بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی ریسک در پروژه‌های تونل سازی به روش مکانیزه با استفاده از روش ترکیبی تحلیل فازی درخت خطا (FFTA)و مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی(FAHP) (مطالعه موردی خط ۳ مترو مشهد)

نگارنده: **حامد غلامی**

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا خالو کاکائی

بهمن ۱۳۹۶

تقدیم به

مقدس ترین واژه ها در لغت نامه دلم

مادر مهربانم:

که زندگی‌ام را مدیون مهر و عطوفت و صبر آن می دانم.

و پدرم، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.

برادران و خواهرانم همراهان همیشگی و پشتوانه های زندگی ام

و تقدیم به:

آن صنوبرهای سرخی که چون لاله زاده شدند و چون شقایق ایستاده مردند

شهید مهدی زین الدین و شهید دکتر مصطفی چمران

تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش پروردگاری را که آفریدگار هستی و سرآغاز دانش هاست. او که سوق دهنده مسیر زندگی انسان ها به سوی آرزوهای قلبی و اهداف نیکی است، که عزمی راسخ بر انجام آن دارند و در این راه بهترین یار و یاور آنان است. بسی شکر که او مرا در زمره جویندگان علم قرار داد تا از این راه درس های زندگی را بیاموزم. اینک در سایه الطاف الهی و در اتمام این پژوهش، لازم میدانم از همه سروران و عزیزانی که بی شک بدون راهنمایی ها و مساعدت های ایشان، انجام این تحقیق میسر نبود، نهایت تشکر و تقدیر خود را ابراز دارم. از این رو:

از اساتید فرهیخته خود جناب آقای دکتر محمد عطایی و جناب آقای دکتر رضا خالوکاکایی که در طول مدت انجام این پژوهش از رهنمودهای علمی و اخلاقی ایشان بهره مند شدم صمیمانه سپاسگزارم و خداوند بزرگ را شاکرم که افتخار شاگردی ایشان را نیز نصیبم نمود.

پادشاهی پسر به مکتب داد　　لوح سیمینش بر کنار نهاد

بر سر لوح او نبشته به زر　　جور استاد به ز مهر پدر

بی شک خود را مدیون این دو عزیز میدانم.

از مهندسین بزرگوار آقایان:

دکتر وحدتی پور، دکتر میر محرابی، مهندس برمرو مهندس مهدی رسولی و همه عزیزان (کارکنان موسسه رهاب (کارگاه خط ۴ مترو مشهد میدان فردوسی) قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا)

جهت همکاری و مساعدت و راهنمایی این جانب در تهیه این پایان نامه، تشکر و قدردانی می نمایم.

حامد غلامی

تعهدنامه

اینجانب **حامد غلامی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با موضوع **ارزیابی ریسک در پروژه‌های تونل سازی به روش مکانیزه با استفاده از روش ترکیبی تحلیل فازی درخت خطا (FFTA)و مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی(FAHP) (مطالعه موردی خط ۳ مترو مشهد)**

تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رضا خالو کاکایی متعهد می‌شوم:

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

تاریخ :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن(مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در تحقیق حاضر ریسک‌ها و علت‌های اصلی آن‌ها در پروژه احداث تونل به‌صورت دقیق، شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای دقیق‌تر شدن بررسی‌ها و ارزیابی‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه از روش‌های فازی درخت خطا و همچنین روش سلسله مراتبی فازی برای شناسایی پارامترهای ریسک‌ها و نمایش گرافیکی آن‌ها اشاره شده است. به دلیل اینکه در واژه‌های زبانی عدم قطعیت وجود خواهد داشت، در این پایان‌نامه از داده‌های فازی جهت آنالیز کمی احتمالات و وقوع شدت ریسک بر روی معیارهای زمین‌شناسی، طراحی، مدیریت،ایمنی و هزینه استفاده گردید. همچنین لازم به ذکر است که اهمیت هر یک از معیارها توسط فرایند سلسله مراتبی فازی تعیین شد و به کمک این فرایند به ترکیب شدت پیامد پرداخته و شدت اثر ریسک موردمحاسبه قرار گرفت. بدین منظور ابتدا در پروژه تونل سازی خط ۳ مترو مشهد، ۱۷ ریسک اصلی از طریق مطالعات گذشته و مصاحبه با خبرگان و متخصصان در پروژه احداث تونل شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای هرکدام از ریسک‌های مطرح‌شده یک درخت خطا به‌طور مجزا رسم و با استفاده از آن‌ها به ارزیابی علت ریسک‌های اصلی پرداخته‌شده است. بر این اساس برای انجام آنالیز کمی و تهیه داده‌های موجود در پروژه بعد از رسم درخت خطا، پرسشنامه‌هایی تنظیم شد که توسط کارشناسان و متصدیان پروژه تکمیل گردید.با استفاده از تجزیه و تحلیل های صورت‌گرفته در این پایان نامه ریسک‌های خرابی در بخش برش دهنده ،مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه ، سایش کاترها انحراف از مسیر و گرفتگی و انسداد دیسک‌ها در پروژه خط۳ مترو مشهد فاکتورهای بالایی از ریسک را دارا هستند.

کلمات کلیدی: ارزیابی ریسک، تونل سازی مکانیزه، روش تحلیلی درخت خطا فازی(FFTA)، روش تحلیلی سلسله مراتبی فازی(FAHP)، خط۳مترو مشهد

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۳- اهداف تحقیق ۴

۱-۴- مراحل تحقیق ۵

۱-۵- ساختار پایاننامه ۶

۲- فصل دوم: مفاهیم ریسک و مدیریت ریسک و روش های ارزیابی آن ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- تعریف ریسک ۹

۲-۳- تعریف مدیریت ریسک ۱۰

۲-۴- فرایندهای اصلی مدیریت ریسک ۱۱

۲-۴-۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک ۱۲

۲-۴-۲- شناسایی ریسک ۱۲

۲-۴-۳- تحلیل کیفی ریسک ۱۴

۲-۴-۴- تحلیل کمی ریسک ۱۵

۲-۴-۵- برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک ۱۷

۲-۴-۶- کنـترل و نظـارت ریسـک ۱۹

۲-۵- جایگاه مدیریت ریسک در مدیریت پروژه ۲۰

۲-۶- اطلاعات و داده‌های موردنیاز و استفاده برای ارزیابی ریسک تونل سازی ۲۱
۲-۷- جمع‌بندی ۲۲
۳- فصل سوم:سابقه علمی موضوع و معرفی مطالعه موردی ۲۳
۳-۱- مقدمه ۲۴
۳-۲- علل انتخاب تونل‌های شهری برای ارزیابی ریسک ۲۴
۳-۳- مروری بر تحقیقات گذشته ۲۵
۳-۴- مطالعه موردی ۳۰
۳-۵- جمع‌بندی ۳۴
۴- فصل چهارم : درخت خطا(FTA) و فرایند سلسله مراتبی (AHP) ۳۵
۴-۱- مقدمه ۳۶
۴-۲- درخت خطا (FTA) ۳۷
۴-۲-۱- تاریخچه درخت خطا ۳۷
۴-۲-۲- روش تحلیل درخت خطا ۳۷
۴-۲-۳- توانایی FTA در کمک به مدیران ۳۸
۴-۲-۴- نمادهای مورداستفاده در تکنیک تحلیل FTA ۳۹
۴-۲-۵- ارزیابی تحلیل درخت خطا ۴۳
۴-۲-۶- مزایای روش تحلیل درخت خطا ۴۵
۴-۲-۷- معایب روش تحلیل درخت خطا ۴۶
۴-۳- روش تحلیل درخت خطای فازی(FFTA) ۴۶

۴-۳-۱- محاسبات فازی درخت خطا ۴۷
۴-۳-۲- مراحل انجام درخت خطای فازی ۴۷
۴-۴- ارزیابی ریسک با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی ۴۹
۴-۴-۱- فرایند سلسله مراتبی(AHP) و فرایند سلسله مراتبی فازی (FAHP) ۵۰
۴-۴-۲- فرایند سلسله مراتبی فازی ۵۲
۴-۵- جمع‌بندی ۵۵
۵- فصل پنجم : تحلیل ریسک تونل سازی مکانیزه مطالعه موردی(خط۳ مترو مشهد) ۵۷
۵-۱- مقدمه ۵۸
۵-۲- تحلیل احتمالاتی ریسک‌های تونل سازی مکانیزه با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی (FFTA) ۵۹
۵-۲-۱- درخت های خطای مطرح‌شده در ریسک تونل سازی مکانیزه ۶۰
۵-۲-۲- طبقه بندی ریسک های مطرح شده در تونل سازی مکانیزه ۸۰
۵-۲-۳- روش تعیین احتمال رویدادهای بالایی و میانی ۸۷
۵-۳- تجزیه و تحلیل پیامد های ریسک تونل سازی مکانیزه به روش سلسله مراتبی فازی.. ۱۱۸
۵-۳-۱- روش تعیین پیامد رویدادهای نهایی و میانی ۱۱۸
۵-۳-۲- رسم نمودار سلسله مراتبی ۱۱۹
۵-۳-۳- فازی سازی نظر کارشناسان به منظور انجام مقایسه های زوجی ۱۲۱
۵-۳-۴- تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با استفاده از اعدا فازی ۱۲۲
۵-۳-۵- محاسبه Si برای هر یک از سطر های ماتریس مقایسه زوجی ۱۲۳

۵-۳-۶- محاسبه درجه بزرگی S_i ها نسبت به همدیگر ۱۲۸

۵-۳-۷- محاسبه بردار وزن نهایی ۱۳۰

۵-۴- ارزیابی ریسک های تونل سازی مکانیزه ۱۳۳

۵-۵- بحث و تحلیل نتایج ریسک ۱۳۹

۵-۶- جمع‌بندی ۱۴۱

۶- فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهاد ۱۴۲

۶-۱- مقدمه ۱۴۳

۶-۲- نتیجه‌گیری ۱۴۳

۶-۳- پیشنهادها ۱۴۵

۷- منابع ۱۴۷

۸- پیوست شماره ۱ ..... ۱۵۹

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: فرایندهای اصلی مدیریت ریسک ۱۱

شکل ۲-۲: تعامل و یکپارچگی مدیریت ریسک با سایر زمینه‌های دانش مدیریت پروژه ۲۱

شکل ۳-۱: شفت ورودی مسیرهای شرقی و غربی میدان فردوسی ۳۳

شکل ۴-۱: درگاه OR ۴۰

شکل ۴-۲: درگاه AND ۴۱

شکل ۴-۳ : درگاه ترکیبی ۴۱

شکل ۴-۴: رویداد اساسی ۴۱

شکل ۴-۵ : رویداد بسط نیافته ۴۲

شکل ۴-۶ : رویداد خانه ۴۲

شکل ۴-۷ : نوع رویدادها در یک درخت خط ۴۳

شکل ۴-۸ : درجه بزرگی دو عدد فازی نسبت به هم ۵۴

شکل ۵-۱: ساختار درختی ریسک تونل سازی مکانیزه ۶۰

شکل ۵-۲: درخت خطای رویداد مربوط به خرابی در بخش برش دهنده ۶۱

شکل ۵-۳: درخت خطای رویداد مربوط به توقف دستگاه ۶۲

شکل ۵-۴: درخت خطای رویداد مربوط به مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه ۶۳

شکل ۵-۵ : درخت خطای رویداد مربوط به خرابی سگمنت ۶۴

شکل ۵-۶: درخت خطای رویداد مربوط به سایش دیسک‌ها ۶۶

شکل ۵-۸: درخت خطای رویداد مربوط به گیرکردن TBM ۶۷

شکل ۵-۹: درخت خطای رویداد مربوط به آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف ۶۹

شکل ۵-۱۰: درخت خطای رویداد مربوط به انحراف از مسیر ۶۹

شکل ۵-۱۱: درخت خطای رویداد مربوط به مشکلات مکانیکی TBM ۷۱
شکل ۵-۱۲: درخت خطای رویداد مربوط به حفاری مکانیزه راهبردی دستگاه و نصب پوشش بتنی ۷۲
شکل ۵-۱۳: درخت خطای رویداد مربوط به پیشروی کم در طول ساخت تونل با TBM..... ۷۳
شکل ۵-۱۴: درخت خطای رویداد مربوط به پشتیبانی ناکافی دستگاه و تجهیزات اجرایی ۷۴
شکل ۵-۱۵: درخت خطای رویداد مربوط به خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی ۷۵
شکل ۵-۱۶: : درخت خطای رویداد مربوط به وارد شدن خسارت به ساختمان‌های اطراف ۷۶
شکل ۵-۱۷: درخت خطای رویداد مربوط به برخورد با عوارض ناشناخته ۷۷
شکل ۵-۱۸: درخت خطای رویداد مربوط به عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب ۷۸
شکل ۵-۱۹: درخت خطای رویداد مربوط به گرفتگی و انسداد دیسک‌ها ۷۹
شکل ۵-۲۰: پارامترهای مربوط به گزینه زمین شناسی ۸۰
شکل ۵-۲۱: پارامترهای مربوط به گزینه طراحی ۸۰
شکل ۵-۲۲: پارامترهای مربوط به گزینه ریسک مدیریت ۸۱
شکل ۵-۲۳: پارامترهای مربوط به گزینه ریسک ایمنی ۸۱
شکل ۵-۲۴: پارامترهای مربوط به گزینه ریسک هزینه ۸۱
شکل ۵-۲۵: مراحل تعیین احتمال رویداد نهایی ۸۸
شکل ۵-۲۶: متغییرهای زبانی مورداستفاده کارشناسان ۹۱
شکل ۵-۲۷: مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به روش چانگ [۷] ۱۱۹
شکل ۵-۲۸: فرم نظر سنجی ارسال شده برای متخصصان جهت برآورد شدت پیامد.....۱۲۰
شکل ۵-۲۹: ساختار سلسله مراتبی پیامد ریسک های تونل سازی مکانیزه ۱۲۱
شکل ۵-۳۰: تابع عضویت فازی برای متغیر های زبانی.....۱۲۲
۵-۳۱: ماتریس امتیاز دهی ریسک ۱۳۴

شکل ۵-۳۲: ماتریس ریسک زمین شناسی ۱۳۷
شکل ۵-۳۳: ماتریس ریسک طراحی ۱۳۷
شکل ۵-۳۴: ماتریس ریسک ایمنی ۱۳۷
شکل ۵-۳۵: ماتریس ریسک مدیریت ۱۳۸
شکل ۵-۳۶: ماتریس ریسک هزینه ۱۳۸
شکل ۵-۳۷: ماتریس ریسک کلی تونل سازی مکانیزه ۱۳۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱: مراحل مدیریت ریسک ۱۰

جدول ۳-۱: ساختار تجزیه‌وتحلیل ریسک ۲۵

جدول ۳-۲: مشخصات کلی پروژه خط ۳ مترو مشهد ۳۲

جدول ۳-۳: مشخصات فنی TBM خط ۳ مترو مشهد (کارگاه فردوسی) ۳۳

جدول ۵-۱: رویدادهای بالایی، میانی و اساسی در ریسک تونل سازی مکانیزه ۸۲

جدول ۵-۲ : جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان(Renjith et al,۲۰۱۰) ۸۹

جدول ۵-۳: مشخصات و امتیازهای کسب‌شده کارشناسان شرکت‌کننده در نظرسنجی ۹۰

جدول ۵-۴: وزن متغیرهای زبانی درکمی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد اساسی .. ۹۲

جدول ۵-۵: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال‌شده برای کارشناسان پروژه (گیرکردن $T_۶$، TBM) ۹۲

جدول ۵-۶: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی (خرابی در بخش برش دهنده $T_۱$) ۹۳

جدول ۵-۷: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی (توقف دستگاه $T_۲$) ۹۳

جدول ۵-۸: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی (مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه $T_۳$) ۹۳

جدول ۵-۹: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(خرابی سگمنت $T_۴$) ۹۴

جدول ۵-۱۰: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(سایش کاتر ها $T_۵$) ۹۴

جدول ۵-۱۲: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(گیرکردن TBM، $T_۶$) ۹۵

جدول ۵-۱۳: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف $T_۷$) ۹۵
جدول ۵-۱۴: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(انحراف از مسیر $T_۸$) ۹۵
جدول ۵-۱۵: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(مشکلات مکانیکی TBM، $T_۹$) ۹۶
جدول ۵-۱۶: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی $T_{۱۰}$) ۹۶
جدول ۵-۱۷: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، $T_{۱۱}$) ۹۶
جدول ۵-۱۸: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی $T_{۱۲}$) ۹۷
جدول ۵-۱۹: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی $T_{۱۳}$) ۹۷
جدول ۵-۲۰: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(خسارت وارد بر ساختمان‌های اطراف $T_{۱۴}$) ۹۷
جدول ۵-۲۱: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(برخورد با عوارض ناشناخته $T_{۱۵}$) ۹۸
جدول ۵-۲۲: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب $T_{۱۶}$) ۹۸
جدول ۵-۲۳: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(گرفتگی و انسداد دیسک‌ها $T_{۱۷}$) ۹۸

جدول ۵-۲۴: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (خرابی در بخش برش دهنده (T_1) ۹۹

جدول ۵-۲۵: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (توقف دستگاه T_2) ۹۹

جدول ۵-۲۶: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه T_3) ۹۹

جدول ۵-۲۷: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (خرابی سگمنت T_4).....۱۰۰

جدول ۵-۲۸: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (سایش کاتر ها T_5) ۱۰۰

جدول ۵-۳۰: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (گیرکردن TBM، T_6) ۱۰۱

جدول ۵-۳۱: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقفT_7) ۱۰۱

جدول ۵-۳۲: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (انحراف از مسیر T_8).....۱۰۱

جدول ۵-۳۳: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (مشکلات مکانیکTBM، T_9) ۱۰۲

جدول ۵-۳۴: نتایج محاسبه عدد غیر فازی و احتمال شکست (حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی T_{10}) ۱۰۲

جدول ۵-۳۵: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، T_{11}) ۱۰۲

جدول ۵-۳۶: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی T_{12}) ۱۰۳

جدول ۵-۳۷: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی T_{13}) ۱۰۳

جدول ۵-۳۸: نتایج محاسبه عددغیرفازی شده و احتمال شکست (خسارت وارد بر ساختمان‌های

اطراف $T_{۱۴}$) ۱۰۳

جدول ۵-۳۹: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (برخورد با عوارض ناشناخته $T_{۱۵}$) ۱۰۳

جدول ۵-۴۰: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب $T_{۱۶}$) ۱۰۴

جدول ۵-۴۱: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (گرفتگی و انسداد دیسک‌ها $T_{۱۷}$) ۱۰۴

جدول ۵-۴۲: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (خرابی در بخش برش دهنده $T_{۱}$) ۱۰۵

جدول ۵-۴۳: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (توقف دستگاه $T_{۲}$)..... ۱۰۵

جدول ۵-۴۴: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه $T_{۳}$) ۱۰۵

جدول ۵-۴۵: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (خرابی سگمنت $T_{۴}$). ۱۰۵

جدول ۵-۴۶: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (سایش کاتر ها $T_{۵}$)... ۱۰۶

جدول ۵-۴۸: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (گیر کردن TBM، $T_{۶}$) ۱۰۶

جدول ۵-۴۹: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(آب گرفتگی کف یا چکه کردن سقف $T_{۷}$) ۱۰۶

جدول ۵-۵۰: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(انحراف از مسیر $T_{۸}$).. ۱۰۶

جدول ۵-۵۱: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(مشکلات مکانیکیTBM ، $T_{۹}$) ۱۰۶

جدول ۵-۵۲: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(حفاری مکانیزه راهبردی و

نصب پوشش بتنی T_{10}) ۱۰۶

جدول ۵-۵۳: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، T_{11}) ۱۰۷

جدول ۵-۵۴: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی T_{12}) ۱۰۷

جدول ۵-۵۵: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی T_{13}) ۱۰۷

جدول ۵-۵۶: :نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (خسارت وارد بر ساختمان های اطراف T_{14}) ۱۰۷

جدول ۵-۵۷: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (برخورد با عوارض ناشناخته T_{15}) ۱۰۷

جدول ۵-۵۸: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب T_{16}) ۱۰۸

جدول ۵-۵۹: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (گرفتگی و انسداد دیسک ها T_{17}) ۱۰۸

جدول ۵-۶۰: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (خرابی در بخش برش دهنده T_1) ۱۰۸

جدول ۵-۶۱: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (توقف دستگاه T_2) ۱۰۹

جدول ۵-۶۲: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه T_3) ۱۰۹

جدول ۵-۶۳: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(خرابی

سگمنت $T_۴$) ۱۱۰

جدول ۵-۶۴: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(سایش کاتر ها $T_۵$) ۱۱۰

جدول ۵-۶۶: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(گیر کردن TBM، $T_۶$) ۱۱۱

جدول ۵-۶۷: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(آب گرفتگی کف یا چکه کردن سقف $T_۷$) ۱۱۱

جدول ۵-۶۸: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(انحراف از مسیر $T_۸$) ۱۱۲

جدول ۵-۶۹: جدول ۵-۶۹ : احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(مشکلات مکانیکیTBM ، $T_۹$) ۱۱۲

جدول ۵-۷۰: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی $T_۱۰$) ۱۱۳

جدول ۵-۷۱: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، $T_{۱۱}$) ۱۱۳

جدول ۵-۷۲: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی $T_{۱۲}$) ۱۱۴

جدول ۵-۷۳: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی $T_{۱۳}$) ۱۱۴

جدول ۵-۷۴: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (خسارت وارد بر ساختمان های اطراف $T_{۱۴}$) ۱۱۵

جدول ۵-۷۵: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل

(برخورد با عوارض ناشناخته T_{15}) ۱۱۵

جدول ۵-۷۶: احتمال شـکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب T_{16}) ۱۱۶

جدول ۵-۷۷: احتمال شـکسـت ، میزان اهمیت نسـبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (گرفتگی و انسداد دیسک ها T_{17}) ۱۱۶

جدول ۵-۷۸: رتبه بندی احتمال وقوع ریسک(هیان و همکاران ۲۰۱۵) ۱۱۷

جدول ۵-۷۹: رتبه بندی احتمال ریسک های موثر در تونل سازی مکانیزه ۱۱۷

جدول ۵-۸۰: نمونه ای از اعدا فازی مثلثی در روش سلسله مراتبی فازی ۱۲۲

جدول ۵-۸۱: مقایسـه زوجی پیامد های زمین شـناسـی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه با بکارگیری اعدا فازی ۱۲۳

جدول ۵-۸۲: محاسبه مقادیر $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پیامدهای زمین شناسی،طراحی، مدیریت،ایمنی و هزینه ۱۲۳

جدول ۵-۸۳: مقایسه زوجی پیامد زمین شناسی و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد زمین شناسی ۱۲۴

جدول ۵-۸۴: مقایسه زوجی پیامد طراحی و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد طراحی ۱۲۴

جدول ۵-۸۵: مقایسه زوجی پیامد مدیریت و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد مدیریت ۱۲۶

جدول ۵-۸۶: مقایسـه زوجی پیامد ایمنی و محاسـبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد ایمنی ۱۲۷

جدول ۵-۸۷: مقایسـه زوجی پیامد هزینه و محاسـبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده

نسبت به پیامد هزینه ۱۲۷

جدول ۵-۸۸: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد های اصلی ریسک تونل سازی ۱۲۹

جدول ۵-۸۹: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد زمین شناسی..... ۱۲۹

جدول ۵-۹۰: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد طراحی ۱۲۹

جدول ۵-۹۱: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد مدیریت..... ۱۲۹

جدول ۵-۹۲: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد ایمنی ۱۳۰

جدول ۵-۹۳: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد هزینه ۱۳۰

جدول ۵-۹۴: وزن نرمال شده پیامد زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه..... ۱۳۰

جدول ۵-۹۵: وزن نرمال شده پیامد زمین شناسی ۱۳۰

جدول ۵-۹۶: وزن نرمال شده پیامد طراحی..... ۱۳۱

جدول ۵-۹۷: وزن نرمال شده پیامد مدیریت ۱۳۱

جدول ۵-۹۸: وزن نرمال شده پیامد ایمنی..... ۱۳۱

جدول ۵-۹۹: وزن نهایی تمامی ریسک های شناسایی شده..... ۱۳۲

جدول ۵-۱۰۰: رتبه بندی پیامد وقوع ریسک(هیان و همکاران ۲۰۱۵) ۱۳۳

جدول ۵-۱۰۱: :رتبه بندی ریسک های شناسایی شده ۱۳۳

جدول ۵-۱۰۲: اعداد مربوط به ریسک ها ی پنج گانه و کلی شناسایی شده ۱۳۵

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

دستگاه حفاری تونل(TBM)[۱] که به نام (Mole) نیز شناخته می‌شود، دستگاهی است که برای حفاری تونل‌ها از آن استفاده می‌شود. این دستگاه با استفاده از یک سطح مدور، قادر است در قشرهای خاکی و سنگی زمین حفاری کند. این نوع ماشین‌آلات توانایی ایجاد حفره در هر نوع زمینی، از سنگ گرفته تا ماسه را دارند. قطر تونل‌هایی که این دستگاه ایجاد می‌کند در محدوده‌ی یک متر(با استفاده از میکرو TBM ها) تا نزدیکی ۱۶ متر(TBM های امروزی) قرار دارند. برای کندن تونل‌هایی که کمتر از یک متر قطر دارند، به‌طورمعمول، بجای استفاده از TBM ها، از روش ساخت‌وساز بدون گودال یا حفاری افقی استفاده می‌کنند.

دستگاه‌های حفاری تونل، به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های حفاری و انفجار صخره‌ها و کندن زمین با دست مورداستفاده قرار می‌گیرد. TBM ها مزایایی همچون کاهش تعرض به زمین‌های مجاور تونل را دارند. این دستگاه به‌صورت قابل‌توجهی هزینه آستر کشیدن تونل را کاهش می‌دهند که خود این باعث شده برای استفاده در مناطق شهری مناسب باشند. ایراد عمده‌ی این دستگاه قیمت بالای آن است. TBM ها برای استفاده در ساخت‌وسازها، گران‌قیمت بوده و آن‌ها را به‌سختی می‌توان جابجا کرد. هرچند باوجود طویل بودن تونل‌های مدرن، هزینه استفاده از دستگاه‌های حفاری تونل، در برابر روش‌های سنتی حفر و انفجار به‌مراتب پایین‌تر است. به همین دلیل تونل سازی با دستگاه‌هایTBMدر یک پروژه کوتاه هزینه بیشتری دارد [۲،۱].

امروزه به‌طور چشم‌گیری از ماشین‌های حفاری تمام مقطع در حفر تونل‌های بلند استفاده می‌شود. ایده‌ی ساخت ماشین‌های حفاری تونل به قبل از سال ۱۸۵۰ برمی‌گردد . اولین ماشین حفاری تمام مقطع(TBM) که مشخصاتی مانند TBM های امروزی داشت توسط چارلز ویلسون[۲] در

[۱] TBM Boring Machine

[۲] Charles Wilson

سال ۱۸۵۱ ساخته شد. جیمز رابینز[1] در سال ۱۹۵۴ اولین ماشین حفاری تمام مقطع نسل امروزی را ساخت. ماشین‌های اولیه از نوع ماشین‌های حفر تونل باز بودند که با تغییراتی بر روی آن‌ها دستگاه‌های حفاری تمام مقطع از نوع سپردار ساخته شد. اولین ماشین حفاری دو سپره در سال ۱۹۷۲به کار گرفته شد[۳].

ایده‌ی این ماشین توسط شرکت seli ایتالیا مطرح و با همکاری شرکت رابینز ساخته شد. امروزه به‌طور گسترده، انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع با توجه به شرایط زمین‌شناسی و نیازهای پروژه برای حفاری تونل‌ها در سنگ سخت و خاک مورداستفاده قرار می‌گیرند [۳].

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

با افزایش روزافزون شهرنشینی، گسترش شهرها و نیاز فزاینده به زمین به‌ویژه در مناطق شلوغ و پرتراکم شهرها، استفاده از فضاهای زیرزمینی و پروژه‌های تونل سازی برای اهداف مختلف از قبیل ایجاد راه‌های ارتباطی، خطوط مترو، تأسیسات زیربنایی و زیر ساختارها افزایش چشمگیری در سال‌های اخیر داشته است. در کشور ایران نیز پروژه‌های تونل سازی با شتاب زیادی در حال افزایش بوده و علاوه بر ۶ کلان‌شهر کشور در اکثر شهرهای بزرگ نیز پروژه‌های تونل سازی چشم‌گیری برای اهداف مختلف در حال اجرا یا مطالعه است. پروژه‌های تونل سازی عموماً پروژه‌هایی با پیچیدگی‌های تأثیرگذار ازجمله شرایط متغیر و نامطمئن زمین هستند. بنابراین اتمام پروژه در چارچوب تعیین‌شده (زمین‌شناسی، طراحی، مدیریت، هزینه، ایمنی) نیازمند شناخت ریسک‌ها، آنالیز و درنهایت رتبه‌بندی برای پاسخ به آن‌ها است. شناخت هرچه بیشتر عوامل تأثیرگذار بر روند پروژه می‌تواند راه را برای این منظور هموار کند. با توجه به خطرات و پیچیدگی‌های اشاره‌شده نیاز به این پژوهش احساس شده و ارزیابی ریسک تونل سازی به روش مکانیزه با استفاده از روش تحلیل درخت خطا می‌تواند به شناسایی ریسک‌ها در پروژه‌های تونل سازی کمک کند و به‌گونه‌ای طبقه‌بندی شوند که با کنترل علل ریشه‌ای ریسک‌های

[1] Robins

اصلی، بتوان از به وقوع پیوستن آن‌ها جلوگیری کرد و یا شدت اثر حوادث را کاهش داد.

ریسک پروژه‌های تونل سازی همواره قابل‌توجه بوده و از طریق مدیریت مناسب می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آن‌ها را کمینه نمود. ازجمله علل اصلی طولانی‌تر شدن و افزایش هزینه‌های پروژه‌های تونل سازی، مدیریت ناقص و ضعیف به‌ویژه مدیریت ریسک گزارش‌شده است. مدیریت ریسک مستلزم شناسایی، ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های مختلف است. رتبه‌بندی و خوشه‌بندی ریسک‌ها، قسمت کلیدی این فرایند به شمار می‌روند. زیرا با انجام رتبه‌بندی، برتری هر ریسک در مقابل سایر ریسک‌ها مشخص و درنتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک برنامه‌ریزی کند.

فرایند مدیریت ریسک یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدیریت پروژه هست به‌طوری‌که مطابق با برخی تفکرها و نگرش‌های نوین، مدیریت ریسک را اساس و جوهره مدیریت پروژه دانسته‌اند. به‌ویژه پروژه‌های تونل سازی که به دلیل ماهیت ساختاری‌شان(عدم شاخت کافی از وضعیت زمین، شرایط پیرامونی و عدم قطعیت‌های مرتبط باآنکه در بسیاری موارد منجر به خسارت‌های سنگینی می‌شود) در مقایسه با پروژه‌های مشابه، همواره با درصد بالایی از ریسک همراه است. مدیریت درست و به‌موقع این ریسک‌ها موجب حداقل شدن احتمال وقوع یا اثر این پیامدهای منفی بر اهداف پروژه می‌شود.

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف اصلی از انجام این مطالعه، ارائه یک رویکردی مبتنی بر ارزیابی ریسک است تا بتوان به‌وسیله آن نتیجه ریسک‌های تونل سازی مکانیزه را کمّی سازی کرد و سپس با شناسایی پارامترهای نامطلوب برای کاهش و مقابله با این پارامترها، گامی مؤثر در بهینه‌سازی ریسک‌های تونل سازی مکانیزه برداشت. پروژه‌های ساخت تونل به دلیل عدم شناخت کافی از وضعیت زمین و عدم قطعیت‌های مرتبط در طراحی و اجرای آن‌ها ازجمله پرمخاطره‌ترین پروژه‌ها به شمار می‌روند. شناسایی و ارزیابی پارامترها و انتخاب ریسک‌ها ازجمله مهم‌ترین عواملی است که دارای اهمیت بسیار است. درنهایت با توجه به نتایج و خروجی‌های ماتریس ریسک، پرمخاطره‌ترین عوامل که می‌توانند پروژه تونل سازی را تحت تأثیر قرار دهند را شناسایی کرد و با اقدامات

آگـاهـانـه لازم را برای کنترل و مقابله با آن‌ها در اولویت قرارداد. با انجام صـــحیح و به‌موقع این اقدامات، گام مؤثری در کاهش هزینه‌ها، روند اجرای پروژه و ایمنی در تونل سازی مکانیزه را می‌توان برداشت.

۱-۴- مراحل تحقیق

تحقیق حاضر را می‌توان به ۷ بخش اصلی تقسیم کرد که بخش اول آن بررسی ادبیات و پیشینه موضوع از طریق مطالعه سوابق، کتب ، پایان‌نامه‌ها و نشریات است که می‌توان به درک بهتری از پژوهش‌های انجام‌شده قبلی متدلوژی مورداستفاده و مفاهیم اساسی تحقیق دست پیدا کرد. موضوعاتی از قبیل نحوه گردآوری اطلاعات موردنیاز، شناخت مبانی روش درخت خطا، کاربرد این روش در محیط‌های تونلی و زیرزمینی، نحوه چگونگی شناسایی خطاها، چگونگی تجزیه‌وتحلیل خروجی‌ها و... مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش دوم، شناسایی تونل (مطالعه موردی) و روش کار تونل و همچنین فعالیت‌های صورت گرفته در آن، ازجمله ملزومات این روش است. برای این امر بازدید از تونل موردمطالعه و شناخت فعالیت‌های آن بسیار حائز اهمیت خواهد بود.در بخش سوم، خطرات موجود شناسایی‌شده و عوامل آن مشخص می‌شود. با استفاده از گفتگو و مصاحبه رسمی و غیررسمی و ارسال پرسشنامه به مدیران، و کارکنان و کارشناسان این خطرات شناسایی خواهند شد. در بخش چهارم، احتمال وقوع ریسک و عواقب ناشی از آن برای دستگاه تونل زنی TBM با استفاده از روش تجزیه‌وتحلیل درخت خطای فازی (FFTA)[۱] و فرایند تحلیل سلسله مراتبی و تصمیم‌گیری چند معیاره فازی (FAHP)[۲] مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. با تشکیل درخت خطا برای رویدادهای اصلی، احتمال وقوع رویداد با توجه به ساختار درخت خطا تعیین خواهد شد و همچنین با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیارِ فازی، شدت یا پیامد رویدادها رتبه‌بندی خواهند شد و در نهایت پس از تعیین مؤلفه‌های ریسک (احتمال وقوع و پیامد)، ارزیابی ریسک انجام خواهد شد. در بخش انتهایی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تطبیق روش‌های ارزیابی فوق می‌توان ریسک هر یک از عوامل شناسایی‌شده را محاسبه کرد.

---

۱ Fuzzy Fault Tree Analysis

۲ Fuzzy Analytic HierarchyProcess

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

تحقیق حاضر در ۶ فصل ارائه‌شده است که در زیر می‌توان نحوه فصل‌بندی انجام‌شده را مشاهده کرد.

۱- در فصل اول کلیاتی از انجام پروژه به‌صورت خلاصه بیان‌شده است.

۲- در فصل دوم تعاریفی در مورد ریسک و فرایندهای ریسک مطرح‌شده است

۳- در این فصل ابتدا مروری بر ارزیابی‌های انجام‌شده در حوزه مدیریت ریسک در پروژه‌های تونل سازی انجام خواهد شد و سپس به‌مرور دلایل برتری روش استفاده‌شده در این پایان‌نامه پرداخته‌شده است.

۴- فصل چهارم شامل تشریح دو روش، درخت خطای فازی و فرایند سلسله مراتبی فازی است تا با اجزای مورداستفاده در این تحقیق آشنایی کافی صورت گیرد.

۵- در فصل پنجم ریسک‌های تونل سازی مکانیزه در خط ۳ مترو مشهد با استفاده از درخت خطای فازی و فرایند سلسله مراتبی فازی ارزیابی‌شده است.

۶- نتایج حاصل از تحقیق و همچنین پیشنهادهایی به‌منظور بهبود هرچه بیشتر کارهای آینده، در این فصل، ارائه‌شده است.

فصل دوم

مفاهیم ریسک و مدیریت ریسک و روش‌های ارزیابی آن

۲-۱- مقدمه

منافع عمومی در زمینه تحلیل ریسک طی سه دهه گذشته گسترش‌یافته است، درحالی‌که تجزیه‌وتحلیل ریسک به‌عنوان یک رویکرد مؤثر و جامع که مکمل مدیریت و به‌طورکلی تقریباً تمام جنبه‌های زندگی ما را تکمیل و تکمیل‌تر می‌کند، گسترش‌یافته است. افزون بر این، سازگاری همه‌جانبه تحلیل ریسک توسط بسیاری از رشته‌ها، همراه با استقرار آن توسط صنعت و سازمان‌های دولتی در تصمیم‌گیری، منجر به پیشرفت بی‌سابقه‌ای از تئوری، روش‌شناسی و ابزارهای عملی شده است[۴].

ریسک به‌عنوان ارزیابی احتمالی که فرد یا چیزی، تحت تأثیر خطر قرار می‌گیرد، در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که "خطر" هرگونه شرایط نامساعد یا منبع احتمالی یک حادثه نامطلوب است که ممکن است در معرض صدمه باشد. علاوه بر این، خطر به‌عنوان یک اندازه‌گیری در عدم قطعیت شدت خطر یا اندازه‌گیری احتمال و شدت اثرات نامطلوب تعریف‌شده است. به‌طورکلی، "خطر" باید به‌عنوان یک ویژگی مواد یا فرآیندها تعریف شود که ممکن است به‌طور بالقوه باعث آسیب شود[۴].

با توجه محدودیت‌های ناشی از کمبود فضا در سطح زمین، نیاز به توسعه‌ی زیربنایی و کوتاه کردن راه‌های ارتباطی مابین مناطق جمعیتی و صنعتی و دلایل متعدد دیگر نظیر تراکم در مناطق شهری، نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل‌ها روزبه‌روز افزایش‌یافته است. با توجه به مسائل و مشکلات متعدد و پیچیده موجود در احداث تونل‌ها، نیاز است که ریسک‌ها در مراحل مختلف اجرای این سازه‌ها شناسایی‌شده و مدیران ارشد (چه در سازمان کارفرما و یا در سازمان پیمانکار) با تمرکز لحظه‌ای بر این مقوله تمامی سعی خویش را در کنترل زمان و هزینه پروژه انجام دهند.

پروژه‌های احداث تونل و بخصوص تونل‌های شهری به دلیل پیچیدگی‌های اجرایی و استفاده از فنّاوری‌های نوین و شرایط خاص کار در زیرزمین دارای ریسک‌های ویژه‌ای هستند که عدم توجه به آن‌ها می‌تواند تأخیرهای زمانی و افزایش هزینه فراوانی را بر پروژه تحمیل کند؛ بنابراین نیاز است ریسک‌ها در این پروژه‌ها به‌دقت شناسایی‌شده و به‌گونه‌ای طبقه‌بندی گردند که به‌راحتی قابل‌ارائه به

مدیران ارشد پروژه و یا حتی پیمانکاران جزء بوده و آنان بتوانند با کنترل علل ریشه‌ای ریسک‌های اصلی، از وقوع آن‌ها جلوگیری کرده و یا شدت اثر حـوادث را کـاهش دهنـد[۵].

۲-۲- تعریف ریسک

واژه ریسک[۱]، مفاهیم متعددی دارد. زمانی که به تعاریف مراجعه شود متوجه می‌شویم که هر یک از محققان به فراخور حال، تعریف خاص موردنظر خود را با ارائه دلیل و مباحث گسترده مطرح کرده‌اند. ریسک اجتناب‌ناپذیر است اما قوانین رقابتی شرکت‌ها و سازمان‌ها را مجبور می‌سازند تا نگاه دقیق‌تری به استراتژی مدیریت ریسک داشته باشند و بدین طریق کارایی عملیاتی و مزیت رقابتی‌شان را افزایش دهند . ریسک محرک قدرتمندی است . امروزه شکست در مدیریت ریسک می‌تواند سبب از دست دادن نیروی انسانی حرفه‌ای، از دست دادن شرکای تجاری و از دست دادن بازار یا فرصت‌های درآمدزایی و از همه بدتر از دست دادن کامل عملیات کسب‌وکار شود. هر سازمانی با ریسک دست‌وپنجه نرم می‌کند، اما در صورت درک و مدیریت درست ریسک ،آن ریسک می‌تواند به مزیت رقابتی تبدیل شود. دو تعریف از مهم‌ترین تعاریف ارائه‌شده از ریسک به شرح زیر است:

- احتمال(کم یا زیاد) وارد شدن آسیب و زیان توسط خطرات، ریسک نامیده می‌شود. درواقع به شانس یا احتمال اینکه کسی از خطر آسیب ببیند یا اموالی دچار صدمه شوند، ریسک گفته می‌شود.
- ریسک، به‌احتمال وقوع یک اتفاق نامعلوم گفته می‌شود، در شرایطی که آن اتفاق بتواند، سبب بروز مشکلاتی شود؛ به‌عبارت‌دیگر ریسک به موقعیتی بستگی دارد که نتیجه واقعی یک‌چیز، احتمالاً تحت تأثیر یک اتفاق نامعلوم قرار دارد و احتمال و اثرات آن اتفاق دقیقاً قابل‌تعیین باشد.
- باآنکه تاکنون تعاریف متعددی از ریسک ارائه‌شده است، می‌توان ادعا کرد که همه این تعاریف برای بیان موقعیت‌هایی ارائه‌شده‌اند که سه عامل مشترک را می‌توان در آن‌ها مشاهده

[۱] Risk

کرد. موقعیت‌هایی با ریسک توأم هستند که: ۱- عمل یا اقدام بیش از یک نتیجه به بار می‌آورد. ۲- تا زمان ملموس شدن نتایج از حصول هیچ‌یک از نتایج آگاهی قطعی در دست نباشد. ۳- حداقل یکی از نتایج ممکن‌الوقوع می‌تواند پیامدهای نامطلوبی را به همراه داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر ، عدم اطمینان از نتایج یک عمل و قرار گرفتن در معرض این نامعلومی‌ها از مهم‌ترین مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده انواع ریسک‌ها می‌باشند [۷،۵].

۲-۳- تعریف مدیریت ریسک

مدیریت ریسک[۱] عبارت است از فرآیندی که از طریق آن‌یک سازمان یا سرمایه‌گذار با روش بهینه در مقابل انواع ریسک‌ها از خود واکنش نشان می‌دهد، بر این اساس مدیریت ریسک ابتدا انواع ریسک‌ها را شناسایی می‌کند و سپس روش کنترل آن‌ها را مشخص می‌سازد. در جدول ۲-۱ مراحل اصلی مدیریت ریسک به‌طور مختصر بیان‌شده است [۸،۹].

جدول ۲-۱: مراحل مدیریت ریسک

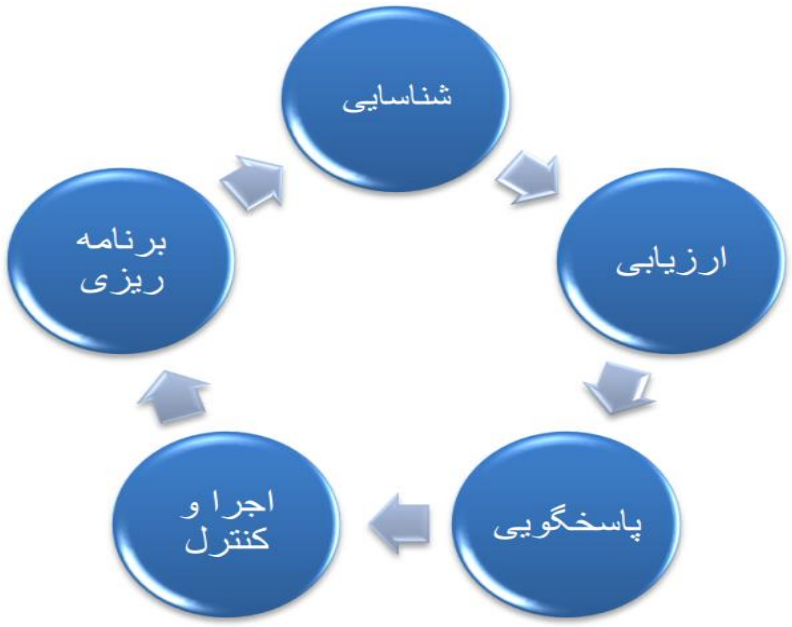
مراحل مدیریت ریسک	اقدامات اصلی
شناسایی ریسک	شناسایی ریسک‌های نهفته و محتمل
	طبقه‌بندی ریسک‌های شناسایی‌شده
	نمایش ساختار ریسک‌های شناسایی‌شده
ارزیابی ریسک	ارزیابی اثرات ریسک
پاسخ به ریسک	شناسایی پاسخ‌های مختلف برای یک تهدید
	انتخاب گزینه مناسب
پایش و کنترل ریسک	بررسی اقدامات مراحل پیشین
	اصلاح مراحل قبل و طرح‌ریزی جدید

[۱] Risk Managment

۲-۴- فرایندهای اصلی مدیریت ریسک

یکی از قسمت‌های مهم اتخاذ تصمیم، مدیریت ریسک است. مدیریت ریسک یک فرایند پیچیده و شامل مراحل شناسایی، آنالیز و مقابله با ریسک (پاسخ به ریسک) است. مدیریت ریسک، فرایند شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌های بالقوه است. هر بخش، واژه مدیریت ریسک را با شرایط خود به کار گرفته، تکنیک‌ها و مفاهیم آن را با شرایط مجموعه خود تطبیق می‌دهد. مدیریت ریسک اغلب فرایند سیستماتیک و پیوسته‌ای را از شناسایی، اندازه‌گیری، تحلیل کنترل، جلوگیری، کاهش و ارزیابی ریسک و جذب اعتبار دنبال می‌کند. مدیریت ریسک فرایند نظام‌یافته‌ی شناسایی، تحلیل و واکنش به ریسک پروژه است. این مدیریت متضمن بیشینه نمودن احتمال و پیامد رویدادهای مثبت و کمینه کردن احتمال و پیامد رویدادهای نامطلوب در راستای اهداف پروژه است [۸،۹].

اولین گام، تعریف اهدافی است که شرکت یا سازمان از فرایند مدیریت ریسک به دنبال آن‌ها است و اهداف مدیریت ریسک باید با استفاده از اطلاعات ارائه‌شده توسط مدیریت ریسک به‌وسیله هیئت‌مدیره یا مالکان شرکت تعریف شوند. شکل ۲-۱ نمایی از فرایندهای اصلی مدیریت ریسک را نشان می‌دهد [۸،۷].



شکل ۲-۱: فرایندهای اصلی مدیریت ریسک

۲-۴-۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک

برنامه‌ریزی مدیریت ریسک، فرایند تصمیم‌گیری در مورد نحوه‌ی نگـرش و برنامه‌ریزی فعالیت‌های مدیریـت ریسک یک پـروژه است. در برنامه‌ریزی برای فرایندهای مدیریت ریسک، حصول اطمینان از اینکه سـطح، نـوع و دامنه‌ی دیـد مدیریت ریسک با ریسـک و نـیز بااهمیت پروژه بـرای سازمان متناسب است، اهمیت دارد.

۲-۴-۲- شناسایی ریسک

شناسایی ریسک متضمن تعیین و مستندسازی ویژگی‌های ریسک‌هایی است که می‌توانند بر پروژه اثر بگذارند. در صورت امکان معمولاً متصدیان شناسایی ریسک افراد زیر را شامل می‌شوند: گروه پروژه، گروه مدیریت ریسک، صاحب‌نظران موضوعی از سایر قسمت‌های شرکت، مشتریان، کاربران نهایی، سایر مدیران پروژه، ذی‌نفعان و صاحب‌نظران خارجی. شناسایی ریسک فرایندی تکرارپذیر است.نخستین تکرار می‌تواند توسط بخشی از گروه پروژه یا توسط گروه مدیریت ریسک انجام شود. کل گروه پروژه و ذی‌نفعان اصلی می‌توانند انجام دهنده‌ی دومین تکرار باشند. جهـت تحقـق یـک تحلیل منصفانه، افرادی که در پروژه درگیر نیستند، می‌توانند تکرار نهایی را انجام دهند [۸،۷].

ابزارها و تکنیک‌های شناسایی ریسک عبارت‌اند از:

۱- بازنگری‌های مستندسازی: انجام یک بازنگری ساختاریافته از مفروضات و برنامه‌های پـروژه در کـل پروژه و نیز در سطوح تفصیلی محدوده، پرونده‌های پیشین پروژه و سایر اطلاعات، معمولاً گام آغازین اتخاذشده توسط گروه پروژه محسوب می‌شود.

۲- تکنیک‌های جمع‌آوری اطلاعات: نمونه‌های تکنیک‌های جمع‌آوری اطلاعات مورداستفاده در شناسایی ریسک می‌توانند شامل طوفان ذهنی، دلفی، مصاحبه و تحلیل قوت‌ها، ضعف‌ها، فرصت‌ها و تهدیدها(SWOT) باشند.

الف: طوفان ذهنی[۱] : شاید طوفان ذهنی متداول‌ترین تکنیک مورداستفاده برای شناسایی ریسک باشد. هدف، به دست آوردن فهرستی جامع از ریسک‌هایی است که می‌توانند بعداً در فرایندهای تحلیل کیفی و کمی ریسک بررسی گردند.

معمولاً گروه پـروژه طوفان ذهنی را انجـام می‌دهد، هرچند مجموعه‌ای از صاحب‌نظران چند تخصصی نیز می‌توانند این تکنیک را انجام دهند. این افراد تحت رهبری یک تسهیل‌کننده، ایده‌هایی در مـورد ریسک خلق می‌کنند. منابع ریسک در محدوده‌ی وسیعی شناسایی و برای بررسی در حین جلسه به همه اعلام می‌گردد. سپس ریسک‌ها برحسب نوع ریسک دسته‌بندی و تعاریف آن‌ها به‌وضوح بیان می‌گردد [۸،۷].

ب: تکنیک دلفی[۲]: تکنیک دلفی شیوه‌ای برای دستیابی به‌اتفاق نظر صاحب‌نظران درباره موضوعی مثل ریسک پروژه است. صاحب‌نظران ریسک پروژه شناسایی‌شده خواهند بود اما به‌صورت بی‌نام مشارکت می‌نمایند. تکنیک دلفی تسهیل‌کننده برای دریافت ایده‌هایی در مورد ریسک‌های مهم پـروژه، از یک پرسشنامه استفاده می‌نماید. پاسخ‌ها تحویل و سپس برای اظهارنظر بیشتر بین صاحب‌نظران به گردش درمی‌آیند. اتفاق‌نظر در ریسک‌های اصلی پروژه ممکن است در خلال چند دور از این فرایند محقق شود. تکنیک دلفی در کاهش تعصب در داده ها و حفظ افراد از اعمال اثر بیجا بر ماحصل کمک می‌نماید.

پ: مصاحبه[۳]: ریسک‌ها را می‌توان از طـریق مصاحبه با مدیران پروژه‌ی باتجـربه یـا صاحب‌نظران موضـوعی شناسایی نمـود. شخص مسئول شناسایی ریسک افراد مناسب را شناسایی می‌کند، آن‌ها را در جریان پروژه قرار داده و اطلاعاتی مثل ساختار شکست کار و فهرست مفروضات را فراهم می‌نماید. مصاحبه‌شوندگان ریسک‌های پروژه را بر اساس تجربیاتشان، اطلاعات پروژه و سایر منابعی که مفید

[۱] Brainstorming
[۲] Delphi Technique
[۳] Interviewing

می‌دانند، شناسایی می‌کنند [۸،۷].

۲-۴-۳- تحلیل کیفی ریسک

انجام یک تحلیل کیفی از ریسک‌ها و وضعیت‌ها به‌منظور اولویت‌بندی اثرهای آن‌ها بر اهداف پروژه تحلیل کیفی نامیده می‌شود.

تحلیل کیفی ریسک فرایند سنجش تأثیر و شانس وقوع ریسک‌های شناسایی‌شده است. این فرایند ریسک‌ها را بر اساس اثرهای بالقوه‌ی آن‌ها بر اهداف پـروژه اولویت‌بندی می‌کند. تحلیل کیفی ریسک یک‌راه تعیین اهمیت پرداختن به ریسک‌های خاص و هدایت واکنش‌ها بـه ریسک است. در ارزیابی کیفی، ریسک‌ها با استفاده از عبارت‌ها و جمله‌های توصیفی تشریح می‌شوند و تلاش می‌شود با ارائه جزئیات کافی از ریسک، راه‌های مناسب پاسخ به آن جستجو شود. درعین‌حال، در فرایند ارزیابی کیفی سعی می‌شود با نگرش مفهومی توصیفی در اولویت‌بندی ریسک‌ها، احتمال بروز ریسک و تأثیر آن در بخش‌های مختلف پروژه موردبررسی قرار گیـرد. این در حالی است که در ارزیابی کمی از مقادیر عددی برای تبیین ابعاد و اهمیت و تأثیرهای ریسک بـر اهداف پروژه به‌صورت مجزا یا گروهی بهره گرفته می‌شود.

مهم‌ترین ابزارها و تکنیک‌های تحلیل کیفی ریسک عبارت‌اند از:

۱- **احتمال و تأثیر ریسک:** احتمال ریسک و پیامدهای ریسک می‌توانند با واژه‌هایی کیفی مثل بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین و بسیار پایین توصیف گردند. احتمال ریسک شانس به وقوع پیوستن یک ریسک است. پیامدهای ریسک عبارت است از تأثیر بر اهداف پروژه، درصورتی‌که یک رویدادِ دارای ریسک به وقوع پیوندد. این دو بعد ریسک برای رویدادهای خاص دارای ریسک به کار می‌روند نـه برای کل پروژه. تحلیل ریسک‌ها با استفاده از احتمال و پیامدها به شناسایی ریسک‌هایی کمـک می‌نماید که می‌بایست به‌طور جسورانه مدیریت شوند [۸]،[۷].

۲- **ماتریس رتبه‌بندی احتمال/ تأثیر ریسک**

می‌توان ماتریسی ساخت که بـر اسـاس ترکیـب مقیاس‌های احتمال و تأثیر، رتبه‌ی ریسک (بسیار بالا، بـالا، متوسـط، پایین و بسیار پایین) را برای ریسک‌ها یا وضعیت‌ها تعیین نماید. ریسک‌های دارای احتمال بالا و تأثیر بالا احتمالاً مستلزم تحلیل بیشـتر ازجمله کمی نمایی و مدیریت جسورانه‌ی ریسک می‌باشـند. رتبه‌بندی ریسـک با اسـتفاده از یک ماتریس و مقیاس‌های ریسـک برای هر ریسـک انجام می‌شود.

۳- تجزیه‌وتحلیل چه می‌شود اگر[۱] ؟

در ایمنی فرایند روش و اسـتفاده از چک‌لیست‌های ایمنی دو ابزار جداگانه تلقی می‌شوند اما در حال حاضـر این دو روش به‌صـورت مکمل هم مورداسـتفاده قرار می‌گیرند. البته این امر به این معنی نیسـت که از روش‌های یادشـده نتوان به‌طور مجزا اسـتفاده کرد زیرا هر دو روش به‌عنوان ابزارهای تجزیه‌وتحلیل ایمنی پذیرفته‌شـده‌اند که در این بخش تنها روش What If Analysis? تشـریح خواهد شد.

نام واقعی روش چه می‌شـود اگر؟ از عبارت اگر این امر رخ دهد پیامدهای آنچه خواهد شـد مشتق شـده و هدف اصـلی از اجرای آن، اعمال توجه و تمرکز به اثرات رویدادهای ناخواسته بر روی سیستم اسـت. اسـاس این روش آنالیز طرح سـؤالاتی که با عبارت ساده چه می‌شود اگر... ؟ و یافتن پاسخ‌های واقعی و دقیق آن‌ها قرار دارد. درصورتی‌که تکنیک توسط افراد باتجربه و دارای دانش کافی از سیستم اجرا شود می‌تواند یک ابزار بسیار مفید در تجزیه‌وتحلیل ایمنی سیستم‌ها باشد [۸]،[۷].

۲-۴-۴- تحلیل کمی ریسک[۲]

اندازه‌گیری احتمال و پیامدهای ریسک‌ها و برآورد آثار آن‌ها بر اهداف پروژه تحلیل کمی نامیده می‌شود.

---

۱ What If Analysis?

۲ Quantitative Risk Analysis

تحلیل کمی ریسک معمولاً در پی تحلیل کیفی ریسک انجام می‌گیرد. این فرایند مستلزم شناسایی ریسک است. فرایندهای کیفی و کمی تحلیل ریسک می‌توانند به‌صورت مجزا و یا باهم مورداستفاده قرار گیرند. ملاحظات مربوط به قابلیت دسترسی زمان و بودجه و نیاز به گزارش‌های کیفی و کمی در مورد ریسک و تأثیرات آن، روش(های) استفاده را تعیین خواهند نمود. هنگامی‌که تحلیل کمی تکرار می‌شود، روندها در نتایج می‌توانند نیاز به اقدام بیشتر یا کمتر مدیریت ریسک را بیان نمایند. بر پایه پیکر دانش مدیریت پروژه ، ارزیابی کمی، در مورد ریسک‌هایی انجام می‌شود که در ارزیابی کیفی دارای اولویت بالا هستند و می‌توانند هدف‌های پروژه را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متأثر سازند. ارزیابی کمی ریسک، تأثیر این‌گونه ریسک‌ها را به‌صورت عددی مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌دهد و امکان تصمیم‌گیری در فضای دارای عدم قطعیت را فراهم می‌کند [۸،۷].

مهم‌ترین ابزارها و تکنیک‌های تحلیل کمی ریسک عبارت‌اند از:

۱- **تحلیل حساسیت**: تحلیل حساسیت به تعیین ریسک‌هایی که دارای بیشترین تأثیر بالقوه بر پروژه هستند، کمک می‌نماید. تحلیل حساسیت هنگامی‌که همه‌ی عناصر دیگر عدم قطعیت در ارزش‌های مبنایشان نگه‌داشته می‌شوند، به بررسی حد عدم قطعیت هر عنصر تأثیرگذار بر هدف تحت بررسی پروژه می‌پردازد.

۲- **تحلیل درخت رویداد :** تحلیل تصمیم معمولاً به‌صورت یک درخت تصمیم ساختاردهی می‌شود. درخت تصمیم نموداری است که یک تصمیم را تحت ملاحظات و آثار انتخاب یک یا دیگر گزینه‌های در دسترس تشریح می‌نماید. درخت تصمیم احتمالات ریسک‌ها و هزینه‌ها یا پاداش‌های هر مسیر منطقی رویدادها و تصمیم‌های آتی را دربرمی گیرد. هنگامی‌که تمام آثار غیرقطعی، هزینه‌ها، پاداش‌ها و تصمیم‌های بعدی کمی شدند، حل درخت تصمیم نشان می‌دهد که کدام تصمیم بیشترین ارزش مورد انتظار را برای تصمیم‌گیرنده نتیجه می‌دهد [۸،۷].

۳- روش تحلیل درخت خطا

یکی از روش‌های مورداستفاده در ارزیابی کمی، روش تحلیل درخت خطا است. در این تحقیق برای بررسی و ارزیابی ریسک‌های تونل سازی مکانیزه از این روش استفاده‌شده است. لذا در مورد این روش در فصل ۴ و ۵ به‌طور کامل شرح داده خواهد شد.

۲-۴-۵- برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک

تهیه رویه‌ها و تکنیک‌هایی جهت افزایش فرصت‌ها کاهش تهدیدها بر اهداف پروژه برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک تعریف می‌شود. برنامه‌ریزی واکنش به ریسک فرایند تکوین انتخاب‌ها و تعیین اقداماتی برای افزایش فرصت‌ها و کاهش تهدیدها بر اهداف پروژه است. این فرایند دربرگیرنده‌ی شناسایی و تخصیص افراد یا قسمت‌هایی به‌منظور پذیرش مسئولیت هر واکنش موردتوافق به ریسک است. این فرایند اطمینان می‌دهد که به ریسک‌های شناسایی‌شده به نحو شایسته‌ای پرداخته می‌شود. اثربخشی برنامه‌ریزی واکنش مستقیماً تعیین خواهد نمود که آیا ریسک پروژه افزایش یا کاهش می‌یابد.

برنامه‌ریزی واکنش به ریسک باید با شدت ریسک متناسب باشد، در مواجهه با چالش‌ها ازنظر هزینه‌ای اثربخش باشد، برای موفقیت‌آمیز بودن به هنگام باشد، با توجه به شرایط پروژه واقع‌بینانه باشد، موردتوافق همه‌ی قسمت‌های درگیر باشد و توسط یک شخص مسئول پذیرفته‌شده باشد. اغلب انتخاب بهترین واکنش به ریسک از میان گزینه‌های مختلف الزامی است.

مهم‌ترین ابزارها و تکنیک‌های برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک‌ها عبارت‌اند از:

۱- **اجتناب**[1]: اجتناب از ریسک عبارت است از تغییر برنامه‌ی پروژه به‌منظور حذف ریسک یا وضعیت یا حفظ اهداف پروژه از تأثیر ریسک. هرچند گروه پروژه هرگز نمی‌تواند تمام رویدادهای دارای ریسک را حذف نماید، ممکن است از بعضی ریسک‌های خاص اجتناب گردد.

بعضی از رویدادهای دارای ریسکی را که در ابتدای پروژه پدیدار می‌شوند می‌توان از طریق

[1] Risk Avoidance

بـیان واضح الزامات، کسب اطلاعات، بهبود ارتـباطات یـا فراگـیری تخصـص حل‌وفصل نمـود. کاهش محدوده برای اجتـناب از فعالیت‌های بـا ریسـک بالا، افزودن منابع یا زمان، اتخاذ یک رویکـرد شناخته‌شده به‌جای یک رویکرد نو یا اجتناب از یک پیمانکار فرعی ناشناخته می‌توانند نمونه‌هایی از اجتناب باشند.

۲- **انـتقال**[۱]: انـتقال ریسک درصدد انتقال پیامد یک ریسک همراه با مالکیت واکـنش آن بـه شـخص ثالـث است. انـتقال ریسـک، ریسک را حذف نمی‌نماید بلکه به‌سادگی مسؤولیت مدیریت آن را به شخص دیگری واگذار می‌کند. انـتقال دادن مسـؤولیت ریسـک در مواجهـه بـا ریسک‌های مالی بسیار اثـربخش است. انتقال ریسک تقریباً همیشه متضمن پرداخت یک حق بـیمه ریسـک بـه شـخص پذیرنده‌ی ریسک است. این پرداخت شامل اسـتفاده از بـیمه، ضمانت‌نامه‌های عملکـردی، تضمین‌ها و تضمین‌ها است. پیمان‌ها می‌توانند برای انتقال مسؤولیت ریسک‌های معین به شـخص دیگـر مورداستفاده قرار گیرند. درصورتی‌که طرح پروژه پایدار باشـد، استفاده از یک پیمان قیمت مقطوع می‌تواند ریسک را به فروشنده انـتقال دهـد. هرچـند یـک پیمان بازپرداخت هزینه بیشتر ریسک‌ها را به مشـتری یـا سرمایه‌گذار محول می‌نماید، اگر تغییرات میان پروژه‌ای وجود داشته باشد این نوع پیمان می‌تواند در کاهش هزینه کمک نماید.

۳- **تعدیـل**[۲]: تعدیـل خواسـتار کاهش احتمال و یا پیامدهای یک رویداد دارای ریسـکِ نـامطلوب تـا یـک آسـتانه قابل‌پذیرش است. اقدام زودهنگام جهت کاهش احتمال وقوع یک ریسک یا تأثیر آن بر پروژه از سـعی در جهـت جبران پیامدهای بعد از وقوع آن اثربخش‌تر است. هزینه‌های تعدیـل می‌بایست با توجه به‌احتمال ریسک و پیامدهای آن مناسب باشند. در مـواردی کـه امکـان کاهش احتمال(وقوع ریسک) وجود ندارد، یک واکـنش تعدیلی می‌تواند با در نظر گرفتن روابطی که تعیین‌کننده‌ی شدت می‌باشند، به تأثیر ریسک توجه نماید. به‌عنوان‌مثال، طراحی بیش

[۱] Risk Transfer

[۲] Risk Mitigation

از نیاز در یـک سیسـتم فرعـی می‌تواند تأثیری را که نتیجه‌ی خرابی یک جزء اصلی است، کاهش دهد.

۴- **پذیـرش**[1]: ایـن تکنـیک نمایانگـر ایـن اسـت کـه گروه پروژه تصمیم دارد برنامه‌ی پـروژه را در مواجهـه بـا یک ریسک تغییر ندهد یا اینکه قادر به شناسـایی هـیچ راهـبرد واکـنش مناسـب دیگـری نیست. اگر ریسکی می‌بایست رخ دهـد، پذیـرش فعال می‌تواند متضمن تکوین یک برنامه‌ی اقتضـایی برای اجرا باشد. پذیرش منفعل مستلزم هیچ اقدامی نیست و درصورتی‌که ریسک‌ها رخ دهند، پرداختن به آن‌ها را به گروه پروژه واگذار می‌کند.

۲-۴-۶- کنـترل و نظـارت ریسـک

نظـارت بـر ریسک‌های باقیمانده، شناسـایی ریسک‌های جدیـد، اجـرای برنامه‌های کاهش ریسک و ارزیابی اثربخشی آن‌ها در سراسر چرخه‌ی حیات پروژه، کنترل و نظارت ریسک نامیده می‌شود.

کنـترل و نظـارت ریسک فرایند پیگیری ریسک‌های شناسایی‌شده، نظارت بـر ریسک‌های باقیمانده و شناسایی ریسک‌های جدید، اطمینان از اجرای برنامه‌های ریسـک و ارزیابـی اثربخشـی آن‌ها در کاهش ریسـک اسـت. کنترل و نظارت ریسـک یک فرایند پیوسـته در حیات پروژه است. همچنان که پروژه بالغ می‌شـود ریسـک‌ها تغییر می‌نمایند، ریسـک‌های جدید به وجود می‌آیند یا ریسـک‌های پیش‌بینی‌شده برطرف می‌شوند. فرایـندهای معتبر کنترل و نظارت ریسک اطلاعاتی فراهم می‌آورند که به اتخاذ تصمیم‌های اثربخش پیش از وقوع ریسک کمک می‌نماید. ارتباط بـا تمام ذی‌نفعان پـروژه بـرای سنجش دورهای پذیرش سطح ریسک در پروژه موردنیاز است.

ایـن فرایندها با یکدیگر و با فرایندهای سایر حوزه‌های دانش تعامل دارند. معمولاً، هر فرایند حداقل یک‌بار در هر پروژه رخ می‌دهد. اگرچه در اینجا فرایندها به‌صورت عناصری مجزا با وجوه اشتراک معین نمایش داده‌شده‌اند، ممکن است در عمل به شیوه‌هایی که در اینجا تشریح نشده، هم‌پوشانی و تعامل

[1] Risk Acceptance

داشته باشند.

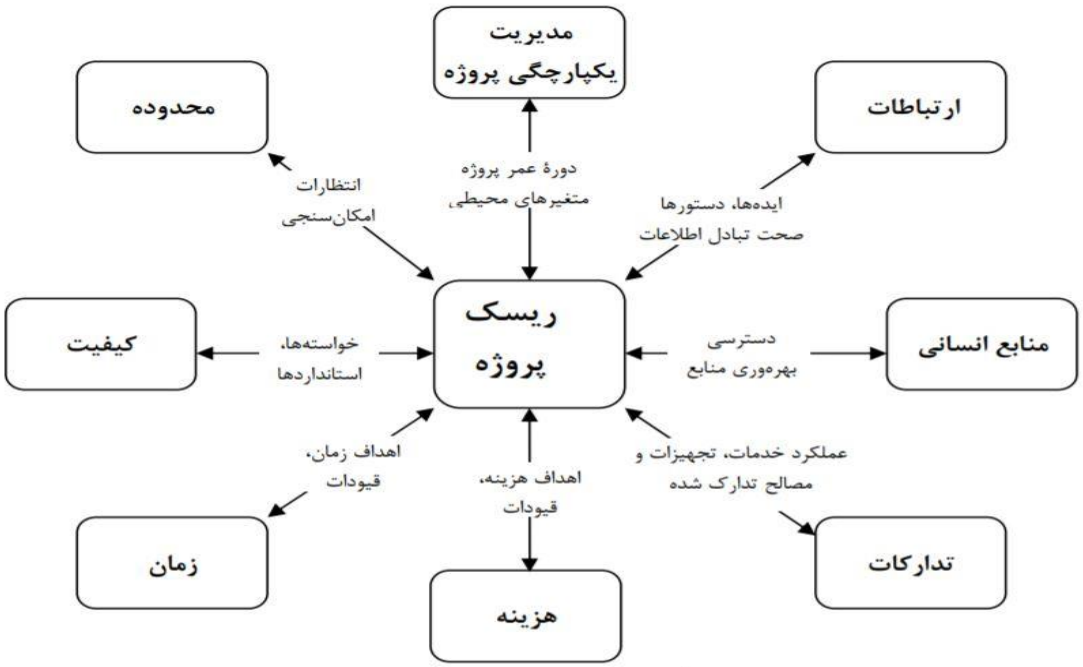
مهم‌ترین ابزارها و تکنیک‌های کنترل و نظارت ریسک عبارت‌اند از:

۱- **ممیزی‌های واکنش به ریسک پروژه**: ممیزی‌های ریسک اثربخشی واکنش به ریسک در اجتناب، انتقال یا تعدیل وقوع ریسک، همچنین اثربخشی مالک ریسک را بررسی و مستند می‌نماید. ممیزی‌های ریسک در طول چرخه‌ی حیات پروژه برای کنترل ریسک انجام می‌شود.

۲- **بازنگری‌های دوره‌ای ریسک پروژه:** بازنگری ریسک پروژه می‌بایست به‌طور منظم زمان‌بندی شود. ریسک پروژه می‌بایست دستور کار تمام جلسات گروه باشد. رتبه‌بندی و اولویت‌بندی ریسک می‌تواند در طول حیات پروژه تغییر نماید. هرگونه تغییرات ممکن است مستلزم تحلیل کیفی و کمی بیشتر باشد [۸،۷].

۲-۵- جایگاه مدیریت ریسک در مدیریت پروژه

مدیریت پروژه، کاربرد دانا، مهارت، ابزارها و تکنیک‌های مرتبط با فعالیت‌های پروژه در راستای تأمین الزامات پروژه‌های شهری است. مدیریت پروژه دارای نه حوزه دانش مدیریت پروژه است. این ۹حوزه اصلی باید به هنگام اجرای مدیریت پروژه به مرحله اجرا درآمده و با سایر قسمت‌ها در تعادل باشد تا بتوان پروژه را با توجه به اهداف تعیین‌شده پیش برد. ۹حوزه ذکرشده در شک ۲-۲ ترسیم‌شده است. در این شکل ارتباط‌ها و سایر نواحی مختلف مدیریت پروژه، به‌نوعی در ارتباط با مدیریت ریسک است [۸].



شکل ۲-۲: تعامل و یکپارچگی مدیریت ریسک با سایر زمینه‌های دانش مدیریت پروژه

مدیریت ریسک فرایندی مستمر و یکپارچه در کل دوره عمر پروژه است.مدیریت ریسک، تنها محدود به دوره خاصی از عمر پروژه نیست و باید کل دوره عمر پروژه را مدنظر قرار دهد. وضعیت و اهمیت ریسک‌های پروژه در مراحل مختلف از دوره عمر آن بسیار متغیر است و همانند سایر کارکردهای مدیریت پروژه، مؤثرترین زمان برای دستیابی به بیشترین تأثیر روی نتایج پروژه، مراحل اولیه دوره عمر پروژه است. ضمن اینکه مدیریت ریسک را می‌توان برای هر یک از مراحل مختلف پروژه به‌عنوان یک بخش مستقل به کاربرد.

۲-۶- اطلاعات و داده‌های موردنیاز و استفاده برای ارزیابی ریسک تونل سازی

هریک از تحلیل‌های مورداستفاده(کمی و کیفی)، نیازمند کسب اطلاعات مربوط به ریسک است. این اطلاعات بر اساس نوع آنالیزی که انجام می‌شود، می‌تواند دامنه وسیع‌تری داشته باشند. از این میان احتمال وقوع و شدت اثر ریسک می‌توانند بر روی بسیاری از معیارها همچون هزینه، ایمنی، مدیریت و... جمع‌آوری و برای محاسبه کمی و کیفی ریسک مورداستفاده قرار گیرد. این دو پارامتر از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در بیشتر روش‌های ارزیابی ریسک موردنیاز است.

۲-۷- جمع‌بندی

مدیریت ریسک شاخه جدیدی از علم مدیریت است که در گسترهٔ متنوعی از انواع گرایش‌ها ازجمله امور مالی و سرمایه‌گذاری، تجارت، بیمه، ایمنی، بهداشت و درمان، پروژه‌های صنعتی و عمرانی و حتی مسائل سیاسی و اجتماعی و نظامی جایگاه خود را بدست آورده است.

در این فصل پس از بررسی مطالعاتی که در مورد ریسک و مدیریت ریسک مطرح‌شده، به تعاریف و مفاهیمی از ریسک، مدیریت ریسک و فرایندهای مدیریت ریسک پرداخته شد. روش‌های تحلیل و بررسی ریسک، ابزارها و تکنیک‌های مورد استفاده در هر بخش از ریسک مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. پس از مباحث مهم مربوط به ریسک به جایگاه مدیریت ریسک در مدیریت پروژه پرداخته شده است

در فصل آینده پس از بررسی سابقه علمی موضوع، به معرفی مطالعه موردی مدنظرپرداخته خواهد شد.

فصل سوم

سابقه علمی موضوع و معرفی مطالعه موردی

۳-۱- مقدمه

هر تحقیق و پژوهش علمی که صورت می‌گیرد بر پایه‌ها، ارکان و نتایج مطالعات و تحقیقات پیشین استوار است. هرقدر تعداد ارتباطات و پیوندهای ممکن یک مطالعه با مطالعات پیشین و تئوری‌های موجود بیشتر باشد، اهمیت و سهم آن مطالعه در بسط دانش آدمی بیشتر خواهد بود. این نکته ازآن‌جهت مهم است که از پیشرفت‌های تازه و رشد و گسترش‌هایی که در این زمینه‌ها به‌عمل‌آمده آگاهی پیدا کنیم. زیرا این بررسی‌ها بخش مهم و لازم فرایند پژوهش علمی را تشکیل می‌دهد.

پروژه‌های تونل سازی به دلیل عدم قطعیت‌های مرتبط با آن‌ها همواره با درصد بالایی از ریسک همراه هستند. مدیریت درست و به‌موقع این ریسک‌ها موجب حداقل کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه می‌گردد. در یک پیمایش جهانی در خصوص پروژه‌های تونل سازی، افزایش ۳۰ تا ۵۰ درصدی در زمان و هزینه‌ها به علت مدیریت ناقص و اشتباه گزارش‌شده است. بر اساس پیمایشی دیگر (در بین شرکت‌های انگلیسی در سال ۱۹۹۴)، ۴۰ درصد پروژه‌ها ازنظر بودجه و یا زمان ، از مقدار تعیین‌شده تجاوز کرده‌اند و در بیش از ۶۰ درصد آن‌ها نیز مدیریت ریسک سازمان، ضعیف ارزیابی‌شده است[۶].

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی ریسک در پروژه‌های تونل سازی مطرح‌شده است که در بخش‌های آتی این فصل به آن‌ها اشاره خواهد شد.

۳-۲- علل انتخاب تونل‌های شهری برای ارزیابی ریسک

به دلیل مستندسازی‌های بهتر و مناسب‌تری از روند تمام اجرای پروژه‌های تونل سازی شهری نسبت به سایر پروژه‌های تونل، تونل سازی شهری مخصوصاً تونل‌های مکانیزه ،موردتوجه متخصصان ریسک واقع‌شده است. تونل‌های مترو و تونل‌های انتقال آب و ... تونل‌هایی می‌باشند که با افزایش استفاده از آن‌ها، در تحقیقات و مقاله‌ها موردبررسی و ارزیابی بسیار مدیریت ریسک قرارگرفته‌اند. بااین‌وجود لازم است تا همگام‌سازی مناسبی برای اجرای مدیریت ریسک در تمام مدت پروژه در دستور کار متخصصان و متصدیان واقع شود.

