۷) نمودار خطر گل گرفتگی برای ماشین به سبب کانی‌های رسی [۶۵]

### ۷-۳ ساینده‌گی زمین

ساینده‌گی معمولاً به عنوان یک ویژگی مهم سنگ و خاک که علت اصلی سایش و خوردگی ابزار برش و بخش‌های مختلف ماشین محسوب می‌شود، شناخته می‌شود. ساینده‌گی زیاد سنگ‌ها و خاک‌ها و در نتیجه فرسودگی سریع و بیش از حد ابزار برش سبب کاهش قابل توجه در راندمان فرآیند حفاری می‌شود. همچنین تاخیرات زمانی ناشی از توقفات ماشین برای تعویض ابزارها و قطعات ساییده شده غیر قابل اجتناب است [۶۵].

تاثیر خاک ساینده بر روی ماشین به دو صورت سایش اولیه<sup>۱</sup> و سایش ثانویه<sup>۲</sup> تعریف می‌شود. منظور از سایش اولیه، ساینده‌گی و فرسایش ابزار و سطوح حفاری از قبیل ابزار تیغه‌ای یا مته‌ای، دیسک کاتر و اسکریپر می‌باشد. سایش ثانویه نیز زمانی رخ می‌دهد که سایش اولیه بیش از اندازه گسترش یابد و باعث سایش سازه‌های نگهدارنده ابزارهای حفاری شود [۶۶].

<sup>۱</sup> Primary Wear

<sup>۲</sup> Secondary Wear

### ۳-۷-۱ مشکلات ناشی از زمین‌های ساینده

خاصیت سایندگی خاک باعث تاثیرات منفی و ایجاد مشکل در حفاری مکانیزه می‌شود. از جمله مشکلاتی که سایندگی خاک موجب ایجاد آن می‌شود می‌توان به سایش و مصرف بیش از حد ابزار برش، سایش کله حفار، سایش محفظه‌های ورود مواد حفاری شده، سایش اتافک فشار (چمبر) دستگاه، سایش سیستم انتقال مارپیچ، سایش سیستم ترابری و دیگر ابزار دارای تماس با خاک اشاره کرد که موجب فرسودگی سریع این قسمت‌های ماشین حفار می‌شود [۵۰].

ابزار برش یکی از پرمصرف‌ترین ابزار و جزو حساس‌ترین پارامترهای حفاری در دستگاه‌های تمام-مقطع می‌باشند. نرخ مصرف ابزار برش می‌تواند در مسایل فنی کوتاه‌مدت، بهره‌وری کل پروژه و نیز افزایش هزینه‌ها سهم به‌سزایی داشته باشد. زمان مورد نیاز برای تعویض ابزار برش علاوه بر هزینه مورد نیاز جهت تامین ابزار برش، توقف عملیات حفاری را در پی خواهد داشت که این توقف زبان‌های مالی زیادی را به پروژه تحمیل خواهد کرد [۶۷]. از اینرو تاثیر خواص سایندگی خاک بر ابزار برش بیشتر از قسمت‌های دیگر است و باید توجه ویژه‌ای نسبت به آن داشت.

### ۳-۷-۲ روش‌های شناسایی سایندگی زمین

برای بررسی سایندگی سنگ و خاک آزمون‌هایی با مقیاس‌های بسیار متفاوت ابداع شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمون‌هایی که در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی سایندگی سنگ و خاک درشت‌دانه انجام می‌شوند، شامل آزمون ویکرز<sup>۱</sup>، آزمون سایش نیروژی (NTNU)، آزمون LCPC و آزمون سرشار<sup>۲</sup> می‌باشند [۶۸]. در جدول (۳-۶) رده‌بندی سنگ بر اساس آزمون‌های سرشار ارائه شده است که در آن CAI شاخص سایش سرشار می‌باشد.

جدول (۳-۶): طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس اندیس سایندگی سرشار [۶۸]

<sup>۱</sup> Vickers

<sup>۲</sup> Cerchar

| گروه | شاخص سایش سرشار (CAI) | توصیف ساینده |
|------|-----------------------|--------------|
| ۱    | $6 <$                 | بسیار ساینده |
| ۲    | ۴-۶                   | خیلی ساینده  |
| ۳    | ۲-۴                   | ساینده       |
| ۴    | ۱-۲                   | نیمه ساینده  |
| ۵    | ۰/۵ - ۱               | کمی ساینده   |
| ۶    | $< 0/5$               | غیرساینده    |

ایده اندازه‌گیری سایش خاک و توسعه روش‌های جدید برای پیش‌بینی سایش ابزار، توسط محققین و صنعت مورد بحث قرار گرفته است. از جمله این فعالیت‌ها و تحقیقات می‌توان به کارهای نیلسون و همکاران (۲۰۰۷)، نتوبی و همکاران (۲۰۰۸)، لانگماک (۲۰۰۹)، لانگماک و همکاران (۲۰۱۰) و رستمی و همکاران (۲۰۱۱) اشاره نمود [۸۵]. در جدول (۷-۳) رده‌بندی ارائه شده برای ساینده‌گی خاک توسط نیلسون، نشان داده شده است که در آن AVS عدد ساینده‌گی خاک نیلسون می‌باشد.

جدول (۷-۳): رده‌بندی پتانسیل ساینده‌گی خاک‌ها بر اساس عدد AVS [۶۹]

| رده | بسیار کم | خیلی کم | کم  | متوسط | زیاد  | خیلی زیاد | بسیار زیاد |
|-----|----------|---------|-----|-------|-------|-----------|------------|
| AVS | $1 >$    | ۲-۳     | ۲-۴ | ۱۳-۲۵ | ۲۶-۳۵ | ۳۶-۴۴     | $> 44$     |

علاوه بر آزمون‌های فوق، در چند سال اخیر استفاده از معیارها و شاخص‌های ژئوتکنیکی مانند معیار شیمازک و ناتز<sup>۱</sup>، شاخص RAI<sup>۲</sup>، عدد سختی ویکرز، نوع کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و ذرات خاک، درصد کوارتز و سایر کانی‌های ساینده، دانه‌بندی و اندازه ذرات برای بررسی ساینده‌گی استفاده می‌شود. این روش‌ها به جای استفاده از دستگاه‌های ویژه آزمایشگاهی، از پارامترهای ذاتی استاندارد خاک و یا سنگ برای بررسی میزان ساینده‌گی استفاده می‌کنند [۵۰].

<sup>۱</sup> Schimazec and Knatz

<sup>۲</sup> Rock Abrasivity Index

## ۳-۸ تورم زمین

بر اساس تعریف انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، پدیده تورم یا آماس ترکیبی از واکنش‌های فیزیکوشیمیایی سنگ یا خاک با آب و رها شدن تنش می‌باشد. خاک‌های متورم‌شونده، خاک‌های ریزدانه هستند که به سبب جذب آب، ازدیاد حجم یافته و فشارهای بالایی ایجاد می‌کنند. تورم معمولاً با انقباض توده‌سنگ یا خاک همراه است یعنی با کاهش رطوبت، زمین زیر سازه‌ها کاهش حجم پیدا می‌کند. بنابراین موضوع تورم خاک‌ها به عنوان یک مساله همواره باید مورد نظر مهندسان قرار داشته باشد [۷۰].

## ۳-۸-۱ مشکلات ناشی از زمین‌های تورمی

تغییر حجم خاک‌ها و زمین‌های آماسی یکی از مهمترین مشکلاتی است که مهندسان و محققان مربوطه با آن روبرو هستند. به نحوی که شاید بتوان این پدیده را یک مشکل جهانی به حساب آورد. بررسی‌ها نشان داده است که خسارت‌های ناشی از عملکرد منفی این نوع محیط‌ها، بیش از هر یک از بلایای زمین‌شناسی دیگر است. به عنوان مثال در ایالات متحده، خاک‌های تورمی و منبسط‌شونده سالیانه بیش از ۳/۲ میلیارد دلار خسارت به بار می‌آورند [۷۱].

وجود خاک‌های متورم‌شونده در مسیر تونل، مشکلات مهمی را در موقع ساخت و بهره‌برداری از تونل ایجاد می‌کنند. در موقع عملیات اجرایی، تورم خاک ممکن است دستگاه حفر تونل را متوقف کند و در موقع بهره‌برداری هم خاک‌های متورم‌شونده ضمن جذب آب، متورم شده و موجب تخریب داخلی تونل می‌شوند که این امر نشان‌دهنده اهمیت مطالعات لازم برای شناسایی رفتار تغییر حجم و فشار تورمی خاک‌های ریزدانه می‌باشد [۷۲].

### ۳-۸-۲ روش‌های شناسایی زمین‌های تورمی

برای بررسی پتانسیل آماس در محیط‌های آبرفتی روش‌های مختلفی از جمله بررسی میزان کانی‌ها و رسوبات تورم‌زا با استفاده از آزمایش‌های مختلف مانند آزمایش تورم، تحکیم، دانه‌بندی، حدود اتربرگ و آزمایش‌های شیمیایی و کانی‌شناسی نیاز می‌باشد با توجه به داده‌های موجود، در این تحقیق از روش‌های USBR، تجزیه شیمیایی و داکشانمورتی و رامان<sup>۱</sup> استفاده شده است [۷۳]. هرکدام از این سه روش در ادامه توضیح داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Dakshnamurty and Raman

## الف- روش USBR

این روش توسط هولتز و گیبس<sup>۱</sup> (۱۹۵۶) ارائه شده است. این محققین نتایج حاصل از ۴۵ آزمایش تورم بر روی نمونه‌های دست‌خورده و نخورده تحت سربار یک پوند بر اینچ مربع را بر اساس درصد رس، نشانه خمیری و حد انقباض خاک در جدولی مشابه جدول (۳-۸) ارائه کردند که برای تعیین پتانسیل تورم به کار می‌رود [۷۴].

جدول (۳-۸): رده‌بندی پتانسیل تورم خاک بر اساس روش USBR [۷۴]

| درجه تورم | درصد تورم محتمل | حد انقباض % | نشانه‌ی خمیری % | درصد ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۱ میلی‌متر |
|-----------|-----------------|-------------|-----------------|------------------------------------|
| خیلی بالا | بیش از ۳۰       | کمتر از ۱۱  | بیش از ۳۵       | بیش از ۲۸                          |
| بالا      | ۲۰-۳۰           | ۷-۱۲        | ۲۵-۴۱           | ۱۳-۲۰                              |
| متوسط     | ۱۰-۲۰           | ۱۰-۱۶       | ۱۵-۲۸           | ۱۳-۲۳                              |
| پایین     | کمتر از ۱۰      | بیش از ۱۵   | ۰-۱۸            | ۰-۱۵                               |

## ب- روش تجزیه شیمیایی (استفاده از PH خاک)

سهولت تبادل کاتیون‌ها با هیدروژن بستگی به PH خاک داشته و با بالا رفتن PH، افزایش می‌یابد، لذا PH خاک‌های متورم‌شونده معمولاً بالاست. بنابراین بالا بودن میزان PH خاک می‌تواند نشانگر پتانسیل تورمی بودن خاک باشد [۷۵].

## ج- روش داکشانمورتی و رامان

داکشانمورتی و رامان (۱۹۷۳) ضمن استفاده از نتایج آزمایش‌های هولتز و گیبس، به انجام آزمایش روی حدود ۵۰ نمونه‌ی خاک از نقاط مختلف پرداختند. معیارهای مورد استفاده آنها، شامل

<sup>۱</sup> Holtz and Gibbs

نشانه خمیری، حد روانی و حد انقباض خاک است [۷۳]. در جدول (۳-۹) روش پیش‌بینی غیر مستقیم پتانسیل تورم این دو محقق ارائه شده است.

جدول (۳-۸): ارزیابی پتانسیل تورم خاک به روش داکشانمورتی و رامان [۷۳]

| پتانسیل تورم | نشانه خمیری % | حد انقباض % | حد روانی % |
|--------------|---------------|-------------|------------|
| پایین        | ۰-۱۸          | بیش از ۱۵   | ۲۰-۳۵      |
| متوسط        | ۱۵-۲۸         | ۱۰-۱۵       | ۳۵-۵۰      |
| بالا         | ۲۵-۴۱         | ۷-۱۲        | ۵۰-۷۰      |
| خیلی بالا    | بیش از ۳۵     | ۰-۱۱        | بیش از ۷۰  |

### ۳-۹ فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل

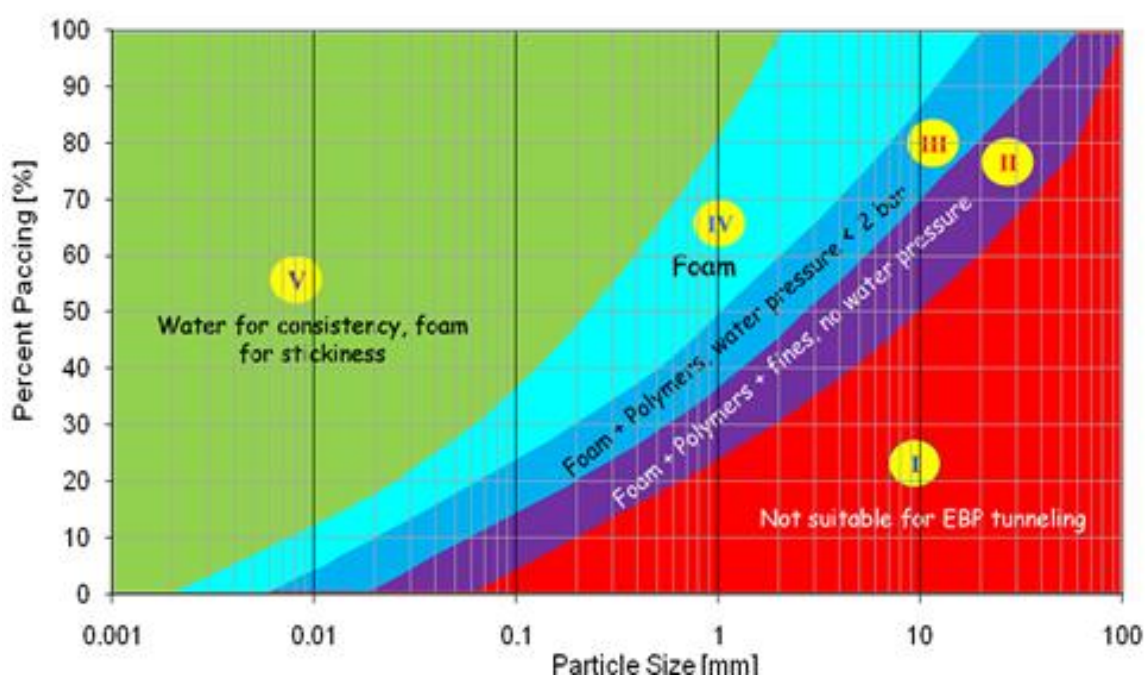
مقدار مصالح ریزدانه (درصد عبوری از الک ۲۰۰) در انتخاب ماشین و همچنین عملکرد ماشین بسیار با اهمیت می‌باشد. بطور کلی ماشین EPB-TBM برای زمین‌هایی که دارای ذرات ریزدانه قابل توجهی باشند، مناسب‌تر است [۴۳].

### ۳-۹-۱ مشکلات ناشی از فقدان مصالح ریزدانه

به طور کلی کاهش ذرات ریزدانه سبب افزایش اصطکاک و نفوذپذیری می‌شود و در نهایت سبب افزایش قابل توجه در ساینده‌گی خاک و یا مشاهده آب در نوار نقاله ماریچ خواهد شد و عدم توجه به این عامل می‌تواند سبب بروز خسارت‌های قابل توجهی در روند حفاری شود. با تمام این مشکلات، امروزه با رشد و توسعه تکنولوژی بهسازی شرایط خاک (Soil conditioning)، امکان حفاری با ماشین EPB در زمین‌هایی که درصد خاک ریزدانه در آنها کمتر از ۲۰ درصد باشد نیز وجود دارد، ولی برای انجام این کار بایستی بخش‌هایی از مسیر تونل که میزان ذرات ریزدانه در آنها کمتر از ۲۰ درصد است، در طی مطالعات ژئوتکنیک اولیه شناسایی شود تا تمهیدات مناسب برای کاهش خطر تونلسازی در چنین زمین‌هایی لحاظ شود [۵۰].

### ۳-۹-۲ روش‌های تعیین میزان خطر ناشی از فقدان مصالح ریزدانه

به منظور بررسی میزان خطر ناشی از کمبود مصالح ریزدانه بهترین راه، مطالعه دانه‌بندی خاک‌های موجود در مسیر تونل و مقایسه آن با نمودارها و جداول ارائه شده در این زمینه می‌باشد. از مهمترین این نمودارها می‌توان به مدل توزع<sup>۱</sup> برای ماشین‌های مختلف اشاره نمود. مدل ارائه شده توزع برای ماشین مدل EPB در شکل (۳-۸) آورده شده است [۷۶].



شکل (۳-۸) نمودار حوزه‌های دانه‌بندی مسیر تونل برای کار با ماشین حفاری مدل EPB [۷۶]

در نمودار (۳-۸) توزیع حوزه‌های دانه‌بندی مشخص شده به شرح زیر می‌باشد:

(I): این شرایط برای استفاده از دستگاه حفار نوع EPB مناسب نمی‌باشد.

(II): در این شرایط در صورتی که فشار آب موجود نباشد، با استفاده از فوم، پلیمر و ریزدانه، می‌توان ماشین EPB را به کار برد.

<sup>۱</sup> Tewes



(III): در این شرایط برای حفاری با ماشین مذکور نیازی به فوم و یا پلیمر نمی‌باشد و فقط می‌بایست

فشار آب کمتر از ۲ بار باشد.

(IV): در این شرایط، خاک نیاز به بهسازی و عمل‌آوری دارد.

(V): در این شرایط برای به کار گرفتن EPB می‌بایست برای اصلاح روانی خاک، آب اضافه نمود و

همچنین برای سفت کردن آن از مواد افزودنی با توجه به جنس زمین استفاده نمود [۶۵].

### ۳-۱۰ روانگرایی خاک

پدیده‌ی روانگرایی به صورت انتقال مواد دانه‌ای از حالت جامد به حالت مایع، در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش تنش موثر تعریف می‌شود. در واقع مکانیزم روانگرایی، افزایش فشار آب حفره‌ای در اثر تنش برشی متناوب می‌باشد. زمانی که فشار آب حفره‌ای برابر با فشار محفظه‌ای اولیه می‌شود خاک مقاومتش را از دست می‌دهد و یا تغییر شکل‌های بزرگ در خاک رخ می‌دهد [۷۷].

زلزله یکی از پدیده‌هایی که همواره باعث بروز صدمات جبران‌ناپذیر جانی و مالی می‌شود. از نظر ژئوتکنیک مهمترین پدیده‌ای که در اثر وقوع زلزله ممکن است در خاک رخ دهد، روانگرایی می‌باشد. در زمان زلزله خاک‌های اشباع ممکن است یکباره تبدیل به مایعی غلیظ شوند. در این شرایط تماس بین ذرات از بین رفته به طوری که مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد و خاک رفتاری شبیه به مایعی با وزن واحد حجم خاک اشباع از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر خاک گسیخته و روان می‌شود [۷۸].

### ۳-۱۰-۱ مشکلات ناشی از روانگرایی

وقوع روانگرایی می‌تواند ساختمان‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، شریان‌های حیاتی، شیب‌ها و بسیاری از تجهیزات ساخته شده‌ی دیگر را به شیوه‌های مختلف تحت تاثیر قرار دهد. روانگرایی با پدیده‌های مختلفی نظیر افزایش فشار آب منفذی، جوشش ماسه و حالت‌های مختلف تغییرشکل همراه است. اما این تغییرشکل‌ها، تنها هنگامی که به اندازه‌ی کافی بزرگ بوده و به سازه‌ها آسیب برسانند، برای مهندسان معنی دار هستند. این نوع تغییرشکل زمین، گسیختگی زمین نامیده می‌شود و ممکن است در شکل‌ها و انواع مختلف ظاهر شود. پس از وقوع زلزله، مشاهدات گسیختگی زمین به عنوان مدرکی از وقوع روانگرایی در اعماق لایه‌های زیرین خاک، به کار برده می‌شود.

نرم‌شوندگی تناوبی (شامل روانگرایی تناوبی و تحرک تناوبی) بسیار بیشتر از روانگرایی جریان‌ی اتفاق می‌افتد، اما اثرات روانگرایی جریان‌ی بر روی سازه‌ها معمولاً از نرم‌شوندگی تناوبی شدیدتر است. این موضوع به آن دلیل است که در این نوع از روانگرایی، پتانسیل تغییرشکل‌های بزرگتر وجود داشته و این تغییرشکل‌ها با سرعت نسبتاً بیشتری رخ می‌دهند. برخی از مهمترین انواع گسیختگی زمین در اثر وقوع روانگرایی عبارتند از: جوشش ماسه، گسیختگی جریان‌ی، نشست زمین، از دست رفتن ظرفیت باربری و شناوری سازه‌های مدفون [۷۸].

### ۳-۱۰-۲ روش‌های برآورد پتانسیل روانگرایی

گام نخست در هر روش ارزیابی روانگرایی لرزه‌ای، تعیین این موضوع است که آیا استعداد روانگرایی در ساختگاه مورد نظر وجود دارد یا خیر. روش‌های گزینشی مختلفی برای جداسازی ساختگاه‌هایی که به طور مشخص نسبت به وقوع پدیده‌ی روانگرایی بی خطر هستند از ساختگاه‌هایی که نیاز به مطالعات تفصیلی بیشتر دارند، وجود دارد. بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و نیز

مشاهدات و مطالعات محلی انجام شده، معیارهای گزینشی زیر مهمترین عواملی هستند که روانگرایی را کنترل می‌کنند و متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در ارزیابی استعداد روانگرایی بر اساس آنها تعریف می‌شوند [۷۸].

- تراز آب زیرزمینی؛

- نوع خاک؛

- تراکم نسبی؛

- دانه بندی؛

- وضعیت زهکشی؛

- شکل ذرات؛

- سن زمین‌شناسی و خصوصیات زمین ریخت‌شناسی؛

- شرایط تاریخچه‌ای (سیمانی شدن، نسبت پیش‌تحکیمی و ضریب فشار جانبی)؛

- فشار همه جانبه

نهشته‌های دارای پتانسیل روانگرایی بر اساس تراز آب زیرزمینی طبق جدول (۳-۱۰) از نظر روانگرایی رده‌بندی شده‌اند.

جدول (۳-۹): استعداد روانگرایی نسبی نهشته‌های طبیعی به صورت تابعی از تراز آب زیرزمینی [۷۸]

| عمق تراز آب زیرزمینی (متر) | استعداد روانگرایی نسبی |
|----------------------------|------------------------|
| کم‌تر از ۳                 | بسیار بالا             |
| ۳ تا ۶                     | بالا                   |
| ۶ تا ۱۰                    | متوسط                  |
| ۱۰ تا ۱۵                   | کم                     |
| بیش از ۱۵                  | بسیار کم               |

روش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر اساس اصل مقایسه تنش‌های ایجادشده بر اثر زلزله و مقاومت خاک می‌باشد. روش‌های پیش‌بینی وقوع روانگرایی را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم کرد:

**دسته اول** روش‌های مبتنی بر تحلیل دینامیکی طیف زلزله و محاسبه تنش برشی وارده به المان خاک و مقایسه این تنش با مقاومت برشی آن المان در آزمایشات تناوبی می‌باشد. این روش‌ها اگرچه نسبتاً دقیق هستند و از اصول قابل اعتمادی برخوردار می‌باشند ولی در عمل کاربرد آنها به چند دلیل از جمله مشکل بودن تهیه نمونه دست‌نخورده از خاک‌های ماسه‌ای و نیمه متراکم اشباع و هزینه نسبتاً بالای انجام آزمایشات دینامیکی محدود می‌باشد [۷۸].

