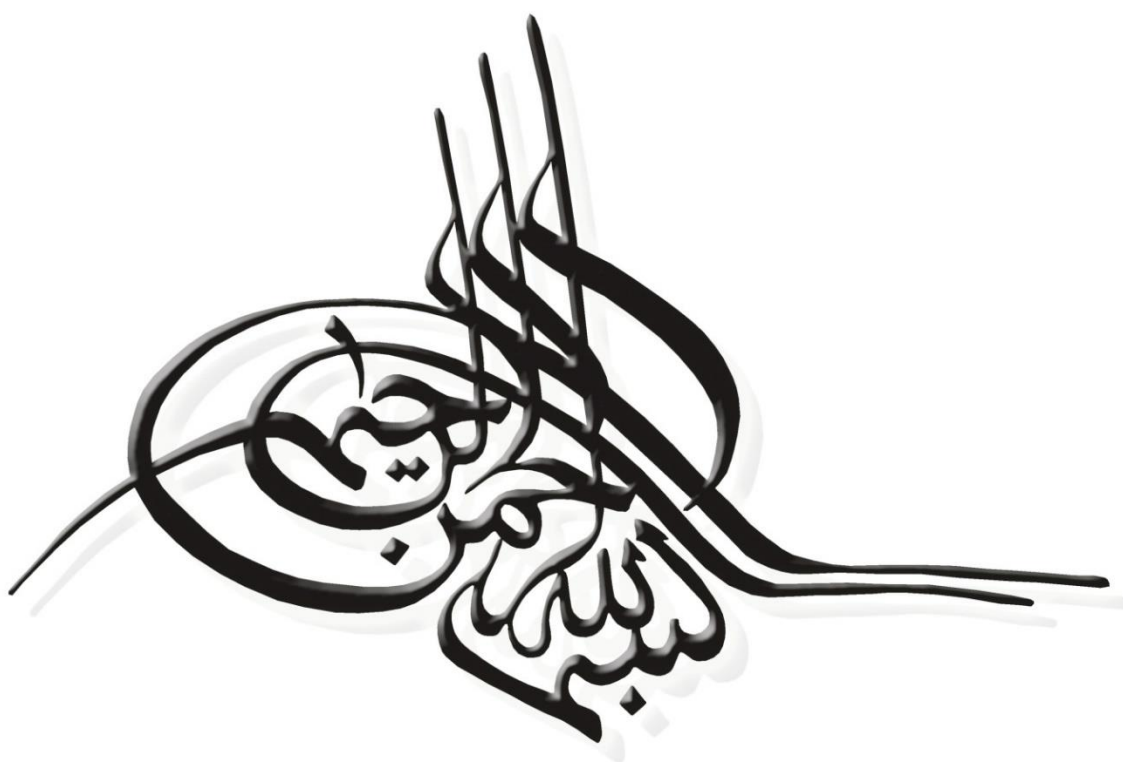






دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد تونل و فضاهاى زیرزمینی

مدیریت ریسک در پروژه تونل سازی کوچک مقطع

(مطالعه موردی: مجموعه معدنی برناکی، شرکت زغال سنگ البرز شرقی)

نگارنده: جواد رجبی

اساتید راهنما

دکتر مرتضی جوادى اصطهباناتی

دکتر محمد عطائی

استاد مشاور

دکتر امیر صفاری

اسفند ۱۴۰۰

شماره: ۴۰۱/۱۰۴
تاریخ: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸
ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای: جواد رجبی با شماره دانشجویی ۹۸۰۵۶۵۴ رشته معدن گرایش تونل و فضاها‌ی زیر زمینی تحت عنوان: مدیریت ریسک در پروژه تونلسازی کوچک مقطع (مطالعه موردی: مجموعه معدنی برناکی، شرکت زغالسنگ البرز شرقی که در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

- الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☒ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	مرتضی جواد اصطهباناتی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	محمد عطانی	استاد	
۳- استاد مشاور	امیر صفاری	-	
۴- استاد داور اول	فرهنگ سرشکی	استاد	
۵- استاد داور دوم	مجید نیکخواه	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	رامین رفیعی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء:



تقدیم بہ

کارگران سخت کوش معادن زغال سنگ ایران

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. او را که زمین به گرد خورشید و ماه به دور زمین، به قدرت او می چرخند و قلم به خواست او می نویسد دفتر پاک عشق را. سپاس او را که بزرگی اش را در اعماق زمین و در گرمای زغال سنگ یافتیم؛ و سلام و درود بر سرور کائنات و مفخر موجودات و رحمت عالمیان و صفوت آدمیان و تتمه دور زمان محمد مصطفی (ص) و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز ...

اینک که به یاری خداوند متعال پایان نامه کارشناسی ارشد خویش را به پایان رسانده ام بر خویش وظیفه می دانم تا از آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ... موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم ... و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند ... پدرانمان، مادرانمان، استادانمان؛ کمال سپاس و قدردانی را به جا آورم.

بدون شک جایگاه و منزلت معلّم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم، اما از آنجایی که تجلیل از معلّم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب حدیث:

«من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ»

هر کس در مقابل خوبی مردم تشکر نکند، از خدای عزّ و جلّ تشکر نکرده است.

امام رضا علیه السلام (عیون الاخبار الرضا علیه السلام، ج ۱، ص ۲۷، ح ۲)

از زحمات اساتید فرهیخته، مهربان و فرزانه‌ام، معلمان اخلاق و علم، جناب آقای دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی و جناب آقای پروفیسور محمد عطائی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی و عاشقانه راهنما، مشوق و مایه دلگرمی بنده در این پایان نامه بودند و بسیار مدیون محبت‌های

بی‌دریغ و حمایت‌های همه‌جانبه ایشان هستم، صمیمانه سپاسگزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم. همچنین از استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر امیر صفاری، مشاوره‌ی همیشگی در دسترس، صادقانه همراه و دوستانه مشوق بودند صمیمانه تشکر می‌کنم.

همچنین از کلیه کارگران سخت‌کوش و مسئولین محترم شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی که با محبت و بزرگواری خویش بنده را یاری نمودند کمال تشکر را دارم. امیدوارم با به پایان رساندن این تحقیق، اندکی از دین خویش را به وطن عزیزم و مردمان مهربانش ادا کرده باشم.

از خانواده‌ام، دلیل اول و آخر تمام تلاش‌هایم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده‌اند و همواره با دعای خیر و تشویقشان در زندگی راهنمایی و یاری‌ام نمودند کمال تشکر و سپاس را دارم. برای ایشان، از درگاه الهی سلامتی و طول عمر خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب **جواد رجبی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **تونل و فضاها**ی زیرزمینی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدیریت ریسک در پروژه تونل سازی کوچک مقطع (مطالعه موردی: مجموعه معدنی برناکی، شرکت زغال سنگ البرز شرقی) تحت راهنمایی دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی و دکتر محمد عطائی متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

احداث تونل با روش چالزنی و انفجار در مقایسه با شیوه مکانیزه به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری کم‌تر بیشتر مورد توجه است. اما باید به این مطلب هم اشاره کرد که روش چالزنی و انفجار به ویژه در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ با مخاطرات قابل توجهی روبرو است که اگر به خوبی مدیریت نشود باعث ایجاد خسارات متعدد و جبران‌ناپذیر و همچنین طولانی‌تر شدن و افزایش هزینه‌ها شود. به همین خاطر برای کاهش حوادث و بهینه‌سازی عملیات انفجار باید ریسک‌ها و مخاطرات موجود شناسایی شده و با مدیریت و عکس‌العمل مناسب می‌توان با پاسخ به ریسک‌ها گامی صحیح و مؤثر برداشت. در این تحقیق که با هدف شناسایی خطرات، ارزیابی، طبقه‌بندی ریسک‌ها در مجموعه معدنی برناکی از مجموعه معادن شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی است می‌توان با کنترل علل ریشه‌ای ریسک‌های اصلی، از وقوع آن‌ها جلوگیری کرد و یا شدت اثر آن‌ها را کاهش داد. در این تحقیق با مطالعه پژوهش‌های پیشین و جمع‌آوری اطلاعات، ریسک‌های مربوط به تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار در مجموعه معدنی برناکی از مجموعه معادن شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی شناسایی شد. ریسک‌های اصلی و علل به وجود آورنده آن‌ها به نام رویدادهای نهایی، میانی و اساسی در قالب درخت خطا شناسایی و رسم شدند. رویدادهای نهایی مؤثر در ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار در ۷ قسمت پرتاب سنگ، لرزش هوا، لرزش زمین، دزد کردن چال، انفجار ناگهانی، وجود قطعات درشت و وجود قطعات بسیار ریز طبقه‌بندی شدند. همچنین میزان اهمیت رویدادهای اساسی از طریق تهیه و ارسال پرسشنامه از کارشناسان نظرخواهی شد. از تئوری فازی برای وزن دادن به علل ریشه‌ای استفاده شد تا احتمال وقوع رویدادهای اساسی و میانی و در نتیجه رویدادهای نهایی به دست آید. سپس برای محاسبه شدت پیامد هر یک از رویدادهای نهایی از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی استفاده شده است. ماتریس ریسک برای رویدادهای نهایی تشکیل شد و نتایج این تحقیق نشان داد که دزد کردن چال و پرتاب سنگ به عنوان بحرانی‌ترین حوادث تعیین و رویدادهای لرزش زمین، لرزش هوا، وجود قطعات

بسیار ریز، وجود قطعات درشت و انفجار ناگهانی در رتبه‌های پایین‌تر قرار گرفتند و در ادامه پاسخ‌های مناسبی برای کنترل آن‌ها در دو بخش پاسخ‌های مدیریتی و فنی برای کنترل یا کاهش ریسک ارائه شد.

کلمات کلیدی: ریسک، درخت خطای فازی، تونل‌سازی، چالزنی و انفجار، مجموعه معدنی برناکی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱: مقدمه و کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۱-۲- ضرورت تحقیق
۴	۱-۳- اهداف تحقیق
۵	۱-۴- مراحل انجام تحقیق
۶	۱-۵- مطالعه موردی
۷	۱-۶- ساختار پایان نامه
۹	فصل ۲: سابقه‌ی علمی موضوع
۱۰	۲-۱- مقدمه
۱۰	۲-۲- خلاصه پژوهش‌های انجام شده مرتبط با ارزیابی ریسک
۱۷	۲-۳- جمع‌بندی
۱۹	فصل ۳: مدیریت و ارزیابی ریسک
۲۰	۳-۱- مقدمه
۲۱	۳-۲- تعاریف و مفاهیم ریسک
۲۲	۳-۳- مدیریت ریسک
۲۴	۳-۳-۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک
۲۴	۳-۳-۲- شناسایی ریسک
۲۵	۳-۳-۳- آنالیز ریسک
۲۵	۳-۳-۴- ارزیابی ریسک
۲۸	۳-۳-۵- پاسخ به ریسک
۲۹	۳-۳-۶- نظارت و کنترل ریسک
۲۹	۳-۴-۱- مروری بر روش تحلیل درخت خطا
۳۰	۳-۴-۲- کاربردهای روش تحلیل درخت خطا
۳۰	۳-۴-۳- اصول روش تحلیل درخت خطا
۳۱	۳-۴-۴- مفاهیم و علائم مورد استفاده در درخت خطا
۳۳	۳-۴-۵- مراحل روش تحلیل درخت خطا
۳۴	۳-۴-۶- ارزیابی درخت خطا
۳۶	۳-۴-۷- مزایا و معایب روش تحلیل درخت خطا
۳۸	۳-۵-۱- کلیات تئوری فازی
۳۸	۳-۵-۲- تاریخچه منطق فازی
۳۸	۳-۵-۳- مجموعه‌های فازی
۳۹	۳-۵-۴- توابع عضویت فازی
۳۹	۳-۵-۵- منطق فازی

۳۹	۳-۵-۵- سیستم فازی
۴۲	۳-۶- روش تحلیل درخت خطای فازی
۴۲	۳-۶-۱- مراحل روش تحلیل درخت خطای فازی
۴۸	۳-۷- روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره
۵۰	۳-۷-۱- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)
۵۰	۳-۷-۲- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)
۵۱	۳-۷-۳- تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP)
۵۵	۳-۸- تعیین عدد ریسک
۵۶	۳-۹- جمع‌بندی
۵۹	فصل ۴: ارزیابی ریسک انفجار تونل‌های پیشروی مجموعه معدنی برناکی
۶۰	۴-۱- مقدمه
۶۰	۴-۲- مراحل کار
۶۰	۴-۲-۱- شناسایی و شناخت خطرات
۷۰	۴-۲-۲- تعیین احتمال رویدادها
۸۲	۴-۲-۳- تعیین شدت پیامد
۹۰	۴-۲-۴- تعیین عدد ریسک
۹۱	۴-۲-۵- پاسخ به ریسک
۹۴	۴-۳- جمع‌بندی
۹۵	فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۶	۵-۱- مقدمه
۹۷	۵-۲- نتیجه‌گیری
۹۸	۵-۳- پیشنهادات
۹۹	منابع و مراجع
۱۰۵	پیوست‌ها
۱۰۶	پیوست الف: پرسشنامه شماره ۱
۱۱۰	پیوست ب: پرسشنامه شماره ۲

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان شکل
۶	شکل ۱-۱: موقعیت جغرافیایی مجموعه معادن شرکت زغال سنگ البرز شرقی
۲۳	شکل ۱-۳: فرآیند کلی مدیریت ریسک
۳۳	شکل ۲-۳: روش‌ها و ابزارهای شناسایی ریسک‌ها
۴۰	شکل ۳-۳: مهم‌ترین علائم مورد استفاده در ترسیم درخت خطا
۴۴	شکل ۴-۳: نمایش یک سیستم فازی
۵۳	شکل ۵-۳: متغیرهای زبانی مورد استفاده کارشناسان
۵۶	شکل ۶-۳: تابع عضویت مثلثی در روش دلفی فازی
۶۱	شکل ۷-۳: ماتریس امتیازدهی ریسک
۶۴	شکل ۱-۴: درخت خطای ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و آتشباری در معدن برناکی
۶۵	شکل ۲-۴: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی پرتاب سنگ
۶۶	شکل ۳-۴: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی لرزش هوا
۶۷	شکل ۴-۴: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی لرزش زمین
۶۸	شکل ۵-۴: درخت خطای رویداد نهایی دزد کردن چال
۶۹	شکل ۶-۴: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی انفجار ناگهانی
۷۰	شکل ۷-۴: درخت خطای مربوط به وجود قطعات درشت
۹۰	شکل ۸-۴: درخت خطای مربوط به وجود قطعات بسیار ریز
۹۰	شکل ۹-۴: عدد ریسک تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی
۹۱	شکل ۱۰-۴: ماتریس ریسک تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۱۰	جدول ۱-۲: خلاصه پژوهش‌های انجام شده مرتبط با ارزیابی ریسک
۴۹	جدول ۱-۳: انواع روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه
۵۲	جدول ۲-۳: طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی بین معیارها
۶۱	جدول ۱-۴: رویداد نهایی، میانی و اساسی در ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار
۷۱	جدول ۲-۴: جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان
۷۲	جدول ۳-۴: مشخصات و امتیازات وزنی کارشناسان
۷۳	جدول ۴-۴: نمونه‌ای از پرسشنامه ارسالی به کارشناسان (پارامترهای مؤثر در اختلال در شبکه تهویه)
۷۳	جدول ۵-۴: وزن متغیرهای زبانی در کمی کردن نظر کارشناسان
۷۳	جدول ۶-۴: نظرات کارشناسان در مورد هر رویداد اساسی
۷۴	جدول ۷-۴: اعداد فازی اجماع نظر کارشناسان برای هر رویداد اساسی
۷۵	جدول ۸-۴: نتایج حاصل از غیر فازی کردن اعداد فازی هر یک از رویدادهای اساسی
۷۵	جدول ۹-۴: نرخ احتمال به دست آمده برای هر رویداد اساسی
۷۶	جدول ۱۰-۴: نرخ احتمال رویدادهای میانی و نهایی
۷۶	جدول ۱۱-۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی پرتاب سنگ از لحاظ احتمال وقوع
۷۷	جدول ۱۲-۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی لرزش هوا از لحاظ احتمال وقوع
۷۸	جدول ۱۳-۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی لرزش زمین از لحاظ احتمال وقوع
۷۸	جدول ۱۴-۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی دزد کردن چال از لحاظ احتمال وقوع
۷۹	جدول ۱۵-۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی انفجار ناگهانی از لحاظ احتمال وقوع
۷۹	جدول ۱۶-۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی وجود قطعات درشت از لحاظ احتمال وقوع
۸۰	جدول ۱۷-۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی وجود قطعات بسیار ریز از لحاظ احتمال وقوع
۸۰	جدول ۱۸-۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به پرتاب سنگ از لحاظ احتمال وقوع
۸۰	جدول ۱۹-۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به لرزش هوا از لحاظ احتمال وقوع
۸۰	جدول ۲۰-۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به لرزش زمین از لحاظ احتمال وقوع
۸۱	جدول ۲۱-۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به دزد کردن چال از لحاظ احتمال وقوع
۸۱	جدول ۲۲-۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به انفجار ناگهانی از لحاظ احتمال وقوع
۸۱	جدول ۲۳-۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به وجود قطعات درشت از لحاظ احتمال وقوع
۸۲	جدول ۲۴-۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به وجود قطعات بسیار ریز از لحاظ احتمال وقوع
۸۲	جدول ۲۵-۴: رتبه‌بندی احتمال وقوع ریسک
۸۲	جدول ۲۶-۴: رتبه‌بندی احتمال وقوع رویدادهای نهایی ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار
۸۳	جدول ۲۷-۴: ماتریس مقایسه زوجی بین معیارهای تصمیم‌گیری برای تعیین شدت پیامد
۸۴	جدول ۲۸-۴: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۱

صفحه	عنوان جدول
۸۴	جدول ۴-۲۹: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۲
۸۴	جدول ۴-۳۰: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۳
۸۵	جدول ۴-۳۱: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۴
۸۵	جدول ۴-۳۲: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۵
۸۵	جدول ۴-۳۳: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۶
۸۶	جدول ۴-۳۴: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۷
۸۶	جدول ۴-۳۵: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۸
۸۶	جدول ۴-۳۶: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۹
۸۷	جدول ۴-۳۷: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۱۰
۸۷	جدول ۴-۳۸: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۱۱
۸۸	جدول ۴-۳۹: ماتریس مقایسه زوجی جامع نظرات کارشناسان
۸۹	جدول ۴-۴۰: تعیین وزن رویدادهای نهایی
۸۹	جدول ۴-۴۱: رتبه‌بندی شدت پیامد ریسک
۸۹	جدول ۴-۴۲: رتبه‌بندی شدت پیامد رویدادهای نهایی به وجود آورنده ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار
۹۰	جدول ۴-۴۳: عدد ریسک تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی
۱۰۷	جدول پ-۱: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار
۱۰۷	جدول پ-۲: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در پرتاب سنگ، لرزش هوا و وجود قطعات بسیار ریز
۱۰۷	جدول پ-۳: پرسشنامه پارامترهای لرزش زمین و وجود قطعات درشت
۱۰۷	جدول پ-۴: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده
۱۰۷	جدول پ-۵: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای انسانی
۱۰۷	جدول پ-۶: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای عملیاتی
۱۰۸	جدول پ-۷: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای عدم دقت در عملیات چالزنی
۱۰۸	جدول پ-۸: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای طراحی مربوط به پرتاب سنگ و لرزش هوا و وجود قطعات بسیار ریز
۱۰۸	جدول پ-۹: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای طراحی مربوط به پرتاب لرزش زمین و وجود قطعات درشت
۱۰۸	جدول پ-۱۰: پرسشنامه پارامترهای مؤثر خطای استفاده از مواد دارای الکتریسیته ساکن و آتش‌زا
۱۰۹	جدول پ-۱۱: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در دزد کردن چال
۱۰۹	جدول پ-۱۲: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در افت کیفیت ماده منفجره
۱۰۹	جدول پ-۱۳: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در انفجار ناگهانی
۱۰۹	جدول پ-۱۴: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در وجود گرد زغال سنگ
۱۰۹	جدول پ-۱۵: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در اختلال در شبکه تهویه
۱۱۱	جدول پ-۱۶: پرسشنامه ماتریس مقایسه زوجی بین معیارهای تصمیم‌گیری برای تعیین شدت پیامد

فصل ۱

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

انفجار از اصلی‌ترین اقدامات مرتبط با استخراج مواد معدنی در معادن روباز و زیرزمینی است. ماده‌ی منفجره انرژی خود را در مدت زمان بسیار کوتاهی آزاد می‌کند و از این رو می‌تواند هر نوع سنگی را بشکند. دلیل کاربرد ماده منفجره در معادن به کار گرفتن انرژی حاصل از انفجار برای شکستن و خرد کردن سنگ‌ها است تا سنگ از توده اصلی جدا شده و به قطعات قابل حمل تبدیل شود (استوار، ۱۳۹۱).

