

**R. Mikaeil\***

Faculty of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
Urmia University of  
Technology.

**e-mail:** reza.mikaeil@gmail.com

**Y. Jalili Kashtiban**

Department of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
AmirKabir University of  
Technology.

**e-mail:** y.j.kashtiban@gmail.com

**K. Shahriar**

Department of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
AmirKabir University of  
Technology.

**e-mail:** k.shahriar@aut.ac.ir

**A. Jafarpour**

Department of Mining and  
Metallurgical Engineering,  
Yazd University.

**e-mail:** jafarpour.a67@gmail.com

## **Evaluation and Management of Geotechnical Risk in Tunneling Projects Using Fault Tree Analysis**

*One of the important steps in designing and implementation of tunneling projects is analyzing and managing the risks from the viewpoint of geotechnical risks. Second part of the Emamzadeh Hashem tunnel is one of the greatest civil projects in Iran that has faced with serious and important challenges in design because of the poor geological structure and geotechnical condition in excavation track. In this research, try to be after the geological studying in the tunnel excavation track, the overall risk amount be assessed by fault tree analysis. During this study, 4 important event including damage to the personnel, damage to the TBM, damage to the restraint system and deflection from the excavation track was identified and studied by using the geotechnical hazards like: encounter to fault and comminuted areas, squeezing, water inrush and tunnel instability. Results of the analysis show that reasons of the higher risk in this project are damage to the TBM and damage to restraint system. So, the higher risk should be reduced by doing some reducer proceedings like concrete injection. After these proceedings, the overall risk came to the poor area in the risk classification. According to the results, in this project, damage to the TBM and damage to restraint system have the highest risks and their risks should be reduced by doing some reducer proceedings like concrete injection. After these proceedings, the overall risk came to the poor area in the risk classification.*

**Keywords:** Geotechnical risks, Fault Tree Analysis, Risk Management.

---

\* Corresponding author

Received 09 April 2020, Revised 04 August 2020, Accepted 30 September 2020.

DOI: 10.22091/cer.2020.5388.1200

## ارزیابی و مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌زنی از دیدگاه مخاطرات ژئوتکنیکی با استفاده از روش تحلیل درخت خطا: مطالعه موردی

رضا میکائیل\*

دانشیار، دانشکده مهندسی معدن،  
دانشگاه صنعتی ارومیه.  
پست الکترونیک:  
reza.mikaeil@gmail.com

یاور جلیلی کشتیبان

دانشجوی کارشناسی ارشد  
استخراج معدن، دانشگاه صنعتی  
امیرکبیر.  
پست الکترونیک:  
y.j.kashtiban@gmail.com

کوروش شهریار

استاد، دانشکده مهندسی معدن،  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر.  
پست الکترونیک:  
k.shahriar@aut.ac.ir

امیر جعفرپور

دانشجوی دکتری مهندسی  
استخراج معدن، دانشگاه یزد.  
پست الکترونیک:  
jafarpour.a67@gmail.com

ارزیابی و مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌زنی از دیدگاه مخاطرات ژئوتکنیکی، یکی از گام‌های مهم و ضروری در طراحی و اجرا می‌باشد. قطعه دوم تونل امامزاده هاشم، یکی از طرح‌های بزرگ عمرانی در کشور محسوب می‌شود که به دلیل ساختار بد زمین‌شناسی و شرایط نامناسب ژئوتکنیکی در مسیر حفر تونل، طراحی این پروژه را با چالش‌های جدی روبه‌رو کرده است. در پژوهش حاضر، تلاش شده است تا پس از بررسی و انجام مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در طول مسیر حفر تونل، میزان ریسک کلی طرح با استفاده از تحلیل درخت خطا مورد بررسی قرار گیرد. در طول انجام پژوهش، چهار مخاطره شامل آسیب به پرسنل، سیستم نگهداری، ماشین حفاری و انحراف از مسیر حفر با توجه مخاطرات ژئوتکنیکی محتمل در مسیر حفاری شامل برخورد با نواحی گسله و خردشده، مچاله‌شوندگی، هجوم آب و ناپایداری تونل مورد بررسی قرار گرفت. آسیب به دستگاه حفاری و آسیب به سیستم نگهداری با اعداد ریسک ۵۳۰۴ و ۵۲۳۰ به‌عنوان حوادث پرخطر به‌وجودآورنده ریسک کلی پروژه شناسایی شدند. مخاطرات ناشی از حضور گسل در منطقه و مچاله‌شوندگی دارای بیش‌ترین احتمال وقوع برابر با ۲۰ درصد هستند. نتایج حاصل از بررسی‌ها حاکی از ریسک بالای پروژه، نشانگر این واقعیت است که نیاز به انجام اقدامات کنترلی و کاهنده به منظور کاهش ریسک، ضروری می‌باشد. پس از انجام اقدامات کاهنده و کاهش احتمال وقوع مخاطرات، مقدار ریسک کلی پروژه از محدوده ریسک به محدوده بی‌خطر (برابر با ۲۷۱) تقلیل پیدا کرد.

واژگان کلیدی: ریسک‌های ژئوتکنیکی، تحلیل درخت خطا، انحراف از مسیر حفر.

### ۱- مقدمه

پیچ‌های خطرناک در طول مسیر سفر محسوب می‌شود، به علت قرارگیری در مسیرهایی با عدم قطعیت بالا و مخاطرات زیاد به دلیل ناشناخته بودن زمین، وجود شرایط بد زمین‌شناسی، محدودیت فضای در دسترس و شرایط کاری نامناسب، بروز حوادث در زمان اجرا امری انکارناپذیر است [۱]. به همین دلیل، ارزیابی و مدیریت ریسک پروژه‌های تونل‌زنی از دیدگاه مخاطرات ژئوتکنیکی، یکی از موارد مهم و ضروری در مرحله اجرا و طراحی است. به دلیل موقعیت طبیعی قرارگیری تونل‌ها،

در سال‌های اخیر، با افزایش جمعیت و توسعه شهرها، صنعت حمل‌ونقل برون‌شهری و درون‌شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. در این صنعت که تونل‌زنی به‌عنوان یکی از روش‌های مناسب برای کاستن مسافت‌های طولانی راه‌های ارتباطی و همچنین حذف

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۱، بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹  
(DOI): 10.22091/cer.2020.5388.1200 شناسه دیجیتال

از روش FTA و براساس اطلاعات و داده‌های موجود از یکی از مهم‌ترین پروژه‌های تونل‌زنی کشور، قابلیت روش FTA در پیش‌بینی رخداد ریسک‌های اجرایی، مورد ارزیابی قرار گرفته و پس از تحلیل کارایی آن در مدیریت ریسک پروژه‌های حفر تونل، راهکارهای اجرایی برای کاهش خطرات حاصل از سوانح مختلف ارائه شده است.

لازم به ذکر است که تاکنون مطالعات متعددی در خصوص ارزیابی ریسک پروژه مذکور انجام شده است؛ ولی به‌کارگیری روش مناسب ارزیابی که بتواند به‌صورت دینامیکی و با اعمال همزمان اثرات عوامل مختلف، به محاسبه ریسک این پروژه تونل‌زنی بپردازد، بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور، این پژوهش با در نظر گرفتن مجموعه‌ای گسترده از عوامل مؤثر بر ریسک‌های تونل‌زنی، با استفاده از یک روش نوین و کارا به تحلیل ریسک‌های پروژه پرداخته شده است.