**دسته دوم** روش‌ها بر پایه مشاهدات و تجربیات قبلی استوار می‌باشند. در این روش‌ها به جای استفاده از روش‌های تحلیلی، با استفاده از فرضیات ساده‌کننده تنش وارده به المان خاک در حین زلزله برآورد می‌شود. مقاومت برشی المان خاک نیز بر اساس انجام آزمایشات ساده محلی و با استفاده از مشاهدات قبلی انجام شده، تخمین زده می‌شود. در نهایت مقایسه بین تنش برشی وارده و مقاومت برشی المان، نشان دهنده وقوع یا عدم وقوع پدیده می‌باشد. از جمله مهمترین معیارهای شاخص تعیین استعداد روانگرایی می‌توان به معیار چینی (وانگ<sup>۱</sup> ۱۹۸۱)، معیار اندرو و مارتین<sup>۲</sup>، معیار مقاومت نفوذ استاندارد (SPT)، معیار سید<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۳)، ایواسکی، ادریس-بولانگر (۲۰۰۴) و

<sup>۱</sup> Wang

<sup>۲</sup> Andrews and Martin

<sup>۳</sup> Seed

... اشاره کرد [۷۸ و ۷۹]. در ادامه برخی از این معیارها به طور مختصر توضیح داده شده‌اند.

### الف- معیار چینی (وانگ ۱۹۸۱-۱۹۷۹)

آزمایش‌های آزمایشگاهی و داده‌های برجا نشان داده است که در ماسه‌های با مقادیر بالای ریزدانه نیز در خلال زلزله روانگرایی اتفاق خواهد افتاد. مطالعات انجام شده در چین نشان داده است که انواع خاصی از ماسه‌های رسی ممکن است در اثر زلزله، مقاومت خود را از دست داده و روانگرا شوند. این خاک‌ها دارای شرایط زیر می باشند:

- $15\% <$  درصد ریزدانه‌های کوچکتر از  $0.075$  میلی‌متر
- $35\% <$  (LL) حد روانی
- $0.9 \times LL \geq$  میزان رطوبت

اگر ماسه چسبنده‌ای، فاقد شرایط فوق باشد در هنگام زمین‌لرزه روانگرا نخواهد شد [۷۸ و ۸۰].

### ب- معیار اندرو و مارتین (۲۰۰۰)

اندرو و مارتین سوابق محلی مربوط به پایگاه داده‌های مورد استفاده وانگ را به همراه تعدادی از موارد روانگرایی رخ داده در طی زلزله‌های بعدی مورد ارزیابی مجدد قرار دادند. آنها در نهایت معیار چینی را به فرم متعارف آمریکایی (اندازه‌ی ذرات رس کمتر از  $0.075$  میلی‌متر) تبدیل کردند.

خلاصه‌ی نتایج کارهای این محققین به صورت زیر می‌باشد [۷۸]:

- خاک‌هایی که کمتر از ۱۰ درصد ریزدانه‌ی رسی (کوچک‌تر از  $0.075$  میلی‌متر) داشته باشند و همچنین حد روانی (حد روانی مربوط به بخش رد شده از الک نمره‌ی ۴۰) آنها کمتر از ۳۲ درصد باشد، مستعد روانگرایی در نظر گرفته می‌شوند.

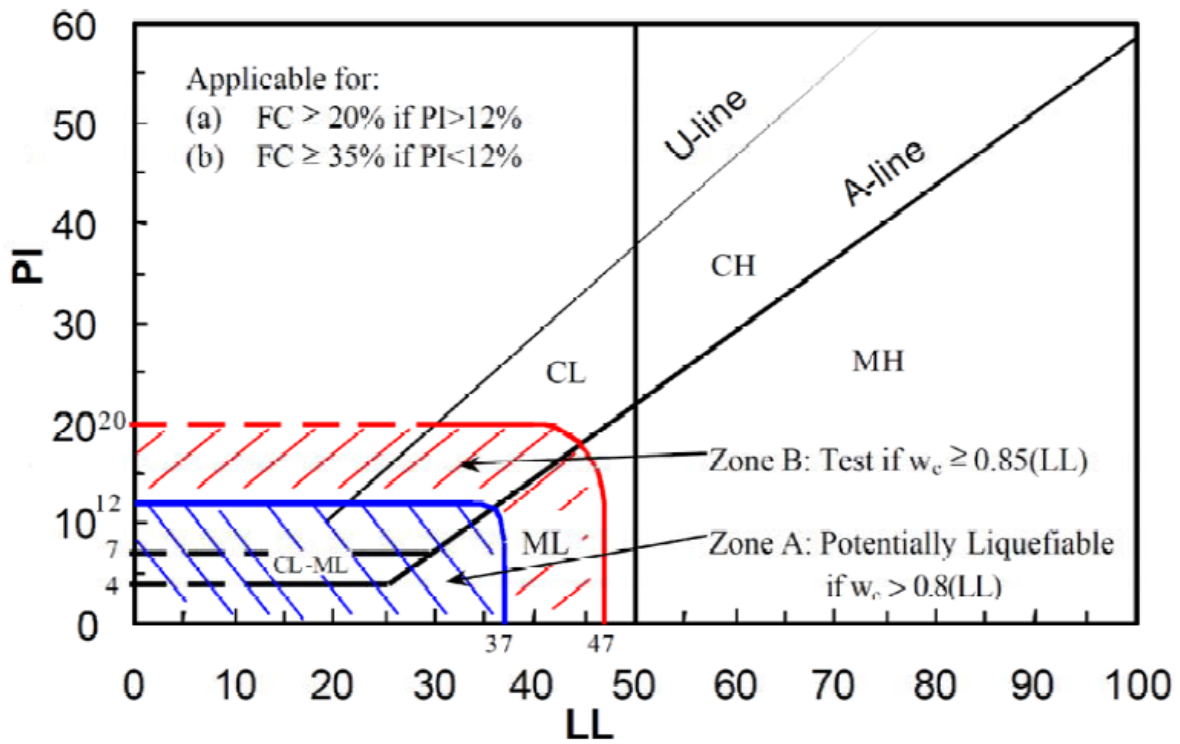
- خاک‌هایی که بیشتر از ۱۰ درصد ریزدانه‌ی رسی داشته باشند و حد روانی آنها بیشتر یا برابر ۳۲ درصد باشد، مستعد وقوع روانگرایی ناشی از بارهای تناوبی نیستند.
- برای ارزیابی استعداد روانگرایی خاک‌های قرارگرفته در محدوده میان این دو معیار، باید نمونه‌گیری کرده و آن را مورد آزمایش قرار داد.

### ج- معیار سید و همکاران (۲۰۰۳)

با توجه به داده‌های محلی حاصل از زلزله‌های اخیر، سید و همکاران معیار جدیدی را برای ارزیابی استعداد روانگرایی خاک‌های ریزدانه پیشنهاد نمودند. شکل (۳-۹) این پیشنهاد را در ارتباط با قابلیت روانگرایی خاک‌های با درصد ریزدانه‌ی قابل توجه نشان می‌دهد؛ به عبارتی در این خاک‌ها ریزدانه‌ها ذرات درشت‌تر را جدا کرده و رفتار کلی خاک را کنترل می‌نمایند. این جداسازی ذرات درشت‌تر معمولاً زمانی رخ می‌دهد که مقدار ریزدانه بیش از ۱۵ تا ۳۵ درصد باشد [۷۸ و ۸۱].

بر مبنای این معیار می‌توان پتانسیل روانگرایی خاک‌های ریزدانه را در قالب نواحی شکل (۳-۹) به صورت زیر بررسی کرد:

- خاک‌های قرار گرفته در داخل ناحیه‌ی A به عنوان خاک‌های مستعد روانگرایی لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شوند
- خاک‌های داخل ناحیه‌ی B می‌توانند مستعد روانگرایی باشند
- خاک‌های ناحیه‌ی C (نواحی خارج از A و B) معمولاً مستعد روانگرایی لرزه‌ای نیستند.



شکل (۳-۹) معیار ارزیابی پتانسیل روانگرایی برای خاک‌های ریزدانه [۷۸]

### ۱۱-۳ جمع بندی

در این فصل مهم ترین مخاطرات زمین شناسی و ژئوتکنیکی که در حفاری مکانیزه در نواحی شهری ممکن است وجود داشته باشند، بررسی شده و مشکلات ناشی از وقوع این مخاطرات و نیز راهکارهای شناسایی آنها به صورت مختصر توضیح داده شده است. نتایج این بررسی ها در جدول (۱۱-۳) به صورت مختصر ارائه شده است.

جدول (۳-۱۰): خلاصه مشکلات ناشی از مخاطرات ژئوتکنیکی و روش های شناسایی این مخاطرات

| مخاطره ژئوتکنیک                     | مشکلات ایجاد شده  | روش های شناسایی  |
|-------------------------------------|---|--|
| جبهه کار مختلط                      | تغییرات فشار سینه کار، آسیب به ابزار برش و لرزش شدید ماشین  | مطالعه گزارشات زمین شناسی و بررسی پروفیل زمین شناسی مسیر   |
| وجود بولدر                          | افزایش گشتاور ماشین، سایش و آسیب به ابزار و توقف ماشین  | بررسی رخنمون ها و ترانشه ها، مطالعات ژئوفیزیکی و حفاری اکتشافی                                   |
| نشست سطح زمین                       | آسیب به سازه های مجاور سطحی و سایر سازه های زیرزمینی  | پیش بینی میزان نشست با روش های تجربی، تحلیلی، عددی و یا آزمایشگاهی                               |
| تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی | حجوم آب به داخل تونل، تولید گل و لای، اعمال فشار اضافی بر سیستم نگهداری و نشست زمین ناشی از زهکشی | انجام مطالعات هیدروژئولوژی و سنجش میزان نفوذپذیری خاک  |
| انسداد و گل گرفتگی                  | گرفتگی کله حفار و سایر ابزار، افزایش نیروی تراست و گشتاور و توقف ماشین                            | حفر گمانه و انجام آزمایشات ژئوتکنیکی بر روی مغزه های حاصل از گمانه ها                            |
| سایندگی زمین                        | سایش ابزار برش، کله حفار و سایر نقاط دارای تماس با خاکو در نتیجه افزایش هزینه                     | انجام آزمون های تعیین سایندگی سنگ و خاک و استفاده از معیارهای ژئوتکنیکی                          |
| تورم زمین                           | توقف ماشین و تخریب نگهدارنده های تونل   | انجام آزمون های تورم، تحکیم، دانه بندی، تعیین حدود اتربرگ، تجزیه شیمیایی و ...                   |
| فقدان مصالح ریزدانه                 | افزایش اصطکاک و نفوذپذیری   | بررسی دانه بندی خاک مسیر   |
| روانگرایی خاک                       | گسیختگی زمین، شناوری سازه های مدفون و آسیب به تونل  | بررسی تراز آب زیرزمینی، نوع خاک، دانه بندی و ... و استفاده از روش های تجربی و تحلیل های دینامیکی |



## **فصل ۴: معرفی پروژه تونل خط ۱ متروی تبریز و بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی آن**

## ۴-۱ مقدمه

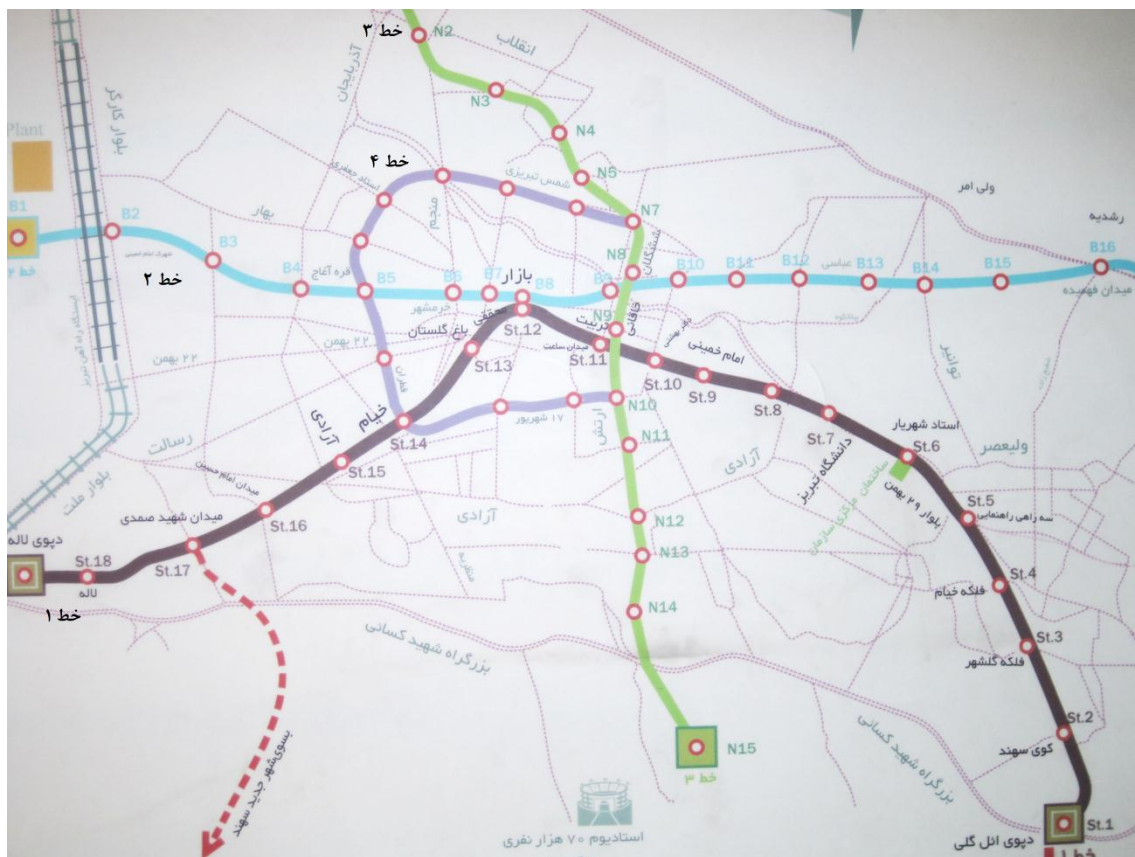
در کلان‌شهر تبریز به دلیل گسترش شهر و افزایش جمعیت مشکلات ترافیک و آلودگی هوا نیز روبه افزایش می‌باشد. یکی از راه‌های کاهش این مشکلات استفاده از مترو جهت حمل و نقل روزانه می‌باشد. بر این اساس کارهای احداث خطوط مترو در این شهر شروع شده است. با این وجود مشکلات ناشی از پدیده‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی همواره به صورت مانعی در طول مراحل اجرایی پروژه وجود دارند. از این رو در این فصل ضمن معرفی پروژه خط ۱ متروی تبریز با بررسی داده‌های حاصل از ۳۱ گمانه حفاری شده در طول مسیر تونل ویژگی‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مسیر تونل به دست آمده است و در مرحله بعد احتمال وجود هرکدام از مشکلات و مخاطرات ژئوتکنیکی در تونل مذکور با استفاده از این نتایج و با روش‌های تجربی ساده به صورت کیفی بررسی شده است.

## ۴-۲ معرفی طرح قطار شهری تبریز

با توجه به حجم وسیع مسافرت‌های درون‌شهری و ضرورت استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی در جهت کاهش مشکلات ترافیکی شهر، برای اولین بار در دی ماه ۱۳۶۹ موضوع مطالعه و احداث قطار شهری تبریز در مجلس مطرح شد. در سال ۱۳۸۰ نیز مطالعات فاز اول و دوم آغاز شد. شبکه‌ی قطار شهری تبریز شامل ۴ مسیر، جمعاً حدود ۶۰ کیلومتر و ۶۰ ایستگاه طراحی شده است. خطوط متروی تبریز مطابق شکل (۴-۱) می‌باشد [۸۲].

- مسیر اول به طول ۱۷/۲ کیلومتر با ۱۸ ایستگاه از میدان ائل‌گلی آغاز و از طریق بلوارهای ائل‌گلی و ۲۹ بهمن، خیابان امام خمینی، خیابان شهید محقق، باغ گلستان، به کوی لاله ختم می‌شود.

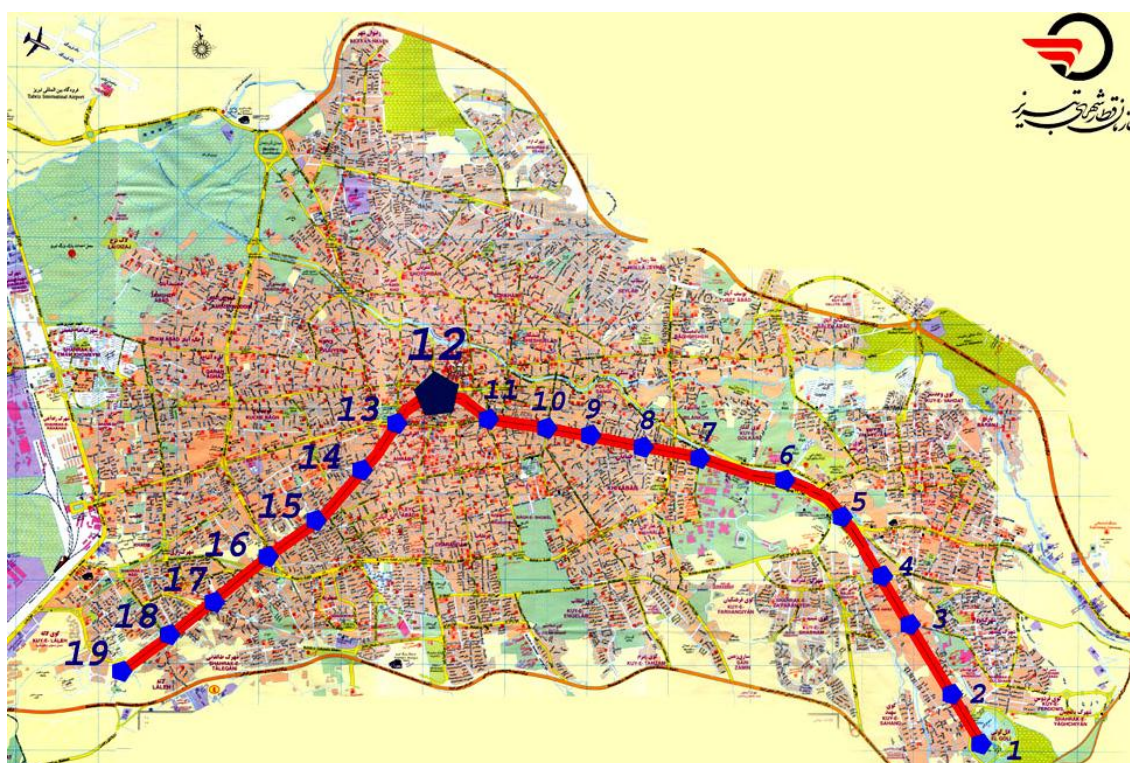
- مسیر دوم به طول ۱۷ کیلومتر و ۱۷ ایستگاه از نزدیکی دانشگاه آزاد اسلامی در شرق تبریز آغاز و از طریق میدان فهمیده، خیابان عباسی، ششگلان و بازار به قراملک ختم می‌شود.
- مسیر سوم به طول ۱۱ کیلومتر و شامل ۱۵ ایستگاه از میدان آذربایجان (حوالی فرودگاه تبریز) آغاز و از طریق بازار تا قراملک و خیابان طالقانی به ورزشگاه ۷۰ هزار نفری واقع در جنوب بزرگراه شهید کسایی ادامه می‌یابد.
- مسیر چهارم به طول ۱۰ کیلومتر به شکل حلقوی در مرکز شهر، سه مسیر فوق الذکر را به هم ارتباط می‌دهد [۸۲].



شکل (۴-۱) طرح خطوط متروی تبریز [۸۲]

## ۴-۲-۱ موقعیت و محل پروژه قطار شهری تبریز

پروژه در شهر تبریز با مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۰۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. که در شکل (۴-۲) نقشه محل پروژه نشان داده شده است [۸۳].



شکل (۴-۲) نقشه محل پروژه [۸۳]

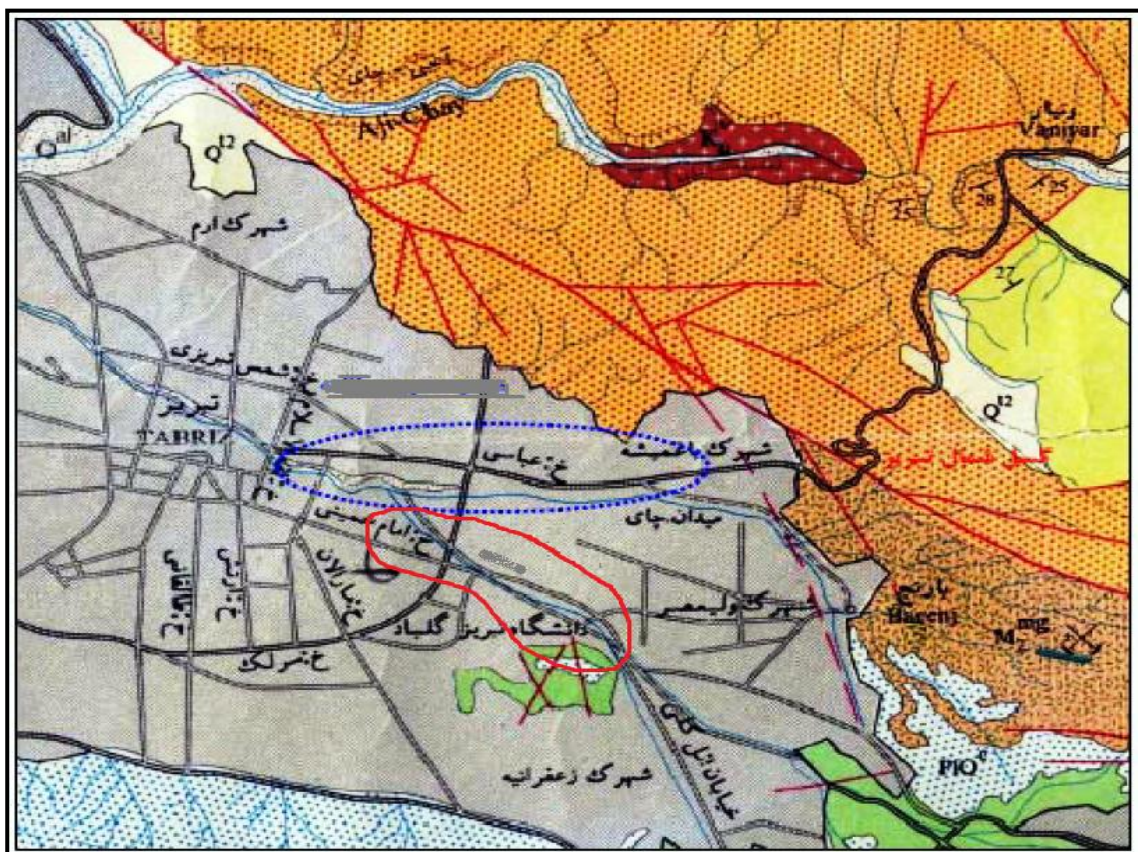
## ۴-۲-۲ زمین‌شناسی عمومی منطقه

زمین‌ساخت منطقه از نظر دیرینه‌شناسی بر اثر حرکات و فشارهای درونی و چین‌خوردگی‌های مربوط به دوران اول (پرمین) و دوران سوم (ائوسن) و به دلیل حرکات و شکست‌های پی در پی بوجود آمده در منطقه‌های آتشفشانی سهند و سبلان شکل گرفته است. همچنین حوزه آبی دریاچه ارومیه نیز در اثر شکل‌گیری این زمین‌ساخت پدیدار شده است. از نظر لیتولوژی اکثر تشکیلات و طبقات زمین‌شناسی آذربایجان، شامل طبقات رسوبی، تشکیلات آتشفشانی و تبخیری می‌باشند. مهمترین این

طبقات که در اکثر نقاط آذربایجان رخنمون دارند عبارتند از: طبقات آهکی، مارنی، ماسه‌سنگ‌های قرمز، سنگ‌های آواری، سنگ‌های آذرین و رسوبات تبخیری شامل طبقات گچ و نمک و همچنین لایه‌های شیل و رگه‌های نازکی از زغال می‌باشند. سن این سازندها به دوران اول و دوم زمین شناسی برمی‌گردد و بیشترین آنها متعلق به دوره کرتاسه می‌باشند. ضخامت رسوبات کرتاسه در بعضی نقاط آذربایجان به چند صد متر می‌رسد. بعلاوه سازندهای مربوط به دوران جدیدتر الیگوسن، میوسن، پلوئوسن، نیز دیده می‌شوند. سازندهای اخیر مشتمل بر رسوبات دریایی کم ژرف مانند ماسه سنگ، مارن و سنگ‌های تبخیری و سنگ‌های آذرین هستند. بر روی این سازندها رسوبات هولوسن و آبرفت‌های جدید دوران کواترنری که بر اثر سیکل‌های فرسایشی بوجود آمده‌اند قرار دارند و نیز در پهنه وسیعی از منطقه کالرد ملانژها گسترش دارند. در قسمت‌هایی از منطقه تشکیلات ماسه‌سنگی و گدازه‌های آتشفشانی در زیر طبقات آبرفتی جدید مشاهده می‌شوند (شکل (۴-۳)) [۸۳].