آتشکاری به عنوان یکی از اولین و مهمترین مراحل در استخراج معادن نقش کلیدی در راندمان تولید، هزینه‌های استخراج و نیز مسائل محیط‌زیستی دارد. از این رو آتشکاری مناسب باعث بهبود شرایط استخراج و وضعیت فنی و اقتصادی معدن می‌شود.

در مجموع شکستن سنگ ناشی از دو فاکتور اصلی است: الف) انفجار ماده منفجره و آزادسازی انرژی و ب) واکنش سنگ در مقابل این انرژی آزادسازی شده. ماده منفجره بلافاصله در اثر انفجار تبدیل به توده‌ای از گاز بسیار داغ با فشار خیلی زیاد می‌شود. در اثر آزادسازی ناگهانی گازهای حاصل از انفجار، امواج ضربه در سنگ گسترش پیدا می‌کند. موج ضربه در مرحله فشاری، باعث فشردگی سنگ و ایجاد درزه و شکاف‌های میکروسکوپی و پس از رسیدن به سطح آزاد، منعکس شده و باعث به وجود آمدن تنش کششی در سنگ و تولید شکاف‌های کوچک اولیه شعاعی در اطراف چال خواهد شد.

گاز فشرده شده در ترک‌های ریز حاصل از موج ضربه نفوذ پیدا کرده و موجب منبسط شدن و گسترش یافتن آن‌ها می‌شود که در نهایت به شکستن سنگ منجر می‌شود. سنگ در اثر خمش چال ناشی از فشار گاز می‌شکند، گاز در شکاف‌ها رخنه پیدا کرده و بدر نتیجه اثر آن در طرف سطح آزاد قابل مشاهده است. اگر سطح آزاد وجود نداشته باشد یا ضخامت بار سنگ به حدی باشد که فشار گازها قادر به تاثیر روی آن نباشد و جابجایش کند در این صورت با حفره‌سازی مواجه هستیم و یا عقب‌زدگی زیاد می‌شود. همچنین به خاطر جابجایی توده سنگ نیز مقداری سنگ دوباره شکسته می‌شود.

به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری کمتر در تونل‌سازی با استفاده از روش چالزنی و انفجار این روش نسبت به روش‌های مکانیزه بیشتر مورد استقبال و توجه است. از سوی دیگر به خاطر سطح آزاد کمتر نسبت به آتشباری در فضاهای روباز، سختی خرج‌گذاری و سایر موارد این روش پیچیدگی‌های خاص خود را دارد و همچنین مخاطراتی مانند نگهداری و حمل‌ونقل ماده منفجره، ریزش سقف، پرتاب سنگ، لرزش زمین و ... داشته که در معادن زغال‌سنگ، خطرانی از قبیل انفجار در اثر وجود گرد زغال‌سنگ، پرتاب سنگ در اثر خروج آبی گاز زغال‌سنگ، گازگرفتگی، عدم رعایت نکات ایمنی توسط افراد و ... نیز به آن‌ها افزوده می‌شود که می‌تواند باعث ایجاد خسارات متعددی از قبیل خسارات جانی، مالی و زیست محیطی فراوان و جبران‌ناپذیر شود.

در هر پروژه‌ای به خصوص در پروژه‌های معدنی انجام هرگونه اقدام و عملی با ریسک همراه است. به همین دلیل برای بهبود وضعیت اجرای عملیات انفجار و نتایج حاصل از آن، لازم است نسبت به شناسایی و کنترل ریسک‌ها اقدامات لازم انجام شود (کوه دره‌ئی، ۱۳۹۵). برای مدیریت مؤثر این چالش‌ها و فراز و نشیب‌ها، رویکردهای جدید مدیریت توصیه شده است که یکی از این رویکردها، رویکرد مدیریت ریسک است.

مدیریت ریسک از روش‌های سیاست‌گذاری مدیریت در هر سازمان است که با بررسی و ارزیابی ریسک‌های موجود در سیستم و با هدف جلوگیری از وقوع شرایط ناخواسته و یا کاهش اثرات (عوامل خطرزا)، ایجاد شده است. مدیریت ریسک، برای توانمندسازی و ارتقای اثربخشی سازمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدیریت ریسک، شامل مجموعه‌ای از فرآیندهای پیوسته و در حال توسعه است که در راهبرد یک سازمان استفاده می‌شود و باید به شیوه‌ای نظام‌مند کلیه مخاطرات مربوط به گذشته، حال و آینده را مورد توجه قرار دهد (عطائی، ۱۳۹۵). این پژوهش با هدف شناسایی ریسک‌های تأثیرگذار در پروژه تونل‌سازی کوچک مقطع (مطالعه موردی: مجموعه معدنی برناکی، شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی) به روش چالزنی و انفجار و

عوامل به وجود آورنده آن‌ها، پاسخ مناسبی برای کاهش شدت خطرات و یا جلوگیری از وقوع آن‌ها داده است.

۱-۲- ضرورت تحقیق

تمامی پروژه‌های زیرزمینی پروژه‌های پیچیده با عوامل تأثیرگذار زیادی از جمله شرایط نامطمئن و متغیر هستند که این شرایط ریسک‌های مهم و قابل توجهی را بر کلیه قسمت‌های پروژه، وارد آورده و منجر به ایجاد هزینه‌های زیاد و تاخیرات زمانی می‌شود (صیادی و همکاران، ۱۳۹۲).

بنابراین استفاده از مدیریت ریسک از همان مراحل ابتدایی پروژه بسیار مهم و ضروری است به نحوی که اتمام پروژه در چارچوب تعیین‌شده (زمان، هزینه، ایمنی و کیفیت) نیازمند شناسایی ریسک‌ها، تجزیه و تحلیل و در نهایت رتبه‌بندی برای پاسخ به آن‌ها است. برای مدیریت ریسک موثر یک پروژه تونل‌سازی لازم است که مدیریت پروژه در اولین فرصت ممکن، ترجیحاً در طول مطالعات امکان‌سنجی و مراحل پیش از طراحی پروژه شروع شود. لازم به ذکر است موفقیت و مزایای اجرای یک مدیریت ریسک موثر به کیفیت فعالیت‌های تعریف شده برای کاهش ریسک بستگی دارد. بنابراین شناخت هر چه بیشتر عوامل تأثیرگذار بر روند پروژه می‌تواند راه را برای این منظور هموار کند. با توجه به پیچیدگی‌ها و خطرات اشاره شده نیاز به این پژوهش احساس شده و ارزیابی ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار با استفاده از تحلیل درخت خطا می‌تواند کمک شایانی در شناسایی ریسک‌ها در تونل‌سازی کند و به گونه‌ای طبقه‌بندی شوند که بتوان با کنترل علل ریشه‌ای ریسک‌های اصلی، از وقوع آن‌ها جلوگیری کرد و یا شدت اثر حوادث را کاهش داد.

۱-۳- اهداف تحقیق

پروژه‌های تونل‌سازی در ادوار گذشته با چالش‌ها و فراز و نشیب فراوانی همراه بوده است به طوری که با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و لزوم مصرف بهینه منابع توجه به مدیریت ریسک این

پروژه‌ها بسیار مورد توجه واقع شده است. از جمله علل اصلی طولانی‌تر شدن و افزایش هزینه‌های پروژه‌های تونل‌سازی، مدیریت ناکارآمد و ضعیف به ویژه مدیریت ریسک گزارش شده است (Wagner, 2006).

مدیریت ریسک یکی از اصلی‌ترین و شاید ضروری‌ترین قسمت مدیریت پروژه است، به نحوی که برخی نگرش‌های نوین، مدیریت ریسک را اساس و شاکله‌ی مدیریت پروژه می‌دانند. مدیریت صحیح و به موقع این قبیل ریسک‌ها باعث کاهش احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه خواهد شد.

هدف از انجام این مطالعه ارزیابی ریسک در پروژه تونل‌سازی کوچک مقطع (مطالعه موردی: مجموعه معدنی برناکی، شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی) با استفاده از روش چالزنی و انفجار است تا در گام نخست بتوان رویدادهای نامطلوب در تونل‌سازی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ این شرکت و عوامل زمینه‌ساز آن را شناسایی و دسته‌بندی کرد و با کمی‌سازی نتایج ناشی از انفجار، وقوع این عوامل را کاهش داد تا گامی مؤثر و سازنده برای بهینه‌سازی عملیات انفجار برداشته شود. در ابتدا بایستی پارامترهای مؤثر در انفجار را شناسایی و تعیین کرد تا در نهایت با توجه به خروجی ماتریس ریسک بتوان مخرب‌ترین عواملی که نتایج حاصل از انفجار را تحت تأثیر قرار می‌دهد، شناسایی و کنترل کرد. از این طریق علاوه بر پیشرفت و توسعه نتایج حاصل از انفجار نقش مهمی در بهبود ایمنی و کم کردن هزینه‌ها در روند تونل‌سازی ایفا می‌کند.

۴-۱- مراحل انجام تحقیق

در این پژوهش مراحل زیر انجام خواهد شد:

- بررسی ادبیات و سابقه‌ی علمی موضوع.

- شناسایی خطر و عوامل آن با استفاده از روش تحلیل درخت خطا در معدن مورد نظر.

- ارزیابی ریسک با توجه به نظر خبرگان (مقدار ضرایب شدت و تکرار هر یک از عوامل بدست آمده در

مرحله قبل، استخراج خواهد شد).

۱-۶- ساختار پایان نامه

این تحقیق شامل ۵ فصل می باشد.

- در **فصل اول** به بیان مسئله، ضرورت تحقیق و اهداف تحقیق پرداخته شده است.

- در **فصل دوم** سابقه کارهای علمی صورت گرفته در زمینه ارزیابی ریسک، به خصوص ارزیابی ریسک

تونل سازی معادن بیان شده است.

- در **فصل سوم** مقدمه ای در مورد ریسک بیان شده است و پس از آشنایی با مفاهیم اولیه ریسک،

روش های مختلف ارزیابی ریسک و فازی سازی و همچنین روش های تصمیم گیری چند معیاره مورد بررسی

قرار گرفته است.

- در **فصل چهارم** به بیان روش انجام کار به منظور یافتن احتمال و شدت پیامد عوامل زمینه ساز ریسک

انفجار با استفاده از روش های تحلیل درخت خطای فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی پرداخته شده

است.

- در **فصل پنجم** نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهاداتی برای بهبود مطالعات آینده بیان شده است.

فصل ۲

سابقه‌ی علمی موضوع

۲-۱- مقدمه

ارزیابی ریسک یکی از پایه‌های اصلی و مهم در مدیریت ریسک است و مزایا و فوائد ناشی از آن نیز در سیستم مدیریت پروژه و طرح‌های فاقد این بخش کاملاً مشخص و مشهود است. ارزیابی ریسک با توجه به واقعیت نامطمئن پروژه‌های تونل‌سازی و بایستگی صرف بهینه‌ی منابع، دارای اهمیت ویژه‌ای است. هدف از ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف مانند میزان تأثیر و احتمال وقوع است. رتبه‌بندی ریسک‌ها، قسمت کلیدی و حساس‌ساز این فرایند محسوب می‌شود، زیرا با انجام رتبه‌بندی، اولویت‌ها را در مقابل سایر ریسک‌ها مشخص شده و در نتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک و پاسخ مناسب و به موقع و کاهش ریسک را به یک سطح قابل قبول برنامه‌ریزی کند (Ghosh & Jintanapakanont, 2004). در این فصل به بررسی سابقه علمی موضوع تحقیق، پرداخته شده است.

۲-۲- خلاصه پژوهش‌های انجام شده مرتبط با ارزیابی ریسک

در خصوص ارزیابی ریسک به روش تحلیل درخت خطا و تحلیل درخت خطای فازی تحقیقات مختلف و متعددی انجام شده که خلاصه‌ای از آخرین تحقیقات در این زمینه در جدول ۲-۱ آورده شده است.

جدول ۲-۱: خلاصه پژوهش‌های انجام شده مرتبط با ارزیابی ریسک

موضوع	محقق (محققان)
این مطالعه به ارزیابی حوادث رخ داده در شرکت‌های تولید زغال‌سنگ ترکیه بین سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ و تجزیه و تحلیل ریسک‌های ناشی از آن با استفاده از فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی ^۱ پرداخته است. نتایج نشان داد که بزرگ‌ترین ریسک زمین لغزش است، خطرناک‌ترین گروه شغلی کارگران غیر ماهر هستند و شایع‌ترین خطرات ناشی از زمین لغزش و ابزارهای حمل و نقل، ابزارهای دستی و سقوط است.	Smith (1996)
این مطالعه با استفاده از آنالیز درخت خطای فازی و بر اساس اعداد فازی مثلثی به بررسی وقوع آتش‌سوزی معدن پرداخته است.	Jia et al. (2004)

¹ Analytic Hierarchy Process

Joy (2004)	این پژوهش در کشور استرالیا انجام شده است به بررسی مدیریت ریسک ایمنی شغلی در معدن کاری این کشور پرداخته است.
Groves et al. (2007)	تجزیه و تحلیل تلفات و آسیب‌های مربوط به تجهیزات معدنی از اهداف این تحقیق بود. نتایج این تحقیق نشان داد که ابزارهای دستی غیرموتوری از جمله تجهیزاتی بودند که اغلب با صدمات غیرکشنده درگیر بودند؛ در حالی که حمل و نقل معدنی شایع‌ترین منبع تلفات بود. همچنین نتایج نشان داد کارمندان جوان‌تر در معرض خطر آسیب دیدگی بودند در حالی که کارگران بالای ۵۵ سال خطر مرگ و میر بالایی داشتند. اکثر حوادث مربوط به کارگران با کمتر از ۵ سال سابقه است.
Komljenovic & Kecojec (2007)	برنامه مدیریت ریسک ایمنی و بهداشت شغلی در عملیات معدن کاری روباز موضوع مورد بحث در این تحقیق بود. این فرآیند می‌تواند برای کمک به قضاوت در مورد تحمل ریسک و کمک به انتخاب بین اقدامات کاهش خطر بالقوه و/یا اجتناب از ریسک استفاده شود. این مقاله همچنین بر مزایای استفاده از مفاهیم مدیریت ریسک از دیدگاه تصمیم‌گیرندگان تاکید می‌کند.
Tao et al. (2007)	آنالیز وقوع پرتاب سنگ در انفجار با استفاده از درخت خطا و محاسبه برش‌های حداقل و ارائه اقدامات کنترلی از اهداف این تحقیق بوده است.
Komljenovic et al. (2008)	این تحقیق که در معادن ایالات متحده انجام شده است به بررسی آسیب‌های عملیات استخراج در مدت ۱۰ سال از ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ را مورد تحلیل ریسک اولیه قرار داده است.
Kecojec and Nor (2009)	این تحقیق که در معدن کاری زیرزمینی زغال‌سنگ در آمریکا طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۷ پرداخته است به شناسایی خطرات برای حوادث منجر به مرگ مربوط به تجهیزات در این معادن اشاره کرده است.
Radosavljevic et al. (2009)	این تحقیق به ارزیابی ریسک و مدیریت سیستم‌های فنی در مورد صنایع معدنی پرداخته است.
Lei (2010)	در این تحقیق تحلیل درخت خطای رویداد ریزش سقف در معدن انجام شده است.
Orsulak et al. (2010)	این مطالعه با استفاده از پایگاه اطلاعات ایمنی و بهداشت معادن، رویکردی برای توصیف و ارزیابی خطرات ناشی از نقض ایمنی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ پنسیلوانیا ارائه داده است.
Tyagi et al. (2010)	در این تحقیق روش تئوری مجموعه فازی با تحلیل درخت خطا در بهبود قابلیت اطمینان به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی انجام شده است.
Kinilakodi & Grayson (2011)	نویسندگان این تحقیق روشی را برای ارزیابی و نظارت بر خطرات تکراری در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ ارائه داده‌اند. این مطالعه در دو مرحله آماری مدل‌سازی وقایع خطر بر اساس گزارش بازرسی و نظارت بر وضعیت ایمنی بر اساس نمودار کنترل رخدادهای خطر، انجام شده است.
Paithankar (2011)	این مطالعه به شناسایی خطر و تحلیل ریسک در صنعت معدن کاری به خصوص معدن سنگ آهن پرداخته است. نتایج این تحقیق اولویت‌بندی خطرات حادث بود که به ترتیب عبارتند از، پرتاب سنگ، واژگون شدن تجهیزات، انفجار مواد منفجره در انبار نگهداری مواد منفجره،

آتش‌سوزی در مخازن سوخت، ریزش دامپ باطله، آتش‌سوزی تجهیزات معدنی، لرزش زمین و آتش‌سوزی دستگاه‌های الکتریکی.	
نویسندگان این تحقیق با استفاده از تحلیل درخت خطا به بررسی و تجزیه و تحلیل ریسک پرتاب سنگ در اثر انفجار پرداختند. با استفاده از مجموعه برش حداقل، بحرانی‌ترین و آسیب‌پذیرترین جزء در حادثه پرتاب سنگ شناسایی شد. همچنین تقویت و پشتیبانی از عملیات نظارتی، اقدامی مهم و مؤثر برای جلوگیری از رخداد پرتاب سنگ در عملیات انفجار در نظر گرفته شد.	Zhou et al. (2012)
این مقاله که یک رویکرد عملی نوین برای مدیریت ریسک در پروژه‌های معدنی است، بر اساس یک مفهوم جدید به نام تمرکز خطر و بر اساس روش تجزیه و تحلیل چند معیاره سلسله مراتبی تحلیلی است. هدف آن گسترش استفاده از این روش برای معادن طلا در سراسر کبک ^۱ است. این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن بهداشت و ایمنی شغلی در تمام فعالیت‌های عملیاتی معدن را نشان می‌دهد. یک پایگاه داده سازگار با فهرست‌بندی حدود ۲۵۰ خطر بالقوه در یک معدن طلای زیرزمینی ساخته شد. علی‌رغم محدودیت‌ها، نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه به طور بالقوه در سراسر بخش معدن کبک قابل اجرا است.	Badri et al. (2013)
به ارائه یک ابزار ارزیابی ریسک جدید برای معادن زغال‌سنگ زیرزمینی بر اساس روش برآورد و روش ارزیابی نیمه‌کمی ساده پرداختند. روش پیشنهادی برای نه تنها برآورد خطر انفجار، بلکه تصمیم‌گیری در مورد اینکه آیا پیشنهاد سرمایه‌گذاری به خوبی توجیه شده است و همچنین به منظور بهبود ایمنی، کاربرد داشته است.	Pejic et al. (2013)
در این تحقیق تحلیل درخت خطای فازی برای آتش‌سوزی و انفجار مخازن نفت خام انجام شده است. آتش‌سوزی و انفجار مخزن نفت خام (COTFE ^۲) رایج‌ترین نوع حادثه در پالایشگاه‌های نفت، ترمینال‌های نفت یا انبار است که اغلب منجر به مرگ انسان، آلودگی محیط‌زیست و خسارات اقتصادی می‌شود. در این مقاله، با استفاده از تکنیک تحلیل کیفی درخت خطا، علل بالقوه مختلف COTFE شناسایی شده و یک درخت خطای COTFE ساخته شده است. تجزیه و تحلیل کمی درخت خطای متعارف، احتمال وقوع COTFE را با استفاده از داده‌های احتمال دقیق رویدادهای پایه محاسبه می‌کند. با این حال، اغلب به دلیل داده‌های ناکافی، تغییر محیط یا مولفه‌های جدید، به دست آوردن داده‌ها و اطلاعات دقیق متناظر بسیار دشوار است. ثابت شده است که نظریه مجموعه فازی بر این مشکلات نامطمئن مؤثر است. از این رو، این مقاله یک رویکرد ترکیبی از نظریه مجموعه فازی و تحلیل درخت خطا را برای تعیین کمیت درخت خطای COTFE در محیط فازی و ارزیابی احتمال وقوع COTFE بررسی می‌کند.	Wang et al. (2013)
این مطالعه به توسعه مدل‌های مبتنی بر سیستم‌های مهندسی سنگ برای تجزیه و تحلیل ریسک پرتاب سنگ و پیش‌بینی فاصله پرتاب سنگ در انفجار سینه‌کار پرداخته است.	Faramarzi et al. (2014)

¹ Quebec

² Crude Oil Tank Fire and Explosion

Purba (2014)	این مطالعه به روش مبتنی بر قابلیت اطمینان فازی برای ارزیابی احتمالاتی ایمنی نیروگاه هسته‌ای پرداخته است.
Shi et al. (2014)	این مطالعه به ارزیابی درخت خطای فازی بر اساس روش AHP بهبود یافته برای حوادث آتش‌سوزی و انفجار در مخازن فولادی ذخیره‌سازی نفت پرداخته است.
Hyun et al. (2015)	با بهره‌گیری از روش تحلیل درخت خطا و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به بررسی خطرات استفاده از TBM ¹ پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از تحلیل درخت خطا احتمال وقوع رویدادها محاسبه شد و از روش AHP برای تعیین شدت پیامد استفاده شد. در نهایت ماتریس ریسک برای تعیین سطح ریسک رویدادهای بالایی محاسبه شده است.
Rajakarunakaran et al. (2015)	این تحقیق به استفاده از درخت خطای فازی برای ارزیابی ریسک در ایستگاه سوخت‌گیری گاز مایع اشاره کرده است. نتایج نشان داد قابلیت اطمینان فازی یک روش جایگزین مناسب برای ارزیابی قابلیت اطمینان داده‌ها است، مخصوصاً زمانی که داده‌های کمی و کافی در دسترس نیست.
Lavasani et al. (2015)	این پژوهش با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی به تحلیل کمی ریسک نشت در چاه‌های متروکه نفت و گاز طبیعی پرداخته است.
Verzani et al. (2015)	این مطالعه به بررسی ریسک طراحی تونل دسترسی معدن التینیت ² در شیلی اشاره دارد. ساخت تونل در واقع در حال انجام است و سپس یک مقایسه اولیه پیش‌بینی شده در مقایسه با مشاهدات در نظر گرفته شده است.
Newham et al. (2016)	وضعیت حرارتی یک معدن زغال‌سنگ زیرزمینی براساس نتایج نمونه‌های گاز از منطقه آسیب دیده برای مدیریت و کنترل ریسک در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق همچنین به بررسی توسعه شاخص گاز که به وضعیت گرمایش بسیار حساس است و اقدامات کنترلی مربوطه می‌پردازد.
Yan et al. (2016)	این تحقیق به مدل‌سازی قابلیت اطمینان وسایل نقلیه خودکار با استفاده از اثرات حالت‌های شکست و تجزیه و تحلیل بحرانی و تجزیه و تحلیل درخت خطا می‌پردازد.
Yaghoubpour et al. (2016)	این تحقیق به ارزیابی ریسک حمل و نقل عمومی از طریق تحلیل درخت خطا پرداخته است.
Cheliyan & Bhattacharyya (2017)	به بررسی و تجزیه و تحلیل درخت خطای فازی در مورد نشت نفت و گاز در سیستم‌های ساخت زیردریایی پرداخته است.
Jahanbani et al. (2017)	این تحقیق به ارزیابی ریسک آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ البرز شرقی با استفاده از تحلیل درخت خطای فازی پرداخته است.
Wang et al. (2017)	این پژوهش با استفاده از روشی جدید و ترکیب روش آنالیز درخت خطای فازی با برنامه ویژوال بیسیک ³ به شناسایی و ارزیابی خطر انفجار گرد و غبار زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی پرداخته است.