## ۲- پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در راستای تخمین، ارزیابی و محاسبه ریسک‌های تونل‌زنی انجام شده است. در این اوصاف، با توجه به بررسی‌های انجام شده، در سال‌های اخیر تعداد معدودی مطالعه در زمینه ارزیابی ریسک به روش تحلیل درخت خطا در مورد تونل انجام شده است که در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می‌شود. اردشیر و همکاران، ارزیابی ریسک در پروژه‌های عمرانی برای تونل‌های انتقال آب را با استفاده از روش FTA انجام دادند. در این مطالعه، با تحلیل ریسک پروژه دشت ذهاب در قالب مطالعه موردی و پس از اعتبارسنجی نتایج پژوهش توسط کارشناسان، مشخص گردید که تحلیل‌ها واقع‌بینانه بوده و خطرات بحرانی واقعی پروژه مشخص شدند. در خصوص کاهش عوارض حوادث احتمالی نیز اقداماتی پیشنهاد شد که چنانچه از سوی مدیریت طرح اعمال شود، می‌تواند خطرات عمده را نیز به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد [۳].

ریسک‌های متنوعی را باید در حین طراحی و اجرای پروژه‌های تونل‌زنی در نظر گرفت و با مدیریت صحیح و اصولی، در راستای کاهش آنها گام برداشت.

عدم مدیریت ریسک‌ها و بی‌توجهی به احتمال رخداد سوانح مختلف در حین اجرای طرح‌های حفر تونل، قطعاً توأم با صدمات مالی و جانی بوده و کل فرآیند اجرای تونل‌زنی را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. اعمال هزینه‌های مکرر مالی ناشی از حوادث اتفاق افتاده، از دیگر مسائل مهمی است که لزوم ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل‌زنی را گوشزد می‌کند.

هرچند که ارزیابی ریسک، در طول سال‌های گذشته نیز بسیار مدنظر پژوهشگران و مدیران پروژه‌های حفر تونل بوده است، ولی به‌کارگیری روش‌های مرسوم سنتی و یا استفاده از شیوه‌های تخمین ریسک، موجب شده است که پیش‌بینی وقوع سوانح و حوادث در این پروژه‌ها چندان دقیق نبوده و در طول اجرای پروژه، مشکلات عدیده‌ای رخ دهد. تحلیل‌های کمی برای بررسی دقیق‌تر احتمالات در پروژه‌ها استفاده می‌شوند. بنابراین نتایج حاصل از استفاده از شیوه‌های نوین نظیر <sup>۱</sup>FMEA یا تحلیل درخت خطا (<sup>۲</sup>FTA) در ارزیابی ریسک، نشان می‌دهد که می‌توان با تقریب قابل قبولی، ریسک حاصل از رخداد حوادث و سوانح فنی، طبیعی و اجرایی را پیش از آغاز پروژه حفر تونل محاسبه کرد و عوارض آنها را با استفاده از شیوه‌های مدیریتی به حداقل مقدار ممکن رساند [۱ و ۲].

از سوی دیگر، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش FTA در ارزیابی ریسک، محاسبه احتمال وقوع خطرات و مدیریت آنها در پروژه‌های مختلف صنعتی و عمرانی نشان می‌دهد که این روش، قابلیت محاسبه و ارزیابی ریسک را بهتر از سایر شیوه‌های تخمین داشته و درصد خطای آن کمتر از روش‌های دیگر است. در این پژوهش، با استفاده

<sup>۱</sup>- Failure Mode and Effects Analysis

<sup>۲</sup>- Fault Tree Analysis

خطرات داخلی رخ داده در فرایند تولید ارزیابی شدند. علاوه بر این، خطرات داخلی مورد اشاره باید براساس سطح خطرات آنها مدیریت شده و کاهش یابد [۷].

در مطالعه‌ای که قاسمی و همکاران انجام دادند، پس از شناسایی ریسک‌های خاص پروژه‌های تونل‌زنی مشتمل بر تأخیر زمانی و افزایش هزینه که به دلیل عدم توجه کافی به شرایط خاص کار به وقوع می‌پیوندد، با تمرکز بر روی یکایک این ریسک‌ها، علل ریشه‌ای هر کدام شناسایی شد و با استفاده از درخت خطای ترسیم شده، احتمال وقوع ریسک‌ها با استفاده از روش آنالیز درخت خطا محاسبه شدند. در پایان نیز ریزش جداره تونل به‌عنوان اصلی‌ترین و محتمل‌ترین عامل وارد آمدن خسارت به ساختمان‌های اطراف شناسایی شد [۸].

در پژوهشی دیگر، با استفاده از روش تحلیل درخت خطا فازی، یکی از اصلی‌ترین علل افزایش زمان و هزینه در پروژه‌های حفر تونل که ناشی از عدم شناسایی یا عدم توجه کافی به ریسک است مورد ارزیابی قرار گرفت [۹]. همچنین محققان، به بررسی و ارزیابی ایمنی مسافری قطارها در تونل‌های راه‌آهن با روش FTA پرداختند. در این مطالعه، خطراتی نظیر آتش‌سوزی، خروج از خط، وجود دود حاصل از دیزل‌ها در تونل و عدم وجود سیستم تهویه مناسب مورد ارزیابی قرار گرفتند و دود ناشی از فعالیت دیزل‌ها، به‌عنوان پر ریسک‌ترین خطر شناسایی شد [۱۰].

فولادگر و همکاران با مرور روش‌های ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل‌زنی، روش تحلیل درخت خطا را به‌عنوان روشی قابل اعتماد و کارا در تحلیل ریسک‌های عملیاتی و اجرایی حفر تونل مورد اشاره قرار دادند. علاوه بر این، در پژوهش مذکور استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۱].

هیون<sup>۵</sup> و همکاران، با استفاده از روش تحلیل درخت خطا به ارزیابی و مدیریت ریسک‌های محتمل در حفر

در پژوهشی دیگر، کاربرد ارزیابی ریسک به روش درخت تحلیل خطا برای طراحی سپر دستگاه حفاری تمام‌مقطع ارائه شد. نتایج احتمالی این مطالعه، که ممکن است از رویدادهای آغازین به‌صورت متوالی رخ دهند، تحلیل شده و اقدامات متقابل کلی (عملکردهای ایمنی) برای اطمینان از ایمنی در برابر خطرات ارائه شده‌اند. مشخص گردید که روش مورد استفاده، یک روش مؤثر برای ارزیابی و تحلیل کمی از خطرات احتمالی و برای پیشنهاد اقدامات متقابل برای شرایط محیطی خطرناک مانند تونل واقع در زیر سطح ایستایی است [۴].

گیرساک<sup>۳</sup>، به مطالعه ارزیابی ریسک پروژه‌های حفاری افقی با به‌کارگیری درخت تحلیل خطا پرداخت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش FTA در تحلیل ریسک پروژه‌های حفاری، نتایج قابل قبول داشته و از این روش می‌توان در ارزیابی ریسک‌های طرح‌های عمرانی - معدنی مشابه بهره گرفت [۵].