همان‌گونه که در فصل گذشته به آن اشاره کردیم، یکی از مراحل اصلی در مدیریت ریسک، ارزیابی ریسک است و به‌صورت کمی و کیفی طبقه‌بندی می‌شوند. ارزیابی کیفی که معمولاً برای یک تصمیم‌گیری خوب به‌منظور ایمنی و کاهش هزینه‌ها و خسارات کافی است ولی پیمانکاران و متصدیان عرصه تونل سازی به دنبال ارزیابی کمی و با جزئیات بیشتری نسبت به ارزیابی کیفی برای محاسبه هزینه‌ها و درنتیجه سود بیشتر هستند.

استفاده از اصول کیفی در تحلیل ریسک آسان‌تر است و نیازمند تلاش کمتری است. ارزیابی کیفی برای طبقه‌بندی ریسک کافی است و این امکان را فراهم می‌کند که مواردی که نسبتاً مهم هستند جهت به‌کارگیری ریسک‌های مدیریت ریسک در دستور کار قرار گیرند [۹،۱۰،۱۱].

۳-۳- مروری بر تحقیقات گذشته

در این قسمت از تحقیق با مرور تحقیقاتی که در زمینه ریسک برای پروژه‌های تونل سازی انجام‌شده است، با دسته‌بندی آن‌ها سعی بر این است که ریسک‌های مربوط به مسائل اجرایی تونل سازی را مدنظر قرار داده برای این منظور ابتدا از مقاله El_Sayegh که در سال ۲۰۰۷ انجام داده است ؛ در جدول ۳-۱ مورد استفاده خواهد گرفت. [۱۲].

جدول ۳-۱: ساختار تجزیه‌وتحلیل ریسک[۱۲]

ریسک سیاسی	جنگ ، اعتصابات کار گری، فساد
ریسک اجتماعی	درگیری‌های ناشی از تفاوت‌های قومی و مذهبی و فرهنگی
ریسک اقتصادی	نوسان‌های ارزی ، تحریم، تورم، کمبود وسایل و تجهیزات
ریسک طبیعی	سیل ، زلزله، سونامی
ریسک انسانی	خطا و اشتباه در تخمین‌ها و اندازه‌گیری‌ها
ریسک کارفرما	تأخیر در پرداختی پیمانکار ، تغییر دادن طرح اولیه
ریسک طراح	ناقص بودن طراحی، طراحی اشتباه، خطاهای مربوط به نقشه‌ها
ریسک پیمانکار	حوادث موجود در کار، کیفیت پایین تولید، تولید کم، عدم صلاحیت پیمانکار
ریسک تضمین‌کننده‌ها	مشکل تأمین مواد و تجهیزات
سایر ریسک‌ها	مشکلات قراردادی ، عدم حل منازعات

از تحقیقات و مقالات متعددی که برای تحقیق مطالعه شده است به نتیجه بر این است که :

بعضـــی از افراد با تکیه‌بر ماتریس احتمال وقوع و شـــدت اثر ریســـک‌ها، به رتبه‌بندی و بررســـی ریسـک‌ها پرداخته‌اند. و بسیاری نیز به تکیه‌بر ارزیابی‌های کیفی و نیمه کمی ، ریسک را موردسنجش قرار داده‌اند. لازم به ذکر است که بسیاری از این افراد در تحقیقات و مقالات خود فقط یک عامل مؤثر بر ریسک را موردبررسی قرار داده‌اند و سعی کرده‌اند با بررسی و ارزیابی همین یک عامل ریسک، تأثیر آن را بر پروژه‌ها اندازه‌گیری کنند.

Reily و Brown در سال ۲۰۰۴ ضمن شناسایی برخی از ریسک‌های ذاتی و بالقوه (با تأثیرهای مثبت و منفی) در پروژه‌های تونل و زیرساختی و استفاده از توزیع احتمالاتی به‌منظور تخمین دقیق‌تر زمان و هزینه‌ی پروژه و در نظر گرفتن عدم قطعیت روش مرسوم و متداول (احتمال و شدت) ریسک را مورداستفاده قرار داده‌اند [۱۳].

Duzgun و Einstein در سال ۲۰۰۴ ریسک‌های ریزش سقف معادن زیرزمینی زغال‌سنگ ترکیه را بر اساس تناوب و تعداد رخدادهای ریزش سقف در طول یک سال مورد ارزیابی قرار داده‌اند و دو پارامتر رخداد و پیامد را در ارزیابی خود مورداستفاده قرار داده‌اند [۱۴].

Roberto Bubbico و Barbara Mazzarotta وSergio Di Cave در سال ۲۰۰۴ ریسک حمل‌ونقل مواد از تونل‌های ریلی و جاده‌ای با استفاده از احتمال و شدت اثر حوادث را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۱۵].

Gerard Arends و همکاران در سال ۲۰۰۴ ضمن ارائه مدلی برای ارزیابی بودجه ریسک ، برای مدیریت ریسک‌ها در ۵ فاز اصلی پروژه‌های زیرزمینی، روش کیفی آنالیز ریسک را موردبررسی و ارزیابی قرار داده‌اند [۱۶].

Jannadi در سال ۲۰۰۸ ضمن تشریح انواع ریسک‌های بالقوه در پروژه‌های روباز در عربستان به بررسی کیفی ریسک و ارزیابی آن در این پروژه‌ها پرداخته است [۱۷].

ارائه‌شده توسط مایکل اسپنسر زوریخ - ژوئن ۲۰۰۸- در سال ۲۰۰۸ با کمک برخی از شرکت‌های بیمه و برخی از انجمن‌های تونل سازی جهت ارزیابی ریسک روش مرسوم احتمال در اثر ریسک را بررسی کردند.

بعضی از افراد نیز که در زیر نام‌برده شده‌اند با استفاده از معیارهایی نظیر احتمال وقوع، شدت اثر بین ریسک‌ها، فرصت یا تهدید بودن ریسک یا بررسی ریسک از دیدگاه کارفرما،پیمانکار و مشاورین سعی کرده‌اند تا با تأثیر دادن معیارهای مختلف و با دیدگاه‌های مختلف ارزیابی ریسک را با واقعیت موجود در پروژه‌های ساخت‌وساز بیشتر تطبیق دهند.

Benardos و Kaliampakos ، در سال ۲۰۰۴ مخاطرات در حفاری تونل با TBM را با شخص آسیب‌پذیری را بر اساس مؤلفه‌های سیستم‌های مهندسی سنگ بیان کرده‌اند و جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت نیز با استفاده از توزیع مناسب پارامترها مدل احتمال را بیان کرده‌اند [۱۸].

David B. Ashley و همکاران در سال۲۰۰۸ مواردی از قبیل پلان مدیریت ریسک و پاسخ به ریسک بر اساس تخمین زمان و هزینه درست فعالیت با لحاظ کردن ریسک را بررسی کرده‌اند [۱۹].

Alan N. Beard در سال ۲۰۱۰ چگونگی طراحی و ارزیابی ریسک را در تونل مطرح کرده‌اند و در مورد ریسک ایمنی و مدیریت ایمنی از چندین معیار جهت کاهش ریسک و گرفتن تصمیم درست و اینکه چه معیارهایی مناسب‌تر و صحیح‌تر هستند را موردبررسی قرار داده‌اند[۲۰].

بعضی از افراد هم با ارائه مدل‌های پیچیده برنامه‌های کامپیوتر و نرم‌افزار به جابه‌جایی‌های زمین و میزان خسارت وارد بر ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور تونل، ارزیابی‌های خود را انجام دادند که در زیر به آن‌ها اشاره می‌کنیم:

Kim و همکاران در سال ۲۰۰۳، شبکه‌ای را به جهت ارزیابی صدمات وارد بر خسارت‌های وارد بر ساختمان‌ها و تأسیسات اطراف تونل ایجاد کرده و نام آن‌ها را TURISK نهاده‌اند. و این شبکه را بر اساس پیش‌بینی میزان جابجایی زمین ناشی از حفر تونل‌ها ، میزان صدمات ،پیش‌بینی و ارزیابی می‌شود [۲۱].

Buppler و همکاران در سال ۲۰۰۶ و همچنین عطایی در سال ۱۳۹۴ پاسخ به ریسک‌ها در جهت کنترل و مدیریت آن‌ها در عملیات حفاری تونل در مرکز شهر را تحت شرایط پیچیده زمین‌شناسی بررسی کرده‌اند [۲۳].

Ruaidhri Farrell و همکاران در سال ۲۰۱۲ بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل و صدمات وارد بر تأسیسات را موردبررسی و ارزیابی قراردادند [۲۲].

و افرادی نیز با تحلیل نظرات خبرگان و یا ارائه شاخصی خاص مانند شاخص سطح ایمنی ، به ارزیابی ریسک، پروژه‌های تونل سازی را موردبررسی قرار داده‌اند.

H.S. Chou و همکاران در سال ۲۰۰۱ شاخص ریسک نفوذ مواد را به داخل تونل معرفی کرده‌اند و همچنین با استفاده از ماتریسی که شاخص ریسک در بازه‌های متفاوت کیفی طبقه‌بندی می‌شوند، با بررسی و ارزیابی ریسک پرداخته‌اند [۲۴].

Miguel A. Sánchez و همکاران در سال ۲۰۰۷ ضمن شناسایی برخی از ریسک‌های زمین‌شناختی از قبیل لغزش یا ریزش سقف، نشت آب و ... و دو شاخص نیمه کمی(شاخص‌های طبیعی یا ذاتی و ضریب اطمینان) را ارائه کرده‌اند و بر اساس آن محیط را طبقه‌بندی و ریسک‌ها را موردبررسی و ارزیابی قرار داده‌اند [۲۵].

شهریار و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک رویکردی جهت انتخاب TBM بر اساس کمی کردن ریسک‌های ژئوتکنیکی با استفاده از درخت تصمیم مدنظر قراردادند و از تعریف مرسوم و متداول ریسک یعنی حاصل‌ضرب احتمال در رخداد به‌منظور بررسی و ارزیابی ریسک بهره برده‌اند [۲۶].

Eun-Soo Hong و همکاران در سال ۲۰۰۹، روش آنالیز درخت رویداد را به جهت کمی کردن و تعیین ریسک برای طرح مقدماتی حفر یک تونل در زیر سطح آب زیرزمینی با استفاده از ماشین حفار تمام مقطع TBM مورد ارزیابی قرار دادند [۲۷].

هدف ما از بررسی مقالات فوق، شناسایی و معرفی ریسک‌های مرتبط با پروژه‌های تونل سازی و یافتن مناسب‌ترین و صحیح‌ترین روش ارزیابی ریسک است. برای دستیابی به این هدف سعی خواهد

شد که مقالات مرتبط با ریسک‌های شناسایی‌شده را به‌طور مناسب دسته‌بندی کرد و همچنین مقالاتی که از یک تکنیک خاص یا روش‌های نزدیک به یکدیگر استفاده کرده بودند را با یکدیگر موردبررسی و ارزیابی قرارداد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها به شناسایی اولیه ریسک‌های موجود در تونل سازی مکانیزه ختم شد و در ادامه راه با توجه و استفاده از دانش متخصصین و خبرگان در این عرصه، ریسک‌ها شناسایی‌شده و تکمیل شدند. همچنین با دسته‌بندی مقالات مرتبط با یک ریسک (مثلاً ریسک سایش دیسک‌ها)، سعی شد اطلاعات بیشتری در مورد ریسک‌های اصلی به دست آید و درواقع علل پایه‌ای و اساسی آن ریسک شناسایی گردند.

بررسی مطالعات و مقالات پیشین به نتایج زیر ختم شدند :

با توجه به اینکه همه ریسک‌های شناسایی و مطرح‌شده توسط دانشمندان دارای مزایا و معایبی می‌باشند، اما در جایگاه خود، می‌توانند ارزشمند باشند. به‌عنوان‌مثال با ارزیابی‌های کیفی و نیمه کمی ریسک‌ها و استفاده از روش متداول احتمال و شدت، اثر ریسک‌ها را می‌توان ارزیابی کرد و رده‌بندی ریسک‌ها را به‌سرعت انجام داد که خود می‌تواند اساس بررسی دقیقی باشد.

با استفاده از تجزیه‌وتحلیل آنالیز چند معیاره و مطالعات بیشتر بر روی پارامترها و علل وقوع ریسک‌های بیشتر می‌توان ارزیابی دقیق‌تر و منطقی‌تری را نیز کسب کرد.

ارزیابی ریسک با استفاده از درخت تصمیم و آنالیز درخت رویداد که شهریار موردبررسی قرار داده است؛ طبق قوانینی که هرکدام دارا می‌باشند ، می‌توانند دارای مزایا وبرتری های خاصی باشند. به‌عنوان‌مثال در ارزیابی درخت تصمیم با انتخاب استراتژی که دارای بالاترین احتمال به هدف می‌رسد، ابزار مناسبی برای بررسی ریسک برای سازمان‌ها و افراد درگیر با پروژه است. پس می‌توان این‌گونه بیان کرد که بررسی و ارزیابی اثرات یک شکست توسط درخت رویداد نیز ابزار ارزشمندی محسوب می‌شود.

استفاده از هرکدام از ابزارها و روش‌ها در ارزیابی ریسک دارای ویژگی‌هایی هستند که دربندهای فوق مختصر به آن اشاره شد. اما نکته مهم و قابل‌تأملی که در اینجا می‌شود؛ این است که ابزارهایی که

معرفی شدند ؛هیچ‌کدام توانایی دقیق و معطوف شدن روی یک ریسک خاص را ندارند، بنابراین یک روش و ابزار دقیق‌تر و خاص دیگری موردنیاز است. برای روشن‌تر شدن چالش مطرح‌شده در ابتدا به‌فایده های شکست یک ریسک بزرگ در یک مجموعه که سبب بروز یا شدت گرفتن ریسک می‌شود اشاره خواهد شد.

فرض کنید یک اتفاق یا ریسک به وقوع می‌پیوندد. سؤالاتی که احتمالاً مدیران و افراد رده‌بالاتر از مسئولین حاضر در کارگاه خواهند پرسید به شرح زیر است:

چه عواملی باعث رخ دادن این اتفاق شده است؟و یا اینکه چرا شما جلوی روی دادن این اتفاق را نگرفته‌اید؟ و سؤالات دیگر و منطقی از همین قبیل که همه متخصصین و متصدیان پروژه انتظار شنیدنشان را دارند. روشن‌کننده این معایب، استفاده از یک‌راه عملی برای کنترل و جلوگیری از وقوع چنین حوادثی با شدت تکرار زیاد، کنترل علل وقوع آن‌ها است.

برای غلبه بر ای چنین معایب، روش درخت خطا، روشی مؤثر و مفیدتر خواهد بود. زیرا این ابزار تصمیم‌گیری بیشترین توانایی را در شناسایی ریشه‌های وقوع ریسک‌های عمده واصلی دارد و ازاین‌جهت یک ابزار قدرتمند محسوب می‌شود. به همین دلیل با شناسایی ریسک‌های خاص پروژه تونل سازی شهری، از افراد خبره و متخصص در این زمینه کمک گرفته شد تا درخت خطای هر یک از ریسک‌های شناسایی‌شده تکمیل گردد. ازآنجاکه در ارزیابی ریسک به داده‌های پرسشنامه‌ای و دانش افراد متخصص با واژه‌های زبانی سروکار داریم و همچنین به دلیل ماهیت فازی بودن واژه‌های زبانی در این تحقیق ، محاسبات بر اساس تئوری‌های فازی صورت گرفته است.

۳-۴- مطالعه موردی

شهر مشهد در عرض‌های ۵۹/۶ و ۵۹/۸ عرض جغرافیایی۳۶/۱ تا ۳۶/۳, طول جغرافیایی، در ارتفاع تقـریبی۱۰۰۰ متری از سطح دریاهای آزاد، در شمال شرقی ایران قرارگرفته است. این شهر در اطراف درهٔ کشف رود و مابین کوه‌های هزار مسجد و بینالود در مساحتی به طول ۴۰۰ کیلومترمربع گسترده شـده است و در فاصله ۹۲۵کیلومتری تهران واقع‌شده است. مشهد به سبب وجود بارگاه ملکوتی علی

بن موسی‌الرضا (ع) سالانه پذیرای ده‌ها میلیون زائر و مسافر از سرتاسر ایران است که حضور این جمعیت با توجه به ساختار معابر شهری و افزایش خودروهای شخصی باعث ایجاد ترافیک در این کلان‌شهر می‌گردد که برای رفع این مشکل، احداث خطوط قطار شهری در دستور کار مسئولین قرارگرفته است . مطالعات جامع حمل‌ونقل شهر مشهد بین سال‌های ۷۳ تا ۷۸ و مطالعات توسعه شبکه حمل‌ونقل ریلی بین سال‌های ۸۱ و ۸۳ توسط پژوهشکده حمل‌ونقل دانشگاه صنعتی شریف صورت پذیرفت. بر اساس مطالعات مشهد نیازمند ۴خط مترویی است که این مطالعات در شورای ترافیک استان تصویب و در شورای عالی ترافیک شهرهای کشور مطرح گردیده است و با توجه به وجود شهرهای جدید همچون گل‌بهار و بینالود پس از انجام مطالعات، توسعه خطوط مترو به این شهرهای جدید نیز پیش‌بینی و مراحل تصویب آن نیز سپری گردیده است.

خط ۳ مترو مشهد که محدوده شهرک ابوذر تا امیریه را شامل می‌شود، دارای ۲۸/۵ کیلومتر طول و از سمت جنوب شرق به شمال غرب است.خط ۳ قطار شهری مشهد به دو مسیر شرقی و غربی منفک شده است، مسیر شرقی این خط از میدان فردوسی به‌طرف میدان شهدا و سپس با عبور از چهارراه شهدا تا صحن جامع رضوی (باب الجواد) ادامه می‌یابد، این خط با عبور از خیابان امام رضا، خط ۲را در میدان بسیج قطع و به‌طرف پایانه امتداد می‌یابد که در این مسیر بیشترین سرویس را به زائرین حضرت رضا ارائه می‌دهد، در ادامه مسیر این خط با عبور از میدان حافظ در شهرک ابوذر خاتمه می‌یابد. مسیر غربی این خط نیز از میدان فردوسی به سمت میدان جانباز و در ادامه به میدان امام علی خواهد رسید، این خط بعد از طی خیابان امامیه و گذشت از تقاطع میثاق در انتهای بلوار امیریه خاتمه می‌یابد.

بر اساس مطالعات انجام شده توسط مشاورین محترم شرکت قطار شهری مشهد، بطور خلاصه می توان گفت خاک منطقه در محدوده خط پروژه از ابتدای مسیر تا حدود کیلومتراژ ۷ از رس و سیلت، در محدوده کیلومتراژ ۷تا ۹/۵از ماسه همراه با رس و سیلت، در محدوده کیلومتراژ ۹/۵تا ۱۱/۵از رس و سیلت و از محدوده کیلومتراژ۱۱/۵تا انتهای مسیر از شن همراه با رس و سیلت تشکیل شده است. با

توجه به اندازه گیری های انجام شـده، سـطح آب زیرزمینی در محدوده کیلومتراژ ۲/۵تا انتهای مسیر پـایین تر از خط پروژه قرار دارد. در مطالعات ژئوتکنیک مسـیر ، هنگام حفاری گمانه های DH-۲۰ ،DH-۱۴و H۲B۲قنات مشاهده گردید که امتداد قنات ها احتمالاً با خط پروژه تقاطع خواهد داشت.

مشـخصـات کلی پروژه و همچنین مشـخصـات فنی دسـتگاه مورداستفاده در خط ۳ به ترتیب در جداول ۳-۲ و ۳-۳و همچنین زمین شـناسی مسیرهای شرقی و غربی میدان فردوسی در شکل ۳-۱ نشان دادهشده است.

در مسـیر شرقی غالبا ریز دانه های رسی-سیلتی وجود دارد.که در ابتدای مسیر این بخش از تونل از سیلت و رس سیلتی تشکیل شده است. در میانه مسیر ، رس سیلتی با میان لایه های ماسه ای و در بخش هایی زیر سـطح آب اسـت. و بخش انتهایی مسیر شرقی از موادی همچون رس سیلتی و شن و ماسه رس دار و گاهی دارای قطعات درشت سنگی تشکیل شده است.

در مسیر غربی نیز که غالبا درشت دانه شناسایی شده است در بخش ابتدایی مسیر از سیلت و رس سـیلتی، در بخش میانی مسـیر از ماسه سیلتی با میان لایه های رسی سیلتی و قسمت انتهایی مسیر غربی نیز از موادی چون ماسه و شن سیلتی تشکیل شده است که درشکل ۳-۱ نشان داده شده است.

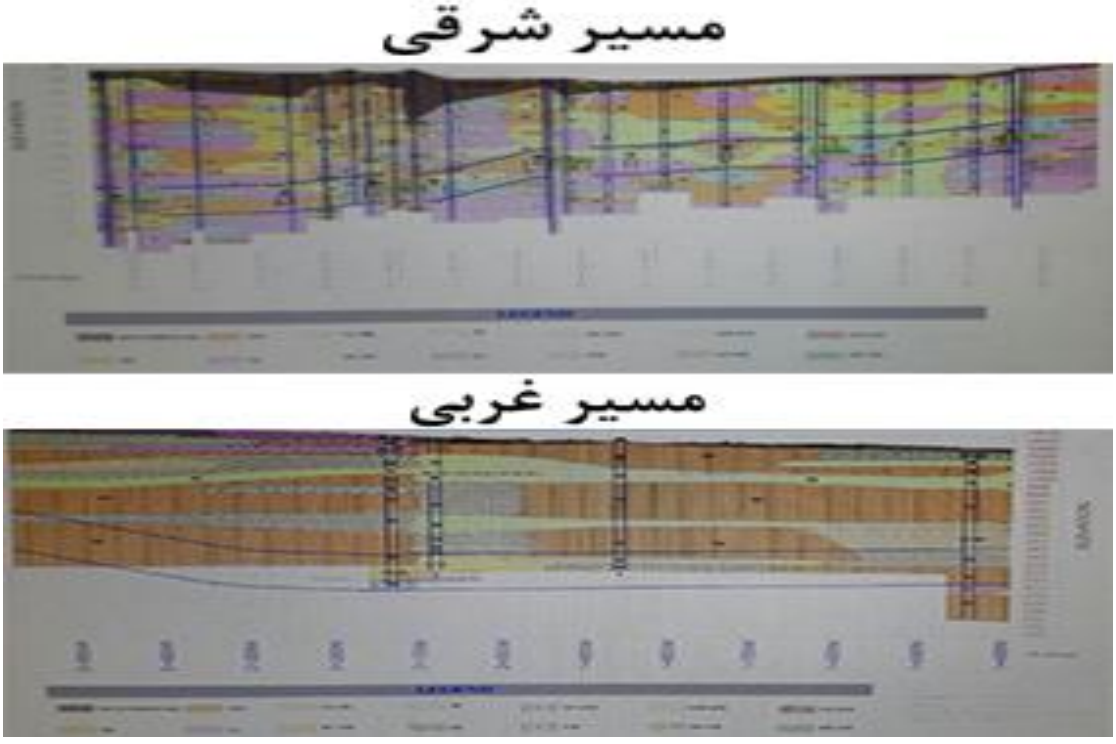
جدول ۳-۲: مشخصات کلی پروژه خط ۳ مترو مشهد

عنوان پروژه	خط ۳ قطار شهری مشهد
تعداد کل ایستگاه‌ها	۲۴ ایستگاه
موضوع و محدوده پروژه	اجرای ۲۸/۵ کیلومتر تونل به انضمام ۱۱ ایستگاه تا مرحله لاینینگ هسته مرکزی و اجرای شفت ورودیTBM
محل اجرا	استان خراسان رضوی-شهر مشهد
کارفرما	شرکت قطار شهری مشهد
مشاور کارفرما	شرکت مهندسی ره پویان
پیمانکار	قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیا(ص)- گروه تخصصی قائم- موسسه مهندسی رهاب
نوع تأمین اعتبار پروژه	عمرانی(پیش‌پرداخت ۵۰ درصد نقد، ۵۰درصد تهاتر، به‌صورت ۶۰ درصد نقد-۴۰درصد تهاتر)
مبلغ قرارداد	۱۰،۹۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰
زمان‌بندی اولیه اجرای پروژه	۳۶ ماه شمسی
نوع قرارداد	۴ عاملی

حداکثر سرعت قطارها	۸۰ کیلومتر در ساعت
ظرفیت جابجایی مسافر	۲۰۰۰۰نفر در هر ساعت در هر جهت
روش احداث ایستگاه	روش اول: ریپ و شمع روش دوم:ترانشه باز

جدول ۳-۳: مشخصات فنی TBM خط ۳ مترو مشهد (کارگاه فردوسی)

مدل دستگاه	EPB/OPEN MODE Single Shield – ۹/۴m S۲۰ Type
قطر کاترهد	۹/۴۳ متر
طول دستگاه	۱۰۰متر
وزن تقریبی دستگاه	۱۱۰۰تن
طول شیلد	۱۰/۷ متر
سرعت دوران کاترهد	۳/۱۷ دور در دقیقه
نیروی محرکه کاترهد	۱۰ دستگاه الکتروموتور با توان ۲۷۵ کیلووات
سرعت پیشروی ماکزیمم	۸۰ mm/min
سطح مقطع حفاری	۶۹/۳۶ مترمربع
روش انتقال مصالح	اسکرو و نوار نقاله
قطر تونل تمام‌شده	۸/۴ متر
سیستم حرکتی پشتیبان دستگاه	ریلی(گنتری ها) – چرخ(بوژی‌ها)
سیستم راهبری دستگاه	سیستم پیمایشی(pps) به کمک دوربین نقشه‌برداری



شکل ۳-۱: زمین شناسی مسیرهای شرقی و غربی میدان فردوسی

۳-۵- جمع‌بندی

هدف اصلی از مدیریت ریسک در تونل‌های شهری افزایش ایمنی و کیفیت در فرآیند ساخت تونل است، تا درنتیجه آن هزینه‌ها بهینه‌شده و پروژه در زمان‌بندی تعیین‌شده، قابل‌اجرا باشد.

در فصل سوم دلایل در نظر گرفتن تونل‌های شهری برای ارزیابی ریسک در نظر گرفته شد. همچنین به بررسی و مطالعه تحقیقات انجام‌شده در این زمینه و مزایا و معایبی که هر یک دارا هستند، پرداخته شد. در این قسمت سعی شده است که تحقیقات بر اساس موضوع موردبررسی، دسته‌بندی شوند. سپس به مزایا و معایب هر یک از روش های مطرح شده برای ارزیابی ریسک پرداخته شده است. و بعد از مطرح‌شدن موضوع‌های مهم و بررسی‌شده در تونل به معرفی مطالعه موردی پرداخته‌شده است.

در فصل چهارم به بیان مفاهیم و تعاریف مربوط به درخت خطا و همچنین فرایند سلسله مراتبی پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

درخت خطا(FTA) و فرایند سلسله مراتبی(AHP)

۴-۱- مقدمه

پس از شـــناســـایی خطرات، ارزیـابی خطرات با روش‌های کیفی و کمی انجام‌پذیر اســـت. برای ســـیســـتم‌های پیچیده و زمانی که ارزیابی کیفی ریســـک نمی‌تواند اطلاعات کافی در اختیار تحلیلگر ریسک بگذارد، ارزیابی کمی ریسک موردتوجه قرار می‌گیرد. هر چه بتوان درروند ارزیابی خطر به‌سوی کمی کردن آن پیش رفـت، نتـایج بهتری به دســـت خواهد آمد. ارزیابی به روش‌های کمی، می‌تواند کانون‌ها و عوامل خطرهای موجود را شـناسـایی کرده و با اتخاذ تدابیر پیشگیرانه و کنترلی، نسبت به حذف یا مهار آن اقدام کرد. و بدین ترتیب، می‌توان آن را به‌عنوان یک‌قدم به ســـمت صـــنعت ایمن محسوب کرد.

امروزه برای ارزیابی کمی ریسک، روش‌های بسیار زیادی معرفی‌شده است که هرکدام از نقاط قوت و ضعف خود برخوردار می‌باشند. روش تحلیلی درخت خطا(FTA)، روش تحلیلی درخت رویداد(ETA)، روش تحلیلی علت – پیامد(CCA)،روش حالات شـکست و تحلیل اثرات(FMEA)، روش ویلیام فاین و روش ۳D دانشگاه ملبورن، مهم‌ترین روش‌های ارزیابی کمی ریسک است[۷].

روش تحلیلی درخت خطا، یک روش منطقی مناسب برای شناسایی خطای سیستم است و معمولاً برای تحلیل سـیسـتم‌های پیچیده، به‌ویژه برای شـناسایی ارتباط درونی سیستم و شناسایی خطاهای رایج سیستم به کار می‌رود[۷].

روش تحلیلی درخت خطا، به شـناسایی زمینه‌های مربوط به طراحی محصولات و خدمات جدید یا در حل‌وفصـل مشـکلات شـناخته‌شـده در محصولات یا خدمات موجود و همچنین به شناسایی اعمال اصلاحی برای اصلاح خطاها و کاهش آن‌ها کمک می‌کند[۷].

در این فصـل پارامتر های مربوط به تحلیل درخت خطای فازی و مراحل سـلسـله مراتبی فازی به طور مفصل بحث خواهد شد.

۴-۲- درخت خطا (FTA)

۴-۲-۱- تاریخچه درخت خطا

تجزیه‌وتحلیل درخت خطا یا درخت علت برای اولین بار در سال ۶۲ - ۱۹۶۱ در آزمایشگاه‌های تلفن بل به وجود آمد و سپس توسط آقای واتسون برای تعیین و بهبود قابلیت اطمینان سیستم کنترل موشک‌های قاره‌پیما توسعه یافت. این تکنیک در مهروموم‌های بعد توسط شرکت هواپیمایی بوئینگ گسترش‌یافته و به‌صورت قانون‌مند درآمد. اولین مقاله درباره آن در سال ۱۹۶۵ در سمپوزیوم ایمنی سیستم‌ها که توسط دانشگاه واشنگتن و شرکت بوئینگ برپاشده بود ارائه شد. از سال ۱۹۶۵ استفاده از تکنیک FTA به صنایع مختلف نظیر هوافضا، هسته ای، شیمیایی و غیره گسترش یافت و از آن به‌طور گسترده‌ای برای تجزیه‌وتحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و ایمنی سیستم‌ها استفاده شد [۲۸،۷].

۴-۲-۲- روش تحلیل درخت خطا

تکنیک تجزیه‌وتحلیل خطا یا روش درخت علت به‌عنوان یکی از قوی‌ترین ابزارهای تجزیه‌وتحلیل فرایند ایمنی سیستم به‌ویژه در هنگام ارزیابی سیستم‌های بسیار پیچیده و دقیق محسوب می‌شود. به دلیل استفاده از روش قیاسی (رسیدن از کل به جزء) در این روش، بسیاری از تجزیه‌وتحلیل گرهای ایمنی سیستم، بکار گیری روش FTA را در بررسی حالات احتمالی مختلف که می‌توانند منجر به بروز رویدادهای مطلوب یا نامطلوب در سطح سیستم شوند بسیار مفید می‌دانند[۲۸].

تکنیک FTA در بررسی ایمنی سیستم به‌صورت یک روش سازمان‌یافته، دقیق و چند سونگر عمل می‌کند؛ سازمان‌یافته از این نظر که هر رویدادی را با توجه به نوع رویداد، عملکرد و جایگاه آن در سیستم یا فرایند ارزیابی می‌کند، دقیق به این دلیل که ارتباط و نقش رویدادها را به‌صورت تکی یا ترکیبی از آن‌ها در وقوع رویداد اصلی موردبررسی قرار می‌دهد و چند سونگر ازاین‌جهت که تجزیه‌وتحلیل گر را قادر می‌سازد که اثرات بالقوه رویدادهای احتمالی موجود در ساختمان درخت

خطا بر روی رویداد اصلی را ارزیابی کنـد [۲۸].

تجزیه‌وتحلیل درخت خطا یکی از مدل‌های مطلوب ارزیابی مخاطرات به شمار می‌رود. ساختار FTA با رویداد اصلی در بالاترین سطح شروع‌شده که عموماً با مستطیل نمایش داده می‌شود و رویدادهای مرتبط با آن بر اساس رابطه منطقی که با رویداد اصلی دارند در زیرشاخه‌های آن به‌صورت درختی ترسیم می‌شوند.این عمل تا جایی که دیگر امکان تقسیم زیرشاخه یا دلایل خرابی وجود نداشته باشد ادامه خواهند یافت. رویدادهایی که دیگر امکان تقسیم ندارند به‌عنوان رویداد اساسی شناخته می‌شوند که با نماد دایره نمایش داده می‌شوند. درصورتی‌که علت یا زیرسیستم‌های یک رویداد موجود نباشد و یا بررسی آن‌ها خارج از مقصود تحقیق موردنظر باشد، رویداد به‌عنوان رویداد توسعه‌نیافته شناخته خواهد شد.که از نماد لوزی برای نمایش آن استفاده می‌شود[۲۸].

به دلیل انعطاف‌پذیری‌های موجود در تکنیک FTA از این روش در مرحله طراحی از عمر سیستم نیز استفاده می‌شود، FTA قادر است که نقص‌های بالقوه در طی فاز طراحی را پیش‌بینی کرده و تغییرات و تصحیحات ضروری را مشخص سازد از این روش همچنین می‌توان در طول فاز عملیاتی نیز برای تعیین ماهیت رویدادهای مطلوب یا نامطلوب ناشی از فعالیت سیستم استفاده کرد [۳۳].

۴-۲-۳- توانایی FTA در کمک به مدیران

الف : FTA به‌عنوان ابزار کمکی در طراحی سـیسـتم: به هنگام طراحی سیستم ، از تحلیل درخت خطا می‌توان در انتخاب طرح مناسب بهره برد. طریقه کار بدین شکل است که ابتدا فهرستی از الزامات عملکردی تهیه‌شـده و برای هر طرح از درخت خطا برای بررسـی بهترین طرح ، که بیشـترین الزامات را برآورده می‌سـازد، استفاده می‌شود. البته درصورتی‌که داده‌های طراحی کافی نباشد، می‌توان از داده‌های عام استفاده نمود[۲۸].

ب : کاربرد FTA در بهینه‌سازی و به حداقل رساندن منابع: به این کاربرد تحلیل درخت خطا اغلب کمتر توجه می‌شـود. FTA نه‌تنها میزان اهمیت و سـهم رویدادها را مشـخص می‌کند ، بلکه

رویدادهای قابل‌اغماض را نیز نمایان می‌سازد. در مورد این رویدادها ، نیازی به اختصاص بودجه و منابع نیست و گاهی بعد از اجرای تحلیل و تخصیص مجدد منابع ، مقدار آن تا ۴۰درصد کاهش پیدا می‌کند [۲۸].

پ : کاربرد FTA در اولویت‌دهی به رویدادهایی که بیشترین سهم را در وقوع آن دارند :

مطمئناً یکی از اساسی‌ترین منافع حاصل از تحلیل درخت خطا دریافتن رویدادهایی است که بالاترین نقش را در بروز رویداد بالایی دارند . اگر درخت خطا کمی شود ، رویدادهای اساسی و قطعاتی که میزان اهمیت بیشتری دارند ، مشخص‌شده و می‌توان آن‌ها را به ترتیب درصد سهم شان در بروز رویداد بالایی ، اولویت‌بندی نمود . بر اساس تجربه، تنها ۱۰تا ۲۰درصد از رویدادهای اساسی پراهمیت و قابل‌توجه هستند . از مزایای اولویت‌بندی رویدادها ، تخصیص حسابگرانه هزینه‌ها است . با شناسایی قطعات ، تجهیزات و سیستم‌های بحرانی و دردسرآفرین، به‌راحتی می‌توان هزینه‌ها را به‌منظور کاهش و یا حذف این رویدادها ، متمرکز نمود و از صرف آن‌ها در بخش‌های غیرضروری پرهیز کرد. بدین ترتیب علاوه بر کاهش هزینه‌ها، احتمال بروز رویداد نامطلوب نیز کاهش خواهد یافت [۲۸].

ت : کاربرد FTA به‌عنوان یک ابزار تشخیص‌دهنده علل وقوع رویداد بالایی و برطرف‌کننده آن: این نوع کاربرد ، FTA کاملاً متفاوت با کاربردهای پیشگیرانه یا پیش فعال آن است . با بسط درخت خطا ، علل بروز رویداد بالایی و رویدادهای میانی به‌طور تفضیلی آشکارشده و مورد تأکید قرار می‌گیرد . در هر مرحله از کشف علل ، می‌توان اقداماتی را برای کاهش یا حذف آن‌ها ، پیشنهاد نمود . مزیت FTA در این بخش این است که می‌توان از آن برای ارزیابی اثربخشی پیشنهادها مختلف بهره برد [۲۸].

۴-۲-۴- نمادهای مورداستفاده در تکنیک تحلیل FTA

در ساخت درخت خطا از اصطلاحات و نمادهای مختلفی استفاده می‌شود که تجزیه و تحلیلگر را قادر می‌سازد نوع رویدادها و همچنین ارتباط آن‌ها با یکدیگر را به‌صورت تصویری نشان دهند.

رویداد : یک عنصر دو ارزشی است که اگر تغییرات ناشی از آن در جهت مثبت باشد به آن نرمال و در غیر این صورت به آن رویداد ناخواسته یا رویداد خطا می‌گویند [۲۸].

رویداد اصلی(نهایی یا بالایی) : رویدادی که در بالاترین نقطه درخت خطا جای می‌گیرد و علل به وجود آورنده آن شناسایی و تحلیل می‌شوند. رویداد اصلی در هر درخت منحصربه‌فرد بوده و می‌تواند یک حادثه، ازکارافتادن سیستم یا یک رویداد مطلوب باشد [۲۸].

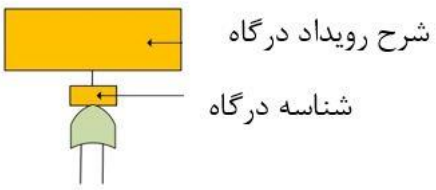
رویداد میانی: هر رویدادی در ساختمان درخت خطا ، به‌استثنای رویداد اصلی که مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و علل به وجود آورنده آن تائید می‌شود، رویداد میانی گفته می‌شود.

اصطلاحات و نمادها عبارت‌اند از :

۱- درگاه‌ها

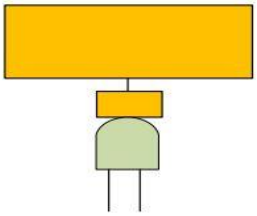
دو نوع درگاه پایه در درخت خطا وجود دارد : درگاه AND و درگاه OR. انواع دیگر درگاه‌ها حالت‌های خاصی از این دو نوع درگاه پایه هستند.

درگاه OR : درصورتی‌که شرط وقوع رویداد خروجی درگاه ، وقوع حداقل یکی از رویدادهای ورودی باشد ، از درگاه OR استفاده می‌شود . این درگاه می‌تواند دارای تعداد ورودی‌های دلخواه باشد. شکل ۴-۱یک نمونه از درگاه OR را نشان می‌دهد .



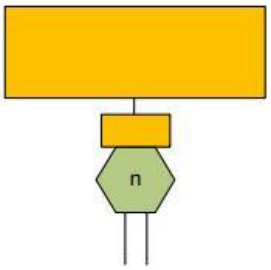
شکل ۴-۱: درگاه OR

درگاه AND : درگاه AND علامت این است که وقوع رویداد خروجی مشروط به وقوع هم‌زمان تمامی رویدادهای ورودی است. این درگاه می‌تواند به‌اندازه دلخواه ورودی داشته باشد. شکل ۴-۲ یک نمونه از درگاه AND را نشان می‌دهد[۲۸].



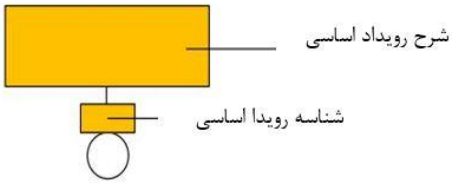
شکل ۴-۲: درگاه AND

درگاه ترکیبی : درگاه ترکیبی با یک ۶ ضلعی منتظم و یک عدد ، نشان داده می‌شود . در مواقعی که ترکیب خاصی از چند رویداد باعث وقوع رویداد دیگری می‌شود ، به‌جای استفاده از درگاه‌های AND و OR متعدد ، به‌راحتی می‌توان تنها از یک درگاه ترکیبی استفاده نمود. شکل ۴-۳ یک نمونه درگاه ترکیبی را نشان می‌دهد[۲۸].



شکل ۴-۳ : درگاه ترکیبی

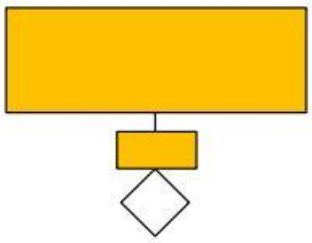
رویداد اساسی : با قرار دادن یک دایره در زیر شناسه رویداد ، شناخته می‌شوند . این رویدادها ، خطا یا شکست‌های آغازگر درخت خطا بوده و در مرزهای تحلیل قرارگرفته‌اند و بیش از این بسط نخواهند یافت.شکل ۴-۴ یک رویداد اساسی را معرفی می‌کند[۲۸].



شکل ۴-۴: رویداد اساسی

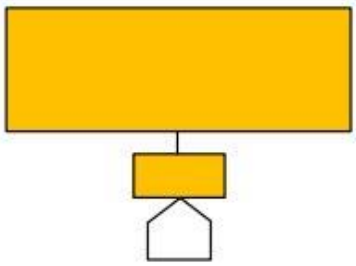
رویداد اساسی رویدادی است که دیگر نتوان آن را تجزیه کرد. به‌عبارت‌دیگر این رویداد در سطح یک درخت قرار می‌گیرد و مسیر درخت به آن محدود می‌شود.

رویداد بسط نیافته : با قرار دادن یک لوزی در زیر شناسه رویداد ، شناخته می‌شوند . این رویداد پایه ، حکایت از این دارد که به دلیل ناشناخته بودن توالی رویدادهای بعدی یا نداشتن اطلاعات کافی ، تحلیل‌گر قادر نیست یا نمی‌خواهد توالی شکست‌های بعدی این رویدادها را دنبال کند . ممکن است حتی علت بسـط ندادن رویداد این باشـد که بسـط رویداد ، اطلاعات جدیدی به تحلیل اضافه نکند یا ادامه آن در ارزیابی ریسک مشابه ای آمده باشد. شکل ۴-۵ رویداد بسط نیافته را نشان می‌دهد[۲۸].



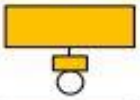
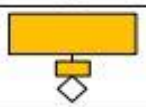
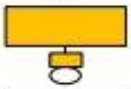
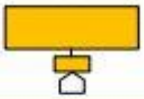
شکل ۴-۵ : رویداد بسط نیافته

رویداد خانه : رویداد خانه وقتی بکار می‌رود که انتظار وقوع رویدادی را در وضـعیت عادی داشته باشـیم. بنابراین رویدادهای خانه به‌خودی‌خود بیانگر خطای سـیسـتم نیستند. شکل ۴-۶ نشان‌دهنده یک رویداد خانه است[۲۸].



شکل ۴-۶ : رویداد خانه

در شکل ۴-۷ تمامی نمادهای مورداستفاده در تحلیل درخت خطا با توضیح مختصر نشان داده‌شده است.

شرح رویداد	نماد رویداد
رویداد پایه : یک خطای آغازین پایه که نیازی به توسعه بیشتر آن نیست .	
رویداد بسط نیافته : رویدادی که بدلیل عدم دسترسی به اطلاعات و یا بدلیل نارسا بودن پیامدها بسط داده نمی شود .	
رویداد شرطی : شرایط خاص یا محدودیت هایی که به هر گیت منطقی اعمال می شود .	
رویداد خانه : رویدادی که انتظار می رود در شرایط عادی ، حتماً اتفاق بیفتد .	

شرح گیت	نماد گیت
AND (و منطقی): خطای خروجی وقتی رخ می دهد که تمامی خطاهای ورودی همزمان اتفاق بیفتند.	
OR (یا منطقی): خطای خروجی وقتی رخ می دهد که حداقل یکی از خطاهای ورودی رخ بدهد.	
COMBINATION (ترکیب): خطای خروجی وقتی اتفاق می افتد که n تا از خطاهای ورودی رخ بدهند.	
PRIORITY AND (و همراه با اولویت): خطای خروجی وقتی اتفاق می افتد که تمامی خطاهای ورودی به ترتیب خاصی رخ بدهند.	
EXCLUSIVE OR (یا انحصاری): خطای خروجی وقتی روی می دهد که دقیقاً یکی از خطاهای ورودی رخ بدهد	

شرح انتقال	نماد انتقال
TRANSFER IN (انتقال به): نشاندهنده انتقال بخشی از درخت خطا به جایی که با نماد TRANSFER OUT مشخص شده است. (به عنوان مثال انتقال به صفحه دیگر)	
TRANSFER OUT (انتقال از): نشاندهنده این است که این بخش از درخت بایستی به نماد TRANSFER IN مشابه خود متصل شود.	

شکل ۴-۷ : نوع رویدادها در یک درخت خط [۲۸]

۴-۲-۵- ارزیابی تحلیل درخت خطا

تحلیل درخت خطا می‌تواند هم به‌صورت کمی و هم به‌صورت کیفی یا نظری یا به‌صورت هردو شکل انجام شود.

۴-۲-۵-۱- تجزیه‌وتحلیل کیفی درخت خطا

۱- رده‌بندی کیفی برش‌های حداقل

هر یک از برش‌های حداقل نمایانگر یک‌راه احتمالی برای وقوع رویداد اصلی می‌باشند بدین

ترتیب که با رخ دادن رویدادهای که در یک برش حداقل قرار دارند رویداد اصلی به وجود خواهد آمد، بنابراین تجزیه‌وتحلیل آن‌ها ارزیابی اهمیت هر یک از راه‌های احتمالی بروز رویداد اصلی خواهد بود. تعداد رویدادهای پایانی موجود در یک برش حداقل طبقه آن برش نام دارد، درصورتی‌که احتمال وقوع رویدادهای پایانی تقریباً یکسان بوده و وقوع آن‌ها مستقل از هم باشد برش‌های حداقل کم طبقه مهم‌تر از نوع پر طبقه خواهد بود .لازم به ذکر است که دو رویدادی را مستقل از هم می‌گویند که نتیجه وقوع یکی بر نتیجه وقوع دیگری هیچ اثری نداشته باشد [۲۸،۷].

۲- رده‌بندی کیفی رویدادهای پایانی

رده‌بندی کیفی رویدادهای پایانی برحسب اهمیت آن‌ها در ایجاد رویداد اصلی ممکن است بر اساس برش‌های حداقل و به شرح زیر صورت می‌گیرد.

الف) رویدادهای پایانی موجود دربرش مای حداقل کم طبقه معمولاً مهم‌تر از آن‌هایی هستند که دربرش های حداقل پر طبقه قرار دارند.

ب) اگر دو رویداد پایانی تنها دربرش های حداقل n طبقه وجود داشته باشند آن رویدادی که به تعداد دفعات بیشتری در برش‌های حداقل یادشده تکرار گردیده است از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. دو اصل فوق در صورتی معتبر خواهد بود که احتمال وقوع رویدادهای پایانی یکسان بوده و ازنظر آماری مستقل از هم باشند [۲۹،۲۸،۷].

۴-۲-۵-۲- تجزیه‌وتحلیل کمی درخت خطا

از روابط احتمالاتی موجود بین رویدادهای ورودی و خروجی و همچنین دروازه‌های (و) و (یا) می‌توان به‌صورت زیر برای محاسبه احتمال وقوع رویدادهای میانی و درنتیجه رویداد اصلی استفاده کرد.

۱- تجزیه‌وتحلیل کمی درگاه (و):

مقدار خروجی برای یک درگاه (و) از معادل زیر بدست می‌آید:

$$\Pr(\text{top event}) = \prod_{i=1}^{n} pi \qquad (۱-۴)$$

۲- تجزیه‌وتحلیل کمی درگاه (یا)

مقدار خروجی برای یک درگاه (یا) از معادل زیر بدست می‌آید:

$$\Pr(\text{top event}) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - pi) \qquad (۲-۴)$$

Pr (top event) نشان‌دهنده احتمال میران نقص در خروجی دروازه است Pn..... , P ۱ هم نشان‌دهنده میزان نقص‌های ورودی است [۲۹،۲۸،۷].

۴-۲-۶- مزایای روش تحلیل درخت خطا

مزایای این روش عبارت‌اند از :

۱- ارزیابی احتمالات، ترکیبات مختلف خطاها و عیوب داخل یک سیستم پیچیده را ممکن می‌سازد.

۲- تجزیه‌وتحلیل به‌سوی کشف خطاها و نقص‌های اصلی هدایت می‌شوند.

۳- از این روش می‌توان برای تجزیه‌وتحلیل خطاهای انسان و تجهیزات استفاده کرد.

۴- به تحلیل‌گر در فهم دقیق عملکردها و ارتباط بین اجزا و عناصر عملکردی سیستم کمک می‌کند.

۵- این روش وسیله‌ای است که تمرکز بر روی یک عیب را هم‌زمان انجام می هد.

۶- این روش، چشم‌اندازی را ایجاد می‌کند که نشان می‌دهد معایب، چگونه می‌توانند منتج به عواقب جدی‌تر و خطرناک‌تر گردد.

۷- این روش، کمی و کیفی است و امکان برآورد احتمالی یک عیب یا حادثه را فراهم می‌کند.

۸- به دست آوردن ترسیم گرافیکی از ترکیب وقایع که به رویداد اصلی ختم می‌شود.

۹- در این روش، می‌توان رویداد با بیشترین ارزش را شناسایی کرد.

۱۰- با این روش به جهت شناسایی علل وقوع یک رویداد می‌توان مجموعه‌ای را شناسایی و حذف کرد که سبب ایجاد یک رویداد ناخواسته می‌شود [۲۸،۷]

۴-۲-۷- معایب روش تحلیل درخت خطا

معایب این روش عبارت‌اند از:

۱- اگر خطاها با علل مشترک شناسایی نشوند، درخت خطا دقیق نخواهد بود.

۲- در هر بار فقط یک رویداد نامطلوب در سطح سیستم تحلیل می‌شود؛ بنابراین برای تحلیل ایمنی یک سیستم به انجام تحلیل‌های درخت خطای متعدد نیاز است.

۳- این روش به‌طور نسبی جزئیات را بیان می‌کند و انجام ارزیابی دقیق ممکن است ، به منابع و زمان قابل‌توجهی نیازمند باشد.

۴- این روش نیازمند داشتن اطلاعات جامع و تخصصی از سیستم است و نیاز به آموزش دارد.

۵- احتمال وجود خطا برای منابع مختلف وجود دارد که نتیجه این خطای پشت سرهم، سبب ایجاد خطا می‌شود.

۶- برای سیستم‌های بزرگ و حجیم به‌راحتی قابل‌استفاده نیست.

۷- تکمیل و اجرای این روش، نیاز به مدارک مشروح و مستند دارد که باید در دسترس باشد.

۸- می‌توان برای یک حادثه درخت‌های خطای زیادی کشید.و نتیجه یکسانی گرفت و به‌کارگیری این روش به‌طور کامل کاربردی نیست [۲۸،۷].

۴-۳- روش تحلیل درخت خطای فازی(FFTA)

تحلیـل درخت خطا، یکی از مدل‌های مطلوب ارزیابی مخاطرات به شـــمار می‌رود. گاهی اوقات به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی، برآورد دقیق میزان احتمال وقوع رویدادها دشـوار است. علاوه براین به علت عدم دقت در اطلاعات رویداد بالایی، نتیجه کلی نیز دارای عدم قطعیت اســـت. برای جلوگیری از چنین شـرایطی، رویکرد فازی و ترکیب آن با نظر متخصصان را با روش تحلیل درخت خطا به کار برد

تا ابهام در احتمال رویدادهای اساسی را کاهش داد[۷].

۴-۳-۱- محاسبات فازی درخت خطا

برای آنالیز کمی درخت خطا لازم است تا برای همه رویدادهای اساسی مقادیر احتمال وقوع را بدست آورده که در تحقیق حاضر این اطلاعات با استفاده از افراد خبره در بحث تونل سازی شهری در خط ۳ مترو مشهد جمع‌آوری‌شده است. برای تفسیر اطلاعات جمع‌آوری‌شده که در قالب عبارات احتمال وقوع خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد بودند ابتدا لازم بود تا این عبارات به اعداد فازی تبدیل گردند، این کار با نسبت دادن اعداد فازی ذوزنقه‌ای زیر به واژه‌های زبانی انجام‌گرفته است که در فصل بعد به‌طور کامل تشریح شده است.

۴-۳-۲- مراحل انجام درخت خطای فازی

الف) مرحله ۱: انتخاب کارشناسان

هنگامی‌که اطلاعات کافی وجود نداشته باشد، ازنظر کارشناسان استفاده می‌شود. کارشناس به کسی گفته می‌شود که اطلاعات کافی از سیستم مورد ارزیابی داشته و با روش تحلیل درخت خطا آشنایی داشته باشد.

ب) مرحله ۲: تعیین وزن کارشناسان و کمی سازی نظرات آن‌ها

بعد از مشخص شدن معیارهای ارزیابی کارشناسان در مرحله قبل، وزن آن‌ها تعیین می‌شود. بر این اساس ، ضریب اهمیت هر کارشناس از تقسیم مجموع امتیازهای کسب‌شده توسط وی، تقسیم‌بر مجموع امتیازات کسب‌شده توسط کلیه کارشناسان شرکت‌کننده در مطالعه به دست می‌آید.

ج) مرحله ۳: اجماع نظر کارشناسان

برای اجماع نظر کارشناسان،ضریب اهمیت هر کارشناس در نمره متغیر زبانی او ضرب شده است. این کار طبق رابطه (۵-۳) و بر اساس مطالعه کلمن و وینکلر و رنجیت و همکارانش انجام‌شده است [۷].

$$M_i = \sum_{j=1}^{n} w_j A_{ij}, \qquad i = 1, 2, 3, \ldots, m \tag{۳-۴}$$

که در این رابطه

A_{ij} : متغیر زبانی در رابطه با هر رویداد اساسیi توسط کارشناس j

W_j : وزن کارشناس j

m : تعداد رویدادهای اساسی

n : تعداد کارشناسان

M_i : عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد اساسی i

د) مرحله ۴ : غیر فازی کردن و محاسبه احتمال شکست

غیر فازی کردن اعداد فازی روش مهمی برای تصمیم‌گیری در محیط فازی است. در این تحقیق روش مرکز گرانیگاه برای غیر فازی کردن مورداستفاده واقع‌شده است. این روش توسط سوگنو در سال ۱۹۸۵ ابداع‌شده و دقیق‌ترین روش برای غیر فازی کردن است. این روش می‌تواند به شکل رابطه(۴-۴) نشان داده شود[۷].

$$X^* = \frac{\int \mu i(x) x dx}{\int \mu i(x)} \tag{۴-۴}$$

فرمول فوق می‌تواند برای هر دو عدد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای استفاده شود.غیر فازی کردن اعداد فازی با استفاده از رابطه (۴-۵) به دست می‌آید.

بر اساس رابطه ذکرشده ، عدد فازی مثلثی($\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3)$ و عدد فازی ذوزنقه‌ای ($\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3,a_4)$ را به ترتیب از روابط زیر به اعداد قطعی تبدیل کرد:

$X^*=$ (a۱+a۲+a۳)/۳ (۵-۴)

$$X^* = \frac{1}{3}\frac{(a_4+a_3)^2 - a_4a_3 - (a_1+a_2)^2 + a_1a_2}{(a_4+a_3-a_2-a_1)} \tag{۶-۴}$$

عدد به‌دست‌آمده از مرحله قبل در رابطه با هر رویداد اساسی ، معادل نظر کارشناسان بوده و هنوز به‌صورت (امکانی) است. ازآنجایی‌که درخت خطا احتمال می‌پذیرد؛ لذا باید عدد امکانی حاصل را به عدد احتمال تبدیل کرد. بدین منظور می‌توان از روابط زیر استفاده کرد[۷].

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad (۷-۴)$$

$$k = \left[\frac{1-CFP}{CFP}\right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (۸-۴)$$

که در این رابطه:

FP : احتمال شکست هر رویداد پایانی

CFP : عدد امکانی حاصل از مرحله غیر فازی کردن

ه)مرحله ۵ : تعیین احتمال رویداد بالایی و اهمیت و رده‌بندی مجموعه‌های برش حداقل

در این مرحله مشابه روش تحلیل درخت خطا، احتمال رویدادهای بالایی ، اهمیت و رده‌بندی مجموعه‌های برش حداقل انجام می‌شود.

۴-۴- ارزیابی ریسک با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی

در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره کلاسیک سعی می‌شود که تأثیر عوامل مختلف در تصمیم‌گیری با استفاده از مفاهیم ریاضی محاسبه شود. اما بیان بسیاری از عوامل با منطق ریاضی کلاسیک امکان‌پذیر نیست. از طرف دیگر همیشه در دنیای واقعی عدم قطعیت وجود داشته و شرایط نامطمئن، همواره در مراحل مختلف مطالعه و بررسی یک مسئله وجود دارد. بنابراین در بسیاری از موارد، تمام و یا قسمتی از داده‌های یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره، فازی هستند. در این صورت اگر مسئله با استفاده از داده‌های قطعی، مدل و فرموله شوند، جواب درست و دقیقی به دست نخواهد آمد و درنتیجه گزینه ارجح انتخاب نخواهد شد. در چنین تصمیم‌گیری‌های غیردقیقی نمی‌توان به هدف و مقصود موردنظر دست‌یافت. لذا در مدل‌های تصمیم‌گیری که داده‌های آن تصادفی یا فازی هستند، باید باوجود محاسبات

و عملیات بیشتر به‌طور منطقی و دقیق برخورد کرده و عدم قطعیت را در مدل تصمیم‌گیری لحاظ کرد.مدل کردن عدم قطعیت در مسائل تصمیم‌گیری به‌وسیله تئوری‌های فازی انجام می‌شود. نارسایی و محدودیت‌هایی که درروش مای تصمیم‌گیری چند معیاره کلاسیک وجود دارد باعث شده که تصمیم‌گیری‌های چند معیاره فازی مطرح شوند [۳۱].

. در این تحقیق جهت ارزیابی پیامدهای مربوط به عملیات تونل سازی مکانیزه از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده‌شده است، به همین دلیل در فصل پنجم به شرح این روش به‌طور کامل پرداخته خواهد شد.

۴-۴-۱- فرایند سلسله مراتبی(AHP) و فرایند سلسله مراتبی فازی (FAHP)

فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چندمنظوره است که اولین بار توسط توماس ال. ساعتی عراقی الاصل در دهه ۱۹۷۰ ابداع گردید. فرایند تحلیل سلسله مراتبی منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است. این تکنیک، مسائل پیچیده را بر اساس آثار متقابل آن‌ها موردبررسی قرار می‌دهد و آن‌ها را به شکلی ساده تبدیل کرده به حل آن می‌پردازد. فرایند تحلیل سلسله مراتبی در هنگامی‌که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه رقیب و معیار تصمیم‌گیری روبروست می‌تواند استفاده گردد. معیارهای مطرح‌شده می‌تواند کمی و کیفی باشند. اساس این روش تصمیم‌گیری بر مقایسات زوجی نهفته است. تصمیم‌گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتبی تصمیم آغاز می‌کند. درخت سلسله‌مراتب تصمیم، عوامل مورد مقایسه و گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. سپس یک سری مقایسات زوجی انجام می‌گیرد. این مقایسات وزن هر یک از فاکتورها را در راستای گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. درنهایت منطق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به‌گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی را با یکدیگر تلفیق می‌سازد که تصمیم بهینه حاصل آید. اصول فرآیند تحلیل سلسله مراتبی توماس ساعتی (بنیان گزار این روش) چهاراصل زیر را به‌عنوان اصول فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بیان نموده و کلیه محاسبات، قوانین و مقررات را بر این اصول

بنانهاده است. این اصول عبارت‌اند از: شرط معکوسی: اگر ترجیح عنصر A بر عصر B برابر n باشد، ترجیح عنصر B بر عنصر A برابر خواهد بود. اصل همگنی: عنصر Aبا عنصر B باید همگن و قابل‌مقایسه باشند. به‌بیان‌دیگر برتری عنصر A بر عنصر B نمی‌تواند بی‌نهایت یا صفر باشد. وابستگی: هر عنصر سلسله مراتبی به عنصر سطح بالاتر خود می‌تواند وابسته باشد و به‌صورت خطی این وابستگی تا بالاترین سطح می‌تواند ادامه داشته باشد. انتظارات : هرگاه تغییری در ساختمان سلسله مراتبی رخ دهد پروسهٔ ارزیابی باید مجدداً انجام گیرد.. مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی به‌کارگیری این روش مستلزم چهار قدم عمده زیر است: الف) مدل‌سازی در این قدم، مسئله و هدف تصمیم‌گیری به‌صورت سلسله مراتبی از عناصر تصمیم که باهم در ارتباط می‌باشند، درآورده می‌شود. عناصر تصمیم شامل «شاخصه‌های تصمیم‌گیری» و «گزینه‌های تصمیم» است. فرایند تحلیل سلسله مراتبی نیازمند شکستن یک مسئله با چندین شاخص به سلسله مراتبی از سطوح است. سطح بالا بیانگر هدف اصلی فرایند تصمیم‌گیری است. سطح دوم، نشان‌دهنده شاخص‌های عمده و اساسی که ممکن است به شاخص‌های فرعی و جزئی‌تر در سطح بعدی شکسته شود) است. سطح آخر گزینه‌های تصمیم را ارائه می‌کند.ب) قضاوت ترجیحی (مقایسات زوجی) انجام مقایساتی بین گزینه‌های مختلف تصمیم، بر اساس هر شاخص و قضاوت در مورد اهمیت شاخص تصمیم با انجام مقایسات زوجی، بعد از طراحی سلسله‌مراتب مسئله تصمیم، تصمیم‌گیرنده می‌بایست مجموعه ماتریس‌هایی که به‌طور عددی اهمیت یا ارجحیت نسبی شاخص‌ها را نسبت به یکدیگر و هر گزینه تصمیم را با توجه به شاخص‌ها نسبت به سایر گزینه‌ها اندازه‌گیری می‌نماید، ایجاد کند. این کار با انجام مقایسات دوبه‌دو بین عناصر تصمیم (مقایسه زوجی) و از طریق تخصیص امتیازات عددی که نشان‌دهنده ارجحیت یا اهمیت بین دو عنصر تصمیم است، صورت می‌گیرد[۳۲].

این روش توسط مفهوم هوشمندانه مغز انسان که از فرایند مرحله‌به‌مرحله و فرایندهای تجزیه‌وتحلیل سلسله مراتبی در حین تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند، توسعه داده‌شده است.در این روش از وزن دهی به مقادیر به‌عنوان مقیاس نسبی استفاده می‌شود.

۴-۴-۲- فرایند سلسله مراتبی فازی

روش تحلیل سلسله مراتبی معمولی و کلاسیک به‌درستی نحوه تفکر انسان را منعکس نمی‌کند، زیرا در مقایسه‌های زوجی این روش از اعداد دقیق استفاده می‌شود. به همین دلیل ارائه یک بازه به‌جای یک عدد ثابت موجب اثربخشی بهتر و درنتیجه‌ی قضاوت‌ها خواهد شد[۷].

روش AHP فازی یک فرایند تصمیم‌گیری با تجزیه‌وتحلیل سلسله مراتبی است که توسط ساعتی در اوایل ۱۹۷۰ توسعه‌یافته است. این روش به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا به‌طور سیستماتیک اولویت‌بندی گزینه‌های بسیاری را با کمک نرم‌افزارهای کاربردی و با استفاده از استانداردهای چندگانه، در فرایند تصمیم‌گیری برای معیارهای مختلف مربوط به فاکتورهای تصمیم‌گیری را در نظر بگیرند[۳۱]. فرایند تحلیل سلسله مراتبی در هنگامی‌که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه رقیب و معیار تصمیم‌گیری روبروست می‌تواند استفاده گردد. معیارهای مطرح‌شده می‌تواند کمی و کیفی باشند. اساس این روش تصمیم‌گیری بر مقایسات زوجی نهفته است. تصمیم‌گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتبی تصمیم آغاز می‌کند. درخت سلسله‌مراتبی تصمیم، عوامل مورد مقایسه و گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. سپس یک سری مقایسات زوجی انجام می‌گیرد. این مقایسات وزن هر یک از فاکتورها را در راستای گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. درنهایت منطق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به‌گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی را با یکدیگر تلفیق می‌سازد که تصمیم بهینه حاصل آید [۳۲]. این روش علی‌رغم مزیت‌هایی که دارد به دلیل استفاده از اعداد دقیق در مقایسه‌های زوجی خود، ارائه مقیاس نامتوازن در قضاوت‌ها ، عدم قطعیت و نادقیق بودن مقایسه‌های زوجی مورد نکوهش قرار می‌گیرد.

ازاین‌رو تصمیم‌گیرندگان اغلب به علت طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی، در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را به‌جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند. برای غلبه بر مشکلات روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه‌شده است. در این روش پس از تهیه نمودار سلسله مراتبی از تصمیم‌گیرندگان خواسته می‌شود تا

عناصر هر سطر را نسبت به هم مقایسه کنند و اهمیت نسبی عناصر را با استفاده از اعداد فازی بیان کنند[۳۱].

مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به روش چانگ[۱] به شرح زیر است[۳۱]:

مرحله۱: رسم نمودار سلسله مراتبی

مرحله۲: تعریف اعداد فازی به‌منظور انجام مقایسه‌های زوجی

مرحله۳: تشکیل ماتریس مقایسه زوجی $(\tilde{A})$ با به‌کارگیری اعداد فازی

ماتریس مقایسه زوجی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{A}=\begin{bmatrix}1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n}\\ \tilde{a}_{21} & 1 & \dots & \tilde{a}_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & 1\end{bmatrix} \qquad (۹-۴)$$

که این ماتریس حاوی اعداد فازی زیر است:

$$\tilde{a}_{ij}=\begin{cases}1 & i=j\\ \tilde{1},\tilde{3},\tilde{5},\tilde{7},\tilde{9}\ or\ \tilde{1}^{-1},\tilde{3}^{-1},\tilde{5}^{-1},\tilde{7}^{-1},\tilde{9}^{-1} & i\neq j\end{cases}$$

اگر کمیته تصمیم‌گیرنده دارای چندین تصمیم‌گیرنده باشد، درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی جامع که درروش تحلیلی سلسله مراتبی فازی به کار می‌رود، یک عدد فازی مثلثی است که مؤلفه اول آن حداقل نظرسنجی‌ها، مؤلفه دوم آن میانگین نظرسنجی‌ها و مؤلفه سوم آن حداکثر نظرسنجی‌ها است[۳۱].

مرحله۴: محاسبه S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی

S_i که خود یک عدد فازی مثلثی است از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i=\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}\otimes\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}\right]^{-1} \qquad (۱۰-۴)$$

که در این رابطه i بیان‌گر شماره سطر و j بیان‌گر شماره ستون است. M_{gi}^{j} در این رابطه اعداد فازی مثلثی ماتریس‌های مقایسه زوجی هستند. مقادیر $\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}$ ، $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}$، $\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}\right]^{-1}$ را می‌توان به ترتیب از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}=\left(\sum_{j=1}^{m}l_j,\sum_{j=1}^{m}m_j,\sum_{j=1}^{m}u_j\right) \qquad (۱۱-۴)$$

[۱] Chang

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = \left(\sum_{i=1}^{n} l_i, \sum_{i=1}^{n} m_i, \sum_{i=1}^{n} u_i\right) \qquad (۱۲-۴)$$

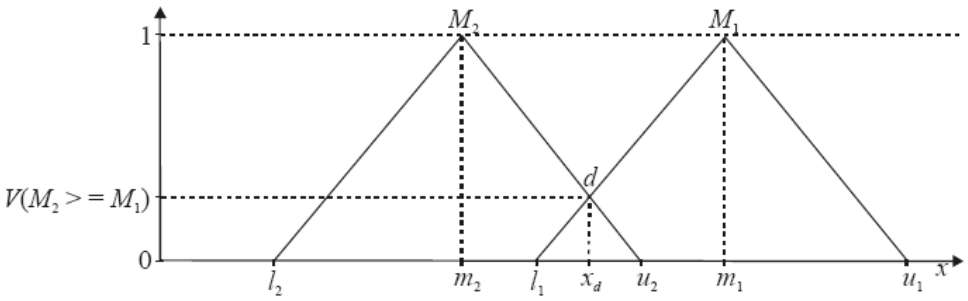
$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} l_i}\right) \qquad (۱۳-۴)$$

در روابط بالا l_i، m_i و u_i به ترتیب مؤلفه‌های اول تا سوم اعداد فازی هستند.

مرحله۵: محاسبه درجه بزرگی S_iها نسبت به همدیگر

به‌طورکلی اگر $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، طبق شکل ۴-۸ درجه بزرگی M_1 نسبت به M_2 به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \dfrac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۱۴-۴)$$



شکل ۴-۸ : درجه بزرگی دو عدد فازی نسبت به هم[۳۱]

از طرف دیگر میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از K عدد فازی مثلثی دیگر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} V(M \geq M_1, M_2, ..., M_k) &= V[(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and ... and } (M \geq M_k)] \\ &= MinV(M \geq M_i), \quad i = 1, 2, 3, ..., k \end{aligned} \qquad (۱۵-۴)$$

مرحله۶: محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی

بدین منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$d'(A_i) = MinV(S_i \geq S_k) \qquad k = 1,2,...,n \ , \ k \neq i \qquad (۱۶-۴)$$

بنابراین بردار وزن نرمالیزه نشده به‌صورت زیر خواهد بود:

$$A_i \ (i = 1, 2, ..., n) \qquad W' = (d'(A_1), d'(A_2), ..., d'(A_n))^{\mathrm{T}} \qquad (۱۷-۴)$$

مرحله۷: محاسبه بردار وزن نهایی

برای محاسبه بردار وزن نهایی باید بردار وزن محاسبه‌شده در مرحله قبل را نرمالیزه کرد. بنابراین:

$$W = (d(A_1), d(A_2), ..., d(A_n))^{\mathrm{T}} \qquad (۱۸-۴)$$

۴-۵- جمع‌بندی

ارزیابی و تخمین ریسک در تونل سازی مکانیزه یک نیاز اصلی و اولیه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت ریسک به‌حساب می‌آید که در تمامی عمر یک پروژه تونل سازی صورت می‌گیرید. ارزیابی کمی ریسک مشتمل بر به‌کارگیری ابزارهای خاصی است که نیازمند داده‌های فراوان و معتبر بوده و پیچیدگی آن‌ها ایجاب می‌کند. عمده محاسبات مربوط به‌وسیله کامپیوتر و نرم‌افزار انجام شود. این حقیقت که وجود ریسک‌ها و افزایش عوامل تأثیرگذار، رسیدن به اهداف پروژه‌ها را دچار مشکل کرده بیانگر این مطلب است که روش‌های فعلی نتوانسته‌اند همه نیازهای مدیریت را برآورده کنند و نیاز به روش‌های نوین احساس می‌شود. یکی از نیازهای مدیریت برای کنترل ریسک‌ها بحث پرداختن به علل ریشه‌ای حوادث است. به‌عنوان‌مثال روش تحلیل درخت رویداد در ارزیابی ریسک‌های طراحی سیستم مورداستفاده قرار می‌گیرد نه یک فرایند پیچیده وسخت.از روش ۳D دانشگاه ملبورن برای شناسایی کلیه خطرات ناشی از فعالیت‌ها به‌منظور تعیین اولویت آن‌ها جهت انجام اقدامات کنترلی استفاده می‌شود. از روش ویلیام فاین برای ضرورت و موجه بودن هزینه‌ها و لزوم اجرای هر چه سریع‌تر برنامه‌های کنترلی خطر استفاده می‌شود. روش‌های موجود را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف طبقه‌بندی کرد. به‌عنوان‌مثال بعضی از روش‌های مطرح‌شده کاربرد مدیریتی و تعدادی کاربردمهندسی دارند. نقطه قوت روش درخت خطا نسبت به روش‌های مطرح‌شده،قابلیت آن برای شناسایی ترکیبی از خرابی‌های ابتدایی تجهیزات و خطاهای انسانی است که می‌تواند منجر به یک حادثه شوند. این روش منطق برای شناسایی خطای سیستم است و معمولاً برای تحلیل دستگاه‌های پیچیده و شناسایی خطاهای رایج سیستم به کار می‌رود.

روش‌های مختلفی برای ارزیابی کمی ریسک‌ها وجود دارد که در این فصل روش‌های کمی کردن ریسک با استفاده از درخت خطا به‌طور کامل شرح داده شد. سپس به معرفی روش تحلیلی درخت خطا، همچنین روش تحلیل سلسله مراتبی فازی(FAHP) و درخت خطای فازی(FFTA) به‌طور مفصل تشریح شده است. در فصل آینده بعضی از پارامترهای مربوط به ریسک در تونل سازی مکانیزه با استفاده از روش‌های مطرح‌شده در این فصل به‌طور مفصل موردبررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

فصل پنجم

تحلیل ریسک تونل سازی مکانیزه

مطالعه موردی(خط ۳ مترو مشهد)

۵-۱- مقدمه

عوامل خطر در پروژه‌های تونل زنی بسیار مهم است. این عوامل می‌توانند بر روی حداقل یک هدف پروژه مانند زمین‌شناسی،ایمنی، مالی، و یا طراحی تأثیرگذار باشد. بنابراین، این عوامل برای مدیران و یا برنامه ریزان حیاتی است، به‌طوری‌که؛ همیشه برای آن‌ها یک روش مناسب به‌منظور اولویت‌بندی ریسک‌ها وجود دارد. بسیاری از مشکلات تصمیم‌گیری در دنیای واقعی در محیط‌های پیچیده‌ای رخ می‌دهد که در آن دستگاه‌های غیرمنطقی، نامشخص و بادانش ناقص در نظر گرفته می‌شود. برای مقابله با چنین پیچیدگی‌هایی، مدل‌سازی ترجیحاً به استفاده از یکسری ابزارها، تکنیک‌ها و مفاهیم خاص برای آشکار کردن اطلاعات موجود با جزئیات دقیق نیاز دارد.

تونل‌سازی و کارهای ساختمانی زیرزمینی خطراتی را برای همه‌کسانی که با پروژه درگیر و همچنین کسانی که مستقیماً در این پروژه دخیل نبوده‌اند، ایجاد می‌کنند. ماهیت پروژه‌های تونل سازی به‌طورمعمول شامل ریسک‌های قابل‌توجهی ازجمله خطراتی بزرگی هستند که حوادث فاجعه‌بار را ایجاد می‌کنند. با توجه به مبهم بودن شرایط ذاتی، ازجمله شرایط زمین و آب‌های زیرزمینی، ممکن است خطرات احتمالی بیش‌ازحد و یا حتی ریسک تأخیر و همچنین خطرات زیست‌محیطی وجود داشته باشد. علاوه بر این، برای تونل‌هایی که در مناطق شهری احداث می‌شوند، خطر آسیب به ساختمان‌های تاریخی و یا حتی مختل کردن زندگی افراد جامعه وجود دارد.که درنهایت، یک خطر اجتماعی به وجود خواهد آمد که پروژه تونل سازی باعث ایجاد اعتراضات عمومی می‌شود که بر روند اجرای پروژه تأثیر می‌گذارد و باعث تأخیر در اتمام آن می‌شود.