¹ Tunnel Boring Machine

² El-Tenient

³ Visual Basic = VB

Yang et al. (2017)	به ارزیابی ریسک هجوم آب در معدن زغال سنگ زیر زمینی بر اساس GIS و تئوری مجموعه فازی پرداخته است.
Mottahedi & Ataei (2019)	در این مطالعه، ترکیبی از روش تئوری فازی و روش تجزیه و تحلیل درخت خطا برای تجزیه و تحلیل احتمال وقوع انفجار در معدن زغال سنگ استفاده شده است. بنابراین، وقوع انفجار زغال سنگ به عنوان یک رویداد بالا در درخت خطا با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی تحلیل شده است.
Norouzi Masir et al. (2021)	یکی از مخاطرات روش چالزنی و انفجار در معادن روباز پدیده پرتاب سنگ است؛ لذا ارزیابی ریسک در این خصوص امری ضروری است. برای این منظور از ترکیب روش تحلیل درخت خطا و تصمیم‌گیری چندمعیاره در این مطالعه استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصل، ارتباط بین رویدادهای پرتاب سنگ در معادن روباز به ۳ بخش کلی خطای طراحی، خطای انسانی و خطای طبیعی طبقه‌بندی شدند. بر اساس ماتریس ریسک محاسبه شده، اعداد ریسک رویدادهای پرتاب سنگ در نتیجه خطاهای طراحی، انسانی و طبیعی به ترتیب ۱۲، ۶ و ۲ به دست آمد؛ لذا برای کاهش ریسک ریسک پرتاب سنگ، انتخاب مقدار مناسب پارامترهای الگوی آتشکاری از قبیل بارسنگ، فاصله‌داری، تاخیرهای انفجار و قطر چال امری لازم است.
Kong et al. (2022)	این مقاله وضعیت ایمنی معادن زغال سنگ طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ در استان گوئیژو چین را با جمع‌آوری داده‌ها در مورد حوادث تجزیه و تحلیل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که حوادث اولیه در این معادن، گازخیزی، ریزش سقف و هجوم آب است که مربوط به شرایط پیچیده زمین‌شناسی در منطقه است.
بخت‌آور و شهریار (۱۳۸۵)	این مقاله برای ارزیابی ریسک معادن زغال سنگ کرمان از آمار حوادث آن‌ها استفاده می‌کند که برای حوادث در اثر ریزش و ماندن زیر آوار، میزان احتمال ۱۰ به توان ۴ ضربدر ۳.۱۶ درجه شدت حادثه فاجعه آفرین و ریسک بالا ارزیابی شد در حالیکه برای حوادث در اثر برخورد با اجسام، میزان احتمال ۱۰ به توان ۲- ضربدر ۳.۶ درجه شدت حادثه بحرانی و ریسک بالا است. همچنین برای حوادث در اثر سقوط اشیاء احتمال ۱۰ به توان ۳- ضربدر ۲.۳۵، درجه شدت حادثه زیاد و ریسک بالا بر آورد شد و در نهایت برای سایر حوادث (ایزار مکانیکی، دستی و غیره) میزان احتمال ۱۰ به توان ۳- ضربدر ۲.۵ درجه شدت حادثه بحرانی و ریسک متوسط است.
صیادی و همکاران (۱۳۹۰)	ساختار کاملی از ریسک‌های پروژه‌های تونل‌سازی در قالب ۱۷ دسته اصلی و ۱۹۶ زیر شاخه تهیه کرده و سپس این ریسک‌ها را در عملیات تونل‌سازی سد سیمره در جنوب غربی ایران رتبه‌بندی کرده‌اند. از روش تصمیم‌گیری گروهی و میانگین وزن‌دار برای جمع‌آوری و تجمیع نظر کارشناسان و از روش تخصیص خطی برای تعیین رتبه ریسک‌ها استفاده شده است.
قاسمی و همکاران (۱۳۹۰)	با استفاده از آنالیز درخت خطا (FTA) به ارزیابی ریسک در پروژه‌های احداث تونل پرداخته‌اند و با تمرکز بر روی هریک از ریسک‌ها، علل ریشه‌ای هر کدام را شناسایی و درخت خطای آن را ترسیم کرده‌اند. در نتیجه احتمال وقوع ریسک‌ها محاسبه شد.

قنبری و همکاران (۱۳۹۰)	در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP ^۱)، انتخاب بهترین چال انفجاری در معدن سنگ آهک نکا انجام شده است.
محمدزاده و همکاران (۱۳۹۰)	روش ماتریس ارزیابی ریسک در تونل‌های معدن زغال‌سنگ طبس نشان داد که تونل‌سازی با دستگاه رودهدر، ریسک کم‌تری نسبت به روش چالزنی و آتشباری دارد. همچنین ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی مربوطه نشان داد که رودهدر دارای کله حفار طبلکی مناسب‌تر از کله حفار مخروطی برای حفاری این تونل‌ها است.
آزاد و همکاران (۱۳۹۱)	در این مقاله هدف تحلیل ریسک معدن زغال‌سنگ طزره بود. در این رابطه یک مدل آماری که متغیرهای آن شامل تعداد حوادث و روزهای کاری از دست رفته در اثر وقوع حادثه در معدن است ارائه شده است. ۵۶۶۶ روز از دست رفته در اثر وقوع حوادث در معدن زغال‌سنگ طزره از فروردین ۱۳۸۰ تا پایان اسفند ۱۳۹۰ به ثبت رسیده است.
برخورداری و همکاران (۱۳۹۱)	شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرآیند تونل‌سازی با بکارگیری از تکنیک آنالیز ایمنی شغلی از اهداف این تحقیق بوده است.
مصری‌پور و بصیری (۱۳۹۱)	انتخاب روش ارزیابی پروژه‌های معدنی با استفاده از روش تلفیقی تحلیل سلسله مراتبی فازی و TOPSIS ^۲ فازی از اهداف این پژوهش بوده است.
نظارت و همکاران (۱۳۹۱)	در این تحقیق مدیریت ریسک تونل‌سازی مکانیزه با نگاه ویژه بر عوامل زمین‌شناسی انجام شده است.
باقرپور و همکاران (۱۳۹۳)	ریسک حوادث معادن زیرزمینی زغال‌سنگ ایران، بر مبنای یک رویکرد جدید و ارائه راهکارهای کنترلی (کاهش احتمال) و کاهشی (کاهش اثرات)، بر اساس نظر کارشناسان معادن ایران مورد بررسی قرار گرفته‌اند و بر اساس مقدار ریسک، حوادث رتبه‌بندی شدند.
رمضان‌نیا و همکاران (الف ۱۳۹۳)	به ارزیابی ریسک پروژه‌های معدنی و عمرانی در حوزه مطالعاتی مدیریت ریسک پروژه پرداخته‌اند.
رمضان‌نیا و همکاران (ب ۱۳۹۳)	به بررسی مدیریت ریسک با نگاه ویژه بر پروژه‌های تونل‌سازی پرداخته است. با توجه به نتایج حاصل، هزینه و زمان زیاد در خصوص انجام پروژه‌های حفاری مکانیزه، شناسایی و رتبه‌بندی ریسک برای مدیریت ریسک به هنگام، انکارناپذیر است.
امیری و نعمتیان (۱۳۹۵)	به مدیریت ریسک پروژه‌های ساخت تونل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره و مقایسه مدل‌های مختلف رتبه‌بندی ریسک پرداخته‌اند.
کوه دره‌ئی و همکاران (۱۳۹۵)	به منظور ارزیابی آتشکاری یک رویکرد مبتنی بر ریسک ارائه دادند که در نتیجه ریسک ذاتی محاسبه شد و ماتریس‌های ریسک به دست آمدند. همچنین متداول‌ترین سیستم‌های آغازی بر اساس این‌که چگونه هر یک از آن‌ها می‌توانند با خطرات و انحرافات مربوط با ریسک مقابله و از رخداد آن‌ها پیشگیری کنند مورد بررسی قرار گرفتند.
نخعی پناه خلیل آباد و همکاران (۱۳۹۷)	این پژوهش به ارزیابی ریسک ایمنی مخاطرات مربوط به دستگاه سیم برش به روش درخت خطای فازی و همچنین به کارگیری برخی از روش‌های تعدیل برای کاهش این خطرات در معادن سنگ ساختمانی کوثر اصفهان است. در این پژوهش پس از جمع‌آوری اطلاعات

^۱ Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Process

^۲ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

مربوط به علل خطرات مربوط به دستگاه سیم برش، نظرات از طریق پرسشنامه توسط متخصصان مربوطه انجام شد و خطرات مربوط شناسایی شدند، سپس اقدام به تحلیل و ریشه یابی علل خطرات با روش تحلیل درخت خطا شده است. با توجه به مدل درختی که با این روش ایجاد شده، برای وزن دادن به علل ریشه‌ای که به عنوان رویدادهای اساسی تعیین شده اند از تئوری فازی استفاده شد تا در نهایت احتمال وقوع هر رویداد اساسی به دست آید. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین احتمال وقوع در بین رویدادهای میانی به ترتیب برای خطرات ناشی از تعمیر و نگهداری، مسائل زمین شناسی و طراحی نادرست و بیشترین احتمال وقوع در بین رویدادهای اساسی به ترتیب برای خطرات ناشی از حرکت و ضربه شلاقی سیم ناشی از گسیختگی، انحراف داشتن سیم برش و وجود گل و لای در داخل بلوک سنگ است. در انتها نیز با توجه به روش‌های کنترلی موجود پاسخ مناسبی برای کنترل این ریسک‌ها ارائه شده است.	
در این پژوهش با استفاده از روش تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست زیست‌محیطی، ریسک‌های زیست‌محیطی سد باطله معدن مس سونگون ارزیابی شد و با پیشنهاد اقدامات مدیریتی مناسب برای کاهش اثرات ریسک‌ها از بروز حوادث ناشی از نشت یا شکست سد باطله جلوگیری به عمل آمد. در ابتدا خطرات بالقوه موجود در این سد باطله در سه دسته فیزیکی- شیمیایی، بیولوژیکی و اقتصادی- اجتماعی، از طریق بازدید میدانی و گفتگو با کارشناسان خبره پروژه، و همچنین در قالب پرسشنامه‌هایی شناسایی شد. بر اساس آنالیزهای انجام شده در محیط فیزیکی- شیمیایی، ریسک لرزه خیزی منطقه با ۱۶.۷ درصد، در محیط بیولوژیکی، ریسک آلودگی صوتی با ۱۴.۶ درصد و در محیط اجتماعی- اقتصادی، ریسک اثر بر چشم انداز با ۱۹.۳ درصد بالاترین امتیاز ریسک را به دست آوردند.	خیرخواه و امیری (۱۳۹۸)
در این مقاله به ارزیابی و مدیریت ریسک ایمنی در معادن روباز کرومیت فاریاب با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداخته شد. طبق بررسی‌های انجام گرفته در مرحله اول ۷۸ خطر در ۴ معدن روباز کرومیت فاریاب، شناسایی شد. پس از نظرسنجی با افراد شاغل در معدن، ۲۷ خطر در ۶ گروه (زمین‌شناسی، حفاری و انفجار، حمل و نقل، ماشین‌آلات و تجهیزات، قوانین و مقررات و خطاهای فردی) به عنوان مخاطرات مهم تعیین شدند. در ارزیابی انجام شده با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در نهایت ۱۱ خطر به عنوان خطرات اصلی تعیین شد. ارزیابی‌های مربوط نشان داد که گروه‌های حفاری و انفجار و خطاهای فردی به ترتیب مهم‌ترین گروه از خطرات در معادن روباز کرومیت فاریاب‌اند. در نهایت برای هر گروه از خطرات پاسخ به ریسک مناسب اعمال شد.	عامری سیاهوئی و همکاران (۱۳۹۸)
در این مقاله به بررسی و شناسایی مخاطرات و آنالیز حساسیت حوادث در طی دوره ۱۰ ساله از سال ۱۳۸۸ لغایت ۱۳۹۷ ناشی از استخراج معادن زغال سنگ ایران پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در طول این دوره زمانی، تعداد ۴۶۶ نفر از کارگران در معادن ایران و تعداد ۱۲۰ نفر در معادن زغال سنگ ایران، جان خود را از دست داده اند (۷.۲۵٪ فوت شدگان معادن ایران) که بطور میانگین به ترتیب ۶.۴۶ و ۱۲ نفر در هر سال است. متأسفانه در معادن زغال سنگ از سال ۱۳۸۸ لغایت ۱۳۹۷ به صورت میانگین هر ماه یک نفر فوت کرده است.	فتوت و مافی (۱۴۰۰)

۲-۳- جمع‌بندی

هر پروژه دارای درجه‌ای از ریسک است که این ریسک‌ها می‌بایستی به طور مناسب شناسایی شود تا پاسخ‌های ضروری برای به دست آوردن سطح مورد توقع موفقیت پروژه را گسترش داد. پروژه‌های مختلف به خصوص پروژه‌های معدنی ممکن است در اندازه، موضوع، عدم قطعیت، پیچیدگی و سایر خصوصیت‌های دیگر با یکدیگر متفاوت باشند.

با توجه به محدودیت‌های متفاوتی که پروژه‌ها در دسترسی به منابع گوناگون اعم از منابع مالی و انسانی و نیز زمان روبرو هستند، مدیران پروژه توان واکنش و پاسخ‌دهی به تمامی ریسک‌ها را به طور همزمان نخواهند داشت. از این رو باید پیش از آغاز و ضمن اجرای پروژه نسبت به تعیین و شناسایی مهم‌ترین ریسک‌ها و حذف ریسک‌های کم‌اهمیت اقدام کرد. رتبه‌بندی ریسک گامی مهم در برآورده کردن هرچه بهتر این نیاز است. راه عملی در کنترل و جلوگیری از وقوع ریسک‌ها و حوادث با شدت و تکرار بالا، کنترل علل ریشه‌ای وقوع آنهاست.

در تحقیقاتی که در این فصل مورد بررسی قرار گرفت، تاکنون ارزیابی ریسک در مورد مسئله تونل‌سازی در معادن به روش چالزنی و انفجار با استفاده از تحلیل درخت خطای فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی مورد بررسی و تحقیق قرار نگرفته است. از این رو یکی از اهداف تحقیق پیش‌رو شناسایی، ریشه‌یابی، رده‌بندی و پاسخ به ریسک‌های تونل‌سازی معادن به روش چالزنی و انفجار است. در فصل بعد به بررسی مفاهیم اولیه مدیریت ریسک و روش‌های ارزیابی ریسک پرداخته می‌شود.

فصل ۳

مدیریت و ارزیابی ریسک

۳-۱- مقدمه

حادثه و عواقب منجر از آن از جمله موارد هزینه‌زا در هر سازمانی است. این حوادث باعث آسیب‌های جانی، مالی و زیست محیطی می‌شوند و به صورت مستقیم یا غیرمستقیم، سازمان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. لذا کاهش بروز حوادث، آثار و پیامدهای آن‌ها، یکی از اولویت‌های اصلی هر سازمانی است (عطائی، ۱۳۹۵). در این بین معدن‌کاری از جمله فعالیت‌هایی است که در بخش‌های مختلف آن از جمله چالزنی و انفجار همواره تحت تأثیر حوادث و پیامدهای مختلفی قرار دارد که بایستی با مدیریت ریسک برای شناسایی، کاهش و حذف این حوادث اقدام کرد.

ریسک پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از روش چالزنی و انفجار همواره مورد توجه بوده و از طریق مدیریت مناسب می‌توان احتمال وقوع یا تأثیر پیامدهای نامطلوب آن‌ها را کاهش داد. از جمله موارد اصلی طولانی‌تر شدن و افزایش هزینه‌های بخش تونل‌سازی در معدن‌کاری زیرزمینی، مدیریت ناقص و ضعیف به ویژه مدیریت ریسک است. لازمه مدیریت ریسک شناسایی، ارزیابی و درجه‌بندی ریسک‌های مختلف است. رتبه‌بندی ریسک‌ها، بخش اساسی این فرایند به شمار می‌آید، زیرا با انجام رتبه‌بندی، ارجحیت هر ریسک در مقابل سایر ریسک‌ها مشخص و در نتیجه تصمیم‌گیرنده می‌تواند در مورد میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک، برنامه‌ریزی کند. با توجه به موارد ذکر شده و اهمیت آتشکاری در معادن زیرزمینی برای احداث و پیشروی تونل که تأثیر بسزایی در پیامدهای مختلف از جمله ایمنی، اقتصاد و مسائل زیست‌محیطی دارد، تلاش برای کاهش ریسک و پیامدهای آتشکاری برای بهبود هزینه‌ها و نتایج آتشکاری امری ضروری است.

در این فصل، ابتدا مفاهیم مهم مدیریت ریسک بیان شده است و بعد از آن به اختصار روش‌های مختلف ارزیابی ریسک و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره اشاره شده است و از بین آن‌ها، روش‌های تحلیل درخت خطا، تحلیل درخت خطای فازی و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی به تفصیل بیشتری بیان شده است.

۲-۳- تعاریف و مفاهیم ریسک

ریسک تهدید ناشی از رویداد یا رخدادی است که به طور نامطلوبی توانایی یک سازمان را در دستیابی به اهدافش تحت الشعاع قرار می‌دهد. در دنیای امروز، کلیه سازمان‌ها، صنایع و سایر جوامع، با طیف گسترده‌ای از ریسک‌ها روبرو هستند که بر اهداف آن‌ها اثر نامطلوب دارد. برای مقابله با این ریسک‌ها، هر سازمان، به مدل ریسک خاص خود نیازمند است.

مدیریت ریسک، فرآیندی است که هدف آن، کاهش آثار مضر یک فعالیت از طریق انجام آگاهانه برای پیش‌بینی حوادث ناخواسته و برنامه‌ریزی برای جلوگیری از آن‌ها است. مدیریت ریسک به دو پرسش اساسی درباره پیشامدهای احتمالی آینده پاسخ می‌دهد. نخستین پرسش این که «چه خواهد شد؟» و دومین پرسش این که «چه باید کرد؟» (عطائی، ۱۳۹۵).