متحدی و عطایی، نیز با استفاده از روش تحلیل درخت خطا به تحلیل ریسک انفجار زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی پرداختند. با توجه به نتایج حاصل از محاسبات انجام شده، مقادیر احتمال وقوع انفجار زغال‌سنگ با سازوکارهای خودسوزی و از راه دور را به ترتیب در معادن زغال سنگ ۰/۹ و ۱۱/۶ درصد نشان می‌دهد. همچنین انتشار انرژی لرزه‌ای به دلیل لغزندگی ناپیوستگی‌های موجود در نزدیکی معادن زغال‌سنگ، مسیری بحرانی‌تر برای انفجار زغال‌سنگ از راه دور ایجاد می‌کند. نتیجه این مطالعه می‌تواند الهام‌بخش مهندسان معدن باشد که با انفجار زغال در تضاد هستند [۶].

در مطالعه وسیانی و یاشیو<sup>۴</sup>، روشی ترکیبی برای ارزیابی ریسک ارائه شده است که بخش مهمی از روش ارائه شده را به FTA اختصاص دادند. در یک مطالعه موردی نیز نتایج حاصل از روش ترکیبی ارائه شده

<sup>3</sup>- Gierczak

<sup>4</sup>- Wessiani and Yoshio

<sup>5</sup>- Hyun

### ۳- مطالعه موردی: تونل امامزاده هاشم

قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم، بخشی از طرح توسعه جاده‌ای کشور است که وظیفه افزایش ظرفیت حمل‌ونقل و کاهش حوادث جاده‌ای در محدوده حادثه‌خیز امامزاده هاشم را بر عهده دارد. طول تونل حدود ۳۲۰۰ متر و به لحاظ موقعیت مکانی در محدوده شمال‌شرقی استان تهران و در حد فاصل دره مشاء (در شمال) و دره جنوب‌شرقی آبلعی واقع شده است. این منطقه جزو نواحی کوهستانی رشته کوه البرز به حساب می‌آید. مقطع عرضی تونل به صورت دایروی با قطر حفاری حدود ۱۲/۲۷ متر و شیب طولی تونل ۲/۵ درصد است. روش اجرای تونل به صورت مکانیزه و با استفاده از یک دستگاه حفاری تمام‌مقطع سپر تلسکوپی است [۱۵].

ناحیه مورد بررسی، قسمتی از استان ساختاری- رسوبی البرز است که در جنوب گسله‌راندگی سراسری شاهرود- آبیگ واقع شده و واحدهای لیتولوژیکی آن را می‌توان به نام واحدهای چینه‌شناسی البرز نامید. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی انجام شده، هفت سازند سر راه تونل به ترتیب عبارتند از توف برشی و گدازه آئوسن، توف داسیتی آئوسن، سازند دورود، سازند مبارک، سازند روته، نازک لایه کرمینه‌ای و سازند باروت [۱۶].

در شکل ۱، پروفیل طولی مسیر تونل نشان داده شده است. جدول ۱ نیز مشخصات ژئوتکنیکی واحدهای مورد مطالعه از مسیر حفر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم را ارائه داده است.

براساس پروفیل زمین‌شناسی موجود، مسیر تونل با حدود ۷ تا ۸ گسل برخورد می‌کند که با توجه به ناحیه‌های گسلی آنها در حدود ۴۰۰ متر از مسیر تونل را ناحیه‌های گسلی تشکیل می‌دهند [۱۶]. در جدول ۲، مشخصات گسل‌های مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم ارائه شده است. با توجه به بررسی‌های هیدروژئولوژی در منطقه امامزاده هاشم مشخص شد که کل مسیر تونل زیر سطح ایستایی قرار گرفته است.

مکانیزه تونل شامل گیر کردن کله‌حفار، گیر کردن ماشین حفاری، وجود نقص در سیستم پشتیبانی حمل‌ونقل و وجود نقص در سگمنت‌ها پرداختند. این پژوهشگران هرکدام از مواد مذکور را به سه دسته خطاهای طراحی، مدیریتی و عوامل زمین‌شناسی تقسیم‌بندی کردند. در نهایت، نقص در سگمنت و سیستم پشتیبانی حمل‌ونقل به‌عنوان اصلی‌ترین و پرریسک‌ترین مخاطرات شناسایی شدند [۱۲].

وانگ<sup>۶</sup> و همکاران در پژوهشی دیگر با به‌کارگیری همزمان تکنیک‌های شبکه‌های بیزی و ماشین بردار پشتیبان، ریسک‌ها و خطرات ناشی از تونل‌زنی را ارزیابی کردند [۱۳].

صداقتی و همکاران نیز با استفاده از روش تحلیل فازی به ارزیابی و مدیریت ریسک هجوم آب زیرزمینی در تونل امامزاده هاشم پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از رویکرد تحلیل عددی در شرایط عدم قطعیت، ریسک‌های ناشی از هجوم آب به تونل در حین عملیات حفر، مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۴].

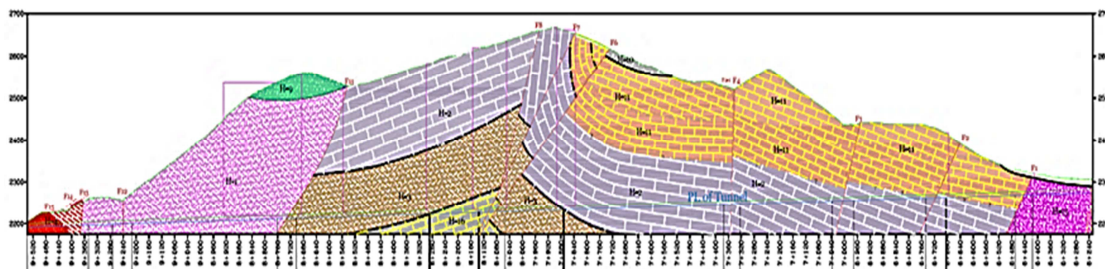
حفر قطعه دوم تونل امامزاده هاشم نیز به دلیل ساختار بد زمین‌شناسی و شرایط نامساعد ژئوتکنیکی، به‌عنوان یکی از پرمخاطره‌ترین پروژه‌های تونل‌زنی در سطح کشور است که نیازمند بررسی و مدیریت ریسک‌های تونل‌زنی (به‌ویژه ریسک‌های ژئوتکنیکی) می‌باشد. در پژوهش حاضر، سعی می‌شود تا در مرحله نخست پس از بررسی و شناسایی مخاطرات موجود در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم مشتمل بر آسیب به پرسنل، سیستم نگهداری، ماشین حفاری و انحراف از مسیر حفاری، به شناسایی عوامل ایجاد این مخاطرات و ارزیابی ریسک کلی پروژه با استفاده از روش FTA پیش و پس از انجام اقدامات کنترلی پرداخته شود.

<sup>6</sup>- Wang

تحلیل درخت خطا (FTA)، چگونگی وقوع یک حادثه ناخواسته را از ترکیب چند حادثه بنیانی به صورت یک مدل منطقی گرافیکی نشان می‌دهد که حادثه ناخواسته، به نام واقعه رأس معروف است. تحلیل درخت خطا، تمامی راه‌هایی که منجر به این حادثه می‌شود را تعیین کرده و با داشتن داده‌های صحیح، قادر به محاسبه احتمال و دفعات تکرار این واقعه است.

با توجه به وجود مناطق ضعیف همراه با دسته درزه‌های متعدد و تراز بالای آب در برخی مناطق، احتمال هجوم آب در حین حفر تونل وجود دارد. مشخصات هیدروژئولوژی مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم در جدول ۳ ارائه شده است.