برای بررسی ریسک‌های مرتبط با هر سیستم، ابتدا لازم است تا پتانسیل ریسک‌های ذاتی و سناریوهای مرتبط با آن به‌طور سیستماتیک ارزیابی و شناسایی شوند. ارائه یک تعریف منحصربه‌فرد و معتبر از واژه ریسک سخت و مشکل است، چراکه معنی و مفهوم آن می‌تواند با توجه به موضوع و زمینه ارزیابی بسیار متفاوت باشد اما بااین‌وجود یک تعریف جامع توسط Kaplan در سال ۱۹۹۷ به شرح زیر ارائه‌شده است:

یک معنا و مفهوم رایج و موردقبول از ریسک (R)، حاصل‌ضرب فراوانی رخداد یک رویداد مخرب(F)، و خسارت یا پیامد آن[۲] (C) ازنظر ایمنی، اقتصادی، اعتبار و غیره است که در معادله زیر به آن اشاره‌شده است.

$$R= F \times C \qquad (۱-۵)$$

در این تحقیق بر اساس پروژه‌ها و کارهای انجام‌شده درگذشته و همچنین مکاتبه و رایزنی با کارشناسان و متخصصان امر در زمینه تونل سازی شهری ابتدا تعدادی سطوح ریسک و عوامل زمینه‌ساز خطر در عملیات تونل سازی شناسایی‌شده است و با استفاده از ساختار تحلیل درخت خطای فازی(FFTA) مورد ارزیابی قرارگرفته است.سپس با توجه به نوع درگاه‌های ارتباطی، محاسبات برای یافتن احتمال رویدادهای میانی و پایانی صورت گرفته است. همچنین برای پیدا کردن عنصر دوم ریسک یعنی پارامتر پیامد، روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) مورداستفاده قرارگرفته است. درنهایت عدد ریسک بدست آمده در ساختار ماتریس ریسک ارائه‌شده است که در ادامه فصل به تشریح مفصل آن پرداخته‌شده است.

۵-۲- تحلیل احتمالاتی ریسک‌های تونل سازی مکانیزه با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی (FFTA)

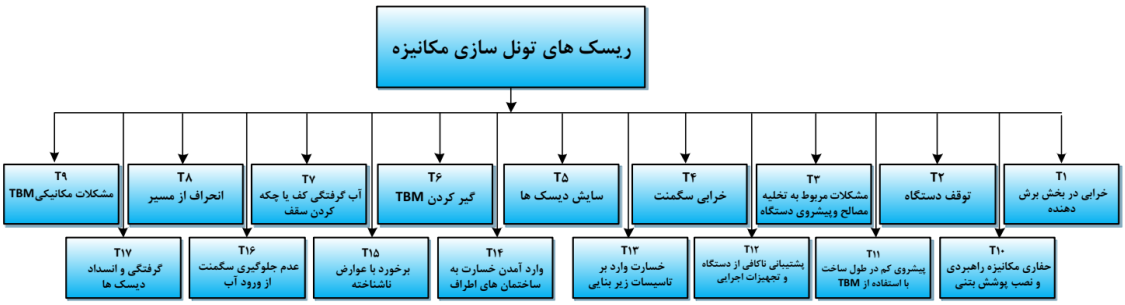
تحلیل درخت خطا، یکی از مدل‌های مطلوب ارزیابی مخاطرات به شمار می‌رود. گاهی اوقات به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی، برآورد دقیق میزان احتمال وقوع رویدادها دشوار است. علاوه بر این به علت عدم دقت در اطلاعات رویداد بالایی، نتیجه کلی نیز داری عدم قطعیت است. برای جلوگیری از چنین شرایطی، رویکرد فازی و ترکیب آن با نظر متخصصان و کارشناسان را می‌توان با روش تحلیل درخت خطا به کار برد تا ابهام در رویدادهای اساسی را کاهش دهد.

فرایند ارزیابی ریسک اولین و مهم‌ترین مرحله در اجرای ایمن سیستم‌های عملیاتی است. درخت خطا به‌صورت گرافیکی نشان می‌دهد که چگونه یک رویداد می‌تواند بهروش‌های مختلفی اتفاق بیفتد و به‌طور سیستماتیک احتمال رویدادهای متوالی را شناسایی بکند.این روش به‌راحتی می‌تواند توضیح

دهد که چگونه نقص تجهیزات و خطاهای انسانی با توجه به یک سری درگاه‌های AND و OR در ترکیب با یکدیگر باعث به وجود آمدن ریسک در رویداد اولیه خواهد شد.

۵-۲-۱- درخت های خطای مطرح‌شده در ریسک تونل سازی مکانیزه

ریسک‌های مختلف ناشی از نتایج عملیات تونل سازی را می‌توان به ۱۷ رویداد مستقل تقسیم کرد که خود این نتایج می‌توانند به‌عنوان رویداد بالایی برای درخت خطاهای جداگانه مورداستفاده قرار بگیرند، در شکل ۵-۱ این تقسیم‌بندی ارائه‌شده است.



شکل ۵-۱: ساختار درختی ریسک تونل سازی مکانیزه

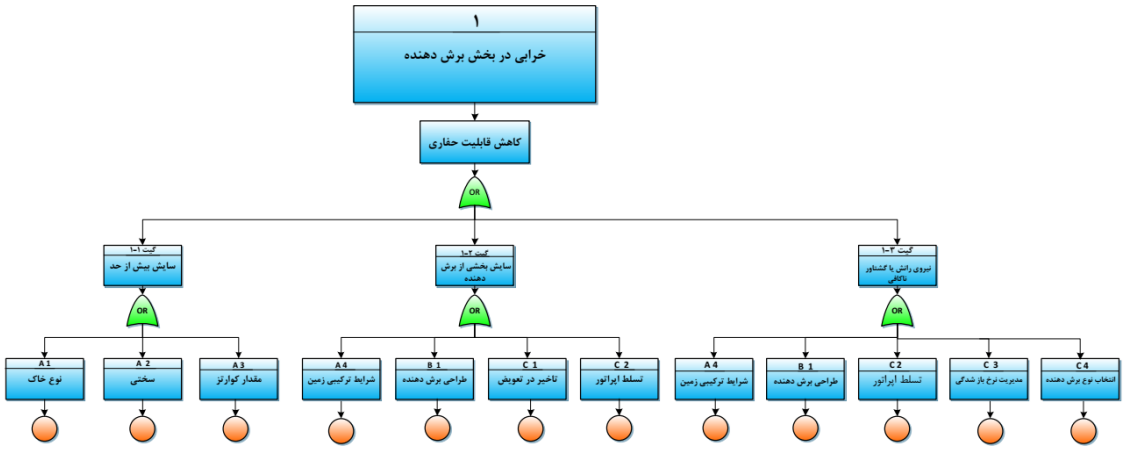
۵-۲-۱-۱- خرابی در بخش برش دهنده: T۱

با پیشرفت و گسترش صنعت تونل سازی ، افزایش ابعاد و محدود شدن زمان کار و همچنین تغییر ساختار شهری و ایجاد خطوط مترو استفاده از ماشین‌های تونل زنی تمام مقطع TBM هرروز بیشتر می‌شود. TBM ماشینی برای حفر تونل‌ها با مقاطع دایره‌ای با ابعاد و شرایط زمین‌شناسی متفاوت است. استفاده گسترده از سازه‌های زیرزمینی در نقاط مختلف کشور برای اهداف گوناگون نظیر حمل‌ونقل، آب‌رسانی، معدن و منابع نفتی سبب شده است که توجه بسیار زیادی به نوع زمین و بالطبع استفاده از ابزارهای مناسب برای ایجاد این‌گونه فضا در زیرزمین شود. ابداع ماشین تونل زنی مجهز به برش دهنده‌های دیسکی و یا استفاده از سپرها به‌عنوان وسیله ایمنی برای حفر تونل‌ها عمده‌ترین پیشرفت‌ها درروند مکانیزه کردن حفر تونل است. ابزار برش TBM که روی کله حفاری آن نصب می‌گردند ازجمله مهم‌ترین قسمت‌های ماشین است که آشنایی با آن‌ها و مکانیزه حفر آن‌ها از

اهمیت زیادی برخوردار است. از سویی دیگر یکی از فاکتورهای مهم بر سرعت حفاری یا نرخ پیشروی در TBM نرخ نفوذ و یا نرخ پیشروی آنی ماشین است. اصلی‌ترین قسمت ماشین تونل زنی کله حفاری آن است که ابزار برش‌های سنگ روی آن نصب می‌شوند . این صفحه دایره‌ای شکل است و حول محور خود منطبق بر محور دستگاه و محور تونل می‌چرخد.

ابزار برش TBM به‌عنوان مهم‌ترین قسمت دستگاه که در تماس با توده سنگ سینه کار است در شرایط مختلف زمین‌شناسی رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد . درگذشته برای برش سنگ‌ها در محفظه‌ای دایره‌ای شکل کارگران در محفظه‌هایی مخصوص عمل برش سنگ را توسط ابزارهای دستی اولیه انجام می‌دادند . امروزه به‌طورکلی از ابزار برش دیسکی از نوع فرورونده استفاده می‌شود . (نیروی وارده از سوی ابزار برشی فرورونده از نوع فشاری بوده و عمود بر سطح سنگ وارد می‌گردد.

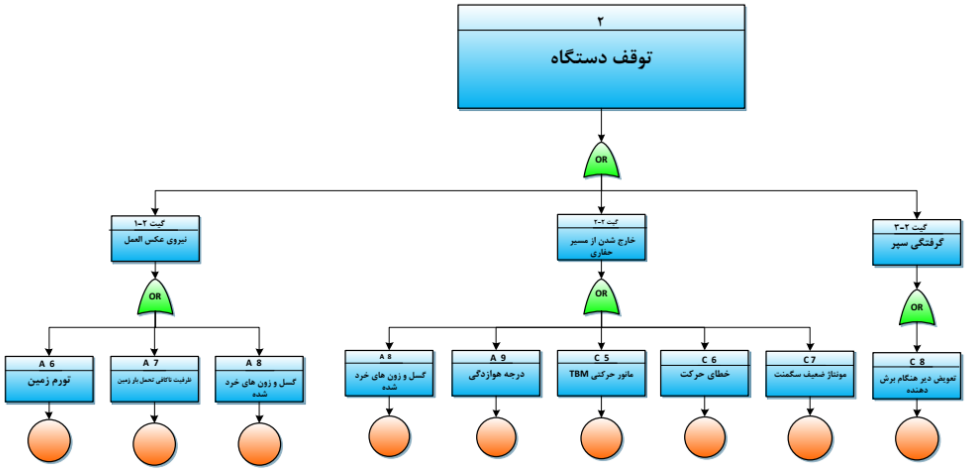
یکی از مهم‌ترین مشکلات در میان خطرات مربوط به برش دهنده‌های TBM کاهش میزان پیشرفت تونل به دلیل کاهش قابلیت و توانایی برش دهنده‌های ماشین حفاری (درخت ۱) است. از مهم‌ترین دلایل اصلی این خطر می‌توان به سایش بیش‌ازحد (درگاه ۱-۱)، سایش بخشی از برش دهنده‌های ماشین (درگاه ۱-۲)، یا نیروی محرک ناکافی یا گشتاور ماشین TBM (درگاه ۱-۳)، اشاره کرد که در شکل ۵-۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۵-۲: درخت خطای رویداد مربوط به خرابی در بخش برش دهنده

۵-۲-۱-۲- توقف دستگاه: T۲

حفاری تونل در بعضی از شرایط زمین‌شناسی و شرایط جبهه کار مخلوط در زیرساخت‌های شهری مشکلات بالقوه بزرگی را شامل می‌شود که باعث توقف دستگاه می‌شود که اگر اقدامات متقابل برای جلوگیری با این شرایط در نظر گرفته نشود باعث توقف کامل حفاری خواهد شد. و عوامل متعدد برای این پارامتر وجود دارد. خطرات ناشی از توقف دستگاه (به‌عنوان‌مثال، انسداد یا گرفتگی سپر) شامل نیروی واکنش یا نیروی عکس‌العمل نامناسب (درگاه۲-۱) ناشی از جابجایی بیش‌ازحد زمین، خارج شدن دستگاه از مسیر حفاری در حین حفاری (درگاه۲-۲) و گرفتگی سپر (درگاه ۲-۳)، می‌باشند [۴۳].

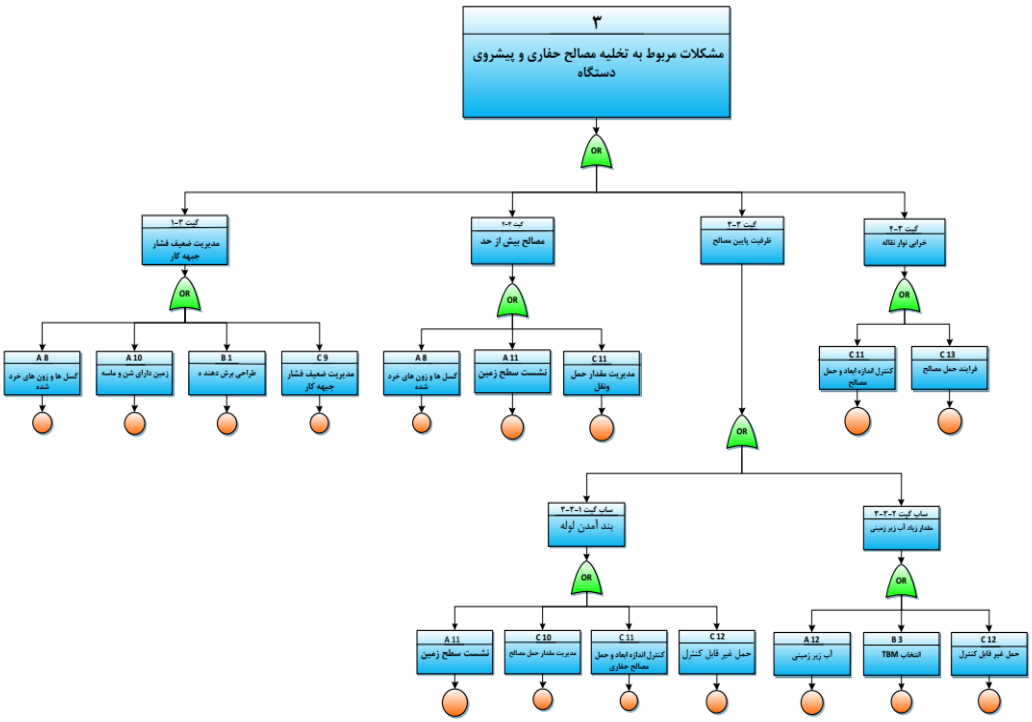


شکل ۵-۳: درخت خطای رویداد مربوط به توقف دستگاه

۵-۲-۱-۳- مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه: T۳

اگر مواد حفاری (به‌عنوان‌مثال ماک) به‌طور سیستماتیک به عقب منتقل نشوند، TBM دیگر نمی‌تواند روبه‌جلو پیشروی داشته باشد،درنتیجه کل ساخت‌وساز تونلی متوقف می‌شود.به‌عنوان یک اصل ، برای پیشروی و حفاری ماشین تمام مقطع بایستی تمامی مشکلات مربوط به تخلیه رفع شوند. تونل زنی در شرایط جبهه کار مخلوط با دستگاه حفاری تمام مقطع (TBM) با چالش‌های بزرگی روبرو است و ممکن است خطرات بالقوه‌ای را بدون هشدار ایجاد کند. بنابراین درک دقیق از چنین شرایط نامطلوب، برای یک حفر موفق یک تونل با ماشین حفار تمام مقطع ضروری است [۹۱،۴۳].

خرابی‌های مربوط به مایع بهسـازی می‌توانند از کمربند نقاله خارج شـوند و سپس به دلیل اصطکاک کم و شیب بالای نوار نقاله پیچ (اسکرول)دستگاه حفاری تونل تجمع می‌یابند و باعث می‌شود که زمان و شـرایط کار برای تمیز کردن و تخلیه مواد و مصـالح حفاری افزایش یابد خطرات ناشـی از مشکلات مربوط به تخلیه مصـالح حفاری و پیشـروی دستگاه عبارتند از مدیریت ضعیف و نامناسب فشار جبهه کار (درگاه ۳-۱) ریزش مصالح بیش‌ازحد (درگاه ۳-۲)، ظرفیت پایین مصالح (درگاه۳-۳) و خرابی نوار نقاله (درگاه۴-۳). شکل۵-۴ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



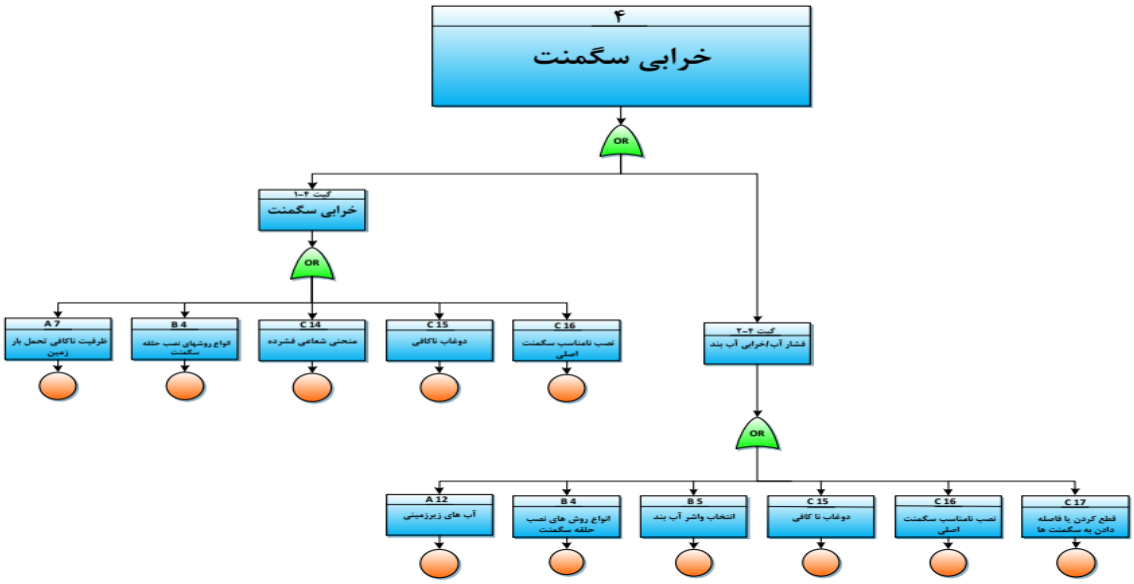
شکل ۵-۴: درخت خطای رویداد مربوط به مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه

۵-۲-۱-۴- خرابی سگمنت: T۴

ایجاد پله در بین سـگمنت ها، امری معمول در چیدمان رینگ بتنی اسـت ولی مقدار مجاز پله شـدگی در هر پروژه وابسـته به اهداف پروژه، قطر تونل، خصـوصـیات TBM ابعاد شیلد پشتی، نوع و ابعاد سـگمنت، روش اتصـال سگمنت ها، شرایط آب‌بندی (به‌کارگیری گسکت) و روش اجرای تزریق دوغاب است . پله شدگی نسبت به رینگ قبل درنتیجه‌ی عدم قرارگیری مناسب سگمنت ها در امتداد

درزهای محیطی اســت درحالی‌که پله شــدگی در رینگ در امتداد درزهای طولی رخ می‌دهد. بنابراین پله شــدگی‌ها به دو گروه پله شــدگی محیطی و طولی طبقه‌بندی می‌شــود [۶۴]. لب‌پریدگی نوعی شــکستگی سگمنت است که در گوشه‌های سگمنت و تحت تأثیر بارهای موقت در زمان رینگ گذاری ایجاد می‌شــود. توزیع خارج از مرکز نیروی جک‌های جلوبرنده بر رینگ ســگمنت ی یکی از عوامل لب‌پریدگی است. این عامل در زمین‌های نرم و ناهمگن می‌تواند منجر به افزایش آرماتوربندی یا تغییر ابعاد ســگمنت در طراحی پوشش تونل شود. علاوه بر آن شکستگی سگمنت دوام پوشش بتنی تونل را کاهش می‌دهد . همچنین نشت آب به تونل تحت تأثیر پله شدگی و لب‌پریدگی افزایش می‌یابد[۶۴].

خطرات ناشی از خرابی سگمنت عبارت‌اند از خرابی سگمنت(درگاه ۴-۱) و فشار آب / خرابی آب‌بند (درگاه۴-۲). شکل۵-۵ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای مطرح‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵ : درخت خطای رویداد مربوط به خرابی سگمنت

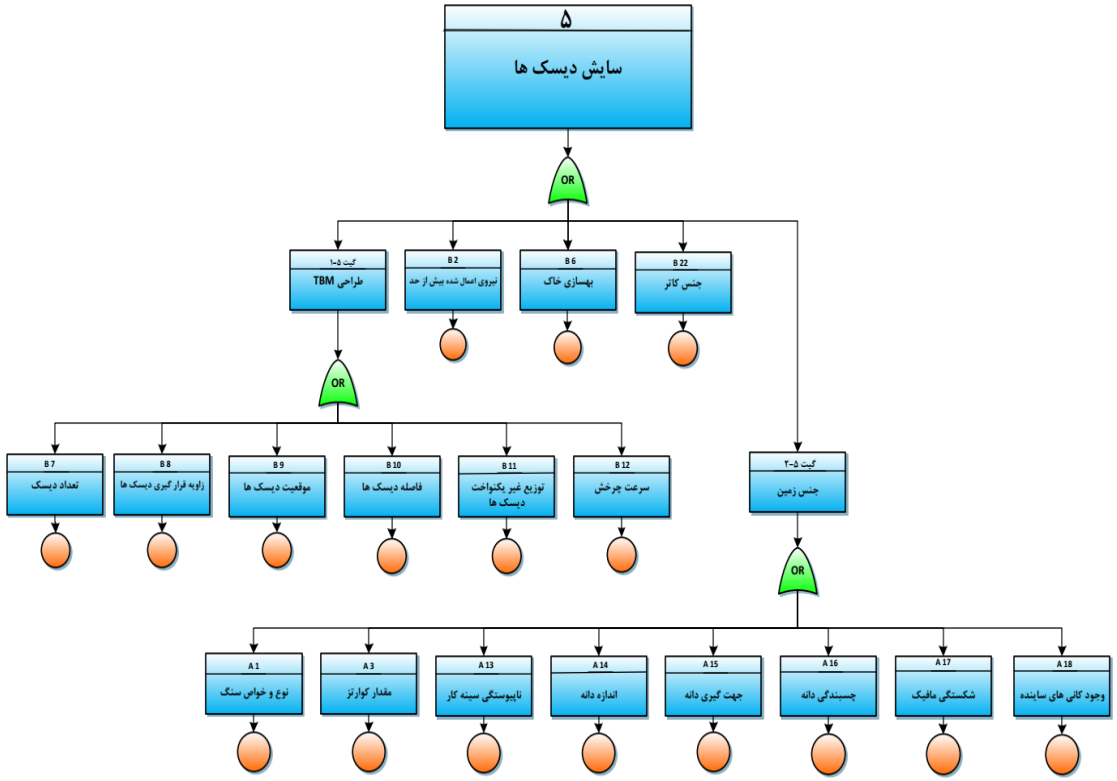
۵-۲-۱-۵- سایش دیسک‌ها: T5

سایش را می‌توان به‌صورت از دست رفتن و زدوده شدن مداوم و ناخواسته مواد از سطح یک جسم جامد، در اثر کنش‌های مکانیکی، مانند تماس و حرکت نسبی میان دو جسم، تعریف نمود . برهم‌کنش

سـطوح در تماس به هنگام حرکت نسـبی، موضـوعی اسـت عمومی که در اکثر طرح‌های مهندسی حضور دارد و می‌توان گفت ماشین یا مکانیزمی وجود ندارد که به آن وابسته نباشد.

یکی از هزینه‌های عمده‌ی احداث تونل با ماشـین حفار تونل در سنگ‌های سخت و زمین‌های نرم، سایش ابزارهای حفاری است. عملیات بازبینی و تعویض ابزار حفاری در زمین‌های نرم به‌ویژه در مناطق سـسـت و زیر سـطح آب زیرزمینی از طریق نگهداری پایداری جبهه کار تونل با اسـتفاده از فشـار هوا انجام می‌گیرد که عملیات هایپرباریک نامیده می‌شـود. که زمان‌بر، هزینه‌بر و همراه با ریسـک اسـت. انجام این عملیات نیازمند شـرایط زمین‌شـناسـی قابل آب‌بند با دوغاب بنتونیت است که در آن بعد از تخلیه مصـالح حفاری‌شـده از اتاقک حفاری، فشـار هوایی معادل با فشـار لازم برای نگهداری زمین و نیروی آب تراوشـی به جبهه کار اعمال می‌شـود و افراد تحت شرایط خاص به این محدوده تحت‌فشار واردشـــده و از ابزارهـای حفاری بازدید کرده و یا آن‌ها را تعویض می‌کنند. علاوه بر آن، بازدید از ابزار حفـاری در هر پروژه‌ای به‌صـــورت دوره‌ای انجام می‌گیرد که هرچقدر تعداد آن کاهش یابد می‌تواند درروند حفاری و کاهش هزینه‌ها تأثیر داشته باشد [۹۷].

از مهم‌ترین دلایل اصلی این خطر می‌توان به طراحی TBM (درگاه ۵-۱) و جنس زمین (درگاه ۵-۲)، نیروی اعمال‌شده بیش‌ازحد(B۲)، بهسازی خاک(B۶) و جنس کاتر ها (B۲۲) اشاره کرد که در شکل ۵-۶ نشان داده‌شده است.



شکل ۵-۶: درخت خطای رویداد مربوط به سایش دیسک‌ها

۵-۲-۱-۶- گیرکردن TBM: T۶

حفاری مکانیکی تونل با ماشین‌های تونلی (TBM) یک روش محبوب جهانی در بین تونل زنی است که محدودیت‌های کاربرد آن (قطر، طول، بارگذاری بیش‌ازحد، فشار آب، زیرزمین و غیره) به‌طور مداوم در حال پیشرفت است . در اغلب مناطق با خواص زمین‌شناسی بسیار متغیر باقدرت هر چه تمام در حال پیشرفت است. اغلب در طول حفاری و انتقال مواد، تأثیر مکانیکی موجب از دست دادن قدرت می‌شود که حتی می‌تواند منجر به فروپاشی کامل ساختار کامپوزیت شود. در بسیاری از موارد و به‌ویژه در ترکیب با جریان آب، مواد حفاری به سطوح فولادی، ابزار برش یا انتقال سیستم TBM می‌چسبند. این ممکن است در حفاری، حمل‌ونقل و استفاده مجدد یا از خارج کردن مشکلات بزرگی ایجاد کند: تقاضای انرژی بالا، مسدود کردن یا خرابکاری ابزار حفاری، مسدود کردن نوار نقاله پیچ یا باند، مشکلات در ثبات جبهه کار ازجمله مشکلاتی است که در اثر گرفتگی TBM برای حفاری یک تونل مکانیزه اتفاق بیفتد. عوامل تعیین‌کننده در بروز چسبندگی و یا گرفتگی دسترسی به آب و همچنین

مواد معدنی خاک رس ،درحالی‌که قدر چسبندگی تغییرات بسته به قوام خاک هستند. برای استفاده از مکانیسم‌های مربوطه زیر سه معیار ممکن تعریف‌شده است[۱۰۵]:

۱ نوع بار (تنش برشی - فشرده‌سازی, برشی)

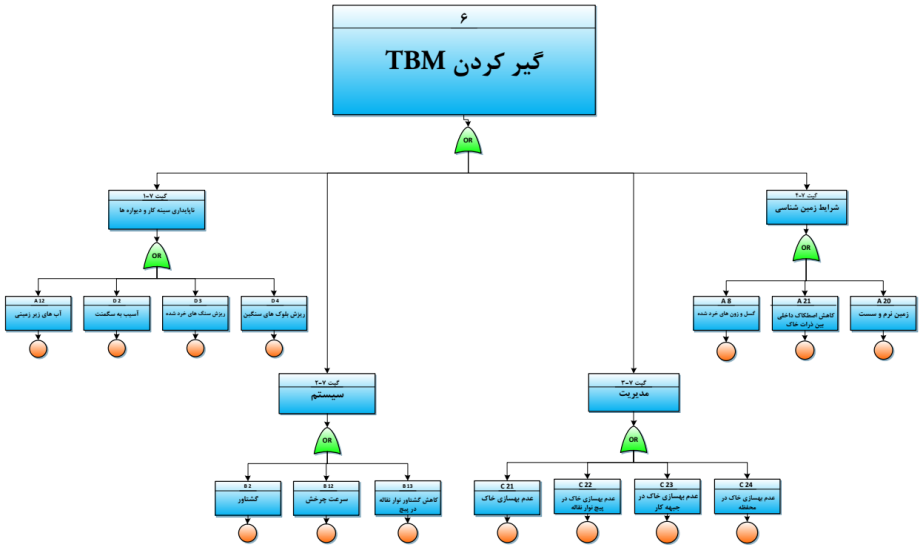
۲ جهت بارگذاری (نرمال, مماسی),

۳ نسبت نیروی چسبندگی / مقاومت خاک (بسته به‌ویژه در شکل‌پذیری و سازگاری).

به‌ویژه در محدوده پیچیده هندسی اطراف TBM با سایش مکانیکی بسیار متفاوت مواد حفاری، ترکیبی از این برای مقدار خاک بستگی به سطح فولاد (ابزار) مناسب است.

عوامل تأثیرگذار بر پیشرفت و توسعه گرفتگی عبارت‌اند از:

می‌شود TBMقابلیت خاک رس برای توسعه رفتار چسبنده که منجر به مسدود شدن یا گرفتگی به عوامل متعددی که مربوط به نوع خاک، توزیع اندازه دانه آن، نوع مواد معدنی خاکی، پلاستیک عبارت‌اند TBMخاک، محتوای آب آن و حضور آب، بستگی دارد[۱۰۵]. خطرات ناشی از گیرکردن از ناپایداری سینه کار و دیواره‌ها (درگاه ۷-۱) سیستم حفاری (درگاه ۷-۲)، مدیریت حفاری (درگاه۷-۳) و شرایط زمین‌شناسی (درگاه۷-۴). شکل۵-۷ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.

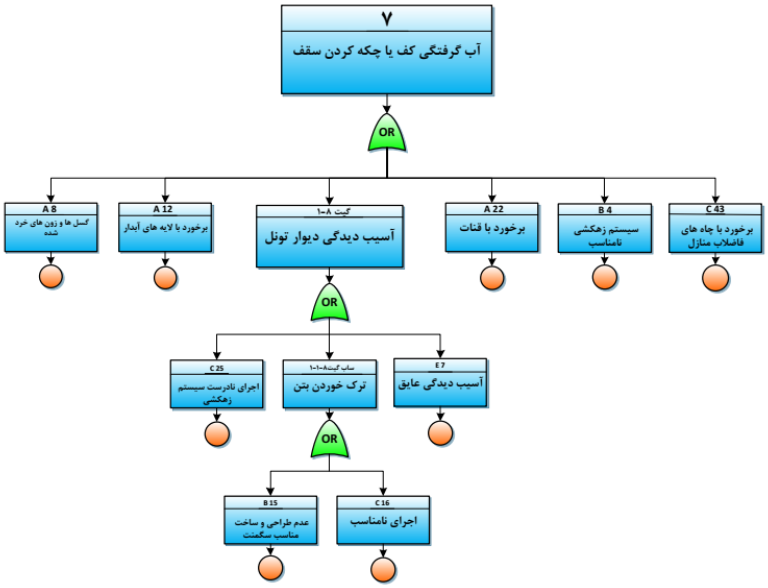


شکل ۵-۷: درخت خطای رویداد مربوط به گیرکردن TBM

۵-۲-۱-۷- آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف: T7

آب زیرزمینی علاوه بر هوازدگی، شستشو، کاهش زبری سطح و تضعیف سنگ‌های حساس به آب، با افزایش فشار منفذی و کاهش تنش مؤثر، باعث کاهش مقاومت سنگ می‌شود حفر تونل در سنگ‌های کارستی و در زیر سطح ایستابی علاوه بر مشکلات پایداری می‌تواند توجیه اقتصادی و زمانی اجرای طرح را نیز تهدید کند. پوشش بتنی این تونل‌ها با در نظر گرفتن فشار هیدرو استاتیکی اعمالی، طراحی‌شده و TBM مناسب با توجه به فشار هیدرو استاتیکی و نیز نفوذپذیری سنگ انتخاب می‌شود TBM . های باز قادر به تحمل حداکثر فشارمعینی از آب هستند، به‌طوری‌که شدت‌جریان آب از سینه کار تونل بیشتر از ۹۹ لیتر بر ثانیه برای هر متر قطر تونل نباشد، از طرفی حداکثر مقدار فشار آب برای TBM های سپری بیشتر از انواع باز است و تقریباً یک مقدارمعین از وجود آب می‌تواند آسیب‌های جدی به سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی TBMو سیستم پشتیبانی آن وارد سازد و موجب توقف عملیات حفاری، کاهش راندمان حفاری و فرسودگی TBM شود. از طرف دیگر غرقاب شدن تونل، توقف عملیات حفاری، افزایش زمان و هزینه‌های ساخت، خشک شدن چشمه‌ها در منطقه و مشکلات زیست‌محیطی، از پیامدهای برخورد با زون‌های کارستی و هجوم آب به داخل تونل است [۴۸].

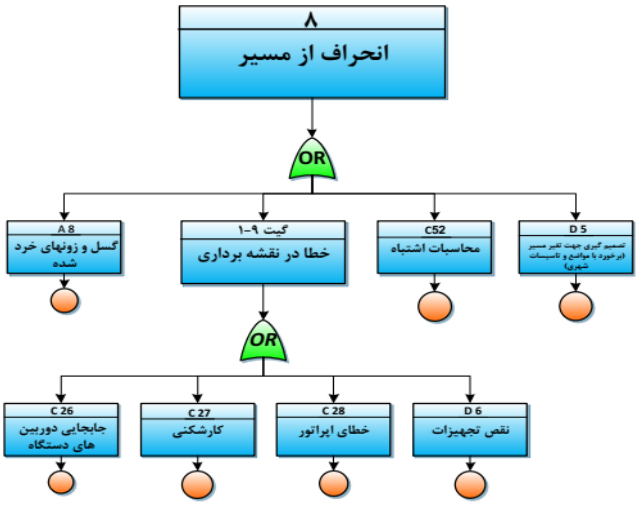
خطرات ناشی از آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف عبارتند از آسیب‌دیدگی دیواره‌های تونل (درگاه ۸-۱) ترک خوردن بتن (درگاه ۸-۱-۱)، گسل‌ها و زون‌های خردشده (A8) ، برخورد با لایه‌های آبدار(A۱۲)، برخورد با قنات(A۲۲)، سیستم زهکشی نامناسب(B۴) و برخورد با فاضلاب و چاه‌های منازل. شکل۵-۸ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۸: درخت خطای رویداد مربوط به آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف

۵-۲-۱-۸- انحراف از مسیر: T8

انحراف از مسیر حفاری به خصوصیات هندسی تونل (ابعاد، شیب، قوس و ...،) وضعیت زمین‌شناسی، شرایط حفاری و مهارت اپراتور حفار وابسته است [۴۸]. از مهم‌ترین دلایل اصلی این خطر می‌توان به خطا در نقشه‌برداری (درگاه ۹-۱) ،گسل‌ها و زون‌های خردشده(A۸)، محاسبات اشتباه(C۵۲) و تصمیم‌گیری به جهت تغییر مسیر برای جلوگیری از برخورد با مواضع و تأسیسات شهری(D۵) اشاره کرد که در شکل ۵-۹ نشان داده‌شده است.

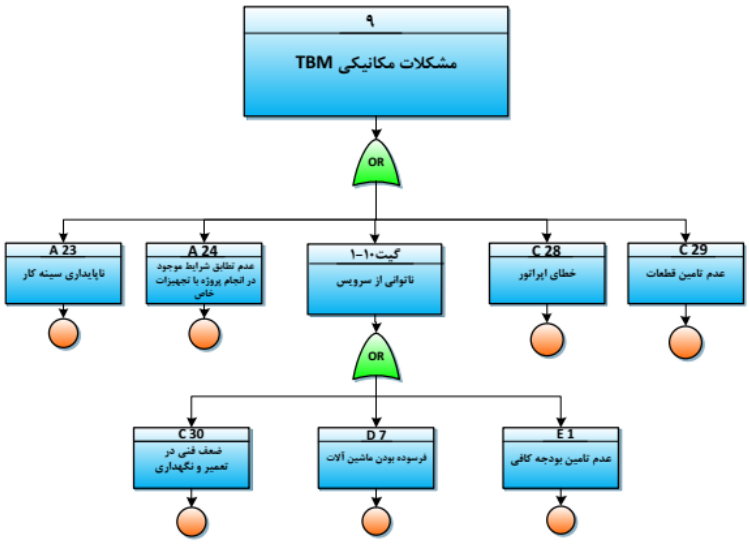


شکل ۵-۹: درخت خطای رویداد مربوط به انحراف از مسیر

۵-۲-۱-۹- مشکلات مکانیکی TBM: T۹

هم‌اکنون با توجه به نیاز به گسترش شبکه‌های مترو و راه‌های ارتباطی در شهرهای پرجمعیت و بزرگ، همچنین محدودیت‌های نواحی شهری، استفاده از روش‌های مکانیزه تونل سازی در نواحی شهری اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از روش‌های مکانیزه حفاری تونل مستلزم انتخاب ماشین مناسب با در نظر گرفتن شرایط پروژه، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی طول مسیر، تجربه و دانش فنی موجود و الزامات پروژه به‌خصوص زمان‌بندی پروژه است. برای انتخاب ماشین مناسب باید توانایی‌های ماشین‌های حفاری در زمین‌های نرم، دامنه کاربرد و محدودیت‌های خاص هر یک با توجه به شرایط زمین مسیر تونل را در نظر گرفت .اگرچه با پیشرفت فنّاوری ماشین‌های حفاری و با استفاده از روش‌های بهسازی و افزودنی‌های مختلف، محدوده کاربرد ماشین‌های مختلف تا حد زیادی به هم نزدیک شده است، به گونه‌ای که انواع سپرهای بسته در بازه گسترده‌ای از خاک‌های مختلف با موفقیت استفاده می‌شود [۱۰۷].حفاری تونل باراندمان موردنظر و کمترین هزینه و مشکلات اجرایی به انتخاب مناسب‌ترین ماشین بستگی دارد.

از مهم‌ترین دلایل اصلی این خطر می‌توان به ناتوانی از سرویس (درگاه ۱۰-۱) ، ناپایداری سینه کار(A۲۳) ، عدم تطابق شرایط موجود در انجام پروژه با تجهیزات خاص(A۲۴)، خطای اپراتور(C۲۸) و عدم تأمین قطعات (C۲۹) ضعف فنی در تعمیر و نگهداری(C۳۰)، فرسوده بودن ماشین‌آلات(D۷) و عدم تأمین بودجه (E۱) اشاره کرد که در شکل ۵-۱۰ نشان داده‌شده است.



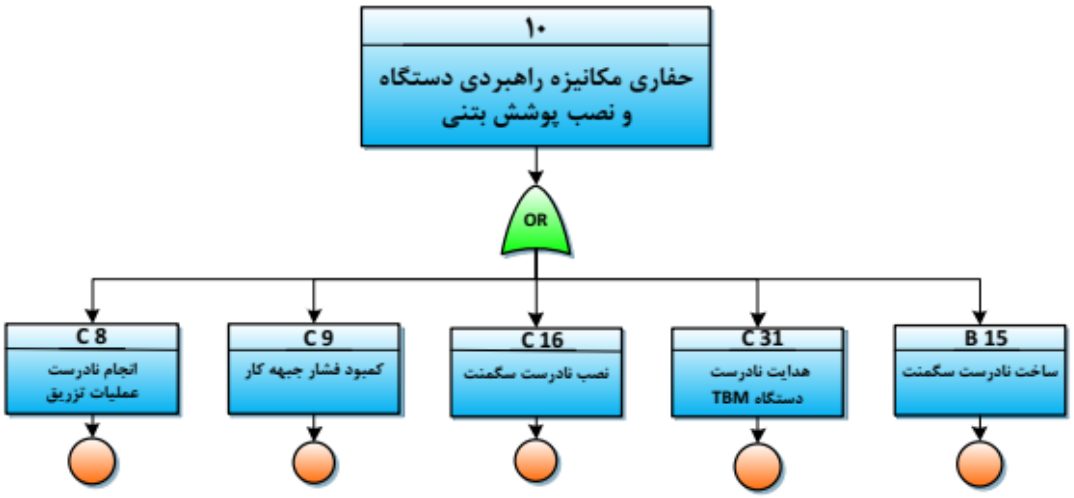
شکل ۵-۱۰: درخت خطای رویداد مربوط به مشکلات مکانیکی TBM

۵-۲-۱-۱۰- حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی: T۱۰

با افزایش جمعیت شـهری، جمعیت شـهرها بیشـتر و بیشـتر می‌شـود، ترافیک در همه‌جا اتفاق می‌افتد. در این مورد، راه‌کار بهره‌برداری از فضای زیرزمینی یک‌راه مؤثر برای مقابله با این مجموعه‌ای از مشـکلات معضلات پیش رو بوده است. ساخت تونل یکی از پروژه‌های زیربنایی مهمی است که برای افزایش شـبکه‌های حمل‌ونقل، به‌ویژه در شـهرهای پرجمعیت، اهمیت دارد. پروژه‌های تونل با ریسـک بالا، پیچیدگی‌ها، عدم اطمینان، وظایف سـاختاری تکراری، بودجه‌های بزرگ و طولانی‌مدت مشـخص می‌شود. چندین روش تونل زنی مانند دستگاه تعادل فشار زمین، دستگاه حفار تونل دوغابی در صنعت ساخت تونل برای بهبود سازه تونل‌ها و کاهش تأثیر بر ساختارهای اطراف آن توسعه‌یافته است. ساخت و طراحی یک تونل نیاز به اسـتفاده از تکنیک های مناسـبی دارد. انتخاب روش مناسـب برای حفاری تونل عمدتاً بر اسـاس تجربه‌های میدانی و محاسـبات دانش نظری به دلیل شـرایط متغیر زمین است. مؤثرترین عواملی که نقش مهمی در تصـمیم‌گیری برای انتخاب مناسب روش حفاری دارند، عبارت‌اند از: تونل، اندازه تونل، هیدرولوژی زیرزمینی، زمین‌شـناسـی سـاختاری، زمین‌شناسی منطقه‌ای، خواص مواد اطراف با مشخصات ژئوتکنیکی آن‌ها، ویژگی‌های ضعیف،تنش‌های القاء شده در محل.

خطرات ناشی از حفاری مکانیزه راه بردی و نصب پوشش بتنی عبارت‌اند از انجام نادرست عملیات

تزریق (C۸) ،کمبود فشارهای جبهه کار(C۹)، نصب نادرست سگمنت (C۱۶)، هدایت نادرست دستگاه TBM(C۳۱) و ساخت نادرست سگمنت(B۱۵). شکل۵-۱۱ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۱: درخت خطای رویداد مربوط به حفاری مکانیزه راهبردی دستگاه و نصب پوشش بتنی

۵-۲-۱-۱۱- پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM: T۱۱

یکی از مسائل مهم در حفاری مکانیزه ، پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM بوده که این کار مستلزم تخمین نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری TBM است. شناخت عوامل تأثیرگذار ب بهره‌وری از این نظر حائز اهمیت است که به‌وسیله آن می‌توان تخمین دقیق‌تری از زمان‌های توقف و حفاری و درنتیجه هزینه‌های اجرایی را به دست آورد. شرایط نامطلوب توده سنگ یکی از علل مهم کاهش بهره‌وری بوده که از آن جمله می‌توان به وقوع ریزش،ناپایداری، درزه و شکاف نامساعد در توده سنگ ، وجود آب‌های زیرزمینی، وجود مصالح حفاری چسبنده و سینه کار مختلط اشاره کرد. از آغاز حفاری تونل به روش مکانیزه ، یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی پیش‌بینی نرخ پیشروی بوده است. این کار مستلزم تخمین نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری است. نرخ پیشروی برابر با حاصل‌ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره‌وری است یا به‌عبارت‌دیگر، ضریب بهره‌وری نسبت زمان حفاری ماشین به‌کل زمان عملیات تونل سازی است [۱۰۸].

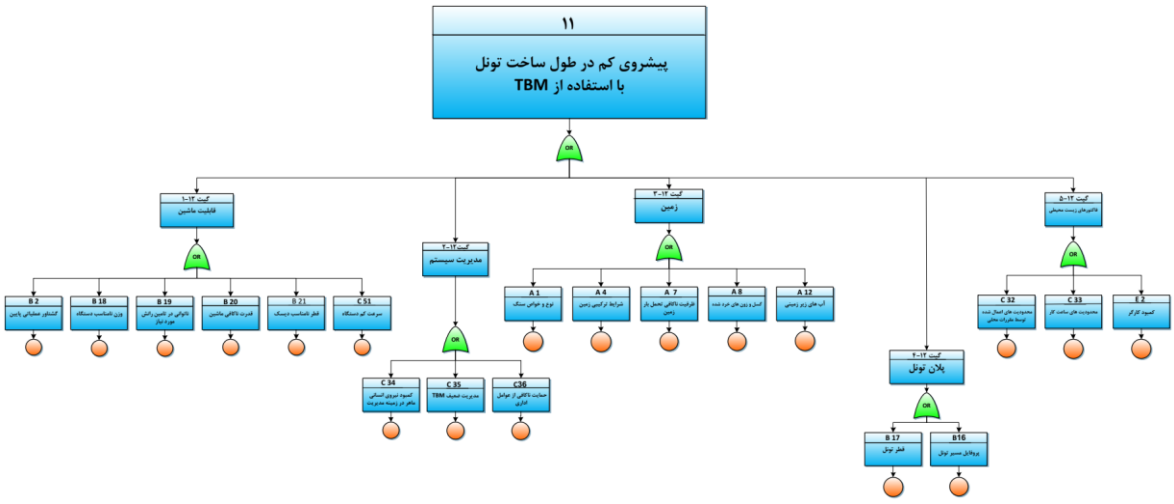
- پارامترهای اصلی مؤثر بر نرخ پیشروی حفاری تونل با ماشین TBM. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ پیشروی حفاری تونل که با TBM حفر می‌شود به شرح زیر است:

۱- پارامترهای مرتبط با شرایط زمین‌شناسی و دستگاه حفاری

۲- پارامترهای کیفیت مدیریت

۳- پارامترهای مرتبط با شرایط محلی و محیطی

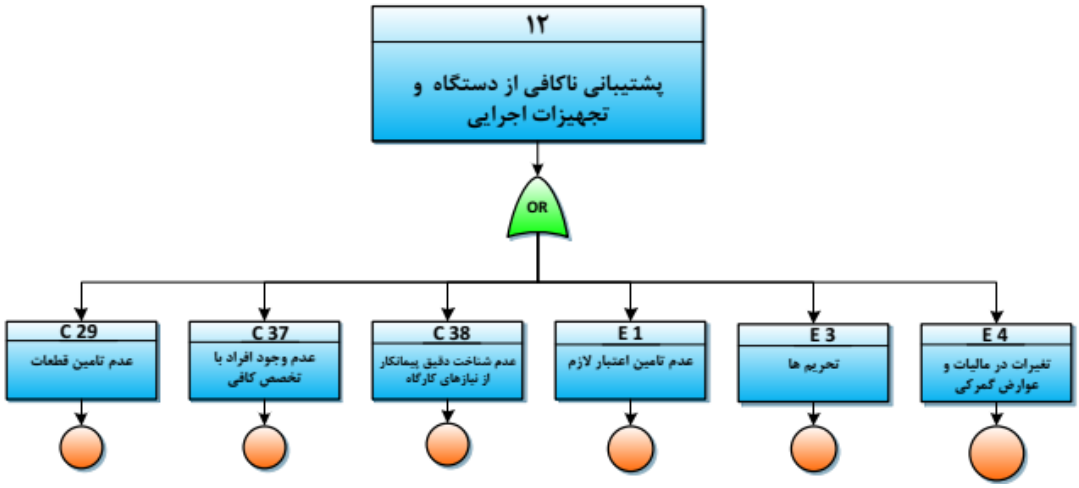
از مهم‌ترین دلایل اصلی این خطر می‌توان به قابلیت ماشین (درگاه ۱۲-۱) ،مدیریت سیستم (درگاه ۱۲-۲) ، شرایط زمین(درگاه۱۲-۳) ، پلان تونل (درگاه ۱۲-۴) و فاکتورهای زیست‌محیطی(درگاه۱۲-۵) و گشتاور عملیاتی پایین (B۲)،وزن نامناسب دستگاه (B۱۸)، ناتوانی در تأمین رانش موردنیاز(B۱۹)،قدرت ناکافی ماشین(B۲۰)، قطر نامناسب دیسک‌ها(B۲۱)، سرعت کم دستگاه(C۵۱)،کمبود نیروی انسانی ماهر در زمینه مدیریت(C۳۴)، مدیریت ضعیف TBM(C۳۵)، حمایت ناکافی از عوامل اداری(C۳۶)، نوع و خواص سنگ و خاک(A۱)، شرایط ترکیبی زمین(A۴)، ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین(A۷)، گسل و زون‌های خردشده (A۸)، آب‌های زیرزمینی(A۱۲)، ، پروفایل مسیر تونل(B۱۶)، قطر تونل(B۱۷)، محدودیت‌های اعمال‌شده توسط مقررات محلی(C۳۲)، محدودیت در ساعت کار(C۳۳) و کمبود کارگر(E۲) اشاره کرد که در شکل ۵-۱۲نشان داده‌شده است.



شکل ۵-۱۲: درخت خطای رویداد مربوط به پیشروی کم در طول ساخت تونل با TBM

۵-۲-۱-۱۲- پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی: T۱۲

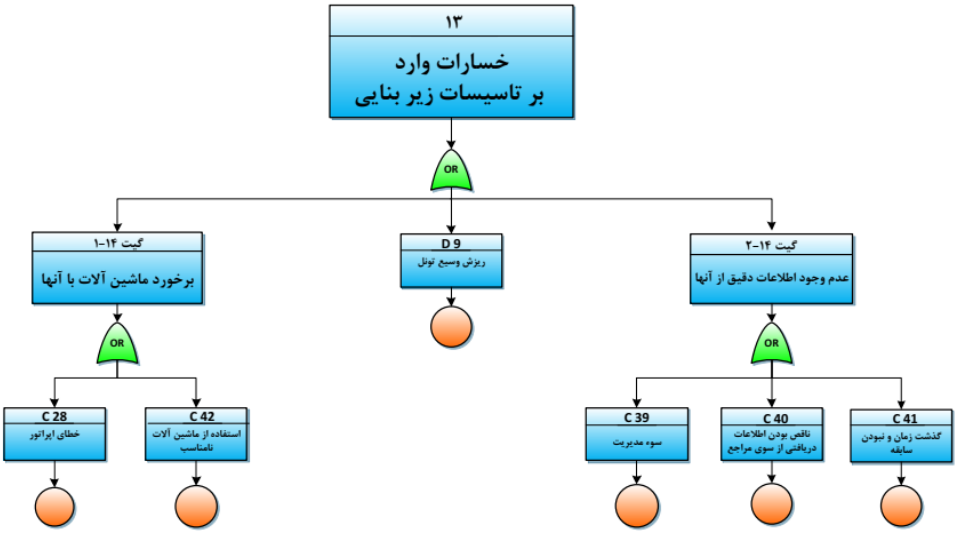
خطرات ناشی از پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی عبارت‌اند از عدم تأمین قطعات(C۲۹)، عدم وجود افراد با تخصص کافی(C۳۷)، عدم شناخت پیمانکار از نیازهای کارگاه(C۳۸)، عدم تأمین اعتبار(E۱)، تحریم‌ها(E۳) و تغییر در مالیات و عوارض گمرکی(E۴) شکل۵-۱۳ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۳: درخت خطای رویداد مربوط به پشتیبانی ناکافی دستگاه و تجهیزات اجرایی

۵-۲-۱-۱۳- خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی: T۱۳

خطرات ناشی از خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی عبارت‌اند از برخورد ماشین‌آلات با آن‌ها(درگاه۱۴-۱)،عدم وجود اطلاعات دقیق از آن‌ها(درگاه۱۴-۲) و ریزش وسیع تونل(D۹)، خطای اپراتور(C۲۸)،استفاده از ماشین‌آلات نامناسب(C۴۲)،سوء مدیریت(C۳۹)، ناقص بودن اطلاعات دریافتی از سوی مراجع(C۴۰) و گذشت زمان و نبود سابقه(C۴۱) شکل۵-۱۴ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۴: درخت خطای رویداد مربوط به خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی

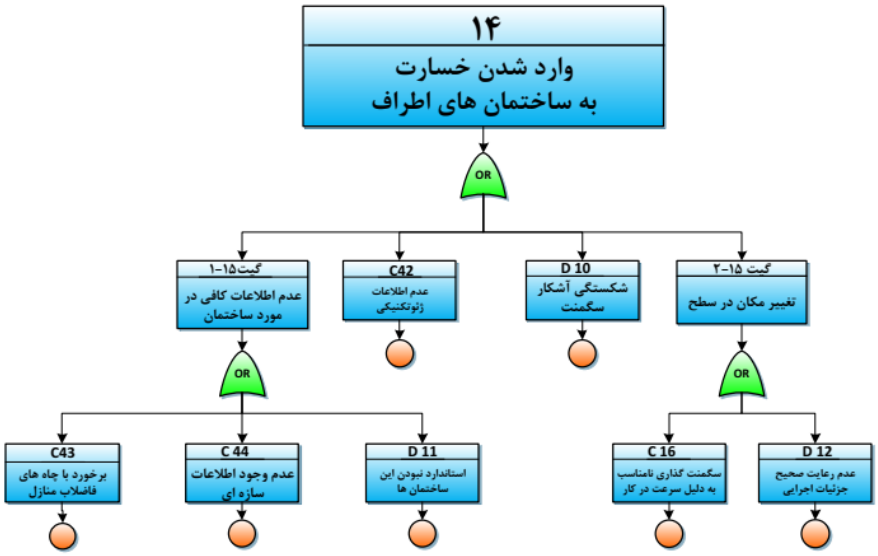
۵-۲-۱-۱۴- وارد شدن خسارات به ساختمان‌های اطراف: T۱۴

رشد جمعیت در اکثر شهرها باعث افزایش نیاز به اجرای زیرساخت‌ها شده است. هرچه محیط شهری شلوغ‌تر و فضـای سـطحی محدودتر شده، نیاز به ایجاد سازه‌های زیرسطحی مانند تونل‌ها برای تا مین این زیرسـاخت‌ها، بیشتر احساس می‌شود. ازجمله مشکلات حفاری این تونل‌ها نشست ناشی از حفاری و اثرات مخرب احتمالی آن برای ساختمان‌های واقع در سطح زمین است. ازاین‌رو تعیین مقدار نشـست ناشی از حفاری‌های زیرزمینی و مقایسه با مقدار نشست مجاز ساختمان‌ها امری بسیار مهم و قابل‌توجه اسـت. حفر تونل و دیگر فضـاهای زیرزمینی منجر به حذف بخشـی از توده خاک و بروز تغییرات قابل‌توجه در وضـعیت تنش می‌گردد. ازجمله نتایج دست‌خوردگی، وقوع کرنش‌هایی در توده خاک و بروز نشـست در سطح زمین می‌شود. مسئله نشست و تأثیر آن برسازه‌های اطراف و تأسیسات شهری از مهم‌ترین مسائل مطرح در حفاری‌های کم‌عمق در نواحی شهری است.

نشست زمین ازجمله مخاطراتی است که همواره همراه با تونل سازی همراه بوده و باعث آسیب به سـازه‌های اطراف تونل می‌شود. چون در مناطق شهری اغلب نشست به‌صورت نامتقارن رخ می‌دهد، خمش و پیچش در سـاختمان‌ها افزایش‌یافته و آسـیب‌های وارده بیشـتر می‌شـود. بدین منظور تونل سازی سپری یکی از روش‌های اصلی و ایمن در تونل سازی شهری است. به علت اهمیت نشست زمین

و تأثیر مستقیم آن بر هزینه‌های پروژه، مطالعات مختلفی برای پیش‌بینی و کنترل آن صورت گرفته و در ۲۴سال گذشته روابط متعددی برای پیش‌بینی نشست زمین ارائه‌شده است [۷۱]،[۷۲].

خطرات ناشـــی از خســـارت وارد بر ســـاختمان‌های اطراف عبارت‌اند: عدم اطلاعات کافی در مورد ســـاختمـان‌هـا(درگـاه۱۵-۱)، تغییر مکان در ســـطح(درگاه۱۵-۲)، عدم اطلاعات ژئوتکنیکی(C۴۲)، شـــکســـتگی آشـــکار ســـگمنت(D۱۰)، برخورد با چاه‌های فاضـــلاب منازل(C۴۳)، عدم وجود اطلاعات ســـازه‌ای(C۴۴)، استاندارد نبودن این ساختمان‌ها(D۱۱)، سگمنت گذاری نامناسب به دلیل سرعت در کـار(C۱۶)،عـدم رعـایـت جزییـات اجرایی(D۱۲) شـــکل۵-۱۵ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.

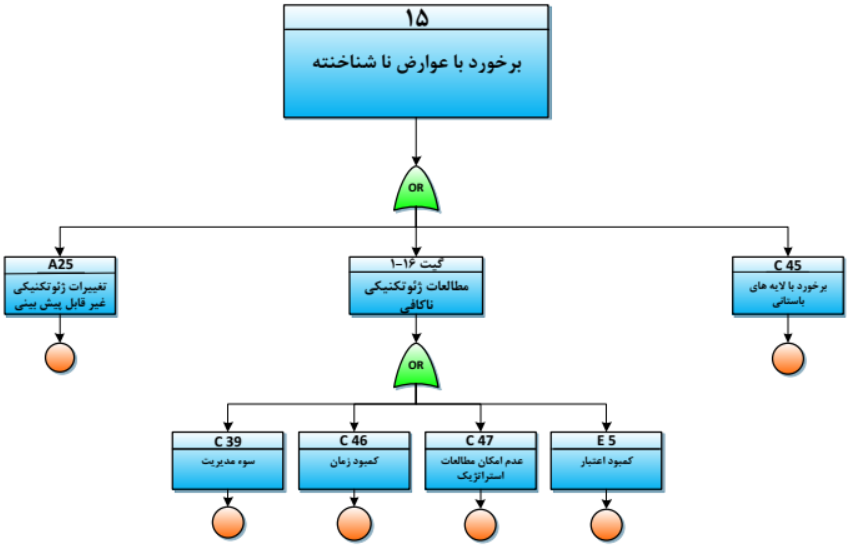


شکل ۵-۱۵۷: : درخت خطای رویداد مربوط به وارد شدن خسارت به ساختمان‌های اطراف

۵-۲-۱-۱۵- برخورد با عوارض ناشناخته: T۱۵

خطرات نـاشـــی از برخورد با عوارض ناشـــناخته عبارت‌اند: تغییرات ژئوتکنیکی غیرقابل‌پیش‌بینی (A۲۵)، مطـالعـات ژئوتکنیکی نـاکـافی(درگـاه۱۶-۱)، برخورد بـا لـایه‌های باســـتانی(C۴۵)، ســـوء مدیریت(C۳۹)، کمبود زمان (C۴۶)، عدم امکان مطالعات استراتژیک(C۴۷) و کمبود اعتبار (E۵).

شکل ۵-۱۶ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



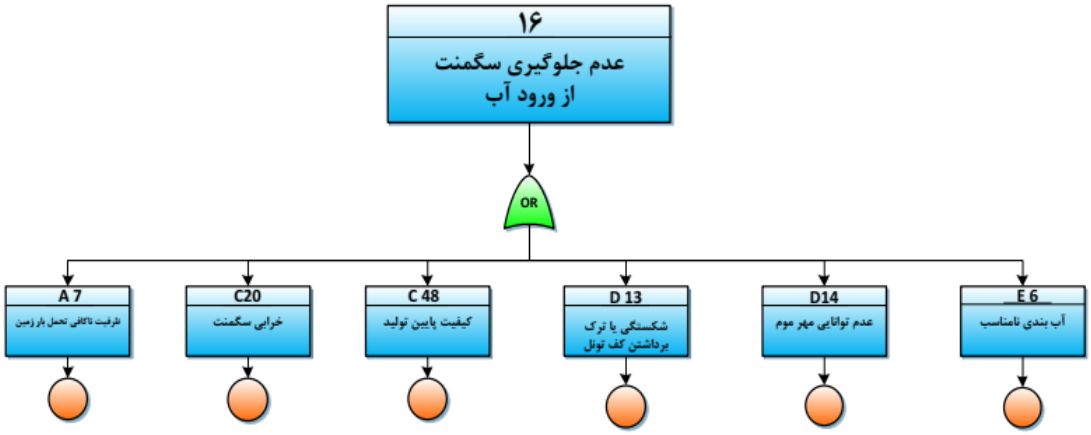
شکل ۵-۱۶: درخت خطای رویداد مربوط به برخورد با عوارض ناشناخته

۵-۲-۱-۱۶- عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب: T۱۶

سیستم نگهداری تونل‌های حفرشده به‌وسیله ماشین‌های تمام مقطع از مجموعه‌ای از قطعات پیش‌ساخته بتنی تشکیل‌شده است که در محلی خارج از تونل تولیدشده و جهت نصب به‌وسیله ماشین حفار، به تونل انتقال می‌یابند .این قطعات در طی فرایند تولید، انتقال به تونل، نصب و حتی در طی زمان بهره‌برداری از تونل دچار آسیب‌دیدگی‌های متعددی خواهند شد که همین امر دوام پوشش نگهداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گاه هزینه بازسازی پوشش نگهداری آسیب‌دیده به حدی است که پروژه را ازلحاظ اقتصادی با مشکلات جدی روبرو می‌کند.

در حفاری مکانیزه، پوشش تونل باید توانایی تحمل بارهای وارده بر آن را داشته باشد. هرگونه افزایش تنش در جسم که فراتر از مقاومت آن باشد منجر به شکستگی می‌شود. در مورد سگمنت نیز افزایش بارهای وارده و ضربات ناگهانی می‌تواند سبب تمرکز تنش شده و صدماتی از قبیل ترک‌خوردگی، لب‌پریدگی و شکستگی را به وجود آورد. در موارد خاص، علاوه بر بارهای اعمال‌شده، پوشش بتنی باید در مقابل عواملی از قبیل واکنش شیمیایی آب‌های زیرزمینی و فاضلاب‌ها، یخزدگی‌های مکرر، بار ترافیک و آتش‌سوزی نیز مقاوم باشد که بررسی این عوامل در مرحله‌ی طراحی ضرورت دارد. خطرات ناشی از عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب عبارت‌اند: ظرفیت ناکافی تحمل بار

زمین(A۷)، خرابی سـگمنت(C۲۰)، کیفیت پایین تولید(C۴۸)، شـکسـتگی یا ترک برداشـتن کف تونل(D۱۳)، عدم توانایی مهروموم (D۱۴) و آب‌بندی نامناسـب(E۶) شـکل ۵ -۱۷ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۷: درخت خطای رویداد مربوط به عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب

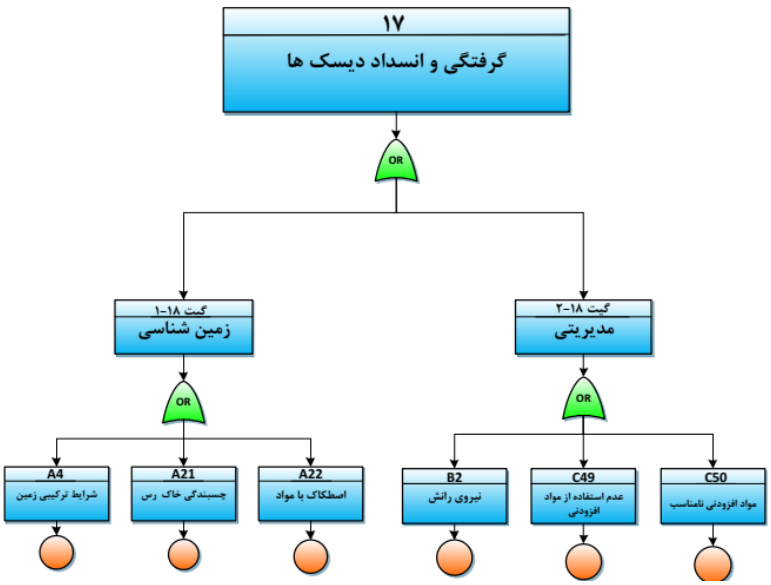
۵-۲-۱-۱۷- گرفتگی و انسداد دیسک‌ها: T۱۷

در تونل‌هایی که ماشـین‌های حفر تونل TBM برای حفاری در سـنگ‌ها و یا خاک‌های رسـی و چسبنده به کار گرفته می‌شوند همواره خطر گل گرفتگی [۱]و انسداد[۲] ،کله حفـار [۳]و دیسـک کاترهـای [۴]ماشـین را تهدید می‌نماید. معمولاً در چنین سـنگ‌هایی، چسـبندگی کانی‌های رسی به سطوح فلزی ماشین سـبب کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در بهره‌وری ماشین می‌گردد. یکی از مخاطرات مهم زمین‌شناسی در تونل‌های مکانیزه مربوط به رفتار چسـبندگی کانی‌های رسـی در سنگ‌های رسی (آرژیلیتی) است. به‌طورکلی در چنین زمین‌هایی، همواره خطر گل گرفتگی و انسداد، کاترهد و دیسک کاترهای ماشین را تهدید می‌نماید. در بسیاری از پروژه‌ها مواردی از چسبندگی کانی‌های رسی به سطوح فلزی ماشین و کاهش بهره‌وری گزارش‌شـده اسـت [۹۸]. به‌طورکلی موضـوع چسـبندگی کانی‌های رسی بیشتر در

[۱] clogging
[۲] blockage
[۳] cutterhead
[۴] disc cutter

مورد ماشین‌های حفاری نوع سپر تعادلی زمین(EPB) که عمدتاً در خاک حفاری می‌کنند، مطرح بوده است زیرا به‌طورکلی فراوانی کانی‌های رسی در خاک‌ها نسبت به سنگ‌ها بیشتر است. ولی بااین‌وجود با توجه به اینکه اساس شکل‌گیری پدیده در هر دو مورد (خاک و سنگ) مشترک است. می‌توان از نتایج حاصل از مطالعات انجام‌شده در تونل‌های مکانیزه خاکی، برای تونل‌های سنگی نیز استفاده نمود. با توجه به اینکه در مورد خصوصیات گل‌های تونل موردبحث کار چندانی نشده است می‌توان از طریق تحلیل برگشتی حدود خصوصیات مهندسی آن را حدس زد اما با توجه به هزینه نسبتاً کم شناسایی ازیک‌طرف و ریسک زیاد آن برای پروژه از طرف دیگر پیشنهاد می‌گردد. برای استفاده عملی این اطلاعات در حل و یا کاهش مشکل گل گرفتگی، این بررسی‌ها در تونل معرفی‌شده، قبل از رسیدن به مقاطع مشابه و در سایر تونل‌های مستعد، هم‌زمان با فاز مطالعات پروژه، انجام پذیرد [۱۰۹].

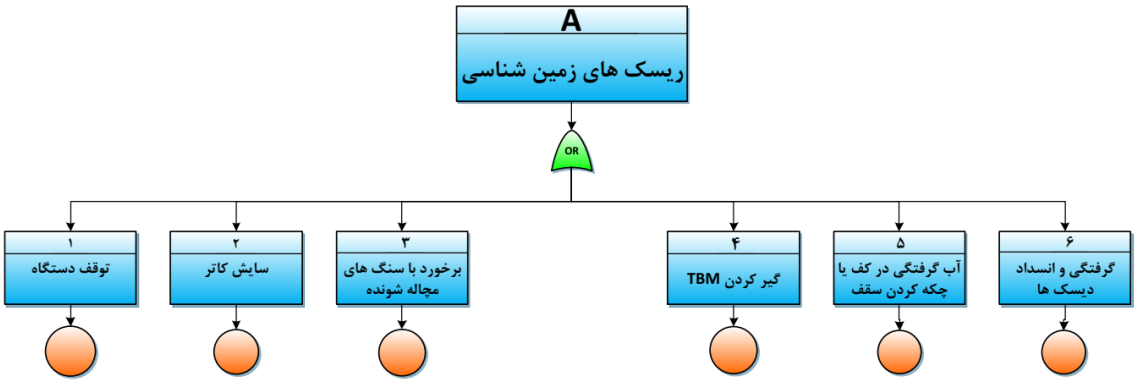
خطرات ناشی از عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب عبارت‌اند: زمین‌شناسی(درگاه۱۸-۱)، مدیریتی(درگاه۱۸-۲)، شرایط ترکیبی زمین(A۴)، چسبندگی خاک رس(A۲۱)، اصطکاک با مواد (A۲۲)، نیروی رانش (B۲)، عدم استفاده از مواد افزودنی (C۴۹) و مواد افزودنی نامناسب (C۵۰) شکل ۵ -۱۸ درخت مربوط به این رویداد به‌خوبی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد.



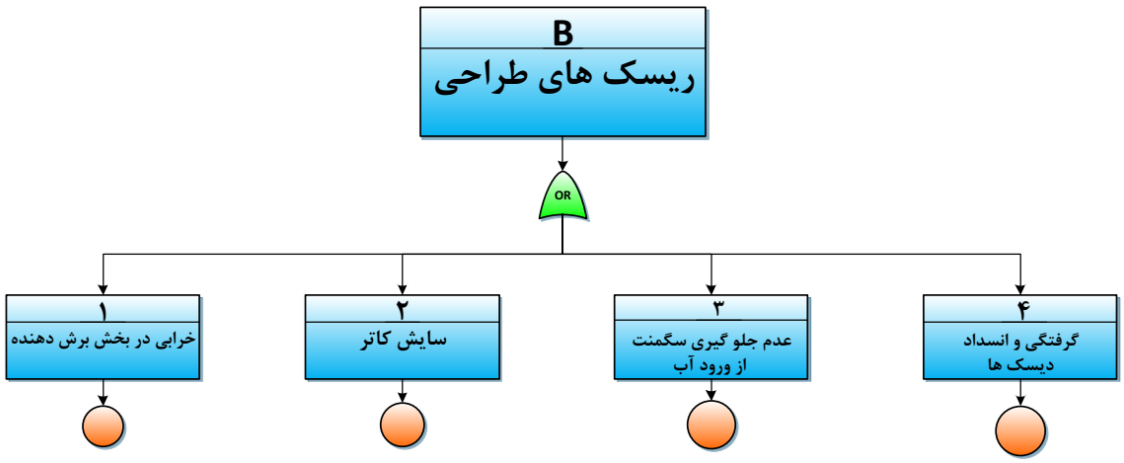
شکل ۵-۱۸۸: درخت خطای رویداد مربوط به گرفتگی و انسداد دیسک‌ها

۵-۲-۲- طبقه بندی ریسک های مطرح شده در تونل سازی مکانیزه

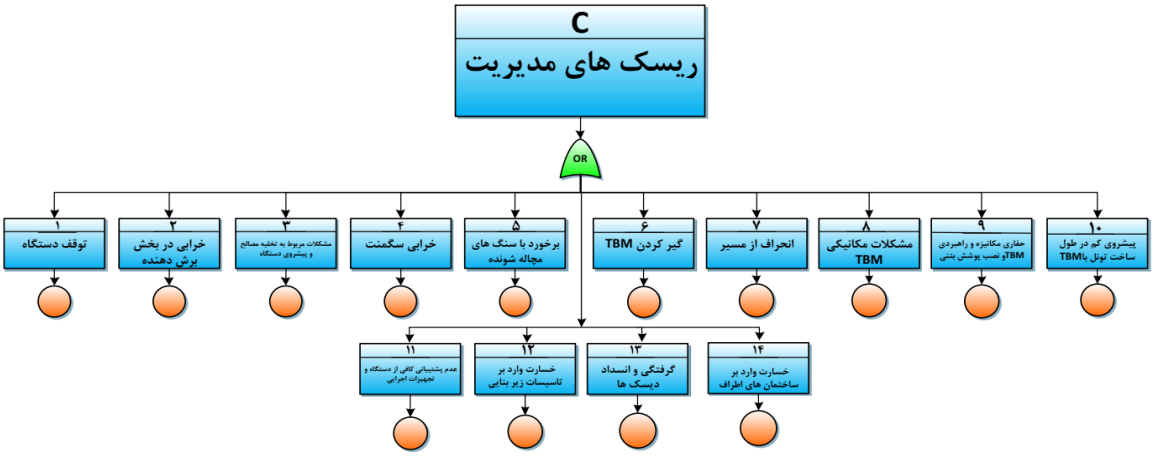
لازم به ذکر است که در پایان نامه پیش رو پارامتر های مربوط به ریسک زمین شناسی با حرف A، پارامتر های مربوط به ریسک طراحی با حرف B، پارامتر های مربوط به ریسک مدیریت با حرف C، پارامتر های مربوط به ریسک ایمنی با حرف D و پارامتر های مربوط به ریسک هزینه با حرف E در نظر گرفته شده است. در پیوست ۱ هر یک از این ریسک ها شرح داده شده است. شکل های(۵-۱۹) تا (۵-۲۳) نحوه دسته بندی ریسک ها را مشخص می کنند.



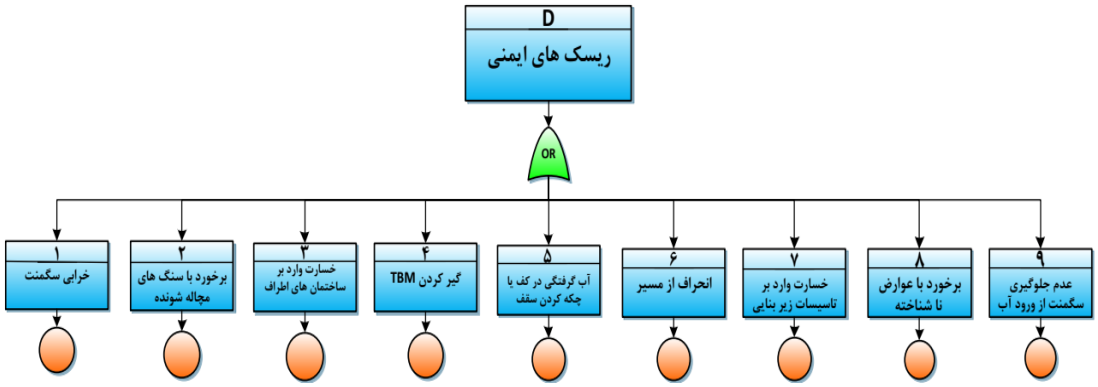
شکل ۵-۱۹: پارامترهای مربوط به گزینه زمین شناسی



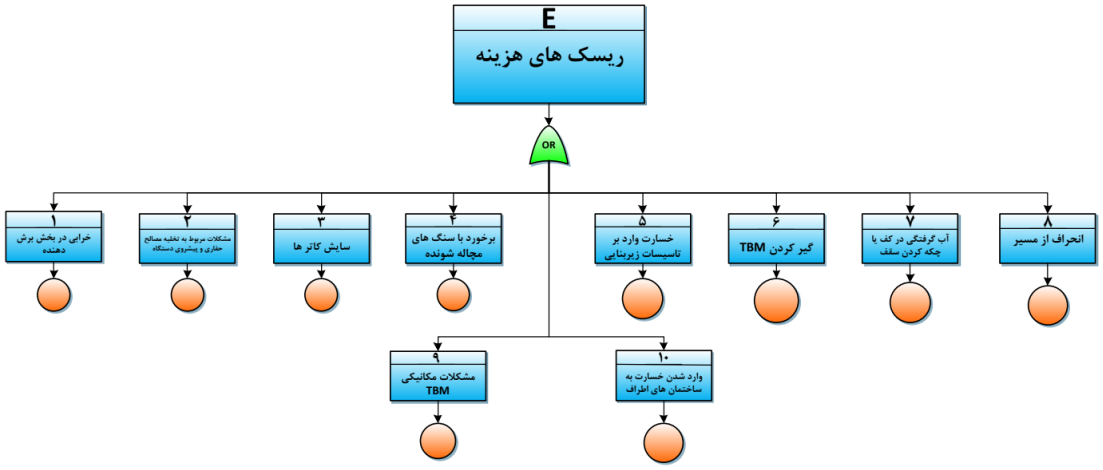
شکل ۵-۲۰۹: پارامترهای مربوط به گزینه طراحی



شکل ۵-۲۱: پارامترهای مربوط به گزینه ریسک مدیریت



شکل ۵-۲۲: پارامترهای مربوط به گزینه ریسک ایمنی



شکل ۵-۱۰۳: پارامترهای مربوط به گزینه ریسک هزینه

به‌منظور تسهیل در امر ارزیابی نتایج ریسک تونل سازی مکانیزه، ۱۷ ریسک اصلی(رویداد بالایی)، ۳۸

رویداد های میانی و ۱۱۹ رویداد اساسی در جدول ۵-۱ لیست شده‌اند.