به طور کلی شهر تبریز بر روی رسوبات دوره‌های مختلف دوران‌های سوم و چهارم زمین‌شناسی بنا شده است. این رسوبات شامل سنگ رس، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، توف، ژئوپس و رسوبات آبرفتی از قبیل رس، لای، ماسه، شن و قلوه‌سنگ می‌باشد. به علاوه واریزه‌های کوه‌پایه‌ای و همچنین لایه‌هایی از خاکریزهای دستی در قسمت‌هایی از شهر دیده می‌شوند. در جدول (۴-۱) سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده شهر تبریز معرفی شده‌اند.





شکل (۳-۴) وضعیت زمین‌شناسی تبریز و ساختار قطار شهری تبریز [۸۴]

جدول (۴-۱): سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده شهر تبریز [۸۴]

| دوران    | سازند   |
|----------|---|
| کواترنری | آبرفت‌های کواترنری و رسوبات تخریبی درشت دانه (ماسه شن دار و سیلت دار)   |
| پلیوسن   | طبقات حاوی فسیل ماهی (مارن، خاکستر آتشفشانی و دیاتومیت با ضخامت متوسط ۷ متر)  |
| میوسن    | سازند باغمیشه (لایه‌های مارنی-شیلی خاکستری تا سبز تیره دارای ریز لایه‌های لیگنیت دار)، سازند قرمز فوقانی و رسوبات قرمز رنگ تخریبی قاره ای (ماسه سنگ، سیلتستون، مارن و کنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی) |

### ۳-۴ مطالعات ژئوتکنیک

بررسی‌ها و مطالعات ژئوتکنیک به منظور ارزیابی داده‌های مربوط به رفتار خاک، که در ساخت بناها لازم می‌آید، صورت می‌گیرد. بطور کلی می‌توان گفت این بررسی‌ها برای رسیدن به نیازهای ساخت و

عملکرد سازه انجام می‌گیرد. مطالعات صورت‌گرفته جهت بررسی‌های صحرایی و مطالعات و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مشتمل بر آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی به منظور شناخت شرایط و ویژگی‌های لایه‌های زیرزمینی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله جهت دستیابی به اهداف زیر صورت گرفته است:

- تعیین بافت و ضخامت لایه‌های خاکی

- بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاکی

به منظور دستیابی به اهداف فوق انجام عملیات صحرایی ضروری می‌باشد. به همین منظور مطالعاتی به شرح زیر انجام شده است:

#### ۴-۳-۱ عملیات حفاری گمانه‌های اکتشافی

در راستای مطالعات ژئوتکنیک مسیر خط یک قطار شهری تبریز، تعداد چهار حلقه گمانه ماشینی بوسیله دستگاه حفاری دورانی حد فاصل فلکه دانشگاه تا چهارراه منصور به عمق حداکثر ۳۵ متر در نقاط معرفی شده توسط نماینده کارفرما با مشخصات FBH1 الی FBH7 حفر شده است. پس از حفاری گمانه‌های فوق چهارگمانه دیگر در حدفاصل فلکه دانشگاه و ایستگاه بالا حمام خیابان امام خمینی با مشخصات MBH4 الی MBH7 حفر شده است. در مراحل بعدی نیز تعداد بیشتری گمانه، به منظور کسب اطلاعات بیشتر حفر شده است. از مجموع گمانه‌های حفر شده در مسیر تونل، حدود ۳۱ گمانه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. از اعماق مختلف گمانه‌ها نمونه‌هایی برای انجام آزمایشات مورد نیاز اخذ شده است.

## ۴-۳-۲ آزمایش‌های صحرایی

\* آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد (S.P.T) (طبق استاندارد A.S.T.M:D1507):

این آزمایش مقاومت خاک گمانه را ارزیابی نموده و نمونه دست‌خورده‌ای را برای شناسایی خاک فراهم می‌سازد. مقاومت نفوذ را می‌توان به خصوصیات خاک و تغییرات آن از جمله: تخمین تراکم نسبی ماسه و شن، تخمین پارامترهای مقاومتی خاک، تخمین ظرفیت باربری مجاز پی‌های سطحی و عمیق در ماسه، تخمین مقدار نشست پی در ماسه و ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌های غیر چسبنده اشباع در شرایط زهکشی نشده ارتباط داد.

اساس آزمایش بر سقوط یک چکش به وزن  $63/5$  کیلوگرم از ارتفاع  $76$  سانتیمتر و تعداد ضرباتی که باعث نفوذ  $30$  سانتی‌متر از طول لوله‌ای به قطر خارجی  $50$  میلی‌متر و قطر داخلی  $35$  میلی‌متر می‌شود، قرار دارد. همچنین در محل گمانه‌ها تعدادی آزمایش نفوذپذیری صحرایی در اعماق مختلف با دو روش بار افتان و ثابت انجام شده است [۸۳].

## ۴-۳-۳ آزمون‌های آزمایشگاهی

بر روی نمونه‌های دست‌خورده جهت تعیین خصوصیات فیزیکی، آزمایش‌های زیر انجام شده است:

- آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری (طبق استاندارد AASHTO T 27)
- آزمایش تعیین حد روانی و خمیری خاک (طبق استاندارد ASHTO T 89, T 90)
- آزمایش تعیین وزن مخصوص ذرات جامد
- آزمایش‌های شیمیایی جهت تعیین سولفات و کلرور خاک

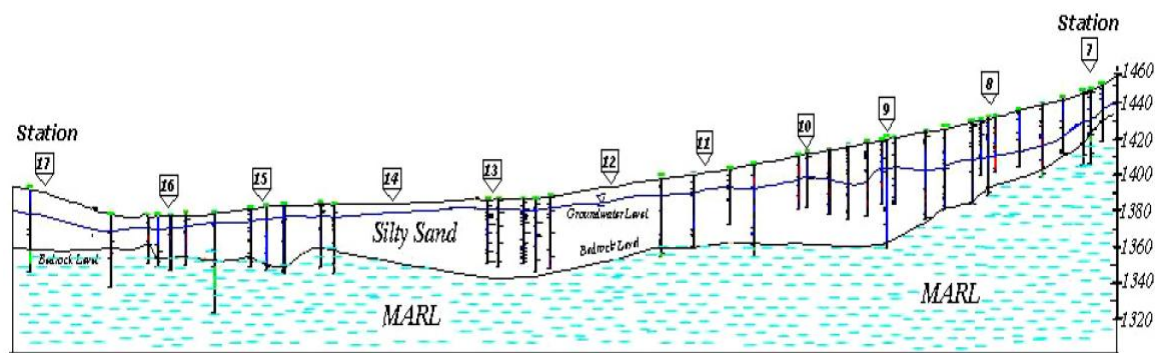
همچنین آزمایش برش مستقیم به روش کند و اشباع با سرعت  $0/1$  میلی‌متر بر دقیقه (طبق

استاندارد ASTM D 3080) بر روی برخی از نمونه‌ها انجام شده است [۸۳].



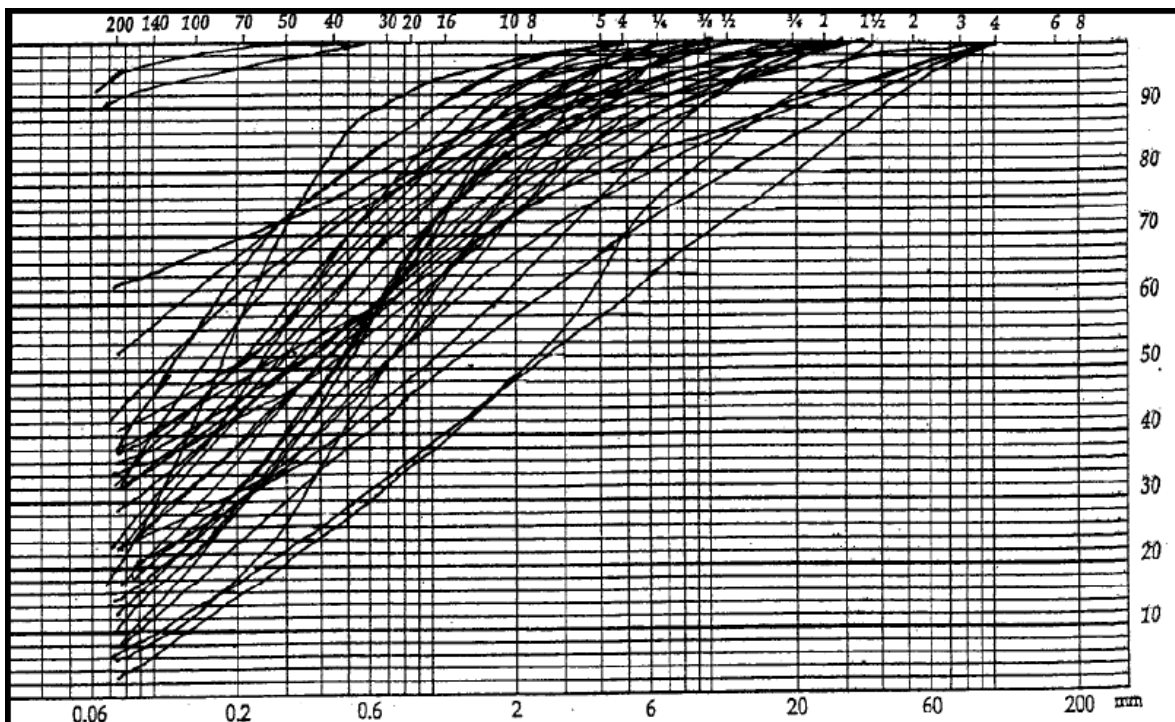
### ۴-۳-۴ نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی

نتایج حفاری‌ها و آزمایشات نشان می‌دهد که قسمت اعظم مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز در داخل رسوبات آبرفتی ماسه‌ای قرار می‌گیرد. این رسوبات با تنوع نه‌چندان زیاد در بافت و دانه‌بندی دارای ضخامتی بین ۱۰ تا ۶۵ متر می‌باشد که بر روی سنگ بستر ماری قرار گرفته‌اند. همان گونه که مقطع زمین‌شناسی در شکل (۴-۴) نشان می‌دهد، ضخامت این رسوبات در قسمت‌های میانی بیشتر بوده و از سمت شرق به غرب نوعی کاهش اندازه ذرات مشاهده می‌شود. طبقه‌بندی یونیفاید این رسوبات به ترتیب فراوانی SM، SP-SM، SW-SM، GP، GM و GC هستند. فراوانی ماسه سیلت دار (SM) بسیار بیشتر از بقیه است [۸۴]. در شکل (۴-۵) نیز منحنی‌های دانه‌بندی چندین نمونه از این رسوبات نشان داده شده است.



شکل (۴-۴) مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل [۸۴]

ضخامت لایه‌بندی رسوبات متغیر بوده و معمولاً این رسوبات به صورت لایه‌های ممتد و طویل نبوده بلکه به صورت عدسی‌های طویل هستند. بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) اغلب قسمت‌های لایه‌های آبرفتی دارای تراکم زیاد تا خیلی زیاد می‌باشند، اگرچه در بعضی مناطق دارای تراکم متوسط و حتی سست نیز می‌باشند. اعداد SPT بالای ۶۰ نیز در برخی افق‌ها نوعی سیمانی شدن را نشان می‌دهد. همچنین در اغلب گمانه‌ها اعداد SPT با افزایش عمق افزایش می‌یابد. البته در مواردی که خاک دستی وجود داشته باشد تراکم کم است [۸۴].



شکل (۴-۵) منحنی‌های دانه‌بندی رسوبات آبرفتی مسیر تونل [۸۴]

مقدار نفوذپذیری این رسوبات عموماً بین  $10^{-2}$  تا  $10^{-6}$  متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. همچنین نتایج آزمونهای برش مستقیم، مقدار چسبندگی رسوبات را ناچیز و زاویه اصطکاک داخلی را بین ۲۵ تا ۳۸ درجه نشان داده است [۸۴].

به منظور شناخت بهتر شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه، در جدول (۴-۲) خلاصه نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی مغزه‌های حاصل گمانه‌های مختلف که از عمق‌های متناظر با تونل اخذ شده و نیز عمق تونل و عمق آب زیرزمینی ارایه شده است. در این جدول کیلومتراژ ۶/۷۰۰ بیانگر ایستگاه ۷ در سمت شرق و ورودی تونل است و جهت مطالعه از غرب به شرق می‌باشد.

جدول (۴-۲): خلاصه نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی گمانه‌های موجود در مسیر تونل متروی خط ۱ تبریز

| شماره گمانه | کیلومتر | دانه بندی | نفوذ پذیری  | عمق کف تونل | عمق آب زیرزمینی | چسبندگی | زاویه اصطکاک داخلی | درصد رس | درصد ماسه | درصد شن |
|-------------|---------|-----------|-------------|-------------|-----------------|---------|--------------------|---------|-----------|---------|
| BH 1        | ۶.۵۶۱   | SP        | -           | ۱۳.۳        | ۲۲.۵            | ۰.۰۶    | ۳۳                 | ۸       | ۵۲        | ۴۰      |
| FBH 1       | ۶.۷۵۱   | SP-SM     | $7*10^{-3}$ | ۱۱.۲        | ۲۰.۱            | ۰.۱۷    | ۳۸                 | ۱۳      | ۴۵        | ۴۲      |
| MBH 5       | ۶.۹۸۳   | SM        | $5*10^{-3}$ | ۱۴.۷        | ۲۲.۹            | ۰.۲۳    | ۱۹                 | ۲۰      | ۵۵        | ۲۵      |
| FBH 2       | ۷.۱۶۱   | SM        | $2*10^{-3}$ | ۲۰.۱        | ۲۲              | ۰       | ۳۶                 | ۴۰      | ۵۵        | ۵       |
| FBH 3       | ۷.۳۲۲   | SP-SM     | $8*10^{-4}$ | ۱۹.۵        | ۱۸.۹            | ۰.۰۸    | ۳۴                 | ۲۸      | ۵۵        | ۱۷      |
| MBH 11      | ۷.۴۰۱   | SM        | -           | ۱۷.۹        | ۲۰.۹            | -       | -                  | ۲۰      | ۷۰        | ۱۰      |
| FBH 4       | ۷.۴۶۲   | SM        | $4*10^{-4}$ | ۱۷.۳        | ۱۸.۷            | ۰.۰۴    | ۳۶                 | ۱۵      | ۶۵        | ۲۰      |
| MBH 12      | ۷.۵۴۴   | SM/SP     | $2*10^{-3}$ | ۱۶.۶        | ۲۰.۵            | ۰       | ۳۸                 | -       | -         | -       |
| MBH 6       | ۷.۷۶۲   | SM        | $7*10^{-4}$ | ۱۷.۱        | ۲۱.۳            | -       | -                  | ۲۸      | ۶۷        | ۵       |
| MBH 7       | ۷.۸۹۳   | CL/SM     | $8*10^{-5}$ | ۱۷.۷        | ۲۱.۴            | ۰.۱۵    | ۲۲                 | ۴۰      | ۵۴        | ۶       |
| FBH 5       | ۸.۱۸۸   | SM        | $3*10^{-5}$ | ۱۷.۹        | ۱۶.۲            | ۰       | ۳۷                 | ۳۳      | ۵۵        | ۱۲      |
| FBH 6       | ۸.۲۱۰   | SM        | $2*10^{-4}$ | ۱۷.۳        | ۱۵.۵            | ۰       | ۳۷                 | ۳۳      | ۵۷        | ۱۰      |
| MBH 13      | ۸.۲۱۴   | SM        | -           | ۱۷.۳        | ۱۶              | ۰       | ۴۰                 | -       | -         | -       |
| MBH 4       | ۸.۳۴۶   | SM        | -           | ۱۶.۶        | ۲۰.۵            | -       | -                  | ۳۵      | ۶۰        | ۵       |
| BH 17       | ۸.۵۲۶   | SP-SM/GP  | $2*10^{-5}$ | ۱۷.۲        | ۲۱              | ۰.۰۴    | ۲۷                 | ۲۰      | ۶۰        | ۲۰      |
| FBH 7       | ۸.۵۵۹   | SM/GM     | -           | ۱۷.۳        | ۱۸              | ۰.۲     | ۳۱                 | ۲۰      | ۵۲        | ۲۸      |
| FBH 8       | ۸.۸۶۸   | SM        | $3*10^{-4}$ | ۱۷.۴        | ۱۲.۷            | ۰       | ۳۷                 | ۳۰      | ۶۵        | ۵       |
| BH 3        | ۸.۸۹۰   | SP-SM     | -           | ۱۷.۳        | ۱۵              | ۰.۰۹    | ۳۴                 | ۸       | ۹۲        | ۰       |
| FBH 9       | ۸.۸۹۱   | SM        | -           | ۱۷.۳        | ۱۲              | ۰       | ۴۰                 | ۳۰      | ۶۰        | ۱۰      |
| MBH 8       | ۹.۲۴۰   | SM        | -           | ۱۸.۹        | ۱۲.۹            | ۰.۴     | ۱۸                 | ۲۰      | ۷۰        | ۱۰      |
| FBH 10-1    | ۹.۴۳۶   | SW-SM/SC  | $8*10^{-3}$ | ۱۹.۲        | ۱۰              | ۰       | ۳۷                 | ۲۵      | ۶۷        | ۸       |
| FBH 10      | ۹.۴۴۶   | SM        | $3*10^{-4}$ | ۱۹          | ۱۲.۱            | ۰       | ۳۴                 | ۳۵      | ۵۵        | ۱۰      |
| MBH 9       | ۹.۷۵۲   | SM        | $2*10^{-5}$ | ۱۹.۸        | ۱۲.۹            | ۰.۲۶    | ۲۳                 | ۱۳      | ۷۵        | ۱۲      |
| FBH 11      | ۹.۸۸۲   | SM        | -           | ۲۱          | ۱۴.۱            | ۰       | ۳۷                 | ۳۰      | ۶۵        | ۵       |

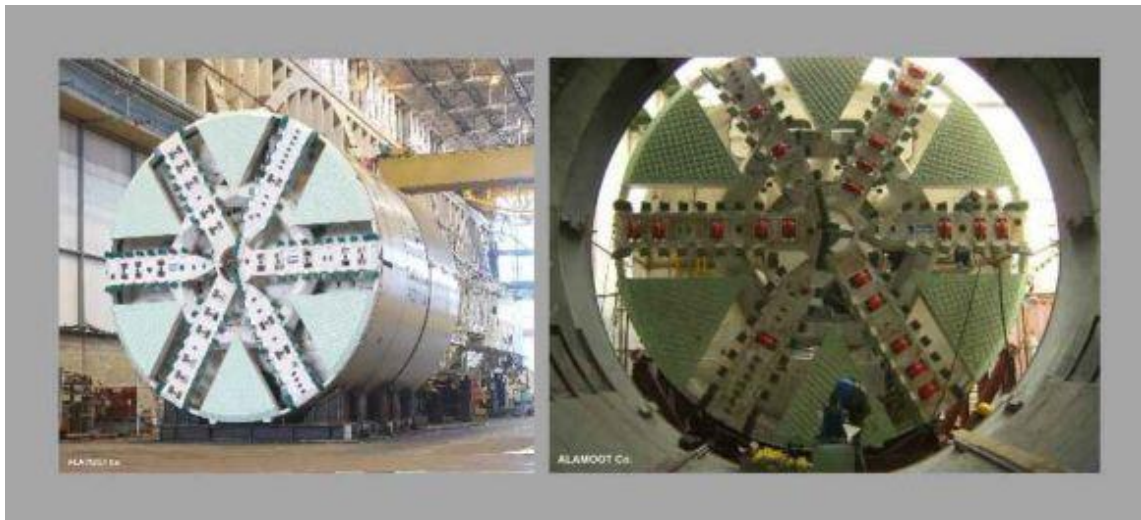
ادامه جدول (۴-۲): خلاصه نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی گمانه‌های موجود در مسیر تونل متروی تبریز

| شماره گمانه | کیلومتر | دانه بندی | نفوذپذیری         | عمق کف تونل | عمق آب زیرزمینی | چسبندگی | زاویه اصطکاک داخلی | درصد رس | درصد ماسه | درصد شن |
|-------------|---------|-----------|-------------------|-------------|-----------------|---------|--------------------|---------|-----------|---------|
| MBH 10      | ۹.۹۶۷   | SM-ML/SM  | -                 | ۲۱.۷        | ۹.۴             | ۰.۰۵    | ۲۲                 | ۴۰      | ۵۸        | ۲       |
| BH 9        | ۱۱.۰۵۰  | SC        | $7 \cdot 10^{-5}$ | ۱۸.۳        | ۸               | ۰.۱     | ۲۹                 | ۶۰      | ۴۰        | ۰       |
| FBH 24      | ۱۱.۲۹۷  | SM        | $5 \cdot 10^{-5}$ | ۱۷.۷        | ۵.۲             | ۰.۱     | ۳۴                 | ۳۰      | ۶۰        | ۱۰      |
| FBH 23      | ۱۱.۳۱۳  | SM        | $2 \cdot 10^{-6}$ | ۱۷.۸        | ۵.۶             | ۰       | ۳۲                 | ۳۵      | ۶۵        | ۰       |
| FBH 25      | ۱۱.۳۳۱  | SM        | $8 \cdot 10^{-4}$ | ۱۸          | ۵.۲             | ۰       | ۳۴                 | ۳۵      | ۶۳        | ۲       |
| BH 10       | ۱۲.۶۴۸  | SW-SM     | -                 | ۲۱          | ۸.۵             | ۰.۳۹    | ۲۶                 | ۱۲      | ۶۰        | ۲۸      |
| BH 13       | ۱۴.۷۴۵  | SW-SM     | -                 | ۱۴.۵        | ۹               | ۰.۰۴    | ۳۶                 | ۱۹      | ۵۸        | ۲۳      |

#### ۴-۴ روش حفاری

خط یک قطار شهری تبریز از لحاظ فیزیکی بصورت هم‌سطح، نیمه‌عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. در بخش عمیق به صورت دو تونل تک خطی (دوقلو) سهند و سبلان می‌باشد. حفاری تونل‌ها توسط دو دستگاه حفار TBM که در سال ۲۰۰۵ توسط کارخانه NFM فرانسه ساخته شده است، انجام می‌شود. این دستگاه‌ها از نوع سپر تعادلی با فشار زمین (EPB) بوده و قادر به کار در زیر تراز آب‌های زیرزمینی می‌باشند (شکل (۴-۶)) [۸۵ و ۸۶].