#### ۴- روش‌شناسی



شکل ۱- پروفیل طولی تونل قطعه دوم تونل راه امامزاده هاشم [۱۵]

جدول ۱- مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ [۱۵]

مقطع	لیتولوژی	طول (m)	مقاومت تراکمی تک‌محوری (MPa)	RMR	RQD	Q	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )
H-4	توف برشی و گدازه آنوسن	۱۳۰	۳۵	۱۹	۲۵	۰/۰۲	۲/۶
H-1	توف داسیتی آنوسن	۶۰۰	۱۲۰	۶۳	۹۰	۹	۲/۶
H-3	سازند درود	۵۲۰	۵۵	۴۳	۵۵	۰/۴۹	۲/۶
H-16	سازند مبارک	۱۴۰	۷۵	۵۵	-	۱/۹۵	۲/۶
H-2	سازند روته	۱۰۲۰	۱۱۰	۵۹	۸۰	۸	۲/۶
H-11	سازند الیکا	۱۸۰	۴۰	۴۴	۶۳	۲/۵۲	۲/۶
H-15	سازند باروت	۱۳۰	۳۰	۵۰	-	۲	۲/۶
-	ناحیه‌های گسلی	۴۰۰	۳۰	۱۵	۱۵	۰/۰۲	۲/۶

جدول ۲- مشخصات گسل‌ها و ناحیه‌های گسلی مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم [۱۵]

ناحیه گسلی	نام گسل	کیلومتر برخورد	مقطع برخورد	نوع گسل	جهت برخورد به تونل	زاویه برخورد به تونل (°)	عرض ناحیه گسلی (m)	ارتفاع روباره (m)
Fz <sub>1</sub>	F <sub>15</sub>	۴۲۰+۹	توف برشی و گدازه آنوسن	معکوس	در جهت حفاری	۵۵	۸۰	۵۰
	F <sub>14</sub>	۴۲۰+۹	توف برشی و گدازه آنوسن	راندگی	خلاف جهت حفاری	۸۵	-	۵۰
	F <sub>13</sub>	۳۷۰+۹	توف داسیتی آنوسن	راندگی	خلاف جهت حفاری	۸۰	-	۵۰
Fz <sub>2</sub>	F <sub>12</sub>	۲۴۰+۹	توف داسیتی آنوسن	قائم	قائم بر تونل	۶۰	۵۰	۵۰
Fz <sub>3</sub>	F <sub>11</sub>	۷۲۰+۸	سازند درود	راندگی	خلاف جهت حفاری	۳۵	۶۰	۳۵۰
Fz <sub>4</sub>	F <sub>7</sub>	۱۰۰+۸	سازند مبارک	راندگی	خلاف جهت حفاری	۵۵	۸۰	۳۵۰
	F <sub>6</sub>	۰۸۰+۸	سازند درود	راندگی	خلاف جهت حفاری	۳۰	۸۰	۳۵۰
Fz <sub>5</sub>	F <sub>4</sub>	۳۵۰+۷	سازند روته	عادی	خلاف جهت حفاری	۹۰	۵۰	۳۰۰
Fz <sub>6</sub>	F <sub>3</sub>	۰۰۰+۷	سازند روته	عادی	خلاف جهت حفاری	۴۵	۷۰	۲۰۰
Fz <sub>7</sub>	F <sub>2</sub>	۷۰۰+۶	سازند روته	عادی	خلاف جهت حفاری	زاویه‌دار	۷۰	۲۰۰
Fz <sub>8</sub>	F <sub>1</sub>	۴۴۰+۶	سازند الیکا	راندگی	خلاف جهت حفاری	۵۰	۶۰	۱۰۰

جدول ۳- مشخصات هیدروژئولوژی مسیر تونل قطعه دوم امامزاده هاشم (ع) [۱۴]

ناحیه	کیلومتر	لیتولوژی	متوسط ارتفاع سطح آب زیرزمینی (متر)	تعداد دسته درزه	نفوذپذیری (m/s)
۱	۴۸۰+۹ - ۳۶۰+۹	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۳۵	-	$10^{-7}$
۲	۷۰۰+۸ - ۳۶۰+۹	مصالح ولکانیکی	۱۲۵	۳	$10^{-5}$
۳	۲۸۰+۸ - ۷۰۰+۸	ماسه‌سنگ	۲۶۵	۵	$10^{-3}$
۴	۱۸۰+۸ - ۲۸۰+۸	سنگ‌آهک	۲۷۰	-	$10^{-7}$
۵	۶۸۰+۶ - ۸۸۰+۷	دولومیت و سنگ‌آهک تیره	۱۹۵	۵	$10^{-4}$
۶	۴۸۰+۶ - ۶۸۰+۶	دولومیت و سنگ‌آهک	۷۰	۵	$10^{-6}$
۷	۲۴۰+۶ - ۴۰۰+۶	شیل و ماسه‌سنگ	۲۵	-	$10^{-7}$

می‌کند، احتمال یک واقعه نامطلوب را ردگیری کند [۱۷].

تحلیل درخت خطا برای نخستین بار در آزمایشگاه‌های تلفن بل در طی قرارداد همکاری با نیروی هوایی آمریکا توسط واتسون در سال ۱۹۶۱ معرفی شد. شرکت بوئینگ، اولین شرکت تجاری بود که به مزایای FTA پی برد و بعدها این روش کاربرد گسترده‌ای در صنعت هوافضا و هسته‌ای پیدا کرد [۱۸].

هر درخت خطا از یک ترکیب شناخته شده به‌عنوان دروازه‌ها تشکیل شده است که برای اجازه‌دادن یا منع کردن معبرهای منطقی خطا به سوی بالای درخت است. دروازه‌ها، رابطه‌های مورد نیاز رویدادها را برای وقوع یک رویداد بالاتر نشان می‌دهند. رویداد بالاتر، خروجی دروازه است و رویداد پایین‌تر، ورودی دروازه محسوب می‌شوند. علامت دروازه، دلالت بر نوع رابطه رویدادهای ورودی مورد نیاز برای رویداد خروجی دارد که معمولاً دو دروازه پر کاربرد آن دروازه (و) و دروازه (یا) هستند [۱۹]. اگر برای وقوع حادثه‌ای چند علت، مشخص شود و وقوع حادثه منوط به رخ دادن تمامی علت‌ها به‌طور هم‌زمان باشد، علت‌ها با دروازه (و) به حادثه اصلی مربوط می‌شوند و اگر برای وقوع حادثه یکی از علت‌ها کافی باشد، دروازه رابط آنها از نوع (یا) خواهد بود [۱۰].