جدول ۵-۱: رویدادهای بالایی، میانی و اساسی در ریسک تونل سازی مکانیزه

ردیف	نام رویداد	نماد رویداد	نوع رویداد
۱	خرابی در بخش برش دهنده	T۱	نهایی
۲	توقف دستگاه	T۲	نهایی
۳	مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	T۳	نهایی
۴	خرابی سگمنت	T۴	نهایی
۵	سایش کاترها	T۵	نهایی
۶	گیرکردن TBM	T۶	نهایی
۷	آب‌گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	T۷	نهایی
۸	انحراف از مسیر	T۸	نهایی
۹	مشکلات مکانیکی TBM	T۹	نهایی
۱۰	حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصب پوشش بتنی	T۱۰	نهایی
۱۱	پیشروی کم در طول ساخت تونل باTBM	T۱۱	نهایی
۱۲	عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	T۱۲	نهایی
۱۳	خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی	T۱۳	نهایی
۱۴	وارد شدن خسارت به ساختمان‌های اطراف	T۱۴	نهایی
۱۵	برخورد با عوارض ناشناخته	T۱۵	نهایی
۱۶	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	T۱۶	نهایی
۱۷	گرفتگی و انسداد دیسک‌ها	T۱۷	نهایی
۱۸	سایش بیش‌ازحد	G۱-۱	میانی
۱۹	سایش بخشی از برش دهنده	G۱-۲	میانی
۲۰	نیروی رانش یا گشتاور ناکافی	G۱-۳	میانی
۲۱	نیروی عکس‌العمل	G۲-۱	میانی
۲۲	خارج شدن از مسیر حفاری	G۲-۲	میانی
۲۳	گرفتگی سپر	G۲-۳	میانی
۲۴	مدیریت ضعیف فشار جبهه کار	G۳-۱	میانی
۲۵	مصالح بیش‌ازحد	G۳-۲	میانی
۲۶	ظرفیت پایین مصالح	G۳-۳	میانی
۲۷	بند آمدن لوله	G۳-۳-۱	میانی
۲۸	مقدار زیاد آب زیرزمینی	G۳-۳-۲	میانی
۲۹	خرابی نوار نقاله	G۳-۴	میانی
۳۰	خرابی سگمنت	G۴-۱	میانی

۳۱	فشار آب/خرابی آب‌بند	G۴-۲	میانی
۳۲	طراحیTBM	G۵-۱	میانی
۳۳	جنس زمین	G۵-۲	میانی
۳۴	زمین‌شناسی	G۶-۱	میانی
۳۵	مدیریتی	G۶-۲	میانی
۳۶	ناپایداری سینه کار	G۷-۱	میانی
۳۷	سیستم	G۷-۲	میانی
۳۸	مدیریت	G۷-۳	میانی
۳۹	شرایط زمین‌شناسی	G۷-۴	میانی
۴۰	آسیب به دیواره‌ها و سگمنت	G۸-۱	میانی
۴۱	ترک خوردن سگمنت ها	G۸-۱-۱	میانی
۴۲	خطا در نقشه‌برداری	G۹-۱	میانی
۴۳	ناتوانی از سرویس	G۱۰-۱	میانی
۴۴	قابلیت ماشین	G۱۲-۱	میانی
۴۵	مدیریت سیستم	G۱۲-۲	میانی
۴۶	زمین	G۱۲-۳	میانی
۴۷	پلان تونل	G۱۲-۴	میانی
۴۸	فاکتورهای زیست‌محیطی	G۱۲-۵	میانی
۴۹	برخورد ماشین	G۱۴-۱	میانی
۵۰	عدم وجود اطلاعات دقیق	G۱۴-۲	میانی
۵۱	عدم اطلاعات کافی در مورد ساختمان	G۱۵-۱	میانی
۵۲	تغییر در سطح	G۱۵-۲	میانی
۵۳	مطالعات ژئوتکنیکی ناکافی	G۱۶-۱	میانی
۵۴	زمین‌شناسی	G۱۸-۱	میانی
۵۵	مدیریتی	G۱۸-۲	میانی
۵۶	نوع و خواص سنگ و خاک	A۱	اساسی
۵۷	سختی	A۲	اساسی
۵۸	مقدار کوارتز	A۳	اساسی
۵۹	شرایط ترکیبی زمین	A۴	اساسی
۶۰	تورم زمین	A۶	اساسی
۶۱	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	A۷	اساسی
۶۲	گسل یا زون‌های خردشده	A۸	اساسی
۶۳	درجه هوازدگی	A۹	اساسی
۶۴	زمین دارای شن و ماسه	A۱۰	اساسی
۶۵	نشست زمین	A۱۱	اساسی

۶۶	سفره آب‌های زیرزمینی محصور/ آب‌های زیرزمینی	A۱۲	اساسی
۶۷	ناپیوستگی سینه کار	A۱۳	اساسی
۶۸	اندازه دانه‌ها	A۱۴	اساسی
۶۹	جهت‌گیری انواع دانه‌ها	A۱۵	اساسی
۷۰	چسبندگی دانه	A۱۶	اساسی
۷۱	شکستگی‌های موجود	A۱۷	اساسی
۷۲	وجود کانی‌های ساینده	A۱۸	اساسی
۷۳	تنش‌های القایی	A۱۹	اساسی
۷۴	زمین نرم و سست	A۲۰	اساسی
۷۵	کاهش اصطکاک داخلی بین ذرات خاک	A۲۱	اساسی
۷۶	برخورد با قنات	A۲۲	اساسی
۷۷	عدم تطابق شرایط موجود در انجام پروژه با تجهیزات خاص	A۲۳	اساسی
۷۸	تغییرات ژئووتکنیکی غیرقابل‌پیش‌بینی	A۲۴	اساسی
۷۹	چسبندگی خاک	A۲۵	اساسی
۸۰	طراحی برش دهنده	B۱	اساسی
۸۱	اندازه نیروی برش دهنده ، گشتاور، نیروی رانش	B۲	اساسی
۸۲	انتخابTBM	B۳	اساسی
۸۳	انواع روش‌های نصب سگمنت	B۴	اساسی
۸۴	انتخاب واشر آب‌بند	B۵	اساسی
۸۵	بهسازی خاک	B۶	اساسی
۸۶	تعداد دیسک‌ها	B۷	اساسی
۸۷	زاویه قرارگیری	B۸	اساسی
۸۸	موقعیت دیسک‌ها	B۹	اساسی
۸۹	فاصله دیسک‌ها	B۱۰	اساسی
۹۰	توزیع غیریکنواخت دیسک‌ها	B۱۱	اساسی
۹۱	سرعت چرخش	B۱۲	اساسی
۹۲	کاهش گشتاور نوار نقاله	B۱۳	اساسی
۹۳	سیستم زهکشی نامناسب	B۱۴	اساسی
۹۴	عدم ساخت مناسب سگمنت	B۱۵	اساسی
۹۵	پروفایل مسیر تونل	B۱۶	اساسی
۹۶	قطر زیاد تونل	B۱۷	اساسی
۹۷	وزن نامناسب دستگاه	B۱۸	اساسی
۹۸	عدم توانایی در تأمین نیروی رانش	B۱۹	اساسی
۹۹	قدرت ناکافی ماشین	B۲۰	اساسی
۱۰۰	قطر نامناسب دیسک‌ها	B۲۱	اساسی

۱۰۱	جنس کاتر	B۲۲	اساسی
۱۰۲	تأخیر روزانه در تعویض برش دهنده	C۱	اساسی
۱۰۳	تسلط اپراتور	C۲	اساسی
۱۰۴	مدیریت نرخ بازشدگی	C۳	اساسی
۱۰۵	انتخاب نوع برش دهنده	C۴	اساسی
۱۰۶	مانور حرکتی TBM	C۵	اساسی
۱۰۷	خطاهای حرکتیTBM	C۶	اساسی
۱۰۸	مونتاژ ضعیف سگمنت	C۷	اساسی
۱۰۹	تعویض دیرهنگام برش دهنده	C۸	اساسی
۱۱۰	مدیریت فشار جبهه کار	C۹	اساسی
۱۱۱	مدیریت مقدار حمل مصالح	C۱۰	اساسی
۱۱۲	کنترل اندازه و ابعاد و شکل مصالح حفاری‌شده	C۱۱	اساسی
۱۱۳	حمل غیرقابل‌کنترل مواد	C۱۲	اساسی
۱۱۴	فرایند حمل مصالح و کنترل مواد	C۱۳	اساسی
۱۱۵	شعاع قوسی	C۱۴	اساسی
۱۱۶	دوغاب ناکافی مواد پرکننده	C۱۵	اساسی
۱۱۷	نصب نادرست سگمنت	C۱۶	اساسی
۱۱۸	قطع یا فاصله دادن به سگمنت	C۱۷	اساسی
۱۱۹	قطر تونل	C۱۸	اساسی
۱۲۰	نوع TBM	C۱۹	اساسی
۱۲۱	خرابی سگمنت	C۲۰	اساسی
۱۲۲	عدم بهسازی خاک	C۲۱	اساسی
۱۲۳	عدم بهسازی خاک در نوار نقاله پیچ	C۲۲	اساسی
۱۲۴	عدم بهسازی خاک در جبهه کار	C۲۳	اساسی
۱۲۵	عدم بهسازی خاک در محفظه	C۲۴	اساسی
۱۲۶	اجرای نادرست سیستم زهکشی	C۲۵	اساسی
۱۲۷	جابجایی‌های دوربین‌های دستگاه	C۲۶	اساسی
۱۲۸	کارشکنی	C۲۷	اساسی
۱۲۹	خطای اپراتور	C۲۸	اساسی
۱۳۰	عدم تأمین قطعات	C۲۹	اساسی
۱۳۱	ضعف فنی در تعمیر و نگهداری	C۳۰	اساسی
۱۳۲	هدایت نادرست دستگاه	C۳۱	اساسی
۱۳۳	محدودیت‌های اعمال‌شده توسط مقررات محلی	C۳۲	اساسی
۱۳۴	محدودیت‌های ساعت کار	C۳۳	اساسی
۱۳۵	کمبود نیروی انسانی	C۳۴	اساسی

۱۳۶	مدیریت ضعیف TBM	C۳۵	اساسی
۱۳۷	عدم حمایت کافی از عوامل اداری	C۳۶	اساسی
۱۳۸	عدم وجود افراد با تخصص	C۳۷	اساسی
۱۳۹	عدم شناخت دقیق فنی پیمانکار	C۳۸	اساسی
۱۴۰	سوء مدیریت	C۳۹	اساسی
۱۴۱	ناقص بودن اطلاعات دریافتی از سوی مراجع مربوطه	C۴۰	اساسی
۱۴۲	گذشت زمان و نبود سابقه	C۴۱	اساسی
۱۴۳	عدم اطلاعات ژئوتکنیکی	C۴۲	اساسی
۱۴۴	برخورد با چاه‌های فاضلاب منازل	C۴۳	اساسی
۱۴۵	عدم وجود اطلاعات سازه‌ای	C۴۴	اساسی
۱۴۶	برخورد با لایه‌های باستانی	C۴۵	اساسی
۱۴۷	کمبود زمان	C۴۶	اساسی
۱۴۸	عدم امکان مطالعات استراتژیک	C۴۷	اساسی
۱۴۹	کیفیت پایین تولید	C۴۸	اساسی
۱۵۰	عدم استفاده از مواد افزودنی	C۴۹	اساسی
۱۵۱	مواد افزودنی نامناسب	C۵۰	اساسی
۱۵۲	سرعت کم دستگاه	C۵۱	اساسی
۱۵۳	محاسبات اشتباه	C۵۲	اساسی
۱۵۴	افزایش روباره بر روی سگمنت	D۱	اساسی
۱۵۵	آسیب به سگمنت	D۲	اساسی
۱۵۶	ریزش‌های اطراف سگمنت	D۳	اساسی
۱۵۷	ریزش بلوک‌های سنگین اطراف سگمنت	D۴	اساسی
۱۵۸	تصمیم‌گیری جهت تغیر مسیر (برخورد با مواضع و تأسیسات شهری)	D۵	اساسی
۱۵۹	نقص تجهیزات	D۶	اساسی
۱۶۰	فرسوده بودن ماشین‌آلات	D۷	اساسی
۱۶۱	انجام نادرست عملیات تزریق	D۸	اساسی
۱۶۲	ریزش تونل در سطح وسیع	D۹	اساسی
۱۶۳	شکستگی آشکار سگمنت	D۱۰	اساسی
۱۶۴	استاندارد نبودن ساختمان‌ها	D۱۱	اساسی
۱۶۵	عدم رعایت صحیح جزئیات اجرایی(HSE)	D۱۲	اساسی
۱۶۶	شکستگی یا ترک برداشتن کف تونل	D۱۳	اساسی
۱۶۷	عدم توانایی مهروموم	D۱۴	اساسی
۱۶۸	عدم تأمین بودجه کافی	E۱	اساسی
۱۶۹	کمبود کارگر	E۲	اساسی
۱۷۰	تحریم‌ها	E۳	اساسی

۱۷۱	تغییر در مالیات و عوارض گمرکی	E۴	اساسی
۱۷۲	کمبود اعتبار	E۵	اساسی
۱۷۳	آب‌بندی نامناسب	E۶	اساسی
۱۷۴	آسیب و فرسودگی عایق	E۷	اساسی

۵-۲-۳- روش تعیین احتمال رویدادهای بالایی و میانی

۵-۲-۳-۱- احتمال رویداد بالایی

احتمال رویداد بالایی بر اساس اعداد احتمال اختصاص داده‌شده به رویدادهای اساسی محاسبه می‌شود.

۵-۲-۳-۲- احتمال رویداد میانی (درگاه)

احتمال درگاه که گاهی احتمال رویداد میانی نامیده می‌شود، احتمال رویدادهایی است که در پایین‌دست رویداد بالایی قرار دارند. هر درگاه مانند یک رویداد بالایی مستقل برای رویدادهای پایین‌دست خود محسوب می‌شود و می‌توان معادلات جبر بولی را برای آن‌ها نوشت. لازم به ذکر است محاسبه احتمال درگاه‌ها، در هنگام رتبه‌بندی رویدادهای فرعی الزامی است [۲۸].

گاهی اوقات به دلیل عدم اطلاعات کافی، برآورد دقیق میزان شکست یا احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته دشوار است.همچنین به دلیل عدم دقت در اطلاعات رویدادهای اساسی، نتیجه کلی نیز دارای عدم قطعیت است. برای جلوگیری از چنین شرایطی، رویکرد فازی و ترکیب آن با نظر متخصصان را می‌توان با روش تحلیل درخت خطا به کاربرد.با توجه به کمبود اطلاعات برای تعیین نرخ شکست اجزاء سیستم لازم است میزان نرخ شکست به‌صورت غیرقطعی محاسبه شوند که برای افزایش دقت و رفع عدم قطعیت از منطق فازی استفاده‌شده است.برای افزایش دقت محاسبات از فرمول مرکز گرانیگاه برای غیر فازی کردن این مدل استفاده گردیده است. این فرمول تا حد بسیاری مشکل غیر فازی کردن را حل می‌کند[۷]. مراحل یافتن احتمال رویدادهای نهایی و مؤثر درخطرهای کلی تونل سازی مکانیزه در شکل ۵-۲۵ ارائه‌شده است.

شکل ۵-۱۱: مراحل تعیین احتمال رویداد پایانی

بر اساس مطالعات انجام‌شده رویدادهای پایانی، میانی، توسعه‌نیافته و همچنین رویدادهای اساسی ریسک‌های تونل سازی مکانیزه مشخص شدند و توضیحات مختصری از هر یک در ارتباط با آن‌ها بیان شد. سپس با توجه به روابط میان علل رویدادها و نوع درگاه آن ها، درخت خطای ۱۷ رویداد نهایی و مؤثر در ریسک تونل سازی مکانیزه در شکل‌های ۵-۲ تا شکل ۵-۱۹ رسم شد تا پایه اصلی برای محاسبات نرخ شکست سیستم باشند. با توجه به اینکه اطلاعات لازم در خصوص تعیین احتمال شکست رویدادهای اساسی وجود نداشت با استفاده از درخت خطای فازی نرخ احتمال این رویدادها تعیین شد. اجرای منطق فازی داری ۵ مرحله است. این مراحل با انتخاب تیمی متشکل از متخصصان و کارشناسان مربوطه شروع و به برآورد احتمال ختم می‌شود. برای برآورد احتمال از فرمول گرانیگاه و فرمول انیساوا استفاده شد[۷]. در ادامه نحوه اجرای منطق فازی برای ۱۷ ریسک تونل سازی مکانیزه خط ۳ مترو مشهد بیان‌شده است.

الف) مرحله ۱: انتخاب کارشناسان

هنگامی‌که اطلاعات کافی وجود نداشته باشد، ازنظر کارشناسان استفاده می‌شود. کارشناس به کسی گفته می‌شود که اطلاعات کافی از سیستم مورد ارزیابی داشته و با روش تحلیل درخت خطا آشنایی داشته

باشـد. در این تحقیق از ۱۲ کارشـناس خط ۲ و خط ۳ مترو مشـهد و در بحث ریسـک‌های تونل سـازی مکانیزه انتخاب گردیده اسـت. قابل‌ذکر اسـت که این کارشـناسـان اهمیت وزنی یکسانی ندارند. به همین دلیل برای تعیین وزن اهمیت متخصصان از روش ارائه‌شده توسط لواسانی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ و رنجیت و همکارانش استفاده‌شده است.

در تعیین اهمیت کارشـناسـان از معیارهای عنوان شغلی، تجربه کاری، سن و تحصیلات استفاده‌شده اسـت. نحوه امتیازدهی کارشـناسـان در جدول۵-۲ و مشخصات مربوط به ۱۲ کارشناس شرکت‌کننده در نظرسنجی در جدول ۵-۳ نشان داده‌شده است.

جدول ۵-۲ : جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان(Renjith et al,۲۰۱۰)

ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	عنوان	مدیر ، معاون	۴
		بازرس،دستیار مدیر،کنترل‌کننده	۳
		سرپرست کارگاه ، سرکارگر	۲
		اپراتور	۱
۲	تجربه (سال)	۳۰	۴
		۲۰-۳۰	۳
		۱۰-۲۰	۲
		۵-۱۰	۱
۳	تحصیلات	دکتری	۵
		کارشناسی ارشد	۴
		کارشناس	۳
		دیپلم	۲
		زیر دیپلم	۱
۴	سن (سال)	بیشتر از ۵۰	۴
		۴۰-۵۰	۳
		۳۰-۴۰	۲
		کمتر از ۳۰	۱

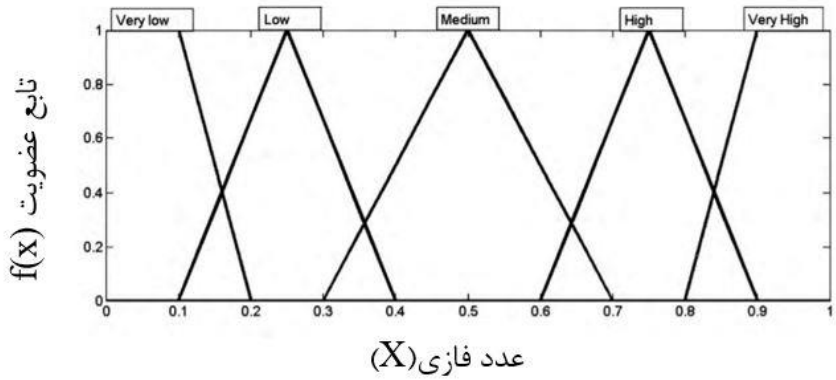
ب) مرحله ۲: تعین وزن کارشناسان و کمی سازی نظرات آن‌ها

بعد از مشـخص شـدن معیارهای ارزیابی کارشناسان در مرحله قبل، وزن آن‌ها تعیین می‌شود. بر این اسـاس ، ضریب اهمیت هر کارشناس از تقسیم مجموع امتیازهای کسب‌شده توسط وی، تقسیم‌بر مجموع امتیازات کسب‌شده توسط کلیه کارشناسان شرکت‌کننده در مطالعه به دست می‌آید [۱۰۹]. نمره وزن هر کارشناس بر اساس معیارهای تعیین‌شده در مرحله ۱، در جدول ۴-۳ نشان داده‌شده است.

جدول ۵-۳: مشخصات و امتیازهای کسب‌شده کارشناسان شرکت‌کننده در نظرسنجی

تعداد کارشناسان	عنوان	تجربه (سال)	تحصیلات	سن(سال)	شاخص وزنی کارشناس	ضریب اهمیت کارشناس
۱	کارشناس کنترل کیفیت حفاری	۵	کارشناسی ارشد	۳۲	۱۰	۰/۰۷۷۰
۲	کارشناس کنترل نظارت تونل پروژه	۸	کارشناسی ارشد	۳۳	۱۰	۰/۰۷۷۰
۳	مسئول حفاری مکانیزه	۷	کارشناسی	۳۶	۱۰	۰/۰۷۷۰
۴	کارشناس کنترل کیفیت	۱۵	کارشناسی ارشد	۴۲	۱۲	۰/۰۹۲۳
۵	بازرسی تونل سازی مکانیزه	۳	کارشناس ارشد	۳۲	۱۰	۰/۰۷۷۰
۶	کارشناس نت	۷	کاردانی	۳۸	۹	۰/۰۶۹۲
۷	کارشناس نت	۶	کارشناسی	۳۲	۱۰	۰/۰۷۷۰
۸	مسئول مکانیک تونل	۷	کارشناسی	۳۶	۱۰	۰/۰۷۷۰
۹	معاونت فنی موسسه رهاب	۲۴	کارشناسی ارشد	۴۵	۱۴	۰/۱۰۷۷
۱۰	مدیراجرایی کنترل کیفیت	۶	دکتری	۳۳	۱۲	۰/۰۹۲۳
۱۱	کارشناس ارشد پیمانی و رسیدگی موسسه رهاب	۱۳	لیسانس	۳۶	۱۱	۰/۰۸۴۶
۱۲	مسئول کارگاه حفاری	۲۰	لیسانس	۴۳	۱۲	۰/۰۹۲۳
مجموع					۱۳۰	۱

برای کمی سازی نظرات کارشناسان یا تعیین وزن نظرات آن‌ها در خصوص رویدادهای اساسی، از متغیر زبانی استفاده‌شده است. پنج متغیر زبانی به‌کاررفته شامل خیلی کمVL ، کمL ، متوسط M ، زیاد V و خیلی زیاد VH به‌کاررفته‌اند.برای فازی نمودن این بخش از اعداد فازی ذوزنقه‌ای استفاده‌شده است. که شکل ۵-۱۲ بیان‌کننده دامنه فازی متغیرهای به‌کاررفته در این تحقیق و روابط(۵-۲) نیز نشان‌دهنده تابع عضویت ذوزنقه‌ای مربوط به اعداد فازی موردنظر است [۷۹].



شکل ۵-۱۲: متغییرهای زبانی مورداستفاده کارشناسان

$$
f_{VH}(x)=\begin{cases}0 & x\le 0.8\\ \frac{x-0.8}{0.1} & 0.8<x\le 0.9\\ 1 & 0.9<x\le 1\end{cases}
$$

$$
f_{H}(x)=\begin{cases}\frac{x-0.6}{0.15} & 0.6<x\le 0.75\\ \frac{0.9-x}{0.15} & 0.75<x\le 0.9\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}
$$

$$
f_{M}(x)=\begin{cases}\frac{x-0.3}{0.2} & 0.3<x\le 0.5\\ \frac{0.7-x}{0.2} & 0.5<x\le 0.7\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}
$$

$$
f_{L}(x)=\begin{cases}\frac{x-0.1}{0.15} & 0.1<x\le 0.25\\ \frac{0.4-x}{0.15} & 0.25<x\le 0.4\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}
$$

$$
f_{VL}(x)=\begin{cases}0 & x>2\\ \frac{0.2-x}{0.1} & 0.1<x\le 0.2\\ 1 & 0<x\le 0.1\end{cases}
$$

(۲-۵)

نظرات کارشناسان با استفاده از روش ارائه‌شده توسط جن و هوانگ در سال۱۹۹۲، لواسانی و همکارانش در سال۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ و همچنین رنجیت و همکارانش، به‌صورت کمی درآمد و وزن آن‌ها تعیین شد.

جدول ۵-۵ نمونه‌ای از برگه‌های نظرسنجی ارسال‌شده برای ۱۲ نفرازکارشناسان است. در این فرم از کارشناسان و متخصصان خواسته‌شده است که بنا به نظر و تشخیص شخصی خود و به میزان اهمیت هر یک از پارامترهای روی‌داده در پروژه خط ۳ مترو مشهد، امتیاز خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد را به آن‌ها اختصاص دهند. قابل به ذکر است که در این پرسشنامه‌ها مقصود از میزان اهمیت پارامترها

، نظرسنجی در مورد رخدادها و رویدادهای اتفاق افتاده در پروژه خط ۳ است که در داخل پرسشنامه برای کارشناسان تشریح شده است. نمونه پرسشنامه در ضمیمه شماره ۱ انتهای مطالعه حاضر موجود است. وزن متغییرهای زبانی کارشناسان که در کمی سازی نظر آن‌ها در رابطه با رویدادهای اساسی مورداستفاده قرارگرفته است، در جدول۵-۴ نشان داده‌شده است.

جدول ۵-۴: وزن متغیرهای زبانی درکمی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد اساسی

متغیر زبانی	وزن ترم‌های ربانی			
خیلی کم(VL)	۰/۲	۰/۱	۰	۰
کم(L)	۰/۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱
متوسط(M)	۰/۷	۰/۵	۰/۵	۰/۳
زیاد(V)	۰/۹	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶
خیلی زیاد(VH)	۱	۱	۰/۹	۰/۸

جدول ۵-۵: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال‌شده برای کارشناسان پروژه (گیرکردن TBM, $T_۶$)

رویداد اساسی		اهمیت هر پارامتر				
		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
ناپایداری سینه کار و دیواره‌ها	وجود آب زیرزمینی					
	آسیب به سگمنت					
	ریزش سنگ‌های خردشده					
	ریزش بلوک‌های سنگین					
سیستم	گشتاور و نیروی رانش					
	سرعت چرخش					
	کاهش گشتاور نقاله در پیچ					
مدیریت	عدم بهسازی خاک					
	عدم بهسازی خاک در نوار نقاله پیچ					
	عدم بهسازی خاک در جبهه کار					
	عدم بهسازی خاک در محفظه					
شرایط زمین‌شناسی	گسل و زون‌های خردشده					
	کاهش اصطکاک داخلی بین ذرات خاک					
	زمین نرم و سست					

ج) مرحله ۳: اجماع نظر کارشناسان

برای اجماع نظر کارشـناسان،ضریب اهمیت هر کارشناس در نمره متغیر زبانی او ضرب شده است. این کار طبق رابطه (۴-۳) و بر اساس مطالعه کلمن و وینکلر و رنجیت و همکارانش انجام‌شده است.

عدد فازی اجماع نظر کارشناسان برای رویدادهای اساسی ریسک‌های تونل سازی مکانیزه به تفکیک هر درخت خطا در جدول۵-۶ تا جدول ۵-۲۳ نشان داده‌شده است.

جدول ۵-۶: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی (خرابی در بخش برش دهنده T_1)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۱	نوع خاک	(۰/۵۹۴۱۲ ،۰/۷۴۱۰۹۵ ،۰/۷۶۵۷۲۵ ،۰/۸۸۸۰۷)
A۲	سختی	(۰/۸۵۱۱۲ ،۰/۹۰۱۹۲ ،۰/۷۰۱۸۴ ،۰/۹۵۱۱۶)
A۳	مقدار کوارتز زمین	(۰/۵۵۵۶۲ ،۰/۷۳۸۷۷ ،۰/۷۵۵۷ ،۰/۸۶۴۹۷)
A۴	شرایط ترکیبی زمین	(۰/۶۴۴۸۷ ،۰/۸۰۸۷۹ ،۰/۸۴۴۹۵ ،۰/۹۱۸۰۶)
B۱	طراحی برش دهنده	(۰/۵۲۲۵۶ ،۰/۷۰۷۲۴ ،۰/۷۲۲۶۴ ،۰/۸۴۳۴۴)
C۱	تأخیر در تعویض برش دهنده	(۰/۵۰۶۳۸ ،۰/۶۹۱۰۶ ،۰/۷۰۶۴۶ ،۰/۸۱۷۲۷)
C۲	تسلط اپراتور	(۰/۴۳۱۷۱ ،۰/۶۲۴۸۷ ،۰/۶۳۱۷۹ ،۰/۷۸۵۷)
A۴	شرایط ترکیبی زمین	(۰/۶۴۱۰۸ ،۰/۸۱۰۳۶ ،۰/۸۴۱۱۶ ،۰/۹۱۷۳۲)
B۱	طراحی برش دهنده	(۰/۵۰۹۵ ،۰/۷۰۱۸۸ ،۰/۷۰۹۵۸ ،۰/۸۳۷۳)
C۲	تسلط اپراتور	(۰/۵۸۹۴۵ ،۰/۷۵۷۹۸ ،۰/۷۸۹۵۳ ،۰/۸۸۲۶۵)
C۳	مدیریت نرخ بازشدگی	(۰/۲۵۰۸۶ ،۰/۴۵۰۹۴ ،۰/۴۵۰۹۴ ،۰/۶۲۶۳۹)
C۴	انتخاب نوع برش دهنده	(۰/۵۱۸۷ ،۰/۷۰۳۳۸ ،۰/۷۱۸۷۸ ،۰/۸۱۲۶۵)

جدول ۵-۷: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی (توقف دستگاه T_2)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۶	تورم زمین	(۰/۳۷۷۰۸ ،۰/۵۶۱۷۶ ،۰/۵۶۹۴۶ ،۰/۷۰۴۱۲)
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	(۰/۴۷۴۰۷ ،۰/۶۳۵۶۵ ،۰/۶۶۶۴۵ ،۰/۷۶۱۰۸)
A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۲۳۷۷۸ ،۰/۳۹۷۸۴ ،۰/۴۲۱۷ ،۰/۵۱۴۰۴)
A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۱۳۲۳۷ ،۰/۲۴۱۶۲ ،۰/۲۸۱۶۵ ،۰/۴۰۹۳۹)
A۹	درجه هوازدگی	(۰/۱۰۶۱۷ ،۰/۲۱۰۷۹ ،۰/۲۵۸۵۲ ،۰/۳۸۵۴۹)
C۵	مانور حرکتی TBM	(۰/۵۸۴۱۴ ،۰/۷۴۲۶۵ ،۰/۷۸۴۲۲ ،۰/۸۷۵۷۷)
C۶	خطای حرکت	(۰/۳۳۷۸۴ ،۰/۵۲۲۵۲ ،۰/۵۳۷۹۲ ،۰/۶۶۶۴۱)
C۷	مونتاژ ضعیف سگمنت	(۰/۳۰۷۰۷ ،۰/۴۸۰۹۹ ،۰/۴۹۷۹۲ ،۰/۶۳۴۸۹)
C۸	تعویض دیرهنگام برش دهنده	(۰/۳۰۰۸ ،۰/۴۳۹۲۸ ،۰/۴۷۰۰۸ ،۰/۵۹۵۵)

جدول ۵-۸: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی (مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه T_3)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۱۹۸۵۶ ،۰/۳۹۸۶۴ ،۰/۳۹۸۶۴ ،۰/۵۴۷۹۴)
A۱۰	زمین دارای شن و ماسه	(۰/۴۳۱۷۲ ،۰/۶۲۴۱ ،۰/۶۳۱۸ ،۰/۷۵۷۲۳)
B۱	طراحی برش دهنده	(۰/۲۷۲۴۳ ،۰/۴۵۴۰۵ ،۰/۴۶۳۲۸ ،۰/۶۱۵۶۳)
C۹	مدیریت ضعیف فشار جبهه کار	(۰/۴۲۱۶۶ ،۰/۵۷۴۰۱ ،۰/۶۰۶۳۴ ،۰/۷۱۴۰۸)
A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۳۶۷۸۸ ،۰/۵۲۹۴۶ ،۰/۵۵۲۵۶ ،۰/۶۵۵۶۷)

A۱۱	نشست سطح زمین	(۰/۴۶۲۵ ،۰/۶۴۵۶۵ ،۰/۶۶۲۵۸ ،۰/۷۶۵۶۹)
C۱۱	مدیریت مقدار حمل‌ونقل مصالح	(۰/۳۱۰۹۴ ،۰/۴۹۲۵۶ ،۰/۵۰۱۷۹ ،۰/۶۲۷۲۲)
A۱۱	نشست سطح زمین	(۰/۲۴۴۷ ،۰/۴۱۳۹۸ ،۰/۴۲۹۳۸ ،۰/۵۹۰۲)
C۱۰	مدیریت مقدار حمل‌ونقل مصالح	(۰/۳۰۳۲۱ ،۰/۴۸۷۸۹ ،۰/۴۹۵۵۹ ،۰/۶۳۵۶۴)
C۱۱	کنترل اندازه ، ابعاد مصالح حفاری	(۰/۴۲۵۵۶ ،۰/۶۲۵۶۴ ،۰/۶۲۵۶۴ ،۰/۷۴۴۱۴)
C۱۲	حمل غیرقابل‌کنترل	(۰/۳۵۵۵۵ ،۰/۵۳۲۵۳ ،۰/۵۴۷۹۳ ،۰/۶۸۳۳۵)
A۱۲	آب زیرزمینی	(۰/۵۴۶۳۹ ،۰/۷۳۱۰۷ ،۰/۷۴۶۴۷ ،۰/۸۳۱۱۱)
B۳	انتخاب TBM	(۰/۶۱۶۴۲ ،۰/۷۸۴۱۷ ،۰/۸۱۶۵ ،۰/۹۰۰۳۷)
C۱۲	حمل غیرقابل‌کنترل	(۰/۳۵۸۶۱ ،۰/۵۳۵۵۹ ،۰/۵۵۰۹۹ ،۰/۶۸۷۹۴)
C۱۱	کنترل اندازه ، ابعاد مصالح حفاری	(۰/۴۱۹۴۱ ،۰/۵۹۶۳۹ ،۰/۶۱۱۷۹ ،۰/۷۵۴۱۴)
C۱۳	فرایند حمل مصالح	(۰/۵۲۹۴۶ ،۰/۷۱۴۱۴ ،۰/۷۲۹۵۴ ،۰/۸۴۸۰۴)

جدول ۵-۹: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(خرابی سگمنت $T_۴$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار	(۰/۴۷۴۷۹ ،۰/۶۴۴۰۷ ،۰/۶۶۷۱۷ ،۰/۷۷۵۶۶)
B۴	انواع روش‌های نصب حلقه سگمنت	(۰/۳۸۷۸۸ ،۰/۵۴۴۸۷ ،۰/۵۶۱۸ ،۰/۶۸۶۴۶)
C۱۴	شعاعی قوسی	(۰/۴۲۷۱۶ ،۰/۵۷۷۹۸ ،۰/۶۰۱۰۸ ،۰/۶۹۶۴۹)
C۱۵	دوغاب ناکافی	(۰/۲۸۰۹۳ ،۰/۴۳۱۷۵ ،۰/۴۵۴۸۵ ،۰/۵۳۸۷۲)
C۱۶	نصب نامناسب سگمنت اصلی	(۰/۴۵۲۵۱ ،۰/۶۱۸۷۳ ،۰/۶۳۴۱۳ ،۰/۷۰۹۵۴)
A۱۲	آب زیرزمینی	(۰/۴۰۰۹ ،۰/۵۶۷۱۲ ،۰/۵۷۴۸۲ ،۰/۶۷۲۵۵)
B۴	انواع روش‌های نصب حلقه سگمنت	(۰/۳۳۲۴۸ ،۰/۴۹۱ ،۰/۵۰۶۴ ،۰/۶۲۱۸۲)
B۵	انتخاب واشر آب‌بند	(۰/۴۸۱۷ ،۰/۶۰۶۳۵ ،۰/۶۴۷۹۲ ،۰/۷۲۰۲۶)
C۱۵	دوغاب ناکافی	(۰/۴۳۱۷۳ ،۰/۵۷۳۳۲ ،۰/۶۰۵۶۵ ،۰/۶۹۶۴۶)
C۱۶	نصب نامناسب سگمنت اصلی	(۰/۴۳۷۸۹ ،۰/۶۰۴۱۱ ،۰/۶۱۹۵۱ ،۰/۷۲۸۰۱)
C۱۷	قطع کردن یا فاصله دادن اتصالات سگمنت	(۰/۱۷۱۶ ،۰/۳۰۳۹۶ ،۰/۳۲۸۵۹ ،۰/۴۳۵۵۶)

جدول ۵-۱۰: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(سایش کاتر ها $T_۵$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
B۷	تعداد دیسک‌ها	(۰/۵۶۳۳۸ ،۰/۷۰۵۷۴ ،۰/۷۴۵ ،۰/۸۱۶۵۵)
B۸	زاویه قرارگیری دیسک‌ها	(۰/۶۳۲۶۳ ،۰/۷۵۶۵۲ ،۰/۸۱۴۲۵ ،۰/۸۵۶۵۶)
B۹	جهت دیسک‌ها	(۰/۴۲۴۸۲ ،۰/۵۶۷۹۴ ،۰/۵۹۸۷۴ ،۰/۶۹۱۰۸)
B۱۰	فاصله دیسک‌ها	(۰/۴۴۹۴۷ ،۰/۵۸۴۸۹ ،۰/۶۲۳۳۹ ،۰/۷۲۰۳۳)
B۱۱	توزیع غیریکنواخت دیسک‌ها	(۰/۶۰۴۹ ،۰/۷۴۴۹۵ ،۰/۷۸۶۵۲ ،۰/۸۴۳۴۶)
B۱۲	سرعت چرخش	(۰/۵۷۵۶۲ ،۰/۷۲۲۶۱ ،۰/۷۵۷۲۴ ،۰/۸۱۳۴۲)
B۶	بهسازی خاک(استفاده از مواد افزودنی)	(۰/۵۷۶۴۷ ،۰/۷۱۸۰۶ ،۰/۷۵۸۰۹ ،۰/۸۲۵۰۲)
B۲۲	جنس کاتر	(۰/۵۶۶۴ ،۰/۷۱۸ ،۰/۷۴۸۰۲ ،۰/۸۰۸۸۱)
B۲	نیروی اعمال‌شده بیش‌ازحد	(۰/۶۲۴۹۲ ،۰/۷۶۶۵۱ ،۰/۸۰۶۵۴ ،۰/۸۵۷۳۲)
A۱	نوع و خواص خاک	(۰/۳۲۸۶۱ ،۰/۵۱۰۲۳ ،۰/۵۱۰۲۳ ،۰/۶۶۰۲۹)
A۳	مقدار کوارتز	(۰/۳۸۲۴۸ ،۰/۵۶۴۱ ،۰/۵۶۴۱ ،۰/۶۸۳۳۷)
A۱۳	ناپیوستگی سینه کار	(۰/۲۱۰۱۱ ،۰/۳۶۸۶۳ ،۰/۳۹۳۲۶ ،۰/۴۸۵۶)
A۱۴	اندازه دانه	(۰/۳۸۰۱۶ ،۰/۵۷۲۵۴ ،۰/۵۸۰۲۴ ،۰/۶۹۷۱۹)
A۱۵	جهت‌گیری دانه	(۰/۲۵۵۴۸ ،۰/۴۰۱۶۶ ،۰/۴۳۲۴۶ ،۰/۵۶۷۸۷)
A۱۶	چسبندگی خاک	(۰/۳۶۷۸۷ ،۰/۵۵۲۵۵ ،۰/۵۶۷۹۵ ،۰/۶۸۶۴۳)

A۱۷	شکستگی مافیک	(۰/۴۲۷۱۳، ۰/۶۱۹۵۱، ۰/۶۲۷۲۱، ۰/۷۵۴۱۷)
A۱۸	وجود کانی‌های ساینده	(۰/۵۱۳۲۸، ۰/۶۳۹۴۶، ۰/۶۹۷۹۶، ۰/۷۸۱۸۲)

جدول ۵-۱۱: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(گیرکردن TBM، $T_۶$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۱۲	وجود آب زیرزمینی	(۰/۳۳۴۶۹، ۰/۴۸۸۵۷، ۰/۵۱۱۶۷، ۰/۶۲۷۱۱)
D۲	آسیب به سگمنت	(۰/۱۸۱۶۲، ۰/۳۶۶۳، ۰/۳۷۴، ۰/۴۹۹۴۳)
D۳	ریزش سنگ‌های خردشده	(۰/۱۹۶۲، ۰/۲۹۳۱۵، ۰/۳۴۹۳۳، ۰/۴۶۰۰۸)
D۴	ریزش بلوک‌های سنگین	(۰/۱۵۶۲، ۰/۲۵۳۱۵، ۰/۳۰۹۳۳، ۰/۴۰۰۰۸)
B۲	گشتاور و نیروی رانش	(۰/۵۵۸۷۵، ۰/۷۳۵۷۳، ۰/۷۵۸۸۳، ۰/۸۶۵)
B۱۲	سرعت چرخش	(۰/۴۷۳۲۸، ۰/۶۵۷۹۶، ۰/۶۷۳۳۶، ۰/۷۸۴۹۲)
B۱۳	کاهش گشتاور نقاله در پیچ	(۰/۴۳۵۶، ۰/۶۲۰۲۸، ۰/۶۳۵۶۸، ۰/۷۵۷۲۵)
C۲۱	عدم بهسازی خاک	(۰/۵۰۳۲۵، ۰/۶۹۵۶۳، ۰/۷۰۳۳۳، ۰/۸۲۰۳)
C۲۲	عدم بهسازی خاک در نوار نقاله پیچ	(۰/۲۸۴۷۲، ۰/۴۶۹۴، ۰/۴۷۷۱، ۰/۶۵۴۰۸)
C۲۳	عدم بهسازی خاک در جبهه کار	(۰/۵۹۰۹۸، ۰/۷۵۷۱۹، ۰/۷۸۳۳۶، ۰/۸۶۴۹۳)
C۲۴	عدم بهسازی خاک در محفظه	(۰/۴۳۷۸۹، ۰/۶۱۴۸۷، ۰/۶۳۰۲۷، ۰/۷۶۶۴۶)
A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۱۳۰۸۱، ۰/۲۶۶۲۳، ۰/۲۹۸۵۶، ۰/۴۳۰۱۵)
A۲۱	کاهش اصطکاک داخلی بین ذرات خاک	(۰/۳۱۲۴۶، ۰/۴۹۷۱۴، ۰/۵۰۴۸۴، ۰/۶۵۷۱۹)
C۲۰	زمین نرم و سست	(۰/۳۷۹۴۶، ۰/۵۷۱۸۴، ۰/۵۷۹۵۴، ۰/۶۹۰۳۴)

جدول ۵-۱۲: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف $T_۷$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
C۲۵	اجرای نادرست سیستم زهکشی	(۰/۲۳۴۶۶، ۰/۳۸۸۵۴، ۰/۴۱۱۶۴، ۰/۵۶۹۳۹)
E۷	آسیب‌دیدگی عایق	(۰/۳۰۴۷۵، ۰/۴۸۹۴۳، ۰/۴۹۷۱۳، ۰/۶۳۷۹۵)
B۱۵	عدم طراحی مناسب با توجه به نوع و محل خاک	(۰/۱۹۲۳۵، ۰/۳۴۶۲۳، ۰/۳۶۹۳۳، ۰/۴۸۴۷۵)
C۱۶	اجرای نامناسب	(۰/۴۱۳۲۴، ۰/۵۹۷۹۲، ۰/۶۱۳۳۲، ۰/۷۲۹۵۱)
A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۰۷۴۶۲، ۰/۱۵۹۲۶، ۰/۲۱۶۹۸، ۰/۳۳۳۰۵)
A۱۲	برخورد با لایه‌های آبدار	(۰/۴۵۶۳۶، ۰/۶۳۳۳۴، ۰/۶۵۶۴۴، ۰/۷۵۹۵۴)
A۲۲	برخورد با قنات	(۰/۲۸۶۱۹، ۰/۴۷۰۸۷، ۰/۴۷۸۵۷، ۰/۶۰۲۴۶)
C۲۵	برخورد با فاضلاب منازل	(۰/۱۲۰۰۲، ۰/۲۸۹۳، ۰/۳۰۴۷، ۰/۴۲۲۴۳)
B۴	اجرای نادرست سیستم زهکشی	(۰/۱۸۰۰۶، ۰/۳۴۹۳۴، ۰/۳۶۴۷۴، ۰/۵۱۲۴۹)

جدول ۵-۱۳: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(انحراف از مسیر $T_۸$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
C۲۶	جابجایی دوربین‌های دستگاه	(۰/۷۲۹۵۲، ۰/۸۶۴۹۶، ۰/۹۲۹۶، ۰/۹۶۵)
C۲۷	کارشکنی	(۰/۱۱۰۰۵، ۰/۲۶۲۴۳، ۰/۲۸۶۲۸، ۰/۴۰۳۲۵)
C۲۸	خطای اپراتور	(۰/۳۱۶۲۸، ۰/۴۷۹۴۲، ۰/۵۰۱۷۴، ۰/۶۳۶۴۱)
D۶	نقص تجهیزات	(۰/۵۵۱، ۰/۷۳۴۱۵، ۰/۷۵۱۰۸، ۰/۸۶۱۸۹)

A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۰۳۳۸۷، ۰/۱۰۱۶۱، ۰/۱۶۷۷۸، ۰/۲۶۷۸۲)
C۵۲	محاسبات اشتباه	(۰/۳۶۰۸۹، ۰/۵۱۹۴۱، ۰/۵۴۴۰۴، ۰/۶۶۱۷۷)
D۵	تصمیم‌گیری جهت تغیر مسیر (برخورد با مواضع و تأسیسات شهری)	(۰/۸۰۰۳۲، ۰/۹۰۰۳۶، ۱/۰۰۰۴، ۱/۰۰۰۴)

جدول ۵-۱۴: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(مشکلات مکانیکی TBM ، T_9)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
C۳۰	ضعف فنی در تعمیر و نگهداری	(۰/۳۷۴۷۱، ۰/۵۵۱۶۹، ۰/۵۶۷۰۹، ۰/۶۸۳۲۹)
D۷	فرسوده بودن ماشین‌آلات	(۰/۵۰۱۰۲، ۰/۶۶۲۶، ۰/۶۹۳۴، ۰/۷۸۸۰۳)
E۱	عدم تأمین بودجه کافی	(۰/۵۸۹۴۵، ۰/۷۴۶۴۳، ۰/۷۸۹۵۳، ۰/۸۷۸۸)
C۲۳	ناپایداری جبهه کار	(۰/۲۲۳۸۹، ۰/۳۹۰۱۱، ۰/۴۰۷۰۴، ۰/۵۶۰۱۷)
C۲۴	عدم تطبیق شرایط موجود در انجام پروژه با تجهیزات خاص	(۰/۳۲۸۵۸، ۰/۵۲۰۹۶، ۰/۵۲۸۶۶، ۰/۶۹۱۰۲)
C۲۸	خطای اپراتور	(۰/۴۲۷۱۱، ۰/۶۲۰۲۷، ۰/۶۲۷۱۹، ۰/۷۵۵۷)
C۲۹	عدم تأمین قطعات	(۰/۵۸۰۲۵، ۰/۷۶۴۹۳، ۰/۷۸۰۳۳، ۰/۸۸۱۹)

جدول ۵-۱۵: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی T_{10})

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
B۱۵	ساخت نادرست سگمنت	(۰/۳۹۴۰۳، ۰/۵۶۷۹۵، ۰/۵۷۵۶۵، ۰/۷۱۴۱۷)
C۸	اجرای نادرست عملیات تزریق	(۰/۳۸۷۸۲، ۰/۵۴۰۲۱، ۰/۵۶۰۲۱، ۰/۶۵۵۶۵)
C۹	کمبود فشار جبهه کار	(۰/۲۰۰۰۸، ۰/۳۶۶۳، ۰/۳۸۳۲۳، ۰/۴۹۹۴۳)
C۱۶	نصب نادرست سگمنت	(۰/۴۳۷۱۲، ۰/۶۳۷۲، ۰/۶۳۷۲، ۰/۷۷۸۷۸)
C۳۱	هدایت نادرست دستگاه	(۰/۱۰۶۲۲، ۰/۲۰۴۷۴، ۰/۲۵۵۵۲، ۰/۳۶۴۷۹)

جدول ۵-۱۶: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، T_{11})

ماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
B۲	گشتاور عملیاتی پایین	(۰/۴۰۲۴۷، ۰/۵۸۷۱۵، ۰/۵۹۴۸۵، ۰/۷۳۲۵۸)
B۱۸	وزن نامناسب دستگاه	(۰/۰۸۳۸۴، ۰/۱۷۷۶۸، ۰/۲۳۰۸، ۰/۳۴۹۳)
B۱۹	ناتوانی در تأمین نیروی رانش موردنیاز	(۰/۲۵۳۲۱، ۰/۳۹۳۲۵، ۰/۴۲۳۲۷، ۰/۵۳۴۰۸)
B۲۰	قدرت ناکافی ماشین	(۰/۰۸۵۴۱، ۰/۱۸۸۵۱، ۰/۲۳۷، ۰/۳۵۳۹۷)
B۲۱	قطر نامناسب دیسک‌ها	(۰/۰۹۶۱۷، ۰/۱۸۳۸۷، ۰/۲۴۰۰۶، ۰/۳۶۶۲۶)
C۵۱	سرعت کم دستگاه	(۰/۱۷۶۲۴، ۰/۳۰۰۸۸، ۰/۳۳۸۶، ۰/۴۵۷۱)
C۳۴	کمبود نیروی انسانی ماهر در زمینه مدیریت	(۰/۵۱۰۹۵، ۰/۶۸۰۲۳، ۰/۷۰۳۳۳، ۰/۸۱۲۶)
C۳۵	مدیریت ضعیف TBM	(۰/۵۸۴۸۴، ۰/۷۵۴۱۲، ۰/۷۷۷۲۲، ۰/۸۶۱۸۶)
C۳۸	حمایت کافی از عوامل اداری	(۰/۲۲۲۳۴، ۰/۴۰۷۰۲، ۰/۴۱۴۷۲، ۰/۵۵۸۶۱)
A۱	خواص و نوع خاک	(۰/۵۹۷۹۹، ۰/۷۷۴۹۷، ۰/۷۹۸۰۷، ۰/۸۹۱۱۶)

A۴	شرایط ترکیبی زمین	(۰/۸۹۸۸۶ ،۰/۸۱۳۴۷ ،۰/۷۸۲۶۷ ،۰/۶۱۳۳۹)
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	(۰/۵۵۸۵۹ ،۰/۴۳۳۹۴ ،۰/۴۲۶۲۴ ،۰/۲۴۱۵۶)
A۸	گسل و زون‌های خردشده	(۰/۴۱۰۱۶ ،۰/۲۹۵۵ ،۰/۲۷۸۵۷ ،۰/۱۱۲۳۵)
A۱۲	وجود آب‌های زیرزمینی	(۰/۸۶۷۲۲ ،۰/۸۱۱۰۴ ،۰/۷۶۷۱۸ ،۰/۶۱۰۹۶)
B۱۷	قطر تونل	(۰/۵۷۷۸۵ ،۰/۴۷۶۲۸ ،۰/۴۳۷۷۸ ،۰/۳۰۷)
B۲۳	پروفایل مسیر تونل	(۰/۹۷۴۲۵ ،۰/۹۴۸۱ ،۰/۸۷۴۲۱ ،۰/۷۴۸۰۲)
C۳۲	محدودیت‌های اعمال‌شده توسط مقررات محلی	(۰/۶۴۶۴۳ ،۰/۵۰۱۷۸ ،۰/۴۷۷۱۵ ،۰/۳۱۸۶۳)
C۳۳	محدودیت‌های ساعت کار	(۰/۶۹۱۰۲ ،۰/۵۲۴۸۱ ،۰/۵۲۴۸۱ ،۰/۳۲۴۷۳)
E۲	کمبود کارگر	(۰/۶۷۷۱۷،۰/۵۱۹۴۱ ،۰/۵۱۱۷۱ ،۰/۳۲۷۰۳)

جدول ۵-۱۷: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی $T_{۱۲}$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
C۲۹	عدم تأمین قطعات	(۰/۹۳۰۳۹ ،۰/۸۶۹۶۱ ،۰/۸۲۱۱۲ ،۰/۶۶۹۵۳)
C۳۷	عدم وجود افراد با تخصص کافی	(۰/۸۲۰۳ ،۰/۷۱۸۷۳ ،۰/۶۸۷۹۳ ،۰/۵۲۶۳۵)
C۳۸	عدم شناخت دقیق فنی پیمانکار از نیازهای کارگاه	(۰/۷۹۲۶۵ ،۰/۶۸۸۷۸ ،۰/۶۷۳۳۸ ،۰/۴۸۸۷)
E۱	عدم تأمین اعتبار لازم	(۰/۹۳۱۱۵ ،۰/۸۷۱۱۳ ،۰/۸۲۱۸۸ ،۰/۶۷۱۰۵)
E۳	تحریم‌ها	(۰/۶۹۸۷۵ ،۰/۵۴۰۲۳ ،۰/۵۴۰۲۳ ،۰/۳۴۰۱۵)
E۴	تغییر در مالیات و عوارض گمرکی	(۰/۵۹۴۸۲،۰/۴۲۴۷۶،۰/۴۱۷۰۶ ،۰/۲۳۲۳۸)

جدول ۵-۱۸: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی $T_{۱۳}$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
D۹	آسیب‌دیدگی وسیع تونل	(۰/۳۰۹۳۸ ،۰/۲۰۸۵۶ ،۰/۱۶۵۴۶ ،۰/۰۶۵۴۲)
C۲۸	خطای اپراتور	(۰/۴۲۹۴۱ ،۰/۳۰۴۷۴ ،۰/۲۸۲۴۲ ،۰/۱۲۶۹۸)
C۴۲	استفاده از ماشین‌آلات نامناسب	(۰/۳۶۴۷۵ ،۰/۲۵۵۴۸ ،۰/۲۲۳۹۳ ،۰/۰۸۶۹۵)
C۳۹	سوء مدیریت	(۰/۵۰۳۳ ، ۰/۳۸۴۸ ،۰/۳۷۰۱۸ ، ۰/۱۹۹۳۴)
C۴۰	ناقص بودن اطلاعات دریافتی از سوی مراجع	(۰/۶۶۲۵۷ ،۰/۵۵۷۱۷ ،۰/۵۰۲۵۲ ،۰/۳۷۹۴۱)
C۴۱	گذشت زمان و نبود سابقه	(۰/۶۴۷۱۹ ،۰/۵۵۲۵۶ ، ۰/۵۰۷۱۴ ،۰/۳۷۴۸)

جدول ۵-۱۹: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(خسارت وارد بر ساختمان‌های اطراف $T_{۱۴}$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
C۴۳	عدم شناخت چاه‌های جذبی فاضلاب	(۰/۸۰۱۸۸ ،۰/۶۵۲۶ ،۰/۶۵۲۶ ،۰/۴۵۲۵۲)
C۴۴	عدم وجود اطلاعات سازه‌ای	(۰/۸۱۴۱۶ ،۰/۶۹۷۹۷ ،۰/۶۸۲۵۷ ،۰/۴۹۷۸۹)
D۱۱	استاندارد نبودن این ساختمان‌ها	(۰/۸۴۹۵۵ ،۰/۷۳۶۴۲ ،۰/۷۱۱۷۹ ،۰/۵۳۶۳۴)
C۴۲	عدم اطلاعات ژئوتکنیکی	(۰/۸۴۰۳۴،۰/۷۳۷۲۴ ،۰/۷۲۱۸۴ ،۰/۵۳۷۱۶)
D۱۰	آسیب به سقف یا دیوارهای تونل	(۰/۷۲۰۲۵ ،۰/۶۲۰۲۱ ،۰/۵۸۷۸۸ ،۰/۴۴۴۷۶)
C۱۶	سگمنت گذاری نامناسب به دلیل سرعت در کار	(۰/۷۳۴۰۸،۰/۶۰۰۹۵ ،۰/۵۸۵۵۵ ،۰/۴۰۸۵۷)

D۱۲	عدم رعایت صحیح جزئیات اجرایی	(۰/۵۱۱۷۳، ۰/۶۸۷۱۸، ۰/۷۱۱۸۱، ۰/۸۲۰۳۱)

جدول ۵-۲۰: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(برخورد با عوارض ناشناخته $T_{۱۵}$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۲۵	تغییرات ژئوتکنیکی غیرقابل پیش‌بینی	(۰/۴۷۵۵۳، ۰/۶۷۵۶۱، ۰/۶۷۵۶۱، ۰/۸۱۷۲۲)
C۴۵	برخورد با لایه‌های باستانی	(۰/۰۵۱۵۶، ۰/۱۵۴۶۸، ۰/۲۰۳۱۶، ۰/۳۰۳۲)
C۳۹	سوء مدیریت	(۰/۳۳۸۶۶ ، ۰/۴۸۰۲۵، ۰/۵۲۱۸۱، ۰/۶۱۹۵۴)
C۴۶	کمبود زمان	(۰/۳۷۰۹۳، ۰/۵۲۹۴۵، ۰/۵۵۴۰۸، ۰/۶۹۴۱۳)
C۴۷	عدم امکان مطالعات استراتژیک	(۰/۲۰۱۶۳، ۰/۳۶۰۱۵، ۰/۳۸۴۷۸، ۰/۵۰۹۴۳)
E۵	کمبود اعتبار	(۰/۳۵۴۷۹، ۰/۵۱۱۰۱، ۰/۵۳۶۴، ۰/۶۶۴۹۱)

جدول ۵-۲۱: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب $T_{۱۶}$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	(۰/۲۹۰۸۲،۰/۱۵۲۳۴، ۰/۳۲۱۶۲، ۰/۴۶۳۲۱)
C۲۰	خرابی سگمنت	(۰/۴۰۰۹۵، ۰/۵۸۴۱، ۰/۶۰۱۰۳، ۰/۷۱۹۵۴)
C۴۸	کیفیت پایین تولید	(۰/۳۴۴۸۲ ، ۰/۵۳۷۲، ۰/۵۴۴۹، ۰/۶۷۴۹۳)
D۱۳	شکستن قسمت‌های دیگر	(۰/۴۸۸۶۸، ۰/۶۸۱۰۶ ، ۰/۶۸۸۷۶، ۰/۸۲۳۴۲)
D۱۴	عدم توانایی مهر موم	(۰/۳۹۰۱۳، ۰/۵۸۱۷۵ ، ۰/۵۹۰۲۱، ۰/۷۳۱۸)
E۶	آب‌بندی نامناسب	(۰/۷۱۱۰۶، ۰/۸۵۵۷۳، ۰/۹۱۱۱۴، ۰/۹۵۵۷۷)

جدول ۵-۲۲: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با رویدادهای اساسی(گرفتگی و انسداد دیسک‌ها $T_{۱۷}$)

نماد رویداد اساسی	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
A۴	شرایط زمین‌شناسی ترکیبی	(۰/۵۹۰۲۹، ۰/۷۵۹۵۷، ۰/۷۹۰۳۷، ۰/۸۸۳۴۶)
A۲۱	چسبندگی خاک رس	(۰/۶۷۴۹۴، ۰/۸۲۷۲۹، ۰/۸۷۵۰۲، ۰/۹۳۴۲۵)
A۲۲	اصطکاک با مواد	(۰/۲۸۷۸۱، ۰/۴۸۰۱۹، ۰/۴۸۷۸۹، ۰/۶۰۴۸۴)
B۲	نیروی رانش	(۰/۴۲۰۹۳، ۰/۶۰۴۰۸، ۰/۶۲۱۰۱، ۰/۷۴۹۵۱)
C۴۹	عدم استفاده از مواد افزودنی	(۰/۵۸۱۰۸، ۰/۷۵۰۳۶، ۰/۷۸۱۱۶، ۰/۸۷۷۳۲)
C۵۰	مواد افزودنی نامناسب	(۰/۶۰۴۱۵، ۰/۷۷۳۴۳، ۰/۸۰۴۲۳، ۰/۸۹۲۷)

د) مرحله ۴ : غیر فازی کردن

در این مرحله با اســـتفاده از مدل مرکز گرانیگاه رابطه(۴-۶) و فرمول ذوزنقه‌ای، این اعداد غیر فازی شـده است.اعداد فازی مندرج در جدول(۵-۶) تا جدول(۵-۲۲) با استفاده از مدل مرکز گرانیگاه به اعداد قطعی تبدیل‌شده است. احتمال شکست هر رویداد پایانی نیز با استفاده از روابط (۴-۷) و (۴-۸) محاسـبه‌شده است. نتایج حاصل از محاسبات مربوط به غیر فازی کردن نظر کارشناسان و احتمال

شکست در رابطه با هر رویداد اساسی برای ریسک‌های تونل سازی مکانیزه به‌صورت تفکیک هر درخت در جدول(۵-۲۳) تا جدول(۵-۳۹) مشخص‌شده است.

جدول ۵-۲۳: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (خرابی در بخش برش دهنده T_1)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۱	نوع خاک	۰/۷۴۵۵۲	۰/۰۲۴۶۵۴۳۶۱
A۲	سختی	۰/۸۴۶۰	۰/۰۴۹۶۵۱۵۱۵
A۳	مقدار کوارتز زمین	۰/۷۲۳۲۴۷۲۴۷	۰/۰۲۱۳۵۴۰۳۹
A۴	شرایط ترکیبی زمین	۰/۷۹۸۳۷	۰/۰۳۵۱۱۹۲۳۸
B۱	طراحی برش دهنده	۰/۶۹۴۱۳۴	۰/۰۱۷۷۴۳۰۳۱
C۱	تأخیر در تعویض برش دهنده	۰/۶۷۴۷۱۸	۰/۰۱۵۶۹۴۷۱۹
C۲	تسلط اپراتور	۰/۶۱۵۳۷۲	۰/۰۱۰۷۸۰۴۷۱
A۴	شرایط ترکیبی زمین	۰/۷۹۶۲۷۷	۰/۰۳۴۶۱۴۰۳۱
B۱	طراحی برش دهنده	۰/۶۸۴۴۲۴	۰/۰۱۶۶۸۶۴۴۸
C۲	تسلط اپراتور	۰/۷۴۹۸۳۹	۰/۰۲۵۳۵۸۲۳۹
C۳	مدیریت نرخ بازشدگی	۰/۴۴۲۷۳	۰/۰۰۳۲۷۷۷۶
C۴	انتخاب نوع برش دهنده	۰/۶۸۱۵۶۳۴۴۸	۰/۰۱۶۳۸۷۶۹۷

جدول ۵-۲۴: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (توقف دستگاه T_2)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۶	تورم زمین	۰/۵۴۹۱۲۸۴۳۴	۰/۰۰۷۰۰۴۱
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	۰/۶۲۹۸۱۴۷۲۴	۰/۰۱۱۸۱۷۸۸۹
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۳۸۸۰۹۳۹۷۴	۰/۰۰۲۰۹۸۲۸۵
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۲۶۷۴۰۹۲۴۹	۰/۰۰۰۶۰۳۰۱۵
A۹	درجه هوازدگی	۰/۲۴۱۵۶۱۳۷	۰/۰۰۰۴۲۷۲۰۷
C۵	مانور حرکتی TBM	۰/۷۴۲۵۰۷۳۲۱	۰/۰۲۴۱۷۶۴۳۲
C۶	خطای حرکت	۰/۵۱۱۹۰۹۲۸۴	۰/۰۰۵۴۳۵۷۰۶
C۷	مونتاژ ضعیف سگمنت	۰/۴۷۷۴۴۰۷۵۷	۰/۰۰۴۲۵۲۹۳۱
C۸	تعویض دیرهنگام برش دهنده	۰/۴۵۰۵۳۲۶۳۱	۰/۰۰۳۴۸۰۰۴۷

جدول ۵-۲۵: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه T_2)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۳۸۱۷۱۳۳۳۳	۰/۰۰۱۹۸۴۷۰۷
A۱۰	زمین دارای شن و ماسه	۰/۶۰۵۸۹۱۱۸۶	۰/۰۱۰۱۴۶۴۰۸
B۱	طراحی برش دهنده	۰/۴۴۹۰۳۶۰۹۵	۰/۰۰۳۴۴۰۵۲۵
C۹	مدیریت ضعیف فشار جبهه کار	۰/۵۷۶۰۴۵۱۸	۰/۰۰۸۳۶۵۹۷
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۵۲۲۲۴۴۰۸۱	۰/۰۰۵۸۳۸۳۰۱
A۱۱	نشست سطح زمین	۰/۶۲۸۱۴۰۵۰۵	۰/۰۱۱۶۹۲۹۷۵
C۱۱	مدیریت مقدار حمل‌ونقل مصالح	۰/۴۷۸۷۱۰۵۴۹	۰/۰۰۴۲۹۲۴۷۲
A۱۱	نشست سطح زمین	۰/۴۱۸۹۲۰۱۶۶	۰/۰۰۲۷۱۵۳۹۹

C۱۰	مدیریت مقدار حمل‌ونقل مصالح	۰/۴۷۷۰۳۱۷۲۵	۰/۰۰۴۲۴۰۲۵۶
C۱۱	کنترل اندازه ، ابعاد مصالح حفاری	۰/۵۹۸۴۴۶۶۶۷	۰/۰۰۹۶۷۲۸۱۴
C۱۲	حمل غیرقابل‌کنترل	۰/۵۲۶۶۸۷۴۷۹	۰/۰۰۶۰۱۸۸۳۹
A۱۲	آب زیرزمینی	۰/۷۰۶۲۷۸۸۸۹	۰/۰۱۹۱۶۳۵۳۱
B۳	انتخاب TBM	۰/۷۷۳۸۰۴۰۲۹	۰/۰۲۹۷۰۹۷۱۴
C۱۲	حمل غیرقابل‌کنترل	۰/۵۳۰۲۴۴۷۰۸	۰/۰۰۶۱۶۶۷۱۲
C۱۱	کنترل اندازه ، ابعاد مصالح حفاری	۰/۵۹۲۸۰۰۵۲۶	۰/۰۰۹۳۲۷۱۷۵
C۱۳	فرایند حمل مصالح	۰/۷۰۰۲۸۸۵۹۹	۰/۰۱۸۴۴۸۵۲۷

جدول ۵-۲۶: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (خرابی سگمنت $T_۴$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار	۰/۶۳۶۰۷۹۰۸۴	۰/۰۱۲۲۹۶۶۴
B۴	انواع روش‌های نصب حلقه سگمنت	۰/۵۴۲۸۴۷۴۶۷	۰/۰۰۶۷۱۵۴۷۵
C۱۴	شعاع قوسی	۰/۵۷۱۷۸۹۵۰۳	۰/۰۰۸۱۳۶۳۵۱
C۱۵	دوغاب ناکافی	۰/۴۲۱۹۰۰۹۷۹	۰/۰۰۲۷۸۱۴۸۴
C۱۶	نصب نامناسب سگمنت اصلی	۰/۵۹۷۰۱۵۵۵۶	۰/۰۰۹۵۸۴۱۲۲
A۱۲	آب زیرزمینی	۰/۵۴۸۴۵۴۶۴۳	۰/۰۰۶۹۷۲۶۳۹
B۴	انواع روش‌های نصب حلقه سگمنت	۰/۴۸۴۶۹۶۳۴۲	۰/۰۰۴۴۸۲۸۱۸
B۵	انتخاب واشر آب‌بند	۰/۶۱۰۹۹۲۰۹۴	۰/۰۱۰۴۸۳۱۲۱
C۱۵	دوغاب ناکافی	۰/۵۷۳۴۷۹۴۲۵	۰/۰۰۸۲۲۶۸۵۶
C۱۶	نصب نامناسب سگمنت اصلی	۰/۵۹۳۰۵۴۹۰۴	۰/۰۰۹۳۴۲۵۰۳
C۱۷	قطع کردن یا فاصله دادن اتصالات سگمنت	۰/۳۰۸۱۷۲۸۲۲	۰/۰۰۰۹۷۰۷۳۹

جدول ۵-۲۷: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (سایش کاتر ها $T_۵$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
B۷	تعداد دیسک‌ها	۰/۷۰۳۳۵۱۰۹۲	۰/۰۱۸۸۱۰۴۸۳
B۸	زاویه قرارگیری دیسک‌ها	۰/۷۶۰۹۷۸۴۸۶	۰/۰۲۷۲۸۱۹۱۷
B۹	موقعیت دیسک‌ها	۰/۵۶۷۲۹۰۸۳۵	۰/۰۰۷۸۹۹۶۷۹
B۱۰	فاصله دیسک‌ها	۰/۵۹۲۱۱۱۴۷۶	۰/۰۰۹۲۸۵۷۷
B۱۱	توزیع غیریکنواخت دیسک‌ها	۰/۷۴۰۰۸۷۱۹	۰/۰۲۳۸۰۰۰۳۲
B۱۲	سرعت چرخش	۰/۷۱۱۵۷۸۸۸۹	۰/۰۱۹۸۲۰۶۴۴
B۶	بهسازی خاک(استفاده از مواد افزودنی)	۰/۷۱۴۹۱۴۳۹۴	۰/۰۲۰۲۴۶۴۹۶
B۲۲	جنس کاتر	۰/۷۰۴۴۰۷۷۷۸	۰/۰۱۸۹۳۷۱۰۳
B۲	نیروی اعمال‌شده بیش‌ازحد	۰/۷۵۸۴۷۸۸۸۹	۰/۰۲۶۸۳۶۰۸۴
A۱	نوع و خواص خاک	۰/۴۹۹۷۱	۰/۰۰۴۹۹۰۱۱
A۳	مقدار کوارتز	۰/۵۴۳۳۱۶۶۶۷	۰/۰۰۶۷۳۶۶۷۹
A۱۳	ناپیوستگی سینه کار	۰/۳۵۹۷۹۰۲۰۱	۰/۰۰۱۶۲۸۱۳۶
A۱۴	اندازه دانه	۰/۵۵۱۵۴۴۷۶۶	۰/۰۰۷۱۱۷۹۳۲
A۱۵	جهت‌گیری دانه	۰/۴۱۳۶۳۱۰۹۴	۰/۰۰۲۶۰۱۰۳۹
A۱۶	چسبندگی خاک	۰/۵۳۸۶۹۲۱۱۷	۰/۰۰۶۵۳۰۱۵۱
A۱۷	شکستگی مافیک	۰/۶۰۱۸۰۴۱۴۲	۰/۰۰۹۸۸۳۸۳۹
A۱۸	وجود کانی‌های ساینده	۰/۶۵۵۸۶۵۰۱۴	۰/۰۱۳۹۳۴۷۵۳

جدول ۵-۲۸: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (گیرکردن TBM، $T_۶$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۱۲	وجود آب زیرزمینی	۰/۴۸۷۷۷۵۷۱۵	۰/۰۰۴۵۸۳۳۲۹
D۲	آسیب به سگمنت	۰/۳۵۰۶۳۳۵۹۵	۰/۰۰۱۴۹۳۷۶۶
D۳	ریزش سنگ‌های خردشده	۰/۳۲۵۴۳۶۲۸۲	۰/۰۰۱۱۶۴۵۷
D۴	ریزش بلوک‌های سنگین	۰/۲۷۹۳۶۶۸۰۴	۰/۰۰۰۶۹۸۷۰۶
B۲	گشتاور و نیروی رانش	۰/۷۲۴۵۰۴۴۱۴	۰/۰۲۱۵۲۶۷۶
B۱۲	سرعت چرخش	۰/۶۴۱۸۶۰۵۲۵	۰/۰۱۲۷۵۴۹۲۹
B۱۳	کاهش گشتاور نقاله در پیچ	۰/۶۰۷۴۲۳۹۲۲	۰/۰۱۰۲۴۶۵۲
C۲۱	عدم بهسازی خاک	۰/۶۷۴۶۴۱۳۳۵	۰/۰۱۵۶۸۷۱۲۸
C۲۲	عدم بهسازی خاک در نوار نقاله پیچ	۰/۴۷۰۷۰۹۵۴	۰/۰۰۴۰۴۸۱۰۷
C۲۳	عدم بهسازی خاک در جبهه کار	۰/۷۴۳۲۹۱۷۴۶	۰/۰۲۴۲۹۹۸۶۲
C۲۴	عدم بهسازی خاک در محفظه	۰/۶۰۹۲۷۷۷۰۴	۰/۰۱۰۳۶۸۸۱۹
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۲۸۱۱۸۰۵۵۶	۰/۰۰۰۷۱۴۰۶۶
A۲۱	کاهش اصطکاک داخلی بین ذرات خاک	۰/۴۹۰۳۳۱۰۵۹	۰/۰۰۴۶۶۸۰۹۷
C۲۰	زمین نرم و سست	۰/۵۴۸۸۲۵۲۹۵	۰/۰۰۶۹۸۹۹۳۱

جدول ۵-۲۹: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف $T_۷$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
C۲۵	اجرای نادرست سیستم زهکشی	۰/۴۰۱۳۳۸۳۶۲	۰/۰۰۲۳۴۹۱
E۷	آسیب‌دیدگی عایق	۰/۴۷۸۸۲۵۱۱۳	۰/۰۰۴۲۹۶۰۵۴
B۱۵	عدم طراحی مناسب با توجه به نوع و محل خاک	۰/۳۴۵۴۲۹۳۲۲	۰/۰۰۱۴۲۱۰۰۷
C۱۶	اجرای نامناسب	۰/۵۸۳۳۲۰۰۱۸	۰/۰۰۸۷۷۱۸۳۴
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۱۹۷۶۴۰۲۹۶	۰/۰۰۰۲۱۳۴۵۶
A۱۲	برخورد با لایه‌های آبدار	۰/۶۲۱۱۳۵۰۹۴	۰/۰۱۱۱۸۳۷۱۶
A۲۲	برخورد با قنات	۰/۴۵۴۶۹۷۴۷۲	۰/۰۰۳۵۹۱۸۸۴
C۲۵	برخورد با فاضلاب منازل	۰/۲۸۰۲۳۲۹۹	۰/۰۰۰۷۰۶۰۱۳
B۴	سیستم زهکشی نامناسب	۰/۳۵۰۰۲۲۲۰۵	۰/۰۰۱۴۸۵۰۸۵

جدول ۵-۳۰: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (انحراف از مسیر $T_۸$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
C۲۶	جابجایی دوربین‌های دستگاه	۰/۸۶۷۵۲۴۴۴۴	۰/۰۵۸۸۹۸۶۳۲
C۲۷	کارشکنی	۰/۲۶۲۹۹۵۶۱۸	۰/۰۰۰۵۷۰۰۷
C۲۸	خطای اپراتور	۰/۴۸۱۳۹۹۲۶۷	۰/۰۰۴۳۷۷۱۶
D۶	نقص تجهیزات	۰/۷۱۹۱۲۴۳۲۴	۰/۰۲۰۷۹۸۰۷۸
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۱۴۴۲۷۴۷۵۸	۰/۰۰۰۰۶۸۳
C۵۲	محاسبات اشتباه	۰/۵۱۸۶۴۲۷۳۵	۰/۰۰۵۶۹۵۳۰۲
D۵	تصمیم‌گیری جهت تغیر مسیر (برخورد با مواضع و تأسیسات شهری)	۰/۹۲۲۵۹۱۱۱۱	۰/۰۹۸۳۲۳۵۴۷

جدول ۵-۳۱: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (مشکلات مکانیکیTBM ، T_9)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
C۳۰	ضعف فنی در تعمیر و نگهداری	۰/۵۳۹۶۱۱۵۱۷	۰/۰۰۶۵۷۰۷۷۶
D۷	فرسوده بودن ماشین‌آلات	۰/۶۵۶۷۶۴۷۲۴	۰/۰۱۴۰۱۴۰۹۹
E۱	عدم تأمین بودجه کافی	۰/۷۴۶۸۷۳۰۲۸	۰/۰۲۴۸۷۲۴۶۲
C۲۳	ناپایداری جبهه کار	۰/۳۹۴۳۱۶۲۳۸	۰/۰۰۲۲۱۳۵۳۶
C۲۴	عدم تطبیق شرایط موجود در انجام پروژه با تجهیزات خاص	۰/۵۱۴۹۰۷۴۱۷	۰/۰۰۵۵۵۰۰۶
C۲۸	خطای اپراتور	۰/۶۰۲۴۰۲۲۳۸	۰/۰۰۹۹۲۱۸۷
C۲۹	عدم تأمین قطعات	۰/۷۴۵۵۹۹۴۸۱	۰/۰۲۴۶۶۷۱۱۳