بخشی از مسیر خط ۱ که به صورت تونل دوقلو با دو دستگاه حفاری TBM سپری نوع EPB حفاری می‌شود، دارای طول حدود ۸ کیلومتر است. قطر حفاری تونل‌ها ۶/۸۸ متر و قطر خارجی سگمنت‌ها ۶/۶ متر و قطر داخلی تونل‌ها ۶ متر است که دارای ۱۴ سانتی‌متر فاصله بین قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌ها می‌باشد که به وسیله بتن تزریقی پر می‌شود. شیب تونل‌ها ۴/۴۱ تا ۰/۲۹- درصد و عمق تونل‌ها از سطح زمین بین ۱۲ تا ۲۳ متر است که در طول مسیر متغیر می‌باشد [۸۶].



شکل (۴-۶) دستگاه‌های حفاری EPB-TBM استفاده شده در خط ۱ متروی تبریز [۸۶]

#### ۴-۵ بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز

با توجه به بررسی نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌ها (مغزه‌های حاصل از ۳۱ گمانه‌ی حفاری شده)، در این قسمت از تحقیق، مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی که احتمال وقوع آن‌ها در مسیر تونل وجود دارد، شناسایی شده و احتمال وقوع آن‌ها بررسی شده است. این مخاطرات شامل نشست سطح زمین، تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی، جبهه‌کار مختلط، انسداد کاترهد و گل‌گرفتگی ابزار برش، ساینده‌ی زمین، وجود بولدر و قلوه‌سنگ در مسیر تونل، تورم و آماس زمین، فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل و پتانسیل روانگرایی خاک مسیر می‌باشند.

به منظور درک مناسب از شرایط مسیر تونل و با توجه به نتایج مطالعات ژئوتکنیکی، تراز آب زیرزمینی و عمق تونل مسیر تونل مذکور به دو زون A و B طبق جدول (۳-۴) تقسیم شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای ارائه شده در جدول (۳-۴) خلاصه‌ای از نتایج مطالعات ژئوتکنیکی مسیر با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش مغزه‌های گمانه‌های حفاری شده در مسیر می‌باشد.

در ادامه نیز هریک از مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی موجود در مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز بررسی شده است.

جدول (۴-۳): زون‌بندی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز

| B                           | A                           | زون                |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| (۸+۸۹۰) تا (۱۴+۷۸۰)         | (۶+۵۵۰) تا (۸+۸۹۰)          | کیلومتراژ          |
| SM, SW, SC, ML              | SP, SM, GP, GM              | دانه‌بندی          |
| ( $10^{-3}$ )-( $10^{-6}$ ) | ( $10^{-2}$ )-( $10^{-5}$ ) | نفوذپذیری (cm/sec) |
| ۱۰-۵۰                       | ۱۰-۷۵                       | SPT                |
| ۵-۱۸                        | ۱۵/۵-۲۳                     | عمق آب زیرزمینی    |
| ۱۷-۲۳                       | ۱۳-۲۰                       | عمق کف تونل        |
| ۱/۴-۱/۹                     | ۱/۵-۲/۴                     | دانسیتته خشک       |
| ۰-۰/۳۹                      | ۰/۰۲-۰/۲۳                   | چسبندگی            |
| ۲۰-۳۸                       | ۲۷-۴۰                       | زاویه اصطکاک داخلی |
| ۷۵-۵۰۰                      | ۲۰۰-۴۰۰                     | مدول الاستیسیته    |
| ۳۸-۶۰                       | ۰-۲۵                        | درصد لای و رس      |
| ۴۰-۷۵                       | ۴۰-۸۰                       | درصد ماسه          |
| ۵-۲۵                        | ۱۵-۴۰                       | درصد شن            |

#### ۴-۵-۱ نشست سطح زمین

به منظور بررسی خطر ناشی از پدیده نشست سطح زمین در مسیر تونل متروی تبریز، ابتدا انواع ساختمان‌های موجود در مسیر بر اساس پارامترهای مورد نیاز شناسایی و رده‌بندی شد. اطلاعات و مشخصات این ساختمان‌ها در جدول (۴-۴) ارائه شده است.

جدول (۴-۴): مشخصات ساختمان‌های واقع در محدوده تونل خط ۱ متروی تبریز [۸۷]

| نوع ملک      | عمر سازه (سال) | تعداد طبقات | نوع اسکلت   | توضیحات                                |
|--------------|----------------|-------------|-------------|--|
| خدماتی اداری | کمتر از ۲۰     | بیش از ۳    | بتنی        | -                                      |
| خدماتی اداری | بیش از ۲۰      | کمتر از ۳   | فلزی و چوبی | میراث فرهنگی - ساختمان‌های قدیمی       |
| مسکونی       | کمتر از ۲۵     | بیش از ۳    | بتنی        | -                                      |
| مسکونی       | کمتر از ۲۵     | بیش از ۳    | فلزی        | -                                      |
| مسکونی       | بیش از ۲۵      | کمتر از ۳   | حمال        | -                                      |
| مسکونی       | بیش از ۲۵      | کمتر از ۳   | حمال چوبی   | برخی با عمر بیش از ۴۰ سال و گاهی ریزشی |
| تجاری اداری  | کمتر از ۳۰     | بیش از ۳    | بتنی        | پاساژها                                |
| تجاری اداری  | کمتر از ۳۰     | کمتر از ۳   | فلزی        | پاساژها                                |
| تجاری اداری  | بیش از ۳۰      | کمتر از ۳   | چوبی        | پاساژهای قدیمی و گاهی ریزشی            |
| عمومی        | کمتر از ۵۰     | ۲           | حمال قوسی   | مساجد و میراث فرهنگی                   |
| عمومی        | بیش از ۵۰      | ۲           | حمال        | مساجد، میراث فرهنگی و موزه             |

با توجه به جدول (۴-۴) ملاحظه می‌شود که در طول مسیر تونل ساختمان‌هایی با مقاومت و کاربری متفاوت وجود دارند. با توجه به اینکه در میان این ساختمان‌ها، مواردی با بافت قدیمی چوبی و آجری وجود دارد، بنابراین باید حداکثر نشست مجاز برای مسیر را با توجه به همین سازه‌ها در نظر گرفت. طبق جدول (۴-۳) فصل قبل مشخص است که حداکثر نشست مجاز برای ساختمان‌های آجری ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین خطر نشست جزو مواردی است که باید حین طراحی و اجرا بیشترین توجه به آن شود.

#### ۴-۵-۲ تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی

با بررسی نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری بر روی گمانه‌ها و با توجه به حدود نفوذپذیری ارایه شده برای زون A و B که در جدول (۴-۳) ارایه شده است، مشاهده می‌شود که میزان نفوذپذیری خاک در طول مسیر متغیر است و میزان نفوذپذیری در اکثر نقاط مسیر بیشتر از  $(10^{-5})$  می‌باشد. در زون A میزان نفوذپذیری حتی در برخی نقاط به  $(10^{-2})$  نیز می‌رسد.

با توجه به جدول (۴-۳) در اکثر نقاط مسیر تونل میزان نفوذپذیری خاک بیشتر از حد مجاز برای کارکرد دستگاه EPB-TBM می‌باشد، لذا استفاده از گل بنتونیت و سایر مواد افزودنی به جبهه کار و محفظه دستگاه توصیه می‌شود.

با مقایسه تراز آب زیرزمینی در گمانه‌ها و نیز عمق طراحی شده برای حفاری تونل در نقاط متناظر با گمانه‌ها در هر دو زون، ملاحظه می‌شود که سطح آب زیرزمینی در زون A (تا نزدیکی ایستگاه ۱۰) پایین‌تر از هد تونل می‌باشد. لذا در این زون مشکلات چندانی از لحاظ وجود آب زیرزمینی وجود ندارد.



از ابتدای زون B (ایستگاه ۱۰ به بعد)، سطح آب زیرزمینی بالاتر از هد تونل می‌باشد. بنابراین آب زیرزمینی می‌تواند سبب بروز مشکلاتی در طول پروسه حفاری و به خصوص در محل ایستگاه‌ها و شفت‌های مسیر می‌شود. لذا باید در این زون تمهیدات لازم برای مقابله با آب زیرزمینی اتخاذ شود.

#### ۳-۵-۴ جبهه کار مختلط

در زون A از لحاظ شرایط دانه‌بندی با توجه به نتایج آزمایشات دانه‌بندی، لاگ گمانه‌ها و مشاهده رخنمون‌ها در محل شفت ایستگاه ۷ مشاهده شد که می‌توان برخی تغییرات از قبیل وجود گراول و قلوه‌سنگ با اندازه مختلف در ماتریس خاک در این زون وجود دارد

در زون B با توجه به بررسی لاگ گمانه‌ها، دانه‌بندی و مشاهده رخنمون‌ها در محل شفت ایستگاه ۱۲ مشاهده شد که در این زون نیز مشکل وجود قلوه‌سنگ در ماتریس خاک وجود دارد اما میزان مواد دانه‌درشت در ماتریس خاک بسیار کمتر از زون A می‌باشد.

#### ۴-۵-۴ گل‌گرفتنی و انسداد کاترهد و ابزار برش

به منظور بررسی پتانسیل گل‌گرفتنی ماشین در مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، پارامترهای ژئوتکنیکی ۶ نقطه از مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز (سه نقطه در زون A و سه نقطه در زون B)، بررسی شده است. این پارامترها از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های حاصل از ۶ گمانه حفاری شده در مسیر تونل به دست آمده‌اند. در مرحله بعد با توجه به پارامترهای ژئوتکنیکی، مقدار شاخص استحکام (CI) متناظر با هر نقطه، توسط رابطه‌ی (۲-۳) محاسبه شده است. سپس پتانسیل انسداد و گل‌گرفتنی این نقاط با نمودار توز (شکل (۳-۷))، مقایسه شده و احتمال وقوع گل‌گرفتنی ماشین حفار در این نقاط به دست آمده است. پارامترهای ژئوتکنیکی این نقاط و نیز احتمال وقوع گل‌گرفتنی آن‌ها در جدول (۴-۶) آمده است.

با توجه به جدول (۴-۵) ملاحظه می‌شود که احتمال وقوع پدیده گل‌گرفتگی ماشین حفار در بیشتر نقاط کم می‌باشد و تنها در کیلومتر ۷+۴۰۰ و ۱۰+۲۵۰ احتمال بروز این پدیده بیشتر می‌شود. بنابراین به منظور مقابله با مشکلات ناشی از این پدیده، توصیه می‌شود که در حین حفاری از فوم و مواد افزودنی ضد چسبندگی استفاده شود.

جدول (۴-۵): پارامترهای ژئوتکنیکی نقاط مختلف مسیر تونل متروی تبریز

| شماره نقطه | کیلومتراژ | زون | LL | PL | PI | W    | CI   | خطر گل‌گرفتگی |
|------------|-----------|-----|----|----|----|------|------|---------------|
| S.01       | ۶+۹۸۳     | A   | ۳۲ | ۲۱ | ۱۱ | ۳۰   | ۰/۱۸ | کم            |
| S.02       | ۷+۴۰۰     | A   | ۲۹ | ۱۸ | ۱۱ | ۱۲   | ۱/۵۵ | متوسط         |
| S.03       | ۸+۳۵۰     | A   | ۲۷ | ۱۷ | ۱۰ | ۲۵   | ۰/۲  | کم            |
| S.04       | ۹+۲۰۰     | B   | ۲۱ | ۱۴ | ۷  | ۱۳/۸ | ۱/۰۳ | کم            |
| S.05       | ۹+۷۵۵     | B   | ۴۲ | ۱۷ | ۲۵ | ۳۸   | ۰/۱۶ | کم            |
| S.06       | ۱۰+۲۵۰    | B   | ۲۸ | ۱۶ | ۱۲ | ۱۷/۸ | ۰/۸۵ | متوسط         |

#### ۴-۵-۵ سایندهای زمین

در حین انجام مطالعات ژئوتکنیکی بر روی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، به منظور بررسی سایندهای مسیر تونل از دو نوع آزمایش استفاده شده است. بر روی اجزای درشت‌تر آزمایش سرشار انجام شده و برای مطالعه خاک‌های ماسه‌ای از روش‌های کانی‌شناسی استفاده شده است [۸۵].

## الف - نتایج آزمایش سرشار

نتایج آزمایش سرشار بر روی نمونه‌سنگ‌های اخذشده از قلوه‌سنگ‌ها و قطعه سنگ‌های شناور در رسوبات آبرفتی در جدول (۴-۶) ارایه شده است. بر روی نمونه‌های مذکور آزمایش‌های سنگ‌شناسی نیز انجام شده است. جنس سنگ‌ها نیز در جدول (۴-۶) آورده شده است.

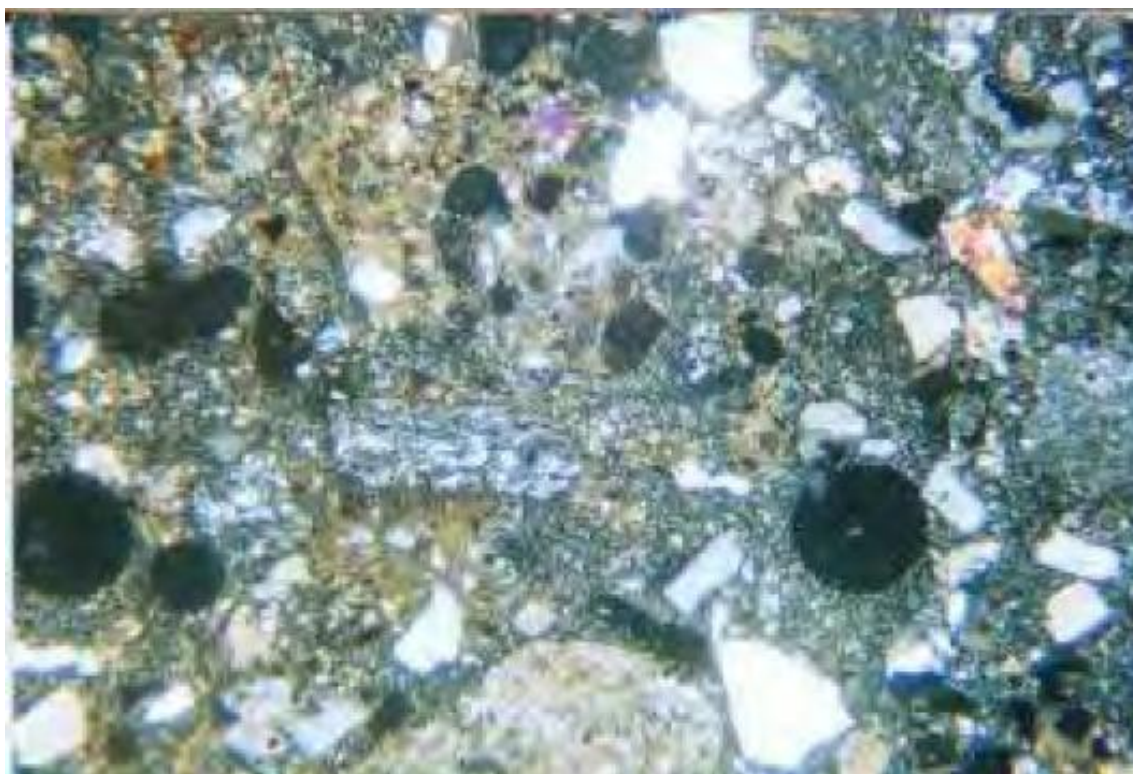
جدول (۴-۶): نتایج آزمایش‌های سایش به روش سرشار بر روی قلوه‌سنگ‌ها و قطعه سنگ‌های مسیر تونل [۸۵]

| شماره نمونه | موقعیت           | عمق نمونه (متر) | جنس سنگ | CAI |
|-------------|------------------|-----------------|---------|-----|
| S.01        | حوالی ایستگاه ۸  | ۱۶              | کنگومرا | ۲/۵ |
| S.02        | حوالی ایستگاه ۱۱ | ۱۵/۵            | آندزیت  | ۳/۵ |
| S.03        | حوالی ایستگاه ۱۳ | ۱۸              | آندزیت  | ۴/۷ |

مقدار CAI نمونه‌ها بین ۲/۵ تا ۴/۷ به دست آمده است. بر اساس تقسیم‌بندی ارایه شده در جدول (۳-۶) فصل قبل مشخص شد که این سنگ‌ها در رده‌ی ساینده تا خیلی ساینده قرار دارند. بنابراین در زون A احتمال بروز مشکل ساینده‌ی ابزار بسیار زیاد است.

## ب - مطالعات کانی‌شناسی

به منظور تعیین ساینده‌ی خاک‌های ماسه‌ای از روش کانی‌شناسی استفاده شده است. مهم‌ترین کانی ساینده موجود در خاک‌های محدوده مورد مطالعه کوارتز می‌باشد. جهت انجام آزمایش، تعدادی نمونه خاک ماسه‌ای از عمق استقرار تونل اخذ شده و بعد از تهیه مقطع نازک، مطالعات میکروسکوپی صورت گرفته است. درصد کوارتز بر اساس مساحت اشغال شده به وسیله کانی‌های کوارتز نسبت به مساحت کل مقطع، تعیین شده است [۸۵]. در شکل (۴-۷) تصویری از یکی از این مقاطع آورده شده است.



شکل (۴-۷) مقطع میکروسکوپی نمونه ماسه‌ای [۸۵]

نتایج مطالعات کانی‌شناسی و تعیین درصد کوارتز انجام شده بر روی نمونه خاک‌های ماسه‌ای در جدول (۴-۷) ارایه شده است. مشاهده می‌شود که درصد کانی‌های ساینده (کوارتز) بین ۵ تا ۲۰ درصد تعیین شده است. بنابراین خاک‌های ماسه‌ای مورد مطالعه در زون B در رده‌ی خاک‌های با ساینده‌ی کم تا متوسط قرار دارند. بنابراین در این زون احتمال بروز مشکلات ساینده‌ی ابزار در حد متوسط می‌باشد.

جدول (۴-۷): نتایج آزمایش‌های کانی‌شناسی بر روی خاک‌های ماسه‌ای

| شماره نمونه | موقعیت           | عمق نمونه (متر) | اجزای تشکیل دهنده   | درصد کوارتز |
|-------------|------------------|-----------------|---|-------------|
| S.10        | حوالی ایستگاه ۹  | ۱۵              | خرده کریستال‌های کوارتز، فلدسپار آلکالن و پلاژیوکلاژ در ماتریس سیلتی و رسی                            | ۵-۱۰        |
| S.11        | حوالی ایستگاه ۱۱ | ۱۸              | خرده کریستال‌های زاویه‌دار کوارتز، فلدسپار آلکالن و پلاژیوکلاژ  | ۵-۱۰        |
| S.12        | حوالی ایستگاه ۱۲ | ۱۹              | پلاژیوکلاژ، فلدسپار آلکالن و کوارتز در ماتریس سیلت و رس   | ۱۰-۱۵       |
| S.13        | حوالی ایستگاه ۱۳ | ۲۰              | خرده کریستال‌های پلاژیوکلاژ، کوارتز، آمفیبول، فلدسپار آلکالن و بیوتیت در خمیره سیلتی و رسی            | ۱۰-۱۵       |
| S.14        | حوالی ایستگاه ۱۴ | ۲۰              | خرده کریستال‌های گردشده تا زاویه‌دار پلاژیوکلاژ، کوارتز، فلدسپار آلکالن و ذرات ریز در ابعاد سیلت و رس | ۷           |
| S.15        | حوالی ایستگاه ۱۶ | ۲۲              | خرده کریستال‌های پلاژیوکلاژ، پیروکسن، کوارتز و فلدسپار آلکالن و ذرات ریز در ابعاد سیلت و رس           | ۵-۱۰        |

#### ۴-۵-۶ وجود بولدر و قطعات سنگی در مسیر تونل

با توجه به عدم انجام مطالعات ژئوفیزیکی در مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، اطلاعات کافی از وجود بولدر در این مسیر وجود ندارد و تنها با استفاده از لاگ گمانه‌ها، رخنمون‌های سطحی و برخی ترانشه‌های حفر شده در مسیر و یا اطراف مسیر و نیز بررسی‌های زمین‌شناسی می‌توان به بررسی امکان وجود بولدر در مسیر تونل پرداخت. از این‌رو احتمال وجود بولدر در مسیر تونل در دو زون، پس از بررسی دانه‌بندی و لاگ گمانه‌ها و نیز رخنمون‌ها پیش‌بینی شده است.

در زون A با توجه به نوع دانه‌بندی مسیر در این زون که بیشتر درشت‌دانه می‌باشد و نیز مشاهدات گمانه و ترانشه‌های حفاری شده و نیز قرار گرفتن بیشتر مسیر در این زون در مجاورت

رسوبات رودخانه مهراں رود احتمال وجود بولدر بسیار بالا می‌باشد. نمونه‌ای از مواد حفاری شده در زون A در شکل (۴-۸) نشان داده شده است.



شکل (۴-۸) نمونه‌ای از مواد حفاری شده در زون A

در زون B میزان مواد درشت دانه کمتر از زون A می‌باشد. در این زون مسیر تونل از حاشیه‌ی رود مهراں رود دورتر می‌شود و در رسوبات ریزدانه‌تر قرار می‌گیرد. با توجه به ویژگی‌های بیان شده برای زون B میزان وجود بولدر در این زون کمتر از زون A می‌باشد ولی با این وجود در این زون نیز خطر وجود بولدر وجود دارد.