در این بخش به منظور درک و شناخت بهتر، ابتدا مفاهیم اساسی مدیریت ریسک بیان شده است و پس از آن روش‌های ارزیابی ریسک گفته خواهد شد. این مفاهیم به شرح زیر است (محمدفام، ۱۳۹۰):

خطر^۱: به شرایطی گفته می‌شود که دارای پتانسیل رساندن آسیب به کارکنان، خسارت به وسایل، تجهیزات، ساختمان‌ها و از بین بردن مواد یا کاهش قدرت کارایی آن باشد.

منبع خطر^۲: هر عامل یا فعالیتی که بتواند خسارت ایجاد کند، منبع خطر نامیده می‌شود. منابع مخاطرات را می‌توان به گروه‌هایی مانند تجهیزات، محیط کار، مواد، روش کار و غیره تقسیم‌بندی کرد.

شدت خطر^۳: یک توصیف طبقه‌بندی شده از سطح مخاطرات بر اساس پتانسیل واقعی یا مشاهده شده آن‌ها در ایجاد جراحت، صدمه و یا آسیب.

احتمال خطر^۴: امکان بروز شرایط خاص در یک وضعیت معین یا محیط کاری.

^۱ Hazard

^۲ Hazard Source

^۳ Hazard Severity

^۴ Hazard Probability

ایمنی^۱: به میزان دوری از خطر ایمنی گفته می‌شود.

سیستم^۲: به مجموعه ای از افراد، تجهیزات، قوانین، روش‌ها و دستورالعمل‌ها که به منظور اجرای یک فعالیت معین در یک محیط خاص در کنار یکدیگر قرار بگیرند، گفته می‌شود.

حادثه^۳: واقعه برنامه‌ریزی نشده و بعضاً خسارت‌آفرین که انجام، پیشرفت، یا ادامه طبیعی یک فعالیت یا کار را دچار اختلال می‌کند.

شبه حادثه^۴: رویدادهایی هستند که هرچند می‌توانند باعث ایجاد صدمه یا جراحت شوند ولی به موارد فوق منجر نشده و به اصطلاح به خیر می‌گذرند.

رویداد (واقعه)^۵: به وقایعی می‌گویند که شرایط لازم برای مرگ یا آسیب‌های جدی به تجهیزات یا محیط‌زیست را به طور بالقوه داشته باشد. بنابراین رویداد، مجموع حادثه و شبه حادثه است.

ریسک^۶: عبارت است از امکان وقوع حادثه بر حسب احتمال وقوع و شدت آن.

شکست (خرابی)^۷: به عدم توانایی یک قسمت یا یک قطعه از دستگاه یا سیستم در اجرای عملکرد مورد انتظار و یا انجام عمل ناخواسته گفته می‌شود.

قابلیت اطمینان^۸: عبارت است از حد اطمینانی که یک محصول یا سیستم می‌تواند کارکرد تعریف شده خود را در شرایط عملیاتی و محیطی از پیش تعریف شده برای یک مدت زمان معین انجام دهد.

¹ Safety

² System

³ Accident

⁴ Near Miss

⁵ Incident

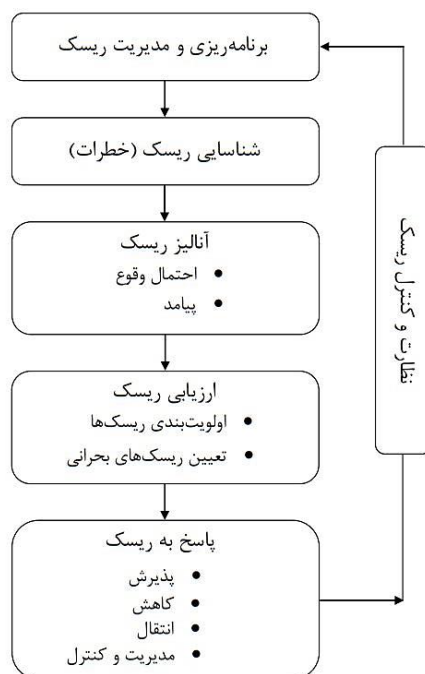
⁶ Risk

⁷ Failure

⁸ Reliability

۳-۳- مدیریت ریسک

مدیریت ریسک، فرآیند نظام‌مند برنامه‌ریزی، شناسایی، تجزیه و تحلیل و واکنش به ریسک است. این مدیریت شامل فرآیندها، ابزارها و روش‌هایی است که به منظور بیشینه کردن احتمال وقوع یا اثر وقایع مثبت و کمینه کردن احتمال وقوع یا اثر پیامدهای ناگوار، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین مدیریت ریسک شامل فرآیند برنامه‌ریزی مدیریت ریسک^۱، شناسایی ریسک^۲، آنالیز ریسک^۳، ارزیابی ریسک^۴، پاسخ به ریسک^۵ و نظارت و پایش ریسک^۶ است. مدیریت ریسک در واقع روند کنترل ریسک و تعدیل اثرات آن است. مدیریت ریسک یک مسیر نظام‌مند برای تعیین، ارزیابی و واکنش به ریسک‌های یک پروژه است (عطائی، ۱۳۹۵) که این فرآیند در شکل ۳-۱ آورده شده است.



شکل ۳-۱: فرآیند کلی مدیریت ریسک (عطائی، ۱۳۹۵)

¹ Risk Management Planning

² Identifying Risk

³ Risk Analysis

⁴ Risk Assessment

⁵ Risk Response

⁶ Risk Monitoring

۳-۳-۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک

برنامه‌ریزی مدیریت ریسک پروژه عبارت است از فرآیند تصمیم‌گیری در مورد چگونگی هدایت فعالیت‌های مدیریت ریسک در پروژه، این فرآیند برای تدارک زمان و منابع لازم برای فعالیت‌های مدیریت ریسک و همچنین تعیین اصول یکسان و مورد توافق برای ارزیابی ریسک‌ها، دارای اهمیت فراوانی است. در برنامه‌ی مدیریت ریسک در استاندارد PMBOK مواردی همچون روش‌شناسی مدیریت ریسک، نقش‌ها و مسئولیت‌ها، بودجه و زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت‌های مدیریت ریسک، دسته‌های ریسک، ماتریس شدت اثر ریسک و غیره لحاظ می‌شود (رمضان‌نیا، ۱۳۹۲).

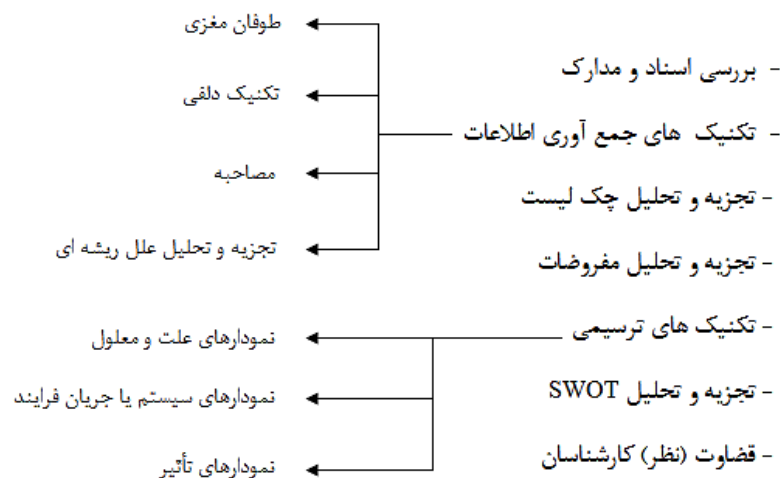
۳-۳-۲- شناسایی ریسک

در این بخش از فرآیند ایجاد سیستم مدیریت ریسک، کل اعضای پروژه برای بحث و شناسایی ریسک‌های مربوط به پروژه گرد هم می‌آیند. پیشنهاد می‌شود در این جلسات، تمرکز تیم تنها بر ریسک باشد. تمرکز بر روی ریسک در این جلسات، باعث می‌شود که کل تیم به اهمیت ریسک در پروژه پی برده و همه به ریسک‌های موجود در پروژه فکر کنند. به دلیل مشکل بودن این بخش، شناسایی و مدیریت ریسک در پروژه‌ها به خوبی انجام نمی‌شود. از آنجایی که ریسک یک رخداد عدم قطعی و گه‌گاه ناشناخته می‌باشد، فرآیند مدیریت ریسک نسبت به سایر فرآیندهای مهندسی، امری غریب به نظر می‌رسد. به همین دلیل شناسایی ریسک برای بسیاری از مدیران پروژه امری سخت و طاقت‌فرسا می‌باشد. در صورتی که رویه‌ی شناخت ریسک مشخص شده باشد، مدیریت آنها راحت‌تر خواهد شد (Tweedale et al., 1997 ;Standish, 2012).

نتایج این مرحله، عبارت‌اند از: شناسایی ریسک‌ها و منابع ریسک‌ها، شناسایی ریسک‌های بالقوه، شناسایی

علائم ریسک و شناسایی ورودی سایر فرایندها در سایر محدوده‌های مدیریت پروژه (رمضان‌نیا، ۱۳۹۲).

روش‌ها و ابزارهای بسیاری برای شناسایی ریسک‌ها وجود دارند، اما از هیچ یک از آن‌ها نمی‌توان انتظار شناسایی تمام ریسک‌های کوچک و بزرگ را داشت (PMI, 2000). رایج‌ترین این روش‌ها در شکل ۲-۳ آورده شده است.



شکل ۲-۳: روش‌ها و ابزارهای شناسایی ریسک‌ها

۳-۳-۳- آنالیز ریسک

آنالیز ریسک روشی است برای تعیین و ارزیابی مؤلفه‌هایی که ممکن است موفقیت یک پروژه یا دستیابی به یک هدف را به مخاطره بیندازند. این روش همچنین به تعیین راهکارهای پیشگیرانه برای کاهش احتمال وقوع مؤلفه‌های مربوط و تعیین اقدامات متقابل در زمان وقوع آن‌ها کمک می‌کند (عطائی، ۱۳۹۵).

۳-۳-۴- ارزیابی ریسک

ارزیابی ریسک، یک فرآیند لازم و نظام‌مند در ارزیابی شدت رویداد و عواقب فعالیت‌های انسانی بر روی سیستم‌های با خصوصیات پرخطر و تشکیل یک ابزار مفید برای سیاست ایمنی است. تنوع در فرآیندهای آنالیز ریسک این‌گونه است که روش‌های متعدد و مناسب زیادی برای انجام این کار وجود دارد (Koulouriotis et al., 2009). تبدیل داده‌های ریسک به اطلاعات تصمیم‌گیری، ارزیابی میزان اثر، احتمال

وقوع و محدوده زمانی ریسک‌ها و طبقه‌بندی و اولویت‌بندی ریسک‌ها، مهم‌ترین اقدامات ارزیابی ریسک می‌باشند (عطائی، ۱۳۹۵).

تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای روش‌های ارزیابی ریسک به کار می‌رود، اما در اینجا به روش‌های ارزیابی کیفی و ارزیابی کمی پرداخته می‌شود.

الف - ارزیابی کیفی ریسک

در ارزیابی کیفی ریسک برای مشخص کردن اثر بالقوه و احتمالی ریسک‌های شناسایی شده بر اهداف پروژه، این ریسک‌ها از نظر کیفی ارزیابی و اولویت‌بندی می‌شوند (عطائی، ۱۳۹۵). روش‌های زیادی برای ارزیابی کیفی ریسک معرفی شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از (توضیحات کامل این روش‌ها در کتاب مدیریت ریسک دکتر محمد عطائی چاپ سال ۱۳۹۵ درج شده است):

- روش چه می‌شود اگر^۱؟
- روش ماتریس ریسک^۲
- روش تحلیل خطرات بالقوه^۳
- روش تجزیه و تحلیل مقدماتی خطر^۴
- روش مطالعه عملیات و خطر^۵
- تجزیه و تحلیل ایمنی شغلی^۶

^۱ What if Analysis

^۲ Risk Matrix

^۳ Hazard Analysis = HAZAN

^۴ Preliminary Hazard Analysis = PHA

^۵ Hazard & Operability Study = HAZOP

^۶ Job Safety Analysis = JSA

ب - ارزیابی کمی ریسک

پس از شناسایی خطرات، ارزیابی ریسک با استفاده از روش‌های کیفی و کمی صورت می‌گیرد. برای سیستم‌های پیچیده و زمانی که ارزیابی کیفی ریسک نمی‌تواند اطلاعات کافی در اختیار تحلیل‌گر ریسک قرار دهد، ارزیابی کمی ریسک مورد توجه قرار می‌گیرد. هرچه بتوان در روند ارزیابی خطر به سوی کمی‌سازی آن پیش رفت، نتایج بهتر و مؤثرتری حاصل می‌شود. ارزیابی ریسک به روش‌های کمی، می‌تواند کانون‌ها و عوامل ریسک موجود را تشخیص داده و با استفاده از تدابیر پیشگیرانه و کنترلی، نسبت به حذف یا مهار آن‌ها اقدام کرد.

در ساده‌ترین حالت ارزیابی کمی ریسک، ریسک هر خطر از حاصل ضرب احتمال تبدیل شدن آن خطر به حادثه (احتمال وقوع حادثه یا تکرار پذیری حادثه) در پیامد حاصله یا شدت حادثه به دست می‌آید. هم احتمال وقوع و هم پیامد حادثه، هر دو به صورت عدد بیان می‌شوند و معمولاً با توجه به گذشته و تاریخچه وقوع حوادث محاسبه می‌شوند (عطائی، ۱۳۹۵).

برای ارزیابی کمی ریسک، روش‌های زیادی معرفی شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از (توضیحات کامل این روش‌ها در کتاب مدیریت ریسک دکتر محمد عطائی چاپ سال ۱۳۹۵ درج شده است):

- روش تحلیل درخت خطا (FTA^1)

(در این پایان‌نامه از روش تحلیل درخت خطا برای ارزیابی ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار

استفاده شده است که در ادامه این فصل به طور مفصل این روش بررسی خواهد شد).

- روش تحلیل درخت رویداد (ETA^2)

- تحلیل علت-پیامد (CCA^3)

¹ Fault Tree Analysis = FTA

² Event Tree Analysis = ETA

³ Cause-Consequence Analysis = CCA

- روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن (FMEA¹)

- روش ویلیام فاین^۲

- روش 3D دانشگاه ملبورن

۳-۳-۵- پاسخ به ریسک

برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک، فرآیند تهیه راه‌حل‌ها و واکنش‌هایی است که برای کاهش تهدیدهای پیش روی اهداف پروژه انجام می‌شود. برنامه واکنش در مقابل ریسک باید متناسب با شدت ریسک، هزینه ناشی از رخداد ریسک، زمان و واقعیات پروژه بوده و به تأیید همه افراد درگیر برسد (PMI, 2000).

اقدامات پاسخ به ریسک شامل مواردی همچون انتقال ریسک، اجتناب از ریسک، کاهش ریسک و پذیرش ریسک است. از بین اقدامات ذکر شده، باید محتمل‌ترین و اثربخش‌ترین اقدام را انتخاب کرد. اتخاذ یک استراتژی خاص و یا چند استراتژی بنا به نیاز پروژه و ریسک موجود امکان‌پذیر است.

الف - انتقال ریسک

انتقال ریسک یعنی جابجایی خطر به موقعیت دیگر. این روش، موجب می‌شود که به وسیله بستن قرارداد یا انجام اقدامات احتیاطی، ریسک به بخش دیگری منتقل شود. بیمه کردن، یک نوع از تکنیک‌های انتقال ریسک به استفاده از بستن قرارداد است.

ب - اجتناب از ریسک

استراتژی اجتناب، یعنی انجام ندادن فعالیتی که سبب ریسک می‌شود. مانند خودداری از ورود و ادامه فعالیتی که بازده یا ادامه فعالیت و یا تولیدات آن ممکن است برای مصرف‌کننده زیان‌بار باشد (عطائی، ۱۳۹۵).

¹ Failure Mode and Effect Analysis = FMEA

² William Fine Method

ج - کاهش ریسک

راه کار کاهش ریسک، یعنی به کارگیری شیوه‌هایی که سبب کاهش شدت زیان می‌شود. مانند پر کردن ناهمواری‌های کف سالن.

د - پذیرش ریسک

استراتژی پذیرش، یعنی قبول زیان وقتی که آن زیان رخ می‌دهد. در واقع خود تضمینی یا تضمین شخصی، در این طبقه جای می‌گیرد. پذیرش ریسک، یک استراتژی قابل قبول برای ریسک‌های کوچک است که هزینه حفاظت در مقابل ریسک ممکن است، از نظر زمانی بیشتر از کلیه زیان‌های حاصله باشد (عطائی، ۱۳۹۵).

۳-۶- نظارت و کنترل ریسک

هدف از این مرحله، نظارت بر وضعیت ریسک‌های شناسایی شده، ریسک‌های جدید، اطمینان حاصل کردن از اجرای صحیح واکنش‌ها، حصول اطمینان از اثربخشی و بهبود مستمر فرآیند نظارت بر تغییرات ریسک در تمام مراحل پیشرفت پروژه و رعایت اصول مدیریت ریسک است. این فرآیند، باید به طور مستمر انجام شود. در این مرحله، باید اقدامات مقابله با ریسک‌هایی که شناسایی شده‌اند، نظارت و کنترل شوند. همچنین در اثر بخشی فرآیند ریسک باید بازنگری صورت گیرد تا اطمینان حاصل شود، نیازهای مدیریت ریسک برآورده می‌شود (عطائی، ۱۳۹۵).

۳-۴- مروری بر روش تحلیل درخت خطا

روش تحلیل درخت خطا، یک روش بر پایه‌ی شکست و جزء‌گرا است. جزء‌گرا از این بابت که با یک رویداد نامطلوب شروع شده و سپس با استفاده از یک فرآیند سیستمی رو به عقب، علل وقوع این رویداد ناخواسته مشخص می‌شود و در طی این فرآیند، درخت خطا برای توصیف گرافیکی رویدادها و ارتباط آن‌ها برای وقوع رویداد نامطلوب یا رویداد رأس، ترسیم می‌شود. در واقع FTA، یک مدل کیفی است که اطلاعات مفید

بسیاری از علل بروز یک رویداد نامطلوب را ارائه می‌دهد و از طرفی می‌توان آن را کمی کرد و اطلاعات بیشتری درباره احتمال وقوع رویداد رأس و میزان اهمیت تمامی علل و رویدادهای مدل شده، به دست آورد (اصفهانی، ۱۳۸۹).

۳-۴-۱- کاربردهای روش تحلیل درخت خطا

روش تحلیل درخت خطا، به شناسایی زمینه‌های مربوط به طراحی محصولات یا خدمات جدید یا در حل-وفصل مشکلات شناخته شده در محصولات موجود و همچنین به شناسایی اعمال اصلاحی برای اصلاح خطاها یا کاهش آن‌ها کمک می‌کند.

روش تحلیل درخت خطا، بیشتر در ارزیابی ایمنی سیستم‌هایی با رویدادهای با شدت و ریسک بالا و در راستای کسب اطمینان از کافی بودن اقدامات پیشگیرانه برای کنترل احتمال وقوع حوادث ناگوار، مفید است. درخت خطا، توانایی تشخیص نحوه ایجاد علت‌های بروز واقعه (رویداد) را دارد. درخت خطا، می‌تواند یک روش مفید برای تشریح احتمال وقوع یک حادثه و تخمین عمر مفید یک سیستم باشد (عطائی، ۱۳۹۵).

۳-۴-۲- اصول روش تحلیل درخت خطا

روش تحلیل درخت خطا، ابزار تجزیه و تحلیل استنباطی و همچنین دیاگرام نمایی برای نشان دادن منطق و ایجاد فرآیند درک استنباطی از چگونگی وقایع نامطلوب است. این روش، مدلی منطقی-دیداری است که از آن برای شرح چگونگی وقایع ناخواسته در یک سیستم که ممکن است به وسیله یک نقص ساده یا ترکیبی از نقایص ایجاد شود، استفاده می‌کنند (محمدفام، ۱۳۹۰).

روش تحلیل درخت خطا، به صورت کل به جزء است که با تعریف یک رویداد نامطلوب به عنوان رویداد بالایی، شروع شده و با پرسیدن این سؤال که این رویداد چگونه اتفاق بیافتد؟ علل این رویداد چیست؟ مسأله را بررسی و تجزیه و تحلیل می‌کند و ساختار درخت خطا تا رسیدن به کوچکترین اجزاء سیستم که

رویداد اساسی نامیده می‌شود ادامه می‌یابد. توسعه توالی علل، زمانی متوقف می‌شود که سطح مناسبی از جزئیات به دست آید.

۳-۴-۳- مفاهیم و علائم مورد استفاده در درخت خطا

در روش FTA از مفاهیمی استفاده می‌شود که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته شده است.

رویداد^۱: یک عنصر دو ارزشی است که اگر تغییرات ناشی از آن در جهت مثبت باشد به آن رویداد طبیعی و در غیر این صورت به آن رویداد ناخواسته گفته می‌شود.