جدول ۵-۳۲: نتایج محاسبه عدد غیر فازی و احتمال شکست (حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی T_{10})

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
B۱۵	ساخت نادرست سگمنت	۰/۵۶۰۱۳۸۵۷۴	۰/۰۰۷۵۳۵۸۱
C۸	اجرای نادرست عملیات تزریق	۰/۵۳۱۸۸۶۱۹۹	۰/۰۰۶۲۳۵۹۶۸
C۹	کمبود فشار جبهه کار	۰/۳۵۸۵۳۷۹۱۶	۰/۰۰۱۶۰۹۲۷۱
C۱۶	نصب نادرست سگمنت	۰/۶۱۷۷	۰/۰۱۰۹۴۱۶۹۶
C۳۱	هدایت نادرست دستگاه	۰/۲۳۳۴۱۹۲۳	۰/۰۰۰۳۷۹۹۷۶

جدول ۵-۳۳: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، T_{11})

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
B۲	گشتاور عملیاتی پایین	۰/۵۷۵۵۲۸۳۶۲	۰/۰۰۸۳۳۷۷۸۲
B۱۸	وزن نامناسب دستگاه	۰/۲۱۱۷۷۴۶۹۹	۰/۰۰۰۲۷۱۶۷۵
B۱۹	ناتوانی در تأمین نیروی رانش موردنیاز	۰/۳۹۸۹۸۷۰۸۲	۰/۰۰۲۳۰۳۰۴۷
B۲۰	قدرت ناکافی ماشین	۰/۲۱۷۰۲۴۷۸۴	۰/۰۰۰۲۹۵۷۳۹
B۲۱	قطر نامناسب دیسک‌ها	۰/۲۲۳۶۹۳۲۹۳	۰/۰۰۰۳۲۸۳۰۶
C۵۱	سرعت کم دستگاه	۰/۳۱۷۸۱۴۴۹۶	۰/۰۰۱۰۷۵۹۷۴
C۳۴	کمبود نیروی انسانی ماهر در زمینه مدیریت	۰/۶۷۲۴۸۸۱۰۲	۰/۰۱۵۴۷۵۴۵۷
C۳۵	مدیریت ضعیف TBM	۰/۷۳۸۵۴۲۴۴۶	۰/۰۲۳۵۶۳۲۰۸
C۳۸	حمایت کافی از عوامل اداری	۰/۳۹۷۴۲۵۵۱۹	۰/۰۰۲۲۷۲۸۳۱
A۱	خواص و نوع خاک	۰/۷۵۹۵۷۷۸۷۲	۰/۰۲۷۰۳۱۰۵۷
A۴	شرایط ترکیبی زمین	۰/۷۷۱۴۶۸۲۷۳	۰/۰۲۹۲۴۹۲۷۷
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	۰/۴۱۰۳۱۷۲۳۹	۰/۰۰۲۵۳۱۲۴۱
A۸	گسل و زون‌های خردشده	۰/۲۷۰۳۱۰۵۷۲	۰/۰۰۰۶۲۵۳۵۹
A۱۲	وجود آب‌های زیرزمینی	۰/۷۵۸۲	۰/۰۲۶۷۸۶۸۶۴
B۱۷	قطر تونل	۰/۴۴۷۸۹۹۲۱۹	۰/۰۰۳۴۱۰۷۳۲
B۲۳	پروفایل مسیر تونل	۰/۸۸۱۹۱۳۳۳۳	۰/۰۶۶۵۰۰۲۷۶
C۳۲	محدودیت‌های اعمال‌شده توسط مقررات محلی	۰/۴۸۵۰۰۳۲۲	۰/۰۰۴۴۹۲۷۵۵
C۳۳	محدودیت‌های ساعت کار	۰/۵۱۳۵۲	۰/۰۰۵۴۹۶۸۹۸
E۲	کمبود کارگر	۰/۵۰۶۶۸۳	۰/۰۰۵۲۴۰۹۹۳

جدول ۵-۳۴: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی $T_{۱۲}$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
C۲۹	عدم تأمین قطعات	۰/۸۱۷۴۶۷۳۸۱	۰/۰۴۰۱۸۲۶۸۴
C۳۷	عدم وجود افراد با تخصص کافی	۰/۶۸۴۲۷۵۲۴۷	۰/۰۱۶۶۷۰۷۷۵
C۳۸	عدم شناخت دقیق فنی پیمانکار از نیازهای کارگاه	۰/۶۵۴۷۹۲۸۱۶	۰/۰۱۳۸۴۰۷۷۳
E۱	عدم تأمین اعتبار لازم	۰/۸۱۸۶۴۴۵۶۴	۰/۰۴۰۵۲۴۱۹
E۳	تحریم‌ها	۰/۵۲۶۳۷۶۶۶۷	۰/۰۰۶۰۰۶۰۶۱
E۴	تغییر در مالیات و عوارض گمرکی	۰/۴۱۶۰۸۷۳۵۶	۰/۰۰۲۶۵۳۶۹۲

جدول ۵-۳۵: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی $T_{۱۳}$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
D۹	آسیب‌دیدگی وسیع تونل	۰/۱۸۷۲۵۰۴۸۱	۰/۰۰۰۱۷۶۴۳۱
C۲۸	خطای اپراتور	۰/۲۸۳۶۷۵۸۰۳	۰/۰۰۰۷۳۵۵۷۱
C۴۲	استفاده از ماشین‌آلات نامناسب	۰/۲۳۰۹۳۹۳۴۸	۰/۰۰۰۳۶۶۳۲
C۳۹	سوء مدیریت	۰/۳۶۰۴۴۳۶۵۷	۰/۰۰۱۶۳۸۰۴۲
C۴۰	ناقص بودن اطلاعات دریافتی از سوی مراجع	۰/۵۲۴۴۱۹۱۷۹	۰/۰۰۵۹۲۶۱۰۴
C۴۱	گذشت زمان و نبود سابقه	۰/۵۱۸۱۷۸۲۲۴	۰/۰۰۵۶۷۷۰۷۱

جدول ۵-۳۶: نتایج محاسبه عددغیرفازی شده و احتمال شکست (خسارت وارد بر ساختمان‌های اطراف $T_{۱۴}$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
C۴۳	عدم شناخت چاه‌های جذبی فاضلاب	۰/۶۳۵۶۶۶۶۶۷	۰/۰۱۲۲۶۴۵۶
C۴۴	عدم وجود اطلاعات سازه‌ای	۰/۶۶۷۹۷۰۰۱۸	۰/۰۱۵۰۴۰۶۱۴
D۱۱	استاندارد نبودن این ساختمان‌ها	۰/۷۰۴۰۸۸۹	۰/۰۱۸۸۹۸۷۹۸
C۴۲	عدم اطلاعات ژئوتکنیکی	۰/۷۰۳۰۰۳۹۲۳	۰/۰۱۸۷۶۹۰۷۷
D۱۰	آسیب به سقف یا دیوارهای تونل	۰/۵۹۰۴۳۹۱۰۸	۰/۰۰۹۱۸۵۹۶۷
C۱۶	سگمنت گذاری نامناسب به دلیل سرعت در کار	۰/۵۷۸۹۶۳۴۷۴	۰/۰۰۸۵۲۶۷۲۹
D۱۲	عدم رعایت صحیح جزئیات اجرایی	۰/۶۷۸۰۰۳۱۲۸	۰/۰۱۶۰۲۳۴۸۱

جدول ۵-۳۷: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (برخورد با عوارض ناشناخته $T_{۱۵}$)

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۲۵	تغییرات ژئوتکنیکی غیرقابل‌پیش‌بینی	۰/۶۵۶۱۲	۰/۰۱۳۹۵۷۱۹۶
C۴۵	برخورد با لایه‌های باستانی	۰/۱۷۷۹۷۶۲۵۵	۰/۰۰۰۱۴۷۲۳۶
C۳۹	سوء مدیریت	۰/۴۸۷۳۵۲۲۰۲	۰/۰۰۴۵۶۹۳۹۹
C۴۶	کمبود زمان	۰/۵۳۵۸۲۶۳۱۲	۰/۰۰۶۴۰۴۸۸۱
C۴۷	عدم امکان مطالعات استراتژیک	۰/۳۶۱۵۹۳۲۴۲	۰/۰۰۱۶۵۵۵۷۴
E۵	کمبود اعتبار	۰/۵۱۴۸۱۷۸۳	۰/۰۰۵۵۴۶۶۱۵

جدول ۵-۳۸: نتایج محاسبه عدد غیرفازی شده و احتمال شکست (عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب T_{16})

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	۰/۳۰۷۲۰۹۹۴۱	۰/۰۰۰۹۶۰۶۳۷
C۲۰	خرابی سگمنت	۰/۵۷۱۵۶۱۹۴۵	۰/۰۰۸۱۲۴۲۳۱
C۴۸	کیفیت پایین تولید	۰/۵۲۰۵۰۳۵۳۳	۰/۰۰۵۷۶۸۸۲۲
D۱۳	شکستن قسمت‌های دیگر	۰/۶۶۵۸۸۶۳۱۲	۰/۰۱۴۸۴۴۲۱۹
D۱۴	عدم توانایی مهر موم	۰/۵۶۹۵۰۴۸۰۸	۰/۰۰۸۰۱۵۳۸۷
E۶	آب‌بندی نامناسب	۰/۸۵۳۱۶۶۶۶۷	۰/۰۵۲۴۹۱۳۴۵

جدول ۵-۳۹: نتایج محاسبه عدد غیر فازی شده و احتمال شکست (گرفتگی و انسداد دیسک‌ها T_{17})

رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده	احتمال شکست
A۴	شرایط زمین‌شناسی ترکیبی	۰/۷۵۰۷۸۰۵۷۱	۰/۰۲۵۵۱۴۶۹۷
A۲۱	چسبندگی خاک رس	۰/۸۲۲۵۲۷۶۱۶	۰/۰۴۱۶۷۷۴۹۵
A۲۲	اصطکاک با مواد	۰/۴۵۹۱۹۴۷۶۶	۰/۰۰۳۷۱۵۷۵۱
B۲	نیروی رانش	۰/۵۹۴۷۷۴۶۴۲	۰/۰۰۹۴۴۶۷۲۷
C۴۹	عدم استفاده از مواد افزودنی	۰/۷۴۲۵۳۴۳۸۴	۰/۰۲۴۱۸۰۶۷۹
C۵۰	مواد افزودنی نامناسب	۰/۷۶۳۱۹۲۲۹۹	۰/۰۲۷۶۸۳۹۴۵

پس از تعیین احتمال شکست رویدادهای اساسی، احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی نیز محاسبه شد که نتایج این محاسبات، در جدول‌های ۴-۴۰ تا ۴-۵۶ درج‌شده است. بر این اساس میزان احتمال وقوع خطر خرابی در بخش برش دهنده ۲۴/۰۷٪ ،پیشروی کم در طول ساخت تونل با استفاده از TBM ۲۰/۴۹٪ ، سایش دیسک‌ها ۲۰/۴۲٪ ، انحراف از مسیر تونل ۱۷/۸۲٪ ، مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه ۱۴/۱۳ ٪ ، گرفتگی و انسداد دیسک‌ها ۱۲/۵۶ ٪ ، گیرکردن TBM ۱۱/۵۷ ٪ ، پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی ۱۱/۴۷ ٪ ، وارد شدت خسارت بر ساختمان‌های اطراف ۹/۴۷ ٪ ، عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب ۸/۷۷ ٪ ، مشکلات مکانیکی TBM ۸/۴۸ ٪ ، خرابی سگمنت ها ۷/۷۲ ٪ ، توقف دستگاه ۶/۲۵ ٪ ، آب‌گرفتگی کف یا چکه کردن سقف ۳/۳۶ ٪ ، برخورد با عوارض ناشناخته ۳/۱۹ ٪ ، حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش ۲/۶۵٪ ، و خسارت وارد بر تأسیسات زیربنایی ۱/۴۴ ٪ بیان‌شده است.

همان‌طور که از نتایج پیداست خرابی در بخش برش دهنده ، پیشروی کم در طول ساخت تونل با استفاده از TBM، سایش دیسک‌ها و انحراف از مسیر بیان‌کننده سطح ریسک بالایی برای ریسک‌هایی

تونل‌سازی مکانیزه در این پروژه هستند.

جدول ۵-۴۰: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (خرابی در بخش برش دهنده T_1)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	خرابی در بخش برش دهنده	بالایی	۰/۲۴۰۶۸۰۷۱
G۱-۱	سایش بیش از حد	میانی	۰/۰۹۲۸۷۵
G۱-۲	سایش بخشی از برش دهنده	میانی	۰/۰۷۷۱۷۰۹
G۱-۳	نیروی رانش یا گشتاور نا کافی	میانی	۰/۰۹۲۹۴

جدول ۵-۴۱: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (توقف دستگاه T_2)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	توقف دستگاه	بالایی	۰/۰۶۲۵
G۲-۱	نیروی عکس العمل	میانی	۰/۰۲۵۴۶۲
G۲-۲	خارج شدن از مسیر حفاری	میانی	۰/۰۳۴۶۰
G۲-۳	گرفتگی سپر	میانی	۰/۰۰۳۴۸۰۰۴۷

جدول ۵-۴۲: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه T_3)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	بالایی	۰/۱۴۱۳۱۹۹۷۴
G۳-۱	مدیریت ضعیف فشار جبهه کار	میانی	۰/۰۲۳۷۴۶
G۳-۲	مصالح بیش از حد	میانی	۰/۰۲۱۶۸۰۵
G۳-۳	ظرفیت پایین مصالح	میانی	۰/۰۷۵۴۲
G۳-۳-۱	بند آمدن لوله	ساب درگاه	۰/۰۲۲۴۶۹
G۳-۳-۲	مقدار زیاد آب زیر زمینی	ساب درگاه	۰/۰۵۴۱۷۲۷
G۳-۴	خرابی نوار نقاله	میانی	۰/۰۲۷۶۰۳۶۲۹

جدول ۵-۴۳: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (خرابی سگمنت T_4)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	خرابی سگمنت	بالایی	۰/۰۷۷۲۰۰۶۸۲
G۴-۱	خرابی سگمنت	میانی	۰/۰۳۸۹۱۹
G۴-۲	فشار آب/خرابی آب بند	میانی	۰/۰۳۹۸۳۱۹

جدول ۵-۴۴: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (سایش کاتر ها T_5)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	سایش دیسک ها	بالایی	۰/۲۰۴۲۳۴۶۵۱
G۵-۱	طراحی TBM	میانی	۰/۱۰۲۳۸۹
G۵-۲	جنس زمین	میانی	۰/۰۵۲۲۴۲۶

جدول ۵-۴۵: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (گیر کردن TBM، T_6)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	گیر کردن TBM	بالایی	۰/۱۱۵۷۳۱۱۵۵
G۷-۱	ناپایداری سینه کار و دیواره ها	میانی	۰/۰۰۸۱۰۷
G۷-۲	سیستم	میانی	۰/۰۴۳۹۰۵۲
G۷-۳	مدیریت	میانی	۰/۰۵۳۴۱
G۷-۴	شرایط زمین شناسی	میانی	۰/۰۱۴۹۵۳۷۳۱

جدول ۵-۴۶: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(آب گرفتگی کف یا چکه کردن سقف T_7)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	آب گرفتگی کف یا چکه کردن سقف	بالایی	۰/۰۳۳۵۶۴۶۱۶
G۸-۱	آسیب دیدگی دیوار تونل	میانی	۰/۰۱۶۷۴۸
G۸-۲	ترک خوردن بتن	ساب درگاه	۰/۰۱۰۱۸۰۴

جدول ۵-۴۷: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(انحراف از مسیر T_8)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	انحراف از مسیر T_9	بالایی	۰/۱۷۸۲۴
G۹-۱	خطا در نقشه برداری	میانی	۰/۰۸۳۰۲۸۴

جدول ۵-۴۸: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(مشکلات مکانیکیTBM ، T_9)

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	مشکلات مکانیکی TBM	بالایی	۰/۰۸۴۸۰۹۰۴
G۱۰-۱	نا توانی از سرویس	میانی	۰/۰۴۴۸۵۶

جدول ۵-۴۹: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی T_{10})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	حفاری مکانیزه و راهبردی دستگاه و نصب پوشش بتنی	بالایی	۰/۰۲۶۴۵۶۱۹

جدول ۵-۵۰: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، T_{11})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	پیشروی کم در طول ساخت تونل با استفاده از TBM	بالایی	۰/۲۰۴۹۴۶۲۸
G۱۲-۱	قابلیت ماشین	میانی	۰/۰۱۲۵۷۱
G۱۲-۲	مدیریت سیستم	میانی	۰/۰۴۰۸۵۸۹
G۱۲-۳	زمین	میانی	۰/۰۸۳۷۶
G۱۲-۴	پلان تونل	میانی	۰/۰۶۹۶۸۴۱۹۳
G۱۲-۵	فاکتورهای زیست محیطی	میانی	۰/۰۱۵۱۵۳۷۲۴

جدول ۵-۵۱: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی T_{12})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	بالایی	۰/۱۱۴۶۸۳۹۸۵

جدول ۵-۵۲: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی(خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی T_{13})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	بالایی	۰/۰۱۴۴۴۹۹۷۸
G۱۴-۱	برخورد ماشین با آنها	میانی	۰/۰۰۱۱۰۲
G۱۴-۲	عدم وجود اطلاعات دقیق از آنها	میانی	۰/۰۱۳۱۸۸۶

جدول ۵-۵۳: :نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (خسارت وارد بر ساختمان های اطراف T_{14})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	وراد شدن خسارت به ساختمان های اطراف	بالایی	۰/۰۹۴۶۸۰۵۳
G۱۵-۱	عدم اطلاعات کافی در مورد ساختمان ها	میانی	۰/۰۴۵۵۰۷
G۱۵-۲	تغیر مکان در سطح	میانی	۰/۰۲۴۴۱۳۶

جدول ۵-۵۴: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (برخورد با عوارض ناشناخته T_{15})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	برخورد با عوارض نا شناخته	بالایی	۰/۰۳۱۹۰۶۷۰۲
G۱۶-۱	مطالعات ژئوتکنیکی ناکافی	میانی	۰/۰۱۸۰۵۹

جدول ۵-۵۵: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب T_{16})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	عدم جلو گیری سگمنت از ورود آب	بالایی	۰/۰۸۷۷۳۶۵۱۸

جدول ۵-۵۶: نتایج محاسبه احتمال شکست رویدادهای بالایی و میانی (گرفتگی و انسداد دیسک ها T_{17})

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	احتمال شکست رویداد
T	گرفتگی و انسداد دیسک ها	بالایی	۰/۱۲۵۵۷۰۳۴۲
G۱۸-۱	زمین شناسی	میانی	۰/۰۶۹۵۹۹
G۱۸-۲	مدیریتی	میانی	۰/۰۶۰۱۵۸۳

به منظور افزایش ایمنی و جلو گیری از خسارا ت وصدمات جانی و مالی، باید بوسیله اقدامات کنترلی و پیشگیرانه از میزان احتمال وقوع آن کاست. بدین منظور، باید ابتدا میزان احتمال و اهمیت نسبی مجموعه های برش حداقل راتعیین و بر اساس مقدار اهمیت نسبی ، مجموعه های برش حداقل را اولویت بندی کرد. نتایج محاسبات در جدول های ۵-۵۷ تا جدل۵-۷۳ درج شده است. می‌باشند.

جدول ۵-۵۷: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (خرابی در بخش برش دهنده T_1)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
A۱	نوع خاک	۰/۰۲۴۶۵۴۳۶۱	۰/۱۰۲۴۳۵۹۶۶	۵
A۲	سختی	۰/۰۴۹۶۵۱۵۱۵	۰/۲۰۶۲۹۶۱۹۶	۱
A۳	مقدار کوارتز زمین	۰/۰۲۱۳۵۴۰۳۹	۰/۰۸۸۷۲۳۵۱۷	۶
A۴	شرایط ترکیبی زمین	۰/۰۳۵۱۱۹۲۳۸	۰/۱۴۵۹۱۶۲۹۷	۲
B۱	طراحی برش دهنده	۰/۰۱۷۷۴۳۰۳۱	۰/۰۷۳۷۲۰۲۰۴	۷
C۱	تاخیر در تعویض برش دهنده	۰/۰۱۵۶۹۴۷۱۹	۰/۰۶۵۲۰۹۷۰۹	۱۰
C۲	تسلط اپراتور	۰/۰۱۰۷۸۰۴۷۱	۰/۰۴۴۷۹۱۵۸۷	۱۱
A۴	شرایط ترکیبی زمین	۰/۰۳۴۶۱۴۰۳۱	۰/۱۴۳۸۱۷۲۲۲	۳
B۱	طراحی برش دهنده	۰/۰۱۶۶۸۶۴۴۸	۰/۰۶۹۳۳۰۲۲۶	۸
C۲	تسلط اپراتور	۰/۰۲۵۳۵۸۲۳۹	۰/۱۰۵۳۶۰۴۹۶	۴
C۳	مدیریت نرخ باز شدگی	۰/۰۰۳۲۷۷۷۶	۰/۰۱۳۶۱۸۷۰۷	۱۲
C۴	انتخاب نوع برش دهنده	۰/۰۱۶۳۸۷۶۹۷	۰/۰۶۸۰۸۸۹۵۱	۹

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در خطر خرابی در بخش برش دهنده شامل سختی ، شرایط ترکیبی زمین، تسلط اپراتور، نوع خاک، مقدارکوارتز، طراحی برش دهنده، می باشد.

جدول ۵-۵۸: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (توقف دستگاه $(T_2$

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
A۶	تورم زمین	۰/۰۰۷۰۰۴۱	۰/۱۱۲۱۴۶۱۵	۳
A۷	ظرفیت نا کافی تحمل بار زمین	۰/۰۱۱۸۱۷۸۸۹	۰/۱۸۹۲۲۲۱۳۴	۲
A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۲۰۹۸۲۸۵	۰/۰۳۳۵۹۶۶۹۱	۷
A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۰۶۰۳۰۱۵	۰/۰۰۹۶۵۵۱۷۵	۸
A۹	درجه هوازدگی	۰/۰۰۰۴۲۷۲۰۷	۰/۰۰۶۸۴۰۲۲۵	۹
C۵	مانور حرکتی TBM	۰/۰۲۴۱۷۶۴۳۲	۰/۳۸۷۱۰۰۹۵	۱
C۶	خطای حرکت	۰/۰۰۵۴۳۵۷۰۶	۰/۰۸۷۰۳۳۸۰۹	۴
C۷	مونتاژ ضعیف سگمنت	۰/۰۰۴۲۵۲۹۳۱	۰/۰۶۸۰۹۵۸۰۶	۵
C۸	تعویض دیر هنگام برش دهنده	۰/۰۰۳۴۸۰۰۴۷	۰/۰۵۵۷۲۰۷۷۴	۶

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در توقف دستگاه شامل مانور حرکتی TBM ، ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین ، تورم زمین می‌باشند.

جدول ۵-۵۹: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه T_3)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۱۹۸۴۷۰۷	۰/۰۱۴۰۴۴۰۶۶	۱۶
A۱۰	زمین دارای شن و ماسه	۰/۰۱۰۱۴۶۴۰۸	۰/۰۷۱۷۹۷۴۰۹	۵
B۱	طراحی برش دهنده	۰/۰۰۳۴۴۰۵۲۵	۰/۰۲۴۳۴۵۶۳۹	۱۴
C۹	مدیریت ضعیف فشار جبهه کار	۰/۰۰۸۳۶۵۹۷	۰/۰۵۹۱۹۸۷۸	۸
A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۵۸۳۸۳۰۱	۰/۰۴۱۳۱۲۶۳۹	۱۱
A۱۱	نشست سطح زمین	۰/۰۱۱۶۹۲۹۷۵	۰/۰۸۲۷۴۱۱۳۵	۴
C۱۱	مدیریت مقدار حمل و نقل مصالح	۰/۰۰۴۲۹۲۴۷۲	۰/۰۳۰۳۷۴۱۳۵	۱۲
A۱۱	نشست سطح زمین	۰/۰۰۲۷۱۵۳۹۹	۰/۰۱۹۲۱۴۵۴۵	۱۵
C۱۰	مدیریت مقدار حمل و نقل مصالح	۰/۰۰۴۲۴۰۲۵۶	۰/۰۳۰۰۰۴۶۴۷	۱۳
C۱۱	کنترل اندازه ، ابعاد مصالح حفاری	۰/۰۰۹۶۷۲۸۱۴	۰/۰۶۸۴۴۶۱۹۱	۶
C۱۲	حمل غیر قابل کنترل	۰/۰۰۶۰۱۸۸۳۹	۰/۰۴۲۵۹۰۱۵۱	۱۰
A۱۲	آب زیر زمینی	۰/۰۱۹۱۶۳۵۳۱	۰/۱۳۵۶۰۳۸۳۹	۲
B۳	انتخاب TBM	۰/۰۲۹۷۰۹۷۱۴	۰/۲۱۰۲۳۰۱۱۲	۱
C۱۲	حمل غیر قابل کنترل	۰/۰۰۶۱۶۶۷۱۲	۰/۰۴۳۶۳۶۵۲۱	۹
C۱۱	کنترل اندازه ، ابعاد مصالح حفاری	۰/۰۰۹۳۲۷۱۷۵	۰/۰۶۶۰۰۰۴۰۱	۷
C۱۳	فرایند حمل مصالح	۰/۰۱۸۴۴۸۵۲۷	۰/۱۳۰۵۴۴۳۷	۳

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی

مکانیزه در ریسک مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه عبارتند ازانتخاب TBM ، آب های زیر زمینی، فرایند حمل و نقل مصالح به خارج ، نشست سطح زمین، زمین های دارای شن و ماسه، کنترل اندازه و ابعاد مصالح حفاری و مدیریت ضعیف فشار جبهه کار می باشد.

جدول ۵-۶۰: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(خرابی سگمنت $T_۴$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	امتیاز نسبی	رتبه
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار	۰/۰۱۲۲۹۶۶۴	۰/۱۵۹۲۸۱۴۹۴	۱
B۴	انواع روشهای نصب حلقه سگمنت	۰/۰۰۶۷۱۵۴۷۵	۰/۰۸۶۹۸۷۲۵	۸
C۱۴	منحنی شعاعی فشرده	۰/۰۰۸۱۳۶۳۵۱	۰/۱۰۵۳۹۲۲۱۷	۶
C۱۵	دوغاب ناکافی	۰/۰۰۲۷۸۱۴۸۴	۰/۰۳۶۰۲۹۲۶۷	۱۰
C۱۶	نصب نامناسب سگمنت اصلی	۰/۰۰۹۵۸۴۱۲۲	۰/۱۲۴۱۴۵۵۶۱	۳
A۱۲	آب زیر زمینی	۰/۰۰۶۹۷۲۶۳۹	۰/۰۹۰۳۱۸۳۶	۷
B۴	انواع روشهای نصب حلقه سگمنت	۰/۰۰۴۴۸۲۸۱۸	۰/۰۵۸۰۶۷۰۷۸	۹
B۵	انتخاب واشر آب بند	۰/۰۱۰۴۸۳۱۲۱	۰/۱۳۵۷۹۰۵۲۳	۲
C۱۵	دوغاب ناکافی	۰/۰۰۸۲۲۶۸۵۶	۰/۱۰۶۵۶۴۵۵۱	۵
C۱۶	نصب نامناسب سگمنت اصلی	۰/۰۰۹۳۴۲۵۰۳	۰/۱۲۱۰۱۵۸۰۹	۴
C۱۷	قطع کردن یا فاصله دادن اتصالات سگمنت	۰/۰۰۰۹۷۰۷۳۹	۰/۰۱۲۵۷۴۲۲۸	۱۱

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک خرابی سگمنت شامل ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین، انتخاب واشر آب بند، نصب نامناسب سگمنت، دوغاب و مواد پرکنند ناکافی می باشد.

جدول ۵-۶۱: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(سایش کاتر ها $T_۵$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
B۷	تعداد دیسک ها	۰/۰۱۸۸۱۰۴۸۳	۰/۰۹۲۱۰۲۳۰۹	۷
B۸	زاویه قرار گیری دیسک ها	۰/۰۲۷۲۸۱۹۱۷	۰/۱۳۳۵۸۱۲۳۵	۱
B۹	موقعیت دیسک ها	۰/۰۰۷۸۹۹۶۷۹	۰/۰۳۸۶۷۹۴۲۶	۱۱
B۱۰	فاصله دیسک ها	۰/۰۰۹۲۸۵۷۷	۰/۰۴۵۴۶۶۱۸۳	۱۰
B۱۱	توزیع غیر یکنواخت دیسک ها	۰/۰۲۳۸۰۰۰۳۲	۰/۱۱۶۵۳۲۷۸۲	۳
B۱۲	سرعت چرخش	۰/۰۱۹۸۲۰۶۴۴	۰/۰۹۷۰۴۸۳۹	۵
B۶	بهسازی خاک(استفاده از مواد افزودنی)	۰/۰۲۰۲۴۶۴۹۶	۰/۰۹۹۱۳۳۵۰۱	۴
B۲۲	جنس کاتر	۰/۰۱۸۹۳۷۱۰۳	۰/۰۹۲۷۲۲۲۸۲	۶
B۲	نیروی اعمال شده بیش از حد	۰/۰۲۶۸۳۶۰۸۴	۰/۱۳۱۳۹۸۲۹	۲
A۱	نوع و خواص خاک	۰/۰۰۴۹۹۰۱۱	۰/۰۲۴۴۳۳۲۱۹	۱۵
A۳	مقدار کوارتز	۰/۰۰۶۷۳۶۶۷۹	۰/۰۳۲۹۸۴۹۹۵	۱۳
A۱۳	ناپیوستگی سینه کار	۰/۰۰۱۶۲۸۱۳۶	۰/۰۰۷۹۷۱۸۸۹	۱۷
A۱۴	اندازه دانه	۰/۰۰۷۱۱۷۹۳۲	۰/۰۳۴۸۵۱۷۳۵	۱۲
A۱۵	جهت گیری دانه	۰/۰۰۲۶۰۱۰۳۹	۰/۰۱۲۷۳۵۵۴۲	۱۶

A۱۶	چسبندگی خاک	۰/۰۰۶۵۳۰۱۵۱	۰/۰۳۱۹۷۳۷۶۶	۱۴
A۱۷	شکستگی	۰/۰۰۹۸۸۳۸۳۹	۰/۰۴۸۳۹۴۵۲۵	۹
A۱۸	وجود کانی های ساینده	۰/۰۱۳۹۳۴۷۵۳	۰/۰۶۸۲۲۹۱۳۲	۸

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک سایش کاتر ها شامل زاویه قرار گیری دیسک ها، نیروی اعمال شده بیش از حد، توزیع یکنواخت دیسک ها، بهسازی خاک (استفاده از مواد افزودنی)، سرعت چرخش، جنس کاتر و تعداد دیسک ها می‌باشند.

جدول ۵-۶۲: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(گیر کردن TBM، $T_۶$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
A۱۲	وجود آب زیر زمینی	۰/۰۰۴۵۸۳۳۲۹	۰/۰۳۹۶۰۳۲۴۳	۹
D۲	آسیب به سگمنت	۰/۰۰۱۴۹۳۷۶۶	۰/۰۱۲۹۰۷۲۰۷	۱۱
D۳	ریزش سنگ های خرد شده	۰/۰۰۱۱۶۴۵۷	۰/۰۱۰۰۶۲۷۱۸	۱۲
D۴	ریزش بلوک های سنگین	۰/۰۰۰۶۹۸۷۰۶	۰/۰۰۶۰۳۷۳۲	۱۴
B۲	گشتاور و نیروی رانش	۰/۰۲۱۵۲۶۷۶	۰/۱۸۶۰۰۶۶۱۲	۲
B۱۲	سرعت چرخش	۰/۰۱۲۷۵۴۹۲۹	۰/۱۱۰۲۱۱۷۱۴	۴
B۱۳	کاهش گشتاور درنوار نقاله پیچ	۰/۰۱۰۲۴۶۵۲	۰/۰۸۸۵۳۷۲۶۶	۶
C۲۱	عدم بهسازی خاک	۰/۰۱۵۶۸۷۱۲۸	۰/۱۳۵۵۴۸۰۱۲	۳
C۲۲	عدم بهسازی خاک در نوار نقاله پیچ	۰/۰۰۴۰۴۸۱۰۷	۰/۰۳۴۹۷۸۵۴۱	۱۰
C۲۳	عدم بهسازی خاک در جبهه کار	۰/۰۲۴۲۹۹۸۶۲	۰/۲۰۹۹۶۸۱۹۷	۱
C۲۴	عدم بهسازی خاک در محفظه	۰/۰۱۰۳۶۸۸۱۹	۰/۰۸۹۵۹۴۰۱۶	۵
A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۰۷۱۴۰۶۶	۰/۰۰۶۱۷۰۰۴۱	۱۳
A۲۱	کاهش اصطکاک داخلی بین ذرات خاک	۰/۰۰۴۶۶۸۰۹۷	۰/۰۴۰۳۳۵۶۹۹	۸
C۲۰	زمین نرم و سست	۰/۰۰۶۹۸۹۹۳۱	۰/۰۶۰۳۹۸۰۰۶	۷

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک گیر کردنTBM، شامل عدم بهسازی خاک در جبهه کار، گشتاور و نیروی رانش، عدم بهسازی خاک، سرعت چرخش، عدم بهسازی خاک در محفظه، کاهش گشتاور نوار نقاله پیچ(اسکرول) ، زمین نرم و سست، کاهش اصطکاک داخلی بین ذرات خاک می باشد.

جدول ۵-۶۳: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(آب گرفتگی کف یا چکه کردن سقف $T_۷$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
C۲۵	اجرای نادرست سیستم زهکشی	۰/۰۰۲۳۴۹۱	۰/۰۶۹۹۸۷۳۹۴	۵
E۷	آسیب دیدگی عایق	۰/۰۰۴۲۹۶۰۵۴	۰/۱۲۷۹۹۳۵۳۹	۳
B۱۵	عدم طراحی مناسب با توجه به نوع و محل خاک	۰/۰۰۱۴۲۱۰۰۷	۰/۰۴۲۳۳۶۴۵۹	۷
C۱۶	اجرای نامناسب	۰/۰۰۸۷۷۱۸۳۴	۰/۲۶۱۳۴۱۷۰۶	۲

A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۰۲۱۳۴۵۶	۰/۰۰۶۳۵۹۵۵۴	۹
A۱۲	برخورد با لایه های آبدار	۰/۰۱۱۱۸۳۷۱۶	۰/۳۳۳۱۹۹۵۸۱	۱
A۲۲	برخورد با قنات	۰/۰۰۳۵۹۱۸۸۴	۰/۱۰۷۰۱۴۰۰۵	۴
C۲۵	برخورد با فاضلاب منازل	۰/۰۰۰۷۰۶۰۱۳	۰/۰۲۱۰۳۴۴۴۳	۸
B۴	اجرای نادرست سیستم زهکشی	۰/۰۰۱۴۸۵۰۸۵	۰/۰۴۴۲۴۵۵۵۳	۶

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک آب گرفتگی کف یا چکه کردن سقف شامل برخورد با لایه های آبدار، اجرای نا مناسب، آسیب دیدگی عایق، برخورد با قنوات، اجرای نادرست سیستم زهکشی می باشد.

جدول ۵-۶۴: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(انحراف از مسیر $T_۸$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
C۲۶	جابجایی دوربین های دستگاه	۰/۰۵۸۸۹۸۶۳۲	۰/۳۳۰۴۴۵۶۴۶	۲
C۲۷	کارشکنی	۰/۰۰۰۵۷۰۰۷	۰/۰۰۳۱۹۸۳۲۸	۶
C۲۸	خطای اپراتور	۰/۰۰۴۳۷۷۱۶	۰/۰۲۴۵۵۷۶۷۵	۵
D۶	نقص تجهیزات	۰/۰۲۰۷۹۸۰۷۸	۰/۱۱۶۶۸۵۸۰۶	۳
A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۰۰۶۸۳	۰/۰۰۰۳۸۳۱۹۱	۷
C۵۲	محاسبات اشتباه	۰/۰۰۵۶۹۵۳۰۲	۰/۰۳۱۹۵۲۹۹۶	۴
D۵	تصمیم گیری جهت تغیر مسیر (برخورد با مواضع و تاسیسات شهری)	۰/۰۹۸۳۲۳۵۴۷	۰/۵۵۱۶۳۵۶۹۹	۱

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک انحراف از مسیر شامل تصمیم گیری جهت تغیرمسیر(برخورد به مواضع و تاسیسات شهری)، جابجایی دوربین های دستگاه، نقص تجهیزات، محاسبات اشتباه و خطای اپراتور می باشد.

جدول ۵-۶۵: جدول ۵-۶۹ : احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(مشکلات مکانیکیTBM ، $T_۹$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
C۳۰	ضعف فنی در تعمیر و نگهداری	۰/۰۰۶۵۷۰۷۷۶	۰/۰۷۷۴۷۷۳۰۷	۵
D۷	فرسوده بودن ماشین آلات	۰/۰۱۴۰۱۴۰۹۹	۰/۱۶۵۲۴۲۹۸۶	۳
E۱	عدم تامین بودجه کافی	۰/۰۲۴۸۷۲۴۶۲	۰/۲۹۳۲۷۶۰۷۱	۱
C۲۳	ناپایداری جبهه کار	۰/۰۰۲۲۱۳۵۳۶	۰/۰۲۶۱۰۰۲۳۶	۷
C۲۴	عدم تطبیق شرایط موجود در انجام پروژه با تجهیزات خاص	۰/۰۰۵۵۵۰۰۶	۰/۰۶۵۴۴۱۸۴۴	۶
C۲۸	خطای اپراتور	۰/۰۰۹۹۲۱۸۷	۰/۱۱۶۹۹۰۷۱۲	۴
C۲۹	عدم تامین قطعات	۰/۰۲۴۶۶۷۱۱۳	۰/۲۹۰۸۵۴۷۶	۲

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی

مکانیزه در ریسک مشکلات مکانیکیTBM شامل عدم تامین بودجه کافی ، عدم تامین قطعات، فرسوده بودن ماشین آلات، خطای اپراتور و ضعف فنی در تعمیر و نگه داری می‌باشند.

جدول ۵-۶۶: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل(حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی T_{10})

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
B۱۵	ساخت نادرست سگمنت	۰/۰۰۷۵۳۵۸۱	۰/۲۸۴۸۴۱۰۹	۲
C۸	اجرای نادرست عملیات تزریق	۰/۰۰۶۲۳۵۹۶۸	۰/۲۳۵۷۰۹۲۲۳	۳
C۹	کمبود فشار جبهه کار	۰/۰۰۱۶۰۹۲۷۱	۰/۰۶۰۸۲۷۷۶۸	۴
C۱۶	نصب نادرست سگمنت	۰/۰۱۰۹۴۱۶۹۶	۰/۴۱۳۵۷۷۹۱۹	۱
C۳۱	هدایت نادرست دستگاه	۰/۰۰۰۳۷۹۹۷۶	۰/۰۱۴۳۶۲۴۶۱	۵

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک حفاری مکانیزه راهبردی و نصب پوشش بتنی شامل نصب نادرست سگمنت، ساخت نادرست سگمنت می باشد.

جدول ۵-۶۷: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM ، T_{11})

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
B۲	گشتاور عملیاتی پایین	۰/۰۰۸۳۳۷۷۸۲	۰/۰۴۰۶۸۲۷۶۸	۷
B۱۸	وزن نامناسب دستگاه	۰/۰۰۰۲۷۱۶۷۵	۰/۰۰۱۳۲۵۵۹۱	۱۹
B۱۹	ناتوانی در تامین نیروی رانش مورد نیاز	۰/۰۰۲۳۰۳۰۴۷	۰/۰۱۱۲۳۷۳۲	۱۳
B۲۰	قدرت ناکافی ماشین	۰/۰۰۰۲۹۵۷۳۹	۰/۰۰۱۴۴۳۰۰۷	۱۸
B۲۱	قطر نامناسب دیسک ها	۰/۰۰۰۳۲۸۳۰۶	۰/۰۰۱۶۰۱۹۱۲	۱۷
C۵۱	سرعت کم دستگاه	۰/۰۰۱۰۷۵۹۷۴	۰/۰۰۵۲۵۰۰۲۹	۱۵
C۳۴	کمبود نیروی انسانی ماهر در زمینه مدیریت	۰/۰۱۵۴۷۵۴۵۷	۰/۰۷۵۵۰۹۸۲۱	۶
C۳۵	مدیریت ضعیف TBM	۰/۰۲۳۵۶۳۲۰۸	۰/۱۱۴۹۷۲۶۰۶	۵
C۳۸	حمایت کافی از عوامل اداری	۰/۰۰۲۲۷۲۸۳۱	۰/۰۱۱۰۸۹۸۸۷	۱۴
A۱	خواص و نوع خاک	۰/۰۲۷۰۳۱۰۵۷	۰/۱۳۱۸۹۳۳۷۷	۳
A۴	شرایط ترکیبی زمین	۰/۰۲۹۲۴۹۲۷۷	۰/۱۴۲۷۱۶۷۹۹	۲
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	۰/۰۰۲۵۳۱۲۴۱	۰/۰۱۲۳۵۰۷۵۴	۱۲
A۸	گسل و زون های خرد شده	۰/۰۰۰۶۲۵۳۵۹	۰/۰۰۳۰۵۱۳۳۱	۱۶
A۱۲	وجود آب های زیر زمینی	۰/۰۲۶۷۸۶۸۶۴	۰/۱۳۰۷۰۱۸۸	۴
B۱۷	قطر تونل	۰/۰۰۳۴۱۰۷۳۲	۰/۰۱۶۶۴۲۰۷۸	۱۱
B۲۳	پروفایل مسیر تونل	۰/۰۶۶۵۰۰۲۷۶	۰/۳۲۴۴۷۶۶۱۹	۱
C۳۲	محدودیت های اعمال شده توسط مقررات محلی	۰/۰۰۴۴۹۲۷۵۵	۰/۰۲۱۹۲۱۶۲۳	۱۰
C۳۳	محدودیت های ساعت کار	۰/۰۰۵۴۹۶۸۹۸	۰/۰۲۶۸۲۱۱۶۵	۹
E۲	کمبود کارگر	۰/۰۰۵۲۴۰۹۹۳	۰/۰۲۵۵۷۲۵۲۱	۸

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک پیشروی کم در طول ساخت با استفاده از TBM شامل پارامترهایی مانند پروفایل مسیر تونل، شرایط ترکیبی زمین، خواص و نوع خاک، وجود آب های زیر زمینی، مدیریت ضعیف TBM و کمبود نیروی انسانی ماهر در زمینه مدیریت می باشد.

جدول ۵-۶۸: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی $T_{۱۲}$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
C۲۹	عدم تامین قطعات	۰/۰۴۰۱۸۲۶۸۴	۰/۳۵۰۳۷۷۴۶۶	۲
C۳۷	عدم وجود افراد با تخصص کافی	۰/۰۱۶۶۷۰۷۷۵	۰/۱۴۵۳۶۲۷۱۱	۳
C۳۸	عدم شناخت دقیق فنی پیمانکار از نیازهای کارگاه	۰/۰۱۳۸۴۰۷۷۳	۰/۱۲۰۶۸۶۱۸۸	۴
E۱	عدم تامین اعتبار لازم	۰/۰۴۰۵۲۴۱۹	۰/۳۵۳۳۵۵۲۶۶	۱
E۳	تحریم ها	۰/۰۰۶۰۰۶۰۶۱	۰/۰۵۲۳۷۰۵۲۹	۵
E۴	تغییر در مالیات و عوارض گمرکی	۰/۰۰۲۶۵۳۶۹۲	۰/۰۲۳۱۳۹۱۶۸	۶

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک پشتیبانی ناکافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی شامل مواردی چون عدم تامین اعتبار لازم، عدم تامین قطعات،عدم وجود افراد با تخصص کافی و عدم شناخت دقیق پیمانکار از نیازهای کارگاه می باشد.

جدول ۵-۶۹: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی $T_{۱۳}$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
C۴۳	عدم شناخت چاه های جذبی فاضلاب	۰/۰۱۲۲۶۴۵۶	۰/۱۲۹۵۳۶۲۴۲	۵
C۴۴	عدم وجود اطلاعات سازه ای	۰/۰۱۵۰۴۰۶۱۴	۰/۱۵۸۸۵۶۴۶۲	۴
D۱۱	استاندارد نبودن این ساختمان ها	۰/۰۱۸۸۹۸۷۹۸	۰/۱۹۹۶۰۵۹۵۹	۱
C۴۲	عدم اطلاعات ژئوتکنیکی	۰/۰۱۸۷۶۹۰۷۷	۰/۱۹۸۲۳۵۸۶۸	۲
D۱۰	آسیب به سقف یا دیوارهای تونل	۰/۰۰۹۱۸۵۹۶۷	۰/۰۹۷۰۲۰۶۵۵	۶
C۱۶	سگمنت گذاری نا مناسب به دلیل سرعت در کار	۰/۰۰۸۵۲۶۷۲۹	۰/۰۹۰۰۵۷۸۹۳	۷
D۱۲	عدم رعایت صحیح جزئیات اجرایی	۰/۰۱۶۰۲۳۴۸۱	۰/۱۶۹۲۳۷۳۴	۳

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی شامل ناقص بودن اطلاعات دریافتی از سوی مراجع، گذشت زمان و نبود سابقه، سوء مدیریت و خطای اپراتور می باشد.

جدول ۵-۷۰: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (خسارت وارد بر ساختمان های اطراف $T_{۱۴}$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
C۴۳	عدم شناخت چاه های جذبی فاضلاب	۰/۰۱۲۲۶۴۵۶	۰/۱۲۹۵۳۶۲۴۲	۵
C۴۴	عدم وجود اطلاعات سازه ای	۰/۰۱۵۰۴۰۶۱۴	۰/۱۵۸۸۵۶۴۶۲	۴
D۱۱	استاندارد نبودن این ساختمان ها	۰/۰۱۸۸۹۸۷۹۸	۰/۱۹۹۶۰۵۹۵۹	۱
C۴۲	عدم اطلاعات ژئوتکنیکی	۰/۰۱۸۷۶۹۰۷۷	۰/۱۹۸۲۳۵۸۶۸	۲
D۱۰	آسیب به سقف یا دیوارهای تونل	۰/۰۰۹۱۸۵۹۶۷	۰/۰۹۷۰۲۰۶۵۵	۶
C۱۶	سگمنت گذاری نا مناسب به دلیل سرعت در کار	۰/۰۰۸۵۲۶۷۲۹	۰/۰۹۰۰۵۷۸۹۳	۷
D۱۲	عدم رعایت صحیح جزئیات اجرایی	۰/۰۱۶۰۲۳۴۸۱	۰/۱۶۹۲۳۷۳۴	۳

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک خسارت وارد بر ساختمان های اطراف شامل استاندارد نبودن این ساختمان ها، عدم اطلاعات ژئوتکنیکی،عدم رعایت صحیح جزئیات اجرایی و عدم وجود اطلاعات سازه ای می باشد.

جدول ۵-۷۱: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (برخورد با عوارض ناشناخته $T_{۱۵}$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
A۲۵	تغییرات ژئوتکنیکی غیر قابل پیش بینی	۰/۰۱۳۹۵۷۱۹۶	۰/۴۳۷۴۳۷۷۵۲	۱
C۴۵	برخورد با لایه های باستانی	۰/۰۰۰۱۴۷۲۳۶	۰/۰۰۴۶۱۴۵۷۹	۶
C۳۹	سوء مدیریت	۰/۰۰۴۵۶۹۳۹۹	۰/۱۴۳۲۱۱۲۶	۴
C۴۶	کمبود زمان	۰/۰۰۶۴۰۴۸۸۱	۰/۲۰۰۷۳۷۷۹۵	۲
C۴۷	عدم امکان مطالعات استراتژیک	۰/۰۰۱۶۵۵۵۷۴	۰/۰۵۱۸۸۷۹۷	۵
E۵	کمبود اعتبار	۰/۰۰۵۵۴۶۶۱۵	۰/۱۷۳۸۳۸۵۵۶	۳

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک برخورد با عوارض ناشناخته شامل تغییرات ژئوتکنیکی غیر قابل پیش بینی، کمبود زمان و کمبود اعتبار وسوء مدیریت می باشد.

جدول ۵-۷۲: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب $T_{۱۶}$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
A۷	ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین	۰/۰۰۰۹۶۰۶۳۷	۰/۰۱۰۹۴۹۱۱۲	۶
C۲۰	خرابی سگمنت	۰/۰۰۸۱۲۴۲۳۱	۰/۰۹۲۵۹۸۰۵۶	۳
C۴۸	کیفیت پایین تولید	۰/۰۰۵۷۶۸۸۲۲	۰/۰۶۵۷۵۱۶۶۳	۵
D۱۳	شکستن قسمت های دیگر	۰/۰۱۴۸۴۴۲۱۹	۰/۱۶۹۱۹۰۸۸۴	۲
D۱۴	عدم توانایی مهر موم	۰/۰۰۸۰۱۵۳۸۷	۰/۰۹۱۳۵۷۴۷۸	۴
E۶	آب بندی نامناسب	۰/۰۵۲۴۹۱۳۴۵	۰/۵۹۸۲۸۳۸۸۷	۱

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب شامل آب بندی نامناسب، شکستن قسمت های سگمنت، خرابی سگمنت و عدم توانایی مهر و موم می باشد.

جدول ۵-۷۳: احتمال شکست ، میزان اهمیت نسبی و رده بندی مجموعه های برش حداقل (گرفتگی و انسداد دیسک ها $T_{۱۷}$)

رویداد	نام رویداد	احتمال شکست	اهمیت نسبی	رتبه
A۴	شرایط زمین شناسی ترکیبی	۰/۰۲۵۵۱۴۶۹۷	۰/۲۰۳۱۹۰۴۷۲	۳
A۲۱	چسبندگی خاک رس	۰/۰۴۱۶۷۷۴۹۵	۰/۳۳۱۹۰۵۵۶۳	۱
A۲۲	اصطکاک با مواد	۰/۰۰۳۷۱۵۷۵۱	۰/۰۲۹۵۹۰۹۹۲	۶
B۲	نیروی رانش	۰/۰۰۹۴۴۶۷۲۷	۰/۰۷۵۲۳۰۵۵۹	۵
C۴۹	عدم استفاده از مواد افزودنی	۰/۰۲۴۱۸۰۶۷۹	۰/۱۹۲۵۶۶۸۰۱	۴
C۵۰	مواد افزودنی نامناسب	۰/۰۲۷۶۸۳۹۴۵	۰/۲۲۰۴۶۵۶۳۴	۲

بر اساس محاسبات انجام شده، بحرانی ترین مجموعه های برش حداقل در ریسک های تونل سازی مکانیزه در ریسک گرفتگی و انسداد دیسک ها شامل چسبندگی خاک رس، مواد افزودنی نامناسب، شرایط ترکیبی زمین و عدم استفاده از مواد افزودنی نا مناسب می باشد.

با توجه به محاسبات انجام شده، میزان احتمال ریسک تونل سازی مکانیزه و همچنین رویداد های میانی آن بدست آمد.برای انجام اقداما ت کنترلی و پیشگیرانه ابتدا باید ریسک ها را اولویت بندی کرده و بعد از تعیین ریسک های بحرانی ، اقدامات لازم جهت پاسخ به ریسک ها را انجام داد.

اکنون با توجه به محاسبات انجام شده و مقادیر احتمال بدست آمده، میتوان نتیجه گرفت که ریسک های تونل سازی مکانیزه بر اساس احتمال رویداد آن ها به ترتیب از زیاد به کم عبارتند از:

خرابی در بخش برش دهنده، پیشروی کم در طول ساخت تونل با استفاده از TBM، سایش دیسک

ها، انحراف از مسیر، مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه، گرفتگی و انسداد دیسک ها، گیر کردن TBM، عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی، وارد شدن خسارت به ساختمان های اطراف، عدم جلو گیری سگمنت از ورود آب، مشکلات مکانیکی TBM، خرابی سگمنت، توقف دستگاه، آب گرفتگی کف یا چکه کردن سقف، برخورد با عوارض نا شناخته، حفاری مکانیزه و راهبردی دستگاه و نصب پوشش بتنی، خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی و برخورد با سنگ های مچاله شونده . از آنجا که هدف ما تشکیل ماتریس ریسک است ، بنابراین نیاز است تا ۱۷ رویداد نهایی بوجود آورنده ریسک تونل سازی مکانیزه را کلاس بندی شوند. بدین منظور از نحوه دسته بندی احتمال رخدا توسط هیان و همکارانش مطابق با جدول۵-۷۴ استفاده شده است [۴۳].

جدول ۵-۷۴: رتبه بندی احتمال وقوع ریسک(هیان و همکاران ۲۰۱۵)

احتمال	سطح احتمال	رتبه احتمال
بالای ٪۲۰	بسیار محتمل	۵
٪(۲۰_۱۲,۱)	محتمل	۴
٪(۱۲_۷,۱)	ممکن	۳
٪(۷_۳)	نامحتمل	۲
زیر ٪۲,۹۹	بسیار نامحتمل	۱

اکنون لازم است تا با استفاده از احتمالات بدست آمده برای ۱۷ رویداد با توجه به رتبه بندی احتمال وقوع ریسک در جدول ۵-۷۴ ، طبقه بندی احتمالاتی برای پارامترها صورت پذیرد.

در جدول ۵-۷۵ رتبه بندی ۱۷ ریسک بوجود آورنده خطر در تونل سازی مکانیزه خط ۳ مترو مشهد آورده شده است.

جدول ۵-۷۵: رتبه بندی احتمال ریسک های موثر در تونل سازی مکانیزه

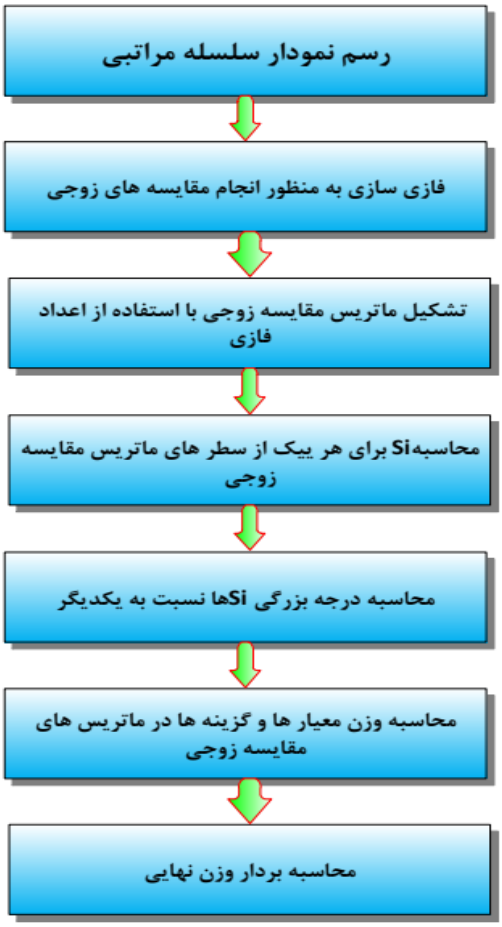
نماد رویداد	نام رویداد	احتمال رویداد	رتبه احتمال رویداد
T۱	خرابی در بخش برش دهنده	۲۴/۰۷	۵
T۲	توقف دستگاه	۶/۲۵	۲
T۳	مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	۱۴/۱۳	۴
T۴	خرابی سگمنت	۷/۷۲	۳
T۵	سایش کاتر ها	۲۰/۴۲	۵

T۶	گیر کردن TBM	۱۱/۶	۳
T۷	آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	۳/۳۶	۲
T۸	انحراف از مسیر	۱۷/۸۲	۴
T۹	مشکلات مکانیکی TBM	۸/۵	۳
T۱۰	حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصب پوشش بتنی	۲/۶۵	۱
T۱۱	پیشروی کم در طول ساخت تونل باTBM	۲۰/۴۹	۵
T۱۲	عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	۱۱/۴۷	۳
T۱۳	خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	۱/۴۴	۱
T۱۴	وارد شدن خسارت به ساختماهای اطراف	۹/۴۷	۳
T۱۵	برخورد با عوارض ناشناخته	۳/۱۹	۲
T۱۶	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	۸/۷۷	۳
T۱۷	گرفتگی و انسداد دیسک ها	۱۲/۵۶	۴

۵-۳- تجزیه و تحلیل پیامد های ریسک تونل سازی مکانیزه به روش سلسله مراتبی فازی

۵-۳-۱- روش تعیین پیامد رویدادهای نهایی و میانی

در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، پس از تهیه نمودار سلسله مراتبی از کارشناسان خواسته می شود تا عناصر هر سطر را با یکدیگر مقایسه کنند و اهمیت نسبی عناصر را با استفاده از اعدا فازی بیان کنند[۷]. مراحل انجام این روش در شکل۵-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳: مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به روش چانگ [۷]

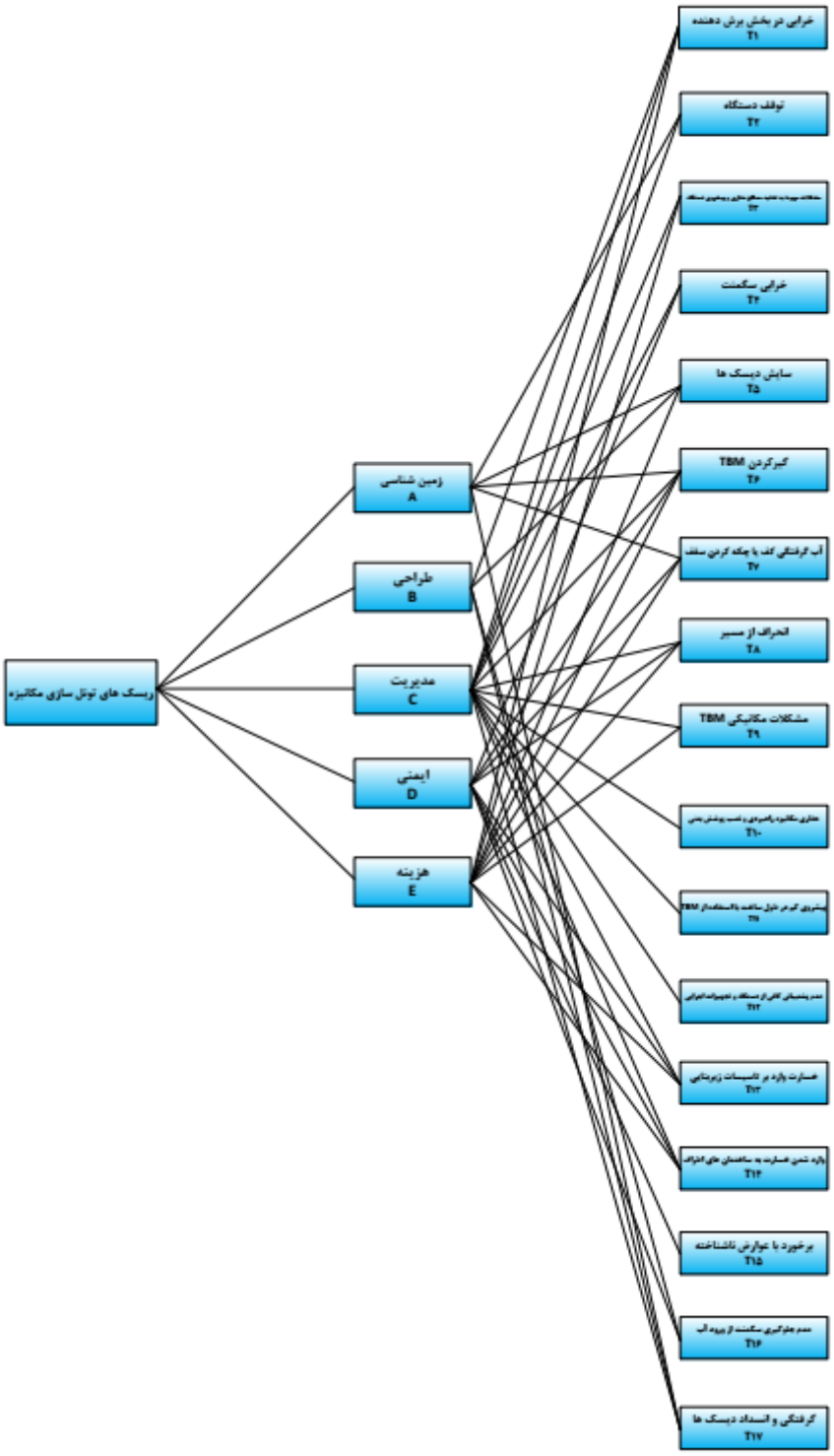
۵-۳-۲- رسم نمودار سلسله مراتبی

همانطور که در شکل ۵-۱۵ نمایش داده شده است، یک ساختار اساسی سلسله مراتبیAHP به صورت یک هدف در بالا، به دنبال آن گزینه ها و معیار ها در پایین هستند.پس از شناسایی ۱۷ ریسک اصلی و زمینه ساز ریسک تونل سازی مکانیزه، از طریق ارسال پرسشنامه به ۷ نفر از کارشناسان و متخصصان در امر تونل سازی از آن ها خواسته شد تا ارزیابی میزان شدت و پیامد هر یک از ریسک ها را انجام دهند. بدین منظور پیامدهای مربوط به هر ریسک در ۵ گروه پیامد زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه بررسی شد تا بدین صورت بتوان شناسایی و واکنش بهتری جهت برخورد با این ریسک ها انجام داد.نمونه ی از فرم نظر سنجی در باره شدت پیامد در ادامه نشان داده شده است.

پارامتر طراحی

معیار i	ترجیح معیار i برمعیار j									شدت پیامد یکسان	ترجیح معیار j بر معیار i									معیار j
خرابی در بخش برش دهنده	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	سایش کاتر
خرابی در بخش برش دهنده	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب
خرابی در بخش برش دهنده	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گرفتگی و انسداد دیسک
خرابی در بخش برش دهنده	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	طراحی TBM
سایش کاتر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب
سایش کاتر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گرفتگی و انسداد دیسک
سایش کاتر	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	طراحی TBM
عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	گرفتگی و انسداد دیسک
عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	طراحی TBM
گرفتگی و انسداد دیسک	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	طراحی TBM

شکل ۵-۱۴: فرم نظر سنجی ارسال شده برای متخصصان جهت برآورد شدت پیامد

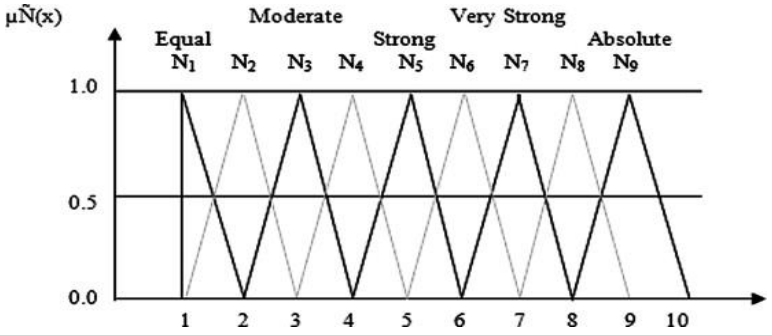


شکل ۵-۱۵: ساختار سلسله مراتبی پیامد ریسک های تونل سازی مکانیزه

۵-۳-۳- فازی سازی نظر کارشناسان به منظور انجام مقایسه های زوجی

پس از دریافت پرسشنامه از کارشناسان با استفاده از اعداد و روابط مربوط به فازی سازی مثلثی

درایه های ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می شود. نمومه پرسشنامه در ضمیمه ۱ انتهای مطالعه حاضر موجود است.در جدول۵-۷۶ نمونه ای از اعداد فازی مثلثی تعریف شده است و توابع عضویت آنها درج شده اند. درشکل ۵-۱۶ نیز تابع عضویت فازی برای متغیرهای زبانی نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶: تابع عضویت فازی برای متغیر های زبانی

جدول ۵-۷۶: نمونه ای از اعدا فازی مثلثی در روش سلسله مراتبی فازی

عدد فازی	تعریف	مقیاس فازی مثلثی	دامنه	تابع عضویت
۹	اهمیت مطلق	(۷،۹،۹)	۷≤ X ≤۹	$\frac{x-۷}{۹-۷}$
۷	اهمیت خیلی قوی	(۵،۷،۹)	۷≤ X ≤۹	$\frac{۹-x}{۹-۷}$
			۵≤ X ≤۷	$\frac{x-۵}{۷-۵}$
۵	اهمیت قوی	(۳،۵،۷)	۵≤ X ≤۷	$\frac{۷-x}{۷-۵}$
			۳≤ X ≤۵	$\frac{x-۳}{۵-۳}$
۳	اهمیت ضعیف	(۱،۳،۵)	۳≤ X ≤۵	$\frac{۵-x}{۵-۳}$
			۱≤ X ≤۳	$\frac{x-۱}{۳-۱}$
۱	اهمیت یکسان	(۱،۱،۳)	۱≤ X ≤۳	$\frac{۳-x}{۳-۱}$
۱	دقیقا مساوی	(۱،۱،۱)	-	-

۵-۳-۴- تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با استفاده از اعدا فازی

همانطور که در قسمت قبل گفته شد ، این ماتریس به صورت رابطه ۴-۹ خواهد بود. اما به دلیل اینکه کمیته تصمیم گیرنده دارای چندین تصمیم گیرنده می باشد ، برخلاف ماتریس رابطه ۴-۹ درایه های ماتریس مقایسه زوجی جامع، یک عدد فازی مثلثی است که مولفه اول آن حداقل نظر سنجی هاست، مولفه دوم آن میانگین عدد نظرسنجی هاست و مولفه سوم آن حداکثر عدد نظر سنجی هاست

[۷]. نمونه ماتریس مقایسه زوجی برای پارامترهای زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه در جدول ۵-۷۷نشان داده شده است.

ماتریس مقایسه زوجی به صورت زیر خواهد بود:

جدول ۵-۷۷: مقایسه زوجی پیامد های زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه با بکارگیری اعدا فازی

معیارها	زمین شناسی	طراحی	مدیریت	ایمنی	هزینه
زمین شناسی	(۱،۱،۱)	(۰/۵،۳/۸۷۵،۶)	(۰/۲ ، ۴/۰۵، ۷)	(۲ ، ۵/۷۵، ۹)	(۰/۱۲۵۰،۲/۷۸۱،۶)
طراحی	(۰/۱۶۶۷،۰/۶۵۴۲،۲)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۶۶۷،۲/۷۹۱۷،۵)	(۰/۱۲۵،۲/۰۷۲۹،۶)	(۰/۱۲۵،۰/۶۵۶۳،۶)
مدیریت	(۰/۱۴۲۹،۱/۴۱۰۷،۵)	(۰/۲،۱/۷۱۶۷،۶)	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵،۲/۸۱۲۵،۶)	(۰/۱۶۶۷ ،۲/۵ ، ۹)
ایمنی	(۰/۱۱۱۱،۰/۲۳۶۱،۰/۵)	(۰/۱۶۶۷،۳/۶۶۶۷،۸)	(۰/۱۶۶۷ ،۱/۲۵، ۴)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۲۵،۴/۱۵۶۳،۸)
هزینه	(۰/۱۶۶۷،۲/۲۵،۸)	(۰/۱۶۶۷،۲/۹۱۶۷،۸)	(۰/۱۱۱۱،۲/۷۷۷۸،۶)	(۰/۱۲۵،۲/۵۶۲۵،۸)	(۱،۱،۱)

۵-۳-۵- محاسبه Si برای هر یک از سطر های ماتریس مقایسه زوجی

در این مرحله نحوه محاسبه Si ها برای ۵ پیامد زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه با توجه به روابط (۴-۱۰) تا (۴-۱۳) نشان داده شده است. با توجه به گستردگی جدول های ترسیم شده برای انجام محاسبات در نرم افزار اکسل، از نمایش این جدول ها برای مقایسه زوجی پارامتر ها نسبت به پیامد های زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه در متن اصلی خودداری شده است و فقط نتایج انتهایی محاسبات ارائه خواهد شد.