#### ۴-۵-۷ تورم (آماس) زمین

به منظور مطالعه‌ی تورم‌پذیری خاک‌های ریزدانه مسیر خط ۱ متروی تبریز در این تحقیق با توجه به داده‌های موجود از روش‌های USBR، تجزیه‌ی شیمیایی و روش داکشانمورتی و رامان استفاده شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز برای این روش‌ها، با استفاده از نتایج آزمایش بر روی هفت

نمونه از خاک مسیر تونل (چهار نمونه برای زون A و سه نمونه برای زون B)، به دست آمده است. این پارامترها طبق جدول (۴-۸) می‌باشند.

جدول (۴-۸): پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز برای بررسی تورم‌پذیری خاک [۸۴]

| شماره نمونه | کیلومتر از | زون | حد روانی | نشانه خمیری | حد انقباض | درصد رس | PH  |
|-------------|------------|-----|----------|-------------|-----------|---------|-----|
| S.01        | ۶+۹۸۳      | A   | ۳۲       | ۱۱          | ۱۴        | ۱۶      | ۷.۵ |
| S.02        | ۷+۴۰۰      | A   | ۲۹       | ۱۱          | ۱۲        | ۲۰      | ۷.۴ |
| S.N         | ۷+۸۵۰      | A   | ۲۷       | ۱۲          | ۱۰        | ۲۰      | ۷.۶ |
| S.03        | ۸+۳۵۰      | A   | ۲۷       | ۱۰          | ۱۷        | ۱۴      | ۷.۳ |
| S.04        | ۹+۲۰۰      | B   | ۲۱       | ۷           | ۱۵        | ۱۴      | ۷.۲ |
| S.05        | ۹+۷۵۵      | B   | ۴۲       | ۲۵          | ۱۲        | ۱۳      | ۷.۷ |
| S.06        | ۱۰+۲۵۰     | B   | ۲۸       | ۱۲          | ۱۶        | ۲۰      | ۷.۶ |

میزان تورم‌پذیری خاک‌های مسیر با استفاده از هر سه روش انتخابی بررسی شده و نتایج آن در جدول (۴-۹) ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول (۴-۹) مشخص است که میزان تورم‌پذیری خاک مسیر در حد متوسط و گاهی پایین می‌باشد. با توجه به جدول مذکور ملاحظه می‌شود که میزان تورم‌پذیری در قسمت‌های مرکزی مسیر کمتر از قسمت‌های شرقی و غربی می‌باشد و در هر دو زون احتمال تورم وجود دارد.

جدول (۴-۹): نتایج بررسی تورم‌پذیری خاک‌های مسیر تونل

| شماره نمونه | کیلومتر از | زون | USBR          | تجزیه شیمیایی | داکشانمورتی و رامان |
|-------------|------------|-----|---------------|---------------|---------------------|
| S.01        | ۶+۹۸۳      | A   | متوسط         | متوسط         | متوسط               |
| S.02        | ۷+۴۰۰      | A   | متوسط         | متوسط         | متوسط               |
| S.N         | ۷+۸۵۰      | A   | متوسط         | متوسط         | پایین               |
| S.03        | ۸+۳۵۰      | A   | پایین         | پایین         | پایین               |
| S.04        | ۹+۲۰۰      | B   | پایین         | پایین         | پایین               |
| S.05        | ۹+۷۵۵      | B   | متوسط تا بالا | بالا          | متوسط               |
| S.06        | ۱۰+۲۵۰     | B   | متوسط         | متوسط         | پایین               |

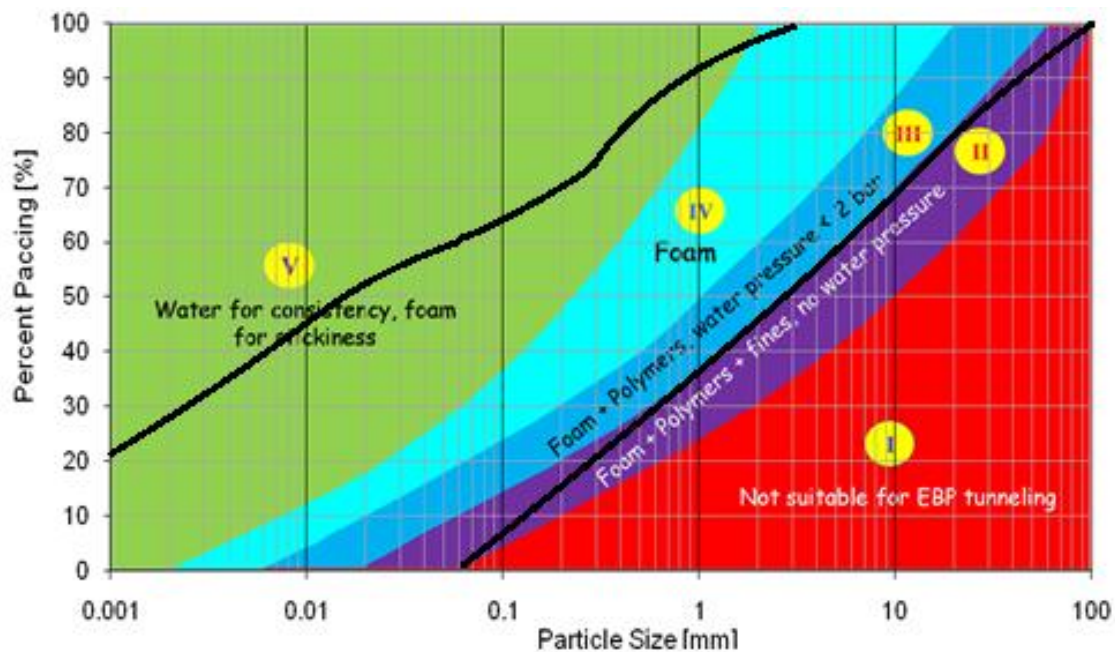
#### ۴-۵-۸ فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل

با بررسی نتایج دانه‌بندی خاک‌های موجود در عمق متناظر با تونل که در شکل (۵-۵) ارایه شده است و نیز مراجعه به جدول (۴-۱) مشخص شد که در بیشتر نقاط زون A درصد مواد ریزدانه کمتر از ۲۰ درصد بوده و با توجه به نمودار شکل (۳-۹)، زون A در محدوده (II) از رده‌بندی توز قرار دارد. بنابراین برای حفاری نیاز به اصلاح خاک و افزودن فوم، پلیمر و مواد ریزدانه مانند بنتونیت می‌باشد.

بررسی دانه‌بندی مسیر تونل در زون B با استفاده از شکل (۴-۵) و نمودار (۳-۹) نیز نشان داد که در طول مسیر تونل در این زون، درصد مواد دانه‌ریز بیشتر از ۲۰ درصد بوده و تنها در انتهای مسیر (کیلومتر ۱۲ به بعد) درصد مواد ریزدانه مقداری کمتر از ۲۰ درصد است و طبق نمودار شکل (۳-۹) زون B در محدوده‌های II، III و IV قرار دارد. بنابراین در این زون نیز اصلاح خاک با فوم، پلیمر و بنتونیت نیاز است.



در شکل (۹-۴) گستره دانه‌بندی خاک مسیر تونل بر روی نمودار ارزیابی شده توسط توزیع فیت شده است. از شکل (۹-۴) مشخص است که دانه‌بندی مسیر تونل در گستره گروه‌های دانه‌بندی V، IV و III قرار دارد.



شکل (۹-۴) گستره‌ی دانه‌بندی خاک مسیر تونل

#### ۹-۵-۴ پتانسیل روانگرایی مسیر تونل

با توجه به اینکه روانگرایی تنها در مصالح اشباع یا بسیار نزدیک به اشباع به وقوع می‌پیوندد، پتانسیل روانگرایی مسیر تونل خط ۱ متری تبریز، تنها در مناطقی که اشباع از آب و یا هم‌تراز با آب زیرزمینی است مورد بررسی قرار گرفته است. نکته دیگر در بررسی پتانسیل روانگرایی، عمق نهشته دارای پتانسیل روانگرایی و نیز عمق سازه می‌باشد زیرا مقاومت زمین در برابر روانگرایی عموماً با عمق افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالب گفته شده و جدول (۳-۱۰)، در ادامه روانگرایی مسیر تونل با توجه به تراز آب زیرزمینی در این مسیر بررسی شده است. البته لازم به ذکر است که بررسی تراز آب زیرزمینی تنها

نقاط دارای احتمال روانگرایی بسیار کم را مشخص می‌کند و برای بررسی نقاط دیگر با عمق آب زیرزمینی کم بایستی سایر پارامترهای موثر در وقوع روانگرایی نیز بررسی شود. در جدول (۴-۱۰) تراز آب زیرزمینی و عمق تونل در ایستگاه‌های مسیر تونل آرایه شده است. در جدول مذکور استعداد روانگرایی خاک مسیر تنها بر اساس سطح آب زیرزمینی بیان شده است.

جدول (۴-۱۰): عمق تراز آب زیرزمینی و عمق تونل مسیر تونل در ایستگاه‌های مختلف

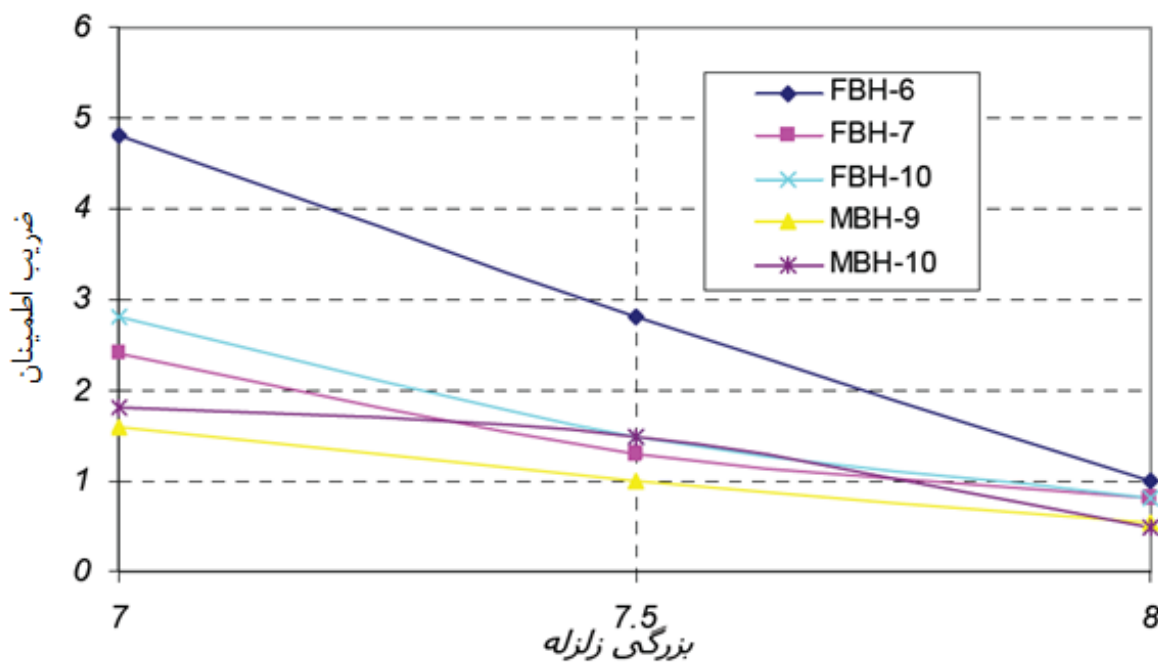
| ایستگاه | کیلومترژ | زون | عمق کف تونل (متر) | عمق آب زیرزمینی (متر) | استعداد روانگرایی |
|---------|----------|-----|-------------------|-----------------------|-------------------|
| ۷       | ۶+۵۵۰    | A   | ۱۲/۳۳             | ۲۲/۵                  | بسیار کم          |
| ۸       | ۷+۳۸۰    | A   | ۱۹/۴۰             | ۲۰/۹                  | بسیار کم          |
| ۹       | ۸+۲۰۰    | A   | ۱۹/۱              | ۱۶                    | بسیار کم          |
| ۱۰      | ۸+۸۹۰    | A   | ۱۸/۳۴             | ۱۵                    | کم                |
| ۱۱      | ۹+۶۴۰    | B   | ۲۱/۴              | ۱۰                    | کم تا متوسط       |
| ۱۲      | ۱۰+۳۶۰   | B   | ۲۳/۹              | ۹/۳                   | متوسط             |
| ۱۳      | ۱۱+۳۲۰   | B   | ۲۰/۲              | ۵/۳                   | بالا              |
| ۱۴      | ۱۲+۴۹۰   | B   | ۲۱/۳              | ۸/۵                   | متوسط             |
| ۱۵      | ۱۳+۵۴۰   | B   | ۲۱/۱              | ۸/۲                   | متوسط             |
| ۱۶      | ۱۴+۷۶۰   | B   | ۱۶/۹              | ۹                     | متوسط             |

با توجه به سطح آب زیرزمینی (جدول (۴-۱۰))، در زون A احتمال وقوع پتانسیل روانگرایی بسیار کم است. نتایج بررسی روانگرایی زون B با معیار چینی و معیار سید در جدول (۴-۱۱) آورده شده است. با توجه به جدول (۴-۱۱) نتایج دو معیار چینی و سید متناقض با یکدیگر می‌باشند.

جدول (۴-۱۱): بررسی روانگرایی زون B

| موقعیت نقطه (km) | LL | درصد ریزدانه | میزان رطوبت | PI | معیار چینی   | معیار سید            |
|------------------|----|--------------|-------------|----|--------------|----------------------|
| ۹+۲۰۰            | ۲۱ | ۱۸           | ۱۳.۸        | ۷  | روانگرا نیست | مستعد روانگرایی است  |
| ۹+۷۵۵            | ۴۲ | ۱۳           | ۳۸          | ۲۵ | روانگرا است  | مستعد روانگرایی نیست |
| ۱۰+۲۵۰           | ۲۸ | ۳۰           | ۱۸          | ۱۲ | روانگرا نیست | مستعد روانگرایی است  |

نتایج بررسی‌های سازمان قطار شهری تبریز برای بررسی روانگرایی مسیر تونل در شکل (۴-۱۰) ارائه شده است. در این شکل ضریب اطمینان برابر نسبت تنش برشی مقاوم در برابر روانگرایی (نسبت مقاومت سیکلی) به تنش برشی ایجاد شده در اثر زلزله (تنش سیکلی) می‌باشد.



شکل (۴-۱۰) ضریب اطمینان روانگرایی برای برخی از گمانه‌های مسیر تونل [۸۴]

با توجه به شکل (۴-۱۰) مشخص است که در زلزله‌های کمتر از ۷/۵ درجه، احتمال روانگرایی در مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز وجود ندارد. در زلزله‌های با بزرگی بیش از ۷/۵ درجه، مواردی از روانگرایی مشاهده می‌شود.

## ۴-۶ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا پروژه تونل خط ۱ متروی تبریز معرفی شده و شرایط زمین‌شناسی و موقعیت تونل بیان شده است. روش حفاری تونل و نیز نتایج بررسی‌ها و آزمون‌های ژئوتکنیکی به صورت مختصر بیان شده است. طبق نتایج مطالعات ژئوتکنیکی، دانه‌بندی مسیر تونل بیشتر شامل ماسه لای‌دار به همراه قلوه‌سنگ (SM) می‌باشد و رده سفتی آن نیز در بیشتر مسیر سفت تا خیلی سفت می‌باشد. در انتهای فصل نیز مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی موجود در مسیر تونل معرفی شده و احتمال وقوع هرکدام از آنها نیز با استفاده از روش‌های ساده تجربی بررسی شده است. این مخاطرات شامل نشست زمین، تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی، جبهه‌کار مختلط، انسداد کاترهد و گل‌گرفتگی ابزار برش، سایندگی زمین، وجود بولدر و قطعات سنگی بزرگ، تورم زمین، فقدان مصالح ریزدانه و روانگرایی می‌باشند. از بین این مخاطرات نشست سطح زمین، سایندگی و وجود بولدر دارای احتمال وقوع بسیار زیاد می‌باشند، جبهه‌کار مختلط، فقدان مصالح ریزدانه و مشکلات نفوذپذیری و آب زیرزمینی دارای احتمال وقوع متوسط تا زیاد می‌باشند و تورم زمین، گل‌گرفتگی ابزار و روانگرایی خاک دارای احتمال وقوع کم می‌باشند. توجه به نتایج بررسی‌ها احتمال وقوع تمام این مخاطرات در مسیر تونل متروی خط ۱ تبریز وجود دارد. لذا در فرآیند رتبه‌بندی ریسک باید تمامی مخاطرات ذکر شده لحاظ شود.

## **فصل ۵: رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی**

### **مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز**

## ۵-۱ مقدمه

به منظور تعیین ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، این مخاطرات در مسیر تونل مذکور شناسایی شده است. پس از بررسی مسیر تونل مطابق مطالب ارائه شده در فصل پنجم، تعداد ۹ مخاطره به عنوان مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مسیر این تونل انتخاب شد. این مخاطرات شامل (R1): جبهه‌کار مختلط، (R2): وجود بولدر و قطعه‌سنگ در مسیر تونل، (R3): نشست سطح زمین، (R4): تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی، (R5): انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش، (R6): ساینده‌گی زمین، (R7): آماس زمین، (R8): فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل و (R9): روانگرایی خاک می‌باشند. در این فصل به منظور استفاده از تجارب و نظرات کارشناسان و افراد با تجربه در زمینه‌ی حفاری مکانیزه تونل، اقدام به طراحی پرسش‌نامه شد. در این پرسش‌نامه با توجه به نظر کارشناسان تونلسازی سازمان قطار شهری تبریز مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر بر اساس چهار معیار (C1): احتمال وقوع ریسک، (C2): میزان تاثیر ریسک بر هزینه، (C3): توانایی سازمان در واکنش به ریسک و (C4): میزان اطمینان از تخمین برای هر دو زون A و B به صورت جداگانه بررسی شده‌اند. در ادامه این فصل رتبه‌بندی ریسک این مخاطرات با استفاده از نتایج این پرسش‌نامه‌ها ارائه شده است.

## ۵-۲ رتبه‌بندی مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز

میانگین نتایج پرسش‌نامه‌های پر شده توسط ۱۱ کارشناس تونلسازی مکانیزه مرتبط با پروژه تونل خط ۱ متروی تبریز در جدول (۵-۱) برای زون A و در جدول (۵-۲) برای زون B آورده شده است. پرسش‌نامه‌های پر شده توسط کارشناسان در قسمت پیوست این تحقیق ارائه شده است. تیم کارشناسی شامل سه کارشناس بخش ژئوتکنیک شرکت مشاور گنو، سه کارشناس دفتر فنی سازمان مرکزی متروی تبریز، دو کارشناس بخش ژئوتکنیک شرکت مشاور ایمن‌سازان تبریز، دو کارشناس

ژئوتکنیک شرکت پیمانکار الموت و همچنین مدیر بخش تونل‌های عمیق خط ۱ متروی تبریز بوده است. میانگین این نتایج با استفاده از روش میانگین ساده به دست آمده است. در ادامه این بخش رتبه‌بندی ریسک‌ها با استفاده از روش کلاسیک (احتمال وقوع  $\times$  میزان تاثیر) و همچنین دو روش رتبه‌بندی ریسک چندمعیاره شامل روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل (TOPSIS) انجام شده است.

جدول (۵-۱): میانگین نتایج پرسش‌نامه برای زون A

| اطمینان از تخمین (C4) | توانایی واکنش به ریسک (C3) | میزان تاثیر ریسک (C2) | احتمال وقوع (C1) | مخاطره ژئوتکنیکی                           |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|--|
| ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد                       | ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد             | جبهه کار مختلط (R1)                        |
| ۷۰٪-۹۰٪               | متوسط                      | ۷۰٪-۹۰٪               | خیلی زیاد        | وجود بولدر در مسیر تونل (R2)               |
| ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد                       | ۷۰٪-۹۰٪               | متوسط            | نشست سطح زمین (R3)                         |
| ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد                       | ۳۰٪-۵۰٪               | زیاد             | تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی (R4)   |
| ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد                       | ۵۰٪-۷۰٪               | متوسط            | انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش (R5) |
| ۷۰٪-۹۰٪               | متوسط                      | ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد             | سایندگی زمین (R6)                          |
| ۵۰٪-۷۰٪               | متوسط                      | ۳۰٪-۵۰٪               | کم               | بروز پدیده آماس زمین (R7)                  |
| ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد                       | ۳۰٪-۵۰٪               | متوسط            | فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل (R8)      |
| ۵۰٪-۷۰٪               | متوسط                      | ۵۰٪-۷۰٪               | متوسط            | پتانسیل روانگرایی خاک (R9)                 |

جدول (۵-۲): میانگین نتایج پرسش‌نامه برای زون B

| اطمینان از تخمین (C4) | توانایی واکنش به ریسک (C3) | میزان تاثیر ریسک (C2) | احتمال وقوع (C1) | مخاطره ژئوتکنیکی                           |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|--|
| ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد                       | ۵۰٪-۷۰٪               | متوسط            | جبهه کار مختلط (R1)                        |
| ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد                       | ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد             | وجود بولدر در مسیر تونل (R2)               |
| ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد                       | ۷۰٪-۹۰٪               | متوسط            | نشست سطح زمین (R3)                         |
| ۷۰٪-۹۰٪               | متوسط                      | ۳۰٪-۵۰٪               | زیاد             | تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی (R4)   |
| ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد                       | ۳۰٪-۵۰٪               | متوسط            | انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش (R5) |
| ۵۰٪-۷۰٪               | متوسط                      | ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد             | سایندگی زمین (R6)                          |
| ۵۰٪-۷۰٪               | متوسط                      | ۱۰٪-۳۰٪               | متوسط            | بروز پدیده آماس زمین (R7)                  |
| ۷۰٪-۹۰٪               | زیاد                       | ۳۰٪-۵۰٪               | کم               | فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل (R8)      |
| ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد                       | ۵۰٪-۷۰٪               | زیاد             | پتانسیل روانگرایی خاک (R9)                 |

در جدول (۳-۵) نیز به منظور کمی‌سازی داده‌های کیفی آرایه شده در پرسش‌نامه و جداول (۱-۵) و (۲-۵)، اعداد معادل گزینه‌های کیفی و بازه‌ای آورده شده است.

جدول (۳-۵): پارامترهای کمی معادل داده‌های کیفی

| پارامتر کیفی         | پارامتر معادل کمی | پارامتر بازه‌ای | پارامتر کمی معادل |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| خیلی کم (۰-۲۰٪)      | ۱                 | کمتر از ۱۰٪     | ۵                 |
| کم (۲۰٪-۴۰٪)         | ۳                 | ۱۰٪-۳۰٪         | ۲۰                |
| متوسط (۴۰٪-۶۰٪)      | ۵                 | ۳۰٪-۵۰٪         | ۴۰                |
| زیاد (۶۰٪-۸۰٪)       | ۷                 | ۵۰٪-۷۰٪         | ۶۰                |
| خیلی زیاد (۸۰٪-۱۰۰٪) | ۹                 | ۷۰٪-۹۰٪         | ۸۰                |
| -                    | -                 | بیش از ۹۰٪      | ۹۵                |

### ۵-۲-۱ رتبه‌بندی مخاطرات ژئوتکنیکی خط ۱ متروی تبریز با روش کلاسیک

رتبه‌بندی ریسک به روش کلاسیک یکی از ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین روش‌های اولویت‌بندی ریسک می‌باشد. این روش به رغم سادگی دارای دقت پایینی در اولویت‌بندی و رتبه‌بندی ریسک می‌باشد. طبق تعریف ریسک می‌توان گفت که (میزان تاثیر  $\times$  احتمال وقوع = ریسک).