برای ترسیم درخت خطا و تحلیل کیفی آن، از نمادهای ویژه‌ای استفاده می‌شود که در جدول ۴ به ذکر

همچنین این روش، توانایی تحلیل سیستم‌های پیچیده بزرگ‌مقیاس را دارد. برخی از خصوصیات FTA به قرار زیر است:

- این تحلیل می‌تواند حوادث منجر به واقعه رأس را به‌طور کیفی، مشخص کرده و سپس با تحلیل کمی این حوادث، احتمال و دفعات تکرار واقعه رأس را مشخص کند.
- این تحلیل با فراهم کردن یک نمایش گرافیکی از حادثه‌ای که منجر به واقعه رأس می‌شوند، به درک راحت‌تر وقایع ناخواسته بسیار کمک می‌کند.
- این روش، اغلب زمانی به کار می‌رود که سایر روش‌های ارزیابی مخاطره، حادثه‌ای را تشخیص دهند که نیاز به جزئیات بیشتری داشته باشد.
- روش تحلیل درخت خطا، به تحلیلگر این اختیار را می‌دهد که بر روی علل خاصی از حادثه تمرکز کرده و ابزار اندازه‌گیری برای کاهش یا حذف آن را مشخص کرده و به این ترتیب، احتمال رخ‌دادن واقعه رأس را کاهش دهد [۱۰].
- کارایی روش FTA مستلزم صرف زمان مهندسی قابل توجه است و کیفیت نتایج بستگی به اعتبار داده‌های ورودی و دقت منطق درخت خطا دارد. این روش می‌تواند در اوایل فاز طراحی اولیه به انجام رسد و به تدریج بهبود یافته و به‌روز شود تا هم‌زمان که طرح رشد

$$P_T(\text{top event}) = \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (2)$$





که در آنها،  $P_T$ ؛ احتمال میزان نقص در خروجی دروازه،  $P_i$  احتمال ورودی های دروازه و  $n$  تعداد داده های ورودی است.

نام و شرح مختصری از خصوصیات آنها پرداخته شده است.

در تحلیل کمی ریسک به روش تحلیل درخت خطا، برای محاسبه احتمالات مربوط به خروجی دروازه های (و) و (یا) به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده می شود [۲۰]:

$$P_T(\text{top event}) = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

جدول ۴- نمادهای استفاده شده در درخت خطا [۱۰ و ۱۹]

رویدادی که در بالاترین نقطه خطا جای می گیرد و علل به وجود آورنده آن شناسایی شده و تجزیه و تحلیل می شود.		رویداد اصلی
واقعه ای که نمی توان آن را به وقایع جزئی تر تجزیه کرد.		رویداد پایه
وقوع واقعه میانی در صورت وقوع حداقل یکی از ورودی ها اتفاق می افتد.		دروازه (یا)
وقوع واقعه میانی در صورت وقوع همه ورودی ها اتفاق می افتد.		دروازه (و)

انحراف از مسیر حفار، به عنوان حادثی که منجر به ریسک کلی در پروژه می شوند، شناسایی و معرفی شدند.

#### ۵-۱-۱- آسیب به پرسنل

پروژه های تونل زنی که به عنوان پروژه های عمرانی زیرزمینی شناخته می شوند، از پروژه های پرخطر از نظر خسارت جانی برای پرسنل محسوب می شوند [۲۱]؛ به طوری که تعداد آسیب دیدگان در فضاهای زیرزمینی بیش تر از کارگاه های عمرانی است. این خسارات، به شکل های مختلف مانند مرگ پرسنل، آسیب هایی با اثرات درازمدت و کوتاه مدت، دست بندی می شوند [۲۲]. به این دلیل، بررسی عوامل و علل به وجود آورنده خسارات جانی در بین پرسنل در حین اجرای پروژه، از اهمیت ویژه ای برخوردار است که می تواند هزینه های فراوانی از نظر مالی و جانی به پروژه تحمیل کند. در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم، تمامی مخاطراتی که منجر به آسیب به پرسنل کارگاه می شوند، شناسایی شده و در گروه های مختلفی دسته بندی شده اند.

#### ۵-۱-۲- آسیب به سیستم نگهداری

## ۵- تحلیل و بحث

در این پژوهش، به منظور ارزیابی ریسک های تونل زنی، ابتدا اطلاعات مربوط به مباحث زمین شناسی، ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی گردآوری شده و پس از تحلیل مهندسی آنها، حوادث مختلف مربوط به شرایط فنی و مهندسی پروژه مورد شناسایی قرار گرفتند. پس از طراحی و ترسیم مدل مربوط به تحلیل درخت خطا، با اجرای مدل و گرفتن خروجی های مختلف مورد نیاز، نتایج حاصل، مورد ارزیابی کارشناسانه قرار گرفتند.

به طور کلی، برای ارزیابی ریسک به روش تحلیل درخت خطا، لازم است که مراحل مختلفی به ترتیب اجرا شوند که در ادامه، تشریح شده است.

#### ۵-۱-۳- شناسایی حوادث

به منظور تحلیل ریسک قطعه دوم تونل امامزاده هاشم، ابتدا باید خطرات و حوادثی که منجر به ریسک کلی در پروژه می شوند را شناسایی کرد. بدین منظور، پس از بررسی های مختلف چهار حادثه شامل آسیب به پرسنل، آسیب به سیستم نگهداری، آسیب به ماشین حفاری و



#### ۵-۱-۴- آسیب به ماشین حفاری

در تونل‌زنی با استفاده از ماشین حفار تمام‌مقطع (TBM<sup>۷</sup>)، در صورت وجود نقص در ماشین حفاری، عملیات تونل‌زنی به کلی متوقف شده و منجر به خسارت‌های مالی فراوانی می‌شود. این خسارت می‌تواند ناشی از تعمیر یا تعویض قطعات دستگاه یا به دلیل ایجاد وقفه در فرآیند تونل‌زنی باشد. بدین منظور، بررسی حادثه آسیب به ماشین حفاری امری بسیار مهم و ضروری است. در پروژه قطعه دوم تونل امامزاده هاشم، پس از بررسی‌هایی که بر روی عوامل ایجاد آسیب به ماشین حفاری انجام شد، آسیب به بخش مکانیکی و الکتریکی دستگاه که خود آنها نیز ناشی از برخی عوامل ژئوتکنیکی منطقه بودند، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل بروز نقص در ماشین حفاری شناسایی شدند. درخت زیر چگونگی رخداد آسیب به ماشین حفاری و نحوه ارتباط عوامل را با یکدیگر نمایش می‌دهد.

#### ۵-۲- شناسایی مخاطرات

تونل‌زنی مکانیزه در محیط‌های سخت، همواره با مخاطرات فراوانی مواجه شد. پروژه‌های تونل‌زنی بسیار محدودی را می‌توان یافت که در این نواحی توقف‌های طولانی‌مدت ناشی از شرایط خاص ژئوتکنیکی در آن رخ نداده باشد. مواردی همچون حضور گسل در منطقه، ناپایداری تونل، هجوم آب، مچاله‌شوندگی و ضعف در ساختارهای زمین‌شناسی از جمله مخاطراتی محسوب می‌شوند که می‌توانند توقف‌های طولانی‌مدت را در حفاری تونل ایجاد کنند [۲۴ و ۲۵]. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم و بررسی پروفیل مسیر، مخاطرات شناسایی شده عبارتند از حضور گسل در منطقه، ضعف در ساختارهای زمین‌شناسی، ناپایداری تونل، مچاله‌شوندگی و هجوم آب. با بررسی‌ها و مطالعاتی که بر روی قطعه دوم تونل امامزاده

در پروژه‌های تونل‌زنی، یکی از فعالیت‌هایی که باید بلافاصله پس از حفاری صورت گیرد، نصب سیستم نگهداری است که با توجه به محیط حفاری می‌تواند به‌صورت نصب سیستم‌های نگهداری سبک و یا سنگین انجام شود [۲۳]. در صورت بروز هرگونه آسیب در سیستم نگهداری، احتمال وقوع خطرات جبران‌ناپذیر جانی و مالی در پروژه بالا رفته و در برخی موارد منجر به توقف کامل پروژه می‌شود [۱]. بنابراین بررسی عواقب ناشی از آسیب به سیستم نگهداری و بررسی علل و عوامل ایجاد آن، لازم و ضروری است. در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم، مخاطرات ژئوتکنیکی نظیر هجوم آب، ناپایداری تونل و مچاله‌شوندگی به‌عنوان عوامل ایجاد آسیب در سیستم نگهداری شناسایی شدند.