جدول ۵-۷۸: محاسبه مقادیر $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پیامدهای زمین شناسی،طراحی، مدیریت،ایمنی و هزینه

معیارها	زمین شناسی	طراحی	مدیریت	ایمنی	هزینه	$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$
زمین شناسی	(۱،۱،۱)	(۰/۵،۳/۸۷۵،۶)	(۰/۲ ، ۴/۰۵، ۷)	(۲ ، ۵/۷۵، ۹)	(۰/۱۲۵۰،۲/۷۸۱،۶)	(۳/۸۲۵ ،۱۷/۴۵۶ ،۲۹)
طراحی	(۰/۱۶۶۷،۰/۶۵۴۲،۲)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۶۶۷،۲/۷۹۱۷،۵)	(۰/۱۲۵،۲/۰۷۲۹،۶)	(۰/۱۲۵،۰/۶۵۶۳،۶)	(۱/۵۸۳۴، ۷/۱۷۵۱، ۲۰)
مدیریت	(۰/۱۴۲۹،۱/۴۱۰۷،۵)	(۰/۲،۱/۷۱۶۷،۶)	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵،۲/۸۱۲۵،۶)	(۰/۱۶۶۷ ،۲/۵ ، ۹)	(۱/۷۵۹۶ ، ۹/۴۳۹۹،۲۷)
ایمنی	(۰/۱۱۱۱،۰/۲۳۶۱،۰/۵)	(۰/۱۶۶۷،۳/۶۶۶۷،۸)	(۰/۱۶۶۷ ،۱/۲۵، ۴)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۲۵،۴/۱۵۶۳،۸)	(۱/۵۶۹۵،۱۰/۳۰۹،۲۱/۵)
هزینه	(۰/۱۶۶۷،۲/۲۵،۸)	(۰/۱۶۶۷،۲/۹۱۶۷،۸)	(۰/۱۱۱۱،۲/۷۷۷۸،۶)	(۰/۱۲۵،۲/۵۶۲۵،۸)	(۱،۱،۱)	(۱/۵۶۹۵ ،۱۱/۵۰۷، ۳۱)

بر اساس اعداد فازی بالا سایر اطلاعات نیز با توجه به فرمول های ارائه شده استنتاج می گردنند،که شرح این عملیات به صورت زیر می باشد:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = (۱۲۸/۵،۵۵/۸۸۷،۱۰/۳۰۷)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = (۰/۰۹۷۰ ، ۰/۰۱۷۹ ،۰/۰۰۸۰)$$

S۱ =(۰/۰۳۰۶، ۰/۳۱۲۵ ،۲/۸۱۳۰)　　S۲ =(۰/۰۱۲۷ ، ۰/۱۲۸۴ ، ۱/۵۵۲۰)

S۳ =(۰/۰۱۴۱ ، ۰/۱۶۹۰ ،۲/۶۱۹۰)　　S۴ =(۰/۰۱۲۶ ، ۰/۱۸۴۵ ،۲/۰۸۵۵)

S۵ =(۰/۰۱۲۶ ، ۰/۲۰۶۰ ،۳/۰۰۷۰)

جدول ۵-۷۹: مقایسه زوجی پیامد زمین شناسی و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد زمین شناسی

زمین شناسی	توقف دستگاه	سایش کاتر	گیر کردن TBM	آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	گرفتگی و انسداد دیسک	$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$
توقف دستگاه	(۱،۱،۱)	(۰/۱۴۲۹۰۱/۸۶۷۰۰۷)	(۰/۱۱۱۱۰۱/۴۳۲۵۰۷)	(۰/۱۴۲۹۰۲/۹۶۵۶۰۸)	(۰/۱۴۲۹۰۲/۱۰۵۱۰۸)	(۱/۵۴۰۹/۳۷۰۲،۳۱)
سایش کاتر	(۰/۱۴۲۹۰۳/۳۳۳۴۰۷)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۱۱۱۰۲/۷۵۴۰۰۷)	(۰/۳۳۳۳۰۳/۴۷۶۲۰۸)	(۰/۳۳۳۳۰۱/۷۱۴۳۰۸)	(۱/۹۲۰۶،۱۲/۲۷۸،۳۱)
گیر کردن TBM	(۰/۱۴۲۹۰۳/۳۰۶۱۰۹)	(۰/۱۴۲۹۰۲/۳۵۳۷۰۹)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۶۶۷۰۳/۲۶۶۷۰۸)	(۰/۱۴۲۹۰۲/۷۳۱۳۰۸)	(۱/۵۹۵۰،۱۲/۶۵۸۰۳۵)
آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	(۰/۱۲۵۰۰۳/۲۰۹۷۰۷)	(۰/۱۲۵۰۰۰/۷۶۷۹۰۳)	(۰/۱۲۵۰۰۱/۹۶۷۹۰۶)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۶۶۷۰۰/۵۳۸۱۰۱)	(۱/۵۴۲۰۷/۴۸۴۰۱۷)
گرفتگی و انسداد دیسک	(۰/۱۲۵۰۰۳/۰۴۶۴۰۷)	(۰/۱۲۵۰۰۱/۷۳۲۱۰۳)	(۰/۱۲۵۰۰۲/۷۹۱۷۰۷)	(۱۰۳/۴۲۸۶۰۶)	(۱،۱،۱)	(۲/۳۷۵،۱۲،۲۴)

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = (۸/۹۷,۵۳/۸ ،۱۳۹)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = (۰/۰۰۷۲،۰/۰۱۸۶،۰/۱۱۱)$$

S۱= (۰/۰۱۱۱ ،۰/۱۷۴۳ ، ۳/۴۴۱۰)　　S۲ = (۰/۰/۱۳۸ ، ۰/۲۲۸۴ ، ۳/۴۴۱۰)　　S۳ = (۰/۰۱۱۵ ، ۰/۲۳۵۴ ، ۳/۸۸۵۰)

S۴ = (۰/۰۱۱۱ ، ۰/۱۳۹۲ ، ۱/۸۸۷۰)　　S۵ = (۰/۰۱۷۱ ،۰/۲۲۳۲ ، ۲/۶۶۴۰)

جدول ۵-۸۰: مقایسه زوجی پیامد طراحی و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد

طراحی

پارامتر طراحی	خرابی در بخش برش دهنده	سایش کاتر	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	گرفتگی و انسداد دیسک	طراحی TBM	$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$
خرابی در بخش برش دهنده	(۱،۱،۱)	(۰/۱۲۵۰،۱/۲۷۳۸،۷)	(۰/۱۴۲۹،۱/۱۷۷۶،۷)	(۰/۲۵۰۰،۱/۱۰۷۱،۳)	(۰/۱۱۱۱،۱/۲۹۳۷،۸)	(۱/۶۲۹۰ ،۵/۸۵۲۲ ، ۲۶/۰۰)
سایش کاتر	(۰/۱۴۲۹،۴/۴۴۹۰،۸)	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵۰۰،۲/۵۴۷۶،۵)	(۰/۳۳۳۳،۳/۰۲۳۸،۷)	(۰/۱۱۱۱،۲/۶۲۷۰،۷)	(۱/۸۳۷۳ ، ۱۳/۶۴۷۴، ۲۸/۰۰)
عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	(۰/۱۴۲۹،۳/۸۷۷۶،۷)	(۰/۲۰۰،۱/۷۲۸۶،۴)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۴۲۹،۲/۷۱۵۶،۷)	(۰/۱۱۱۱،۲/۴۱۲۷،۶)	(۱/۵۹۶۸ ، ۱۱/۷۳۴۵، ۲۵/۰۰)
گرفتگی و انسداد دیسک	(۰/۳۳۳۳،۲/۱۱۹۰،۴)	(۰/۱۴۲۹،۱/۳۵۵۱،۳)	(۰/۱۴۲۹،۲/۶۴۸۰،۷)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۱۱۱،۲/۱۹۸۴،۶)	(۱/۷۳۰۲ ، ۹/۳۲۰۵، ۲۱/۰۰)
طراحی TBM	(۰/۱۲۵۰،۵/۸۷۵۰،۹)	(۰/۱۴۲۹،۳/۶۱۲۲،۹)	(۰/۱۶۶۷،۳/۶۹۰۵،۹)	(۰/۱۶۶۷،۳/۶۹۰۵،۹)	(۱،۱،۱)	(۱/۶۰۱۳ ، ۲۰/۵۵۸۷، ۳۷/۰۰)

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = (۸/۳۹۴۶ \ ،۶۱/۱۱۳۳ \ ، ۱۳۷/۰۰)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = (۰/۰۰۷۳ \ ،۰/۰۱۶۴ \ ، ۰/۱۱۹۱)$$

S۱ = (۰/۰۱۱۸۹۲ ، ۰/۰۹۶۰ ،۳/۰۹۶۶)

S۲ = (۰/۰۱۳۴۱۲ ، ۰/۲۲۳۸۱۷ ،۳/۳۳۴۸)

S۳ = (۰/۰۱۱۶۵۷ ، ۰/۱۹۲۴۵ ، ۲/۹۷۷۵)

S۴ = (۰/۰۱۲۶۳ ، ۰/۱۵۳۰ ، ۲/۵۰۱۱)

S۵ = (۰/۰/۱۱۶۹ ، ۰/۳۳۷۲ ،۴/۴۰۶۷)

جدول ۵-۸۱: مقایسه زوجی پیامد مدیریت و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد مدیریت

خسارت وارد بر تاسیسات زیربنایی	گرفتگی و انسداد دیسک ها	خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$
(۰/۱۱۱۱،۲/۲۷۷۸،۸)	(۰/۱۶۶۷،۲/۲۸۵۷،۶)	(۰/۱۱۱۱،۱/۴۸۸۹،۸)	(۳/۹۳۰،۲۹/۵۵۵،۸۳)
(۰/۱۱۱،۱/۰۸،۴)	(۰/۱۱۱۱،۰/۸۰۲،۲)	(۰/۱۱۱۱،۰/۶۷۰۶،۲)	(۳/۱۰۱۲،۱۹/۹۳۲۳،۶۰)
(۰/۱۱۱۱،۱/۳۹۴۸،۷)	(۰/۱۴۲۹،۱/۱۲۷۶،۴)	(۰/۱۱۱۱،۰/۹۴۳۰،۴)	(۳/۱۸۰ ۲۱/۳۱،۶۶)
(۰/۱۱۱۱،۰/۵۲۱۸،۱)	(۰/۱۴۲۹،۰/۷۹۰۸،۲)	(۰/۱۱۱۱،۰/۴۹۶۶،۱)	(۲/۶۶۲،۱۰/۷۷،۳۲)
(۰/۱۴۲۹،۲/۰۰۵۱،۷)	(۰/۱۶۶۷،۲/۳۸۵۷،۹)	(۰/۱۱۱۱،۱/۴۸۰۷،۶)	(۳/۲۲۴،۳۲/۱۸۹،۹۰)
(۰/۱۴۲۹،۱/۴۶۰۹،۵)	(۰/۱۴۲۹،۲/۶۲۰۴،۷)	(۰/۱۱۱،۱/۶۹۰۵،۶)	(۵/۹۱۳،۳۶/۱۲۴۱،۸۳)
(۰/۱۱۱۱،۱/۶۱۵۹،۸)	(۰/۲،۱/۰۰۴۸،۳)	(۰/۱۱۱۱،۱/۳۲۱۰،۸)	(۳/۵۳۸۸،۲۸/۲۷۴۱،۸۱)
(۰/۱۱۱۱،۰/۹۳۸۵،۵)	(۰/۱۴۲۹،۱/۳۰۲۷،۳)	(۰/۱۱۱۱،۰/۸۶۳۱،۵)	(۴/۰۸۳،۲۷/۹۵،۶۶)
(۰/۱۱۱۱،۱/۳۳۳۹،۷)	(۰/۱۱۱۱،۱/۷۰۶۳،۳)	(۰/۱۱۱۱،۰/۳۳۴۵،۱)	(۳/۴،۲۲/۳۲۱،۶۲)
(۰/۱۱۱۱،۱/۴۷۳۰،۹)	(۰/۳۳۳۳،۱/۴۵۲۴،۵)	(۰/۱۱۱۱،۱/۹۷۳۶،۹)	(۴/۷۹۹۵،۳۲/۰۵۰۸۲)
(۱،۱،۱)	(۰/۱۴۲۹،۴/۷۳۴۷،۹)	(۱،۱،۱)	(۵/۴۵۸،۴۵/۴۶۳،۹۶)
(۰/۱۱۱۱،۱/۲۹۴۴،۷)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۱۱۱،۱/۴۲۷۴،۹)	(۴/۲۶۰،۲۳/۲۵۰۸۷)
(۱،۲/۱۴۲۹،۹)	(۰/۱۱۱۱،۶/۱۵۸۷،۹)	(۱،۱،۱)	(۷/۴۴۵،۶۱/۰۵۴،۱۰۹)

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = (\ ۵۴/۹۹۴۵\ ،\ ۳۹۰/۲۴۲۵\ ،\ ۹۹۷)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = (۰/۰۰۱۰۰\ ،\ ۰/۰۰۲۵۶\ ،\ ۰/۰۱۸۲)$$

S۱ = (۰/۰۰۳۹ ،۰/۰۷۵۷ ، ۱/۵۱۰۶)

S۲ = (۰/۰۰۳۱ ، ۰/۰۵۱۰ ، ۱/۰۹۲۰)

S۳ = (۰/۰۰۳۲ ، ۰/۰۵۴۶ ، ۱/۲۰۱۲)

S۴ = (۰/۰۰۲۷ ، ۰/۰۲۷۶ ، ۰/۵۸۲۴)

S۵ = (۰/۰۰۳۲ ، ۰/۰۸۲۴ ، ۱/۶۳۸۰)

S۶ = (۰/۰۰۵۹ ، ۰/۰۹۲۴ ، ۱/۵۱۰۶)

S۷ = (۰/۰۰۳۵ ، ۰/۰۷۲۴ ، ۱/۴۷۴۲)

S۸ = (۰/۰۰۴۱ ، ۰/۰۷۱۶ ، ۱/۲۰۱۲)

S۹ = (۰/۰۰۳۴ ، ۰/۰۵۷۱ ، ۱/۱۲۸۴)

S۱۰ = (۰/۰۰۴۸ ، ۰/۰۸۱۹ ، ۱/۴۹۲۴)

S۱۱ = (۰/۰۰۵۵ ، ۰/۱۱۶۴ ، ۱/۷۴۷۲)

S۱۲ = (۰/۰۰۴۳ ،۰/۰۵۹۵ ، ۱/۵۸۳۴)

S۱۳ = (۰/۰۰۷۴ ، ۰/۱۵۶۳ ،۱/۹۸۳۸)

جدول ۵-۸۲: مقایسه زوجی پیامد ایمنی و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد ایمنی

ایمنی	خرابی سگمنت	گیر کردنTBM	آب گرفتگی کف ویا چکه کردن سقف	انحراف از مسیر
خرابی سگمنت	(۱،۱،۱)	(۰/۱۴۲۹،۲/۷۸۲۳،۰۷)	(۰/۳۳۳۳،۲/۲۶۱۹،۷)	(۰/۱۲۵۰،۱/۱۳۶۹،۵)
گیر کردنTBM	(۰/۱۴۲۹،۱/۷۳۴۷،۷)	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵۰۰،۲/۲۹۷۶،۹)	(۰/۱۶۶۷،۰/۳۴۷۶،۱)
آب گرفتگی کف ویا چکه کردن سقف	(۰/۱۴۲۹،۱/۰۶۸۰،۳)	(۰/۱۱۱۱،۱/۵۶۳۵،۴)	(۱،۱،۱)	(۰/۱۶۶۷،۰/۷۸۵۷،۲)
انحراف از مسیر	(۰/۲۰۰۳/۰۲۸۶،۸)	(۱،۴،۶)	(۰/۵۰،۲/۲۱۴۳،۶)	(۱،۱،۱)
خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	(۰/۱۴۲۹،۴/۰۲۰۴،۹)	(۱،۵،۹)	(۰/۳۳۳۳،۵/۴۷۶۲،۹)	(۰/۵۰۳/۷۸۵۷،۹)
برخورد با عوارض ناشناخته	(۰/۱۴۲۹،۳/۴۹۶۶،۹)	(۰/۱۶۶۷،۳/۴۵۲۴،۹)	(۱،۳،۸)	(۰/۲۵۰،۲/۲۵۰،۷)
عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	(۰/۱۴۲۹،۱/۱۱۵۶،۴)	(۰/۱۲۵۰،۰/۶۸۴۵،۰۱)	(۰/۳۳۳۳،۲/۰۴۷۶،۵)	(۰/۲۰،۰/۴۹۲۹،۱)
خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	(۰/۱۴۲۹،۵/۰۲۰۴،۹)	(۱،۵/۲۸۵۷،۹)	(۰/۲۰۰۵/۴۵۷۱،۹)	(۰/۲۰۰،۵/۶۰۰،۹)

ادامه جدول ۵-۸۲ : مقایسه زوجی پیامد ایمنی و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد ایمنی

خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	برخورد با عوارض ناشناخته	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$
(۰/۱۱۱۱،۱/۳۸۳۷،۷)	(۰/۱۱۱۱،۱/۶۸۷۳،۷)	(/۲۵۰۰،۲/۶۰۷۱،۷)	(۰/۱۱۱۱،۱/۲۵۹۳،۷)	(۲/۰۸۴۵،۱۴/۱۱۸۵،۴۸)
(۰/۱۱۱۱،۰۰/۴۱۷۸،۱)	(۰/۱۱۱۱،۱/۲۲۶۸،۶)	(۱،۰۲/۵۷۱۴،۸)	(۰/۱۱۱۱،۰۰/۴۰۴۸،۱)	(۲/۸۹۲۹،۱۰/۰۰۱،۳۴)
(۰/۱۱۱۱،۰۰/۵۸۷۳،۳)	(۰/۱۲۵۰،۰/۵۹۴۰،۱)	(۰/۲۰۰،۰/۹۸۱۰،۳)	(۰/۱۱۱۱،۰۰/۹۶۲۹،۵)	(۱/۹۶۸،۷/۵۴۲،۲۲)
(۰/۱۱۱۱،۰۰/۶۷۹۱،۲)	(۰/۱۴۲۹،۱/۶۳۹۵،۴)	(۱،۳،۵)	(۰/۱۱۱۱،۰۰/۹۶۰۹،۵)	(۴/۰۶۵۱،۱۶/۵۷۲۴،۳۷)
(۱،۰،۱)	(۱،۳/۸۵۷۱،۹)	(۱،۴/۷۱۴۳،۹)	(۰/۱۱۱۱،۰۰/۷۵۸۷،۱)	(۵/۰۸۷۳،۲۸/۶۱۲۴،۵۶)
(۰/۱۱۱۱،۰۰/۵۳۲۵،۱)	(۱،۰،۱)	(۰/۳۳۳۳،۲/۲۳۸۱،۸)	(۰/۱۱۱۱،۰۰/۷۰۷۹،۳)	(۱۸/۳۹۱۸،۱۶/۶۷۷۵،۴۶)
(۰/۱۱۱۱،۰۰/۴۱۷۲،۱)	(۰/۱۲۵۰،۱/۲۷۹۸،۳)	(۱،۰،۱)	(۰/۱۱۱۱،۰۰/۲۸۷۱،۱)	(۹/۶۱،۷/۳۲۴۷،۱۷)
(۱،۲/۷۱۴۳،۹)	(۰/۳۳۳۳،۴/۶۱۹۰،۹)	(۱،۶/۱۴۲۹،۹)	(۱،۰،۱)	(۳۹/۶۹۶۵،۳۵/۸۴۰۶۴)

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = (۸۵/۹۲۲۳ \text{ ، } ۱۴۲/۹۵۷۶ \text{ ، } ۳۳۸/۵۸۳۳)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = (۰/۰۰۲۹ \text{ ، } ۰/۰۰۷۰ \text{ ، } ۰/۰۱۲)$$

S۱ = (۰/۰۰۶۰ ، ۰/۰۹۸۸ ، ۰/۵۷۶۰)　　S۲ = (۰/۰۰۸۴ ، ۰/۰۷۰۰ ، ۰/۴۰۸۰)　　S۳ = (۰/۰۰۵۷ ، ۰/۰۵۲۸ ، ۰/۲۶۴۰)

S۴ = (۰/۰۱۴۸ ، ۰/۱۱۶۰ ، ۰/۴۴۴۰)　　S۵ = (۰/۰۱۴۸ ، ۰/۲۰۰۳ ، ۰/۶۷۲۰)　　S۶ = (۰/۰۵۳۳ ، ۰/۱۱۶۷ ، ۰/۵۵۲۰)

S۷ = (۰/۰۲۷۹ ،۰/۰۵۱۳ ، ۰/۲۰۴۰)　　S۸ = (۰/۱۱۵۱ ، ۰/۲۵۰۹ ، ۰/۷۶۸۰)

جدول ۵-۸۳: مقایسه زوجی پیامد هزینه و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد هزینه

هزینه	خرابی در بخش برش دهنده	مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	سایش کاتر	گیر کردنTBM
خرابی در بخش برش دهنده	(۱،۱،۱)	(۰/۳۳۳۳،۲/۰۴۷۶،۰۶)	(۰/۲،۲/۱۷۱۴،۷)	(۰/۱۴۲۹،۲/۷۵۸۵،۷)

مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	(۰/۱۶۶۷۰۱/۲۶۱۹۰۳)	(۱۰۱۰۱)	(۰/۲۰۱/۶۳۵۷۰۵)	(۰/۱۴۲۹۰۱/۶۴۴۲۰۵)
سایش کاتر	(۰/۱۴۲۹۰۱/۳۴۱۸۰۵)	(۰/۲۰۱/۷۴۲۹۰۵)	(۱۰۱۰۱)	(۰/۱۴۲۹۰۲/۵۹۱۸۰۶)
گیر کردنTBM	(۰/۱۴۲۹۰۲/۲۱۵۶۰۷)	(۰/۲۰۲/۹۱۴۳۰۷)	(۰/۱۶۶۷۰۱/۳۰۲۴۰۷)	(۱۰۱۰۱)
آب گرفتگی کف ویا چکه کردن سقف	(۰/۲۰۰/۹۳۳۳۰۲)	(۰/۳۳۳۳۰۱/۲۳۸۱۰۵)	(۰/۲۵۰۰/۷۱۱۴۰۲)	(۰/۱۱۱۱۰۱/۹۲۰۶۰۷)
انحراف از مسیر	(۰/۵۰۲/۶۴۲۹۰۶)	(۰/۲۰۲/۰۲۸۶۰۳)	(۰/۳۳۳۳۰۱/۶۱۹۰۰۴)	(۰/۲۰۰۲/۶۰۰۷)
مشکلات مکانیکی TBM	(۱۰۳/۱۴۲۹۰۶)	(۰۵۰۲/۸۵۷۱۰۷)	(۰/۳۳۳۳۰۲/۳۳۳۳۰۷)	(۰/۱۴۲۹۰۲/۰۵۶۱۰۷)
خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	(۰/۲۰۵/۲۰۹)	(۰/۲۰۵/۸۸۵۷۰۹)	(۰/۲۰۴/۵۲۸۶۰۹)	(۱۰۵/۸۵۷۱۰۹)
خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	(۰/۲۰۵/۹۵۷۱۰۹)	(۱۰۶/۵۷۱۴۰۹)	(۰/۵۰۵/۰۷۱۴۰۹)	(۰/۳۳۳۳۰۴/۶۱۹۰۰۹)

ادامه جدول ۵-۸۳ : مقایسه زوجی پیامد هزینه و محاسبه مقدار $\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$ برای پارامتر های شناسایی شده نسبت به پیامد هزینه

آب گرفتگی کف ویا چکه کردن سقف	انحراف از مسیر	مشکلات مکانیکی TBM	خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}$
(۰/۵۰۲۰۵)	(۰/۱۶۶۷۰/۷۶۱۹۰۲)	(۰/۱۶۶۷۰۰/۵۵۹۵۰۱)	(۰/۱۱۱۱۰۱/۵۴۰۵۰۵)	(۰/۱۱۱۱۰۱/۰۸۹۳۰۵)	(۲/۷۳۱۸۰۱۳/۹۳۰۳۹)
(۰/۲۰۱/۷۴۲۹۰۳)	(۰/۳۳۳۳۰۱/۱۴۲۹۰۵)	(۰/۱۴۲۹۰۰/۸۵۳۷۰۲)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۹۵۶۳۰۵)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۳۶۷۱۰۱)	(۲/۴۰۸۰۱۰/۶۰۵۰۳۰)
(۰/۵۰۲/۲۱۴۳۰۴)	(۰/۲۵۰۱/۲۹۷۶۰۳)	(۰/۱۴۲۹۰۱/۰۴۹۰۰۳)	(۰/۱۱۱۱۰۱/۲۲۸۲۰۵)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۶۴۱۴۰۲)	(۲/۶۰۱۰۱۳/۱۰۷۰۳۴)
(۰/۱۴۲۹۰۲/۴۸۴۷۰۹)	(۰/۱۴۲۹۰۱/۲۳۹۵۰۵)	(۰/۱۴۲۹۰۲/۱۱۵۶۰۷)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۳۱۸۰۰۱)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۸۱۱۵۰۳)	(۲/۱۶۰۵۰۱۴/۴۰۲۰۴۷)
(۱۰۱۰۱)	(۰/۱۲۵۰۰۰/۲۷۴۰۰۰/۵)	(۰/۱۲۵۰۰۰/۰۵۳۶۰۲)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۶۹۰۵۰۴)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۲۴۸۰۰۱)	(۲/۳۶۶۶۰۷/۰۷۰۲۴/۵)
(۲۰۴/۷۱۴۳۰۸)	(۱۰۱۰۱)	(۰/۱۲۵۰۰۱/۹۲۴۰۰۵)	(۰/۱۱۱۱۰۱/۱۹۲۵۰۵)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۶۲۱۰۰۱)	(۴/۵۸۰۵۰۱۸/۳۴۲۳۰۴۰)
(۰/۵۰۳/۶۴۲۹۰۸)	(۰/۲۰۳/۰۶۴۳۰۸)	(۱۰۱۰۱)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۶۷۹۷۰۳)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۲۵۹۹۰۱)	(۳/۹۰۱۹/۰۳۶۲۰۴۸)
(۰/۲۵۰۶/۷۵۰۹)	(۰/۲۰۴/۱۷۱۴۰۹)	(۰/۱۴۲۹۰۴/۳۵۳۷۰۹)	(۱۰۱۰۱)	(۰/۱۱۱۱۰۰/۷۵۸۷۰۱)	(۳/۳۰۴۰۳۸/۵۰۵۰۶۵)
(۱۰۷/۲۸۵۷۰۹)	(۱۰۴/۲۸۵۷۰۹)	(۱۰۶/۷۱۴۳۰۹)	(۱۰۳/۸۵۷۱۰۹)	(۱۰۱۰۱)	(۷/۰۳۳۳۰۵۲/۹۳۳۱۰۷۳)

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = (۳۱/۰۸۵۷ \text{ ، } ۱۸۷/۹۳۰۶ \text{ ، } ۴۰۰/۵)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = (۰/۰۰۲ \text{ ،} ۰/۰۰۵۰۰/۰۳۰)$$

S۱ = (۰/۰۰۵۵ ، ۰/۰۶۹۷ ،۱/۱۷۰۰)　　S۲ = (۰/۰۰۴۸ ، ۰/۰۵۳۰ ، ۰/۹۰۰۰)　　S۳ = (۰/۰۰۵۲ ، ۰/۰۶۵۵ ، ۱/۰۲۰۰)

S۴ = (۰/۰۰۴۳ ، ۰/۰۷۲۰ ، ۱/۴۱۰۰)　　S۵ = (۰/۰۰۴۷ ، ۰/۰۳۵۴ ، ۰/۷۳۵۰)　　S۶ = (۰/۰۰۹۲ ، ۰/۰۹۱۷ ، ۱/۲۰۰۰)

S۷ = (۰/۰۰۷۸ ، ۰/۰۹۵۲ ، ۱/۴۴۰۰)　　S۸ = (۰/۰۰۶۶ ، ۰/۱۹۲۵ ، ۱/۹۵۰۰)　　S۹ = (۰/۰۱۴۱ ، ۰/۲۶۴۷ ، ۲/۱۹۰۰)

۵-۳-۶- محاسبه درجه بزرگی S_i ها نسبت به همدیگر

با توجه به مفاهیم توضـیح داده شده در فصل ۴ برای محاسبه درجه بزرگی (۴-۱۴) درجه بزرگی هر یک از مقادیر Si ها نسبت به یکدیگر در جدول ۵-۸۴ تا جدول۵-۸۹ آمده است.

جدول ۵-۸۴: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد های اصلی ریسک تونل سازی

V(S۱≥S۲) = ۱	V(S۲≥S۱) = ۰/۸۹	V(S۳≥S۱) = ۰/۹۵	V(S۴≥S۱) = ۰/۹۴	V(S۵≥S۱) = ۰/۹۷
V(S۱≥S۳) = ۱	V(S۲≥S۳) = ۰/۹۷	V(S۳≥S۲) = ۱	V(S۴≥S۲) = ۱	V(S۵≥S۲) = ۱
V(S۱≥S۴) = ۱	V(S۲≥S۴) = ۰/۹۶	V(S۳≥S۴) = ۰/۹۹	V(S۴≥S۳) = ۱	V(S۵≥S۳) = ۱
V(S۱≥S۵) = ۱	V(S۲≥S۵) = ۰/۹۵	V(S۳≥S۵) = ۰/۹۹	V(S۴≥S۵) = ۰/۹۹	V(S۵≥S۴) = ۱

جدول ۵-۸۵: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد زمین شناسی

V(S۱≥S۲)= ۰/۹۹	V(S۲≥S۱) = ۱	V(S۳≥S۱) = ۱	V(S۴≥S۱) = ۱	V(S۵≥S۱) = ۱
V(S۱≥S۳) = ۰/۹۸	V(S۲≥S۳) = ۱	V(S۳≥S۲) = ۱	V(S۴≥S۲) = ۰/۹۶	V(S۵≥S۲) = ۰/۹۹
V(S۱≥S۴) = ۱	V(S۲≥S۴) = ۱	V(S۳≥S۴) = ۱	V(S۴≥S۳) = ۰/۹۵	V(S۵≥S۳) = ۰/۹۹
V(S۱≥S۵) = ۰/۹۹	V(S۲≥S۵) = ۱	V(S۳≥S۵) = ۱	V(S۴≥S۵) = ۰/۹۷	V(S۵≥S۴) = ۱

جدول ۵-۸۶: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد طراحی

V(S۱≥S۲)= ۰/۹۲	V(S۲≥S۱) = ۱	V(S۳≥S۱) = ۱	V(S۴≥S۱) = ۱	V(S۵≥S۱) = ۱
V(S۱≥S۳) = ۰/۹۷	V(S۲≥S۳) = ۱	V(S۳≥S۲) = ۰/۹۹	V(S۴≥S۲) = ۰/۹۷	V(S۵≥S۲) = ۱
V(S۱≥S۴) =۰/۹۸	V(S۲≥S۴) = ۱	V(S۳≥S۴) = ۱	V(S۴≥S۳) = ۰/۹۸	V(S۵≥S۳) = ۱
V(S۱≥S۵) =۰/۹۳	V(S۲≥S۵) = ۰/۹۷	V(S۳≥S۵) = ۰/۹۵	V(S۴≥S۵) = ۰/۹۳	V(S۵≥S۴) = ۱

جدول ۵-۸۷: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد مدیریت

V(S۱≥S۲)= ۱	V(S۲≥S۱) = ۰/۹۸	V(S۳≥S۱) = ۰/۹۸	V(S۴≥S۱) = ۰/۹۲	V(S۵≥S۱) = ۱	V(S۶≥S۱) = ۱
V(S۱≥S۳) = ۱	V(S۲≥S۳) = ۱	V(S۳≥S۲) = ۱	V(S۴≥S۲) = ۰/۹۶	V(S۵≥S۲) = ۱	V(S۶≥S۲) = ۱
V(S۱≥S۴) = ۱	V(S۲≥S۴) = ۱	V(S۳≥S۴) = ۱	V(S۴≥S۳) = ۰/۹۵	V(S۵≥S۳) = ۱	V(S۶≥S۳) = ۱
V(S۱≥S۵) = ۱	V(S۲≥S۵) = ۰/۹۷	V(S۳≥S۵) = ۰/۹۸	V(S۴≥S۵) = ۰/۹۱	V(S۵≥S۴) = ۱	V(S۶≥S۴) = ۱
V(S۱≥S۶) = ۰/۹۹	V(S۲≥S۶) = ۰/۹۷	V(S۳≥S۶) = ۰/۹۷	V(S۴≥S۶) = ۰/۹۰	V(S۵≥S۶) = ۱	V(S۶≥S۵) = ۱
V(S۱≥S۷) = ۱	V(S۲≥S۷) = ۰/۹۸	V(S۳≥S۷) = ۰/۹۹	V(S۴≥S۷) = ۰/۹۳	V(S۵≥S۷) = ۱	V(S۶≥S۷) = ۱
V(S۱≥S۸) = ۱	V(S۲≥S۸) = ۰/۹۸	V(S۳≥S۸) = ۰/۹۹	V(S۴≥S۸) = ۰/۹۳	V(S۵≥S۸) = ۱	V(S۶≥S۸) = ۱
V(S۱≥S۹) = ۱	V(S۲≥S۹) = ۱	V(S۳≥S۹) = ۱	V(S۴≥S۹) = ۰/۹۵	V(S۵≥S۹) = ۱	V(S۶≥S۹) = ۱
V(S۱≥S۱۰) = ۱	V(S۲≥S۱۰) =۰/۹۷	V(S۳≥S۱۰) = ۰/۹۸	V(S۴≥S۱۰) = ۰/۹۱	V(S۵≥S۱۰) = ۱	V(S۶≥S۱۰) = ۱
V(S۱≥S۱۱) = ۰/۹۷	V(S۲≥S۱۱) =۰/۹۴	V(S۳≥S۱۱) = ۰/۹۵	V(S۴≥S۱۱) = ۰/۸۶	V(S۵≥S۱۱) = ۰/۹۸	V(S۶≥S۱۱) =۰/۹۸
V(S۱≥S۱۲) = ۱	V(S۲≥S۱۲) =۰/۹۹	V(S۳≥S۱۲) = ۰/۹۹	V(S۴≥S۱۲) = ۰/۹۴	V(S۵≥S۱۲) = ۱	V(S۶≥S۱۲) = ۱
V(S۱≥S۱۳) = ۰/۹۵	V(S۲≥S۱۳) =۰/۹۱	V(S۳≥S۱۳) = ۰/۹۲	V(S۴≥S۱۳) = ۰/۸۱	V(S۵≥S۱۳) = ۰/۹۵	V(S۶≥S۱۳) =۰/۹۵

ادامه جدول ۵-۸۷ : درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد مدیریت

V(S۷≥S۱) = ۰/۹۹	V(S۸≥S۱) = ۰/۹۹	V(S۹≥S۱) = ۰/۹۸	V(S۱۰≥S۱) = ۱	V(S۱۱≥S۱) = ۱	V(S۱۲≥S۱) = ۰/۹۹	V(S۱۳≥S۱) = ۱
V(S۷≥S۲) = ۱	V(S۸≥S۲) = ۱	V(S۹≥S۲) = ۱	V(S۱۰≥S۲) = ۱	V(S۱۱≥S۲) = ۱	V(S۱۲≥S۲) = ۱	V(S۱۳≥S۲) = ۱
V(S۷≥S۳) = ۱	V(S۸≥S۳) = ۱	V(S۹≥S۳) = ۱	V(S۱۰≥S۳) = ۱	V(S۱۱≥S۳) = ۱	V(S۱۲≥S۳) = ۱	V(S۱۳≥S۳) = ۱
V(S۷≥S۴) = ۱	V(S۸≥S۴) = ۱	V(S۹≥S۴) = ۱	V(S۱۰≥S۴) = ۱	V(S۱۱≥S۴) = ۱	V(S۱۲≥S۴) = ۱	V(S۱۳≥S۴) = ۱
V(S۷≥S۵) = ۰/۹۹	V(S۸≥S۵) = ۰/۹۹	V(S۹≥S۵) = ۰/۹۸	V(S۱۰≥S۵) = ۱	V(S۱۱≥S۵) = ۱	V(S۱۲≥S۵) = ۰/۹۹	V(S۱۳≥S۵) = ۱
V(S۷≥S۶) = ۰/۹۹	V(S۸≥S۶) = ۰/۹۸	V(S۹≥S۶) = ۰/۹۷	V(S۱۰≥S۶) = ۰/۹۹	V(S۱۱≥S۶) =۱	V(S۱۲≥S۶) = ۰/۹۸	V(S۱۳≥S۶) = ۱
V(S۷≥S۸) = ۱	V(S۸≥S۹) = ۱	V(S۹≥S۷) = ۰/۹۹	V(S۱۰≥S۷) = ۱	V(S۱۱≥S۷) = ۱	V(S۱۲≥S۷) = ۰/۹۹	V(S۱۳≥S۷) = ۱
V(S۸≥S۸) = ۱	V(S۸≥S۹) = ۱	V(S۹≥S۸) = ۰/۹۹	V(S۱۰≥S۸) = ۱	V(S۱۱≥S۸) = ۱	V(S۱۲≥S۸) = ۰/۹۹	V(S۱۳≥S۸) = ۱
V(S۹≥S۹) = ۱	V(S۸≥S۱۰) = ۰/۹۹	V(S۹≥S۱۰) = ۰/۹۸	V(S۱۰≥S۹) = ۱	V(S۱۱≥S۹) =۱	V(S۱۲≥S۹) = ۱	V(S۱۳≥S۹) = ۱
V(S۱۰≥S۱۰) = ۰/۹۹	V(S۸≥S۱۱) = ۰/۹۶	V(S۹≥S۱۱) = ۰/۹۵	V(S۱۰≥S۱۱) = ۰/۹۸	V(S۱۱≥S۱۰) =۱	V(S۱۲≥S۱۰) =۰/۹۹	V(S۱۳≥S۱۰) = ۱
V(S۱۱≥S۱۲) =۱	V(S۸≥S۱۲) = ۱	V(S۹≥S۱۲) = ۱	V(S۱۰≥S۱۲) = ۱	V(S۱۱≥S۱۲) =۱	V(S۱۲≥S۱۱) =۰/۹۶	V(S۱۳≥S۱۱) = ۱
V(S۱۱≥S۱۳) =۰/۹۸	V(S۸≥S۱۳) = ۰/۹۳	V(S۹≥S۱۳) = ۰/۹۱	V(S۱۰≥S۱۳) = ۰/۹۵	V(S۱۱≥S۱۳) =۰/۹۸	V(S۱۲≥S۱۳) =۰/۹۴	V(S۱۳≥S۱۲) = ۱

جدول ۵-۸۸: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد ایمنی

V(S۸≥S۱)=۱	V(S۷≥S۱)=۰/۸۵	V(S۶≥S۱) =۱	V(S۵≥S۱)=۱	V(S۴≥S۱)=۱	V(S۳≥S۱)=۰/۸۸	V(S۲≥S۱)=۱	V(S۱≥S۲)=۱
V(S۸≥S۲)=۱	V(S۷≥S۲)=۰/۹۰	V(S۶≥S۲) =۱	V(S۵≥S۲) =۱	V(S۴≥S۲) =۱	V(S۳≥S۲)=۰/۹۲	V(S۲≥S۳)=۱	V(S۱≥S۳)=۱
V(S۸≥S۳)=۱	V(S۷≥S۳) = ۱	V(S۶≥S۳) =۱	V(S۵≥S۳) =۱	V(S۴≥S۳) =۱	V(S۳≥S۴)=۰/۸۰	V(S۲≥S۴)=۰/۹۱	V(S۱≥S۴)=۰/۹۶
V(S۸≥S۴)=۱	V(S۷≥S۴)=۰/۷۷	V(S۶≥S۴)=۰/۹۹	V(S۵≥S۴) =۱	V(S۴≥S۵)=۰/۸۴	V(S۳≥S۵)=۰/۶۴	V(S۲≥S۵)=۰/۷۷	V(S۱≥S۵)=۰/۸۴
V(S۸≥S۵)=۱	V(S۷≥S۵)=۰/۵۹	V(S۶≥S۵)=۰/۸۶	V(S۵≥S۶) =۱	V(S۴≥S۶) = ۱	V(S۳≥S۶)=۰/۷۹	V(S۲≥S۶)=۰/۹۱	V(S۱≥S۶)=۰/۹۶
V(S۸≥S۶)=۱	V(S۷≥S۶)=۰/۷۵	V(S۶≥S۷) = ۱	V(S۵≥S۷) =۱	V(S۴≥S۷) = ۱	V(S۳≥S۷) = ۱	V(S۲≥S۷) = ۱	V(S۱≥S۷) = ۱
V(S۸≥S۷)=۱	V(S۷≥S۸)=۰/۳۷	V(S۶≥S۸)=۰/۷۷	V(S۵≥S۸)=۰/۹۲	V(S۴≥S۸)=۰/۷۳	V(S۳≥S۸)=۰/۴۶	V(S۲≥S۸)=۰/۶۶	V(S۱≥S۸)=۰/۷۵

جدول ۵-۸۹: درجه بزرگی هر یک از Si ها نسبت به یکدیگر برای پیامد هزینه

V(S۹≥S۱)=۱	V(S۸≥S۱) =۱	V(S۷≥S۱) = ۱	V(S۶≥S۱) = ۱	V(S۵≥S۱)=۰/۹۶	V(S۴≥S۱) = ۱	V(S۳≥S۱)= ۱	V(S۲≥S۱)=۰/۹۸	V(S۱≥S۲)=۱
V(S۹≥S۲)=۱	V(S۸≥S۲) =۱	V(S۷≥S۲) = ۱	V(S۶≥S۲) = ۱	V(S۵≥S۲)=۰/۹۸	V(S۴≥S۲) = ۱	V(S۳≥S۲)= ۱	V(S۲≥S۳)=۰/۹۸	V(S۱≥S۳)=۱
V(S۹≥S۳)=۱	V(S۸≥S۳) = ۱	V(S۷≥S۳) = ۱	V(S۶≥S۳) = ۱	V(S۵≥S۳)=۰/۹۷	V(S۴≥S۳) = ۱	V(S۳≥S۴)=۰/۹۸	V(S۲≥S۴)=۰/۹۷	V(S۱≥S۴)=۱
V(S۹≥S۴)=۱	V(S۸≥S۴) = ۱	V(S۷≥S۴) =۱	V(S۶≥S۴) = ۱	V(S۵≥S۴)=۰/۹۵	V(S۴≥S۵) = ۱	V(S۳≥S۵) = ۱	V(S۲≥S۵) =۱	V(S۱≥S۵)=۱
V(S۹≥S۵)=۱	V(S۸≥S۵) = ۱	V(S۷≥S۵) =۱	V(S۶≥S۵) = ۱	V(S۵≥S۶)=۰/۹۴	V(S۴≥S۶) = ۱	V(S۳≥S۶)=۰/۹۷	V(S۲≥S۶)=۰/۹۶	V(S۱≥S۶)=۰/۹۸
V(S۹≥S۶)=۱	V(S۸≥S۶) = ۱	V(S۷≥S۶) =۱	V(S۶≥S۷) = ۱	V(S۵≥S۷)=۰/۹۳	V(S۴≥S۷)=۰/۹۹	V(S۳≥S۷)=۰/۹۷	V(S۲≥S۷)=۰/۹۵	V(S۱≥S۷)=۰/۹۸
V(S۹≥S۷)=۱	V(S۸≥S۷) = ۱	V(S۷≥S۸)=۰/۹۳	V(S۶≥S۸)=۰/۹۲	V(S۵≥S۸)=۰/۸۴	V(S۴≥S۸) ۰/۹۲	V(S۳≥S۸)=۰/۸۹	V(S۲≥S۸)=۰/۸۶	V(S۱≥S۸)=۰/۹۱
V(S۹≥S۸)=۱	V(S۸≥S۹)=۰/۹۸	V(S۷≥S۹)=۰/۹۱	V(S۶≥S۹)=۰/۹۰	V(S۵≥S۹)=۰/۸۱	V(S۴≥S۹)=۰/۹۰	V(S۳≥S۹)=۰/۸۶	V(S۲≥S۹)=۰/۸۳	V(S۱≥S۹)=۰/۸۸

۵-۳-۷- محاسبه بردار وزن نهایی

و در نهایت وزن پیامد پارامترها و ریسک های عملیات تونل سازی مکانیزه به شرح جد.ل زیر می باشد.

جدول ۵-۹۰: وزن نرمال شده پیامد زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه

معیار	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
زمین شناسی	۱/۰۰	۰/۲۱
طراحی	۰/۸۹	۰/۱۹
مدیریت	۰/۹۵	۰/۲۰
ایمنی	۰/۹۴	۰/۲۰
هزینه	۰/۹۷	۰/۲۰

جدول ۵-۹۱: وزن نرمال شده پیامد زمین شناسی

معیار	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
توقف دستگاه	۰/۹۸	۰/۲۰
سایش کاتر	۱	۰/۲۰
گیر کردن TBM	۱	۰/۲۰
آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	۰/۹۵	۰/۱۹
گرفتگی و انسداد دیسک	۰/۹۹	۰/۲۰

جدول ۵-۹۲: وزن نرمال شده پیامد طراحی

معیار	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
خرابی در بخش برش دهنده	۰/۹۲	۰/۲۴۴
سایش کاتر	۰/۹۷	۰/۲۵۷
عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	۰/۹۵	۰/۲۵۲
گرفتگی و انسداد دیسک	۰/۹۳	۰/۲۴۷

جدول ۵-۹۳: وزن نرمال شده پیامد مدیریت

معیار	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
توقف دستگاه	۰/۹۵	۰/۰۷۸
خرابی در بخش برش دهنده	۰/۹۱	۰/۰۷۵
مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	۰/۹۲	۰/۰۷۶
خرابی سگمنت	۰/۸۱	۰/۰۶۷
گیر کردنTBM	۰/۹۵	۰/۰۷۸
انحراف از مسیر	۰/۹۵	۰/۰۷۸
مشکلات مکانیکی TBM	۰/۹۴	۰/۰۷۷
حفاری مکانیزه و راهبردیTBMو نصب پوشش	۰/۹۳	۰/۰۷۷
پیشروی کم در طول ساخت تونل باTBM	۰/۹۱	۰/۰۷۵
عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	۰/۹۵	۰/۰۷۸
خسارت وارد بر تاسیسات زیربنایی	۰/۹۸	۰/۰۸۱
گرفتگی و انسداد دیسک ها	۰/۹۴	۰/۰۷۷
خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	۱/۰۰	۰/۰۸۲

جدول ۵-۹۴: وزن نرمال شده پیامدهزینه

معیار	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
خرابی در بخش برش دهنده	۰/۸۶۰	۰/۱۰۹
مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	۰/۸۱۰	۰/۱۰۳
سایش کاتر	۰/۸۳۰	۰/۱۰۶
گیر کردنTBM	۰/۸۸۰	۰/۱۱۲
آب گرفتگی کف ویا چکه کردن سقف	۰/۷۶۰	۰/۰۹۷
انحراف از مسیر	۰/۸۷۰	۰/۱۱۱
مشکلات مکانیکی TBM	۰/۸۹۰	۰/۱۱۳
خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	۰/۹۶۰	۰/۱۲۲
خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	۱/۰۰۰	۰/۱۲۷

جدول ۵-۹۵: وزن نرمال شده پیامد ایمنی

معیار	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
خرابی سگمنت	۰/۷۵	۰/۱۲۸
گیر کردنTBM	۰/۶۶	۰/۱۱۲
آب گرفتگی کف ویا چکه کردن سقف	۰/۴۶	۰/۰۷۸
انحراف از مسیر	۰/۷۳	۰/۱۲۴
خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	۰/۹۲	۰/۱۵۶
برخورد با عوارض ناشناخته	۰/۹۹	۰/۱۶۸
عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	۰/۳۷	۰/۰۶۳
خسارت وارد بر ساختمان های اطراف	۱	۰/۱۷۰

جدول ۵-۹۶: وزن نهایی تمامی ریسک های شناسایی شده

نماد	پارامتر ها / ریسک ها	زمین شناسی	طراحی	مدیریت	ایمنی	هزینه	جمع امتیاز
	وزن پارامتر ها	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۲	۰/۲	۰/۲	
T۱	خرابی در بخش برش دهنده	۰	۰/۲۴۴	۰/۰۷۵	۰		۰/۰۸۳۲
T۲	توقف دستگاه	۰/۱۹۹	۰	۰/۰۷۸	۰	۰	۰/۰۵۷۴
T۳	مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	۰	۰	۰/۰۷۶	۰	۰/۱۰۳	۰/۰۳۵۸
T۴	خرابی سگمنت	۰	۰	۰/۰۶۷	۰/۱۲۴	۰	۰/۰۳۸۲
T۵	سایش کاتر ها	۰/۲۰۳	۰/۲۵۷	۰	۰	۰/۱۰۶	۰/۱۱۸۴
T۶	گیر کردن TBM	۰/۲۰۳	۰	۰/۰۷۸	۰/۱۱۲	۰/۱۱۲	۰/۱۰۳۰
T۷	آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	۰/۱۹۳	۰	۰	۰/۰۷۸	۰/۰۹۷	۰/۰۷۵۵
T۸	انحراف از مسیر	۰	۰	۰/۰۷۸	۰/۱۲۴	۰/۱۱۱	۰/۰۶۲۶
T۹	مشکلات مکانیکی TBM	۰	۰	۰/۰۷۷	۰	۰/۱۱۳	۰/۰۳۸۰
T۱۰	حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصب پوشش بتنی	۰	۰	۰/۰۷۷	۰	۰	۰/۰۱۵۴
T۱۱	پیشروی کم در طول ساخت تونل باTBM	۰	۰	۰/۰۷۵	۰	۰	۰/۰۱۵۰
T۱۲	عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	۰	۰	۰/۰۷۸	۰	۰	۰/۰۱۵۶
T۱۳	خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	۰	۰	۰/۰۸۱	۰/۱۵۶	۰/۱۲۲	۰/۰۷۱۸
T۱۴	وارد شدن خسارت به ساختماهای اطراف	۰	۰	۰/۰۸۲	۰/۱۷	۰/۱۲۷	۰/۰۷۵۸
T۱۵	برخورد با عوارض ناشناخته	۰	۰	۰	۰/۱۶۸	۰	۰/۰۳۳۶
T۱۶	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	۰	۰/۲۵۲	۰	۰/۰۶۳	۰	۰/۰۶۰۵
T۱۷	گرفتگی و انسداد دیسک ها	۰/۲۰۱	۰/۲۴۷	۰/۰۷۷	۰	۰	۰/۱۰۴۵

پس از محاسبه وزن نهایی پیامد هر یک از ریسک های شناسایی شده، لازم است تا ریسک های مرد نظر را رتبه بندی کرد .بدین منظور از جدول زیر استفاده شده است (هیان و همکاران ۲۰۱۵).

جدول ۵-۹۷: رتبه بندی پیامد وقوع ریسک(هیان و همکاران ۲۰۱۵)

پیامد	سطح پیامد	رتبه پیامد
کمتر از ۰/۰۲۰۰	بسیار نامحتمل	۱
۰/۰۲۰۱ تا ۰/۰۴۰۰	نامحتمل	۲
۰/۰۴۰۱ تا ۰/۰۷۰۰	ممکن	۳
۰/۰۷۰۱ تا ۰/۰۸۵۰	محتمل	۴
بیشتر از ۰/۰۸۵۰	بسیار محتمل	۵

اکنون با توجه به مقدار شدت و پیامد هر یک از ریسک های شناسایی شده، رتبه آنها نیز مشخص شده و در جدول زیر آورده شده اند.

جدول ۵-۹۸: رتبه بندی ریسک های شناسایی شده

نام رویداد	نماد	زمین شناسی	طراحی	مدیریت	ایمنی	هزینه	رتبه نهایی
خرابی در بخش برش دهنده	T۱	۱	۴	۴	۱	۵	۴
توقف دستگاه	T۲	۴	۱	۴	۱	۱	۳
مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	T۳	۱	۱	۴	۱	۵	۲
خرابی سگمنت	T۴	۱	۱	۳	۴	۱	۲
سایش کاتر ها	T۵	۵	۵	۱	۱	۵	۵
گیر کردن TBM	T۶	۵	۱	۴	۴	۵	۵
آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	T۷	۴	۱	۱	۳	۴	۴
انحراف از مسیر	T۸	۱	۱	۴	۴	۵	۳
مشکلات مکانیکی TBM	T۹	۱	۱	۴	۱	۵	۲
حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصب پوشش بتنی	T۱۰	۱	۱	۴	۱	۱	۱
پیشروی کم در طول ساخت تونل باTBM	T۱۱	۱	۱	۴	۱	۱	۱
عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	T۱۲	۱	۱	۴	۱	۱	۱
خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	T۱۳	۱	۱	۵	۵	۵	۴
وارد شدن خسارت به ساختماهای اطراف	T۱۴	۱	۱	۵	۵	۵	۴
برخورد با عوارض ناشناخته	T۱۵	۱	۱	۱	۵	۱	۲
عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	T۱۶	۱	۵	۱	۳	۱	۳
گرفتگی و انسداد دیسک ها	T۱۷	۵	۴	۴	۱	۱	۵

۵-۴- ارزیابی ریسک های تونل سازی مکانیزه

به منظور ارزیابی نهایی ریسک های مربوط به تونل سازی مکانیزه لازم است پس از تعیین کلاس های کمی مربوط به احتمال و پیامد رویداد ریسک های شناسایی شده، عدد ریسک را برای هر یک از آنها محاسبه، و در ماتریس ریسک نوشته شود.در مورد تحقیق پیش رو پیامد به ۵ دسته مرتبط با

زمین شـناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه تقسیم شده است. نتیجه حاصلضرب میان دو پارامتر می تواند به وضوح در یک ماتریس ریسک نشان داده شود. در ماتریس ریسک طبق قرار داد فراوانی بر روی محور y و پیامد بر روی محور x قرار می گیرد.

به طور مثال برای یک ماتریس ۵×۵، پنج سـطح احتمال رخداد و پنج سـطح پیامد وجود دارد، از این رو چهار منطقه مختلف ریسکی نیز برای آن تعریف می شود. زون های ریسکی عبارتند از:

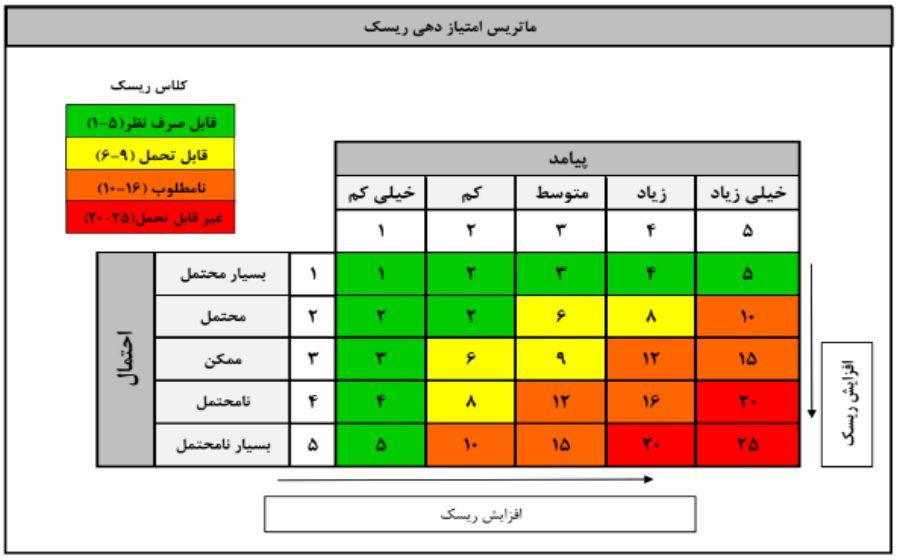
الف) منطقه با ریسک خیلی بالا برای مقادیر ۲۰ تا ۲۵ و معمولا با رنگ قرمز نشان داده می شود.

ب) منطقه با ریسک بالا برای مقادیر ۱۰ تا ۱۶ و معمولا با رنگ نارنجی مشخص می شود.

ج) منطقه ALARP برای مقادیر ۶تا۹ می باشد و معمولا بارنگ زرد نشان داده می شود.

د) منطقه با ریسک کم برای مقادیر کمتر از ۵ و معمولا با رنگ سبز نمایش داده می شود.

یک ماتریس ریسک به صورت شکل ۵-۱۷ نمایش داده می شود [۴۳]. ماتریس ریسک برای تایید بر تهدیدات بحرانی و هدایت بهتر به سـمت پیشـگیری و کاهش رویداد های زیان بار و سـاده سـازی اقدامات کنترلی بسـیار مفید خواهد بود. در ادامه برای درک بهتر ریسـک های شـناسایی شده، اعداد کمی به فراوانی و پیامد آن ها در جدول ۵-۹۹لیست شده و در ماتریس جداگانه با عنوان های ماتریس ریسک زمین شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه و ریسک کلی آورده شده است.



۵-۱۷: ماتریس امتیاز دهی ریسک

جدول ۵-۹۹: اعداد مربوط به ریسک ها ی پنج گانه و کلی شناسایی شده

ردیف	نام رویداد	نماد رویداد	احتمال وقوع رویداد	شدت پیامد زمین شناسی	شدت پیامد طراحی	شدت پیامد مدیریتی	شدت پیامد ایمنی	شدت پیامد هزینه	شدت پیامد کلی
۱	خرابی در بخش برش دهنده	T۱	۵	۱	۴	۴	۱	۵	۴
۲	توقف دستگاه	T۲	۲	۴	۱	۴	۱	۱	۳
۳	مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	T۳	۴	۱	۱	۴	۱	۵	۲
۴	خرابی سگمنت	T۴	۳	۱	۱	۳	۴	۱	۲
۵	سایش کاتر ها	T۵	۵	۵	۵	۱	۱	۵	۵
۶	گیر کردن TBM	T۶	۳	۵	۱	۴	۴	۵	۵
۷	آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	T۷	۲	۴	۱	۱	۳	۴	۴
۸	انحراف از مسیر	T۸	۴	۱	۱	۴	۴	۵	۳
۹	مشکلات مکانیکی TBM	T۹	۳	۱	۱	۴	۱	۵	۲
۱۰	حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصب پوشش بتنی	T۱۰	۱	۱	۱	۴	۱	۱	۱
۱۱	پیشروی کم در طول ساخت تونل باTBM	T۱۱	۵	۱	۱	۴	۱	۱	۱
۱۲	عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	T۱۲	۳	۱	۱	۴	۱	۱	۱
۱۳	خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	T۱۳	۱	۱	۱	۵	۵	۵	۴
۱۴	وارد شدن خسارت به ساختماهای اطراف	T۱۴	۳	۱	۱	۵	۵	۵	۴
۱۵	برخورد با عوارض ناشناخته	T۱۵	۲	۱	۱	۱	۵	۱	۲
۱۶	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	T۱۶	۳	۱	۵	۱	۳	۱	۳
۱۷	گرفتگی و انسداد دیسک ها	T۱۷	۴	۵	۴	۴	۱	۱	۵

ادامه جدول ۵-۹۹: اعداد مربوط به ریسک های پنج گانه و کلی شناسایی شده

ردیف	نام رویداد	نماد رویداد	ریسک زمین شناسی	ریسک طراحی	ریسک مدیریتی	ریسک ایمنی	ریسک هزینه	ریسک کلی
۱	خرابی در بخش برش دهنده	T۱	۵	۲۰	۲۰	۵	۲۵	۲۰
۲	توقف دستگاه	T۲	۸	۲	۸	۲	۲	۶
۳	مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه	T۳	۴	۴	۱۶	۴	۲۰	۸
۴	خرابی سگمنت	T۴	۳	۳	۹	۱۲	۳	۶
۵	سایش کاتر ها	T۵	۲۵	۲۵	۵	۵	۲۵	۲۵
۶	گیر کردن TBM	T۶	۱۵	۳	۱۲	۱۲	۱۵	۱۵
۷	آب گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف	T۷	۸	۲	۲	۶	۸	۸
۸	انحراف از مسیر	T۸	۴	۴	۱۶	۱۶	۲۰	۱۲
۹	مشکلات مکانیکی TBM	T۹	۳	۳	۱۲	۳	۱۵	۶
۱۰	حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصب پوشش بتنی	T۱۰	۱	۱	۴	۱	۱	۱
۱۱	پیشروی کم در طول ساخت تونل باTBM	T۱۱	۵	۵	۲۰	۵	۵	۵
۱۲	عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی	T۱۲	۳	۳	۱۲	۳	۳	۳
۱۳	خسارت وارد بر تاسیسات زیر بنایی	T۱۳	۱	۱	۵	۵	۵	۴
۱۴	وارد شدن خسارت به ساختماهای اطراف	T۱۴	۳	۳	۱۵	۱۵	۱۵	۱۲
۱۵	برخورد با عوارض ناشناخته	T۱۵	۲	۲	۲	۱۰	۲	۴
۱۶	عدم جلوگیری سگمنت از ورود آب	T۱۶	۳	۱۵	۳	۹	۳	۹
۱۷	گرفتگی و انسداد دیسک ها	T۱۷	۲۰	۱۶	۱۶	۴	۴	۲۰

ریسک زمین شناسی		پیامد				
		۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۱					
	۲				$T_{۲}$, $T_{۷}$	
	۳					$T_{۶}$
	۴					$T_{۱۷}$
	۵					$T_{۵}$

شکل ۵-۱۸: ماتریس ریسک زمین شناسی

ریسک طراحی		پیامد				
		۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۱					
	۲					
	۳					$T_{۱۶}$
	۴				$T_{۱۷}$	
	۵				$T_{۱}$	$T_{۵}$

شکل ۵-۱۹: ماتریس ریسک طراحی

ریسک ایمنی		پیامد				
		۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۱					
	۲				$T_{۸}$	$T_{۱۵}$
	۳			$T_{۱۶}$	$T_{۴}$ ، $T_{۶}$	$T_{۱۴}$
	۴				$T_{۸}$	
	۵					

شکل ۵-۲۰: ماتریس ریسک ایمنی

ریسک مدیریت		پیامد				
		۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۱					
	۲			$T_۴$	$T_۲$	
	۳				$T_۶$	$T_{۱۴}$
	۴				$T_۳$, $T_۸$, $T_۹$, $T_{۱۲}$, $T_{۱۸}$	
	۵				$T_۱$ ، $T_{۱۱}$	

شکل ۵-۲۱: ماتریس ریسک مدیریت

ریسک هزینه		پیامد				
		۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۱					
	۲				$T_۷$	
	۳					$T_۶$ ، $T_۹$,$T_{۱۴}$
	۴					$T_۳$ ، $T_۸$
	۵					$T_۱$ ، $T_۵$

شکل ۵-۲۲: ماتریس ریسک هزینه

ریسک کلی		پیامد				
		۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۱	$T_{۱۰}$			$T_{۱۳}$	
	۲		$T_{۱۵}$	$T_{۲}$ ، $T_{۷}$		
	۳	$T_{۱۲}$	$T_{۴}$ ، $T_{۹}$	$T_{۱۶}$	$T_{۱۴}$	$T_{۶}$
	۴		$T_{۳}$	$T_{۸}$		$T_{۱۷}$
	۵	$T_{۱۱}$	$T_{۱۲}$		$T_{۱}$	$T_{۵}$

شکل ۵-۲۳: ماتریس ریسک کلی تونل سازی مکانیزه

با توجه به ۵ ماتریس اولیه در بالا متوجه می‌شویم که تعداد بیشتر رویدادهای با ریسک بالا، به ترتیب از زیاد به کم شامل ریسک هزینه، مدیریت ، طراحی و زمین‌شناسی است و پس‌ازاین‌ها ریسک ایمنی در سطح پایین‌تری نسبت به ۴ ریسک دیگر قرار می‌گیرد. (۴ رویداد در منطقه ریسک خیلی بالا برای ریسک مربوط به هزینه، ۲ رویداد در منطقه ریسک خیلی بالا برای ریسک مربوط به مدیریت ، ۲ رویداد در منطقه ریسک خیلی بالا برای ریسک مربوط به طراحی و ۲ رویداد در منطقه ریسک خیلی بالا برای ریسک مربوط به زمین‌شناسی). رویدادهایی که نشانگر ریسک بسیار بالایی هستند و در اغلب ریسک‌ها مشترک هستند شامل ریسک‌های خرابی در بخش برش دهنده ، سایش کاتر ها ،انحراف از مسیر و گرفتگی و انسداد دیسک‌ها است درحالی‌که ریسک‌هایی چون حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصب پوشش بتنی، و برخورد با عوارض ناشناخته، خسارت وارد بر ساختمان‌های اطراف دارای ریسک پایین‌تری نسبت بقیه پارامترها دارا می‌باشند و در ناحیه سبزرنگ قرارگرفته‌اند.

۵-۵- بحث و تحلیل نتایج ریسک

پس از تعیین و ارزیابی ریسک و تعیین اولویت و درجه اهمیت هر ریسک به‌منظور شناسایی ریسک‌های بحرانی(ریسک‌هایی که برای مقابله با آن‌ها بایستی اقدامات و کنترلی را انجام داد). برنامه و واکنش در برابر ریسک و یا پاسخ به ریسک مطرح می‌شود. پاسخ به ریسک شامل یک برنامه کنترل

و مستندسازی می‌باشد. هدف از طرح این موضوع، رسیدگی به ریسک‌های مختلف و چگونگی برخورد با آن‌ها است. درصورتی‌که نتوانیم خطری را حذف کنیم، باید ریسک ناشی از آن خطر را بپذیریم و اقدامات کنترل‌شده برای کاهش آن انجام داد.

بر اساس ماتریس‌های ریسک که در قسمت قبل ارائه شد:

در ماتریس ریسک‌های مربوط به زمین‌شناسی، رویداد سایش دیسک کاترها در قسمت ریسک خیلی زیاد و گرفتگی و انسداد دیسک‌ها در قسمت ریسک بالا است.

در ماتریس ریسک مربوط به معیار طراحی، رویدادهای خرابی در بخش برش دهنده و سایش دیسک‌ها در قسمت ریسک خیلی زیاد می‌باشد.

در ماتریس مرتبط با معیار مدیریت، رویدادهای خرابی در بخش برش دهنده، ، پیشروی کم در طول ساخت تونل با TBMدر منطقه‌های ریسک‌های خیلی زیاد قرارگرفته‌اند.

در ماتریس مربوط به معیار هزینه،رویدادهای، خرابی در بخش برش دهنده، مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه، سایش دیسک کاترها و انحراف از مسیر در منطقه با ریسک خیلی بالا جای گرفته‌اند.

بر اساس جدول ۵-۹۹ و محاسبه وزن مربوط به ۱۷ رویداد شناسایی و ارزیابی‌شده در ۵ دسته‌ی زمین‌شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه، جدول ریسک‌های کلی تونل سازی مکانیزه ترسیم شد. با توجه به توضیح‌های بالا و شکل ۵-۲۳ ، خروجی نهایی ریسک‌های کلی تونل سازی مکانیزه عبارت‌اند از:

رویدادهای خرابی در بخش برش دهنده، سایش دیسک کاترها و گرفتگی و انسداد دیسک ها در منطقه ریسک خیلی بالا قرار دارند. رویداد های گیرکردن TBM، انحراف از مسیر و وارد شدن خسارت به ساختمان‌های اطراف در منطقه ریسک بالا ،ریسک‌های توقف دستگاه،مشکلات مربوط به تخلیه مصالح حفاری و پیشروی دستگاه، خرابی سگمنت،آب‌گرفتگی در کف یا چکه کردن سقف، مشکلات مکانیکی TBM، عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی و عدم جلوگیری

ســـگمنت از ورود آب در منطقه ریســـک‌های متوســـط جای گرفته‌اند. و درنهایت رویدادهای حفاری مکانیزه و راهبردی TBM و نصــب پوشــش بتنی، پیشــروی کم در طول ســاخت با اســتفاده از عدم پشتیبانی کافی از دستگاه و تجهیزات اجرایی ،خسارت وارد بر تأسیسات زیر بنایی ، برخورد با عوارض ناشــناخته در منطقه ریســک‌های کم قرار دارند بعد از حاصل شدن این نتایج بایستی اقدامات کنترلی برای رویدادهای مدنظر به ترتیب اولویت از ریسک خیلی بالا تا ریسک کم، انجام شود.

۵-۶- جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا رویدادهای اساسی و به وجود آورنده رویدادهای بالایی شناسایی شدند و در قالب ساختار درخت خطا مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند. پس‌ازآن به کمک منطق فازی و استفاده از فرمول تبدیل امکان به‌احتمال، احتمال هر یک از ۱۷ ریسک شناسایی‌شده محاسبه شده است و درنهایت با استفاده از رتبه‌بندی احتمال وقوع ریسک هر یک از رویدادهای بالایی رتبه‌بندی شدند. در ادامه برای به دست آوردن جز دیگر عدد ریسک، یعنی شدت پیامد، از روش تحلیلی سلسله مراتبی فازی استفاده شد و درنهایت ماتریس ریسک در پنج گروه ریسک زمین‌شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه برای تونل سازی مکانیزه ارائه شده است. درنهایت ریسک‌های مدیریت و هزینه به‌عنوان بحرانی‌ترین خطر تونل سازی مکانیزه در خط ۳ مترو مشهد معرفی شدند و رویدادهای خرابی در بخش برش دهنده، سایش کاتر هاو گرفتگی و انسداد دیسک‌ها به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ریسک تونل سازی مکانیزه خط ۳ مترو مشهد تعیین شده است.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهاد

۶-۱- مقدمه

تونل سازی مکانیزه به‌عنوان فعالیتی مدرن و پیشرفته در سراسر دنیا شناخته‌شده است. پیشرفت و موفقیت یک عملیات تونل سازی نیازمند یک برنامه قدرتمند و هوشمندانه است. بدین‌جهت یک عملیات تونل سازی موفق، بایستی از ابزارهای مدیریتی، اجرایی، بازرسی و ابزارهای تصمیم‌گیری در طول فرایند استفاده کند. برای ریسک‌های مرتبط با سیستم ، در قدم اول باید پتانسیل ریسک‌های ذاتی و عواقب و سناریوهای آن به‌طور سیستماتیک ارزیابی و شناسایی شوند. در این پایان‌نامه برای محاسبه و کمی سازی ریسک تونل سازی مکانیزه،لازم بود که احتمال و پیامد رویدادها به‌عنوان دو جزء اصلی در کمی سازی ریسک موردبررسی و ارزیابی قرار گیرند. برای انجام چنین محاسباتی از روش‌های فازی درخت خطا(FFTA) و تحلیل سلسله مراتبی فازی(FAHP) به ترتیب برای محاسبه احتمال و پیامد رویداد اصلی استفاده شد.که نتایج حاصل از این ارزیابی و همچنین ارائه پیشنهاد در جهت بهبودی عملیات در بخش‌های آتی آورده شده است.

۶-۲- نتیجه‌گیری

صنعت تونل سازی دارای پیشرفت بزرگی در ساخت‌وساز پروژه‌های زیرزمینی بوده است. که در حال حاضر، تفاوت قابل‌توجهی با دو دهه گذشته کرده است. در بسیاری از اوقات، پروژه‌های تونل زنی خود را در موقعیتی که در آن شرایط غیرمنتظره است و ادامه پروژه با تهدید روبرو است مواجه دیده‌اند. مدیران همواره به دنبال تکنیک‌های معتبر برای غلبه بر محدودیت‌های مالی و زمان هستند. ارزیابی ریسک یکی از ارکان مدیریت ریسک بوده و با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم صرف بهینه منابع، دارای اهمیت بسیار است.هدف از ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف از قبیل میزان تأثیر و احتمال وقوع است. رتبه‌بندی ریسک‌ها، قسمت کلیدی این فرایند محسوب می‌شود.زیرا با انجام عملیات رتبه‌بندی، ارجحیت هر ریسک در برابر سایر ریسک‌ها مشخص‌شده و درنتیجه امکان برنامه‌ریزی میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک فراهم می‌شود. در این پایان‌نامه ۱۸ ریسک از ریسک‌های تونل سازی مکانیزه موردبررسی و

ارزیابی قرارگرفته است.

در این مرحله بعدازاینکه بعضی از پارامترهای مهم و مؤثر در تونل سازی مکانیزه شناسایی شد، تعداد ۱۷ ریسک را مدنظر قراردادیم و برای هر یک به‌صورت مجزا درخت خطا ترسیم شد. و چگونگی ارتباط و عوامل به وجود آورندگان آن‌ها در قالب ساختار منطقی درخت خطا بررسی شد. در ادامه کار با نظرسنجی‌های انجام‌گرفته از متخصصین مربوط به تونل مکانیزه خط۳ مترو مشهد در این زمینه بحث و تبادل شد. برای محاسبه احتمال رویداد نهایی از درخت خطای فازی(FFTA) استفاده شد که ماحصل این قسمت به دست آوردن مقدار احتمال هر یک از ریسک‌ها است. برای ارزیابی نهایی ریسک‌های تونل سازی مکانیزه خط ۳مترو مشهد نیاز بود تا علاوه بر احتمال رویدادهای نهایی، شدت این رویدادها نیز محاسبه شوند. درنتیجه مجدداً نظرات متخصصین با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی(FAHP) تجزیه‌وتحلیل شد. با محاسبه احتمال و شدت پیامد هر یک از رویدادهای نهایی، ماتریس ریسک کلی تونل سازی مکانیزه مشخص و رویدادها با ریسک بالا شناسایی شدند. ماتریس‌های نهایی ریسک در ۵ دسته زمین‌شناسی، طراحی، مدیریت، ایمنی و هزینه ارائه شدند. در ماتریس ریسک ایمنی رویدادی در منطقه ریسک خیلی زیاد قرار نگرفت اما رویدادهای خرابی سگمنت،گیرکردن TBM، انحراف از مسیر، وارد شدن خسارت به ساختمان‌های اطراف در منطقه با ریسک بالا قرار گرفتند. با بررسی ماتریس‌های تشکیل‌شده مشخص شدند که هر یک از ریسک‌ها در چه ناحیه از ریسک قرار دارند. برخی از مهم‌ترین شاخصه‌های انجام این پژوهش با روش‌های انجام‌شده عبارت‌اند از:

- ✓ استفاده از روش فازی در این پایان‌نامه سبب شد که مشکلات ناشی از ابهام و عدم دقت ناشی از ذهنی بودن اطلاعات کاهش یابد.
- ✓ با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته، احتمال شکست رویداد پایانی به کمک اعداد فازی توسط کارشناسان مختلف متفاوت خواهد بود. در چنین شرایطی صحت انتخاب عدد فازی برای نشان

دادن رویداد پایانی، بسیار مهم است. درنتیجه این روش می‌تواند باعث کاهش عدم قطعیت سیستم باشد.

- ✓ در این پایان‌نامه یک سیستم مدیریت ریسک جدید برای تونل زنی TBM مورداستفاده قرار گرفت. برای تسهیل مدیریت ریسک در تونل زنی با TBM، عوامل و خطرات احتمالی ریسک بالقوه از طریق بررسی پرسشنامه متخصصان باتجربه جمع‌آوری شد. خطرات احتمالی در تونل زنی TBM به ۱۷قسمت تقسیم شدند هر فاکتور ریسک به ۵ دسته تقسیم می‌شود: زمین‌شناسی، طراحی، و مدیریت ایمنی و هزینه با توجه به ویژگی‌های آن‌ها.

۶-۳- پیشنهادها

ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل سازی مکانیزه یکی از اساسی‌ترین مراحل در بررسی خروجی‌های عملیاتی است. بنابراین نتایج حاصل از این پایان‌نامه می‌تواند سرآغاز خوبی برای تحقیقات عمیق‌تر در مورد هر یک از پارامترهای مهم در تونل سازی مکانیزه باشد.نظرها و پیشنهادهایی که حاصل این پایان‌نامه است، به‌طور خلاصه به شرح زیر است.

۱- پیشنهاد می‌شود که سایر تونل‌های مکانیزه نیز با استفاده از روش انجام‌شده، ریسک‌های عملیات حفاری خود را مورد ارزیابی قرار دهند.

۲- برای انجام محاسبات فازی، اهمیت نسبی هر ریسک، روش‌های مختلفی ازجمله روش تحلیلی سلسله مراتبی دلفی،روش شباهت به گزینه ایده آل فازی و ...وجود دارد. لذا پیشنهاد می‌شود از روش‌های دیگر نیز استفاده شود.

۳- روش پیشنهادی با مقایسه و با مشاهدات میدانی قابل‌اعتماد بود. پس از انجام نظرسنجی از متخصصان TBM،در مطالعه موردی مدنظر، روش تحلیل فازی درخت خطا و تحلیل ریسک با استفاده از روش فازی سلسله مراتبی انجام شد.که اکثر خطرات مطرح‌شده در این پایان‌نامه با خطرات موجود در تونل خط۳ مترو مشهد همخوانی خوبی دارد.

۴- یکی از مهم‌ترین نکات به‌دست‌آمده از این مطالعه و بسیاری از مطالعات گذشته FTA بر پایه فازی این است که احتمال وقوع رویدادها با اعطای امکان وقوع خطا توسط خبرگان به رویدادها به دست می‌آید؛ درحالی‌که، احتمال وقوع یک جزء می‌تواند تابعی از متغیرهایی همچون نرخ خطا، میانگین زمان تعمیر، زمان مأموریت و فواصل بازرسی باشد. احتمال وقوع جز به‌طور مستقیم توسط خبره با استفاده از امکان‌های وقوع خطا محاسبه می‌شود؛ بنابراین اعمال این متغیرها در رویکرد فازی می‌تواند دقت مطالعه را افزایش دهد.

۵- در این پروژه با استفاده از روش فازی نه‌تنها به کارشناسان وزن داده شد، بلکه با استفاده از غیر فازی کردن وزن رویدادهای نهایی، وزن هر یک از رویداد مورد ارزیابی قرار گرفت. تفاوت این روش با روش‌های گذشته این قسمت است که شاید نقطه قوت مطالعه حاضر در خصوص کمی سازی و افزایش دقت محاسبه ضریب هر رویداد نهایی است.

۶- با روش پیشنهادی جدید، احتمال و پیامد خطرات مرتبط با روش تونل زنی سپر به‌صورت کمی پیش‌بینی‌شده و می‌توان به‌طور پیش‌بینی‌شده برای به حداقل رساندن خرابی‌های موجود در پروژه اقدام کرد.

۷- یکی از مشکلات مطالعه حاضر، محدودشده به استفاده از یک گروه خبره همگون فرآیندی است که می‌تواند منجر به نتایج خوش‌بینانه گردد. بر اساس نتایج این مطالعه و مطالعات پیشین می‌توان گفت که نتایج استفاده از یک گروه ناهمگون از خبرگان ارزشمندتر از یک گروه خبره همگون است.

۸- مشکل دیگری که در ارزیابی ریسک با این روش مطرح است، پاسخ کارشناسان مدنظر به پرسشنامه‌ها بر اساس احساسات و تعصب صورت می‌گیرد که این مسئله باعث نادقیق شدن محاسبات انجام‌شده می‌شود.

منابع

[۱] Ang AH-S, Tang WH. "**Probability concepts in engineering planning and design**". Volume II – Decision, risk and reliability. New York: John Wiley and Sons;

[۲] Ang AH-S, De Leon D. "**Modeling and analysis of uncertainties for risk-informed decisions in infrastructures engineering**". Struct Infrastruct Eng.

[۳]O. Frough۱, S. R. Torabi.(۲۰۱۲. **)."Evaluation of TBM utilization using rock mass rating system: a case study of Karaj-Tehran water conveyance tunnel (lots ۱ and ۲)'**. Journal of Mining & Environment, Vol.۳, No.۲, ۲۰۱۲, ۸۹-۹۸.

[۴] M.M. Fouladgar, A. Yazdani-Chamzini, E.K. Zavadskas.(۲۰۱۲). "**Risk evaluation of tunneling projects**". archives of civil andme chanical engineering ۱۲ (۲۰۱۲) ۱ – ۱۲

[۵] P.K. Marhavilas , D. Koulouriotis , V. Gemeni .(۲۰۱۰)." **Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period ۲۰۰۰-۲۰۰۹"**. journal ournal of Loss Prevention in the Process Industries

[۶] وفایی، ف،"طراحی یک مدل ریاضی برای اندازه‌گیری کارایی مدل‌های جبرانیMADM به کمک روش تحلیلی پوششی داده‌ها"،(۱۳۸۶) رساله دوره دکتری مدیریت گرایش تحقیق در عملیات، دانشکده علوم انسانی،دانشگاه تربیت مدرس،تهران

[۷] عطایی م.(۱۳۹۵) ." **مدیریت ریسک"**.چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود. فصل ۳،۴،۵

[۸] نظری، ا. فرصت کار، ا. کیافر، ب. (۱۳۸۷). **"مدیریت ریسک در پروژه‌ها"** . چاپ اول. ریاست جمهوری. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، مرکز مدارک علمی، موزه و انتشارات. فصل ۱:۸

[۹] Søren Degn Eskesen, Per Tengborg, Jørgen Kampmann, Trine Holst Veicherts. (۲۰۰۴). "**Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association,**

Working Group No. ۲". Tunnelling and Underground Space Technology ۱۹ (۲۰۰۴) ۲۱۷–۲۳۷

[۱۰] A.H. Thomas & J.P. Banyai.(۲۰۰۷**)." Risk Management of the construction of tunnels using Tunnel Boring Machines (TBMs)"**. Taylor & Francis Group, London, ISBN ۹۷۸-۰-۴۱۵-۴۰۸۰۷-۳

[۱۱] Olga Špačková . ۲۰۱۲. "**Risk management of tunnel construction projects**". CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

[۱۲] رفیع زاده ،ا .(۱۳۸۸). **"بررسی و ارزیابی ریسک پروژه‌های عمرانی با رویکرد فازی"** . پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۱۳] Reilly, j.j., Brown, j.(۲۰۰۴). "**Management and Control of Cost and Risk for Tunneling and Infrastructure Projects**". Tunneling and Underground Space Technology, Vol.۱۹ (B۱۸). ۲۰۰۴, pp. ۱–۸

[۱۴] H.S.B. Duzgun, H.H. Einstein.(۲۰۰۴). "**Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines"**. Safety Science ۴۲ (۲۰۰۴) ۲۳–۴۱

[۱۵] Roberto Bubbico, Sergio Di Cave, Barbara Mazzarotta.(۲۰۰۴). " **Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a simplified approach "**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries ۱۷ (۲۰۰۴) ۴۷۷–۴۸۲

[۱۶] Gerard Arends et al. (۲۰۰۴)." **Risk Budget management in progressing underground works International Society for Trenchless Technology (ISTT) and International Tunnelling Association (ITA)** ".Tunnelling and Underground Space Technology ۱۹ (۲۰۰۴) ۲۹–۳۳

[۱۷] Osama A. Jannadi.(۲۰۰۸) ." **Risks associated with trenching works in Saudi Arabia** ". Building and Environment ۴۳ (۲۰۰۸) ۷۷۶–۷۸۱

[۱۸] A.G. Benardos, D.C. Kaliampakos. (۲۰۰۴). "**Amethodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling—illustrated by the Athens Metro, Greece"**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences ۴۱ (۲۰۰۴) ۹۸۷–۹۹۹

[۱۹] David B. Ashley, James E. Diekmann, Keith R. Molenaar.(۲۰۰۶)." **Guide to Risk Assessment**

and Allocation for HighwayConstruction Management ". Report No. FHWA-PL-۰۶-۰۳۲

[۲۰] Alan N. Beard. (۲۰۱۰). " **Tunnel safety, risk assessment and decision-making** ".Tunnelling and Underground Space Technology .

[۲۱] Chungsik,Yoo,Jae-Hoon Kim. (۲۰۰۳)."**A web-based tunneling-induced buildingyutility damage assessment system: TURISK** " . Tunnelling and Underground Space Technology ۱۸ (۲۰۰۳) ۴۹۷–۵۱۱.