رویداد بالایی^۲: رویدادی که در بالاترین نقطه درخت خطا جای می‌گیرد و علل به وجود آورنده آن شناسایی و تحلیل می‌شوند. رویداد بالایی در هر درخت خطا منحصر به فرد است.

رویداد میانی^۳: هر رویدادی در ساختمان درخت خطا به استثنای رویداد اصلی که مورد تجزیه و تحلیل بیشتر قرار گرفته و علل به وجود آورنده آن تأیید می‌شود، رویداد میانی گفته می‌شود.

رویداد پایانی^۴: رویدادی که نمی‌توان علل به وجود آورنده آن را تعیین و شناسایی کرد. رویدادهای اساسی و رویدادهای توسعه نیافته، انواع رویدادهای پایانی هستند.

رویداد اساسی^۵: رویدادی که در پایین‌ترین سطح درخت خطا قرار دارد و دیگر نمی‌توان آن را تجزیه کرد.

رویداد توسعه نیافته^۶: این رویداد پایه به دلایل نداشتن اطلاعات کافی، اضافه نشدن اطلاعات جدید به تحلیل با بسط دادن رویداد و ایجاد آن در سیستم یا زیرسیستمی که خارج از حدود سیستم مورد نظر است، بیشتر از حد موجود تشریح و تحلیل نمی‌شود.

¹ Event

² Top Event

³ Intermediate Event

⁴ Terminal Event

⁵ Basic Event

⁶ Undeveloped Event

رویداد خانه‌ای^۱: رویدادی است که در شرایط نرمال سیستم، رخ دادن آن پیش‌بینی می‌شود. این رویداد

با عملکرد طبیعی سیستم توانایی منجر شدن به خطا را دارد.

نمادهای انتقال^۲: هنگام ثبت درخت خطای یک پروژه که شاید شامل صدها شاخه، درگاه و رویداد

باشد، بایستی به طریقی درخت خطا را در صفحات مختلف، مجزا کرد. در این وضعیت می‌توان ادامه هر

بخش از درخت را با استفاده از نماد **انتقال به**، به صفحه دیگری ارجاع داد و با به کارگیری نماد **انتقال از**،

صفحه‌ای را که درخت خطا از آن‌جا ادامه پیدا کرده است را مشخص کرد.

درگاه‌های منطقی^۳: رویدادهای مختلف در بدنه درخت خطا توسط درگاه‌ها به یکدیگر وصل می‌شوند

که با توجه به نوع خود یک یا چند ورودی دارند ولی فقط دارای یک خروجی می‌باشند.

درگاه «و»^۴: برای بیان حالتی استفاده می‌شود که رویداد خروجی در زمانی اتفاق می‌افتد که فقط و

فقط باید همه رویدادهای ورودی اتفاق بیافتد.

درگاه «یا»^۵: برای بیان حالتی استفاده می‌شود که رویداد خروجی در زمانی رخ دهد که حداقل یکی از

رویدادهای ورودی رخ دهند.

مجموعه برش^۶: ترکیبی از رویدادهای اساسی است که اگر همگی اتفاق بیافتند، منجر به وقوع رویداد

بالایی می‌شوند.

مجموعه برش حداقل^۷: کمترین گروهی از رویدادهای اساسی هستند که اگر همگی اتفاق بیافتند،

منجر به رویداد بالایی می‌شوند. هر یک از برش‌های حداقل نمایانگر یک راه احتمالی برای وقوع رویداد اصلی

¹ House Event

² Transfer Symbol

³ Logic Gates

⁴ And Gate

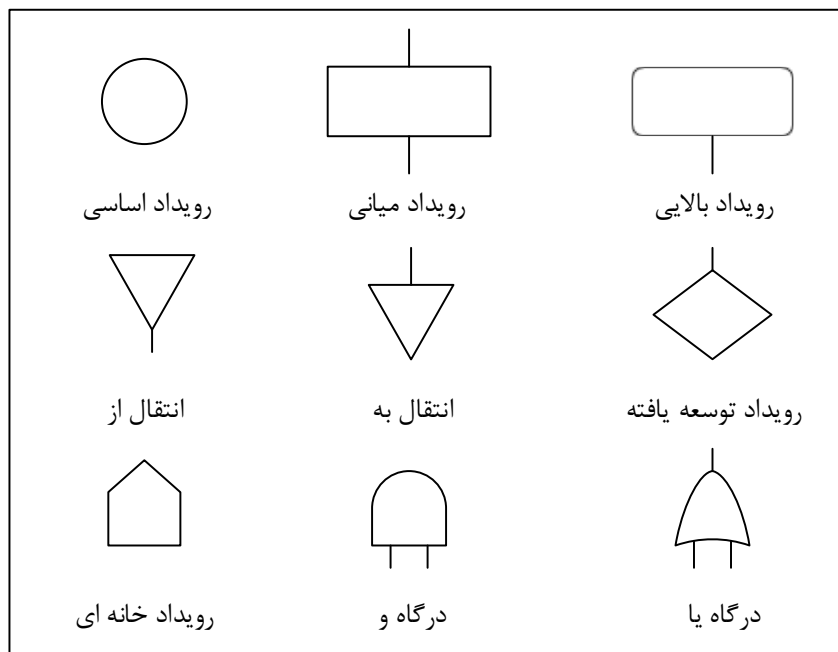
⁵ Or Gate

⁶ Cut Set

⁷ Minimal Cut Set = MCS

است. بدین ترتیب که با رخ دادن رویدادهایی که در یک برش حداقل قرار دارد، رویداد اصلی به وجود خواهد آمد.

در شکل ۳-۳ مهم‌ترین علائم مورد استفاده در ترسیم درخت خطا نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: مهم‌ترین علائم مورد استفاده در ترسیم درخت خطا (Kecojevic & Zhang, 2013)

۳-۴-۴- مراحل روش تحلیل درخت خطا

به طور خلاصه مراحل روش تحلیل درخت خطا به صورت زیر انجام می‌گیرد (عطائی، ۱۳۹۵):

- شناخت سیستم و انتخاب بخشی از آن
- انتخاب رویداد نامطلوب
- شناسایی علل حادثه نامطلوب
- ترسیم درخت خطا
- بازنگری، تکمیل و آزمایش درخت خطا
- ارزیابی درخت خطا

- تفسیر نتایج

۳-۴-۵- ارزیابی درخت خطا

پس از ترسیم و تکمیل درخت خطا، باید آن را مورد ارزیابی قرار داد که می‌توان ارزیابی را به صورت کیفی و کمی انجام داد.

الف - ارزیابی کیفی درخت خطا

درخت خطا به خودی خود یک ارزیابی کیفی از رویدادهایی است که منجر به رویداد بالایی می‌شوند. هنگام تشکیل درخت خطا، بینش و درک قابل توجه‌ای از علل وقوع رویداد بالایی به دست می‌آید و هرچه بیشتر بر روی این علل و ارتباط آن‌ها دقت شود، اطلاعات به دست آمده دقیق‌تر و با ارزش‌تر می‌شود. با استفاده از ارزیابی کیفی، بسیاری از کاستی‌های مدل و سیستم مشاهده می‌شود.

ب - ارزیابی کمی درخت خطا

در ارزیابی‌های کمی، منطق حاکم بر FTA به شکل منطق عددی در می‌آید که اطلاعات منسجم‌تری را به دست می‌دهد. ارزیابی کمی درخت خطا شامل تعیین احتمال وقوع رویداد رأس و میزان اهمیت و نقش رویدادهای پایه در بروز رویداد رأس است. همچنین می‌توان عدم قطعیت‌ها را در هر یک از نتایج کمی حاصله به دست آورد (اصفهانی، ۱۳۸۹).

مواردی که در ارزیابی کمی تعیین می‌شوند عبارتند از (عطائی، ۱۳۹۵):

- احتمال رخ دادن رویداد بالایی
- احتمال رخ دادن رویدادهای میانی
- احتمال رخ دادن هر مجموعه برشی حداقل و اولویت‌بندی مجموعه‌های برشی
- تعیین مجموعه‌های برشی غالب
- اهمیت رویدادهای اساسی، رویدادهای میانی و مجموعه‌های برشی حداقل

برای محاسبه احتمال وقوع رویداد بالایی بایستی احتمال وقوع هریک از رویدادهای اساسی مشخص باشد. اگر نرخ شکست هر رویداد اساسی در دسترس باشد احتمال رویداد از رابطه زیر به دست می‌آید (Lavasani et al., 2015):

$$P_i(x) = 1 - e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (1-3)$$

اگر مقدار $\lambda_i \cdot t$ بسیار کوچک باشد احتمال رویداد از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Lavasani et al., 2015):

$$P_i(x) = \lambda_i \cdot t \quad (2-3)$$

اگر رویدادهای اساسی قابل تعمیر باشند، احتمال هر رویداد از رابطه زیر به دست می‌آید (Rausand & Hoyland, 2004):

$$P_i(x) = \frac{1}{2} \lambda_i \tau \quad (3-3)$$

که:

$P_i(x)$: احتمال وقوع رویداد اساسی i

λ_i : نرخ شکست رویداد اساسی i

t: زمان مورد نیاز برای ارزیابی

τ : فاصله هر تعمیر

پس از تعیین احتمال وقوع هر یک از رویدادهای اساسی، با توجه به نوع درگاه می‌توان احتمال مربوط به شاخه‌ها را از پایین به بالا محاسبه کرد تا در نتیجه احتمال رویداد بالایی به دست آید.

محاسبه احتمال با درگاه و: احتمال رویداد خروجی در این درگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود

(Lavasani et al., 2011):

$$P(E_o) = \prod_{i=1}^m P(E_i) \quad (۴-۳)$$

که در آن $P(E_o)$ ، احتمال وقوع رویداد خروجی، m تعداد رویدادهای ورودی درگاه «و»، $P(E_i)$ احتمال وقوع هریک از رویدادهای ورودی درگاه است.

محاسبه احتمال با درگاه یا: احتمال رویداد خروجی در این درگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Lavasani et al., 2011):

$$P(E_o) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P(E_i)) \quad (۵-۳)$$

که در آن $P(E_o)$ ، احتمال وقوع رویداد خروجی، m تعداد رویدادهای ورودی درگاه «یا»، $P(E_i)$ احتمال وقوع هریک از رویدادهای ورودی درگاه است.

۳-۴-۶- مزایا و معایب روش تحلیل درخت خطا

مزایا و معایب روش تحلیل درخت خطا به شرح زیر است (عطائی، ۱۳۹۵):

الف) مزایا:

- ارزیابی احتمالات ترکیبات مختلف خطاها در یک سیستم پیچیده.
- نقاط منفرد و خطاهای با علل مشترک قابل شناسایی و ارزیابی است.
- تجزیه و تحلیل به سوی کشف خطاها و نقص‌های اصلی هدایت می‌شود.
- با شناسایی نقاط آسیب‌پذیر سیستم، امکان به کارگیری منابع لازم برای کنترل ریسک‌های تعیین شده فراهم می‌شود.
- از این روش می‌توان برای پیکره‌بندی مجدد سیستم برای کاهش آسیب پذیری آن استفاده کرد.
- ابزار مفیدی برای شناسایی ریشه علت‌های نقص تجهیزات است.
- در این روش، می‌توان رویداد با بیشترین ارزش را شناسایی کرد.

- این روش یک نمایش دیداری از سیستم و منابع آن، که دچار نقص می‌شوند را ارائه می‌کند.
- این روش اجازه می‌دهد که تمرکز در یک زمان معطوف به یک نقص سیستم باشد.
- همچنین این روش یک ابزار سازمان یافته برای مهندسان جهت آگاهی از رفتار سیستم و ارتباط داخلی بین عناصر آن می‌باشد.
- این روش کمی و کیفی است و امکان برآوردهای احتمالی یک عیب یا حادثه را فراهم می‌کند.
- با این روش به جهت شناسایی علل وقوع یک رویداد می‌توان مجموعه‌ای را شناسایی و حذف کرد که سبب ایجاد یک رویداد ناخواسته شود.
- درخت خطا جهت مدل کردن هر سیستمی انعطاف‌پذیر است و به تجزیه و تحلیل اثر یک یا چند رویداد اساسی در احتمال شکست رویداد بالا کمک می‌کند.

(ب) معایب:

- در هربار فقط یک رویداد نامطلوب در سطح سیستم، آنالیز می‌شود.
- آنالیز درخت خطا برای سیستم‌های بزرگ به نرم‌افزارهای اختصاصی نیاز دارد.
- انجام ارزیابی دقیق به زمان و منابع قابل توجهی نیاز دارد.
- روش تحلیل درخت خطا در صورتی دقیق است که کلیه عوامل مؤثر در خطاها و عیوب مورد توجه قرار گیرد.
- اگر خطاهای با علل مشترک شناسایی نشود، درخت خطا دقیق نخواهد بود.
- احتمال وجود خطا برای منابع مختلف وجود دارد که نتیجه این خطا پشت سر هم، سبب ایجاد خطا می‌شود.

با توجه به اینکه روش تحلیل درخت خطا، مدل مطلوبی برای ارزیابی مخاطرات به شمار می‌رود، اما 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 دارای عدم قطعیت است. برای جلوگیری از به وجود آمدن چنین شرایطی، رویکرد فازی و استفاده از نظر متخصصان را می‌توان با روش تحلیل درخت خطا به کار برد تا ابهام در احتمال رویدادهای اساسی را کاهش دهد. در ادامه به رویکرد فازی و روش‌های فازی‌سازی اشاره خواهد شد.

۳-۵- کلیات تئوری فازی

منطق فازی روش نوینی است که روش‌هایی را که برای طراحی و مدل‌سازی یک سیستم مستلزم ریاضیات پیشرفته است، با استفاده از مقادیر زبانی و دانش فرد خبره جایگزین و تا حدود زیادی آن را تکامل می‌بخشد. در واقع، در منطق فازی می‌توان نتایج دقیق را با استفاده از مجموعه‌ای از معلومات نادقیق که با الفاظ و مقادیر کلامی تعریف شده‌اند را استخراج کرد (وظیفه‌دان، ۱۳۹۶).

۳-۵-۱- تاریخچه منطق فازی

پایه و اساس مجموعه‌ها و منطق فازی به وسیله لطفی‌زاده مطرح شده است. در سال ۱۹۶۵ لطفی‌زاده، اولین مقاله خود را در زمینه فازی تحت عنوان مجموعه‌های فازی منتشر کرد. این مقاله اولین قدم در معرفی بینش نو و واقع‌گرایانه از جهان در چارچوب مفاهیم کاملاً بدیع اما بسیار سازگار با طبیعت انسان است. در دهه ۱۹۹۰ پیشرفت‌های زیادی در زمینه سیستم‌های فازی ایجاد شد. اما با وجود شفاف شدن تصویر سیستم‌های فازی، هنوز فعالیت‌های بسیاری باید انجام شود و بسیاری از راه‌حل‌ها و روش‌ها همچنان در ابتدای راه قرار دارد (عطائی، ۱۳۹۴).

۳-۵-۲- مجموعه‌های فازی

مجموعه‌های فازی در ریاضیات جدید به مجموعه‌هایی اطلاق می‌شود که عضویت بعضی یا تمام اعضا کاملاً مشخص نیست و عناصر آن به طور نسبی متعلق به آن مجموعه هستند. یک مجموعه فازی تعمیم یک مجموعه کلاسیک است که اجازه می‌دهد تا تعلق هر مقداری را در بازه $[0,1]$ اختیار کند.

۳-۵-۳- توابع عضویت فازی

روش‌های مختلفی برای نمایش توابع عضویت وجود دارد که برخی از آن‌ها نمایش ترسیمی، نمایش جدولی، لیست و نمایش عددی هستند. در روش نمایش عددی، یک عدد فازی ممکن است به صورت مثلثی یا ذوزنقه‌ای نمایش داده شود. در حالت مثلثی عدد مربوطه را به صورت $\tilde{M} = (a, b, c)$ نمایش می‌دهند که پارامترهای a ، b و c به ترتیب بیانگر کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بیشترین مقدار ممکن برای عدد مورد نظر هستند و عدد مورد نظر می‌تواند بین a تا c تغییر کند. در حالت ذوزنقه‌ای عدد مربوطه را به شکل $\tilde{M} = (a, b, c, d)$ نمایش می‌دهند که منظور از آن این است که عدد مورد نظر می‌تواند بین a تا d متغیر باشد (عطائی، ۱۳۹۵).

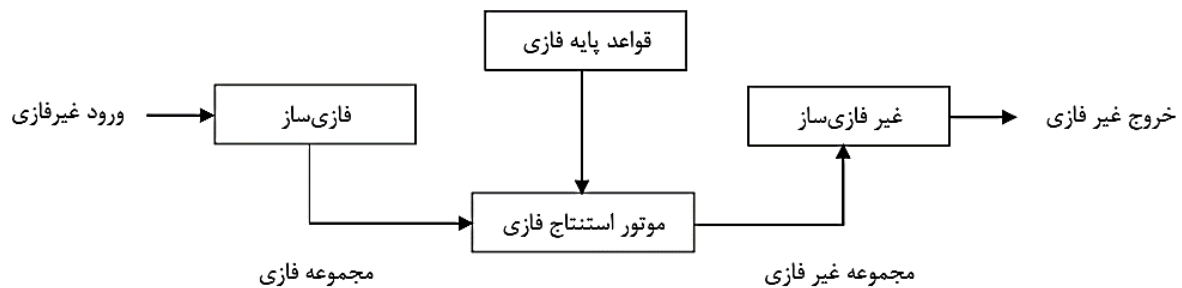
۳-۵-۴- منطق فازی

استدلال با استفاده از مجموعه‌های فازی را منطق فازی می‌گویند. منطق فازی در حل مسائلی که درک آن‌ها مشکل است، ابزاری توانمند است. در منطق فازی به جای دو ارزشی بودن، طیفی از ارزش‌ها، در بازه بسته بین صفر و یک وجود دارد. با این طیف عدم قطعیت به خوبی نمایش داده می‌شود. وجه تمایز عمده منطق فازی با منطق چند ارزشی آن است که در منطق فازی مفهوم یک عبارت نیز می‌تواند مبهم باشد. اگر پیچیدگی سیستم زیاد بوده و داده‌های کافی موجود نباشد و یا داده‌های موجود مبهم و غیر صریح باشند، بهترین ابزار برای مدل‌سازی سیستم، منطق فازی است (وظیفه‌دان، ۱۳۹۶).

۳-۵-۵- سیستم فازی

در سیستم‌های عملی، اطلاعات مهم از دو منبع نشأت می‌گیرند. یک منبع افراد خبره‌ای هستند که دانش و آگاهی خود را در مورد سیستم با زبان طبیعی بیان می‌کنند. منبع دیگر، اندازه‌گیری‌ها و مدل‌های ریاضی هستند که از قواعد فیزیکی ناشی شده‌اند. بر این اساس یک مسأله مهم ترکیب این دو نوع اطلاعات در طراحی سیستم‌ها است. بدین منظور باید دانش بشری را در چهارچوبی مشابه مدل‌های ریاضی فرموله کرد.

این تبدیل توسط یک سیستم فازی انجام می‌شود. در شکل ۳-۴ یک سیستم فازی نشان داده شده است. یک سیستم فازی شامل سه بخش فازی‌ساز، موتور استنتاج فازی و غیر فازی‌ساز است.



شکل ۳-۴: نمایش یک سیستم فازی (عطائی، ۱۳۹۴)

فازی‌سازی^۱ عبارت است از تعریف مجموعه‌های فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی. برای تعریف این مجموعه‌های فازی باید دانش اولیه‌ای از دامنه تعریف هر کدام از این متغیرها وجود داشته باشد. در طبقه‌بندی توابع عضویت، داده‌های ورودی به صورت مجموعه‌های فازی مثل بالا، متوسط، پایین و ... تقسیم می‌شود که دامنه تمام داده‌های ورودی به وسیله چنین متغیرهایی با نسبت دادن درجه عضویت تقسیم‌بندی می‌شود (عطائی، ۱۳۹۴).

استنتاج فازی^۲ بخش اصلی از یک سیستم فازی است که یک پایگاه قواعد فازی است که از قواعد اگر... آن‌گاه ... تشکیل شده است. این مجموعه قواعد، بر اساس دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی به دست می‌آید. موتور استنتاج فازی با انجام پردازش‌هایی روی قوانین فازی و سایر داده‌های موجود در پایگاه اطلاعات، پاسخ مورد نظر را که به شکل عبارات زبانی فازی یا مقادیر فازی است، تعیین می‌کند. در مرحله استنتاج فازی، تعدادی قاعده فازی به صورت قواعد اگر ... آن‌گاه ... تعریف می‌شود. هر قاعده فازی دارای دو بخش مقدمه و نتیجه است. در قسمت مقدمه اجزا توسط عملگرهای AND و OR به هم

^۱ Fuzzification

^۲ Fuzzy Inference

مربوط می‌شوند. در استنتاج فازی، خروجی با توجه به تابع عضویت تعیین شده و برآورد قواعد و محاسبه نتیجه فازی به دست می‌آید.