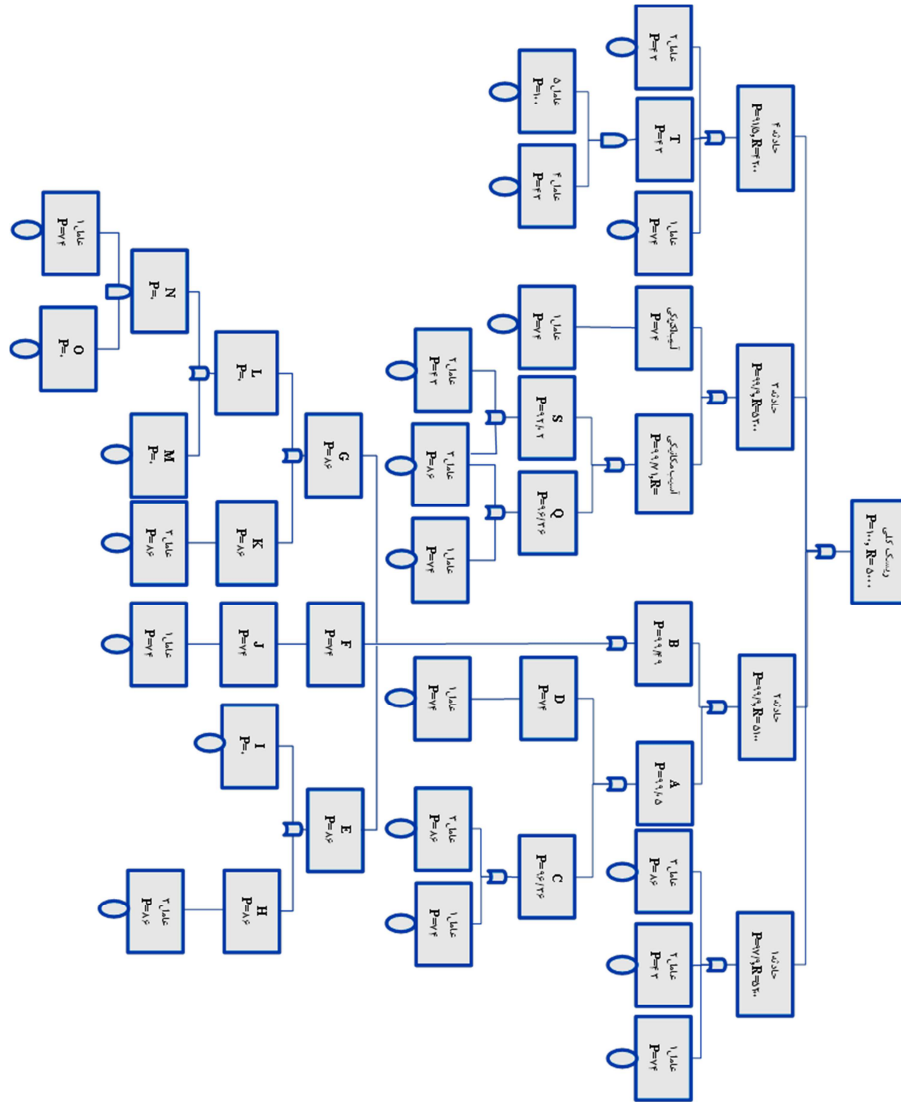
#### ۵-۳- انحراف از مسیر حفاری

یکی از اولویت‌های کاری دیگری که باید در فرآیند تونل‌زنی مورد توجه واقع شود، طراحی مسیر حفر و جلوگیری از انحراف دستگاه از مسیر حفر است. در صورتی که دستگاه از مسیر طراحی شده منحرف شود، ممکن است به سمت پرتگاه، سفره زیرزمینی و یا سایر مناطقی که دارای مخاطرات فراوانی هستند، انحراف یافته و منجر به خسارت‌های هنگفتی خواهد شد که قابل جبران نیست و حتی ممکن است پروژه به مدت زیادی متوقف شود [۱]. در بررسی‌هایی که انجام شد، انحراف از مسیر حفر می‌تواند به دلیل مخاطرات ژئوتکنیکی موجود در منطقه حفاری و یا اشتباهات طراحی باشد که در این پژوهش، فقط به بررسی عوامل ژئوتکنیکی پرداخته شد. در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم، مخاطراتی همچون هجوم آب، برخورد با زون گسله- خردشده و مچاله‌شوندگی که موجب انحراف دستگاه حفاری از مسیر طراحی شده می‌شوند. در درختی که برای بررسی احتمالات وقوع حادثه انحراف از مسیر حفر تنظیم و ترسیم شد، علاوه بر مشخص کردن مخاطرات به‌وجود آورنده این حادثه، ارتباط بین این عوامل نیز مشخص شده است.

7- Tunnel Boring Machine

هاشم صورت گرفت، پس از شناسایی حوادث و مخاطرات به وجود آورنده ریسک کلی پروژه، احتمالات مربوط به عوامل یا مخاطرات با استفاده از روش‌های تحلیلی و

عددی از صفر تا ۱۰۰ مشخص و نتایج این احتمالات در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- درخت ترسیم شده به منظور تحلیل ریسک قطعه دوم تونل امامزاده هاشم

همچنین شدت خطر مربوط به هر یک از مخاطرات و حوادث، پس از تنظیم جدول کلاس‌بندی شدت خطر، شدت خطر هر یک از حوادث با استفاده از جدول ۵ و دانش نویسندگان تعیین شده و نتایج آن در نمودار شکل ۲ برای هر یک از حوادث، اعمال شده است. درخت مربوط به حوادث و مخاطرات در شکل ۲ ترسیم شده است که در درخت مربوطه پارامترهایی که به صورت اختصاری یا

به صورت عوامل و حوادث نام‌گذاری شده‌اند، در جدول ۶ نام دقیق آنها بیان شده است.

### ۳-۵- اجرای اقدامات کنترلی و کاهشده

پیش از این، ارزیابی ریسک حوادث و میزان پرخاطر بودن حوادث شناسایی و همچنین ریسک کلی پروژه مشخص شد. در ادامه مطابق با استاندارد مدیریت ریسک استرالیا، باید اقداماتی را که می‌تواند سبب جلوگیری یا

کاهش ریسک شود در نظر گرفت و انجام داد. این اقدامات روش‌های مختلفی برای جلوگیری و یا کاهش اثر که موجب کاهش یا حذف ریسک می‌شوند اصطلاحاً اقدامات کاهشده نامیده می‌شوند. در تونل‌زنی مکانیزه نیز بودن شرایط اجرا می‌شوند.