[۲۲] Ruaidhri Farrell et al.(۲۰۰۶). " **Building response to tunnelling** ". Soils and Foundations ۲۰۱۴;۵۴(۳):۲۶۹–۲۷۹

[۲۳] رمضان نیا،ر . عطایی،م . میرزائی نصیرآباد، ح. (۱۳۹۴)." **اولویت‌بندی ریسک‌های زمین‌شناسی در تونل سازی مکانیزه با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی** ". نشریه علمی-پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

[۲۴] H.S. Chou et al.(۲۰۰۱)." **A study of liquefaction related damages on shield tunnels** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۱۶ ۲۰۰۱ ۱۸۵ Ž . ۱۹۳

[۲۵] Miguel A. Sánchez , Alberto Foyo, Carmen Tomillo, Eneko Iriarte.(۲۰۰۷). " **Geological risk assessment of the area surrounding Altamira Cave: A proposed Natural Risk Index and Safety Factor for protection of prehistoric caves** ". Engineering Geology ۹۴ (۲۰۰۷) ۱۸۰–۲۰۰

[۲۶] K, Shahriar. M, Sharifzadeh . J, K, Hamidi.(۲۰۰۷) . " **Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۳ (۲۰۰۸) ۳۱۸–۳۲۵

[۲۷] Eun-Soo Hong et al.(۲۰۰۹). " **Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۴ (۲۰۰۹) ۲۶۹–۲۷۷.

[۲۸] اصفهانی،ح.(۱۳۸۹) " **ارزیابی ریسک با روش تحلیل خطا** " چاپ اول، تهران،انتشارات کالج برتر

[۲۹] Michael Stamatelatos.(۲۰۰۲)." **Fault Tree Handbook with Aerospace**

Applications ". Prepared for NASA Office of Safety and Mission Assurance NASA Headquarters.

[۳۰] January .(۱۹۸۱)."**Fualt Tree Handbook**". U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington

[۳۱] عطایی م. (۱۳۸۸). **"تصمیم‌گیری‌های چند معیاره فازی"**.چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود. فصل ۳،۱

[۳۲] قدسی پور، ح.(۱۳۸۱). **"فرایند تحلیل سلسله مراتبی** AHP **"** ، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[۳۳] محمد فام، ا. (۱۳۹۰)."**مهندسی ایمنی**".چاپ ششم، انتشارات فن‌آوران، تهران، فصل اول

[۳۴] دفتر تحقیقات و معیارهای فنی.(۱۳۶۸)" **کتاب‌نامه تونل و تونل سازی**". چاپ اول، فصل ۱

[۳۵] S, Tarigh Azali, M, Ghafoori , G, R, Lashkaripour , J, Hassanpour.(۲۰۱۳)." **Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line ۷, Tehran Metro, Iran**".Engineering Geology ۱۶۶ (۲۰۱۳) ۱۷۰–۱۸۵

[۳۶] جودکی،و. اجل‌لوئیان،ر. (۱۳۹۳)،" **نقش شرایط زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سازندها در رخداد مخاطرات حفاری**"علوم زمین سال بیست و پنجم، شماره ،۹۷صفحه ۱۵۱تا ۱۶۲

[۳۷] G, Barzegari , A, Uromeihy , J, Zhao.(۲۰۱۴)." **Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects** ".Tunnelling and Underground Space Technology ۴۸ (۲۰۱۵) ۴۳–۵۷

[۳۸] فروغ ، ا؛ ترابی، ر. سرشکی ف. اسماعیل جلالی،م .(۱۳۹۲). " **پیش‌بینی نرخ پیشروی TBMبا استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ** "پیش بینی نرخ پیشروی TBMبا استفاده از رویکرد سیستم های مهندسی سنگ: ص۱۳-۲۵

[۳۹] F.I. Shalabi.(۲۰۰۵) ." **FE analysis of time-dependent behavior of tunneling in squeezing ground using two different creep models** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۰ (۲۰۰۵) ۲۷۱–۲۷۹

[۴۰] M. Barla, S. Ferrero, G. Barla.(۲۰۱۶)." **A new approach for predicting the swelling behaviour of expansive clays in tunnelling** ". See discussions, stats,:

[۴۱] H. Mashimo, T. Ishimura.(۲۰۰۳)**." Evaluation ofthe load on shield tunnel lining in**

gravel ". Tunnelling and Underground Space Technology ۱۸ (۲۰۰۳) ۲۳۳–۲۴۱

[۴۲] بخشنده امنیه، ح. زمزم،م،ص. (۱۳۹۴)." **کنترل نشست زمین در تونل سازی مکانیزه در محیطهای شهری با انجام اقدامات اصلاحی مؤثر در تونل خط ۲متروی تهران** ". نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن . Vol. ۱۰, No ۲۷, ۲۰۱۵, pp.۴۵-۵۹

[۴۳] Ki-Chang Hyun.(۲۰۱۵). "**Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۴۹ (۲۰۱۵) ۱۲۱–۱۲۹

[۴۴] E, Farrokh , J, Rostami.۲۰۰۹." **Effect of adverse geological condition on TBM operation in Ghomroud tunnel conveyance project** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۴ (۲۰۰۹) ۴۳۶–۴۴۶

[۴۵] E. Alavi Gharahbagh , J. Rostami , A.M. Palomino.(۲۰۱۱)**." New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications**". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۶ (۲۰۱۱) ۶۰۴–۶۱۳

[۴۶] E, Alavi Gharahbagh , J,Rostami , K, Talebi.(۲۰۱۴)." **Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۴۱ (۲۰۱۴) ۱۲۷–۱۳۶

[۴۷] Barla G., Pelizza S.(۲۰۰۰) "**TBM Tunnelling in Difficult Ground Conditions**", GeoEng۲۰۰۰-International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Vol. ۱, Melbourne (۲۰۰۰) ۱۴۷۱-۱۴۸۹

[۴۸] Zarei,H,R & Uromeihy, A، Sharifzadeh,M.(۲۰۱۰)**." Identifying geological hazards related to tunneling in carbonate karstic rocks - Zagros, Iran**".DOI ۱۰,۱۰۰۷/s۱۲۵۱۷-۰۱۰-۰۲۱۸-y

[۴۹] فصیحی ، ا. زارع ، ش. طریق ازلی، ص. (۱۳۹۱)." **انتخاب ماشین حفاری مکانیزه مناسب برای حفر تونل قطعه شرقی- غربی خط ۷مترو تهران** ". Vol. ۷, No. ۱۵, ۲۰۱۲, pp. ۷۷-۸۶

[۵۰] Shani Wallis**," Precast concrete forms the backbone of the Channel Tunnel**", Tunnell & Tunnelling Londen, England

[۵۱] بزرگمهرنیا ،ر. عدل پرور،م،ر. بزرگمهرنیا،س. (۱۳۹۰)." **بررسی روش های طراحی، تولید و نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته در تونل‌های مترو و راه‌آهن**". ۶و ۷اردیبهشت ،۱۳۹۰دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

[۵۲]Peila, D., Oggeri, C., Vinai, R. (۲۰۰۷), "**Laboratory Tests on Screw Conveyor Device for ۲- Conditioned Soil for EPB Tunneling Operations**". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ۱۳۳(۱۲), ۱۶۲۲-۱۶۲۵.

[۵۳] محمدی ، د . فروغ ، ا. صـدقی،م. (۱۳۹۳). **"ارزیابی بهســازی خاک مســیر تونل کمکی کانال ابوذر "**. اولین کنفرانس ملّی مکانیک خاک و مهندسی پی

[۵۴] Thomas Kasper, Gu¨nther Meschke.۲۰۰۵." **On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۱ (۲۰۰۶) ۱۶۰–۱۷۱

[۵۵] G، Barzegari , A، Uromeihy , J، Zhao.(۲۰۱۴)." **Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۴۸ (۲۰۱۵) ۴۳–۵۷

[۵۶] شریعت علوی ،ح . کاکایی ، ر. زورآبادی ، م .علیزاده صوری ،ب . عبداللهی،م. (۱۳۸۸). **"محاسبه ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه حفاری تمام مقطع TBMدر سنگ‌های سخت مطالعه موردی: قطعه ۱تونل انتقال آب قمرود "**. Vol. ۵, No. ۹, ۲۰۱۰, pp.۷۹-۹۱

[۵۷] سید کاظم اورعی،حسین صالح زاده، بهرام صالحی.۱۳۸۷." **محاسبه بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه TBMدر پروژه تونل انتقال آب کرج تهران با استفاده از مدل‌های تجربی "**. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷

[۵۸] محمد غفوری و صادق طریق ازلی. ۱۳۸۴.**"تأثیر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ در ارزیابی پایداری تونل کلات"**. جلد ۱۳۸۴. ۲۸۳-۳۰۲

[۵۹] پدرام روغنچی، دانشجوی کارشناسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.۱۳۸۸." **ابزار برش و مکانیزم حفر آن درTBM"**. مقاله بلور، شماره ،۲۶

[۶۰] مؤلفین. ماشین‌های حفر تونل تمام مقطع TBM" **حفاری زیرزمینی با استفاده از ماشین‌های حفر تونل تمام مقطع TBM"** . گروه مهندسی معدن دانشگاه اراک

[۶۱] آمون،ص. شریف‌زاده،م. شهریار،ک. طریق ازلی،ص. (۱۳۹۴). **"ارزیابی سایش ابزار برشی در تونل سازی مکانیزه در زمینه‌ای نرم- مطالعه موردی :تونل قطعه شمالی- جنوبی خط ۷متروی تهران ". دوفصلنامه ی علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره ی ۴؛ شماره ی ۲؛ زمستان ۱۳۹۴**

[۶۲]CAVARRETTA, M. COOPC. O'SULLIVAN.(۲۰۱۰)." **The influence of particle**

characteristics on the behaviour of coarse grained soils '. Cavarretta, I. et al. (۲۰۱۰). Ge´otechnique ۶۰, No. ۶, ۴۱۳–۴۲۳ [doi: ۱۰,۱۶۸۰/geot.۲۰۱۰,۶۰,۶,۴۱۳]

[۶۳] James C. Ni a, Wen-Chieh Cheng.(۲۰۱۱)." **Steering characteristics of microtunnelling in various deposits** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۸ (۲۰۱۲) ۳۲۱–۳۳۰

[۶۴] تاجیک،م. فروغ،ا؛ توکلی،ح. (۱۳۹۲)." **ارزیابی کیفیت نصب پوشش بتنی در حفاری مکانیزه مطالعه‌ی موردی: قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران** ".ارزیابی کیفیت نصب پوشش بتنی در حفاری مکانیزه-مطالعهی موردی: قطعهی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران: ص۳۵-۴۸

[۶۵] کرمی، م. فرامرزی، ل. باقرپور، ر. (۱۳۹۲)." **بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی و خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ بر انتخاب ماشین حفاری تمام مقطع در تونل انتقال آب سبزکوه** ". نشریه‌ی زمین‌شناسی مهندسی، جلد هشتم، شمارهٔ ۲

[۶۶] علوی ،م،ص. کریمی نسب ،س. زارع،ح . (۱۳۹۵)." **ارزیابی جریان آب ورودی به تونل‌ها به روش تانسور نفوذپذیری** ". فصلنامه پژوهشی - شماره ۱۸

[۶۷] مهتدی نیا،م. (۱۳۹۳)." **بررسی انواع آسیب‌های وارده به سگمنت های بتنی در تونل ها** ". پایان‌نامه کارشناسی ارشد . دانشگاه فنی تهران. دانشکده مهندسی معدن.

[۶۸] میرمحرابی،ح. (۱۳۹۰)" **بررسی خطر گل گرفتگی در سنگ‌های رسی (آرژیلیتی) تونل اسپر** ". هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیطزیست ایران

[۶۹] داوود جمالی و همکاران. (۱۳۹۳). "**طراحی و ساخت منعطف برای پروژه‌های بزرگ صنعت احداث در شرایط پیچیده**". پژوهش‌های مدیریت انسانی ،دوره ۴ شماره ۴

[۷۰] یاوری،ف. منصوری،ح. ابراهیمی فرسنگی،م ،ع. "**نرخ پیشروی TBM به روش سیستم‌های مهندسی سنگ**" انجمن تونل ایران.

[۷۱] صالحی، م ص.(۱۳۹۰) .سعید ابریشمی."**مطالعه تأثیر حفاری تونل‌های شهری برسازه‌های سطحی**". ششمین کنگره مهندسی عمران، اردیبهشت ۹۰ دانشگاه سمنان

[۷۲] عباسی، ر. حسینی، م.(۱۳۹۲)"**بررسی تأثیر حفاری تمام مقطع تونل مترو بر روی ساختمان‌های مجاور (مطالعه موردی؛ خط یک متروی تبریز)**". نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن ،شماره ۴،پاییز و

زمستان ،۱۳۹۱صفحه ۵۹تا ۷

[۷۳] طریق ازلی؛ ص. غفوری؛ م. لشکریپور؛ غ،ر. حسن‌پور، ج.(۱۳۹۳)."**تأثیر ذرات ریزدانه بر روی مقدار افت مخروط اسلامپ در خاک به عمل‌آوری شده با فوم برای حفاری با ماشینEPB** ".**دوفصلنامه ی علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره ی ۳؛ شماره ی ۲؛ زمستان ۱۳۹۳**

[۷۴] J. Hassanpour , J. Rostami , S. Tarigh Azali , J. Zhao.(۲۰۱۴)." **Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۴۳ (۲۰۱۴) ۲۲۲–۲۳۱

[۷۵] O. Acaroglu , L. Ozdemir , B. Asbury.(۲۰۰۷)." **A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction**". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۳ (۲۰۰۸) ۶۰۰–۶۰۸

[۷۶] تلخابی؛ه. پرچمی جلال؛م. گلابچی،م.(۱۳۹۲). " **بررســی و تحلیل علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری قراردادهای طرح و ســاخت عمرانی پروژه‌های زیرزمینی کشــور**". بررســی و تحلیل علل ایجاد ادعاهای پیمانکاری قراردادهای طرح و ساخت عمرانی پروژه های زیرزمینی کشور: ص۳۳-۱۷

[۷۷] کاتبی؛ ه. رضایی ؛ ا،ح. حاجی علیلو بناب ؛م. تاریفرد،ا. (۱۳۹۳)."**امکان‌سنجی استفاده از سربار مصنوعی برای کاهش عمق شفت ورودی ماشین حفار مکانیزه (مطالعه موردی شفت غربی خط ۲قطار شهری تبریز)** ". **دوفصلنامه ی علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره ی ۳؛ شماره ی ۲؛ زمستان ۱۳۹۳**

[۷۸] بـاقریـه ،ع. امیـدی،م. (۱۳۹۳). "**پیش‌بینی رفتــار تورم زمین های متورم شــونده در اطراف تونل**". هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل.۱۷ و ۱۸اردیبهشت‌ماه

[۷۹] جهانبانی؛ ز. عطایی؛م. سرشکی؛ ف. قنبری،ک. (۱۳۹۶)." **ارزیابی ریسک خودسوزی زغال‌سنگ در انباشتگاه زغال به روش تحلیل درخت خطای فازی".نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن** " دوره دوازدهم،شماره ،۵ صفحه ۱تا۱۲.pp ,۲۰۱۷ ,۳۵ .No ,۱۲ .Vol

[۸۰] J,Woo Cho .Seokwon Jeon . H,Young Jeong .S, Ho Chang.(۲۰۱۳)." **Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement**".Tunnelling and Underground Space Technology ۳۵ (۲۰۱۳) ۳۷–۵۴

[۸۱] H, ZHU. Q, XU. Qizhen ZHENG.Sh, LIAO. (۲۰۰۸)." **Experimental study on working**

parameters of earth pressure balance shield machine tunneling in soft ground" . Higher Education Press and Springer-Verlag ۲۰۰۸. Civ. Eng. China ۲۰۰۸, ۲(۴): ۳۵۰–۳۵۸

[۸۲] برزگری؛ق. ارومیه‌ای،ع.(۱۳۹۴) **" راندمان حفاری مکانیزه تونل به روش سپر تعادلی در زمینهای نرم و ساینده". نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن**".دوره دهم، شماره ۹۲،زمستان ۱۳۹۴،صفحه ۶۷تا ۷۹

[۸۳] احمدی،م. همتی شعبانی، ع. فروغی،ع.(۱۳۸۵).**" پیش‌بینی سرعت نفوذ TBM در حفاری سنگ سخت با استفاده از مدلNTH (مطالعه موردی تونل انتقال آب قمرود).**" نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن". دوره اول شماره ۱

[۸۵] Herrenknecht, M., & bappler, K. (۲۰۰۳). "**Segmental Concrete Lining Design and Installation**". Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar. Colorado School of Mines.

[۸۶] اشـتری ،ح، ر. مظاهر،م.**"بررسـی مدلی از بانک اطلاعاتی جهت مدیریت ریسـک ژئوتکنیک در تونل سازی "**. پانزدهمین همایش حمل‌ونقل بین‌المللی ریلی.

[۸۷] Lihui Wang et al.(۲۰۱۱)." **The energy method to predict disc cutter wear extent for hard rock TBMs** ".Tunnelling and Underground Space Technology ۲۸ (۲۰۱۲) ۱۸۳–۱۹۱

[۸۸] کاتبی، ه. (۱۳۸۹)." **تحلیل و پیش‌بینی نشـست سطحی زمین ناشی از تونل سازی (مطالعهٔ موردی: پروژهٔ خط۲ قطار شهری تبریز)** ". مهندسی حمل‌ونقل. سال اول. شماره چهارم. تابستان ۱۳۸۹.

[۸۹] اورعی ،ک. صـالحی،ب. (۲۰۰۸)." **محاسـبه بهره‌وری نیروی انسانی در پروژه تونل انتقال آب کرج – تهران** ".

[۹۰]J. Zhao , Q.M. Gong , Z. Eisensten.(۲۰۰۷)." **Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۲ (۲۰۰۷) ۳۸۸–۴۰۰

[۹۱] M,Hongsu . Y, Lijun . G, Qiuming .W, Ju.(۲۰۱۵)." **TBM tunneling in mixed-face ground: Problems and solutions** ". International Journal of Mining Science and Technology xxx (۲۰۱۵) xxx–xxx

[۹۲] مظفری، ا. هاشـمی؛ س. مولایی، ا. (۱۳۹۳)**"بررسی تحلیلی و تطبیقی ملاحظات برنامه‌ریزی، حقوقی و مالکیتی در فرآیند احداث فضـاهای زیرزمینی شهری** " بررسی تحلیلی و تطبیقی ملاحظات برنامهریزی، حقوقی و مالکیتی در فرآیند احداث فضاهای زیرزمینی شهری: ص ۱۳۱-۱۱

[۹۳] پور هاشـمی،م.(۱۳۹۰)." **مدیریت ایمنی در تونل‌های شهری- مطالعه موردی تونل نیایش، امیرکبیر و توحید**". نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل

[۹۴] صـــیادی ،ا،ر. حیاتی ،م. منجزی،م. (۱۳۹۰)**"ارزیابی، رتبه‌بندی و خوشـــه‌بندی ریســـک عملیات تونل ســـازی ســـد و نیروگاه سیمره با استفاده از روش ELECTRE**". نشـریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن. دوره ششم، شماره یازدهم، سال ،۱۳۹۰صفحه ۵۷تا ۶۹.

[۹۵] حیاتی ،م . آب روشـن، م، ر." **مدیریت ریسک در عملیات تونل سازی مطالعه موردی: راه‌آهن درود- خرم آباد** ". کنفرانس پژوهش‌های نوین در علوم و مهندسی.

[۹۶] علیزاده ،ح،ر. خراســانیان، م. علوی خوشــحال،م. (۱۳۸۴)." **بررســی مشــکلات اجرایی و خطرات زمان بهره‌برداری تونل‌های شــهری مترو) ". گزارش روش اجرای خطوط ۳و ۷متروی تهران** "، ، ۱۳۸۴موســســه مهندسین مشاور ساحل، گزارش داخلی موسسه جهت ارسال به کارفرما

[۹۷] E, Alavi Gharahbagh et al.(۲۰۱۳)." **Periodic inspection of gauge cutter wear on EPB TBMs using cone penetration testing**".Tunnelling and Underground Space Technology ۳۸ (۲۰۱۳) ۲۷۹–۲۸۶

[۹۸] Sass Æ U. Burbaum.(۲۰۰۸)."**A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines**". Bull Eng Geol Environ (۲۰۰۹) ۶۸:۲۷–۳۴

[۹۹] بخشنده ا، ح. زمزم، م، ص. موسوی، ا. طریق ازلی، ص. (۱۳۹۲)." **انتخاب مناسب‌ترین مجموعه‌ی بهسازی خاک در حفاری مکانیزه تونل خط ۷ متروی تهران** ". انتخاب مناسـب ترین مجموعه ی بهسـازی خاک در حفاری مکانیزه ی تونل خط ۷متروی تهران: ص ۱۵۴-۱۴۵

[۱۰۰] میرقاسـمپور، م ا. صـنعتی، ع. (۱۳۹۰)." **نقشـــه‌برداری زیرزمینی** ".چاپ اول. انتشـارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی. فصل ۷

[۱۰۱] Thomas Kasper, Gu¨nther Meschke.(۲۰۰۵)." **On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling** ". Tunnelling and Underground Space Technology ۲۱ (۲۰۰۶) ۱۶۰–۱۷۱

[۱۰۲] V.R. Renjith.(۲۰۱۰)." **Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation** " Journal of Hazardous Materials ۱۸۳ (۲۰۱۰) ۱۰۳–۱۱۰

[۱۰۳] خاکی، غ، (۱۳۹۰)،"روش تحقیق با رویکرد به پایان‌نامه نویسی"،چاپ اول انتشارات مرکز تحقیقات علمی کشور، تهران، ص۱۶۵-۱۶۸

[۱۰۲] V.R. Renjith.۲۰۱۰."**Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation** " Journal of Hazardous Materials ۱۸۳ (۲۰۱۰) ۱۰۳–۱۱۰

[۱۰۳]Chan. M. H. C., "A Geological Prediction and Updating Model in Tunneling", Combridge, Mss: University of MIT, ۲۳۶ p, ۱۹۸۱.

[۱۰۴]سقا زده، م . محبوبی، ا، ر.قربان بیگی،س .(۱۳۹۰)**" اثر فشار تزریق بر نشست تونل‌های کم‌عمق حفاری‌شده به روش مکانیزه در محیط‌های شهری"**. ششمین کنگره مهندسی عمران

[۱۰۵] F.S. Hollmann, M. Thewes , (۲۰۱۳),"**Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunneling**", F.S. Hollmann, M. Thewes

[106] **L Lin* and Y Xu,(۲۰۰۶) "A tensor approach to the estimation of hydraulic conductivities in Table Mountain Group aquifers of South Africa "**

[۱۰۷] Rick P. LOVAT, P.Eng,(۲۰۰۷)" **TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines.** "

[۱۰۸] اورعی،ک. (۱۳۸۷)،"نگهداری در معادن"، چاپ دوم،انتشارات دانشگاه امیرکبیر

[۱۰۹]Seyed Miri Lavasani, (۲۰۱۵)," **An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry** ", Volume ۹۳, January ۲۰۱۵, Pages ۷۵-۸۸

پیوست شماره ۱

مفاهیم و تعاریف مربوط به رویدادهای اصلی

- **خواص و نوع سنگ و خاک (A۱)**

مشخصه اصلی ماشین متعادل‌کننده فشار زمین(EPB) دارا بودن اتاقک فشار به‌منظور مقابله با فشار آب و زمین در جبهه کار تونل است. در این روش، مواد حفرشده در اتاقک خاصی به نام اتاقک حفاری یا اتاقک فشار که بلافاصله در پشت سر کاترهد قرار دارد، جمع‌آوری و فشرده می‌شوند و تشکیل پوششی را می‌دهند که نگهداری جبهه کار را تأمین می‌کند. ولی نکته‌ی مهم این است که مصالح جمع شده در اتاقک فشار باید دارای خصوصیات ویژه‌ای باشد تا بتوانند الزامات EPB را فراهم کنند. به‌عبارت‌دیگر خاک جمع شده در اتاقک حفاری باید قابلیت اعمال فشار و همچنین قابلیت انتقال داشته باشند. لازم به توضیح است که در ادبیات حفاری مکانیزه، به ویژگی‌هایی همچون قابلیت اعمال فشار و انتقال خاک، کارپذیر[۱] مصالح می‌گویند. کارپذیری مناسب برای ماشین EPB وقتی ایجاد می‌شود که خاک جمع شده در اتاقک حفاری به یک ماده همگن، پلاستیک و خمیری تبدیل شود. چنین خاکی هم قابلیت اعمال فشار به سینه کار را دارد و هم قابلیت انتقال مصالح از طریق نوار نقاله مارپیچ رادارند. بنابراین، کارپذیری شاخصی برای خصوصیت پلاستیکی خاک جمع شده در اتاقک فشار است و معیاری برای کاربری ماشین EPB در زمین‌های مختلف است. از سوی دیگر واضح است که وقتی دانه‌بندی خاک متفاوت باشد، خصوصیات کارپذیری آن‌ها نیز متفاوت است [۳۵].

- **سختی(A۲)**

سختی عبارت است از مقاومتی که کانی یا سنگ در مقابل ابزار خراش دهنده از خود نشان می‌دهد تا خراش در آن ایجاد نشود.ابزار خراش دهنده در تماس باکانی یا سنگ هستند و طی حرکت موجب ساییدگی آن‌ها می‌شوند. همه کانی‌ها یا سنگ‌ها در مقابل همه اجسام خراش دهنده

[۱] Workability

انعطـاف‌پـذیری نـدارند، به‌عبارت‌دیگر ازنظر خراش دهندگی، هم اجســـام خراش دهنده و هم خراش گیرنده طبقه‌بندی‌شـده‌اند. مقاومت برشی و سختی خاک تعیین می‌کند که خاک پایدار خواهد بود یا خیر یا اینکه چقدر در اثر فشـار بار تغییر شـکل خواهد داشـت. داشتن اطلاعات از مقاومت خاک لازم اسـت تا بتوانیم تعیین کنیم که آیا یک شیروانی (خاک شیب‌دار) پایدار خواهد ماند، یا یک ساختمان یا پل چه مقدار نشـسـت خواهد داشـت، یا تنش محدودکننده روی یک دیوار حائل چقدر خواهد بود. مهم اسـت که شـکسـت عناصر خاک را متفاوت از شکست کل یک سازه خاکی (مانند: پی ساختمان، شـیروانی یا دیوار حائل) بدانیم. برخی عناصـر خاک ممکن است قبل از شکست سازه، به اوج مقاومت خود برسـند. برای تعیین «مقاومت برشـی» و «نقطه‌ی تسـلیم» خاک از روی منحنی تنش - کرنش، می‌توان از معیارهای مختلف اسـتفاده کرد. یکی از مشـکلاتی که معمولاً در طرح‌های تونل سـازی با ماشـین حفار تمام مقطع رخ می‌دهد و کمتر به آن پرداخته می‌شود، وجود تناوب سنگ‌های سخت و نرم در سـینه کار تونل و ایجاد شـرایط سـینه کار مختلط اسـت. در این شـرایط، TBM در سینه کار ضـربات شدیدی را به هنگام چرخش دیسک کاترها (برش دهنده‌های صفحه حفار،) در لحظه برخورد با سنگ‌های مقاوم‌تر، وارد می‌کند که سبب خرد شدن آن‌ها می‌شود.

- **مقدار کوارتز(A۳)**

کانی‌های سـاینده مانند کوارتز در توده سنگ و همچنین وجود رگه‌های کوارتزی در بین لایه‌ی نرم از عوامل فرسایش و یا خرابی ابزار برشی است و علاوه بر کاهش ضریب بهره‌وری سبب کاهش نرخ نفوذ و پیشروی دستگاه TBM نیز می‌شود. سختی مواد معدنی اجزای خاک یا درصد مواد کوارتز یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده عیار سایش خاک یا سنگ در تونل زنی مکانیزه است [۳۶]،[۳۷].

- **شرایط ترکیبی زمین(A۴)**

تونل سـازی اغلب در زمین‌های ترکیبی و مخلوط و زیرساخت‌های شهری با دستگاه حفار TBM باعث به وجود آوردن مشکلات بالقوه خواهد شد که اگر اقدامات متقابل مناسب در زمان مناسب اعمال

نشـود، بیشـتر باعث مشـکلات و مزاحمت‌هایی خواهد شـد. به‌طورمعمول، شـرایط جبهه کار مخلوط می‌تواند منجر به ساییدگی برشی، تراکم تراشه‌های غلتکی، محل سکونت زمین، عملکرد ضعیف TBM و افزایش هزینه شـود. جبهه کار مختلط علاوه برگیر انداختن کاترهد، ممکن اسـت باعث افزایش نرخ رسـایش ابزار حفاری و حتی آسـیب دیدن آن شود. این موضوع کاهش نرخ نفوذ را نیز به همراه دارد [۳۸].

- **تورم زمین(A۶)**

تورم در تونل معمولاً به‌صورت سریع به‌وسیله انحرافات و تغییر مکان‌ها نشان داده می‌شود رفتار تورمی معمولاً در زمین‌هایی مشـاهده می‌شـود که به‌اندازه لازم ذرات ریزدانه رسی داشته باشند تمایل به جذب آب در این ذرات و تغییر در رطوبت طبیعت در اثرات هوای محل موجب می‌شود که زمین تا حد رطوبت مرطوب شده و سپس تا پایین‌تر از حد انقباض رطوبت خود را از دست بدهد جذب رطوبت باعث ازدیاد حجم خاک و از دسـت دادن باعث انقباض و کاهش حجم خاک می‌شـود که با استفاده از تحلیل اجزا محدود اثر عوامل مختلف بر رفتار تونل در زمین‌های متورم شونده بررسی‌شده است [۴۰].

- **ظرفیت ناکافی تحمل بار زمین(A۷)**

ظرفیت باربری خاک مقدار تنش تماسـی میانگین بین خاک و شـالوده اسـت که به گسیختگی برشـی خاک منجر شـود. تنش باربری مجاز مقدار ظرفیت باربری اسـت که به‌وسـیله ضریب اطمینان تقسـیم‌بندی شـده اسـت. بعضـی مواقع در محل‌هایی با خاک نرم، خاک زیر شـالوده بارگذاری شـده می‌تواند نشـست‌های زیاد بدون رخ دادن گسیختگی برشی حقیقی داشته باشد. در بعضی موارد، تنش باربری مجاز با توجه به حداکثر نشـسـت مجاز محاسـبه می‌شـود.حفر تونل‌های سطحی و کم‌عمق در زمین بـاعـث تغیر در میـدان تنش شـــده و یـک میـدان تغییر مکـان در منـاطق اطراف تونـل ایجاد می‌شود.این تغییر مکان‌ها چه در زمان حفاری و یا پس‌ازآن ، بعضاً اثرات جبران‌ناپذیری را رو تأسیسات که در سـطح زمین و سـازه‌های اطراف خود داشـت. برای جلوگیری از تغییر مکان‌های حین حفاری،

بایســتی انتخاب شــیوه حفاری و چگونگی اجرای آن موردمطالعه قرار گیرد. اما برای محاســبه کاهش ظرفیت تحمل بار زمین در اثر وجود حفره بایستی عوامل مختلفی را از قبیل عمق استقرار و قرارگیری تونل، قطر، خروج از مرکزیت تونل نسبت به نقطه موردبررسی ، ضخامت لاینینگ و... موردبررسی قرار گیرد [۴۱].

- **گسل‌ها و زون‌های خردشده(A8)**

زون‌های خطا در یک تونل ممکن است باعث مشکلات زیادی از قبیل فشار بالا و بار زیاد بر روی دســتگاه TBM و افزایش خطر تضعیف TBM، بی‌ثباتی یا سقوط در جبهه کار و منجر به ایجاد حفره در تاج و یک جریان ناگهانی آب و مواد سست به درون تونل شود.

تمام این رویدادهای زمین‌شناسی به علت ناحیه گسل ،موجب تأخیر طولانی و در بدترین حالت توقف دائمی پروژه می‌شود. بنابراین، تونل زنی با دستگاه TBM در چنین مناطقی با کیفیت بسیار پایین و با مشکلات زیادی همراه است. زون‌های گسلی و خردشده در مسیر تونل باعث گیر افتادن کله حفار TBM و انحراف آن از مسیر تونل، ناپایداری و ریزش سینه کار تونل، افزایش بیش شکستگی و تغییر شکل‌های حاصل از مچالـه شوندگی و یا تـورم سنگ‌ها، ناپایداری مـراحل احداث و افـزایش جریان آب زیرزمینی به داخل تونل می‌شوند **[۴۳]**.

- **درجه هوازدگی(A9)**

هوازدگی و دگرسـانی به‌عنوان عوامل مخرب، پارامترهای ژئومکانیکی سـنگ‌ها را به‌شـدت تحت تأثیر قرار داده و مقاومت ســنگ‌ها را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. دگرســانی و هوازدگی به‌عنوان فرایندهای طبیعی که پایداری و مقاومت ســنگ‌ها را کاهش می‌دهند نیازمند بررســی‌های ویژه‌ای در مطالعات مهندسی سنگ می‌باشند. ارزیابی دگرسانی و هوازدگی در شرایط مختلف و تأثیر آن بر روی خصـوصـیات مهندسـی سـنگ‌ها مطالعات ویژه‌ای را می‌طلبد. عوامل مختلفی از قبیل نوع سنگ میزبان و خصوصیات فیزیکی و شیمیائی سیالات گرمابی بر روی دگرسانی تأثیر دارند درحالی‌که

اســتعداد سنگ‌ها در مقابل هوازدگی به فاکتورهای متعددی از قبیل ترکیب کانی‌شناسی ، اندازه دانه، بافت، ساخت و شرایط محیطی بستگی دار [۴۴].

-زمین دارای شن و ماسه (A۱۰)

خواص مکانیکی مهندســی زمین دارای شــن و ماســه اشــباع‌شده، آب‌رسانی، مکانیسم شکست ناپایداری و کنترل پایداری تونل اطراف سنگ، مسائل کلیدی در طراحی و ساخت تونل در زمین دارای شــن و ماســه است. برخی از مسائل در شکست و یا ناپایداری تونل‌ها در زمین‌های شنی اطراف سنگ نیاز به مطالعه بیشتر دارد. در خاک غالب دارای شن و ماسه ، شرایط پایداری جبهه کار مسئله مهمی تلقی می‌شود که باید موردتوجه قرار گیرد [۴۵].

- نشست زمین(A۱۱)

ســاخت فضــاهای زیرزمینی باعث اغتشاش در میدان تنش زمین و تغییر شکل آن می‌شود. احداث فضاهای زیرزمینی شهری مانند تونل‌های مترو، به علت نشست حساسیت ویژه‌ای دارند. نشست زمین ازجمله مخاطراتی اســت که همواره همراه با تونل سازی همراه بوده و باعث آسیب به سازه‌های اطراف تونل می‌شود. چون در مناطق شهری اغلب نشست به‌صورت نامتقارن رخ می‌دهد، خمش و پیچش در ســاختمان‌ها افزایش‌یافته و آســیب‌های وارده بیشــتر می‌شــود. بدین منظور تونل سازی سپری یکی از روش‌های اصلی و ایمن در تونل سازی شهری است [۴۶].

- آب‌های زیرزمینی(A۱۲)

وجود آب زیرزمینی ازجمله مســائلی اســت که علاوه بر آنکه عملیات تونل ســازی را با مشــکل مواجه می‌ســازد خطراتی را نیز در پی دارد. آب زیرزمینی علاوه بر هوازدگی، شــســتشــو، کاهش زبری ســطح و تضــعیف سنگ‌های حساس به آب، با افزایش فشار منفذی و کاهش تنش مؤثر، باعث کاهش مقاومت ســنگ و خاک می‌شــود. حفر تونل در ســنگ‌ها و خاک‌های کارســتی و در زیر سطح ایستابی علاوه بر مشکلات پایداری می‌تواند توجیه اقتصادی و زمانی اجرای طرح را نیز تهدید کند. پوشش بتنی

این تونل‌ها با در نظر گرفتن فشـار هیدرو اسـتاتیکی اعمالی، طراحی‌شـده و TBMمناسـب با توجه به فشـار هیدرواسـتاتیکی و نیز نفوذپذیری سـنگ انتخاب می‌شـود. آب زیرزمینی دلیل اصـلی توقفات TBMو بـه طبع آن کاهش بهره‌وری در بســیاری از پروژه‌ها بوده اســت. تجربه‌ی به‌دســت‌آمده در پروژه‌های مختلف نشان داده است که جریان آب می‌تواند مشکلات زیادی ایجاد نماید. جریان آب‌های زیرزمینی یکی از فاکتورهایی است که همیشه بایستی در عملیات تونل زنی موردتوجه قرار گیرد. آب زیرزمینی به اشــکال گوناگون، از وجود مقدار کم آب که به شــکل مقطعی در تونل دیده می‌شــود تا شـرایطی که آب به شـکل آزاد در تونل جریان یابد، گاهی اوقات با شســتن مواد سـرازیر شدن حجم عظیمی از خاک و ســنگ مرطوب و شــل به داخل تونل و ایجاد دیگر مســائل حاد، مشــکلاتی در امر حفاری تونل ایجاد می‌کند. اگر این مشــکلات به شــکل ناگهانی اتفاق افتد،امکان توقف کامل فعالیت تونل زنی وجود دارد. مشـکلات ذکرشـده در تونل سازی سنتی بسیار خطرناک هستند، درحالی‌که در تونل سـازی مکانیزه با TBMبا تمام تأسـیسـات پیچیده الکتریکی، این مشکلات می‌تواند بسیار حادتر باشد [۴۸]،[۴۷].

- **ناپیوستگی سینه کار(A۱۳)**

این پارامتر علاوه بر تأثیر در شـرایط پایداری یکی از عوامل مهم گیر افتادن کاتر هد اسـت. این پارامتر همچنین بر نرخ نفوذ نیز تأثیرگذار اسـت. فاصـله‌داری ناپیوسـتگی‌ها برحسـب تعداد درزه در مترمکعب توده سنگ در نظر گرفته‌شده است.

- **اندازه دانه‌ها (A۱۴) و جهت‌گیری انواع دانه‌ها (A۱۵)**

برای بررسی تأثیر توزیع دانه‌بندی خاک بر روی سایش ابزارهای برشی، چند مفهوم و فاکتور باید معرفی شود. محیط‌های خاکی برحسب اندازه دانه‌ها، معمولاً شن، ماسه، سیلت و رس نامیده می‌شوند. برای تشــریح خاک‌ها، ســازمان‌های مختلف حدود جداکننده اندازه دانه‌های خاک معرفی کرده‌اند؛ به گونه ایی که چهار فاکتور مهم دانه‌بندی وجود دارد. خاک از مخلوطی از ذرات با اندازه‌ها، شــکل‌ها و

کانی‌های مختلف تشـــکیل‌شـــده اســـت. ازآنجایی‌که اندازه دانه‌های خاک آشـــکارا بر رفتار خاک تأثیر می‌گـذارد از انـدازه دانه‌ها و نحوه توزیع اندازه‌های مختلف دانه‌های خاک در دســـته‌بندی انواع خاک استفاده می‌شود. توزیع اندازه دانه‌ها نسبت حضور دانه‌ها با اندازه‌های مختلف در خاک را نشان می‌دهد و اندازه دانه‌ها معمولاً در نموداری تجمعی نمایش داده می‌شـود مثلاً درصـد دانه‌های کوچک‌تر از یک اندازه مشـخص را بدسـت می‌دهد. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی اسـت که برای اندازه‌گیری سـایش مورداستفاده قرار می‌گیرد تعیین توزیع اندازه دانه خاک است [۴۹].

- **چسبندگی دانه (A۱۶)**

خاک، آمیخته‌ای از دانه‌ها است که این دانه‌ها، گاهی دارای ویژگی چسبندگی‌اند (سیمانی شدن) و گاهی اصلاً این ویژگی را ندارند؛ درحالی‌که سنگی که این دانه‌ها از آن جداشده‌اند، شامل مجموعه‌ای از دانه‌های مختلف بوده است که با پیوندهای شیمیایی به یکدیگر چسبیده بودند.

- **شکستگی‌های موجود (A۱۷)**

به شـکسـتگی با منشأ طبیعی در یک‌لایه یا مجموعه‌ای از سنگ‌ها گفته می‌شود که در امتداد آن شـکسـتگی، حرکت یا جابجایی صورت نگرفته باشد. گرچه فرایند درزه‌ای شدن سنگ ممکن است به‌صورت مفرد نیز صورت گیرد، اما معمولاً به شکل گروهی از درزه‌ها شکل می‌گیرد که مجموعه درزه نامیده می‌شـود. تفاوت درزه با گسـل در این اسـت که در گسـل‌ها بین دو سطح شکستگی جابه‌جایی مشـخص و قابل‌اندازه‌گیری صـورت گرفته، درحالی‌که سـطوح دو طرف درزه فاقد جابه‌جایی و حرکت هسـتند. درزه‌ها فراوان‌ترین اشـکال زمین‌شـناسـی سـاختمانی هسـتند که در بیشـتر سـنگ‌ها یافت می‌شـــونـد. این اشـــکـال ازلحـاظ ظـاهر، ابعاد و شـــکل قرارگیری دارای تنوع بســـیاری بوده و در محیط‌های زمین ساختی گوناگونی روی می‌دهند. بسیاری اوقات ممکن است منشأ فشارهایی که باعث ایجاد شـکستگی در سنگ و تشکیل درزه می‌شوند، نامشخص باشد. بخش عمده درزه‌ها در سنگ‌های مستحکم و مقاوم مانند ماسه‌سنگ، سنگ آهک، کوارتزیت و سنگ خارا پدید می‌آیند

- **وجود کانی‌های ساینده (A۱۸)**

یکی از هزینه‌های عمده‌ی احداث تونل با ماشین حفار تونل در سنگ‌های سخت و زمین‌های نرم، سایش ابزارهای حفاری است. عملیات بازبینی و تعویض ابزار حفاری در زمین‌های نرم به‌ویژه در مناطق سست و زیر سطح آب زیرزمینی از طریق نگهداری پایداری جبهه کار تونل با استفاده از فشار هوا انجام می‌گیرد که عملیات هایپرباریک نامیده می‌شود. کانی‌های ساینده مانند کوارتز در توده سنگ و همچنین وجود رگه‌های کوارتزی در بین لایه‌ی نرم از عوامل فرسایش و یا خرابی ابزار برشی است و علاوه بر کاهش ضریب بهره‌وری سبب کاهش نرخ نفوذ نیز می‌شود. در تونل زنی سنتی با استفاده از حفاری و انفجار، ممکن است سنگ‌های بسیار سخت و ساینده تأثیر کمی بر روی هزینه‌های تونل زنی داشته باشند ولی در تونل زنی مکانیزه با TBM این خصوصیات تأثیرات متعددی داشته و عملیات تونل زنی ممکن است دچار وقفه ناگهانی شود. موارد بسیار زیادی وجود دارد که به علت برخورد و مواجه‌شدن ماشین TBM با دایک های آندزیتی یا دیابازی، دایک های هماتیتی، گرانیت ها، دولومیت های سیلیکاتی، ماسه‌سنگ های کوارتزی و غیره مجبور به خروج TBM از داخل تونل شده است که در این صورت تونل زنی با TBM نامناسب و پرهزینه خواهد بود که دلایل آن می‌تواند: نرخ نفوذ پائین، قابلیت دسترسی پائین ماشین به خاطر زمان لازم برای تعویض برش دهنده‌ها و هزینه بالای برش دهنده‌های سنگ باشد [۵۵].

- **زمین‌های سست (A۲۰)**

احداث تونل در زمین‌های سست از گذشته تا حال، از چالش‌های علم مهندسی بوده است. سعی و خطاهای انجام‌گرفته در طول تاریخ اطلاعات ارزشمندی در اختیار اهل این فن قرار داده است. به‌طورکلی پایدارسازی موقت و گذر از نواحی حادثه‌خیز و مشکل‌ساز هدف اصلی در طراحی و اجرای سازه‌ها در شرایط غیر خود ایستا زمین است. تعداد زیادی از تونل‌ها با شرایط زمین‌های نرم روبرو می‌شوند که این شرایط مستلزم بذل‌توجه به جنبه‌های خاصی است که انتخاب روش تونل سازی،

شـکل کنترل زمین و وسـایل نگهداری را شـامل می‌شـود. برخورد با این شرایط خاص نباید به‌صورت غافلگیرکننده باشـد و قبل از شروع اجرا با استفاده از برداشت‌های برجا و آزمایش نمونه‌ها و مقایسه با اطلاعات موجود درباره زمین‌های سـسـت، آمادگی لازم ایجاد شـود. علاوه بر این هنگامی‌که تونلی در زمین‌های نرم و سـسـت احداث می‌شـود قدرت آن به‌طور قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت و تحکیم ثانویه آن برای مدت طولانی از مهم‌ترین شـرایط پیش رو خواهد بود. نکته‌ای مهم که در این لایه‌های نرم حائز اهمیت اسـت سـاخت سـپر سـازگار با این نوع خاک ، یعنی سـازگاری تجهیزات سپر با نوع خاک،سازگاری ابزار برش و تجهیزات سپر با نوع طبقه‌بندی خاک است. [۸۴]،[۵۸].

- **اصطکاک داخلی بین ذرات خاک (A۲۱)**

مقاومت برشـی خاک در درجه‌ی اول، از اصـطکاک داخلی میان دانه‌ها ناشـی می‌شود، بنابراین مقاومت برشی در یک صفحه تقریباً متناسب است با تنش مؤثر عمود بر سطح آن صفحه. خاک از قفل و بند (اتصـال داخلی) میان دانه‌ها، مقاومت برشـی زیادی بدسـت می‌آورد. اگر دانه‌ها به‌صـورت خیلی متراکمی به یکدیگر متصل شده باشند در اثر تغییر شکل برشی تمایل به دور شدن از یکدیگر دارند دو نوع اصطکاک بین ذرات وجود دارد : ۱-اصطکاک ناشی از چسبندگی ۲-اصطکاک ناشی از وزن توده بالا و زبری بین ذرات که هرچقدر ذرات شـکل‌های نامنظم داشـته باشـند ، اصـطکاک بیشـتری ایجاد می‌کنند.

- **برخورد با قنات(A۲۲)**

مشـــکلات اجرایی خاص تونل‌های شـــهری که نه‌تنها باعث توقف عملیات اجرایی می‌شـــود بلکه هزینه‌های اضـافی متناسـب با نوع مشـکلات اجرایی را به پروژه تحمیل خواهد کرد ازجمله مشـکلات می‌توان به برخورد با چاه‌ها و قنات‌های قدیمی در حین احداث تونل اشاره کرد.

- **عدم تطابق شرایط موجود در انجام پروژه با تجهیزات خاص(A۲۳)**

در دنیای امروزی که مملو از تغییرات بوده، لزوم استفاده از ابزار و روش‌های موجود در تطبیق با

شـرایط بیش‌ازپیش روشن‌شده است. در حقیقت، اگر سازمان‌ها نتوانند خود را با محیط اطراف سازگار نمایند، قابلیت حضور جدی در عرصه‌ی رقابت را از دست خواهند داد. اجرای موفق هر پروژه مستلزم مدیریت دقیق و کارآمد فازهای مختلف اجرای آن است که هر یک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهند بود. ازجمله‌ی این فازها می‌توان به فاز برنامه‌ریزی و زمان‌بندی و تجهیزات و... اشـــاره داشـــت که در صـورت کارآمد بودن امکان دسـتیابی موفقیت‌آمیز به اهداف موردنظر پروژه را تا حد زیادی تضـمین خواهد کرد. در همین بالاییتا از دیگر مشکلات تونل سازی منطبق نبودن شرایط انجام پروژه با شرایطی که از قبل برای انجام پروژه با برنامه‌ریزی صورت گرفته است.

- **تغییرات ژئوتکنیکی غیرقابل‌پیش‌بینی (A۲۴)**

ارزیابی دقیق شـرایط زمین‌شـناسـی و خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ برای تخمین راندمان حفاری و فرسـایش صـفحه حفار، دارای اهمیت زیادی اسـت. در هر پروژه به‌منظور انتخاب دستگاه و شـرایط مناسـب مربوط به آن پروژه، معمولاً تحقیقاتی در زمینه پیش‌بینی راندمان حفاری، فرسـایش ابزار و هزینه‌های راهبری ماشـین انجام می‌شـود، اما همواره تنوع شـرایط زمین‌شـناسـی و تغییرات غیرقابل‌پیش‌بینی پارامترهـــای توده سـنگ در طول مسـیر تونل باعث کاهش راندمان و بعضاً توقف حفاری توسـط دسـتگاه حفار می‌شـود. ازجمله این عوامل می‌توان به تغییرات ناگهانی مقاومت سنگ، تناوب لایه‌های سخت و نرم، درصد بالای کوارتز در سنگ و وجود آب زیرزمینی اشاره داشت [۴۸].

- **طراحی برش دهنده(B۱)**

مطابق با آخرین کوشش‌ها و تحقیقات در حفاری سنگ ، کاملاً مشخص است که جنس و شکل ابزارهای برشـی می‌بایسـت متناسب با جنس سنگ، متغیر باشد. با آغاز استفاده از حفاری مکانیزه در صـنعت تونل سـازی و معدن ، انواع مختلفی از ابزارهای برشـی با مواد و اشـکال مختلف مورداستفاده واقع‌شـده‌اند و به‌تدریج تکامل‌یافته‌اند کاربرد ماشین حفاری تمام مقطع در تونل سازی باگذشت زمان روزبـه‌روز ابعـاد تازه‌تری به خود می‌گیرد و به اهمیت آن افزوده می‌شـــود. پیشـــرفت مداوم طراحی

ماشـین‌های حفاری مسـتلزم دانسـتن عوامل تأثیرگذار دربرش مکانیکی سنگ است. یکی از مهم‌ترین عوامل به‌کارگیری موفق ماشـین‌های حفاری، طراحی بهینه برش دهنده‌هاسـت. این نوع طراحی‌ها به مطالعه کامل شرایط زمین و مشخصات هندسی ابزار برش نیازمند است. دیسک‌های حفاری ابزار برشی هسـتند که در کله حفاری ماشـین‌های تمام مقطع نظیر ماشـین‌های تونل سـازی سـنگ سـخت مورداستفاده قرار می‌گیرند [۵۹].

- **نیروی برش دهنده، گشتاور و نیروی رانش (B۲)**

یکی از فاکتورهای اسـاسی برای بررسی عملکرد ماشین، گشتاور است. گشتاور کله حفار وظیفه چرخاندن کله حفار برای برش زمین و انتقال مواد حفرشده به اتاقک حفاری را بر عهده دارد. همچنین گشـتاور کله حفار رابطه مسـتقیمی با نیروی پیشران دارد و ازجمله فاکتورهایی است که مقدار آن در حین حفاری مستقیماً توسط اپراتور ماشین تنظیم نمی‌شود؛ بلکه تابعی از فاکتورهای دیگر است.

گشتاور کاترهد یک پارامتر مهم برای طراحی و بهره‌برداری از فشار تعادل زمین (EPB) است. بر اساس تجزیه‌وتحلیل در چند مورد از پروژه‌های تکمیل‌شده از سایت‌های شغلی، مدل تعیین گشتاور معمول بر اساس آزمایش‌ها ثابت می‌کند که به‌اندازه کافی بهبودیافته است. ترکیب‌بندی و روش محاسبه مربوطه گشتاور صفحه حفار با توجه به ساختار صفحه حفار، اصل برش و تعامل میان صفحه حفار و خاک انجام می‌شود. . نتایج آزمایش نیز نشان می‌دهد که فرمول محاسبه گشتاور برای تونل زنی سپر EPB می‌تواند به‌طور منطقی گشتاور حفاری موردنیاز صفحه حفار را در تونل زنی خاک رس، پیش‌بینی کند، اما برای تونل زنی در خاک‌های بدون انسجام، بهسازی خاک مقدار گشتاور موردنیاز را کاهش می‌دهد [۶۰].

- **انتخاب TBM (B۳)**

هم‌اکنون با توجه به نیاز به گسترش شبکه‌های متـرو و راه‌های ارتبـاطی در شـهرهای پرجمعیت و بـزرگ، همچنـین محدودیت‌های نواحی شـهری، اسـتفاده از روش‌های مکـانیزه تونل

سازی در نـــواحی شـهری اجتناب‌ناپذیر اسـت. استفاده از روش‌های مکـانیزه حفـاری تونـل مسـتلزم انتخـــاب ماشین مناسب با در نظـــر گـــرفتن شـــرایط پـروژه، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی طـــول مســـیر، تجربـه و دانـش فنـی موجود و الزامات پروژه به‌خصوص زمان‌بندی پروژه است .بـرای انتخاب ماشـــین مناســـب باید توانایی‌های ماشـــین‌های حفـــــاری در زمین‌های نرم، دامنه کاربرد و محدودیت‌های خاص هـــر یـــک بـــا توجه به شرایط زمین مسیر تونل را در نظر گرفت .اگرچه بـــا پیشـــــرفت تکنولـــــوژی ماشین‌های حفـــاری و بـــا اســـتفاده از روش‌های بهسـازی و افزودنی‌های مختلـــف، محـدوده کـاربرد ماشین‌های مختلف تا حد زیادی به هم نزدیک شده اسـت، به‌گونه‌ای که انواع سـپرهای بسته در بازه گسترده‌ای از خاک‌های مختلف با موفقیت استفاده می‌شود . حفاری تونل با راندمان موردنظر و کمتـــرین هزینـــه و مشـکلات اجرایـی بـه انتخـاب مناسب‌ترین ماشین بسـتگی دارد .بنـــابراین عـــلاوه بـــر شـــرایط زمین و قابلیت به‌کارگیری دستگاه، دیگر عوامل به‌ویژه رانـدمان حفاری و هزینه‌های مربوط نیز مدنظر قرار خواهد گرفت [۶۵]،[۴۹].

یکی از مهم‌ترین مسائل تونل سازی مکانیزه در نواحی شهری انتخاب ماشین حفاری مناسب است. شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیک بستر و نوع مصالح تشکیل‌دهنده ، تغییرات لایه‌ها، میزان سطح آب زیرزمینی،

موقعیت و شرایط خاص شهری و غیره موارد مهمی هستند که بر انتخاب ماشین و روش اجرای تونل‌های شهری مؤثر هستند.

- **انواع روش‌های نصب سگمنت (B۴)**

پس از انتقال قطعات به محوطه کاری، این قطعات در موقعیت مناســب دپو می‌شــوند. ســپس به واگن‌های حمل قطعات منتقل می‌گردند. قطعات را به دو طریق می‌توان به دستگاه نصب تحویل داد:

۱- در ناحیه کف تونل: در این حالت انتقال قطعات به‌گونه‌ای است که سطح بیرونی آن به سمت کف تونل است. این قطعات به یک میز انتقال منتقل می‌شوند، سپس دستگاه نصب، قطعات را از روی میز انتقال به سمت بالابلند می‌کند.

در ناحیه سقف تونل: تحویل قطعات به‌گونه‌ای است که سطح بیرونی آن به سمت سقف تونل است. این قطعات به یک میز انتقال که درPlatform بالائی اولین تریلر سیستم پشتیبان قرارگرفته، منتقل می‌گردند. سپس دستگاه نصب، قطعات را بلند کرده و می‌تواند آن را بچرخاند و این قطعات توسط یک بازوی انتقال به کف دنباله‌ی سپر منتقل می‌شوند. نمونه دیگری از نحوه تحویل قطعات به ماشین حفاری تونل که در تونل مانش نیز به کار گرفته‌شده است، بدین گونه بوده که در نزدیکی ماشین حفاری تونل، واگن‌های حمل از یکدیگر جداشده و سپس واگن‌های حمل قطعات به سمت جلو هل داده می‌شوند. در پروژه‌های تونلی دنیا، سیستم‌های نصب مختلفی به کار گرفته‌شده است که در زیر به دو نمونه‌ی رایج آن اشاره می‌شود.

استفاده از پین در نصب: در نوعی از این دستگاه نصب، یک پین و ۴ بولت مخروطی شکل وجود دارد که این ۴ بولت در حفره‌های مربوطه با قطعات درگیر می‌شوند.

استفاده از دستگاه نصب مکشی: از این نوع دستگاه برای قطعات با سطح داخلی صاف استفاده می‌گردد. در این نوع دستگاه یک قسمت پینی شکل وجود دارد که کار آن تحمل کردن نیروهای برشی است. در بعضی موارد برای نصب حلقه‌های قطعاتی که متشکل از تعداد زیادی قطعه بتنی بودند، از دستگاه نصب دوکله‌ای استفاده می‌شد. این روش، زمان را به نصف کاهش می‌داد که این به‌واسطه‌ی تداخل عملیات بین دو سر دستگاه نصب بود .اکنون، تمایل به کاهش تعداد قطعات یک حلقه به ۵ تا ۷ المان، استفاده ازاین‌گونه دستگاه‌های نصب را غیر جذاب نموده است [۵۱] .

- **واشر آب‌بند (B۵)**

نوار آب‌بند یا گسکت به‌منظور جلوگیری از ورود آب به داخل تونل به کار گرفته می‌شوند. این

نوارها دور قطعات سگمنتی و در محل اتصال آن‌ها به یکدیگر نصب می‌شوند. با توجه به تعداد زیاد قطعات سگمنت مورداستفاده در تونل‌هایی که با دستگاه حفاری مکانیزه حفاری می‌شوند، پایایی خواص آب‌بندی این نوارها در زمان نصب در تونل و همچنین در دوره بهره‌برداری از اهمیت بسزایی برخوردار است. بر این اساس آزمایش‌هایی به‌منظور تائید عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت نوار آب‌بند موردنیاز است.

- **بهسازی خاک (B۶)**

امروزه از تونل سازی سپری در مقیاس گسترده برای حفر تونل‌های شهری در خاک‌های نرم و کم‌عمق استفاده می‌شود. تونل سازی با EPB نیازمند بهسازی خاک است و قابلیت اجرای آن برای خاک‌های فاقد چسبندگی نیز افزایش‌یافته است.

تونل سازی با سپر EPB امروزه در محیط‌های خاکی، به دلیل ایمنی بالا، توانایی پیشگیری از جابجایی و پیشرفت سریع بخش‌های مکانیکی و الکترونیکی دستگاه، به‌کارگیری این ماشین‌ها بسیار متداول شده است. در این میان، بهسازی خاک یک عامل کلیدی برای حفاری موفقیت‌آمیز تونل در محدوده‌ی وسیعی از شرایط خاک است. استفاده از عوامل بهسازی خاک سبب تغییر مشخصات خاک می‌شود. این تغییرات، خاک را به حالت خمیری تبدیل کرده و از آن برای کنترل فشار و انتقال صحیح آن به اتاقک حفاری (در امتداد نقاله‌ی مارپیچ) استفاده می‌شود. عملیات بهسازی موجب کاهش نفوذپذیری زمین شده و مانع از چسبندگی خاک‌های رسی می‌شود. لازم به ذکر است بهسازی با تزریق فوم و پلیمر از طریق نازل‌های طراحی‌شده بر روی کله‌ی حفار به جلوی سطح جبهه کار، اتاقک چمبر، امتداد نوار نقاله‌ی مارپیچ و محفظه‌ی پشت سر کله‌ی حفار انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین اصول بهسازی شرایط خاک، انتخاب نوع مواد افزودنی و به دست آوردن اطلاعات کافی از رفتار حفر پذیری خاک در مواجهه با ماشین است . رفتار خاک را می‌توان با بررسی توزیع دانه‌بندی لایه‌های مختلف شناسایی نمود. به‌طورکلی به‌منظور حفاری با ماشین EPB همواره برای کنترل مخاطرات زمین و

همچنین داشتن یک‌روند عادی و نرمال در طی حفاری، لازم است تا لایه‌های خاکی مسیر تونل توسط مواد افزودنی مختلف (فوم، پلیمر، بنتونیت و غیره) بهسازی شود. علت این امر آن است که یک خاک ایده آل برای ماشین EPB ،خاکی است که پس از ورود به اتاقک حفاری تبدیل به یک ماده بالستیک و خمیری باقابلیت اعمال فشار به جبهه کار، نفوذپذیری کم برای جلوگیری از زهکش شدن آب زیرزمینی و آب‌بند کردن آن، خاصیت کم چسبناکی جهت عدم انسداد کله حفار، عدم افزایش در مقدار گشتاور ماشین و کاهش سایش ابزارهای برش و کله حفار باشد [۵۳].

- **تعداد دیسک(B ۷) ،زاویه دیسک (B۸)، موقعیت دیسک(B۹)،فاصله دیسک(B۱۰) و توزیع غیر یکنواخت دیسک ها(B۱۱)**

در سنگ‌های نرم تنها از یک نوع ابزار برش برای حفر تونل استفاده می‌گردد اما در ماشین‌هایی که در سنگ‌های سخت‌تر کار می‌کنند، امکان دارد که در یک ماشین از ابزارهای مختلفی استفاده شود .الگوی چیدمان ابزار برش بر روی صفحه حفار در زمین‌های مختلف متفاوت است، اما به‌طورکلی ابزار برش پس از نصب به سه گروه مرکزی ، میانی و محیطی تقسیم می‌شوند. در مورد مشخص نمودن تعداد برش دهنده‌ها باید در مرحله اول فاصله بهینه کاترها از یکدیگر تعیین شود و بعد با داشتن فاصله بین کاترها از هم و داشتن سطح صفحه حفار تعداد کاترها مشخص می‌شود و همچنین پارامتر مهم دیگر در مورد دیسک‌ها، زاویه قرارگیری لبه دیسک‌ها است که با افزایش زاویه لبه دیسک نیروی رانش افزایش می‌یابد ، اما نیروی چرخش تغییر چندانی نمی‌کند و همچنین انرژی مخصوص تغییر کمی می‌کند [۵۵].

- **سرعت چرخش صفحه حفار(B۱۲)**

ماشین‌های حفار تونل (TBM) راه طولانی را طی کرده‌اند و به ابزاری قابل‌اعتماد، همه‌کاره، و تا حدودی هوشمند تبدیل‌شده‌اند. استفاده از این ماشین‌ها زمانی مؤثر و کارآمد خواهد بود که قبل از حفاری، از نوع زمین و ماشین حفار را برای آن شرایط خاص شناخت کافی داشته باشیم تا بتوان برای

شرایط موجود ماشین حفار مناسب را طراحی کرد. در همین بالاییتا، طراحی صفحه حفار از مهم‌ترین بخش‌های یک ماشـین حفاری تونل اسـت که مستقیماً با شرایط زمین مورد حفاری در ارتباط است و به‌صورت قابل‌توجهی می‌تواند عملکرد ماشین حفار را تحت تأثیر قرار دهد.سرعت چرخش صفحه حفار ازجمله پارامترهای بسـیار مهمی اسـت که حفاری و پیشـروی و میزان نرخ نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهد ، پس برای انتخاب سـرعت مناسـب صفحه حفار بایستی مطالعات و اطلاعات دقیقی از شرایط کاری پروژه داشته باشیم [۶۵].

- **گشتاور نوار نقاله(B۱۳)**

به علت پیشـرفت‌های مکانیکی و اسـتفاده مؤثر از افزودنی‌ها به خاک برای بهسازی آن و همچنین شرایط زمین تعداد قابل‌توجهی از برنامه‌های کاربردی در سبالایر جهان با استفاده از ماشین‌های تونل زنی تحت‌فشار (EPB) مواجه هستند. بهسازی مناسب خاک ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی خاک را تغییر می‌دهد و آن را برای کنترل فشـار در محفظه دستگاه و خروج با نوار نقاله پیچ به‌طور مناسب فراهم می‌کند. سـیسـتم اسـتخراج مواد حفاری‌شـده یا نوار نقاله نقش اساسی در طول عملیات EPB به‌ویژه برای استفاده صحیح فشار جبهه کار دارد. نوار نقاله‌ها مسئولیت انتقال خاک‌های حفاری‌شده به پشت دستگاه را بر عهده‌دارند. چند دستگاه نوار نقاله ساده به‌صورت ترکیبی می‌توانند این مهم را انجام دهند. هر یک از این دسـتگاه‌ها به‌وسـیله یک الکتروموتور و یک دسـتگاه گیربکس سـاده به حرکت درمی‌آیند. تکیه‌گاه الاسـتیک نوار نقاله بر روی غلتک‌های کوچک و بزرگ قرارگرفته اسـت که این غلتک‌ها به‌صورت دستی روغن‌کاری می‌شوند.

- **سیستم زهکشی(B۱۴)**

یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات پیش رو در عملیات تونل سازی در مقاطع سنگی، ورود جریان آب به درون محیط تونل اسـت که از طریق ناپیوسـتگی‌ها و خلل و فرج در دیواره‌ی تونل صـورت می‌گیرد. ازجمله مهم‌ترین مشـکلاتی که به علت نشـت آب به درون محیط تونل گریبان گیر عملیات

می‌شود، می‌توان به مواردی همچون کاهش پایداری دیواره و سقف تونل، اعمال فشار مازاد بر سیستم نگهدارنده دائم و موقت، تأثیرات تخریبی بر وضـــعیت ژئومکانیکی ســـنگ، و همچنین وجود آب‌های زیرزمینی با شـدت زیاد اشـاره کرد. یکی از راه‌های مقابله با مشکلات ناشی از خطر نشت آب به درون تونل‌ها اسـتفاده از یک سـیسـتم بهینه زهکشی با در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار در این انتخاب است [۶۶].

- **عدم ساخت مناسب سگمنت (B۱۵)**

مراحل طراحی پوشـــش بتنی (لاینینگ بتنی) شـــامل۱- :تعیین پارامترهای هندســـی، ۲-تعیین اطلاعات ژئوتکنیکی، ۳-انتخاب مقاطع بحرانی، ۴-تعیین خصـوصیات مکانیکی ماشین حفاری تونل، -۵تعیین خصوصیات مواد، ۶-تعیین بارهای وارده برلاینینگ (بارهای استاتیکی، بارهای فشاری ناشی از جک‌های جلوبرنده، بارهای سیستم پشتیبانی، بارهای ناشی از تزریق ثانویه، بار مرده و بارهای ناشی از سـیسـتم نصـب قطعات) و ۷-مدل طراحی اسـت که نهایتاً با ارائه نتایج محاسـبه‌شـده پایان می‌یابد [۶۷]،[۵۱].

الف: پارامترهای طراحی هندسی : پارامترهای هندسی طراحی شامل عرض، طول، ضخامت، تعداد، درزه‌های مابین قطعات و پهلوهای قطعات است. عرض قطعات به‌طورمعمول بین(۱/۲متر)برای تونل‌های با قطر(۳/۵مترتا ۱/۸متر) برای تونل‌های با قطر ۱۰متر متغیر است. طول قطعات ازنقطه‌نظر مسائل اجرایی نباید بیشتر از ۶ متر باشد. ضخامت قطعات برای سیستم‌های باز انعطاف‌پذیر به‌طورمعمول بین ۲۰تا ۳۵ سانتیمتر است و برای سیستم‌های یک‌لایه و دارای سیستم آب‌بندی، بین ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر است. تعداد قطعات یک حلقه در پروژه‌های تونلی مختلف، متفاوت است. درزه‌های مابین قطعات یک حلقه را درزه طولی یا درزه شعاعی و درزه مابین قطعات دو حلقه مجاور را درزه محیطی یا دایروی می‌نامند.

ب -**محاسبات ساختاری**

محاسبات طراحی سطح مقطع لاینینگ تونل باید برای مقاطع بحرانی زیر صورت گیرد:

مقاطعی که بیشترین و کمترین روباره رادارند یا بالاترین و پایین‌ترین سطح ارتفاعی آب زیرزمینی را شامل می‌شوند. مقطعی که دارای سربار بزرگی است، مقطع با بارهای نامتقارن یا با سطح غیریکنواخت ازنظر ارتفاعی،

مقطعی که در مجاورت تونل دیگری است و یا اینکه در آینده قرار خواهد گرفت.

ج- بررسی ضریب اطمینان مقطع لاینینگ

بر اساس نتایج نیروهای داخلی، ضریب اطمینان مقاطع بحرانی باید با استفاده از روش طراحی حالت حدی یا روش تنش مجاز، موردبررسی قرار گیرد. این مقاطع عبارتند از :مقطع با حداکثر ممان خمشی منفی، مقطع با حداکثر ممان مثبت و مقطع با حداکثر نیروی محوری. همچنین ضریب اطمینان لاینینگ باید در برابر نیروی جک‌های سپر نیز موردبررسی قرار گیرد.

د محاسبات ساختاری درزه‌ها

در درزه‌ها بولت ها به‌عنوان تسلیح ارزیابی می‌گردند. ضریب ایمنی درزه باید با روشی مشابه با آنچه برای بررسی ضریب ایمنی قطعه لاینینگ بیان شد بررسی شود. به‌واسطه‌ی اینکه موقعیت درزه‌ها قبل از اینکه قطعات بر روی‌هم سوار شوند نامعین است محاسبات طراحی باید برای سه مقطع بحرانی انجام گردد. اگر بولت ها فقط برای نصب بکار روند و پس از نصب برداشته شوند، درزه‌ها باید نیروی عمودی را از خود عبور دهند. نیروهایی که از یک حلقه به حلقه‌های دیگر منتقل می‌شوند، توسط جفت‌شدگی هندسی کنترل می‌گردند و به‌واسطه‌ی وجود نیروهای فشاری جک‌های سپر در این حالت، امکان توسعه ترک‌های ریز در درزه‌های محیطی وجود دارد و این بر عمر لاینینگ تأثیرگذار است، بنابراین لازم است که در هنگام تولید قطعات، کنترل کیفیت مقاومت کششی قطعه بتنی به‌منظور جلوگیری از افزایش ترک‌های موئی در نظر گرفته شود.

ازآنجاکه در ساخت قطعات بتنی پیش‌ساخته علاوه بر ملاحظات فنی خاص حداکثر نیاز روزانه نیز تأثیرگذار است، فرآیند تولید قطعات بتنی پیش‌ساخته را می‌توان به پنج مرحله تقسیم‌بندی نمود:

اختلاط ، قالب‌گیری ، پرداخت قطعات ، خارج کردن از قالب ،دپو کردن [۶۷]،[۵۱].

- **پروفایل مسیر تونل (B۱۶)**

مشخصات هندسی تونل‌ها شامل شکل و اندازه مقطع، و شیب تونـــل است . مقطـــع تونل‌ها می‌تواند به‌صـورت طاقی، نعل اسـبی، مسـتطیلی و یا دایره‌ای باشـد. البته در صـورت حفاری مقطع به‌صورت دایره‌ای، شکل مقطع نهایی را با استفاده از دال‌های بتنی به صورتی اصلاح می‌نمایند که کف تونل به‌صورت مســطح و قابل‌استفاده به‌عنوان راه و راه‌آهن باشد. تونل‌های راه و راه‌آهن ممکن اسـت به‌صورت دوطرفه و یـا یک‌طرفه عمل نمایند . تونل‌های راه به‌صورت دوطبقه نیز اجرا می‌شوند. ازجمله پارامترهای مهم در طراحی پروفایل مســیر شــیب‌محوری تونل، شــکل دهانه‌ها، مســیرهای فرار و خروجی‌های اضطراری، پناهگاه‌ها، راه‌های دسترسی گروه نجات، وجود تقاطع در داخل تونل، نوع رویه ســطح راه، تجهیزات ایمنی و اضــطراری موجود در تونل، مقاومت ســاختار و تجهیزات تونل در برابر آتش‌سوزی می‌باشند.

- **قطر زیاد تونل(B۱۷و C۱۸)**

به‌طورکلی محیط زمین در ابتدا تحت‌فشار ناشی از تنش‌های طبیعی بوده و هرگونه اختلالی همانند حفر تونل، این وضــعیت تنش را مختل کرده و ســبب پدید آمدن تغییر مکان‌هایی در مقطع زمین می‌شـود که اگر این تغییر مکان‌ها در محدوده استاندارد نباشند، موجب بروز مشکلاتی در ساختارهای ســطحی و زیرســطحی می‌شــوند که گاهی خســارت‌های زیادی را به دنبال دارند. ازجمله مهم‌ترین پارامترهایی که باعث برهم زدن این اختلال می‌شود، عمق و قطر تونل است [۷۷].

- **وزن دستگاه حفاری (B۱۸)**

ازجمله پارامترهای مهم در پیشـروی و سـرعت ماشـین در تونل سـازی مکانیزه قابلیت دسـتگاه حفاری است که خود این قابلیت با پارامترهای مختلفی ازجمله وزن دستگاه حفاری بستگی دارد. وزن ماشـین تابعی از قطر ماشـین است که با افزایش قطر ماشین وزن آن نیز افزوده می‌شود به‌طوری‌که :

وزن ماشـــینی به قطر ۲ متر ۲۰ تن و ماشـــینی با قطر ۶ متر ۱۳۰ تن وزن دارد .همان‌طور که انتظار می‌رود، افزایش وزن TBM منجر به افزایش فشـــار بر روی ســـطح و همچنین نشـــســـت می‌شـــود و همچنین بارگذاری عمودی افزایش‌یافته و باعث تشـدید تغییرات برشـی خاک در امتداد سطح مقطع حفاری و پوسته سپر می‌شود [۱۰۱].

- **نیروی رانش (B۱۹)**

منظور از نیروی رانش، نیرویی اسـت که به صفحه حفار اعمال می‌شود و صفحه حفار با آن نیرو به ســـینه کار فشـــار وارد می‌کند. این نیرو در اکثر TBMها به‌وســـیله میله‌های هیدرولیکی و از طریق بلبرینگ اصـلی دسـتگاه به صـفحه حفار وارد می‌شـود. ولی در بعضـی ماشـین‌ها سیستم اعمال نیرو به‌وسیله حفر چال پیشاهنگ در سینه کار است بدین‌صورت که چالی در سینه کار حفرشده و سیستم چال زن در این چال حفرشـده توسـط جک‌هایی محکم می‌شـود و صـفحه حفار را به سینه کار فشار می‌دهد. برای محاسبه نیروی رانش به‌صورت سرانگشتی می‌توان گفت که نیروی رانش لازم به ازای هر مترمربع صـــفحـه حفـار ۴۳ تن می‌شـــود و برای برآورد متوســـط نیروی رانش لازم برای هر یک از کـاراکترهای دیســـکی نیروی رانش لازم به ازای کیلو نیوتن حدود ۵۰ برابر قطر تونل برحســـب متر محاســبه می‌شود. نیروی پیشران ازجمله فاکتورهایی است که مقدار آن در حین حفاری توسط اپراتور برای راهبرد ماشـین در مسـیر تونل و ایجاد فشـار EPB مناسـب آن نقطه از مسیر تنظیم می‌شود. به عبارتی مقدار نیروی پیشران با توجه به نیروهای موردنیاز برای برش جبهه کار و تعادل فشار زمین در جبهه کار تونل تخمین زده می‌شود.

- **قدرت ماشین (B۲۰)**

قدرت ماشـین عبارت اسـت از مقدار نیروی اعمالی در واحد زمان توسط ماشین. و برای ماشین به قطر ۳ متر حدود ۲۰۰ کیلووات و برای ماشین به قطر ۶ متر حدود ۶۰۰ کیلووات تغییر می‌کند. قدرت ماشین متناسب با مجذور قطر ماشین است. ماشین‌های با توان بالا که در آن‌ها از دیسک کاترهای ۱۹

اینچ با ظرفیت بیش از ۳۰۰ کیلو نیوتن استفاده می‌شود، بیش از دو دهه است که در بازار وجود دارند. این ماشین‌ها برای سنگ‌های بسیار سخت مناسب‌تر بوده و سرعت پیشروی مناسبی از آن‌ها در کشورهایی همچون آمریکا، نروژ، آفریقای جنوبی، هنگ کنگ و عربستان سعودی مشاهده و ثبت‌شده است.

- **قطر دیسک‌ها (B۲۱)**

برنده‌ها، ابزار برش سنگ هستند که روی صفحه حفار نصب می‌شوند و حفر سنگ را انجام می‌دهند. زمانی که TBM حفاری می‌کند، برنده‌های TBM در سرتاسر سطح تونل می‌چرخند و زون خردشده‌ی زیر برنده را به‌طور پیوسته توسعه می‌دهند. هندسه دیسک‌های برشی توسط قطر و پروفیل لبه آن‌ها مشخص می‌شوند. درگذشته دیسک‌های برشی مورداستفاده در دستگاه‌های TBM با مقطع Vشکل و با زاویه ۲۶الی ۱۲۶ درجه تولید می‌شدند. این دیسک‌ها علیرغم نرخ پیشروی مناسب، پس از سایش لبه دیسک عملکرد خود را به‌سرعت از دست می‌دادند. امروزه برای دستیابی به کار آیی بیشتر، دیسک‌های برشی با مقطع ثابت طراحی‌شده‌اند که به‌وفور به کار گرفته می‌شوند. درصورتی‌که بار ثابتی بر دیسک‌های برشی اعمال شود، با افزایش قطر آن‌ها سطح مقطع دیسک بالا رفته و به طبع آن سطح تماس دیسک با سنگ نیز بیشتر می‌شود افزایش قطر دیسک سبب افزایش نیروی رانش می‌شود اما تأثیری چندانی در نیروی چرخش، انرژی مخصوص ندارد.پارامتر دیگری که در مبحث قطر دیسک‌ها مطرح است ، سایش دیسک‌هاست. قطر دیسک کاترها به‌طور متداول ۳۸۰ تا ۴۸۰ میلی‌متر(۱۵ تا ۱۹ اینچ) است که در این میان دیسک کاترهای با قطر ۱۲ اینچ رایج‌ترین نوع می‌باشند. اگرچه اخیراً کاربرد دیسک کاترهای با قطر بزرگ‌تر از ۱۱ اینچ نیز برای سنگ‌های بسیار سخت و ساینده رو به افزایش است [۸۷].