غیر فازی‌سازی^۱ فرآیند تبدیل اعداد فازی به اعداد حقیقی قطعی، است. گاهی اوقات لازم است دو عدد فازی را با هم مقایسه کرد تا مشخص شود کدام یک بزرگتر از دیگری است. گاهی اوقات نیز به دلیل متغیرهای زیاد و محاسبات گسترده اعداد فازی، به ناچار اعداد فازی را باید به اعداد قطعی تبدیل کرد. بعضی مواقع ممکن است بخواهیم سطح خروجی فرآیند استنتاج فازی را در قالب یک عدد معمولی بیان کنیم که به غیر فازی‌سازی نیاز است. برای غیرفازی کردن روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: روش گرانیگاه^۲، روش نصف‌کننده سطح^۳، روش میانگین حداکثرها^۴، روش کوچک‌ترین حداکثرها^۵ و روش بزرگ‌ترین حداکثرها^۶.

در **روش گرانیگاه**، سطح به دست آمده در مرحله استنتاج محاسبه شده و بر محور افقی تصویر می‌شود. بنابراین در این روش میانگین وزن‌دار مقادیر متغیر خروجی به دست می‌آید. چون این روش تمام نقاط حوزه تعریف و درجه عضویت آن‌ها را در نظر می‌گیرد، دقیق‌ترین روش غیرفازی کردن است.

در **روش نصف‌کننده سطح**، نقطه‌ای تعیین خواهد شد که اگر از آن نقطه خط قائمی رسم شود، سطح به دو قسمت مساوی تقسیم خواهد شد.

در **روش میانگین حداکثرها**، میانگین تمام مقادیری که دارای بیشترین درجه عضویت هستند، تعیین می‌شود.

¹ Defuzzification

² Centeriod

³ Bisector

⁴ Mean of Maximum = MOM

⁵ Smaller of Maximum = SOM

⁶ Largest of Maximum = LOM

در روش کوچک‌ترین حداکثرها، کوچک‌ترین مقدار از بین تمام مقادیری که دارای بیشترین درجه عضویت هستند، تعیین می‌شود.

در روش بزرگ‌ترین حداکثرها، بزرگ‌ترین مقدار از بین تمام مقادیری که دارای بیشترین درجه عضویت هستند، تعیین می‌شود.

۳-۶- روش تحلیل درخت خطای فازی

امروزه استفاده از منطق فازی در سیستم‌هایی که دارای ورودی‌های غیر صریح و نامطمئن هستند و همچنین سیستم‌هایی که قابلیت مدل‌سازی توسط دانش بشری بر مبنای قانون دارند، بیشتر می‌شود. از جمله این سیستم‌ها، سیستمی است که توسط درخت خطا مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. از طرف دیگر لازمه‌ی ضروری برای تحلیل درخت خطا، تعریف و فهم سیستم مورد بررسی و تشکیل درخت است که با توجه به ارتباط نزدیک منطق فازی با بیان انسانی می‌توان از دانش متخصصین در این زمینه به راحتی استفاده کرد و به کمک روابط فازی، سیستم مورد بررسی را معرفی کرد. به بیانی دیگر برای طی مرحله دشوار تشکیل درخت و ارائه مدار منطقی برای یک سیستم با وجود عدم قطعیت‌ها، روش فازی به عنوان یک واسطه کارآمد بسیار مناسب است (درهمی و باصولی، ۱۳۸۱).

با توجه به آنچه در بالا بیان شد، برای بهبود تحلیل درخت خطا در زمان عدم قطعیت ورودی‌ها، پیشنهاد می‌شود تحلیل درخت خطا با استفاده از ورودی‌ها و دریچه‌های فازی صورت پذیرد. بدین معنا که در ساخت مدل منطقی درخت با بهره‌گیری از دانش متخصصین، درخت خطا با دریچه‌های فازی تعریف شود و همچنین ورودی‌ها به صورت گزاره‌های فازی با تابع عضویت بین صفر و یک در نظر گرفته شود.

۳-۶-۱- مراحل روش تحلیل درخت خطای فازی

در این روش به مانند روش تحلیل درخت خطا، یک وضعیت نامطلوب به عنوان رویداد بالایی انتخاب و تمام راه‌هایی که می‌توانند سبب بروز این وضعیت نامطلوب شوند، جستجو و بررسی می‌شوند. سپس به طور

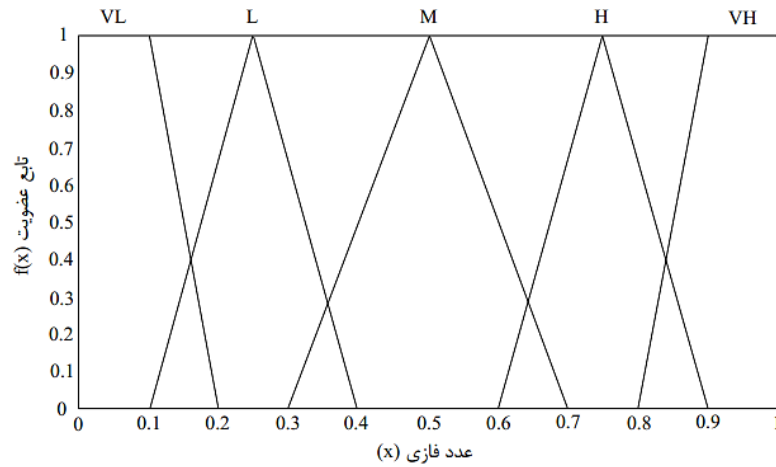
نظام‌مند تمامی دلایل خرابی در یک ساختار بالا به پایین مرتب شده و تا رسیدن به کوچک‌ترین اجزا سیستم ادامه پیدا می‌کند و در نهایت با توجه به تعاریف گفته شده در بخش روش تحلیل درخت خطا، می‌توان مجموعه‌های برش و مجموعه‌های برش حداقل را به دست آورد.

مرحله ۱: انتخاب و تعیین وزن متخصصان

برای انتخاب افراد خبره و متخصص نیاز است افرادی انتخاب شوند که در زمینه موضوع مورد پژوهش، اطلاعات کافی در مورد روش تحلیل درخت خطای فازی داشته باشند تا از نظرات آن‌ها بیشترین استفاده شود. در این مرحله، متخصصان نظرات ذهنی خود را برای هر رویداد اساسی بیان می‌کنند. گاهی اوقات ممکن است به دلیل عدم وجود داده‌هایی که از محدودیت‌های فیزیکی یا کمبود منابع ناشی می‌شود ابهامی وجود داشته باشد که این ناهماهنگی پس از ترکیب نظرات متخصصان برطرف می‌شود (Rausand & Hoyland, 2004). این نکته را هم باید در نظر گرفت که کارشناسان دارای اهمیت وزنی یکسانی نمی‌باشند که باید وزن هریک با توجه به روش‌های مختلفی که وجود دارد تعیین شود. پارامترهای مختلفی همچون عنوان شغلی، تحصیلات، میزان تجربه و ... برای تعیین وزن هر کارشناس در نظر گرفته می‌شود.

مرحله ۲: کمی‌سازی نظرات کارشناسان

نظرات کارشناسان در خصوص رویدادهای اساسی را می‌توان با استفاده از متغیرهای زبانی دریافت کرد. عبارت‌های خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH)، نمونه‌هایی از متغیرهای زبانی هستند که برای فازی کردن آن‌ها، می‌توان مطابق شکل ۳-۵ از اعداد فازی دوزنقه‌ای استفاده کرد. همچنین اعداد فازی دوزنقه‌ای مربوط به نمودار در روابط ۳-۶ تا ۳-۱۰ آورده شده است (Renjith et al., 2010).



شکل ۳-۵: متغیرهای زبانی مورد استفاده کارشناسان (Renjith et al. 2010)

$$f_{VL}(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 0.1 \\ \frac{0.2-x}{0.1} & 0.1 \leq x \leq 0.2 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۳-۶)$$

$$f_L(x) = \begin{cases} \frac{x-0.1}{0.15} & 0.1 \leq x \leq 0.25 \\ \frac{0.4-x}{0.15} & 0.25 \leq x \leq 0.4 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۳-۷)$$

$$f_M(x) = \begin{cases} \frac{x-0.3}{0.2} & 0.3 \leq x \leq 0.5 \\ \frac{0.7-x}{0.2} & 0.5 \leq x \leq 0.7 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۳-۸)$$

$$f_H(x) = \begin{cases} \frac{x-0.6}{0.15} & 0.6 \leq x \leq 0.75 \\ \frac{0.9-x}{0.15} & 0.75 \leq x \leq 0.9 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۳-۹)$$

$$f_{vH}(x) = \begin{cases} \frac{x-0.8}{0.1} & 0.8 \leq x \leq 0.9 \\ 1 & 0.9 \leq x \leq 1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۱۰-)$$

(۳)

مرحله ۳: اجماع نظر کارشناسان

برای اجماع نظر کارشناسان، طبق رابطه زیر ضریب اهمیت هر کارشناس در نمره متغیرهای زبانی او ضرب می‌شود (Renjith et al., 2010):

$$M_i = \sum_{j=1}^n W_j A_{ij} \quad (i=1,2,3,...,m) \quad (۱۱-۳)$$

که:

W_j : ضریب اهمیت کارشناس j

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

m : تعداد رویدادهای اساسی

n : تعداد کارشناسان

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

مرحله ۴: غیر فازی سازی

پس از اجماع نظر کارشناسان، به دلیل متغیرهای زیاد و محاسبات گسترده اعداد فازی، اعداد فازی را باید به اعداد قطعی تبدیل کرد که فرآیند آن را غیر فازی سازی می‌گویند. روش‌های مختلفی به منظور غیر فازی کردن اعداد فازی وجود دارد که در بخش‌های قبل به طور مختصر توضیح داده شده است. اما در اینجا روش گرانیگاه به تفصیل شرح داده می‌شود.

روش گرانیگاه به دلیل این که تمام نقاط حوزه تعریف و درجه عضویت آن‌ها را در نظر می‌گیرد، دقیق‌ترین روش غیرفازی کردن است. این روش توسط سوگنو در سال ۱۹۸۵ توسعه یافته است. در این روش، عدد قطعی از رابطه زیر تعیین می‌شود (Sugeno, 1999):

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x).x dx}{\int \mu_i(x).dx} \quad (۱۲-۳)$$

براساس رابطه بیان شده، عدد فازی مثلثی $A = (a_1, a_2, a_3)$ و عدد فازی ذوزنقه‌ای $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ را می‌توان به ترتیب از روابط زیر به اعداد قطعی تبدیل کرد:

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \quad (۱۳-۳)$$

$$\begin{aligned} X^* &= \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} \\ &= \frac{1}{3} \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4 + a_3 - a_2 - a_1)} \end{aligned} \quad (۱۴-۳)$$

مرحله ۵: استفاده از تبدیل فرمول امکان به احتمال

عدد حاصل از غیرفازی کردن، هنوز به صورت امکانی است. از آنجایی که درخت خطا احتمال می‌پذیرد، لذا باید عدد به دست آمده را از لحاظ امکانی به احتمالی تبدیل کرد. بدین منظور، می‌توان از روابط زیر استفاده کرد (Lavasani et al. 2015):

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad (۱۵-۳)$$

$$k = \left[\frac{1 - CFP}{CFP} \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (16-3)$$

که:

FP : احتمال شکست هر رویداد پایانی

CFP : عدد امکانی حاصل از مرحله غیرفازی کردن

مرحله ۶: تعیین احتمال رویدادهای نهایی و میانی

بعد از تعیین نرخ احتمال هریک از رویدادهای اساسی و با استفاده از اطلاعات بدست آمده، باید نرخ احتمال رویدادهای میانی و نهایی محاسبه شود. هر درخت خطا شامل تعداد زیادی از مجموعه‌های برشی است که برای رویداد نهایی، منحصر بفرد است. اگر احتمالات تمام رویدادهای اساسی محاسبه شود، با توجه به نوع درگاه با جایگزینی رویدادهای اساسی و میانی، احتمال رخداد رویداد نهایی به دست می‌آید (Omidvari et al, 2014).

مرحله ۷: تعیین میزان اهمیت و رتبه‌بندی مجموعه‌های برشی

بعد از محاسبه نرخ رویداد نهایی، با استفاده از رابطه فاسل-وسلی^۱ باید میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل FVI مشخص و رتبه‌بندی شوند. از آنجایی که حوادث از دیدگاه قابلیت اطمینان و ریسک شناسایی می‌شوند، این اهمیت عددی به تمام رویدادهای اساسی و میانی اجازه می‌دهد تا اولویت‌بندی شوند (Wang et al, 2013).

$$FVI(i) = \frac{P(MCS_i)}{P(TE)} \quad (17-3)$$

¹ Fussell- Vesely

۳-۷- روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

در اکثر روش‌های ارزیابی ریسک از دو یا سه مؤلفه استفاده می‌شود و سایر جنبه‌ها و معیارهای مؤثر حذف می‌شود. یکی دیگر از مشکلات این روش‌ها، آن است که ریسک‌هایی که احتمال زیاد و اثر کم دارند، با ریسک‌هایی که احتمال کم و اثر زیادی دارند، معادل هم فرض می‌شوند که این موضوع می‌تواند سبب بروز خطای سیستماتیک شود. علاوه بر این امکان تخصیص وزن‌های متفاوت برای معیارها وجود دارند (عطائی، ۱۳۹۵).

در تصمیم‌گیری‌ها، معیارهای مختلفی باید مورد توجه قرار گیرند که این معیارها اهمیت یکسانی ندارند. بعضی از این معیارها، کمی و بعضی از آن‌ها کیفی هستند. به دلیل نارسایی‌های موجود در برخی از روش‌های ارزیابی اخیراً روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور کمک به تصمیم‌گیرندگان به منظور تصمیم‌سازی مناسب و با در نظر گرفتن مجموعه معیارها، کاربرد زیادی در زمینه‌های مختلف علمی داشته و دارد. روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه به دو دسته تعاملی (جبرانی)^۱ و غیرتعاملی (غیرجبرانی)^۲ تقسیم می‌شوند (جدول ۳-۱). پیش‌فرض روش‌های غیرتعاملی آن است که هر شاخص مستقل از دیگری است و هر کدام از شاخص‌ها به تنهایی در انتخاب مهم هستند. به بیان دیگر در این روش‌ها مبادله^۳ بین شاخص‌ها مجاز نیست و نقطه ضعف در یک شاخص توسط مزیت شاخص دیگر جبران نمی‌شود. در روش‌های تعاملی قوت یک شاخص می‌تواند نقاط ضعف شاخص‌های دیگر را بپوشاند و در واقع وزن کل شاخص‌ها مد نظر است (عطائی، ۱۳۹۴).

¹ Compensatory Methods

² Non Compensatory Methods

³ Trade-off

جدول ۳-۱: انواع روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه (عطائی، ۱۳۹۴)

روش‌های غیر تعاملی	روش‌های حل بدون ترجیحات معیارها (روش تسلط ^۱ ، روش حداقل حداکثرها ^۲ و روش حداکثر حداقل‌ها ^۳)
	روش‌های حل با سطح استاندارد (روش ارضای منفرد ^۴ و روش ارضای جامع ^۵)
	روش‌های حل با ترجیحات کیفی (روش حذفی ^۶ ، روش لغت‌نامه‌ای ^۷ ، روش نیمه لغت‌نامه‌ای ^۸ و روش جایگشت ^۹)
روش‌های تعاملی	روش وزن‌دهی ساده ^{۱۰}
	روش برنامه‌ریزی توافقی ^{۱۱}
	روش VIKOR
	روش شباهت به گزینه ایده‌آل ^{۱۲}
	روش تسلط تقریبی ^{۱۳}
	روش تحلیل سلسله مراتبی ^{۱۴}
	روش تحلیل شبکه ^{۱۵}

به دلیل اقتضای تحقیق حاضر در ادامه توضیح مختصری از روش‌های فرآیند سلسله مراتبی (AHP)،

فرآیند سلسله مراتبی فازی (FAHP) و فرآیند سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP) آورده شده است.

¹ Dominance

² Maximin

³ Maximax

⁴ Disjunctive Satisfying

⁵ Conjunctive Satisfying

⁶ Elimination

⁷ Lexicography

⁸ Semi Order Lexicography

⁹ Permutation

¹⁰ Simple Additive Weighting (SAW)

¹¹ Compromise Programming

¹² Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

¹³ Elimination Choice Translating Reality (ELECTRE)

¹⁴ Analytical Hierarchy Process (AHP)

¹⁵ Analytical Network Process (ANP)

۳-۷-۱- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی، در سال ۱۹۸۰ توسط محققى به نام توماس ال ساعتى^۱ استاد دانشگاه پیتسبورگ ارائه شده است. این روش که منعکس کننده رفتار طبیعى و تفکر انسانی است، تصمیم گیرنده را قادر می سازد که تعامل بین معیارهای مختلف را در موقعیت های پیچیده و غیر ساختاری، ارائه دهد. این روش، تصمیم گیری را از طریق سازمان دهی احساسات، ادراک، برآوردها و قضاوت ها تسهیل می کند و نیروهای اثرگذار بر تصمیم را شناسایی می کند. مراحل این روش به شرح زیر است (عطائی، ۱۳۹۵).

گام ۱: ساختن نمودار سلسله مراتبی

گام ۲: تشکیل ماتریس های مقایسه زوجی

گام ۳: محاسبه وزن عناصر در روش تحلیل سلسله مراتبی

گام ۴: محاسبه نرخ ناسازگاری

۳-۷-۲- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی به درستی نحوه تفکر انسانی را منعکس نمی کند، زیرا در مقایسه های زوجی این روش از اعداد دقیق استفاده می شود. از دیگر مواردی که اغلب روش تحلیل سلسله مراتبی به خاطر آنها مورد انتقاد قرار می گیرد وجود مقیاس نامتوازن در قضاوت ها، عدم قطعیت و نادقیق بودن مقایسه های زوجی است. تصمیم گیرندگان اغلب به علت طبیعت فازی مقایسه های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری ها اعلام کنند. به همین دلیل در قضاوت هایشان ارائه یک بازه را به جای یک عدد ثابت ترجیح می دهند. برای غلبه بر این مشکلات روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه شده است.

¹ Thomas L. Saaty

در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، پس از تهیه نمودار سلسله مراتبی از تصمیم‌گیرنده (یا تصمیم‌گیرندگان) خواسته می‌شود تا عناصر هر سطح را نسبت به هم مقایسه کنند و اهمیت نسبی عناصر را با استفاده از اعداد فازی بیان کنند (عطائی، ۱۳۹۴).

مراحل این روش طبق نظر چانگ^۱ به شرح زیر است (Chang, 1996):

گام ۱: رسم نمودار سلسله مراتبی

گام ۲: تعریف اعداد فازی به منظور انجام مقایسه‌های زوجی

گام ۳: تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با به کارگیری اعداد فازی

گام ۴: محاسبه S_i برای هریک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی

گام ۵: محاسبه درجه بزرگی S_i ها نسبت به یکدیگر

گام ۶: محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس‌های مقایسه زوجی

گام ۷: محاسبه بردار وزن نهایی

۳-۷-۳- تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP)

روش دلفی فازی، در سال ۱۹۸۸ توسط کوفمان^۲ و گوپتا^۳ ارائه شده است. در روش دلفی، پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌شوند. در صورتی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلند مدت، دور شدن نتیجه‌ی پیش‌بینی از واقعیت را در پی خواهد داشت. از طرفی، افراد خبره از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند و این نشان می‌دهد که عدم قطعیت حاکم بر این شرایط، از نوع امکانی است. امکانی بودن عدم قطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه‌های فازی، به پیش‌بینی بلند مدت و تصمیم‌گیری در

¹ Chang

² Kaufman

³ Gupta

دنیای واقعی پرداخت. بدین ترتیب، اطلاعات لازم در قالب زبان طبیعی از خبرگان دریافت شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می‌شود. کاربرد این روش، به منظور تصمیم‌گیری و اجماع بر مسائلی که اهداف و پارامترها به صراحت مشخص نیستند، منجر به نتایج ارزنده‌ای می‌شود. ویژگی مهم این روش، ارائه چارچوبی انعطاف‌پذیر است که بسیاری از موانع مربوط به عدم دقت و صراحت را تحت پوشش قرار می‌دهد (عطائی، ۱۳۹۵).

مراحل اجرای این روش به شرح زیر است (عطائی، ۱۳۹۴):

مرحله ۱: نظر سنجی از متخصصان

در این مرحله، ابتدا از متخصصان متخلف در مورد پارامترهای مؤثر بر یک سیستم به صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظرسنجی می‌شود. در جدول ۳-۲ طبقه‌بندی کمی و کیفی به منظور مقایسه زوجی بین معیارها که توسط ساعتی ارائه شده است می‌تواند به متخصصان در پاسخ‌دهی به سوالات کمک کند.