جدول ۵- کلاس‌بندی شدت خطر براساس آسیب جسمی، مدت زمان توقف و میزان صدمه دیدن دستگاه

بیان کمی شدت خطر	بیان کیفی شدت خطر
۱۰۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به مرگ پرسنل شود. - صدمه دیدن بیش از ۹۰ درصد دستگاه که موجب تعویض دستگاه شود. - توقف پروژه به مدت بیش از ۲ ماه
۹۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به قطع عضو یا فلج‌شدگی بیش از ۴ عضو از بدن شود. - صدمه دیدن بیش از ۵۰ درصد قطعات دستگاه که باعث تعویض آنها شود. - توقف پروژه به مدت ۱ تا ۲ ماه
۸۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به قطع عضو یا فلج‌شدگی ۲ تا ۴ عضو از بدن شود. - صدمه دیدن ۱۰ تا ۵۰ درصد قطعات دستگاه که باعث تعویض آنها شود. - توقف پروژه به مدت ۲۰ روز تا ۱ ماه
۷۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به قطع عضو یا فلج‌شدگی یک عضو از بدن شود. - صدمه دیدن بیش از ۵۰ درصد دستگاه که کاربرد اساسی دارند. توقف پروژه به مدت ۱۵ تا ۲۰ روز
۶۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به آسیب دیدگی دستگاه گوارشی، بینایی و شنوایی که اثرشان تا درازمدت باقی است. - صدمه دیدن ۲۰ تا ۵۰ درصد دستگاه که کاربرد اساسی دارند. - توقف پروژه به مدت ۱۰ تا ۱۵ روز
۵۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به شکستگی بیش از ۴ عضو بدن شود. - صدمه دیدن ۵ تا ۲۰ درصد دستگاه که کاربرد اساسی دارند. - توقف پروژه به مدت ۵ تا ۱۰ روز
۴۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به شکستگی ۲ تا ۴ عضو از بدن شود. - صدمه دیدن قطعات الکتریکی دستگاه یا بخشی از دستگاه که با تعمیر، مشکل رفع می‌شود ولی نیاز به یک فرد متخصص است. - توقف پروژه به مدت ۳ تا ۵ روز
۳۰	- آسیب‌های جسمی که منجر به شکستگی یک عضو از بدن می‌شود - صدمه دیدن بخشی از قطعات کاربردی دستگاه که توسط افراد غیرمتخصص نیز تعمیر می‌شوند. - توقف پروژه به مدت ۱ تا ۳ روز
۲۰	آسیب‌های جسمی به‌صورت خراشیدگی یا بریدگی می‌باشند صدمه دیدن بخشی از قطعات کاربردی دستگاه که به راحتی تعمیر می‌شوند. توقف پروژه به مدت ۱۲ تا ۲۴ ساعت
۱۰	آسیب‌های جزئی جسمی که به‌صورت بسیار سطحی هستند. صدمه دیدن بخشی از دستگاه که تعمیر کردن یا نکردن آنها تأثیری در روند پروژه ایجاد نمی‌کند. توقف پروژه به مدت ۱ تا ۱۲ ساعت
صفر	هیچ‌گونه آسیب جسمی وجود نداشته باشد. هیچ‌گونه آسیبی به دستگاه وارد نمی‌شود. پروژه هیچ‌گونه توقفی نداشته باشد.

جدول ۶- مشخصات حوادث و مخاطرات استفاده شده در شکل ۲

حوادث و مخاطرات		ردیف	حوادث و مخاطرات		ردیف
اختلال عصبی	G	۱۶	آسیب به سیستم نگهداری	حادثه ۱	۱
تنفس گرد و غبار	H	۱۷	آسیب به پرسنل	حادثه ۲	۲
تنفس گازهای سمی حاصل از نشت	I	۱۸	آسیب به ماشین حفاری	حادثه ۳	۳
برق گرفتگی	J	۱۹	انحراف از مسیر حفر	حادثه ۴	۴
وجود گرد و غبار در محیط تونل	K	۲۰	هجوم آب	عامل ۱	۵
ورود گازها یا آبهای سمی به چشم	L	۲۱	مچاله‌شوندگی	عامل ۲	۶
نشت گاز سمی	M	۲۲	ناپایداری تونل	عامل ۳	۷
هجوم آبهای حاوی مواد شیمیایی مضر	N	۲۳	ضعف در ساختار زمین‌شناسی	عامل ۴	۸
مواد شیمیایی مضر	O	۲۴	حضور گسل در منطقه	عامل ۵	۹
احتمال حوادث و مخاطرات	P	۲۵	آسیب‌هایی که در کوتاه‌مدت اثرش باقی می‌ماند.	A	۱۰
صدمه دیدن قطعات دستگاه	Q	۲۶	آسیب‌هایی که در بلندمدت اثرش باقی می‌ماند.	B	۱۱
ریسک	R	۲۷	شکستگی اعضای بدن	C	۱۲
گیر افتادن دستگاه	S	۲۸	برق گرفتگی خفیف	D	۱۳
برخورد با زون گسله- خردشده	T	۲۹	اختلال گوارشی	E	۱۴
			اختلال بینایی	F	۱۵

با اجرای اقدامات کاهنده، احتمال وقوع و اثر مخاطره به حداقل رسیده و در نتیجه آن مقدار ریسک کلی کاهش می‌یابد. با توجه به مطالب گفته شده، نتایج احتمالات مربوط به عوامل و مخاطرات به‌وجود آورنده حوادث و ریسک کلی و همچنین ریسک یکایک حوادث و ریسک کلی پروژه پس از اجرای اقدامات کاهنده به ترتیب در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

انتخاب روش مناسب برای کاهش ریسک بستگی به شرایط حفاری، هزینه و وجود دانش فنی آن دارد و کاری زمان‌بر است. به همین دلیل، در قطعه دوم تونل امامزاده هاشم با بررسی روش‌های انجام شده در سایر پروژه‌ها، برای ناپایداری تونل، ناحیه‌های گسلی، ناحیه‌های خردشده و هجوم آب روش تزریق و برای پدیده مچاله‌شوندگی ترکیبی از تزریق و روش‌های مخصوص مچاله‌شوندگی در نظر گرفته شده است

#### ۴-۵- ارزیابی ریسک باقی‌مانده

جدول ۷- نتایج مربوط به احتمالات مخاطرات ژئوتکنیکی و ریسک حوادث به‌وجود آورنده ریسک کلی پروژه

مخاطره ژئوتکنیکی	احتمال	حوادث	عدد ریسک
حضور گسل در منطقه	۲۰	آسیب به ماشین حفاری	۱۵۰
ضعف در ساختارهای زمین‌شناسی	صفر	آسیب به سیستم نگهداری	۴۶۷
ناپایداری تونل	صفر	آسیب به پرسنل	صفر
مچاله‌شوندگی	۲۰	انحراف دستگاه از مسیر حفر	۴۶۷
هجوم آب	صفر	ریسک کلی پروژه	۲۷۱

مطابق با داده‌های موجود در جدول ۷، پنج مخاطره ژئوتکنیکی در حین عملیات تونل‌زنی، بسیار مهم محسوب

با بررسی نتایج حاصل از مدل FTA و تحلیل مهندسی آنها، مسائل جالب توجهی به‌دست می‌آید.