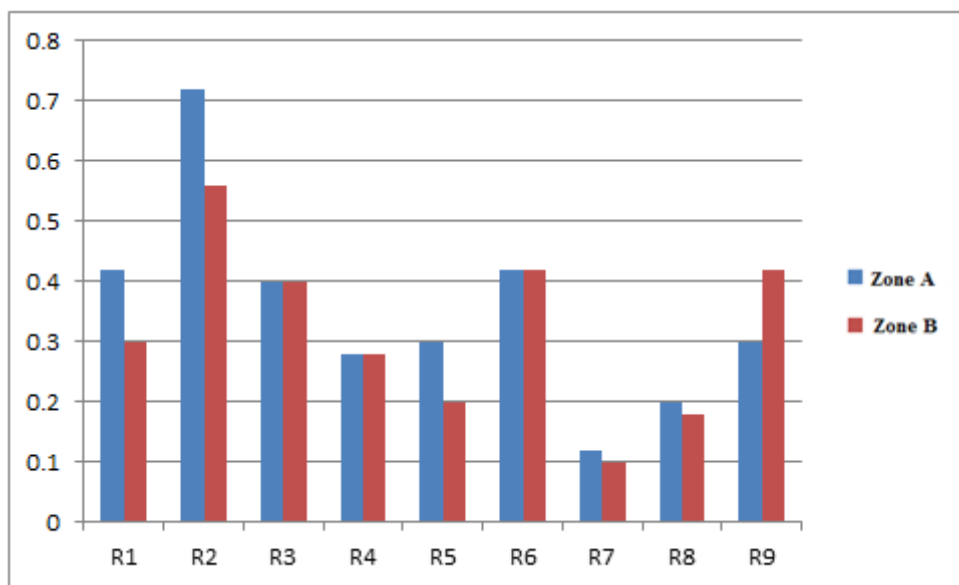
به منظور رده‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز با استفاده از تعریف ریسک، ابتدا احتمال وقوع و میزان تاثیر هر کدام از ریسک‌ها بر هزینه با استفاده از میانگین نظرات کارشناسان به دست آمد. پس از انجام محاسبات، میزان ریسک هر کدام از مخاطرات برای زون A و زون B در جدول (۴-۵) آورده شده است.

با توجه به نتایج جدول (۴-۵) مخاطرات ژئوتکنیکی با استفاده از تعریف ریسک در زون A به صورت  $(R2 > R1 = R6 > R3 > R5 = R9 > R4 > R8 > R7)$  رده‌بندی شده‌اند. در زون B نیز این مخاطرات به صورت  $(R2 > R6 = R9 > R3 > R1 > R4 > R5 > R8 > R7)$  رده‌بندی شده‌اند. در نمودار شکل (۱-۵) نیز میزان ریسک این مخاطرات به صورت نمودار ستونی در دو زون نشان داده شده است.



جدول (۴-۵): میزان ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی به دست آمده طبق تعریف ریسک

| شماره مخاطره | زون A            |                  |      | زون B            |                  |      |
|--------------|------------------|------------------|------|------------------|------------------|------|
|              | احتمال وقوع (C1) | میزان تاثیر (C2) | ریسک | احتمال وقوع (C1) | میزان تاثیر (C2) | ریسک |
| R1           | ۷۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۴۲ | ۵۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۳۰ |
| R2           | ۹۰٪              | ۸۰٪              | ۰/۷۲ | ۷۰٪              | ۸۰٪              | ۰/۵۶ |
| R3           | ۵۰٪              | ۸۰٪              | ۰/۴۰ | ۵۰٪              | ۸۰٪              | ۰/۴۰ |
| R4           | ۷۰٪              | ۴۰٪              | ۰/۲۸ | ۷۰٪              | ۴۰٪              | ۰/۲۸ |
| R5           | ۵۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۳۰ | ۵۰٪              | ۴۰٪              | ۰/۲۰ |
| R6           | ۷۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۴۲ | ۷۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۴۲ |
| R7           | ۳۰٪              | ۴۰٪              | ۰/۱۲ | ۵۰٪              | ۲۰٪              | ۰/۱۰ |
| R8           | ۵۰٪              | ۴۰٪              | ۰/۲۰ | ۳۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۱۸ |
| R9           | ۵۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۳۰ | ۷۰٪              | ۶۰٪              | ۰/۴۲ |



شکل (۵-۱) نمودار ستونی میزان ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز

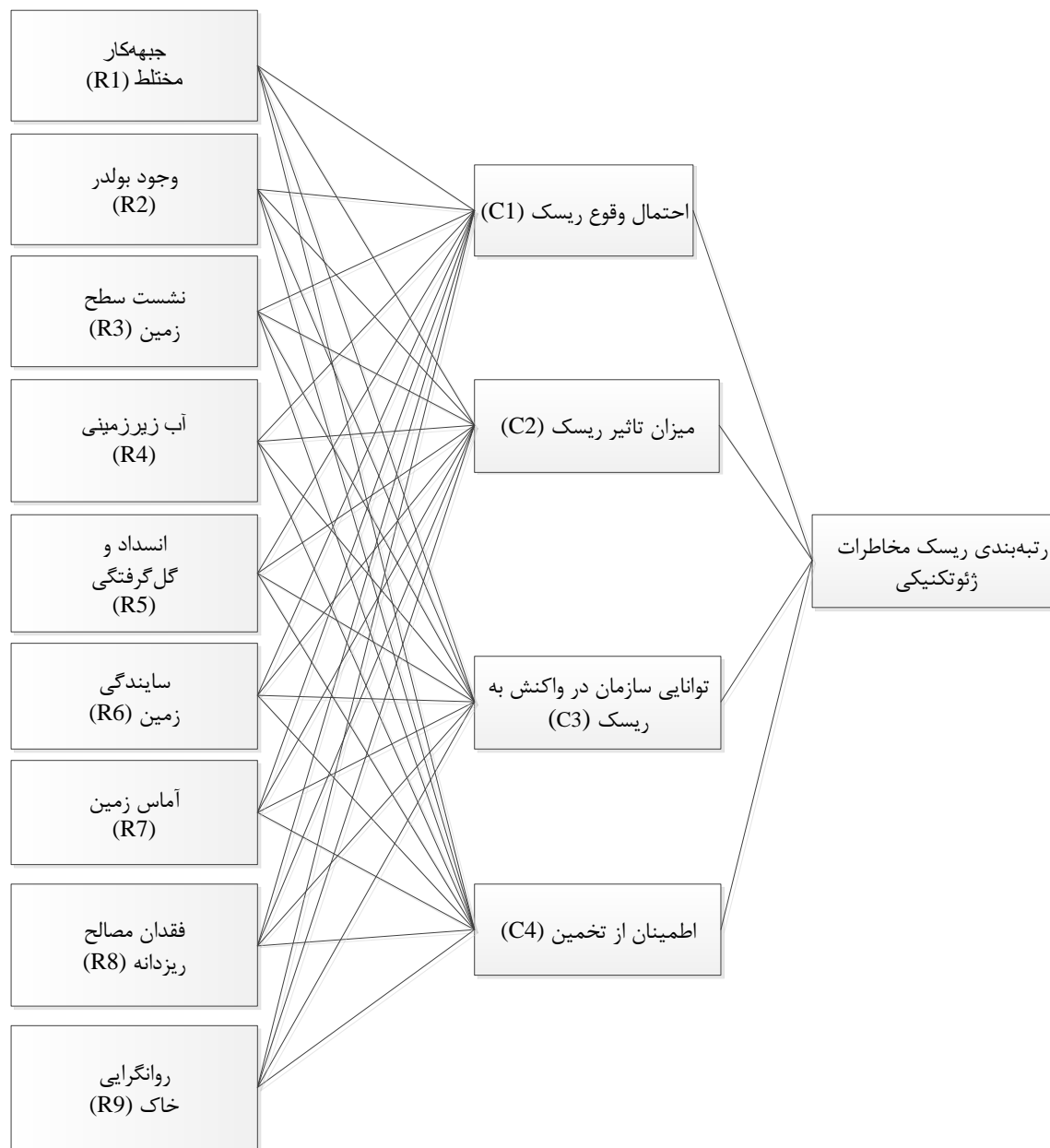
## ۵-۲-۲ رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی تونل خط ۱ متروی تبریز با

### استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

به منظور رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی تونل خط ۱ متروی تبریز با

استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، ابتدا نمودار سلسله مراتبی به صورت شکل (۵-۲) رسم شده

است. این نمودار در واقع نشان دهنده‌ی استراتژی تصمیم‌گیری به صورت گرافیکی است.



شکل (۵-۲) نمودار سلسله مراتبی رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی تونل متروی تبریز

در این تحقیق وزن معیارهای مختلف مطابق کار آقای نظارت در نظر گرفته شده است، یعنی برای معیارهای C<sub>1</sub>، C<sub>2</sub>، C<sub>3</sub> و C<sub>4</sub> به ترتیب وزن‌های ۰/۱۴۳، ۰/۴۲۸، ۰/۱۴۳ و ۰/۲۸۶ مورد استفاده قرار گرفته است [۴۲].

در این رتبه‌بندی، معیارهای احتمال وقوع ریسک (C<sub>1</sub>)، میزان تاثیر ریسک (C<sub>2</sub>) و اطمینان تخمین (C<sub>4</sub>) با رتبه‌ی ریسک رابطه مستقیم دارند و معیار توانایی سازمان در واکنش به ریسک (C<sub>3</sub>) با رتبه‌ی ریسک رابطه عکس دارد. یعنی با افزایش سه معیار C<sub>1</sub>، C<sub>2</sub> و C<sub>4</sub> رتبه‌ی ریسک افزایش می‌یابد، ولی با افزایش معیار C<sub>3</sub> رتبه‌ی ریسک کاهش می‌یابد. با توجه به این مطلب و پس از تحلیل و بررسی جداول (۱-۵) تا (۳-۵)، نتایج پرسش‌نامه‌ها به صورت کمی و همچنین وزن هرکدام از مخاطرات نسبت به معیارهای مختلف در جداول (۵-۵) و (۶-۵) آورده شده است.

جدول (۵-۵): نتایج کمی پرسش‌نامه‌های زون A و وزن مخاطرات نسبت به هرکدام از معیارها

| C4    |              | C3     |              | C2     |              | C1    |              | مخاطره<br>ژئوتکنیک |
|-------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| وزن   | نتیجه<br>کمی | وزن    | نتیجه<br>کمی | وزن    | نتیجه<br>کمی | وزن   | نتیجه<br>کمی |                    |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۰۸۶  | ۳            | ۰/۱۱۵  | ۶۰           | ۰/۱۳۲ | ۷            | R1                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۱۴۲۵ | ۵            | ۰/۱۵۴۵ | ۸۰           | ۰/۱۷۰ | ۹            | R2                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۰۸۶  | ۳            | ۰/۱۵۴۵ | ۸۰           | ۰/۰۹۴ | ۵            | R3                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۰۸۶  | ۳            | ۰/۰۷۷  | ۴۰           | ۰/۱۳۲ | ۷            | R4                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۰۸۶  | ۳            | ۰/۱۱۵  | ۶۰           | ۰/۰۹۴ | ۵            | R5                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۱۴۲۵ | ۵            | ۰/۱۱۵  | ۶۰           | ۰/۱۳۲ | ۷            | R6                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۱۴۲۵ | ۵            | ۰/۰۷۷  | ۴۰           | ۰/۰۵۸ | ۳            | R7                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۰۸۶  | ۳            | ۰/۰۷۷  | ۴۰           | ۰/۰۹۴ | ۵            | R8                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۱۴۲۵ | ۵            | ۰/۱۱۵  | ۶۰           | ۰/۰۹۴ | ۵            | R9                 |

جدول (۵-۶): نتایج کمی پرسش‌نامه‌های زون B و وزن مخاطرات نسبت به هرکدام از معیارها

| C4    |              | C3    |              | C2    |              | C1    |              | مخاطره<br>ژئوتکنیک |
|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|--------------------|
| وزن   | نتیجه<br>کمی | وزن   | نتیجه<br>کمی | وزن   | نتیجه<br>کمی | وزن   | نتیجه<br>کمی |                    |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۰۹۱ | ۳            | ۰/۱۲۵ | ۶۰           | ۰/۰۹۸ | ۵            | R1                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۰۹۱ | ۳            | ۰/۱۶۷ | ۸۰           | ۰/۱۳۷ | ۷            | R2                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۰۹۱ | ۳            | ۰/۱۶۷ | ۸۰           | ۰/۰۹۸ | ۵            | R3                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۱۵۱ | ۵            | ۰/۰۸۳ | ۴۰           | ۰/۱۳۷ | ۷            | R4                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۰۹۱ | ۳            | ۰/۰۸۳ | ۴۰           | ۰/۰۹۸ | ۵            | R5                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۱۵۱ | ۵            | ۰/۱۲۵ | ۶۰           | ۰/۱۳۷ | ۷            | R6                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۱۵۱ | ۵            | ۰/۰۴۲ | ۲۰           | ۰/۰۹۸ | ۵            | R7                 |
| ۰/۱۲۵ | ۸۰           | ۰/۰۹۱ | ۳            | ۰/۰۸۳ | ۴۰           | ۰/۰۶۰ | ۳            | R8                 |
| ۰/۰۹۴ | ۶۰           | ۰/۰۹۱ | ۳            | ۰/۱۲۵ | ۶۰           | ۰/۱۳۷ | ۷            | R9                 |

به منظور رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، در قسمت (الف)

ریسک‌های زون A بررسی شده است. در قسمت (ب) نیز رتبه‌بندی ریسک زون B انجام شده است.

#### الف) رتبه‌بندی ریسک زون A

با توجه به مقدار وزن معیارها و جدول (۵-۵)، حاصلضرب نتایج وزن‌دار هرکدام از مخاطرات در

معیارهای مختلف و نیز رده‌ی ریسک هرکدام از این مخاطرات در جدول (۷-۵) ارزیابی شده است. با

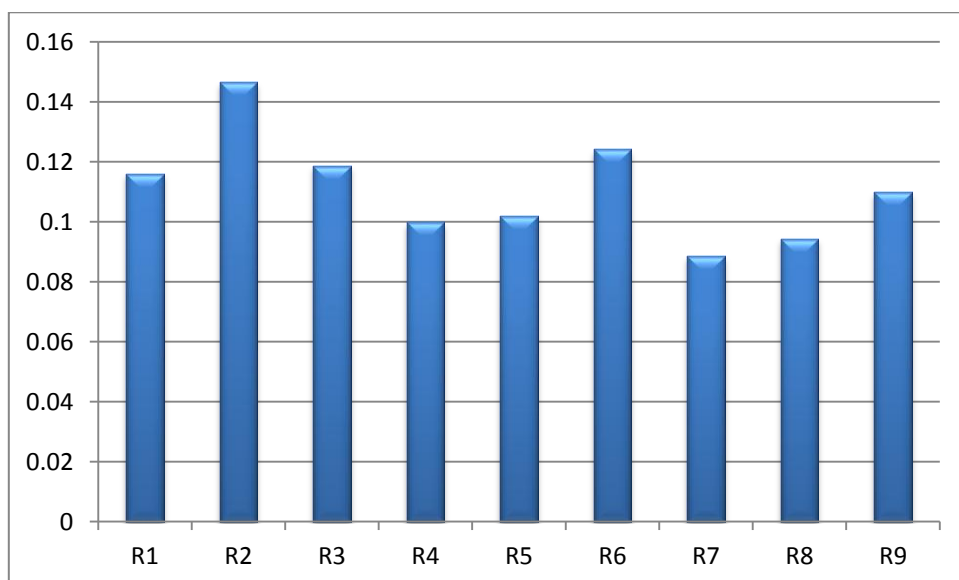
توجه به نتایج جدول (۷-۵) مخاطرات ژئوتکنیکی با استفاده از روش AHP در زون A به صورت

$(R2 > R6 > R3 > R1 > R9 > R5 > R4 > R8 > R7)$  رده‌بندی شده‌اند. در شکل (۴-۵) رده‌ی ریسک

مخاطرات ژئوتکنیکی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

جدول (۵-۷): نتایج وزن دار و رده‌ی ریسک مخاطرات زون A نسبت به معیارهای مختلف

| مخاطره | C1    | C2    | C3    | C4    | رده‌ی ریسک |
|--------|-------|-------|-------|-------|------------|
| R1     | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۱۶۱     |
| R2     | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۶۶ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۴۶۶     |
| R3     | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۶۶ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۱۸۷     |
| R4     | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۹۹۹     |
| R5     | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۰۱۸     |
| R6     | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۲۴۲     |
| R7     | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۸۸۵     |
| R8     | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۹۴۴     |
| R9     | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۰۹۹     |



شکل (۵-۳) شکل شماتیک رده‌ی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون A

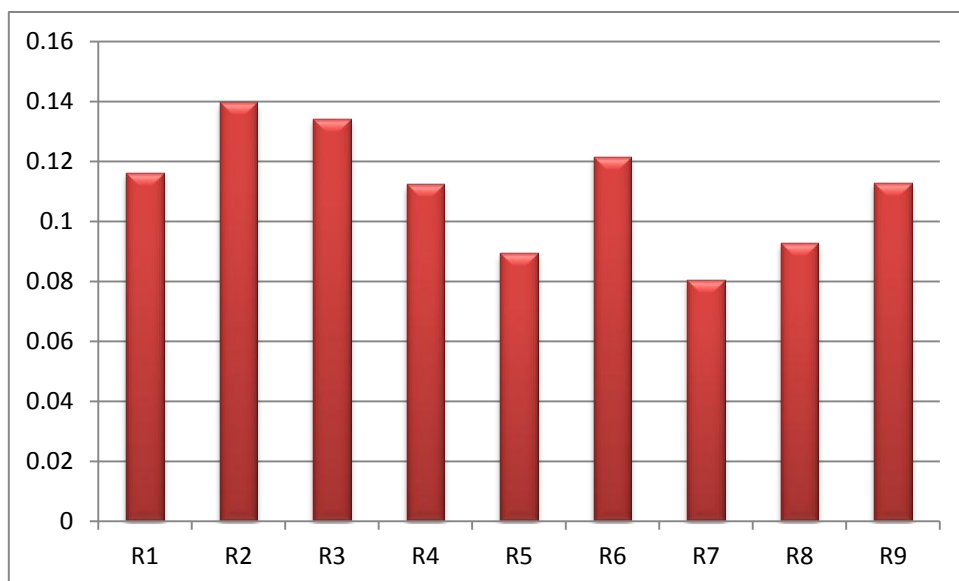
### ب) رتبه‌بندی ریسک زون B

با توجه به مقدار وزن معیارها و جدول (۵-۶)، حاصلضرب نتایج وزن دار هرکدام از مخاطرات در معیارهای مختلف و نیز رده‌ی ریسک هرکدام از این مخاطرات در جدول (۵-۸) ارزیابی شده است. با توجه به نتایج جدول (۵-۸) مخاطرات ژئوتکنیکی با استفاده از روش AHP در زون B به صورت

(R2>R3>R6>R1>R9>R4>R8>R5>R7) رده‌بندی شده‌اند. در شکل (۵-۵) رده‌ی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

جدول (۵-۸): نتایج وزن‌دار و رده‌ی ریسک مخاطرات زون B نسبت به معیارهای مختلف

| مخاطره | C1    | C2    | C3    | C4    | رده‌ی ریسک |
|--------|-------|-------|-------|-------|------------|
| R1     | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۱۶۳     |
| R2     | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۷۱ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۳۹۸     |
| R3     | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۷۱ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۳۴۳     |
| R4     | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱۱۲۵     |
| R5     | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۸۹۴     |
| R6     | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۲۱۶     |
| R7     | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۸۰۵     |
| R8     | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۹۲۹     |
| R9     | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۱۳۰     |



شکل (۵-۴) شکل شماتیک رده‌ی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون B

## ۵-۲-۳ رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی تونل خط ۱ متروی تبریز با

### استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS)

به منظور رتبه‌بندی ریسک با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل، به جای گزینه‌ها از ریسک‌های مختلف و به جای شاخص‌های تصمیم‌گیری از شاخص‌های ارزیابی ریسک (احتمال وقوع، میزان تاثیر، توانایی‌سازمان در واکنش به ریسک و اطمینان تخمین) استفاده شده است. در ادامه آن نیز ریسک‌های زون A و زون B با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل رتبه‌بندی شده‌اند.

### I. رتبه‌بندی ریسک‌های زون A با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل

به منظور رتبه‌بندی ریسک زون A و تشکیل ماتریس بدون مقیاس برای این زون، جدول (۵-۱) با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱) بی‌مقیاس شده و در جدول (۵-۹) آورده شده است.

جدول (۵-۹): ماتریس بدون مقیاس زون A برای حل با روش TOPSIS

| C4    | C3    | C2    | C1    | مخاطره ژئوتکنیک |
|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| ۰/۳۷۱ | ۰/۳۷۷ | ۰/۳۳۵ | ۰/۳۸۱ | R1              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۲۶۹ | ۰/۴۴۷ | ۰/۴۹  | R2              |
| ۰/۲۷۶ | ۰/۳۷۷ | ۰/۴۴۷ | ۰/۲۷۲ | R3              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۳۷۷ | ۰/۲۲۴ | ۰/۳۸۱ | R4              |
| ۰/۲۷۶ | ۰/۳۷۷ | ۰/۳۳۵ | ۰/۲۷۲ | R5              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۲۶۹ | ۰/۳۳۵ | ۰/۳۸۱ | R6              |
| ۰/۲۷۶ | ۰/۲۶۹ | ۰/۲۲۴ | ۰/۱۶۳ | R7              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۳۷۷ | ۰/۲۲۴ | ۰/۲۷۲ | R8              |
| ۰/۲۷۶ | ۰/۲۶۹ | ۰/۳۳۵ | ۰/۲۷۲ | R9              |

در مرحله بعد به منظور تعیین ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار، ماتریس جدول (۵-۹) در وزن معیارهای موجود ضرب شده است. ماتریس تصمیم بدون مقیاس وزن‌دار زون A در جدول (۵-۱۰) آورده شده است.