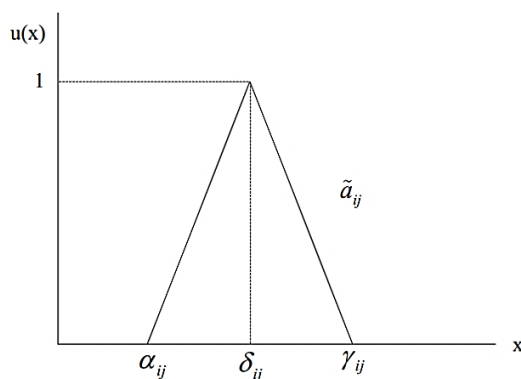
جدول ۳-۲: طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی بین معیارها (Saaty, 1980)

ارزش	اولویت‌ها	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 j کمی بیشتر است.
۵	شدت پیامد قوی	شدت پیامد معیار i نسبت به j بیشتر است.
۷	شدت پیامد خیلی قوی	شدت پیامد معیار i خیلی بیشتر از j است.
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 تدریجی را نشان می‌دهد مثلاً ۸، بیانگر شدت پیامد زیادتر از ۷ و پایین‌تر از ۹ برای i است.

مرحله ۲: محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی $\tilde{a}_{ij}$ ، نتایج نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم در نظر گرفته می‌شود. اعداد فازی در این مرحله را بر اساس توابع عضویت مختلف از جمله روش مثلثی و یا دوزنقه‌ای می‌توان محاسبه

کرد. با توجه به کاربرد زیاد و سهولت محاسبه روش مثلثی، محاسبه اعداد فازی با استفاده از توابع عضویت مثلثی که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، محاسبه می شوند.



شکل ۳-۶: تابع عضویت مثلثی در روش دلفی فازی (عطائی، ۱۳۹۵)
در این حالت، یک عدد فازی به صورت روابط زیر تعریف می شود (Liu & Chen, 2007).

$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (۱۸-)$$

(۳)

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (۱۹-۳)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (۲۰-۳)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (۲۱-۳)$$

که در این روابط:

β_{ijk} : نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام

γ_{ij} : حد بالای نظرهای پرسش شوندگان

α_{ij} : حد پایین نظرهای پرسش شوندگان

δ_{ij} : میانگین هندسی نظرهای پرسش شوندگان

بدیهی است که مؤلفه های عدد فازی به گونه ای تعریف شده اند که: $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$. در ضمن مقادیر

این مؤلفه ها در بازه $[1/9, 9]$ تغییر می کنند.

مرحله ۳: تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل، ماتریس مقایسه زوجی فازی بین

پارامترهای مختلف به شرح رابطه زیر تشکیل می‌شود (Liu & Chen, 2007).

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ \left(\frac{1}{\gamma_{12}}, \frac{1}{\delta_{12}}, \frac{1}{\alpha_{12}}\right) & (1,1,1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ \left(\frac{1}{\gamma_{13}}, \frac{1}{\delta_{13}}, \frac{1}{\alpha_{13}}\right) & \left(\frac{1}{\gamma_{23}}, \frac{1}{\delta_{23}}, \frac{1}{\alpha_{23}}\right) & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (22-3)$$

مرحله ۴: محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها

وزن فازی نسبی پارامترها از روابط زیر محاسبه می‌شوند (Liu & Chen, 2007):

$$\tilde{Z}_i = \left[\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (23-)$$

(۳)

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (24-3)$$

که در آن:

$\tilde{Z}_i$: عدد فازی

$\otimes$: نماد ضرب اعداد فازی

$\oplus$: نماد جمع اعداد فازی

$\tilde{W}_i$: یک بردار سطری نشان‌دهنده وزن پارامتر i ام.

$\tilde{a}_1 \times \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ می‌باشد.

مرحله ۵: غیرفازی کردن وزن پارامترها

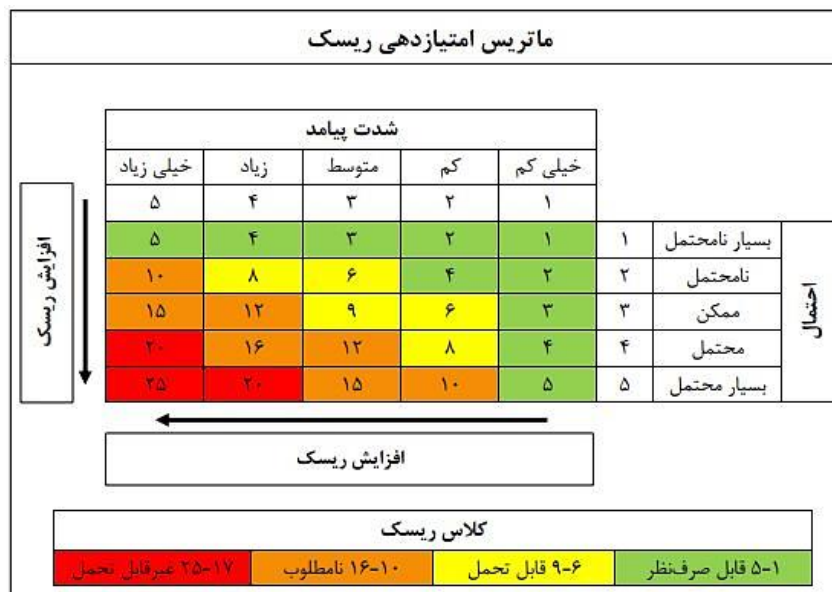
به منظور غیر فازی کردن وزن پارامترها، طبق رابطه زیر میانگین هندسی مؤلفه‌های عدد فازی وزن پارامترها به دست می‌آید که در نتیجه وزن پارامترها به صورت یک عدد قطعی بیان می‌شوند (Liu & Chen, 2007):

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^3 w_{ij} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (25-3)$$

از آن‌جا که روش فازی دلفی بر مبنای تجربیات و نظرات تعدادی از متخصصان یک علم استوار است، لذا به نظر می‌رسد نتایج به دست آمده از این روش می‌تواند رهیافت مناسبی برای ارزیابی اهمیت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده و یک مفهوم باشد (عطائی، ۱۳۹۵).

۳-۸- تعیین عدد ریسک

برای ارزیابی نهایی ریسک بعد از تعیین رتبه احتمال و شدت پیامد رویدادهای نهایی به وجود آورنده ریسک، لازم است که عدد ریسک هر یک از آن‌ها محاسبه شود و در ماتریس ریسک قرار داده شود که از طریق ضرب دو فاکتور فوق، در ماتریس ریسک نشان داده می‌شود. طبق قرارداد، احتمال روی محور Y و شدت پیامد روی محور X قرار می‌گیرد (Seccatore et al, 2012). در شکل ۳-۶ ماتریس ریسک 5×5 نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: ماتریس امتیازدهی ریسک (Hyun et al, 2015)

با توجه به شکل بالا ماتریس ریسک ۵×۵، دارای ۵ سطح احتمال رخداد و ۵ سطح شدت پیامد است که ۴ منطقه مختلف ریسک نیز برای آن تعریف می‌شود یعنی محدوده با ریسک کم برای مقادیر کمتر از ۵ که با رنگ سبز، محدوده با ریسک الارپ^۱ برای مقادیر ۶-۹ با رنگ زرد، محدوده با ریسک بالا برای مقادیر ۱۰-۱۶ با رنگ نارنجی و محدوده با ریسک خیلی بالا برای مقادیر ۲۰-۲۵ با رنگ قرمز نشان داده می‌شود (Hyun et al, 2015).

۳-۹- جمع‌بندی

با توجه به محدودیت‌های مختلفی که پروژه‌ها در دسترسی به منابع گوناگون اعم از منابع مالی، انسانی و زمانی روبرو هستند، مدیران پروژه توان واکنش و پاسخ‌دهی به تمامی ریسک‌ها را به طور همزمان نخواهند داشت. لذا باید پیش از شروع و ضمن اجرای پروژه نسبت به شناسایی مهم‌ترین ریسک‌ها و حذف ریسک‌های کم‌اهمیت اقدام کرد. مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی به منظور پاسخ به موقع به ریسک‌های محتمل از بخش‌های مهم پروژه‌ها است. به همین منظور رتبه‌بندی ریسک از بخش‌های کلیدی مدیریت

۱ - محدوده با ریسک الارپ (alarp) محدوده‌ای است که زمان، زحمت، دشواری و هزینه اقدامات کاهش ریسک، با به کارگیری اقدامات بیشتر برای کاهش ریسک توجیه‌ناپذیر باشد.

ریسک پروژه محسوب می‌شود به این دلیل که می‌توان اولویت هر ریسک در میزان و زمان پاسخ را مشخص نماید.

در این فصل پس از بیان مطالبی در مورد ریسک و علل ایجاد کننده‌ی آن، مراحل مختلف مدیریت ریسک ذکر شد و روش تحلیل درخت خطا که یکی از روش‌های ارزیابی ریسک است مورد بررسی قرار گرفت. به خاطر عدم قطعیت در مورد رویداد بالایی، محاسبه احتمال رویدادها با مشکل مواجه است، بنابراین با ترکیب درخت خطای فازی و نظر متخصصان ابهام در مورد احتمال رویدادهای اساسی کاهش پیدا خواهد کرد. در این راستا روش تحلیل درخت خطای فازی توضیح داده شد. سپس خلاصه‌ای از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره بیان شد و از این بین با توجه به اقتضای تحقیق روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی مورد بررسی بیشتری قرار گرفت. در فصل بعد ابتدا با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی احتمال رویدادها محاسبه خواهد شد و به منظور تعیین شدت پیامد رویدادها از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی استفاده می‌شود.

فصل ۴

ارزیابی ریسک انفجار تونل‌های

پیشروی مجموعه معدنی برناکی

۴-۱- مقدمه

به دلیل موضوعات متعدد موجود در ساخت تونل‌های معدنی که با روش چالزنی و انفجار احداث می‌شوند، لازم است که ریسک‌های موجود در مراحل مختلف اجرای این قبیل سازه‌ها مشخص شده و تصمیم‌گیران اصلی با تمرکز بر این مباحث، تمامی تلاش خود را در کنترل زمان و هزینه پروژه به کار گیرند.

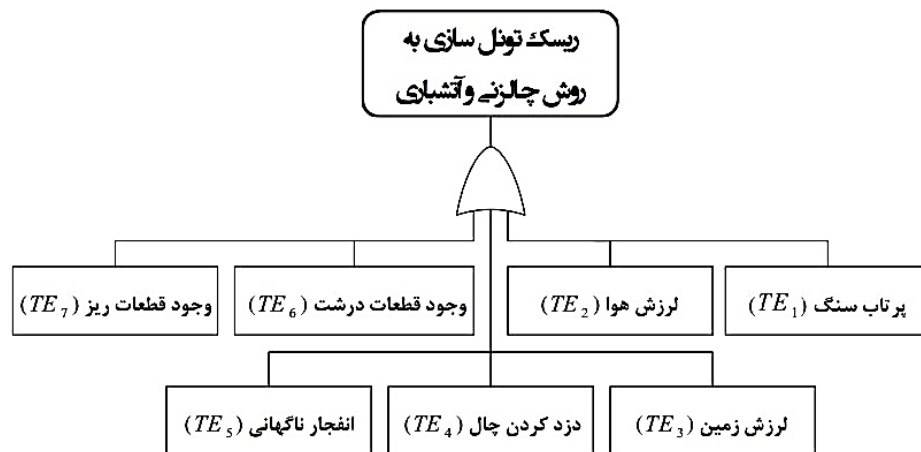
در این مطالعه بر اساس مطالعات پیشین و با بهره‌گیری از دیدگاه کارشناسان در گام اول تمامی سطوح ریسک و عوامل زمینه‌ساز خطر عملیات تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی شناسایی و با استفاده از ساختار تحلیل درخت خطای فازی مورد بررسی و تحلیل و تحلیل قرار می‌گیرد. در گام دوم احتمال هریک از رویدادها و همچنین با توجه به نوع درگاه‌های ارتباطی، احتمال رویدادهای میانی و نهایی محاسبه خواهد شد. در گام سوم شدت پیامد هر رویداد، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی محاسبه می‌شود تا از حاصل ضرب مقدار عددی احتمال و شدت پیامد، عدد و سطح ریسک رویدادهای نهایی حاصل شود تا بدین ترتیب بتوان پاسخ و راهکار مناسب را ارائه داد. در ادامه و در بخش‌های پیش رو مراحل ذکر شده فوق آورده شده است.

۴-۲- مراحل کار

۴-۲-۱- شناسایی و شناخت خطرات

به منظور شناسایی مخاطرات مربوط به تونل‌سازی با روش چالزنی و انفجار، از مطالعات پیشین در این زمینه و همچنین با استفاده از نظر کارشناسان بهره برده شده است. مهم‌ترین خطرات مشخص شده و علل وقوع آنها نیز شناسایی شد. این خطرات در درخت خطا به عنوان رویدادهای نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همگی عوامل ایجاد رویدادهای نهایی در قالب رویدادهای میانی و اساسی تقسیم بندی شد که در ادامه آورده شده است.

درخت خطای در این پژوهش شامل ۷ رویداد نهایی شامل پرتاب سنگ^۱ (TE_1)، لرزش هوا^۲ (TE_2)، لرزش زمین^۳ (TE_3) دزد کردن چال^۴ (TE_4)، انفجار ناگهانی (TE_5)، وجود قطعات درشت (TE_6)، وجود قطعات ریز (TE_7)، است که در شکل ۴-۱ آورده شده است. هریک از رویدادهای نهایی گفته شده به زیرگروه‌های مختلف شامل رویدادهای میانی و علل رخداد آنها یعنی رویداد اساسی، طبقه‌بندی می‌شوند که در جدول ۴-۱ رویدادهای نهایی، میانی و اساسی آورده شده‌اند.



شکل ۴-۱: درخت خطای ریسک تونل سازی به روش چالزنی و آتشباری در معدن برناکی

جدول ۴-۱: رویداد نهایی، میانی و اساسی در ریسک تونل سازی به روش چالزنی و انفجار

نوع رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
نهایی	پرتاب سنگ	TE_1
نهایی	لرزش هوا	TE_2
نهایی	لرزش زمین	TE_3
نهایی	دزد کردن چال	TE_4
نهایی	انفجار ناگهانی	TE_5
نهایی	وجود قطعات درشت	TE_6
نهایی	وجود قطعات بسیار ریز	TE_7
میانی	عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده	IE_1
میانی	خطای انسانی	$IE_{1,1}$

¹ Fly Rock

² Air Blast

³ Ground Vibration

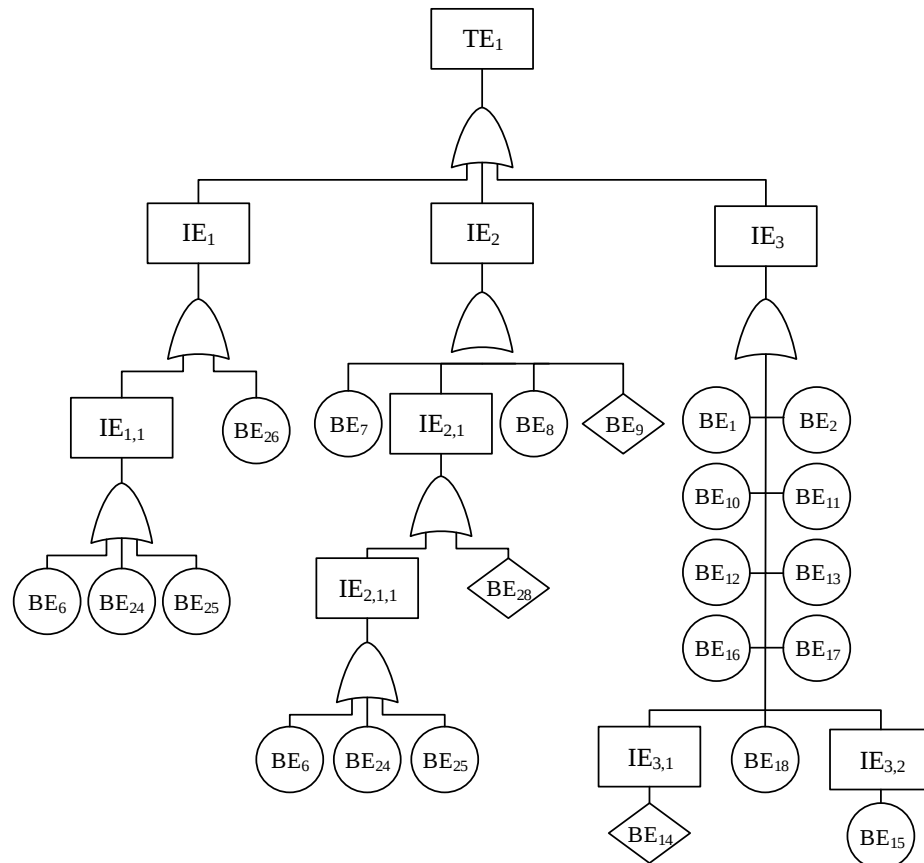
⁴ Misfire

نوع رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
میانی	خطای عملیاتی	IE ₂
میانی	عدم دقت در عملیات چالزنی	IE _{2,1}
میانی	خطای انسانی	IE _{2,1,1}
میانی	خطای طراحی	IE ₃
میانی	وجود حفره	IE _{3,1}
میانی	خرج قوی	IE _{3,2}
میانی	خطای طراحی (مربوط به TE ₃)	IE ₄
میانی	وجود حفره (مربوط به TE ₃)	IE _{4,1}
میانی	خرج ضعیف	IE _{4,2}
میانی	افت کیفیت ماده منفجره	IE ₅
میانی	عدم دقت در عملیات چالزنی (مربوط به TE ₄)	IE ₆
میانی	خطای انسانی (مربوط به TE ₄)	IE _{6,1}
میانی	وجود گرد زغال سنگ	IE ₇
میانی	اختلال در شبکه تهویه	IE _{7,1}
میانی	استفاده از مواد دارای الکتریسیته ساکن و آتش‌زا	IE ₈
میانی	خطای عملیاتی (مربوط به TE ₆)	IE ₉
میانی	عدم دقت در عملیات چالزنی (مربوط به TE ₆)	IE _{9,1}
میانی	خطای انسانی (مربوط به TE ₆)	IE _{9,1,1}
میانی	خطای طراحی (مربوط به TE ₆)	IE ₁₀
میانی	خرج ضعیف (مربوط به TE ₆)	IE _{10,1}
میانی	خطای طراحی (مربوط به TE ₇)	IE ₁₁
میانی	خرج قوی (مربوط به TE ₇)	IE _{11,1}
اساسی	ترتیب نامناسب انفجار	BE ₁
اساسی	زمان نامناسب تأخیر	BE ₂
اساسی	آسیب‌دیدگی در سیم رابط انفجار	BE ₃
اساسی	خرابی در دستگاه (سیستم) شروع انفجار	BE ₄
اساسی	اختلال در اتصالات مدار انفجار	BE ₅
اساسی	تجربه ناکافی	BE ₆
اساسی	کیفیت خرج‌گذاری	BE ₇
اساسی	عدم مهارت کافی آتشبار	BE ₈
اساسی	عدم وجود نظارت و بازرسی	BE ₉
اساسی	مقدار کم بارسنگ	BE ₁₀
اساسی	مقدار کم فاصله ردیفی	BE ₁₁
اساسی	قطر زیاد چال	BE ₁₂

نوع رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
اساسی	اضافه حفاری	BE ₁₃
اساسی	برآورد اشتباه از عوارض طبیعی	BE ₁₄
اساسی	انتخاب نادرست خرج	BE ₁₅
اساسی	کم بودن طول چال	BE ₁₆
اساسی	گل گذاری کم	BE ₁₇
اساسی	شیب نامناسب چال	BE ₁₈
اساسی	مقدار زیاد بارسنگ	BE ₁₉
اساسی	مقدار زیاد فاصله ردیفی	BE ₂₀
اساسی	قطر کم چال	BE ₂₁
اساسی	طول زیاد چال	BE ₂₂
اساسی	گل گذاری زیاد	BE ₂₃
اساسی	عدم دقت	BE ₂₄
اساسی	نبود دانش کافی	BE ₂₅
اساسی	غیرممکن بودن پیش بینی	BE ₂₆
اساسی	عدم وجود علائم آگاهی دهنده	BE ₂₇
اساسی	نقص فنی دستگاه	BE ₂₈
اساسی	عدم توجه به دستورالعمل ها	BE ₂₉
اساسی	طول مدت انبار کردن	BE ₃₀
اساسی	وجود رطوبت در انبار	BE ₃₁
اساسی	شرایط نگهداری ماده منفجره	BE ₃₂
اساسی	عدم تهویه مناسب	BE ₃₃
اساسی	اختلال در لوله های هوای فشرده	BE ₃₄
اساسی	از کار افتادن فن تهویه	BE ₃₅
اساسی	آسیب دیدگی در داکت ها و کانال های انتقال هوا	BE ₃₆

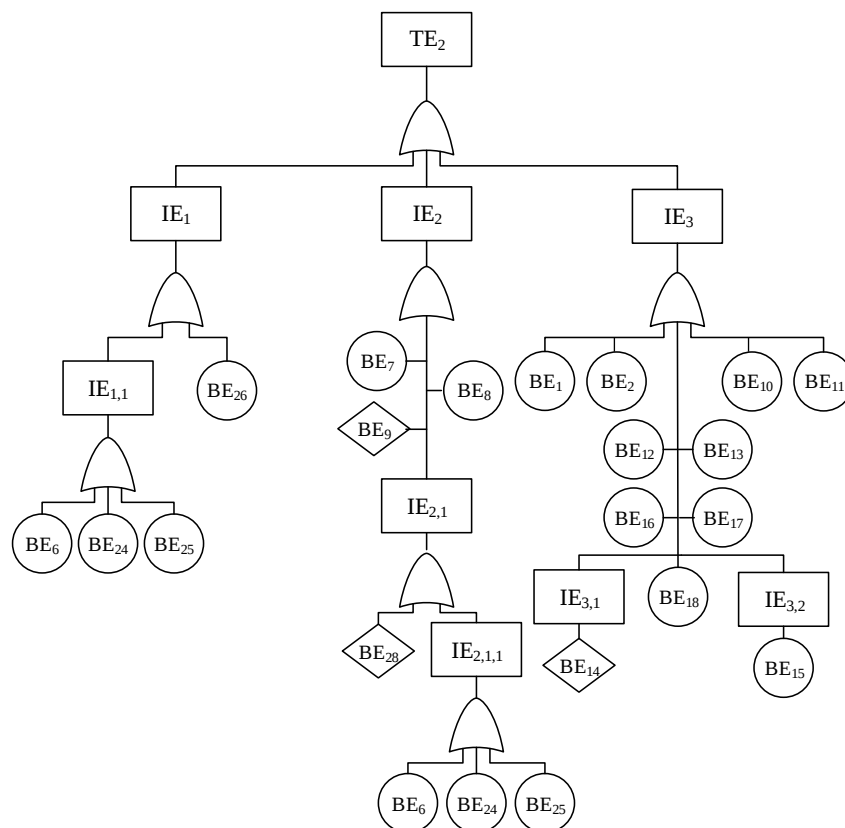
پرتاب سنگ (TE₁) یک سازوکار پیچیده و مشکل برای وقوع پرتاب سنگ در عملیات انفجار وجود دارد که اغلب پیش بینی آن کاری دشوار است که علت آن وجود عدم قطعیت هایی در ارتباط با تنوع ذاتی پدیده انفجار است که باعث پرتاب سنگ می شود (Zhou et al, 2012). در شکل ۴-۲ ساختار درخت خطای پرتاب سنگ آورده شده است.