- **جنس کاتر ها (B۲۲)**

از آغاز به‌کارگیری موفقیت‌آمیز دیسک کاترها در دستگاه‌های حفار TBM طی ۵۱ سال گذشته

فنّاوری ساخت این ابزار به‌طور بی‌وقفه‌ای در حال تکامل بوده است که این امکان را فراهم نموده تا حفاری در سنگ‌های بسیار سخت و ساینده آسان‌تر گردد. به لطف این تکنولوژی، بازه وسیع‌تری از سنگ‌ها به کمک دستگاه‌های حفار قابل حفاری است. با استفاده از طراحی‌های جدید و توسعه مواد و آلیاژهای مقاوم در مقابل سایش، راندمان و ظرفیت باربری دیسک کاترها افزایش محسوسی داشته است [۷۳].

- **تأخیر روزانه در تعویض برش دهنده (C1)**

ازجمله مواردی که موجب تأخیر درروند حفاری می‌شوند عبارتند از: زمان تعویض برش دهنده، تعمیرات زمان‌بندی‌شده و نشده، جلو راندن ماشین، توقف عملیات به خاطر نصب نگهداری یا مشکلات ترابری، قطع برق، مشکلات ناشی از تراوش آب، تعویض نوبت و زمان نهار، تأخیرهای ناشی از کارگران و مسائل متفرقه دیگر. تمام این پارامترها باید برای تعیین واقعی بهره‌وری منظور شوند. یکی از موارد اصلی هزینه در پروژه‌های تونل زنی با استفاده از ماشین‌آلات حفاری مکانیزه تونل (TBM) در سنگ و خاک هزینه تغییر یا تعویض ابزار برش به دلیل ساییدگی یا فرسایش است. تعویض ابزار برشی یک فعالیت زمان‌گیر است که می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر نرخ پیشرفت روزانه و درنتیجه، در زمان و هزینه ساخت تونل داشته باشد. برآورد دقیق عملکرد TBM و زمان تکمیل و هزینه مربوطه، با استفاده از روش‌های مناسب، نیاز به ارزیابی دارد[۷۴]،[۷۵].

- **تسلط اپراتور (C2)**

یکی دیگر از پارامترهای مهم دیگر که در تونل سازی مکانیزه بایستی موردبررسی دقیق قرار گیرد و تسلط اپراتورهایی است که داخل TBM فعالیت می‌کنند.

- **انتخاب نوع برش دهنده(C4)**

ابزار برش ، بر روی صفحه حفار نصب می‌شوند و حفر سنگ درواقع به کمک این ابزار انجام می‌گیرد . بسته به نوع زمینی که باید حفاری شود ، ابزار برش متفاوت است و در حالت کلی آن‌ها را

به چهار دسته : ابزار برش برای حفر زمین‌های نرم ، سنگ‌های نرم ، سنگ‌های متوسط و سنگ‌های محکم تقسیم‌بندی می‌کنند . برای زمین‌های نرم و سنگ‌های نرم از نوعی ابزار برشی به نام ناخن و برای سنگ‌های نیمه سخت و سخت از نوعی دیگر از این ابزارها به نام دیسک یا دیسک نگین‌دار استفاده می‌شود [۸۰].

- **مانور حرکتی TBM (C۵)**

در پروژه‌های تونلی که توسط ماشین حفار تونل (TBM) احداث می‌گردد شروع حرکت دستگاه TBMبه دلیل نیروی قابل‌توجه لازم جهت نفوذ به خاک ، نیاز به تمهیدات خاص برای تأمین تکیه‌گاه دستگاه دارد . این موضوع در پروژه‌های مترو با توجه به عبور دستگاه TBM از ایستگاه‌های میانی در حال ساخت و آغاز مجدد حرکت TBM جهت نفوذ به خاک در هریک از این ایستگاه‌ها، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

- **خطاهای حرکتی TBM(C۶)**

ساخت تونل زنی مکانیزه در اغلب موارد به دلیل وابستگی‌های متقابل و برخورد با فرآیندهای حساس دچار اختلالاتی می‌شوند. که بعضی از این دلایل می‌تواند نقص‌های فنی، ابعاد کمبود ظرفیت ، کمبود سازمانی و چرخه تولیدی باشد. بر این اساس دستگاه و تدارکات می‌تواند برای مقابله با حوادث پیش‌بینی‌نشده و تغییر شرایط موجود اقدامات مناسب را در شرایط خاص انجام دهند. بنابراین، اختلالات احتمالی باید ابتدا مشخص و سپس تجزیه‌وتحلیل شود.

- **مونتاژ ضعیف سگمنت (C۷) و کیفیت پایین تولید سگمنت(C۴۸)**

در تونل‌هایی که با TBM ساخته می‌شوند، حفاری و سگمنت گذاری به‌صورت هم‌زمان انجام می‌شود. از مهم‌ترین فواید این نوع پوشش می‌توان به کنترل کیفیت بتن در کارخانه‌ی تولید سگمنت و نصب سریع و دقیق رینگ توسط TBM اشاره نمود؛ اما باید در نظر داشت که خرابی‌های زمان

ساخت و همچنین لب‌پریدگی[1] و پله شدگی[2] که از نقایص زمان نصب هستند، سبب کاهش کیفیت نصب پوشش نهایی تونل می‌شود. بررسی علل و شناخت مکانیزم وقوع این نواقص در بالا بردن کیفیت پوشش بتنی پیش‌ساخته‌ی تونل‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. این سیستم‌های نگهداری متشکل از تعدادی قطعات بتنی پیش‌ساخته هستند و توسط یکسری قالب‌های خاص تولید می‌شوند. این پوشش، شامل تعدادی قطعات چدنی قالب‌ریزی شده بود که در یک تونل بزرگراه در لندن استفاده شد.

- **تعویض دیرهنگام برش دهنده(C8)**

دیسک کاترها مهم‌ترین ابزار برشی در کاترهد TBM هستند که بازدید و تعویض آن‌ها یکی از عوامل اصلی تأخیر در حفاری به شمار می‌رود. بازدید و تعویض دیسک کاترها بر روی راندمان حفاری و نرخ پیشروی تأثیرگذار است و هزینه‌های بسیاری را بر پروژه حفاری تحمیل می‌کنند. یکی از هزینه‌های عمده‌ی احداث تونل با ماشین حفار تونل در سنگ‌های سخت و زمین‌های نرم، سایش ابزارهای حفاری است. عملیات بازبینی و تعویض دیرهنگام ابزار حفاری در زمین‌های نرم به‌ویژه در مناطق سست و زیر سطح آب زیرزمینی از طریق نگهداری پایداری جبهه کار تونل با استفاده از فشار هوا انجام می‌گیرد که عملیات هایپرباریک نامیده می‌شود. که زمان‌بر، هزینه‌بر و همراه با ریسک است [۷۴]،[۷۵].

- **فشار جبهه کار (C9)**

تعیین میزان فشار موردنیاز برای تأمین پایداری سینه کار تونل در زمین‌های خاکی که با دستگاه EPB حفاری می‌شوند یکی از مهم‌ترین پارامترها در پیشروی دستگاه است. این پارامتر بخصوص در مواردی که تونل در محیط‌های شهری حفر می‌شود اهمیت بیشتری پیدا می‌کند .فشار سینه کار

[1] Stepping
[2] Spalling

به‌طورکلی تابعی از عمق و قطر تونل، میزان بار سطحی، تراز آب زیرزمینی، مشخصات مهندسی خاک و تنش مؤثر است. برای تعیین فشار مناسب سینه کار(σT) روش‌های مختلفی بر مبنای محاسبات تجربی، تحلیلی و عددی گسترش‌یافته است [۷۴].

- **مدیریت مقدار حمل‌ونقل مصالح حفاری‌شده (C۱۰)**

ماشین‌آلات حفر تونل T.B.M یکی از مهم‌ترین ماشین‌آلات حفر تونل می‌باشند که قادرند تونل را به‌صورت تمام مقطع حفر کنند. در حین حفاری پارامتر مدیریت حمل‌ونقل مصالح دارای اهمیت زیادی است که باید موردتوجه قرار بگیرد.

- **کنترل اندازه ابعاد و شکل مصالح حفاری(C۱۱)**

یکی از ویژگی‌های مواد حفرشده توسط TBM این است که شکل و اندازه ابعاد مواد حفاری باید در حالت بهینه باشند تا باعث نرخ پیشروی بالا و همچنین مقدار سایش کمتر در طول عملیات حفاری باشد.گرچه معمولاً محدودیتی برای ابعاد مواد حفاری‌شده و انتقال آن‌ها وجود ندارد اما اگر ابعاد حفاری‌شده خیلی زیاد باشد ممکن است گیر کنند و عمل انتقال را متوقف سازند از طرفی مواد خیلی نرم نیز علاوه بر مشکل بهسازی ممکن است مخلوطی را تولید کنند که به‌شدت ساینده باشند [۹۱].

- **حمل غیرقابل‌کنترل مواد حفاری‌شده(C۱۲)**

اگر سیستم دفع مواد متناسب با ماشین نباشد، آهنگ پیش روی ماشین، علی‌رغم ظرفیت بالای آن، محدود به توانایی ماشین در دفع مواد خواهد بود. بنابراین، مواد حفرشده باید بلافاصله به پشت دستگاه منتقل‌شده و در آنجا به داخل نوار نقاله یا واگن‌هایی که مواد را به بیرون تونل حمل می‌کنند، تخلیه شود [۹۱].

- **فرایند حمل مصالح و کنترل مواد(C۱۳)**

قطعات سنگ‌ها و موادی که به‌وسیله صفحه حفار از جبهه کار کنده می‌شود ، باید از محل جبهه کار به پشت ماشین منتقل شود تا دستگاه بتواند به حفاری خود ادامه دهد .مواد حفرشده

به‌وسیله سیستم ویژه از جلوی جبهه کار جمع‌آوری‌شده و به داخل نوار نقاله‌ای که از داخل دستگاه می‌گذرد به پشت ماشین هدایت می‌شود در بسیاری موارد ، در محیط صفحه حفار ، سطل‌هایی تعبیه می‌شود که مواد حفاری‌شده به داخل آن‌ها ریخته شده و از درون این سطل‌ها بر روی نوار نقاله‌ای که از بدنه دستگاه می‌گذرد ، تخلیه می‌شود . سرعت چرخش سطل‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که موادی که در آن‌ها می‌ریزند به‌آسانی تخلیه می‌شود و نیروی گریز از مرکز مانع تخلیه آن‌ها نشود .

- **منحنی شعاعی تونل(C۱۴)**

ازجمله پارامترهای مهم که بر انحراف تونل تأثیرگذار است پارامتر مهم شعاع قوسی تونل است. همچنین با در دست داشتن اطلاعات مربوط به شعاع قوسی تونل می‌توان تأثیر شعاع قوسی تونل و انحراف مسیر حفاری بر روی نصب ناقص سگمنت را موردبررسی و تجزیه‌وتحلیل قرارداد.

- **دوغاب ناکافی و مواد پرکننده (C۱۵)**

از ماشین‌آلات حفاری برای ایجاد فضاهای زیرزمینی، ماشین حفاری تمام مقطع (TBM) است. در کنار استفاده از این ماشین، به‌منظور جلوگیری از نشست زمین و ورود جریان آب به داخل تونل حفرشده و نگهداری از ماشین و تجهیزات مربوط به آن و تسریع انجام پروژه، در حین حفاری از سگمنت‌های پیش‌ساخته بتنی استفاده می‌شود. به‌کارگیری این نوع قطعات بتنی به علت تفاوت میان شعاع حفرشده توسط دستگاه و شعاع خارجی سگمنت‌ها مستلزم استفاده از دوغاب به‌عنوان ماده پرکننده فضای خالی میان سگمنت و دیواره حفرشده است. این دوغاب به‌علاوه برای کاهش نشست زمین، اتصال یکنواخت و یکدست میان زمین و سگمنت و نگه‌داشتن سگمنت های به‌کاربرده شده در جای خود به کار می‌رود. این نوع دوغاب از مخلوط موادی از قبیل سیمان، بنتونیت، آب و مواد افزودنی دیگر با نسبت‌های خاص ساخته می‌شود.در حفاری با TBM فضای خالی بین سگمنت ها و دیواره‌های تونل حفاری‌شده با استفاده از MORTAR و یا GROUT بلافاصله پس از نصب سگمنت و خروج

رینگ بتنی از Tail skin پر می‌شـــود. تزریق دوغاب پرکننده پشـــت ســـگمنت[1] به جهت به حداقل رسـاندن نشـست زمین و تثبیت رینگ یا سگمنت نصب شده در جای خود به هنگام پیشروی TBM انجام می گیرد و بسیار حائز اهمیت است.

- **نصب نادرست سگمنت (C۱۶)**

از قطعات بتنی پیش‌سـاخته اسـتفاده‌های گسـترده‌ای از گذشته تاکنون در ساخت تونل‌ها گردیده اسـت. بدیهی اسـت تاکنون تحقیقات زیاد در این زمینه انجام‌شـده است. پس از حفر، عملیات حفاری متوقف‌شـــده و قطعات پیش‌ســـاخته بتنی که در کارگاه دیگری تولید و با تریلی به محل حفاری حمل شـده، توسـط واگن‌های مخصـوص حمل [2]به داخل تونل و جلوی دسـتگاه برده می‌شـوند. سپس این قطعات پیش‌سـاخته به ترتیب توسط دستگاه حمل‌کننده یا Erector ، که قادر است ۳۶۰ درجه حول محور خود بچرخد در جای خود قرارگرفته و بلافاصله به‌وسیله پیچ و مهره‌های قوسی شکل به قطعات نصـب‌شـده قبلی متصـل و تثبیت می‌گردند. بدیهی است که حر گونه اختلال درروند فوق باعث نصب نادرست سگمنت های تونل خواهد شد[۵۱].

- **قطع یا فاصله دادن به سگمنت ها(C۱۷)**

قطع یا فاصـــله دادن به ســـگمنت ها در طول عملیات تونل ســـازی مکانیزه باعث توقف تمام پروژه خواهد شد. از یک‌سو ورود جریان آب به داخل تونل و از سوی دیگر تأمین نیروی تکیه‌گاه برای به جلو راندن TBM دچار اختلال خواهد شد.

- **نوع TBM(C۱۹)**

به علت محدودیت دامنه کاربرد TBM ها در شـرایط پیچیده و نامطلوب زمین‌شناسی، انتخاب این ماشین‌ها با بررسی‌های دقیق دستگاه و شرایط محیط انجام می‌شود. شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات

[1] Backfill grouting

[2] SegmentCar

ژئومکانیکی توده -سنگ ازجمله مهم‌ترین پارامترهایی است که همواره اجرای تونل‌ها را تحت‌الشعاع قرار داده و می‌تواند در انتخاب نوع TBM مناسب، نقش به سزایی داشته باشد. امروزه بسیاری از حفاری‌های زیرزمینی با وسایل مکانیکی انجام می‌شوند. در این میان رایج‌ترین نوع حفاری مکانیکی در سنگ، استفاده ازTBM ها است که برای حفر تونل‌هایی با مقاطع دایره‌ای شکل به کار می‌روند TBMها نسبت به تغییر شرایط زمین، انعطاف‌پذیری زیادی ندارند و عملکرد TBM نسبت به تغییر شرایطی مانند نوع سنگ، جریان آب زیرزمینی، وجود گسل و درزه و سایر ویژگی‌های ساختاری بسیار حساس است. بنابراین انتخاب نوع TBM مناسب برای حفاری تونل باید بااحتیاط انجام شود.

- **خرابی سگمنت(C۲۰,D۱۰)**

استفاده از این نوع پوشش، معایبی نیز به همراه دارد که در اینجا به بررسی دو نقیصه‌ی پله شدگی و لب‌پریدگی در زمان نصب پرداخته می‌شود در حفاری مکانیزه، پوشش تونل باید توانایی تحمل بارهای وارده بر آن را داشته باشد. هرگونه افزایش تنش در جسم که فراتر از مقاومت آن باشد منجر به شکستگی می‌شود. در مورد سگمنت نیز افزایش بارهای وارده و ضربات ناگهانی می‌تواند سبب تمرکز تنش شده و صدماتی از قبیل ترک‌خوردگی، لب‌پریدگی و شکستگی را به وجود آورد. در موارد خاص، علاوه بر بارهای اعمال‌شده، پوشش بتنی باید در مقابل عواملی از قبیل واکنش شیمیایی آب‌های زیرزمینی و فاضلاب‌ها، یخزدگی‌های مکرر، بار ترافیک و آتش‌سوزی نیز مقاوم باشد که بررسی این عوامل در مرحله‌ی طراحی ضرورت دارد. علاوه بر طبقه‌بندی ،*JSCE* برخی از محققین نشان داده‌اند مقدار رواداری در ابعاد سگمنت های تولیدشده، نصب نامناسب رینگ، فشار تزریق غیریکنواخت، انحراف ماشین حفاری و نوع و تعداد سگمنت در رینگ می‌توانند در تغییر شکل و پله شدگی رینگ مؤثر باشند [۶۴].

- **عدم بهسازی خاک(C۲۱،۲۲،۲۳،۲۴)و عدم بهسازی خاک در نوارنقاله پیچ(C۲۲)و عدم بهسازی خاک در جبهه کار(C۲۳)و عدم بهسازی خاک در محفظه(C۲۴)**

تونل ســـازی با ســـپر EPB امروزه در محیط‌های خاکی، به دلیل ایمنی بالا، توانایی پیشـــگیری از جابجایی و پیشـرفت سـریع بخش‌های مکانیکی و الکترونیکی دستگاه، به‌کارگیری این ماشین‌ها بسیار متداول شـده اسـت. در این میان، بهسازی خاک یک عامل کلیدی برای حفاری موفقیت‌آمیز تونل در محدوده‌ی وسیعی از شرایط خاک است.

اسـتفاده از عوامل بهسـازی خاک سـبب تغییر مشـخصات خاک می‌شود. این تغییرات، خاک را به حالت خمیری تبدیل کرده و از آن برای کنترل فشـار و انتقال صحیح آن به اتاقک حفاری (در امتداد نقاله‌ی مارپیچ) اسـتفاده می‌شـود. عملیات بهسـازی موجب کاهش نفوذپذیری زمین شـده و مانع از چسبندگی خاک‌های رسی می‌شود. لازم به ذکر است بهسازی با تزریق فوم و پلیمر از طریق نازل‌های طراحی‌شـده بر روی کله‌ی حفار به جلوی سـطح جبهه کار، اتاقک چمبر، امتداد نوار نقاله‌ی مارپیچ و محفظه‌ی پشـت سـر کله‌ی حفار انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین اصول بهسازی شرایط خاک، انتخاب نوع مواد افزودنی و به دست آوردن اطلاعات کافی از رفتار حفر پذیری خاک در مواجهه با ماشین است. در حفاری زمین‌های نرم توسـط دسـتگاه حفار، فوم به‌صـورت عاملی خارجی وارد محیط سـینه کار می‌شـود. به‌طورکلی مواد افزودنی در جبهه کار تونل، محفظه پشـت کاترهد (چمبر) و نقاله مارپیچ تزریق می‌گردد .تزریق در جبهه کار و از طریق نازل‌های طراحی‌شـده بر روی کاترهد، می‌تواند سـبب کاهش اصطکاک بین کاترهد و ابزارهای برشی و بدنه کاترهد با خاک و جلوگیری و کاهش سایش این قطعات شود. با تزریق فوم، خاک و زمین غیر چسبنده و نفوذناپذیر اصلاح می‌شود. بدین ترتیب که فوم به خاک حفاری‌شـده، اضـافه‌شـده و بخشی از ساختار دانه‌ای آن را تکمیل می‌کند و لذا باعث سهولت جریان مواد حفاری‌شـده و ایجاد لایه‌ای نفوذناپذیر در خاک می‌شود. استفاده از فوم مزایای دیگری نیز دارد که ازجمله آن‌ها اصلاح خواص مواد حفرشده و بهبود سیالیت آن‌ها توسط عمل لیز سازی، کاهش خطر گیرکردن در اتاق اختلاط، کاهش ساینده‌گی مواد حفرشده و افزایش عمل ابزارهای برشی است.

پلیمرها نیز در بهســازی خاک، با جذب آب یا خشــک نمودن خاک‌های مرطوب و بهبود ســاختار خاک به کار می‌روند .هدف اصــلی اســتفاده از پلیمرها، مدیریت نگهداری جبهه کار و حمل‌ونقل در

خاک‌های سست درشت‌دانه است. همچنین پلیمرها می‌توانند برای کاهش چسبندگی روی تیغه‌های نوار نقاله، در محفظه‌ی حفاری، مورداستفاده قرار گیرند. هنگامی‌که فوم به خاک اضافه می‌شود، حباب‌های هوا، چگالی دوغاب خاکی را کم کرده و اصطکاک بین دانه‌های خاک را کاهش می‌دهند، بنابراین فوم باید پیش از متلاشی شدن حباب‌های هوا به خاک جلوی جبهه کار اضافه شود .فوم قابلیت تراکم خاک را افزایش می‌دهد. اگر فشار در محفظه‌ی حفاری کاهش یابد، هوای داخل ساختار خاک - فوم منبسط می‌شود و خاک داخل محفظه تغییر شکل خواهد داد [۸۲]،[۵۳].

- **سیستم زهکشی(C۲۵)**

ورود آب به تونل‌ها یکی از مهم‌ترین مشکلات تونل سازی در محیط‌های سنگی است. زیرا در این محیط‌ها جریان آب به‌وسیله ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. این مسئله باعث ایجاد مشکلاتی مانند کاهش پایداری توده سنگ، افزایش فشار روی سیستم‌های نگهداری، تأثیر مخرب روی پارامترهای ژئومکانیکی محیط و همچنین خطرات جانی و مالی می‌شود .تخمین آب ورودی به تونل جهت طراحی سیستم زهکشی کارآمد و همچنین پیش‌بینی تأثیر فرآیند زهکشی بر محیط‌زیست ضروری است. درصورتی‌که سوراخ کردن سفره آب زیرزمینی باعث صدمات زیست‌محیطی یا اجتماعی نگردد ، با خارج کردن آب با استفاده از تکنیک‌های (زهکشی) داخل تونل ، خارج تونل، از محیط پیرامونی تونل می‌توان باعث افزایش مقاومت سنگ جداره

تونل شد . و بدین روش می‌توان با کمترین هزینه از محیط آبدار عبور کرد

- **جابجایی دوربین‌های TBM (C۲۶)**

با پیشرفت تکنولوژی و ساخت وسایل و تجهیزات حفر تونل ازجمله دستگاه‌های (TBM) نه‌تنها نیاز به پرسنل نقشه‌برداری همچنین عملیات مربوط به آن کاهش نیافته، بلکه نیازمند حساسیت و دقت‌های بالاتری نیز است . با توجه به ساخت دستگاه‌های حفاری مکانیزه در کشورهای مختلف، سیستم‌های نقشه‌برداری مختص به آن نیز به‌منظور هدایت دستگاه حفار مورداستفاده و بهره‌برداری

قرار می‌گیرد. در این بالاییتا و با توجه به دستگاه‌های TBM موجود در کشور، سیستم‌های نقشه‌برداری همچون PPS و TACS ، VMT، ZED برای هدایت دستگاه‌ها استفاده می‌گردد. با عنایت به اینکه هدف اصلی تمامی سیستم‌های نقشه‌برداری TBM تعیین مختصات کاترهد و هدایت دستگاه مطابق با مسیر طراحی‌شده تونل است، لیکن هر یک از این سیستم‌ها دارای محاسن و معایبی بوده که می‌توان با بررسی آن، بهترین سیستم را برای ناوبری دستگاهTBMدر پروژه‌ها انتخاب نمود.

- **کارشکنی (C۲۷)و خطای اپراتور (C۲۸)**

با توجه به حساسیت‌ها و دقت در تونل سازی مکانیزه و همچنین شرایط کاری در زیرزمین و تونل دو پارامتر کارشکنی‌ها و خطاهای ناشی از اپراتورها خطاهایی مهم و قابل‌اجتناب هستند که بایستی توسط مدیریت کارگاه بررسی شوند.

- **عدم تأمین قطعات (C۲۹)**

با توجه به ماهیت تمامی پروژه‌های عمرانی ، خصوصاً پروژه‌های بزرگ سدسازی و تونل سازی پیش‌بینی و برآورد ماشین‌آلات و تجهیزات موردنیاز ونحوهٔ به‌کارگیری آن‌ها نقش بسزایی در پیشرفت فیزیکی و کیفی پروژه همچنین میزان هزینه‌های جاری خواهد داشت . در این میان مؤثرترین آیتم ، قطعات مصرفی ونحوهٔ تأمین آن است ، که عدم تأمین و تعویض به‌موقع خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به کیفیت اجرایی و اقتصاد پروژه متحمل می‌نماید .

تجربه اکثر کارگاه‌های داخلی مؤید این نکته است که عدم آموزش صحیح کاربران ماشین‌آلات ورامین نشدن بهنگام قطعات مصرفی عامل بنیادی توقفات اجرائی بوده است و بعضاً به علت تأمین نشدن قطعات مصرفی جزئی، ماشین‌آلات به مدت طولانی متوقف خواهند گردید.از سوی دیگر با توجه به این امر که تولیدکنندگان قطعات اصلی اکثر ماشین‌آلات وارداتی خود کشورهای مبدأ می‌باشند ، سفارش و خریداری قطعات از طریق نمایندگان داخلی و یا به‌صورت مستقیم مستلزم صرف زمان و هزینه‌های بالا است.

- **ضعف فنی در تعمیر و نگه‌داری(C۳۰) و نقص تجهیزات(D۶) و فرسوده بودن ماشین آلات(D۷)**

در شـرکت‌های عمرانی ، نیروی انسانی، ابزار و تجهیزات ، منابع انسانی و مالی نقش مهم و بسزایی در پروژه ایفا می‌کنند. در شـرکت‌هایی که اغلب فعالیت‌هایشـان راه‌سازی ، تونل سازی، سدسازی و ... است، نقش ماشین‌آلات به‌عنوان بخشی از ابزار و تجهیزات شرکت، بسیار کلیدی است. با توجه به رشد فزاینده قیمت ماشـین‌آلات عمرانی، سـال‌هاسـت که در شرکت‌های عمرانی ، سعی بر ارائه راهکارهایی جهت تقویت سـیسـتم نگهداری و اسـتفاده بهینه از ماشـین‌آلات عمرانی شـده اسـت که غالباً این سیستم‌ها در حد استانداردهای بین‌المللی نمی‌باشند.

- **هدایت نادرست دستگاه حفار(C۳۱)**

سـاخت تونل با استفاده از ماشین حفاری مکانیزه (TBM) مستلزم تعیین موقعیت دقیق دستگاه و هدایت در فضـای زیرزمین اسـت. برخلاف راه‌های سـنتی حفر و هدایت تونل با اسـتفاده از روش‌های همچون لیزر، هدف پیشـنهاد این روش توسـعه یک عملیات جایگزین برای تسـهیل هدایت ماشـین حفـاری مکانیزه و همچنین راه‌های تهیه ازبیلت تونل برای بررسـی عملیات حفاری مکانیزه در طول مسـیبالاییت. یک سـیسـتم هدایت تونل برای ماشین حفاری مکانیزه باید به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شـود که به‌طور پیوسـته بتواند به پایش موقعیت ماشـین حفار مکانیزه بپردازد؛ و همچنین به اپراتور برای هدایت صـحیح ماشـین حفار کمک کند. کنترل ماشـین حفاری مکانیزه برای اپراتورها مانند رانندگی در یک وسیله نقلیه در تاریکی کامل است درنتیجه برای پروژه حفاری تونل به روش مکانیزه ایجاد یک سـیسـتم بی‌نقص نقشه‌برداری مهندسی ضروری است تا با استفاده از این سیستم دو هدف مهم حاصـل شـود یعنی اینکه تونل مطابق با خط پروژه حفر شـود و مهم‌ترین واصـلی‌ترین هدف این است که تونل ساخته‌شده به‌گونه‌ای باشد که از تلورانس‌های مجاز تخطی نکرده باشد.

سـیسـتم هدایت TBM با اسـتفاده از پی پی اس (PPS) برای ایجاد حداکثر اطلاعات مختصـاتی موردنیاز در ماشـین‌های حفاری تونل (TBM) طراحی گردیده اسـت. صـفحه‌نمایش نهایی اطلاعات

به‌گونه‌ای طراحی و مرتب گشته است که حداکثر تمرکز لازم را برای اپراتور دستگاه برای کار حفاری داشته باشد. سیستم PPS به‌طور خودکار موقعیت دقیق و میزان رانش TBM را در یک فضای ۳ بعدی بدست می‌آورد. همچنین PPS تمامی اطلاعات لازم را درباره خروج دستگاه از محور طراحی‌شده محاسبه کرده و نمایش می‌دهد. در این حالت مسیر طراحی‌شده به‌گونه‌ای نمایش داده می‌شود که اپراتور بتواند در یک مرحله حفاری بهترین و بهینه‌ترین مسیر را برای برگرداندن دستگاه به روی خط حفاری طراحی‌شده انجام دهد .برای تونل‌هایی که با نصب سگمنت های بتنی تکمیل می‌گردد در کنار هدایت TBM سیستم پی پی اس (PPS) به کمک برنامه محاسبه رینگ بهترین گزینه چیدن سگمنت را در یک تونل به نمایش درمی‌آورد.

- **محدودیت‌های اعمال‌شده توسط مقررات محلی(C۳۲)**

در فرآیند برنامه‌ریزی برای احداث فضاهای زیرزمینی شهری، توجه به حقوق خصوصی و عمومی امری ضروری بوده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بی‌توجهی به حقوق عوامل ذی‌نفع، مؤثر و نقش‌پرداز در احداث این فضاها می‌تواند به بی‌عدالتی، نارضایتی مالکین و عدم موفقیت در کاربری این فضاها منجر شود .تعیین دقیق مرز مالکیت فضاهای زیرسطحی در کشورها و مناطق مختلف دنیا متفاوت است.

الف - مسائل حقوقی پیش از اجرای پروژه و در زمان طراحی:

مهم‌ترین موضوع در این مرحله موضوع معارضین و ملاحظه ماده ۱۳۶ قانون مدنی یعنی رعایت حریم است . مصادیقی که در این رابطه موضوعیت دارد عبارتند از: حریم آثار تاریخی، حریم چاه‌ها و قنوات، حریم خطوط انتقال برق، حریم راه و راه‌آهن و مترو، حریم فرودگاه.

ب - مسائل حقوقی در حین اجرای پروژه:

موضوع تملک زمین و ساختمان‌های تحت تأثیر احداث فضای زیرزمینی از مباحث مهم آن است. مهم‌ترین قوانینی که برای این منظور به آن استناد می‌شود عبارتند از: قانون تأسیس ۱۳شرکت قطار شهری تهران و حومه ، ۱۳۲۲/۲/۱۶مصوب قانون احداث تونل مشترک تأسیساتی مصوب

۲۷/۱۱/۱۳۷۲و ماده۱۷۲ قانون برنامه پنجم توسعه.

ج- مسائل حقوقی در زمان بهره‌برداری از پروژه:

در این مرحله حقوق مالکانه فضـاهای زیرسطحی و فضاهای رو سطحی تقریباً شبیه به هم است و عبارت اسـت از حقوقی که طبق قوانین و مقررات موجود و عقودی که بین افراد منعقد می‌شود به هر مالک تعلق می‌گیرد. همچنین حقوق عمومی شـامل آن دسـته حقوقی می‌شـود که بر طبق قوانین و مقررات جهت انتفاع شـهروندان و مراجعه‌کنندگان به این فضـاها تدوین می‌شـود و به‌صورت عرفی به رسـمیت شـناخته می‌شـود. مهم‌ترین قانونی که می‌تواند مورد اسـتناد باشـد قانون تملک آپارتمان‌ها مصوب ۱۶ اسفندماه ۱۳۲۳ و آئین -نامه اجرائی آن مصوب ۲ اردیبهشت‌ماه ۱۳۲۷ هیئت‌وزیران است [۹۲].

- **محدودیت‌های ساعت کار(C۳۳)**

همان‌گونه که ماده ۵۱ قانون کار نیز به آن تصـریح دارد سـاعت کار در این قانون مدت‌زمانی است که کارگر نیرو یا وقت خود را به‌منظور انجام کار در اختیار کارفرما قرار می‌دهد به این لحاظ سـاعات صـرف صـبحانه و نهار جزء ساعت کار به‌حساب نمی‌آید بدیهی است چنانچه در کارگاهی از قبل رویه مورد عمل بر این قرارگرفته باشـد که سـاعت صـرف صبحانه یا نهار و یا شام جزء ساعت کار به‌حساب آید استمرار آن به‌عنوان عرف مستقر در کارگاه محسوب و کماکان باید اجرا گردد.

در قانون کار به‌استثنای کارگران موضوع ماده ۵۶ قانون مزبور که در مورد آن‌ها ساعات کار در چهار هفته متوالی ۱۷۶ ساعت تعیین‌شده، ساعات کار اصولاً به‌صورت هفتگی تعیین گردیده است مواد ۵۱ و۵۲ قانون کار به میزان ۳۶ ساعت برای کارگران شاغل در کارهای سخت و زیان‌آور و زیرزمینی و ۴۴ ساعت برای سایر کارگران . یادآوری می‌نماید توزیع ساعات کار در روزهای هفته با جلب توافق کارگران ذی‌ربط از اختیارات کارفرما بوده و به‌جز کارگران شاغل در کارهای سخت و زیان‌آور که ساعات کار آن‌ها نباید از ۶ ساعت در هرروز تجاوز نماید در مورد سایر کارگران با

عنایت به تبصره یک ماده ۵۱ عملاً حداکثری برای میزان ساعات کار روزانه، مشروط به جلب موافقت کارگر، در قانون کار در نظر گرفته نشده است بدیهی است مازاد بر سقف‌های فوق الا شاره، ساعات کار انجام‌شده با در نظر گرفتن ممنوعیت موضوع ماده ۶۱ و قید «مگر در موارد استثنایی با توافق طرفین» در تبصره ماده ۵۹ اضافه‌کار خواهد بود. [۹۲].

- **کمبود نیروی انسانی(C۳۴) و عدم وجود افراد با تخصص(C۳۷)**

دستیابی به نیروی انسانی متخصص در مواقع نیاز یکی از عوامل رشد و توسعه سازمان‌ها است؛ بطوریکه سازمان‌ها برای ادامه حیات خود به عرضه کافی نیروی انسانی نیاز دارند. در بحث نیروی انسانی همواره پدیده عدم تعادل و توازن خودنمایی می‌کند. این موضوع در صنعت تونل سازی، پدیدهای ناخوشایندی است که ازنظر تعداد، ازلحاظ کیفیت و ازنقطه‌نظر توزیع(توزیع جغرافیایی، شغلی و یا تخصصی، سازمانی و یا ازنظر جنسیتی) اتفاق می‌افتد. طبیعی است که تربیت نیروی انسانی در صنعت تونل سازی به میزانی بیش از نیاز برآورد شده در هر کشور، باعث اتلاف هزینه‌های عمومی در آن کشور می‌شود. یکی از موارد مهم در صنعت تونل سازی در کشور ما کمبود نیروی انسانی متخصص در زمینه تونل سازی است [۸۹].

- **مدیریت ضعیف TBM(C۳۵) و سوء مدیریت(C۳۹)**

پروژه‌های ساخت تونل به دلیل عدم شناخت کافی از وضعیت زمین و عدم قطعیت‌های مرتبط در طراحی و اجرای آن‌ها ازجمله پرمخاطره‌ترین پروژه‌ها به شمار می‌روند. عدم شناسایی، ارزیابی و مدیریت صحیح و به‌موقع ریسک‌های متوجه این پروژه‌ها می‌تواند باعث افزایش مدت و هزینه اجرای آن‌ها گردد.

ضرورت پیاده‌سازی سیستم جامع مدیریت پروژه در پروژه‌های بزرگ اکنون یکی از نیازها و دغدغه‌های بزرگ در سازمان‌ها برای اجرای پروژه‌ها است. عوامل زیادی اعم از عدم آموزش‌های حرفه‌ای مدیران پروژه ، ضعف در مدیریت در سطوح مختلف پروژه‌ها ، برنامه‌ریزی ضعیف در مدیریت

ارتباطات و... از علل عدم تحقق اهداف پروژه‌ها است.

تونل سازی و عملیات ساختمانی زیرزمینی در همه قسمت‌های درگیر در پروژه، تحت تأثیر ریسک بوده و عدم قطعیت‌های بی‌شماری طراحی سازه‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده است. ریسک پروژه‌های تونل سازی (خصوصاً تونل‌های آب‌رسان به دلیل طول عمر بسیار زیاد) همواره قابل‌توجه بوده و از طریق مدیریت مناسب می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آن‌ها را کاهش داد. ازجمله علل اصلی طولانی شدن و افزایش هزینه‌های پروژه‌های تونل سازی، مدیریت ناقص و ضعیف، به‌ویژه امروزه مدیریت ریسک گزارش‌شده است.

تخصص، تعهد و مدیریت سالم از ویژگی‌های مدیران پروژه موفق است. مدیر پروژه ضعیف، پیمانکار را بازوی اجرایی خود نمی‌داند بلکه به او به‌صورت مدعی‌ای نگاه می‌کند که مستحق بسیاری از حق کشی‌ها است . این مدیران به تعویق انداختن صورت‌وضعیت‌ها و در پیچ‌وخم قرارداد مطالبات پیمانکار را جزی از توانایی‌های مدیریتی خود فرض می‌کنند. آنان موجب می‌شوند تا پروژه‌ای که باید ظرف مدت معینی به پایان برسد دیرتر و پرهزینه‌تر به اتمام برسد [۹۵].

- **عدم‌حمایت کافی از عوامل اداری(C۳۶)**

ازجمله مسائل مهم در اجرای یک پروژه بررسی مسائل مهم پروژه توسط متخصصین و متصدیان پروژه است که این مهم توسط مدیریت کارگاه بایستی مورد پشتیبانی و حمایت قرار گیرد.

- **عدم شناخت دقیق پیمانکار(C۳۷)**

ازجمله مسائلی که باعث شکست یا عدم پیشرفت در تونل سازی می‌شود ، عدم شناخت دقیق پیمانکار از پروژه است.

- **ناقص بودن اطلاعات دریافتی از مراجع مربوطه (C۴۰) و گذشت زمان و نبود سابقه (C۴۱)**

ضمن حفاری تونل ، به اطلاعات مهمی در مورد وضعیت آینده پروژه نیازمند خواهیم شد که بایستی از سوی مراجع مربوطه تأمین شوند. همچنین ممکن است که باگذشت زمان و نبود سابقه

،امکان دسترسی به اطلاعات موردنیاز وجود نداشته باشد. ناقص بودن اطلاعات دریافتی از سوی مراجع مربوطه باعث مشکلات بزرگ و گاها جبران‌ناپذیری در اجرای پروژه خواهد شد که هزینه‌های زیادی را در پی خواهد داشت.

- **عدم اطلاعات ژئوتکنیکی(C۴۲)**

شناسایی‌های زمین‌شناسی مهندسی و برآورد پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر تونل اهمیت زیادی در طراحی و اجرای موفق تونل‌ها خواهند داشت. شناسایی دقیق و کامل این پارامترها در محیط‌های شهری، با توجه به تشدید اثرات آسیب‌های ناشی از نشست تونل‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. شناسایی پارامترها و مخاطرات ژئوتکنیکی مسیر تونل‌ها در انتخاب نوع دستگاه حفاری نیز دارای اهمیت بسیاری هستند. شناسایی این ویژگی‌ها، یکی از چالش‌های مهم در تونل سازی است. اجرای مکانیزه تونل، پیشرفت و گسترش صنعت تونل سازی را سرعت بخشیده است. بااین‌حال پروژه‌های تونل سازی 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 بررسی و ارزیابی، برآورد و رتبه‌بندی مخاطرات محتمل ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی در تونل سازی مکانیزه در نواحی شهری ازجمله موارد حائز اهمیت در این صنعت خواهد بود.

تونل‌زنی به‌وسیله TBMها مشکلات خاص خود را دارا می‌باشند. این مشکل در سنگ‌های سخت و سنگ‌های ضعیف به‌صورت های مختلف ظاهر می‌شوند. در سنگ‌های ضعیف، مخصوصاً وقتی تنش‌ها بالا باشد، باربری و نگهداری تونل مشکل اصلی و تأخیر اجرایی است.

در سنگ‌های سخت یا ساینده، به‌عنوان‌مثال سنگ‌هایی که درصد کوارتز بالا دارند، فرسایش و خوردگی ابزارهای برش و استهلاک خود تجهیزات مشکل اصلی است. جریان آب هم برای هر دودسته سنگ‌ها مشکل را دوچندان خواهد کرد [۸۶][۳۷].

- **برخورد با چاه‌های فاضلاب منازل (C۴۳)و عدم وجود اطلاعات سازه‌ای(C۴۴)**

در محیط‌های شـهری علاوه بر سـاختمان‌ها و خیابان‌ها، محدوده‌های ترافیکی مانند چهارراه‌ها نیز ازنظر نشـسـت اهمیت ویژه‌ای دارند. در این مناطق به دلیل ترافیک شـهری، بار دینامیکی توسـط ماشـین‌ها ایجادشـده و درنتیجه باعث تشـدید نشـست در این قسمت‌ها می‌شود. بدین منظور بررسی نشست ایجادشده در این قسمت‌ها کمک به درک بهتری از رفتار زمین و جلوگیری از حوادث احتمالی می‌کند. علاوه بر آن حضـور سـازه‌های زیرزمینی دیگر مانند تونل و چاه‌های جذبی فاضـلاب نیز در نزدیکی تونل در حال حفر باعث افزایش نشـسـت زمین در اثر برهم‌نهی آن‌ها می‌شود. دو خطر عمده ناشـی از حضـور قنات، ریزش میله چاه و گالری قنات و باز شـدن مسـیر قنات به تونل و آب‌گرفتگی کارگاه در (نواحی که سـطح ایسـتابی بالا اسـت) می‌باشـند. مشـکلات ناشـی از ریزش آب و فاضـلاب قنات‌های متروکه تجربه راه گشای ایجاد تمهیدات برای مقابله با این خطر در عملیات حفاری تونلی در مناطق شهری است.

از دیگر مشـکلات زمان اجرا و بهره‌برداری تونل‌ها برخورد آن‌ها با موانع رو سـطحی و زیرسـطحی مانند عبور از زیر پی سـاختمان‌های بلند، پل‌ها، مناطق مسـکونی با تراکم زیاد، خیابان‌های اصـلی شهری، تونل‌های انتقال آب، تونل‌های فاضلاب، تونل‌های انتقال کابل برق، تونل‌های دیگر خطوط مترو و زیرگذرها و... است. عبور از مجاورت این‌گونه سازه‌ها در زمان اجرا ممکن است با ایجاد ناپایداری این سازه‌ها همراه باشد. به‌منظور کنترل ناپایداری می‌توان ضمن رعایت فواصل مجاز از روش‌های بهسازی زمین نیز اسـتفاده نمود. در زمان بهره‌برداری از تونل‌های مترو، نشـسـت عوارض سطحی ذکرشده که می‌تواند ناشی از عواملی مانند زهکش نمودن آب به داخل تونل و تغییر وضعیت تنش‌ها باشد مشکلات جدی در پایداری سازه تونل و همچنین باعث نشست سازه‌های سطحی ذکرشده گردد [۸۸]،[۹۱].

- **برخورد با لایه‌های باستانی(C۴۵)**

ازجمله مباحث مهم جهت طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها، به حداقل رسـاندن عدم قطعیت‌ها اسـت.

معمولاً عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های زیرسطحی، ناشی از شرایط ناشناخته زمین است که باعث می‌شود در طراحی‌ها نتوان کل مسائلی که ممکن است در زمان ساخت اتفاق بیفتد، در نظر گرفته شود.

از دیگر مشکلات حین تونل سازی برخورد با لایه‌های باستانی موجود در زمین‌های اطراف تونل است که بایستی هنگام برخورد با آن‌ها تمهیدات لازم را در نظر بگیریم [۱۰۳].

- **زمان(C۴۶)**

تأخیر، کندی وعدم پیشرفت در پروژه‌های عمرانی شهری که سبب عدم ایجاد مدیریت شهری پایدار می‌گردد، حاکی از وجود موانع و مشکلات ریشه‌ای در اجرای طرح‌های ارزشمند شهری است که بازسازی و توسعه فضای شهری را به‌طورجدی در معرض تهدید قرار می‌دهد که متقابلاً باعث افزایش و طولانی شدن زمان انجام پروژه می‌شود. به این منظر توسعه شبکه راه‌ها در پروژه‌های عمرانی درون‌شهری(مانند راه، پل و تونل) با توجه به ویژگی‌ها و محدودیت‌های خاص خود بسیار حائز اهمیت است.

عوامل مختلف پروژه در افزایش زمان اجرا نقش‌هایی دارند که بعضی از این نقش‌ها منحصربه‌فرد بوده و به عوامل دیگر ارتباطی ندارد . سه عامل کارفرما ، مشاور و پیمانکار در افزایش اجرای پروژه‌ها نقش به سزایی را ایفا می‌کنند [۱۰۳].

- **امکان مطالعات استراتژیک (C۴۷)**

امروزه با توجه به پیشرفت فناوری و شناسایی تونل سازی به‌عنوان یک صنعت در دنیا، همگرایی رشته‌ها و متخصصان مختلفی را در این زمینه فراهم نموده است که باعث جذابیت و پیچیدگی‌های خاص این صنعت شده است. فضاهای زیرزمینی در مراحل طراحی، ساخت و نگهداری همواره با شرایط محیطی و پیرامونی گوناگونی روبرو بوده‌اند که دارای عدم قطعیت‌های بالایی می‌باشند. این عدم قطعیت‌ها در صورت وقوع باعث ایجاد خسارت‌های مالی و جانی فراوانی شده‌اند که مدیریت ریسک در این زمینه می‌تواند این موارد را کنترل نموده و کاهش یا حذف نماید .با توجه به فراوانی پروژه‌های

تونل سازی در سطح ملی و جهانی و شرایط مختلفی که هر یک از این پروژه‌ها دارا می‌باشند ایجاد یک بانک مطالعاتی جهت ثبت ریسک‌های ژئوتکنیکی در کنار دیگر مطالعات فنی تونل امری لازم به نظر می‌رسد که با ایجاد یک بانک مطالعاتی در این زمینه می‌توان برای پروژه‌های آتی و در دست‌ساخت متخصصان را جهت جلوگیری از وقوع مخاطرات بعدی مطلع نمود و در امر طراحی و ساخت یاری نمود [۸۶].

- **عدم استفاده از مواد افزودنی(C۴۹)**

یک خاک ایدئال برای ماشین EPB خاکی است که پس از حفاری و ورود به اتاقک فشار، تبدیل به یک ماده پلاستیک و خمیری باقابلیت اعمال فشار به سینه کار باشد. بدیهی است که یک خاک واقعی در طبیعت به‌ندرت دارای چنین ویژگی‌هایی است. بنابراین همیشه سعی می‌شود با تزریق فوم به مصالح جمع شده در اتاقک فشار، خاکی با خصوصیات مذکور را بدست آورد.

به افزودن فوم و پلیمر به خاک، عملیات به عمل‌آوری می‌گویند. در تونل سازی با ماشین EPB رفتار خاک حفاری‌شده از هنگامی‌که در جلوی کاترهد ماشین با فوم مخلوط می‌شود تا زمانی که از نقاله مارپیچ خارج می‌شود بستگی به ویژگی کارپذیری خاک به عمل‌آوری شده دارد که معمولاً با آزمایش اسلامپ ارزیابی می‌گردد. عواملی که بر روی کارپذیری خاک مؤثر هستند شامل شاخص استحکام، درصد رطوبت، مقدار ذرات ریزدانه و نسبت تزریق فوم (FIR) می‌باشند.

- **مواد افزودنی نامناسب (C۵۰)و عدم توانایی مهروموم(D۱۴) و آب‌بندی نامناسب(E۶)**

امروزه از تونل سازی سپری در مقیاس گسترده برای حفر تونل‌های شهری در خاک‌های نرم و کم‌عمق استفاده می‌شود. تونل زنی با EPB نیازمند بهسازی خاک است و قابلیت اجرای آن برای خاک‌های فاقد چسبندگی نیز افزایش‌یافته است. انتخاب مناسب‌ترین مجموعه‌ی بهسازی نیاز به بررسی‌های دقیقی دارد تا بتوان مشخصات خاک بهسازی شده را تعیین و داده‌های قابل‌اندازه‌گیری را مشخص نمود. انتخاب استراتژی مناسب برای بهسازی خاک در حین حفاری، شناسایی مخاطرات

زمین را پراهمیت جلوه می‌دهد تا با اطمینان بیشتر، تصمیمات موردنیاز برای انتخاب نوع رفتار فیزیکی فوم و دیگر افزودنی‌ها گرفته شود.

بهسازی خاک با تزریق فوم، پلیمر، آب یا مواد پرکننده (از طریق نازل‌های طراحی‌شده بر روی کله‌ی حفار) به جلوی سطح جبهه کار، اتاقک چمبر، امتداد نوار نقاله‌ی مارپیچ و محفظه‌ی پشت سر کله‌ی حفار صورت می‌گیرد. این امر می‌تواند سبب کاهش اصطکاک بین کله‌ی حفار و ابزارهای برشی و بدنه‌ی کله‌ی حفار با خاک و کاهش سایش این قطعات شود. چسبندگی در خاک‌های ماسه دار و شن دار به دلیل کافی نبودن مصالح ریزدانه، با عوامل بهسازی خاک تقویت می‌شود. به‌کارگیری عوامل بهسازی مناسب خاک با فوم و پلیمر، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر بازدهی عملیات حفاری تونل تأثیرگذار است. پلیمرها نیز در بهسازی خاک، با جذب آب یا خشک نمودن خاک‌های مرطوب و بهبود ساختار خاک برای تغییر خزش خاک(خصوصیات تغییر شکل و روندگی) به کار می‌روند. هدف اصلی استفاده از پلیمرها، مدیریت نگهداری جبهه کار و حمل‌ونقل در خاک‌های سست درشت‌دانه است. همچنین پلیمرها می‌توانند برای کاهش چسبندگی روی تیغه‌های نوار نقاله، در محفظه‌ی حفاری، مورداستفاده قرار گیرند. آگاهی از عوامل مختلف بهسازی و آثار آن بر روی انواع خاک‌ها در تعیین مناسب‌ترین روش بهسازی، بسیار مؤثر است. از آزمایش مخروط اسالمپ (روانی) برای تعیین مؤثرترین پارامترهای بهسازی شامل نسبت تزریق فوم (FIR) ،نسبت انبساط فوم (FIR) و غلظت ماده‌ی کف‌ساز در محلول فوم(Cf) استفاده می‌شود. اگر این پارامترها به‌طور صحیح در نظر گرفته نشوند، خاک در محفظه‌ی پشت کله‌ی حفار کاملاً خشک‌شده و این مسئله منجر به افزایش گشتاور، دما و کاهش سرعت پیشروی خواهد شد. اگر سیال یا فوم، زیاد از حد اضافه شود، کنترل خاک حفاری سخت و هزینه‌ی حفاری افزایش می‌یابد [۹۹].

- **سرعت دستگاه TBM(C۵۱)**

سرعت نفوذ ماشین در سنگ به هنگام حفاری، معمولاً برحسب میلی‌متر در هر چرخش پیشانی

برشـی یا صـفحه حفار ،یا به‌صـورت متر بر سـاعت بیان می‌شـود. سرعت پیشروی نیز به‌صورت میزان پیشروی تونل در مدت‌زمان معین تعریف می‌شود. و ممکن است برحسب متر در شیفت، متر در روز یا متر در ماه بیان شـــود. این دو پارامتر توســـط پارامتری به‌عنوان ضـــریب بهره‌وری با یکدیگر مرتبط می‌شـوند. این شـاخص عبارت اسـت از درصد زمان ، نسبت به زمان کل یک شیفت است که طی آن دستگاه در حال حفاری است. واضح است که چون دستگاه همیشه در حال پیشروی نیست لذا سرعت پیشـروی همواره کمتر از سرعت نفوذ است. سرعت چرخش صفحه حفار نیز برحسب دور بر دقیقه با قطر پیشانی برشی یا صفحه حفار نسبت معکوس دارد.

- **محاسبات اشتباه(C۵۲)**

عدم محاسبات صحیح در پروژه باعث خسارات جبران‌ناپذیری در طول پروژه تونل سازی مکانیزه و همچنین باعث افزایش زمان پروژه و هزینه می‌شود.

- **افزایش روباره بر روی تونل(D۱)**

در تحقیقی که به‌وسیله چاکری و همکارانش به انجـــام رسیده است تأثیر پارامترهایی مانند عمق، فشار روباره، ابعاد تونـــل و فشـــار ســـینه کـــار در حفـــاری مکـــانیزه بـــا روش متعادل‌کننده فشـار زمین‌بر روی کنتـــــرل نشـسـت‌های سطحی بررسی‌شده است. امروزه طراحی تونل‌ها در برابر بارهای اسـتاتیکی در سـطح بالایی به‌صـورت صـحیح انجام می‌شـود. به‌طور عمده با توجه بهروش‌های عددی پیشـرفته موجود امکان شـبیه‌سازی همه مراحل ساخت‌وساز و مدل‌سازی شرایط مرزی پیچیده فراهم می‌شـود. با توجه به توسعه روزافزون سازه‌های زیرزمینی و هزینه‌های فراوانی که برای ساخت هر یک از این سـازه‌ها صـرف می‌گردد و نیز اهمیت آن‌ها در شـبکه حمل‌ونقل بین‌شـهری و داخل شـهری و خطری که در صـورت آسـیب‌دیدگی آن‌ها متوجه جان مردم می‌شـود، لازم است که پایداری آن‌ها در مراحل مختلف ساخت و بهره‌برداری موردمطالعه قرار گیرد [۴۱].

- **آسیب به سگمنت، ریزش اطراف سگمنت و ریزش بلوک‌های سنگین اطراف سگمنت و آسیب و فرسودگی عایق (D۲،۳،۴وE۷)**

امروزه قطعات پیش‌ساخته بتنی به‌عنوان پوشش نگهداری تونل‌هایی که با استفاده از ماشین‌های تمام مقطع حفاری می‌شوند مورداستفاده قرار می‌گیرند سگمنت های بتنی طی فرایند تولید تا نصب در تونل دچار آسیب‌دیدگی‌های متعددی شده که تأثیر منفی بر کیفیت سگمنت های تولیدشده در کارخانه سگمنت داشته و طول عمر مفید پوشش تونل را نیز کاهش می‌دهند.

پوشش تونل قطارهای شهری با توجه به مکانیزه بودن حفاری تونل به‌صورت قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) است. بارهای وارده بر پوشش دائم تونل و قطعات سگمنتی به دودسته کلی زیر تفکیک می‌شوند:

الف : بارهای محیطی که از جانب عوامل محیطی بر پوشش تونل اعمال می‌شوند مانند بار خاک، آب و زلزله

ب : بارهای حین ساخت و اجرا که در فرایند تولید، حمل، دپو و عملکرد دستگاه حفار بر سگمنت ها اعمال می‌شوند.

- **تصمیم‌گیری برای تغییر مسیر(D۵)**

معمولاً در پروژه‌های حفاری مکانیزه برای شروع عملیات حفاری از شفت‌های ورودی استفاده می‌شود. احداث این شفت‌ها در برخی شرایط ژئوتکنیکی زمین و به‌ویژه باوجود آب زیرزمینی، با مشکلات اجرایی همراه بوده و ازنظر اقتصادی نیز هزینه بالایی دربر خواهند داشت.گاهی اوقات در طی حفاری تونل به دلایلی مجبور به تغییر مسیر تونل به یک سمت خاص وجود دارد که این مهم با مطالعات دقیق و تجربه و شناخت دقیق متصدیان عرصه تونل سازی امکان‌پذیر خواهد بود.

- **عملیات تزریق(D۸)**

عوامل مؤثر در نشست سطح زمین درروش حفاری مکانیزه را می‌توان عمدتاً به سه دسته عوامل

هندسی ، عوامل ژئومکانیکی و نیز پارامترهای کـــاری ماشـــین حفـــاری تقسیم‌بندی کرد. عوامل هندسی شامل عمق و قطر تونل می‌باشند پارامترهای کاری ماشین شامل فشار وارد بر جبهه حفاری ، فشـــار تزریـق در پشـت سـگمنت هـا و نیـز میزان تغییر قطر (کاهش قطر دستگاه در طول) دستگاه اسـت و پارامترهای ژئومکانیکی شـامل مشـخصـات مکانیکی لایه‌های خاک مابین تونل تا سطح زمین اسـت .در حفاری مکانیزه با پیشروی دستگاه حفار، عملیات سگمنت گذاری پوشش که شامل نصب سـگمنت ها و تزریق در پشت لاینینگ است صورت می‌گیرد. به دلیل مسائل اجرایی، قطر حفاری‌شده توسـط دسـتگاه از قطر خارجی حلقه بتنی مقداری بیشـتر اسـت و همواره فضایی پشت پوشش بتنی قـــرار دارد کـــه بایســـتی بـا عملیـات تزریق پر شود تا از ریزش احتمالی خاک و همگرا شدن تونل و درنتیجه نشست‌های سطحی زمین، علی‌الخصوص در تونل‌های کم‌عمق، جلوگیری به عمل آید. فشـار تزریق در این عملیات از اهمیت خاصـی برخوردار اسـت. افزایش بیش‌ازحد این فشار باعث ایجاد تورم خاک در سطح زمین شده و فشار اضافی نیز به لاینینگ وارد می‌سازد. همچنین کم بودن فشار تزریق نیز می‌تواند منجر به نشـسـت سـطحی گردد. نشـسـت یا تورم سـطح زمین می‌تواند خسـاراتی را به سازه‌های ســـطحی وارد می‌سازد به‌ویژه در محیط‌های شهری که با انبوهی از ساخت‌وسازهای سطحی مواجه هستیم [۱۰۴].

- **ریزش تونل(D۹)**

موقعیت و تراکم دسته‌درزه‌ها، نقش بسیار مهمی در پایداری سازه‌هایی دارند که در داخل سنگ و یا بر روی سـنگ طراحی و نصـب می‌شـوند. زیرا تشـکیل گوه‌ها در اثر تقاطع درزه‌ها و تأثیر صفحات لـایـه‌بنـدی و ســـقوط این گوه‌هـا در طی حفر تونـل، می‌توانـد پـایـداری حفاری را به خطر بیندازد. ناپایداری‌هایی که می‌توانند حفاری با TBM را تحت تأثیر قرار دهند، شـــامل ناپایداری ســـینه کار و دیواره‌های تونل هستند. ناپایداری در سینه کار بیشتر با ریزش بلوک‌های سنگی و سنگ‌های خردشده همراه اســـت که در موارد حاد، می‌تواند عملیات حفاری را متوقف کرده و میزان پیشـــروی و عملکرد TBMرا مختل سـازد. علاوه بر این ممکن اسـت که به سیستم انتقال تراشه‌های حفاری و دیسک‌های

برشـی نصـب‌شـده بر روی کله حفار نیز آسـیب برساند، به‌طوری‌که نیاز به تعمیر و یا تعویض قطعات آســیب‌دیده باشــد .ناپایداری در دیواره‌های تونل نیز می‌تواند نصــب ســیســتم نگهداری و عملکرد کفشک‌های TBM باز را دچار مشکل کند.

به‌طورکلی با کاهش کیفیت توده ســنگ و افزایش ناپایداری‌ها که ناشــی از شــرایط تکتونیکی و وضـعیت زمین‌شـناسـی منطقه اسـت، تمایل به استفاده ازTBM های سپری نسبت به TBMهای باز بیشتر می‌شود؛ زیرا پوشش بتنی پیش‌ساخته و سپر فولادی، نگهداری موقت و مطمئنی را برای TBM های سپری ایجاد می‌کند [۱۰۱].

- **استاندارد نبودن ساختمان‌های اطراف تونل و تأثیرپذیری آن‌ها(D11)**

نشـست زمین ازجمله مخاطراتی است که همواره همراه با تونل سازی همراه بوده و باعث آسیب به سـازه‌های اطراف تونل می‌شـود. چون در مناطق شـهری اغلب نشست به‌صورت نامتقارن رخ می‌دهد، خمش و پیچش در سـاختمان‌ها افزایش‌یافته و آسـیب‌های وارده بیشـتر می‌شـود. بدین منظور تونل سازی سپری یکی از روش‌های اصلی و ایمن در تونل سازی شهری است. به علت اهمیت نشست زمین و تأثیر مستقیم آن بر هزینه‌های پروژه، مطالعات مختلفی برای پیش‌بینی و کنترل آن صورت گرفته و در ۲۴ سـال گذشـته روابط متعددی برای پیش‌بینی نشـسـت زمین ارائه‌شـده است. در همین بالاییتا بایستی به استاندارد نبودن برخی از ساختمان‌هایی که در مسیر حفاری تونل قرار می‌گیرند اشاره کرد.

- **عدم رعایت صحیح جزئیات HSE(D12)**

محیط‌های کاری مخصـوص سـاخت فضـاهای زیرزمینی، خطرات خاص و منحصـربه‌فردی را دارا می‌باشـند که کارکنان فعال در آن‌ها باید آگاهی‌های لازم را نسـبت به این خطرات داشـته باشند. این حوادث باید در برنامه ایمنی کارگاه شـناخته شوند و پیش‌بینی‌های لازم ارائه گردد. سقف و دیواره‌ها و ســینه کار در جبهه‌های کاری مختلف تونل باید به‌طور مداوم موردبررســی قرارگرفته و اقدام به لق گیری مناسـب و تحکیمات اولیه سنگ‌های ضعیف شود. لازم است پیچ سنگ‌ها با استفاده از آچارهای

مناســـب به‌طور مرتب مورد آزمایش قرار گیرند. قاب‌ها و دیگر نگهدارنده های مناســـب باید به‌منظور جلوگیری از جابجایی و حرکت بلوک‌های ســنگی، به‌طور اصولی و صحیح نصب شوند. نگهدارنده های آســیب‌دیده و تغییر شکل یافته در اسرع وقت تعمیر و یا تعویض شوند. صفحه‌ها و سپرهای نگهدارنده مناسب برای زمین‌های ضعیف و سست طراحی و مورداستفاده قرار گیرند. دیواره‌ها و نگهدارنده ها پس از انفجار در سینه کار، مرتب بازرسی شوند و نسبت به اصلاح سطوح آسیب‌دیده اقدام گردد.

- **شکستگی یا ترک برداشتن کف تونل(D۱۳)**

شکستگی یا ترک برداشتن کف تونل ، مخصوصاً در تونل‌های مترو دارای اهمیت بسیاری است زیرا بعد از اتمام حفاری به‌نوعی کار تونل آغاز می‌گردد و شکستگی کف تونل از آسیب‌های جدی محسوب می‌شود که می‌تواند هزینه‌ها و خسارات بسیاری را باعث شود.

- **عدم تأمین بودجه کافی (E۱)**

نحوه تـأمین مـالی و تهیـه بودجـه اجرایی لـازم برای انجـام پروژه‌هـای زیربنایی و بهره‌برداری از محصـولات و خدمات حاصـل از آن‌ها در حال حاضـر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی کشـورهای درحال‌توسـعه مطرح است. با توجه به وضعیت خاص کشورهای درحال‌توسعه و بحران‌های مـالی در این کشـــورهـا امکان تأمین ســـرمایه موردنیاز برای اجرای پروژه‌های بزرگ به‌راحتی فراهم نمی‌شـود ، لذا اسـتفاده از راه دیگر ، یعنی جذب سـرمایه‌های خارجی در این کشورها موردتوجه قرار می‌گیرد. درگزارشـــات مالی دولت بودجه نقش بســـیار مهمی دارد، بودجه‌ریزی چیزی جز پیش‌بینی منابع و مصارف مالی در قالب مأموریت‌ها و وظایف دولت نیست. در این مفهوم ، دوام تشکیلاتی دولت و عملکرد جاری آن به‌منزله انجام عملیاتی اســت که منجر به تحقق ســیاســت‌ها و هدف‌های قانونی می‌شـود و ازاین‌رو ، تخصـیص اعتبار به دسـتگاه‌های اجرایی به معنای اطمینان از انجام فعالیت‌هایی است که هدف‌های قانونی را تأمین می‌کند.

- **کمبود کارگر(E۲)**

در پروژه‌های عمرانی و به‌خصوص تونل سازی مکانیزه، نیاز به نیروی انسانی متخصص زیاد است و به همین دلیل بهره‌وری این بخش دارای اهمیت فراوانی دارد. با افزایش مدت‌زمان اجرای این‌گونه پروژه‌ها، هزینه‌ها به‌شدت افزایش می‌یابد. تا جایی که ممکن است پروژه از حالت اقتصادی بودن خارج‌شده و حتی اجرای آن متوقف شود.

- **تحریم‌ها(E۳)**

پروژه‌های تونل سازی مکانیزه نیاز به تجهیزات خاصی مانند TBMبرای حفاری است. بیشتر این ماشین‌آلات یا تجهیزات، یا از خارج واردشده یا لوازم و متعلقات آن وارداتی هستند و در داخل مونتاژ می‌شوند. درنتیجه به سبب تحریم‌های وارده بر کشور، قیمت آن‌ها چند برابر یا واردات آن‌ها با مشکل مواجه شده است.

- **تغییر در مالیات و عوارض گمرکی(E۴)**

وجوهی که در گمرک از کالاهای وارداتی دریافت می‌شود، به چند دسته تقسیم می‌شود. یکی حقوق و عوارض است که نوعی مالیات غیرمستقیم است و دیگری هزینه‌هاست که در مقابل انجام خدمت وصول می‌شود؛ مثل هزینه تخلیه و بارگیری، آزمایش، استاندارد و انبارداری.

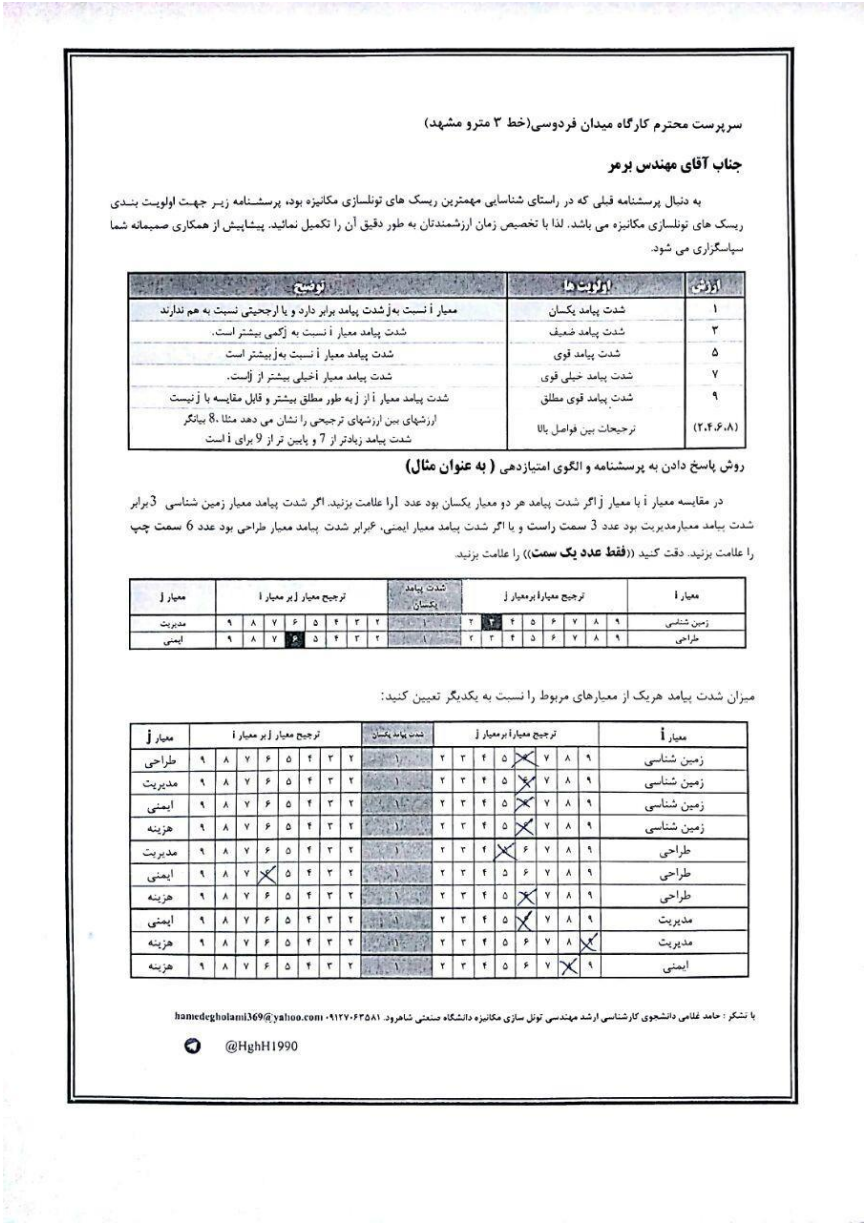
حقوق و عوارض توسط گمرک وصول می‌شود ولی هزینه‌ها توسط سازمان‌های ارائه‌کننده خدمت مثل سازمان بندرها. در بندرها، انبارهای عمومی در گمرکات داخلی و سازمان ملی استاندارد وصول می‌گردد. حقوق ورودی که دربند (ح) ماده یک قانون امور گمرکی تعریف‌شده شامل دو قسمت است: ۱: حقوق گمرکی (که برای همه کالاها ۴ درصد است و توسط مجلس وضع‌شده است). ۲: سود بازرگانی که توسط دولت تعیین می‌شود. البته مالیات‌ها و عوارض دیگر ازجمله ۸ درصد از مالیات ارزش‌افزوده، ۴درصد از کالاهای فرهنگی، ۵ درصد از مجموع حقوق گمرکی و سود بازرگانی به‌عنوان هلال‌احمر نیز از واردات انواع کالاها و به‌تناسب نوع و حجم کالا دریافت می‌شود.

نمونه پرسشنامه برای محاسبه احتمال با استفاده از روش تحلیلی درخت خطای فازی

جدول ۱۱:فرم ارسال نظر سنجی شده برای کارشناسان(سایش کاتر ها T_5)

رویداد اساسی		اهمیت هر پارامتر				
		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
طراحی TBM	تعداد دیسک ها			✓		
	زاویه قرار گیری دیسک ها				✓	
	جهت دیسک ها			✓		
	فاصله دیسک ها				✓	
	توزیع غیر یکنواخت دیسک ها		✓			
	سرعت چرخش			✓		
بهسازی خاک						
جنس کاتر					✓	
نیروی اعمال شده بیش از حد				✓		
جنس زمین	نوع و خواص سنگ			✓		
	مقدار کوارتز				✓	
	ناپیوستگی سینه کار			✓		
	اندازه دانه		✓			
	جهت گیری دانه			✓		
	چسبندگی خاک		✓			
	شکستگی مافیک				✓	
	وجود کانی های ساینده			✓		

نمونه پرسشنامه برای محاسبه شدت احتمال با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی



سرپرست محترم کارگاه میدان فردوسی(خط ۳ مترو مشهد)

جناب آقای مهندس برمر

به دنبال پرسشنامه قبلی که در راستای شناسایی مهمترین ریسک های تونلسازی مکانیزه بود، پرسشنامه زیر جهت اولویت بندی ریسک های تونلسازی مکانیزه می باشد. لذا با تخصیص زمان ارزشمندتان به طور دقیق آن را تکمیل نمائید. پیشاپیش از همکاری صمیمانه شما سپاسگزاری می شود.

ارزش	اولویت ها	توضیح
۱	شدت پیامد یکسان	معیار i نسبت به j شدت پیامد برابر دارد و یا ارجحیتی نسبت به هم ندارند
۳	شدت پیامد ضعیف	شدت پیامد معیار i نسبت به jکمی بیشتر است.
۵	شدت پیامد قوی	شدت پیامد معیار i نسبت به j بیشتر است
۷	شدت پیامد خیلی قوی	شدت پیامد معیار iخیلی بیشتر از jاست.
۹	شدت پیامد قوی مطلق	شدت پیامد معیار i از j به طور مطلق بیشتر و قابل مقایسه با j نیست
(۲،۴،۶،۸)	ترجیحات بین فواصل بالا	ارزشهای بین ارزشهای ترجیحی را نشان می دهد مثلا ،8 بیانگر شدت پیامد زیادتر از 7 و پایین تر از 9 برای i است

روش پاسخ دادن به پرسشنامه و الگوی امتیازدهی (به عنوان مثال)

در مقایسه معیار i با معیار j اگر شدت پیامد هر دو معیار یکسان بود عدد 1را علامت بزنید. اگر شدت پیامد معیار زمین شناسی 3 برابر شدت پیامد معیارمدیریت بود عدد 3 سمت راست و یا اگر شدت پیامد معیار ایمنی، ۶برابر شدت پیامد معیار طراحی بود عدد 6 سمت چپ را علامت بزنید. دقت کنید ((**فقط عدد یک سمت**)) را علامت بزنید.

معیار i	ترجیح معیارi برمعیار j									شدت پیامد یکسان	ترجیح معیار j بر معیار i									معیار j
زمین شناسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		مدیریت
طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		ایمنی

میزان شدت پیامد هریک از معیارهای مربوط را نسبت به یکدیگر تعیین کنید:

معیار i	ترجیح معیارi برمعیار j									شدت پیامد یکسان	ترجیح معیار j بر معیار i									معیار j
زمین شناسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		طراحی
زمین شناسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		مدیریت
زمین شناسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		ایمنی
زمین شناسی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		هزینه
طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		مدیریت
طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		ایمنی
طراحی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		هزینه
مدیریت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		ایمنی
مدیریت	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		هزینه
ایمنی	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹		هزینه

با تشکر : حامد غلامی دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی تونل سازی مکانیزه دانشگاه صنعتی شاهرود. ۰۹۱۲۷۰۶۳۵۸۱ hamedegholami369@yahoo.com

@HghH1990

Abstract

In this study, the risks and their main causes in the tunnel project were accurately identified and evaluated. To further refine the reviews and evaluations in this thesis, we have pointed out the Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) method and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) method to identify the risk parameters and their graphical representation. Because of uncertainty in linguistic words, this thesis uses fuzzy data to analyze quantitative probabilities and the occurrence of risk factors on geological, design, management, safety and cost criteria. It should also be noted that the importance of each criterion was determined by the fuzzy hierarchical process and, by means of this process, the severity of the outcome was combined and the severity of the risk effect was calculated. To this end, firstly in the Tunnel Line Project of Mashhad Metro Line ۳, ۱۸ main risks were identified through past studies and interviews with experts and experts in the tunnel construction project. For each of the risks presented, we draw an fault tree separately and use it to evaluate the root cause of the risks. Based on this, for quantitative analysis and data collection in the project after the drawing of the error tree, a questionnaire was prepared which was completed by experts and project managers. The analysis of this thesis shows that the risk for cutter-related malfunction, mucking and TBM advance problems, the wear of cutters, the deviation of the path and the clogging and disk obstruction in Mashhad Metro Line ۳ Project, factors Have a high risk.

Key words:

Risk assessment, Mechanized tunneling, Fuzzy Fault Tree Analysis (**FFTA**), Fuzzy Analytic Hierarchy Process (**FAHP**), Mashhad Metro Line ۳

Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Petroleum and Geophysics Engineering

MSc thesis in tunnel and underground spaces engineering

Risk assessment in mechanized tunneling projects using a combination of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) and the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Case Study Mashhad Metro Line ۳

By: Hamed gholami

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Reza Khaloo Kakaei

Data: January ۲۰۱۸