جدول (۵-۱۰): ماتریس بدون مقیاس وزن دار وزن A برای حل با روش TOPSIS

| مخاطره ژئوتکنیک | C1    | C2    | C3    | C4    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| R1              | ۰/۰۵۵ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۵۴ | ۰/۱۰۶ |
| R2              | ۰/۰۰۷ | ۰/۱۹۱ | ۰/۰۳۸ | ۰/۱۰۶ |
| R3              | ۰/۰۳۹ | ۰/۱۹۱ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۰۸ |
| R4              | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۹۶ | ۰/۰۵۴ | ۰/۱۰۶ |
| R5              | ۰/۰۳۹ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۰۸ |
| R6              | ۰/۰۵۵ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۳۸ | ۰/۱۰۶ |
| R7              | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۹۶ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۰۸ |
| R8              | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۹۶ | ۰/۰۵۴ | ۰/۱۰۶ |
| R9              | ۰/۰۳۹ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۰۸ |

فاصله از حل ایده آل و ضد ایده آل و شاخص شباهت برای گزینه های مختلف با استفاده از روابط (۲-۴) تا (۲-۶) محاسبه شده و به صورت جدول (۵-۱۱) ارائه شده است. در محاسبه حل ایده آل و حل ضد ایده آل معیارهای C1، C2 و C4 مثبت و معیار C3 منفی در نظر گرفته شده است.

$$A^+ = \{0.070, 0.191, 0.038, 0.106\} \quad \text{حل ایده آل } (A^+)$$

$$A^- = \{0.023, 0.096, 0.054, 0.080\} \quad \text{حل ضد ایده آل } (A^-)$$

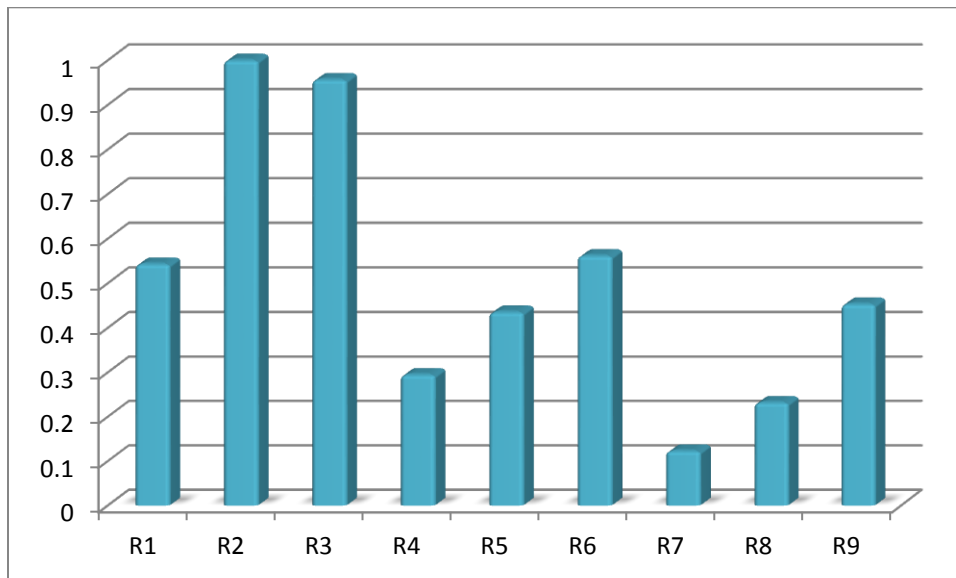
جدول (۵-۱۱): فاصله از حل ایده آل و ضد ایده آل و شاخص شباهت برای وزن A

| R9    | R8    | R7    | R6    | R5    | R4    | R3    | R2    | R1    | مخاطره                 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| ۰/۰۶۴ | ۰/۱۰۲ | ۰/۱۱  | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۶۵ | ۰/۰۹۸ | ۰/۰۴۴ | ۰     | ۰/۰۵۳ | فاصله از حل ایده آل    |
| ۰/۰۵۳ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۶۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۴۱ | ۰/۹۷  | ۰/۱۱۱ | ۰/۰۶۳ | فاصله از حل ضد ایده آل |
| ۰/۴۵۳ | ۰/۲۳۲ | ۰/۱۲۳ | ۰/۵۶۲ | ۰/۴۳۵ | ۰/۲۹۵ | ۰/۹۵۷ | ۱     | ۰/۵۴۳ | شاخص شباهت             |

با توجه به مقادیر شاخص شباهت به دست آمده در جدول (۵-۱۱)، نتایج رتبه بندی ریسک ها با روش شباهت به گزینه ایده آل برای وزن A به صورت (R2>R3>R6>R1>R9>R5>R4>R8>R7)



می‌باشد. نتایج بررسی و رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون A با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل به صورت شماتیک در شکل (۵-۶) نشان داده شده است.



شکل (۵-۵) نتایج رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون A با استفاده از روش TOPSIS

## (II) رتبه‌بندی ریسک‌های زون B با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل

به منظور رتبه‌بندی ریسک زون B و تشکیل ماتریس بدون مقیاس برای این زون، جدول (۵-۲) با

استفاده از رابطه‌ی (۱-۲) بی‌مقیاس شده و در جدول (۵-۱۲) آورده شده است.

جدول (۵-۱۲): ماتریس بدون مقیاس زون B برای حل با روش TOPSIS

| C4    | C3    | C2    | C1    | مخاطره ژئوتکنیک |
|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| ۰/۳۷۱ | ۰/۳۶۴ | ۰/۳۵۴ | ۰/۲۸۶ | R1              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۳۶۴ | ۰/۴۷۱ | ۰/۴۰۱ | R2              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۳۶۴ | ۰/۴۷۱ | ۰/۲۸۶ | R3              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۲۶  | ۰/۲۳۶ | ۰/۴۰۱ | R4              |
| ۰/۲۷۹ | ۰/۳۶۴ | ۰/۲۳۶ | ۰/۲۸۶ | R5              |
| ۰/۲۷۹ | ۰/۲۶  | ۰/۳۵۴ | ۰/۴۰۱ | R6              |
| ۰/۲۷۹ | ۰/۲۶  | ۰/۱۱۸ | ۰/۲۸۶ | R7              |
| ۰/۳۷۱ | ۰/۳۶۴ | ۰/۲۳۶ | ۰/۱۷۲ | R8              |
| ۰/۲۷۹ | ۰/۳۶۴ | ۰/۳۵۴ | ۰/۴۰۱ | R9              |

در مرحله بعد به منظور تعیین ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار، ماتریس جدول (۵-۱۲) در وزن معیارهای موجود ضرب شده است. ماتریس تصمیم بدون مقیاس وزن‌دار زون B در جدول (۵-۱۳) آورده شده است.

جدول (۵-۱۳): ماتریس بدون مقیاس وزن‌دار زون B برای حل با روش TOPSIS

| C4    | C3    | C2    | C1    | مخاطره ژئوتکنیک |
|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| ۰/۱۰۶ | ۰/۰۵۲ | ۰/۱۵۱ | ۰/۰۴۱ | R1              |
| ۰/۱۰۶ | ۰/۰۵۲ | ۰/۲۰۲ | ۰/۰۵۷ | R2              |
| ۰/۱۰۶ | ۰/۰۵۲ | ۰/۲۰۲ | ۰/۰۴۱ | R3              |
| ۰/۱۰۶ | ۰/۰۳۷ | ۰/۱۰۱ | ۰/۰۵۷ | R4              |
| ۰/۰۸  | ۰/۰۵۲ | ۰/۱۰۱ | ۰/۰۴۱ | R5              |
| ۰/۰۸  | ۰/۰۳۷ | ۰/۱۵۱ | ۰/۰۵۷ | R6              |
| ۰/۰۸  | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۵  | ۰/۰۴۱ | R7              |
| ۰/۱۰۶ | ۰/۰۵۲ | ۰/۱۰۱ | ۰/۰۲۵ | R8              |
| ۰/۰۸  | ۰/۰۵۲ | ۰/۱۵۱ | ۰/۰۵۷ | R9              |

فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل و شاخص شباهت برای گزینه‌های مختلف با استفاده از روابط (۲-۴) تا (۲-۶) محاسبه شده و به صورت جدول (۵-۱۴) ارائه شده است.

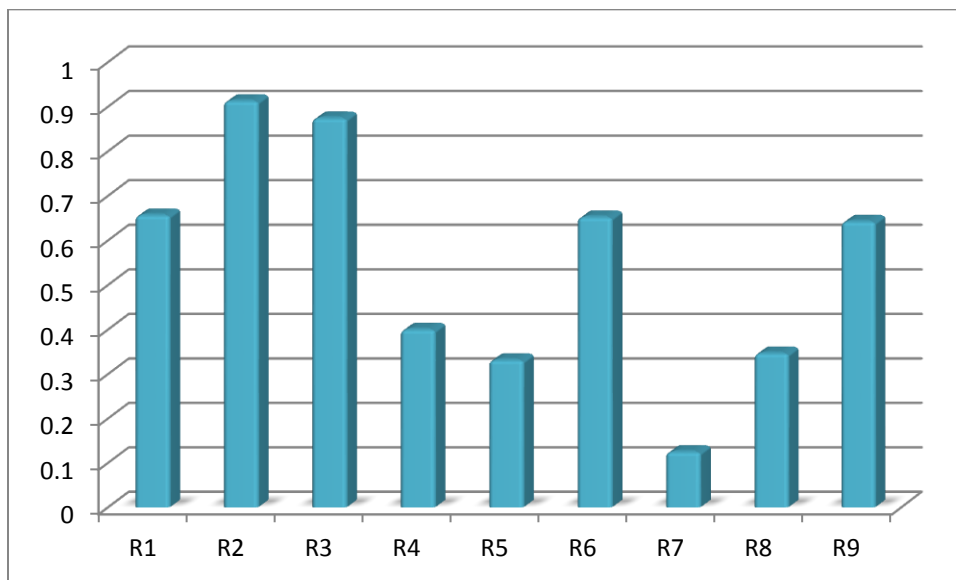
$$A^+ = \{0.057, 0.202, 0.037, 0.106\} \quad \text{حل ایده‌آل } (A^+)$$

$$A^- = \{0.025, 0.050, 0.052, 0.080\} \quad \text{حل ضد ایده‌آل } (A^-)$$

جدول (۵-۱۴): فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل و شاخص شباهت برای زون B

| R9     | R8    | R7    | R6    | R5    | R4    | R3    | R2    | R1     | مخاطره                 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------------------|
| ۰/۰۵۹  | ۰/۱۰۷ | ۰/۱۵۵ | ۰/۰۵۷ | ۰/۱۰۷ | ۰/۱۰۱ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۵۵  | فاصله از حل ایده‌آل    |
| ۰/۱۰۶۱ | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۲۲ | ۰/۱۰۷ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۶۷ | ۰/۱۵۵ | ۰/۱۵۷ | ۰/۱۰۵۶ | فاصله از حل ضد ایده‌آل |
| ۰/۶۴۳  | ۰/۳۴۷ | ۰/۱۲۵ | ۰/۶۵۳ | ۰/۳۳۲ | ۰/۴۰۱ | ۰/۸۷۵ | ۰/۹۱۳ | ۰/۶۵۷  | شاخص شباهت             |

با توجه به مقادیر شاخص شباهت موجود در جدول (۵-۱۴)، نتایج رتبه‌بندی ریسک‌ها با روش شباهت به گزینه ایده‌آل برای زون B به صورت  $(R2 > R3 > R1 > R6 > R9 > R4 > R8 > R5 > R7)$  می‌باشد. نتایج بررسی و رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون B با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل به صورت شماتیک در شکل (۵-۷) نشان داده شده است.



شکل (۵-۶) نتایج رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی زون B با استفاده از روش TOPSIS

### ۵-۳ مقایسه نتایج رتبه‌بندی با نتایج واقعی حاصل از حفاری تونل

به منظور مقایسه نتایج رتبه‌بندی ریسک با نتایج واقعی حاصل از حفاری تونل، گزارشات پیشرفت کار ماهانه مربوط به تاریخ ۹۰/۷/۱ تا ۹۱/۱۰/۳۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه شرایط رویاروی با هرکدام از مخاطرات به ترتیب اولویت آنها در رتبه‌بندی بیان شده است:

## I- وجود بولدر و قطعه‌سنگ در مسیر تونل

با توجه به نتایج گزارشات ارایه شده توسط سازمان قطار شهری تبریز و نیز شرکت مشاورین گنو، پروژه در حین حفاری به وفور با بولدرهایی با ابعاد مختلف، به خصوص در زون A، مواجه شده است که در برخی موارد مشکلات جدی را برای پروژه ایجاد کرده است. با توجه به اینکه راهکار مناسبی برای مقابله با این مشکل در این پروژه اتخاذ نشده است لذا این مخاطره جزو اصلی‌ترین مخاطرات پیش رو در حین حفاری بوده است.

## II- ساینده‌گی زمین

میزان مصرف ابزار برش به دلیل ساینده‌گی زمین در این پروژه بسیار بالاتر از حد معمول بوده است و به رغم استفاده از فوم‌های ضد سایش، بازهم سایش ابزار به خصوص در زون A به دلیل وجود قلوه-سنگ و دانه‌های درشت با مقاومت و سطح ساینده‌گی بالا، زیاد بوده است. در زون B به دلیل کاهش میزان قلوه‌سنگ و ذرات درشت مقداری از ساینده‌گی زمین کاسته شده است، ولی با این وجود سایش ابزار در این زون نیز به دلیل وجود مواد ساینده در خاک مسیر بیش از حد معمول بوده است.

## III- نشست سطح زمین

نشست سطح زمین جزو مهم‌ترین فاکتورهایی است که در حفاری تونل در محیط‌های شهری بایستی همیشه مد نظر قرار گیرد. در پروژه مذکور نیز این فاکتور بسیار مورد تاکید بوده است، و اهمیت آن نیز در زون B به علت قدیمی‌تر بودن بافت شهر نسبت به زون A از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است. با توجه به نتایج نقشه‌برداری و نشست‌سنجی مسیر تونل، میزان نشست سطح زمین تا نقاط ابتدایی زون B ( مکان در حال حفاری) کم‌تر از حد مجاز نشست اشاره شده در بخش

(۳-۴) بوده است، که این مقدار کم نشست سطح زمین به علت انجام عملیات تزریق کامل و به موقع فضای خالی پشت سگمنت می‌باشد.

#### IV- جبهه کار مختلط

به علت رسوبی بودن منطقه، وجود لایه‌بندی و نیز وجود مواد با گستره دانه‌بندی مختلف در مسیر تونل، مخاطره جبهه کار مختلط نیز از موارد بروز خطر در حین حفاری می‌باشد که در زون A در رده خطر پایین‌تر از ساینده‌گی زمین قرار دارد، ولی در زون B به علت کاش میزان ساینده‌گی زمین، خطر جبهه کار مختلط در رده خطر بالاتر از ساینده‌گی زمین قرار گرفته است. در حین حفاری نیز پدیده جبهه کار مختلط تا حدودی باعث بروز مشکلاتی مانند تغییر فشار سینه کار شده است.

#### V- روانگرایی خاک

این مخاطره نیز به دلیل زلزله‌خیز بودن شهر تبریز و قرارگیری این شهر بر روی گسل‌های فعال دارای اهمیت می‌باشد، با این وجود در طی ۵۰ سال اخیر زلزله‌های با شدت نزدیک به ۷ ریشتر در این شهر اتفاق نیفتاده است و از این رو هیچ مورد روانگرایی در مسیر تونل تاکنون گزارش نشده است.

#### VI- انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش

به علت استفاده از مواد افزودنی مناسب و ضد چسبندگی در کل مسیر و نیز روباره کم تا به حال گزارشی مبنی بر انسداد کاترهد وجود نداشته است و تنها چند مورد قفل‌شدگی دیسک‌های برشی به علت چسبندگی زمین گزارش شده است. دلیل بالاتر بودن رده ریسک این مخاطره نسبت به مخاطره تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی در زون A تنها به علت پایین‌تر بودن تراز آب زیرزمینی از تراز تونل در این زون بوده است، و در زون B رده ریسک تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی بالاتر از رده گل‌گرفتگی و انسداد بوده است.

## **VII- تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی**

در زون A به علت پایین تر بودن سطح آب زیرزمینی از تراز تونل مشکلات مربوط به این مخاطره بسیار کم بوده است. در زون B سطح آب زیرزمینی بالاتر از هد تونل قرار داشته و مشکلاتی را ایجاد کرده است. البته به علت استفاده از ماشین EPB این مشکلات نیز کم بوده است و تنها مشکلات ناشی از این مخاطره مربوط به محل ایستگاه‌ها می‌باشد که هزینه آبکشی زیاد است.

## **VIII- فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل**

با توجه به دانه‌بندی مسیر تونل، میزان مواد ریزدانه در مسیر تونل، به خصوص در زون A، کمتر از حد مناسب برای کارکرد ماشین EPB بوده است. با این وجود به علت استفاده از گل بنتونیت در کل مسیر تونل، مشکل چندانی از بابت این مخاطره در طول عملیات حفاری وجود نداشته است.

## **IX- آماس زمین**

به علت کم بودن مواد رسی و سایر کانی‌های دارای پتانسیل تورم در مسیر تونل و نیز کم بودن میزان روبراه تونل، تا به حال گزارشی از بابت مشکل تورم (آماس) زمیندر طول مسیر تونل وجود نداشته است و این مخاطره در رده ریسک بسیار پایین نسبت به سایر مخاطرات ذکرشده در این تحقیق قرار دارد.

## ۴-۵ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا میانگین نتایج حاصل از پرسش‌نامه‌های پر شده توسط کارشناسان تونل‌سازی پس از کمی‌سازی ارائه شد. در مراحل بعد ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز با استفاده از سه روش رتبه‌بندی ریسک شامل روش‌های تعریف کلاسیک ریسک، روش سلسله مراتبی (AHP) و روش شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) رتبه‌بندی شد. این مخاطرات شامل (R1): جبهه‌کار مختلط، (R2): وجود بولدر و قطعه‌سنگ، (R3): نشست سطح زمین، (R4): تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی، (R5): انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش، (R6): سایندگی زمین، (R7): آماس زمین، (R8): فقدان مصالح ریزدانه و (R9): روانگرایی خاک می‌باشند. نتایج رتبه‌بندی ریسک‌ها با استفاده از هر سه روش در جدول (۵-۱۵) ارائه شده است.

جدول (۵-۱۵): نتایج رتبه‌بندی ریسک‌ها با استفاده از هر سه روش

| نهم            | هشتم           | هفتم           | ششم            | پنجم           | چهارم          | سوم            | دوم            | اول            | رتبه ریسک |     |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----|
|                |                |                |                |                |                |                |                |                | روش       | زون |
| R <sub>7</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>2</sub> | کلاسیک    | A   |
| R <sub>7</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>2</sub> | AHP       |     |
| R <sub>7</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> | TOPSIS    |     |
| R <sub>7</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>2</sub> | کلاسیک    | B   |
| R <sub>7</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> | AHP       |     |
| R <sub>7</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> | TOPSIS    |     |

با توجه به جدول (۵-۱۵) مشخص است که نتایج رتبه‌بندی ریسک با استفاده از هر دو روش تقریباً مشابه می‌باشند و تنها در موارد جزئی (R<sub>3</sub> و R<sub>6</sub> در زون A و R<sub>1</sub> و R<sub>6</sub> در زون B) با هم تفاوت دارند.

در دو زون A و B نیز رتبه مخاطرات تقریباً مشابه بوده و تنها در چند مورد تفاوت دارد. این تفاوت‌ها در قسمت مخاطرات دارای رتبه دوم تا چهارم (R<sub>6</sub>، R<sub>3</sub> و R<sub>1</sub>)، به علت کاهش میزان

سایندگی مسیر به علت کاهش اندازه دانه‌بندی در زون B نسبت به زون A می‌باشد. تفاوت در قسمت مخاطرات دارای رتبه ششم و هشتم ( $R_4$  و  $R_5$ ) نیز به دلیل وجود آب زیرزمینی در زون B می‌باشد.

با توجه به جدول (۵-۱۵) ملاحظه می‌شود که در زون A از مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، مخاطرات وجود بولدر و قطعه‌سنگ، سایندگی زمین و نشست سطح زمین به ترتیب دارای اولویت‌های بیشتر و مخاطرات آماس زمین، فقدان مصالح ریزدانه و تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی به ترتیب دارای اولویت‌های کمتر می‌باشند.

با توجه به جدول (۵-۱۵) ملاحظه می‌شود که در زون B از مسیر تونل مذکور، مخاطرات وجود بولدر و قطعه‌سنگ در مسیر تونل، نشست سطح زمین و سایندگی زمین به همراه جبهه‌کار مختلط به ترتیب دارای اولویت‌های بیشتر و مخاطرات آماس زمین، انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش و فقدان مصالح ریزدانه به ترتیب دارای اولویت‌های کمتر می‌باشند.

با مقایسه نتایج حفاری تونل در انتهای زون A و ابتدای زون B با نتایج رتبه‌بندی ریسک نیز مشخص شد که نتایج رتبه‌بندی پیش‌بینی مناسبی از مخاطرات داشته و انطباق خوبی با نتایج حفاری دارند



## **فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

## ۶-۱ مقدمه

ساخت تونل و سایر سازه‌های زیرزمینی، به دلیل وجود متغیرهای زیاد و شرایط زمین با خطرهای مواجه می‌باشد که می‌تواند ایمنی و یا اقتصاد طرح را به مخاطره اندازد. از جمله این سازه‌های زیرزمینی می‌توان به حفاری تونل به صورت مکانیزه با ماشین TBM در نواحی شهری اشاره نمود. از این رو هدف از این تحقیق رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی تونل‌های مکانیزه در نواحی شهری بوده است که به منظور مطالعه موردی مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز انتخاب شده است.

لذا در این فصل جمع‌بندی کارهای انجام شده در این تحقیق ارائه شده است. کارهای انجام شده شامل ارائه روش‌های مدیریت ریسک و انتخاب روش رتبه‌بندی ریسک، شناسایی مخاطرات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مسیر تونل مذکور و در نهایت رتبه‌بندی مخاطرات شناسایی شده با استفاده از روش‌های انتخابی می‌باشد.

## ۶-۲ جمع‌بندی مطالب ارائه شده در پایان‌نامه

ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌ها در پروژه‌های پرمخاطره نظیر تونل‌سازی مکانیزه در نواحی شهری از جمله اقدامات ضروری برای مدیریت و ارائه پاسخ به ریسک‌های مرتبط است. از این رو در این تحقیق در فصل دوم تعاریف مدیریت ریسک و نیز روش‌های رتبه‌بندی ریسک معرفی شده و پس از آن دو روش AHP و TOPSIS به عنوان روش‌های رتبه‌بندی ریسک این تحقیق انتخاب شده است.

فرآیند رتبه‌بندی ریسک مستلزم شناسایی و تعیین مجموعه عوامل ریسک‌زاست که در فصل سوم این تحقیق مخاطرات ژئوتکنیکی موجود در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های مشابه

شناسایی و مشکلات ایجاد شده توسط این مخاطرات و نیز روش‌های ساده‌ای برای شناسایی آنها در زمین‌های مورد مطالعه ارایه شده است.

در فصل چهارم با مطالعه نتایج گمانه‌های حفر شده در مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز شرایط زمین‌شناسی و نیز مشخصات ژئوتکنیکی مسیر به دست آمد. در ادامه این فصل مخاطرات ژئوتکنیکی موجود در مسیر تونل با استفاده از روش‌های ذکر شده در فصل سوم بررسی شده و تعداد ۹ مخاطره در مسیر تونل شناسایی شد. این مخاطرات عبارتند از: (R1): جبهه‌کار مختلط، (R2): وجود بولدر و قطعه‌سنگ در مسیر تونل، (R3): نشست سطح زمین، (R4): تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی، (R5): انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش، (R6): ساینده‌گی زمین، (R7): آماس زمین، (R8): فقدان مصالح ریزدانه در مسیر تونل و (R9): روانگرایی خاک.

در فصل پنجم نیز به منظور رتبه‌بندی دقیق‌تر ریسک‌ها معیارهای: احتمال وقوع ریسک و تاثیر (شدت) ریسک بر هزینه و معیارهای تکمیلی: توانایی سازمان در واکنش به ریسک و اعتبار تخمین نیز در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر، مسیر تونل با توجه به شرایط آب زیرزمینی و نیز دانه‌بندی، مسیر تونل به دو زون A و B تقسیم شده است. پس از زون‌بندی مسیر، رتبه‌بندی ریسک ابتدا با روش تعریف کلاسیک ریسک انجام شده است که نتایج آن در جدول (۶-۱) موجود است.