پس از انجام محاسبات و اندازه‌گیری ریسک، در محدوده خطر قرار گرفت. همچنین آسیب به دستگاه حفاری و آسیب به سیستم نگهداری با اعداد ریسک ۵۳۰۴ و ۵۲۳۰ به‌عنوان حوادث پرخطر به‌وجود آورنده ریسک کلی پروژه شناسایی شدند. از سوی دیگر، به دلیل پرخطر بودن ریسک، باید اقدامات کنترلی و کاهنده اجرا شود. همچنین اجرای اقدامات کنترلی و کاهنده باعث کاهش احتمالات مربوط به مخاطرات می‌شود. لازم به ذکر است که پس از اجرای اقدامات کاهنده، ریسک کلی پروژه برابر ۲۷۱ شد. لازم به ذکر است که مخاطرات ناشی از حضور گسل در منطقه و مچاله‌شوندگی دارای بیشترین احتمال وقوع برابر با ۲۰ درصد هستند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که روش تحلیل درخت خطا به‌عنوان یک روش

گرافیکی، به پژوهشگران، طراحان، مجریان و مدیران این اجازه را می‌دهد که به تمامی مخاطرات دید یکجا داشته باشند. به دلیل بالا بودن ریسک کلی پروژه و احتمال وقوع حوادث جبران‌ناپذیر، پیشنهاد می‌شود به منظور کاهش ریسک، قبل از حفر تونل مورد مطالعه، مطالعاتی در خصوص تزریق صورت پذیرد.

### تقدیر و قدردانی

پژوهش حاضر، نتیجه مساعدت‌های بسیاری از عزیزانی بوده که نویسندگان را مورد لطف و عنایت خود قرار داده‌اند. از مدیریت محترم و کارشناسان شرکت مهندسی مشاور ایران رستن و نیز مدیریت محترم مؤسسه مهندسی مشاور ساحل کمال که همکاری‌های لازم را از نویسندگان دریغ نکردند، تشکر و قدردانی را دارد.

می‌شوند. از بین این پنج مخاطره، حضور گسل در منطقه و نیز مچاله‌شوندگی، دو مخاطره خطرناک هستند که دارای احتمال وقوع بالاتری نسبت به باقی مخاطرات هستند. از سوی دیگر، حوادث مرتبط با این پنج مخاطره نیز مورد شناسایی و ارزیابی قرار گرفتند که سه مورد از آنها توأم با آسیب بوده و یک مورد نیز مربوط به دستگاه حفر است. همچنین همان‌طور که از نتایج جدول ۵ مشاهده می‌شود، ریسک کلی پروژه پس از انجام اقدامات کنترلی، وارد محدوده بی‌خطر ریسک شده و هیچ‌گونه حادثه ناشی از مخاطرات ژئوتکنیکی، پروژه مربوطه را تهدید نمی‌کند.

### ۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با توجه به داده‌های موجود، ارزیابی ریسک مخاطرات ژئوتکنیکی قطعه دوم تونل امامزاده هاشم انجام گرفت. در مسیر تونل، پنج نوع مخاطره شامل ناپایداری تونل، مچاله‌شوندگی، هجوم آب، ضعف در ساختارهای زمین‌شناسی حضور گسل در منطقه و چهار حادثه به‌وجود آورنده ریسک کلی شامل آسیب به دستگاه حفاری، سیستم نگهداری، پرسنل و انحراف از مسیر حفر شناسایی شد. سپس با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، پس از ترسیم درخت خطا و تعیین نوع دروازه‌های ورودی و خروجی و همچنین محاسبه احتمالات مربوط به مخاطرات و تعیین شدت خطر با استفاده از کلاس‌بندی تعریف شده توسط نویسندگان براساس آسیب جسمی، مدت زمان توقف دستگاه و میزان آسیب به دستگاه، ریسک کلی پروژه محاسبه شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که ریسک کلی پروژه

### مراجع

[1] Eskesen, S. D., Tengborg, P., Kampmann, J., & Veicherts, T. H. (2004). "Guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association, working group No. 2", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(3), 217-237.

- [2] Mikaeil, R., Jafarpour, A., & Hoboubeh, A. (2017). "Safety risk analysis of dimensional stone quarried by diamond wire saws using FMEA method (Case study: Badeki marble quarry-Ghareh-Ziaeddin)", *Journal of Mineral Resources Engineering*, 2(1), 75-84.
- [3] Ardeshir, A., Amiri, M., Ghasemi, Y., & Errington, M. (2014). "Risk assessment of construction projects for water conveyance tunnels using fuzzy fault tree analysis", *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 396-412.
- [4] Hong, E. S., Lee, I. M., Shin, H. S., Nam, S. W., & Kong, J. S. (2009). "Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 269-277.
- [5] Gierczak, M. (2014). "The quantitative risk assessment of MINI, MIDI and MAXI horizontal directional drilling projects applying fuzzy fault tree analysis", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 67-77.
- [6] Mottahedi, A., & Ataei, M. (2019). "Fuzzy fault tree analysis for coal burst occurrence probability in underground coal mining", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 165-174.
- [7] Wessiani, N. A., & Yoshio, F. (2018). "Failure mode effect analysis and fault tree analysis as a combined methodology in risk management", In IOP conference series: *Materials Science and Engineering*, 337(1), 012033. IOP Publishing
- [8] Ghasemi, Y., Ardeshir, A., & Amiri, M. (2012). "Risk assessment in tunneling projects using Fault Tree Analysis", *National Conference on Structure, Road, Architecture*. Chalous: Islamic Azad University of Chalous.
- [9] Ghasemi, Y., Ardeshir, A., & Amiri, M. (2012). "Risk assessment in urban tunnel projects using fuzzy Fault Tree Analysis", *2nd National Conference on Crisis Management*, Tehran.
- [10] Zoughi, H., Fathi Mozaffari, A., & Shoureshi, A. (2014). "Calculation and analysis of railway tunnel safety risk for rail-way tunnels based on FTA and ACCA", *3rd International Conference on Recent Developments in Railway*, Tehran: Iran University of Science and Technology.
- [11] Fouladgar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., & Zavadskas, E. K. (2012). "Risk evaluation of tunneling projects", *Archives of civil and mechanical engineering*, 12, 1-12.
- [12] Hyun, K. C., Min, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I. M. (2015). "Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 121-129.
- [13] Wang, F., Ding, L. Y., Luo, H. B., & Love, P. E. (2014). "Probabilistic risk assessment of tunneling-induced damage to existing properties", *Expert Systems with Applications*, 41(4), 951-961.
- [14] Sedaghati, Z., Mikaeil, R., Bakhtavar, E., & Mohammadnejad, M. (2019). "Fuzzy Analysis and Risk Management of Water Inrush by Numerical Simulation and FMEA under Uncertainty for Emamzade Hashem Tunnel", *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 9(19), 1-16.
- [15] Sahel Consulting Engineers. (2014). Engineering services for design and construction of the 2nd section of the Imamzadeh Hashem tunnel. Tehran.
- [16] Iran Rastan Consulting Engineers. (2004). Report of the 2nd phase of the geological study of the 2nd section of the Imamzadeh Hashem Road tunnel. Tehran.
- [17] Vesely, W., Dugan, J., & Fragola, J. (2002). "Minarick, and J. Railsback. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. Handbook", *National Aeronautics and Space Administration*, Washington, DC, 38.
- [18] Ronchi, E., Colonna, P., Capote, J., Alvear, D., Berloco, N., & Cuesta, A. (2012). "The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 74-84.
- [19] Qiao, R., Shao, Z., Liu, F., & Wei, W. (2019). "Damage evolution and safety assessment of tunnel lining subjected to long-duration fire", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 354-363.
- [20] Haile, A. T. (2018). *Observations of the dynamic performance of South African tunnel support systems*. In Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Routledge, 335-341.
- [21] Barla, G., & Pelizza, S. (2000). "TBM tunnelling in difficult ground conditions", In ISRM International Symposium. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- [22] Barton, R. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. CRC Press.