جدول (۶-۱): نتایج رتبه‌بندی ریسک با استفاده از تعریف کلاسیک ریسک

| اولویت ریسک | اول            | دوم            | سوم            | چهارم          | پنجم           | ششم            | هفتم           | هشتم           | نهم            |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| زون A       | R <sub>2</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>7</sub> |
| زون B       | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>7</sub> |

با توجه به دقت پایین روش تعریف کلاسیک ریسک، در ادامه رتبه ریسک با استفاده از دو روش

AHP و TOPSIS برای زون A در جدول (۲-۶) و برای زون B در جدول (۳-۶) ارایه شده است.

جدول (۲-۶): اولویت ریسک با استفاده از دو روش AHP و TOPSIS برای زون A

| اولویت ریسک | اول            | دوم            | سوم            | چهارم          | پنجم           | ششم            | هفتم           | هشتم           | نهم            |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| روش AHP     | R <sub>2</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>7</sub> |
| روش TOPSIS  | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>7</sub> |

جدول (۳-۶): اولویت ریسک با استفاده از دو روش AHP و TOPSIS برای زون B

| اولویت ریسک | اول            | دوم            | سوم            | چهارم          | پنجم           | ششم            | هفتم           | هشتم           | نهم            |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| روش AHP     | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>7</sub> |
| روش TOPSIS  | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>6</sub> | R <sub>9</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>8</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>7</sub> |

با توجه به جداول (۲-۶) و (۳-۶) مشخص است که نتایج رتبه‌بندی ریسک با استفاده از هر دو

روش تقریباً مشابه می‌باشند و تنها در موارد جزئی (R<sub>6</sub> و R<sub>3</sub> در زون A و R<sub>1</sub> و R<sub>6</sub> در زون B) با هم تفاوت دارند.

در دو زون A و B نیز رتبه مخاطرات تقریباً مشابه بوده و تنها در چند مورد تفاوت دارد. این تفاوت‌ها در قسمت مخاطرات دارای رتبه دوم تا چهارم (R<sub>6</sub>، R<sub>3</sub> و R<sub>1</sub>)، به علت کاهش میزان ساینده‌گی مسیر به علت کاهش اندازه دانه‌بندی در زون B نسبت به زون A می‌باشد. تفاوت در قسمت مخاطرات دارای رتبه ششم و هشتم (R<sub>4</sub> و R<sub>5</sub>) نیز به دلیل وجود آب زیرزمینی در زون B می‌باشد.

در زون A از مسیر تونل خط ۱ متروی تبریز، مخاطرات وجود بولدر و قطعه‌سنگ، ساینده‌گی زمین و نشست سطح زمین به ترتیب دارای اولویت‌های بیشتر و مخاطرات آماس زمین، فقدان مصالح ریزدانه و تغییرات نفوذپذیری و اثر آب زیرزمینی به ترتیب دارای اولویت‌های کمتر می‌باشند.

در زون B از مسیر تونل مذکور، مخاطرات وجود بولدر و قطعه‌سنگ در مسیر تونل، نشست سطح زمین و ساینده‌گی زمین به همراه جبهه‌کار مختلط به ترتیب دارای اولویت‌های بیشتر و همچنین مخاطرات آماس زمین، انسداد و گل‌گرفتگی کاترهد و ابزار برش و فقدان مصالح ریزدانه به ترتیب دارای اولویت‌های کمتر می‌باشند.

با مقایسه نتایج حفاری تونل در انتهای زون A و ابتدای زون B با نتایج رتبه‌بندی ریسک نیز مشخص شد که نتایج رتبه‌بندی پیش‌بینی مناسبی از مخاطرات داشته و انطباق خوبی با نتایج حفاری دارند

با توجه به اینکه خط ۲ متروی تبریز نیز در این محیط و به موازات خط ۱ حفاری خواهد شد لذا نتایج این تحقیق تا حد زیادی برای خط ۲ نیز صدق می‌کند و در پروژه خط ۲ نیز بهتر است اقداماتی برای مقابله با مخاطرات ارایه شده در این تحقیق انجام شود. به منظور اختصاص هزینه و بودجه برای مقابله با این مخاطرات در خط ۲ نیز می‌توان به ترتیب اولویت‌بندی ارایه شده در تحقیق حاضر استفاده نمود.

## ۳-۶ پیشنهادات

- پیشنهاد می‌شود که از مراحل ابتدایی طراحی این پروژه‌ها به منظور کاهش مشکلات ناشی از مخاطرات موجود، گروهی به عنوان مسوول شناسایی و رتبه‌بندی ریسک انتخاب شده و عملیات شناسایی و رتبه‌بندی ریسک توسط این گروه انجام شود.
- به منظور رسیدن به نتایجی دقیق‌تر رتبه‌بندی ریسک حفاری مکانیزه با استفاده از سایر روش‌های رتبه‌بندی ریسک نیز انجام شود.
- پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی‌های اولیه، با گردآوری و مطالعه اطلاعات حاصل از حفاری تعدادی پروژه‌های اجراشده و در حال اجرا، جداول و نمودارهایی جهت تعیین میزان مخاطرات مهم موجود در پروژه با استفاده از شاخص‌های ساده و قابل برداشت در هر پروژه ارائه شود.

## مراجع:

- [۱]. محمدی س، (۱۳۸۳)، "بررسی روند مدیریت ریسک در صنعت ساخت"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- [2]. Project Management Institute, (2008), "A Guide to the Project Management Body of Knowledge", fourth Edition, Pennsylvania, USA.
- [3]. Association For Project Management, (2006), "APM body of Knowledge".
- [4]. Federal Aviation Administration, (2009), "Risk Management Handbook".
- [5]. Young L, (2007), "The handbook of project management", Revised 2nd edition.
- [6]. Baecher G.B., Christian J.T, (2003), "Reliability and Statistics in geotechnical engineering", USA: John Wiley & Sons.
- [7]. Kerzner H, (2009), "Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling", John Wiley & Sons, New York.
- [8]. Wagner H, (2006), "Risk Evaluation and Control in Underground Construction". International symposium on underground excavation and tunneling, Bangkok : Thailand , 2-4 February.
- [۹]. ویلیامز س، هینز ج، (۱۳۸۲)، "مدیریت ریسک"، مترجمان: داور ونوس، حجت اله گودرزی، نشر نگاه دانش.
- [۱۰]. روزبهی ص، جداری خ، (۱۳۸۷)، "مدیریت ریسک پروژه با استفاده از PertMaster"، انتشارات کیان رایانه سبز.
- [11]. Raei, R. Saeedi, A. (2003) "Essentials of financial Engineering and Risk Management", SAMT and Tehran University Publications (in Persian).
- [12]. Ericson, Clifton A. (2005) "Hazard analysis techniques for system safety", John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, United States.
- [۱۳]. 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>>.
- [۱۴]. جعفر زاده م، (۱۳۸۶)، "متدولوژی تطبیقی تکنیک های کاربردی آنالیز ریسک"، نخستین کنگره بین المللی مدیریت ریسک، تهران.
- [۱۵]. عطایی م، (۱۳۸۸)، "تصمیم گیری چندمعیاره"، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [16] Rezaie, K., Amalnik, M. (2007), "Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management", Applied Mathematics and Computation, Volume 190, Issue 2.
- [۱۷]. قدسی پور، س.ح. (۱۳۸۵)، "فرآیند تحلیل سلسه مراتبی AHP"، تهران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- [18]. Saaty, T. (1980), "The Analytic Hierarchy Process", Mc Graw-Hill.
- [19]. Einstein, H. (1996), "Risk and analysis in rock engineering", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 11, pp. 141-155.
- [20]. Sturk, S. (1996), "underground projects, as applied to the Stockholm ring road tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 11, pp. 157-164.
- [21]. Wagner, H. (2001), "The Governance of Cost In Tunnelling and Construction".
- [22]. Chou, H., Yang, C. and Chang, S. (2001), "a Study of liquefaction related damages on shield tunnels", Tunnelling and underground Space Technology, vol. 16, pp. 185-1193.
- [23]. Isaksson, T. and Stille, H. (2002), "model for estimation of time and cost for tunnel projects based on risk evaluation", Rock Mech. Rock Engng, vol. 38, pp. 373-398.
- [24]. Grasso, P., Mahtab, M. and Kalamaras, G. (2002), "study on the development of a risk management plan for tunneling", Proc", AITES-ITA, World Tunnel Congress, Sydney.
- [25]. Reilly, J. and Brown, J. (2004) "management and control of cost and risk for tunneling and infrastructure projects", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 19, pp. 330.

- [26]. Arendsb, G. Castlec, J. Drabeck, S. and Sterling, R. (2004), "risk budget management in progressing underground works", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 19, pp. 29-33.
- [27]. Soren, D.E. Per, T. Jorgen, K. and Trine, H.V. (2004), "guidelines for tunnelling risk management: ITA working group NO. 2", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 19, pp. 217-237.
- [28]. Yoo, C. Jeon, Y-W. and Choi, B-S. (2006), "IT-based tunnelling risk management system (IT-TUISK)- development and implementation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, pp. 190-202.
- [29]. Kwong, A. (2006), "risk management of SSDS stage I tunnel B-tunnelling under the eastern harbor crossing tunnel in Hong Kong", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, pp. 358.
- [30]. I.T.I. Group, (2006), "a code of practice for risk management of tunnel works", ITA.
- [31]. Herrenknecht, E.M. and Bappler, K. (2006), "mastering risks during mechanized excavation in urban centers with highly complex ground conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, pp. 260.
- [32]. Reilly, J. Parker, H. (2007), "benefits and life-cycle costs of underground projects", AITES-ITA World Tunnel Congress, Prague.
- [33]. Shahriar, K. Sharifzadeh, M. and Khademi Hamidi, J. (2008), "geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 23, pp. 318-325.
- [34]. Jung, K. Eun-soo, H. Hee-soon, S. and Seok-Woo, N. (2009), "quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: application to the design of shield TBM", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, pp. 269- 277.
- [35]. Kim, Y-G. (2009), "application of risk analysis and assessment in tunnel design", *International Journal of the Japanes Committee for Rock Mechanics (JCRM)*, vol. 5, pp. 11-18.
- [36]. Beard, A. (2010), "problems with using models for fire safety", *Handbook of Tunnel Fire Safety*, London, Thomas Telford.
- [37]. Fouladgar, M.M. Chamzini, A.Y. and Basiri, M.H. (2001), "risk evaluation of tunneling projects by fuzzy TOPSIS", *Internationalconference on Management*.
- [۳۸]. احمدی نژاد، م. قاضی تبریزی، ع. و باباییو ع. (۱۳۸۳)، "برآورد زمان احتمالی حفاری تونل با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران (NCCE)، تهران، ایران.
- [۳۹]. جعفری، م.ج. قراری، ن. (۱۳۸۵)، "آنالیز ریسک TBM به روش تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن"، ششمین کنفرانس تونل.
- [۴۰]. صیادی، الف.ر. حیاتی، م. و سجیدان، م.ح. (۱۳۸۸)، "ارزیابی ریسک پروژه های تونل سازی به کمک روش FMEA و منطق فازی"، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، یزد.
- [41]. Sayadi, A.r. Rajabzadeh, A. Hosseinpor, M. and Hayati, M. (2009), "risk ranking in tunneling projects using TOPSIS method", 8<sup>th</sup> Iranian Tunnelling Conference, Tehran.
- [۴۲]. نظارت ح.ر. (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد: "رتبه بندی ریسک زمین شناسی ماشین حفاری TBM با استفاده از روش های چند معیاره (مطالعه موردی تونل انتقال آب گلاب"، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [43]. Yongfu Xu, De'an Sun, Jun Sun, Deming Fu, Ping Dong (2002), "Soil disturbance of Shanghai silty clay during EPB tunneling" *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- [44]. Medley E.W (1994), "Engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks" (bimrocks), PhD dissertation, University of California, Berkley, U.M.J.
- [۴۵]. عفیفی پور م، و معارف وند پ، (۱۳۹۰)، "بررسی چالش های اجرای تونل در محیط های مخلوط سنگ و خاک" نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ایران.



- [46]. Babendererde S, Hoek E, Marinos P and Cardosa A.S (2004) " Geological risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses – The case of Metro do Porto and the measures adopted" Course on Geotechnical Risks in Rock Tunnels, Portugal.
- [47]. Kovari K. and Ramoni M. (2006) "Urban tunnelling in soft ground using TBMs", International conference of Tunnelling, P 17, Malaysia.
- [48]. U.S. National committee on tunneling thechnology, (1984) "Geotechnical site investigations for underground projects" National academy of science.
- [49]. Hunt S.W, Del Nero D.E, (2010) "Two Decades of Advances Investigating, Baselineing and Tunnelling in Bouldery Ground" keynote lecture ITA-AITES WTC.
- [۵۰]. حسن پور ج و شمسی غ، (۱۳۹۰) "نقش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک در تونلسازی مکانیزه در شرایط دشوار زمین‌شناسی"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ایران .
- [51]. Hunt S.W, Ozdemir (ed.), Swets, Lisse and Zeitlinger, (2002) "Compensation for boulder obstructions", North American Tunneling.
- [52]. Dowden P.B and Robinson R.A, (2002) "Coping with boulders in soft ground TBM tunneling" A Publication of Tunneling Machinery Consultant, Kirkland, Washington, USA.
- [53]. Hunter S.W and Angulo A. (1999) "Identifying and baselining boulders for geo-engineering for underground facilities", ASCE, .underground construction proceedings for the third national conference, pages 255-270.
- [54]. Harding D and Willis D, (2010) "Soft Ground Tunneling on a Mexico City Wastewater Project" Underground space use: Analysis of the past and lessons for the future, pp158-163.
- [55]. Walter B, Alavi E, Frank G, DiPonio M and Mooney M, (2010) " Extending TBM Reliability by Detecting Boulders".
- [56]. Frank G, Guy E.D and Daniels J. (2000) "The use of borehole ground penetrating radar in determining the risk associated with boulder occurrence" No-Dig conference, California.
- [۵۷]. پاکباز م.س و حیدری زاده ی، (۱۳۸۷) "بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل شهری اهواز"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ایران.
- [۵۸]. ستاری ق، شهریار ک، زمانی ح و اسدی الف، (۱۳۸۸) "برآورد تحلیلی نشست ناشی از تونلسازی با سپر تعادلی زمین"، هشتمین کنگره بین المللی تونل، تهران، ایران.
- [۵۹]. حسینی، س، (۱۳۹۰)، "شبیه‌سازی سه بعدی از پروسه حفاری توسط TBM در زمین‌های نرم (مطالعه موردی خط ۳ مترو تهران)". نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، تهران.
- [60]. Suwansawat,S. (2002), "Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of surface Settlement Using Artificial Neural Network", PHD thesis, MIT university, p.76-149.
- [۶۱]. اطمیابی الف، (۱۳۷۹)، تحلیل و طراحی پی- ویرایش پنجم، انتشارات جویبار.
- [62]. Sotirios Psomas (2009), "Properties of foam/sand mixtures for tunneling applications", St Hugh's College.
- [63]. Wassmer, L., Treceno, O., Andreossi, E. and Re, S. (2001), "Tunnel Boring Machine (TBM) Applications in soft ground conditions"
- [64]. Deere D.U (1981), "Adverse geology and TBM tunneling problems" Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), San Francisco, pp. 574-85.
- [65]. Thewes M and Burger W, (2004), "Clogging risks for TBM drives in clay" Underground space use: Analysis of the past and lessons for the future, Vol. 1-2, London.
- [۶۶]. غفوری م، لشکری پور غ، طریق ازلی ص. (۱۳۹۱)، "تاثیر آب و فوم بر ساینده‌گی خاک در حفاری با ماشین EPB-TBM"، همایش و نمایشگاه سد و تونل، تهران، ایران.

- [67]. Rostami J. and Alavi E. (2012) "Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines" Journal of Tunneling and Underground Space Technology, No28, pp. 245-256.
- [68]. Cerchar – Centre d'Etudes et Recherches der Charbonnages de France, (1986). "The Cerchar Abrasivity Index", Verneuil, 12.
- [69]. Nilsen B., Dafi, F., Holzhauser, J. and Raleigh, P. (2007), "New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling", Rapid excavation and tunneling conference.
- [70]. CHEN, F. H. (1957), "Foundation expansive soils", Elsevier Scientific Publishing Company.
- [۷۱]. معماریان ح، (۱۳۷۴)، "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" انتشارات دانشگاه تهران.
- [۷۲]. عسگری ف، فاخر ع، (۱۳۷۲)، "تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندسی ژئوتکنیک" تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی، چاپ اول، ص ۸۷-۹۲.
- [73]. Dakhshanamurthy, V. and Raman, V, (1973), "A simple method of identifying an expansive soil", soils and foundations, Japanese society of Soil mechanics and Foundation Engineering, Vol. 13, No. 1, pp.97-104.
- [74]. Holtz W.G., Gibbs H.G. (1956), "Engineering properties of expansive clays" ASCE 121,641-663.
- [75]. Seed H.B, Woodward R.J and Lundgren R. (1962), "Prediction of swelling potential for compacted clays", Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 88SM4, 107-120.
- [76]. Thewes M. (2007), "TBM tunneling challenges redefining the state of the art" keynote lecture ITA-AITES WTC, PRAGUE.
- [77]. Prakash, Shamsheer. (2005), "Soil Dynamics", University of Missouri-Rolla.
- [۷۸]. معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی (۱۳۹۱)، "راهنمای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک، پیامدها و روش‌های کاهش مخاطرات آن"، نشریه شماره ۵۲۵.
- [۷۹]. کاتبی هف فتحی س. (۱۳۸۵)، "بررسی بروز پدیده روانگرایی در مسیر متروی تبریز".
- [80]. Wang W. (1979), "Some Findings in Soil Liquefaction", Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific, Research Institute, Beijing, China.
- [۸۱]. عسگری ف، دبیری ر، کشاورز م. (۱۳۸۵)، "مقایسه و ارزیابی پتانسیل روانگرایی با روش‌های مقاومت نفوذ استاندارد (SPT) و اندازه‌گیری سرعت موج برشی ( $V_s$ ) در جنوب تهران"، مجله زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال هشتم، شماره دوم.
- [۸۲]. اتحادیه شرکت‌های قطار شهری، (۱۳۸۶)، "خبرنامه اتحادیه شرکت‌های قطار شهری"، شماره ۸.
- [۸۳]. شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی، (۱۳۸۴)، "مطالعات متروی تبریز"، سازمان قطار شهری تبریز و حومه، تبریز.
- [۸۴]. سازمان قطار شهری تبریز، (۱۳۸۴)، "گزارش نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی خط یک قطار شهری تبریز"، سازمان قطار شهری تبریز و حومه، تبریز.
- [۸۵]. شرکت مهندسی مشاور گنو، (۱۳۸۷)، "گزارش مطالعات ژئوتکنیک خط یک قطار شهری تبریز"، سازمان قطار شهری تبریز و حومه، تبریز.
- [۸۶]. شرکت مهندسی مشاور گنو، (۱۳۹۱)، "گزارش پیشرفت کار ماهیانه"، سازمان قطار شهری تبریز و حومه، تبریز.
- [۸۷]. کریم نیا ح، (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد، "تاثیر حفاری تمام مقطع تونل‌ها بر روی نشست سازه‌های مجاور در مناطق شهری"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

## پیوست:

به منظور رتبه‌بندی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر خط ۱ متروی تبریز پرسش‌نامه‌هایی آماده شده و توسط کارشناسان تونل‌سازی مرتبط با متروی تبریز پاسخ داده شده است. این پرسش‌نامه‌ها شامل سه صفحه بودند که در صفحه اول آنها توضیحاتی درباره زون‌بندی و مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل مذکور ارائه شده است. نمونه‌ای از توضیحات صفحه اول پرسش‌نامه در صفحه بعد ارائه شده است. در جدول (پ-۱) نیز مشخصات گروه کارشناسی که در زمینه پاسخ به پرسش‌نامه‌ها همکاری نموده‌اند ذکر شده است.

جدول (پ-۱): مشخصات گروه کارشناسان

| شماره | نام کارشناس     | سمت                                 | سازمان                       |
|-------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------|
| ۱     | دکتر برزگر      | سرپرست گروه ژئوتکنیک                | شرکت مشاور گنو               |
| ۲     | دکتر رنجبر      | مدیر بخش فنی                        | شرکت مشاور گنو               |
| ۳     | مهندس ملکی      | سرپرست شرکت مشاور مستقر در کارگاه   | شرکت مشاور گنو               |
| ۴     | مهندس درگاهی    | کارشناس دفتر فنی                    | سازمان مرکزی قطار شهری تبریز |
| ۵     | مهندس حمداللهی  | مدیر دفتر فنی                       | سازمان مرکزی قطار شهری تبریز |
| ۶     | مهندس نصیری     | مدیر تونل‌های عمیق خط ۱ متروی تبریز | سازمان مرکزی قطار شهری تبریز |
| ۷     | مهندس بخشی      | مدیر خطوط ۲، ۳ و ۴ متروی تبریز      | سازمان مرکزی قطار شهری تبریز |
| ۸     | مهندس سلیمانی   | کارشناس بخش ژئوتکنیک                | موسسه ایمن‌سازان تبریز       |
| ۹     | مهندس حیدری     | کارشناس بخش ژئوتکنیک                | موسسه ایمن‌سازان تبریز       |
| ۱۰    | مهندس آل خمیس   | کارشناس بخش ژئوتکنیک                | شرکت پیمانکاری الموت         |
| ۱۱    | مهندس حکیم‌زاده | سرپرست شرکت الموت مستقر در خط ۱     | شرکت پیمانکاری الموت         |

در ادامه نتایج پرسش‌نامه‌های پر شده توسط کارشناسان ابتدا برای زون A و سپس برای زون B

ارایه شده است.

## **Abstract**

However mechanized tunnelling improve tunnelling industry, but tunnelling projects has many risks due to its working conditions. Also mechanized tunnelling method needs many time and cost. So it's necessary to identify and assessment of probable geotechnical and geological risks in mechanized tunnelling.

In this thesis, in the first it has surveyed risk management methods and has selected suitable methods to risk assessment. Then, it has presented and has surveyed the most important geotechnical and geological risks in mechanized tunnelling in urban areas. It has identified the most important geological risks in Tabriz line 1 metro tunnel and it has surveyed quantified this risks. Then it has ranked the geological risks of Tabriz line 1 metro tunnel by using Analytical Hierachy Process (AHP) and Technique for order-Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) methods. The ranked data has suitable fitting with given real data from excavation of some part of Tabriz line 1 metro tunnel.

**Key words:** Mechanized tunnelling, Geological risks, Risk assessment, Risk ranking, Metro tunnel, AHP method, TOPSIS method and Tabriz metro.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

**M.S. Thesis**

**Assessment of geotechnical risk for mechanized tunneling in urban  
areas- case study Tabriz metro line 1 tunnel**

**Aref Faghedi**

**Supervisors:**

**Dr. F. Sereshki**

**Dr. Sh. Zare**

**September 2013**