در شکل ۲-۴ در سطح اول، رویدادهای میانی عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده (IE_1)، خطای عملیاتی (IE_2) و خطای طراحی (IE_3) است قرار دارند و در زیر سطح‌های بعدی علل به وجود آورنده‌ی رویدادهای بالا بررسی شده است.



شکل ۲-۴: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی پرتاب سنگ

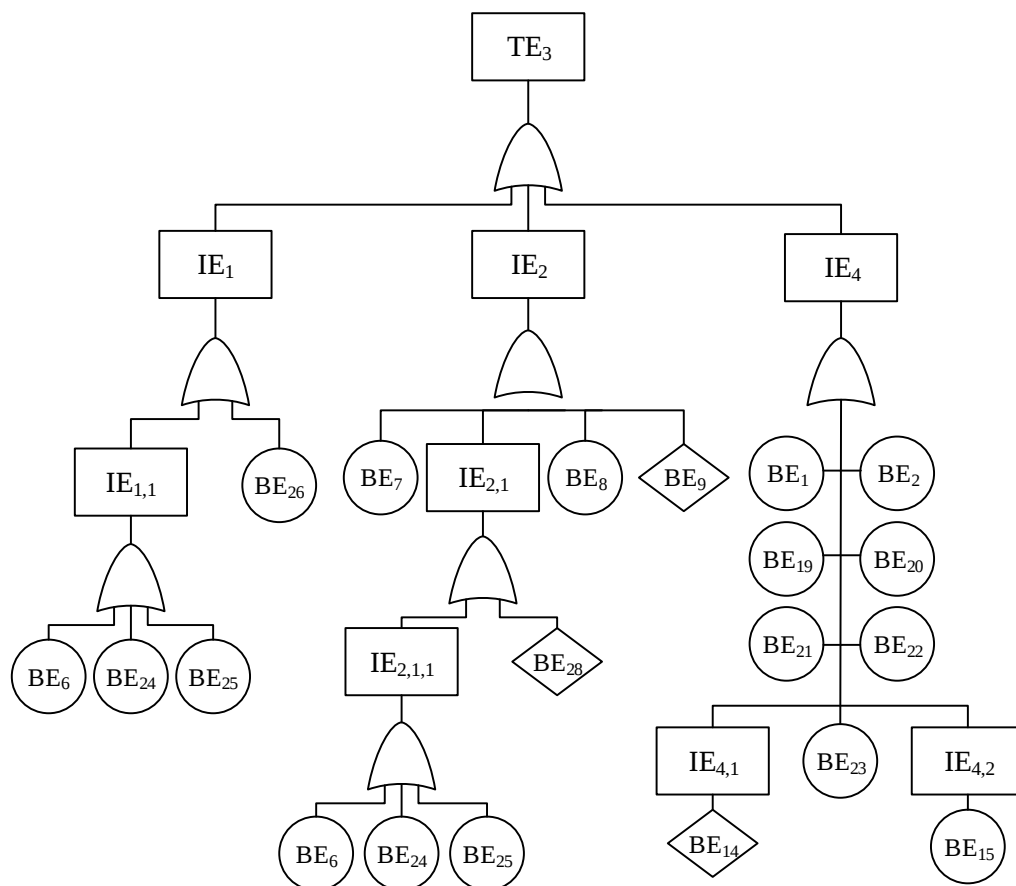
لرزش هوا (TE_2) تعبیری است که برای ارتعاشات هوا بر اثر عملیات آتشباری به کار برده می‌شود. وقوع این عامل در طی عملیات انفجار اجتناب‌ناپذیر است و در هر حالت رخ می‌دهد و تنها می‌توان با بررسی علل بوجود آورنده آن نسبت به کنترل و کاهش میزان آن اقدام کرد. در شکل ۳-۴ ساختار درخت خطای لرزش هوا نشان داده شده است.



شکل ۴-۳: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی لرزش هوا

لرزش زمین (TE_3) یکی از اثرات فرعی عملیات آتشکاری است. همراه با افزایش فعالیت‌های معدنی و عمرانی در سال‌های اخیر، لرزش زمین به یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی تبدیل شده و نیز منبع اصلی شکایات عمومی در ارتباط با تخریب سازه‌ها است (Dowding, 1992).

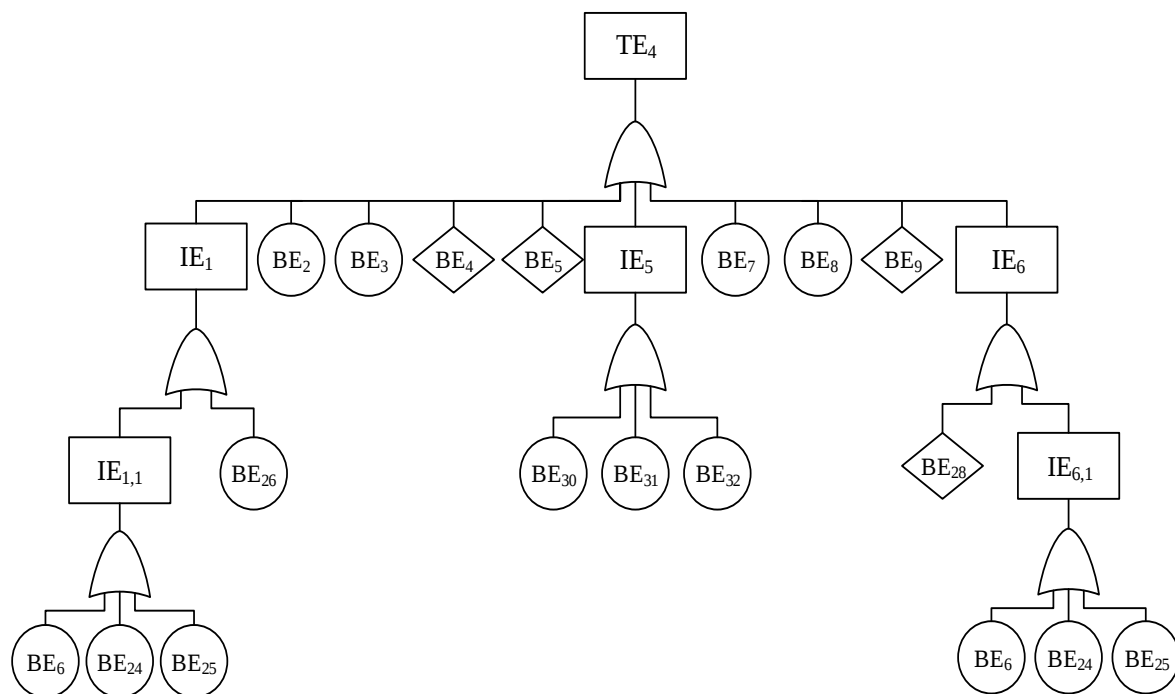
در سطح اول از عوامل تأثیرگذار در ایجاد پدیده لرزش زمین از سه رویداد میانی عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده (IE_1)، خطای عملیاتی (IE_2) و خطای طراحی (IE_4) می‌توان نام برد. سطوح پایین‌تر عوامل مؤثر در ایجاد هریک از رویدادهای میانی بالا که شامل رویدادهای میانی و اساسی است در درخت خطای مربوط به لرزش زمین در شکل ۴-۴ آورده شده است.



شکل ۴-۴: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی لرزش زمین

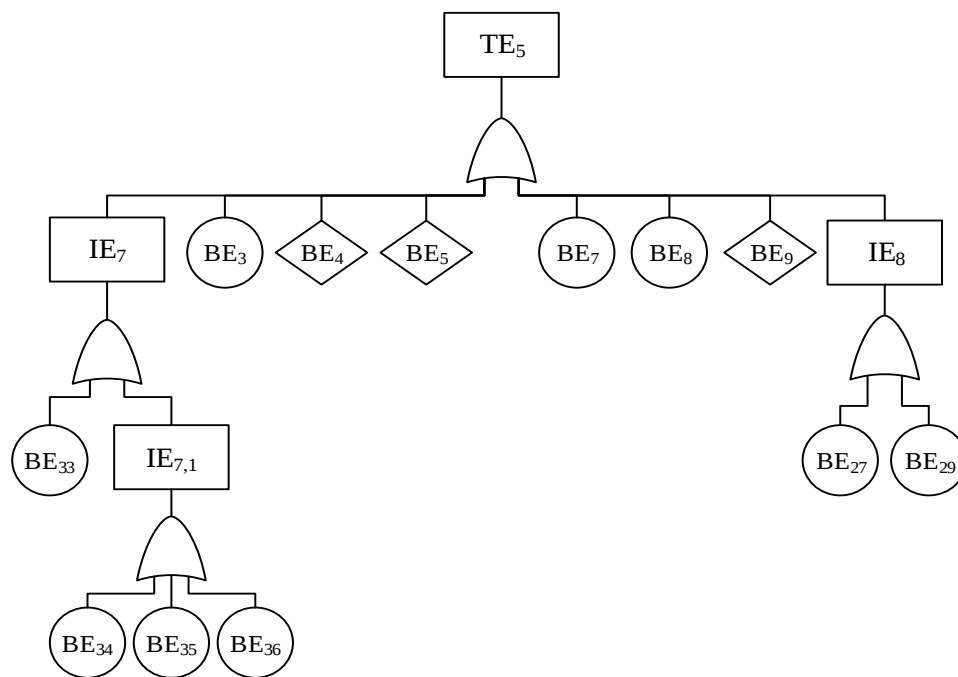
دزد کردن چال (TE4) یا فرآیند چال دزدی هم از منظر ایمنی و هم از منظر اقتصادی عملیات انفجار بسیار حائز توجه است. از وقوع این رویداد چنان انتظار می‌رود که تابع دو عامل اصلی است، یا ماده منفجره معیوب است و منفجر نمی‌شود و یا سیستم آغازی انفجار دچار مشکل است (Verakis, 2011).

علل ایجاد این رویداد در سطح اول شامل رویدادهای میانی عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده (IE1)، افت کیفیت ماده منفجره (IE5) و عدم دقت در عملیات چالزنی (IE6) و رویدادهای اساسی زمان نامناسب تأخیر (BE2)، آسیب‌دیدگی در سیم رابط انفجار (BE3)، خرابی در دستگاه شروع انفجار (BE4)، اختلال در اتصالات مدار انفجار (BE5)، کیفیت خرج‌گذاری (BE7)، عدم مهارت کافی آشکار (BE8)، عدم وجود نظارت و بازرسی (BE9) است. در شکل ۴-۵ درخت خطای مربوط به رویداد نهایی دزد کردن چال و علل به وجود آورنده‌ی آن در سطوح مختلف آورده شده است.



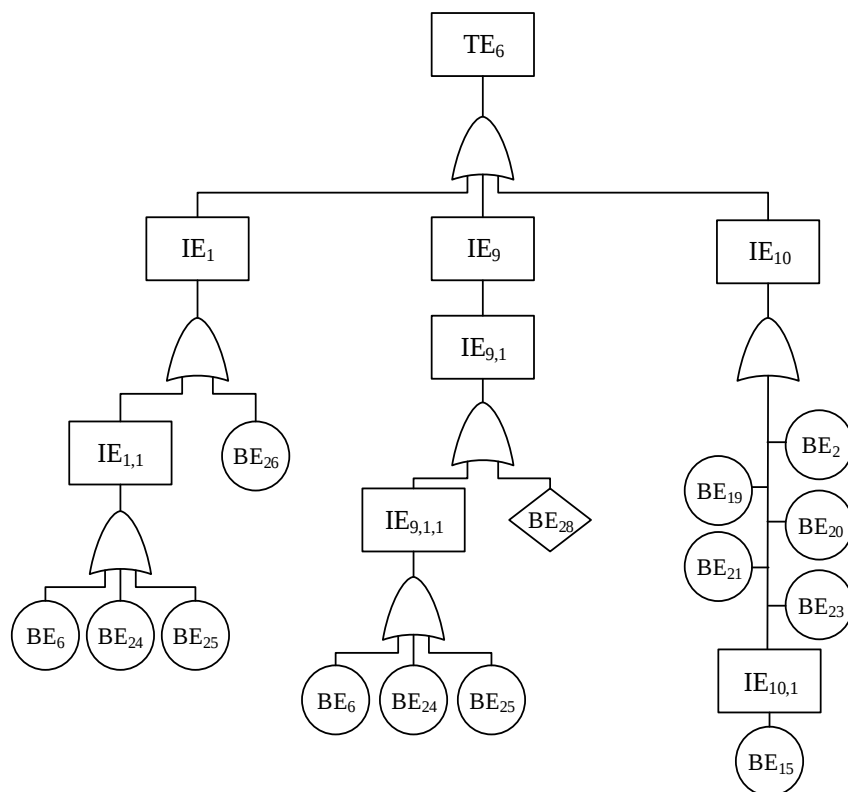
شکل ۴-۵: درخت خطای رویداد نهایی دزد کردن چال

انفجار ناگهانی (TE5) بالاخص در معادن زغال سنگ رخدادی است که می‌تواند باعث خسارت جانی و مالی جبران‌ناپذیری شود. این رویداد می‌تواند در سطح اول در اثر وجود گرد زغال سنگ (IE7)، استفاده از مواد دارای الکتریسیته ساکن و آتش‌زا (IE8) به عنوان رویدادهای میانی و آسیب‌دیدگی در سیم رابط انفجار (BE3)، خرابی در دستگاه شروع انفجار (BE4)، اختلال در اتصالات مدار انفجار (BE5)، کیفیت خرج‌گذاری (BE7)، عدم مهارت کافی آشکار (BE8)، عدم وجود نظارت و بازرسی (BE9) به عنوان رویدادهای اساسی، ایجاد شود. در شکل ۴-۶ درخت خطای مربوط به انفجار ناگهانی آورده شده است.



شکل ۴-۶: درخت خطای مربوط به رویداد نهایی انفجار ناگهانی

وجود قطعات درشت (TE6) که نیازمند انفجار ثانویه است باعث ایجاد مخاطراتی از جمله انفجار در معادن زغال سنگ به دلیل وجود گرد زغال سنگ موجود در فضای تونل و گسترده‌گی آتش انفجار به دلیل وجود گاز متان و ذرات معلق زغال سنگ در هوا می‌شود. وضعیت خردشدگی مهم‌ترین پارامتر خروجی عملیات انفجار است. خردشدگی خوب و مناسب در معدن عبارت است از تولید قطعات خردشده‌ای که به راحتی بزرگ‌ترین اندازه‌ی آن بارگیری شود و نیازی به انفجار ثانویه نداشته باشد. در سطح اول علل به وجود آمدن قطعات درشت رویدادهای میانی عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده، خطای عملیاتی، خطای طراحی دخیل هستند. شکل ۴-۷ درخت خطای مربوط به وجود قطعات درشت و سطوح مختلف رخداد آن را نشان می‌دهد.

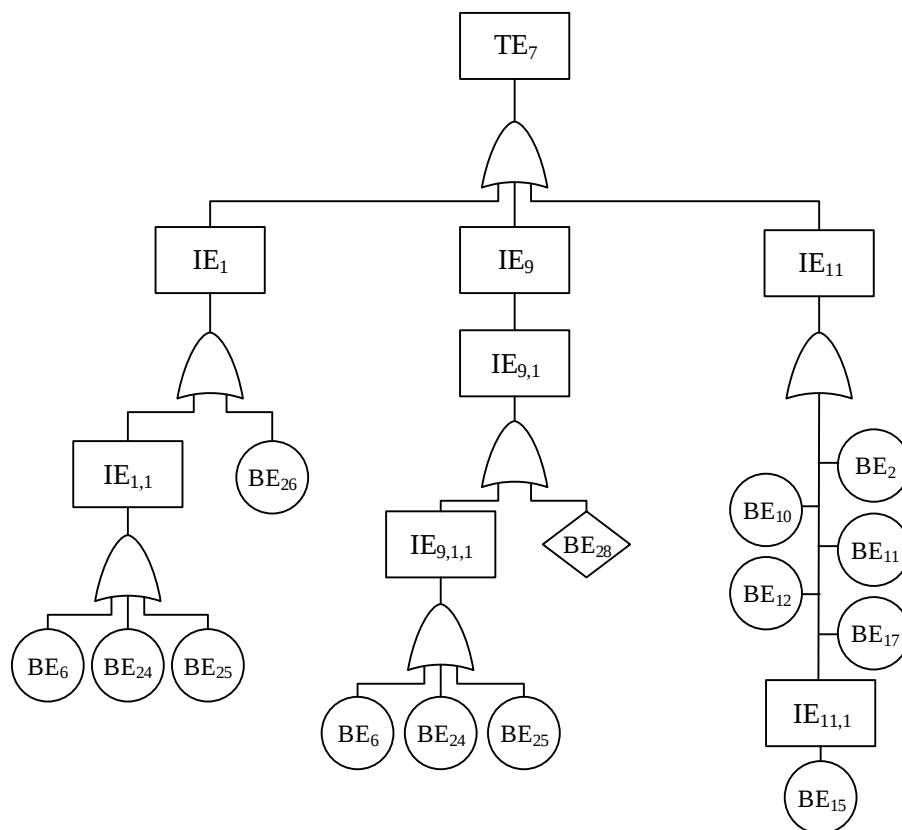


شکل ۴-۷: درخت خطای مربوط به وجود قطعات درشت

وجود قطعات بسیار ریز (TE7): در سطح اول علل به وجود آمدن قطعات بسیار ریز رویدادهای میانی

عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده (IE1)، خطای عملیاتی (IE9)، خطای طراحی (IE11)، تأثیرگذار است. شکل

۴-۸ درخت خطای TE7 را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: درخت خطای مربوط به وجود قطعات بسیار ریز

۴-۲-۲- تعیین احتمال رویدادها

اغلب به خاطر ناکافی بودن اطلاعات لازم، ارزیابی دقیق میزان شکست یا احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته سخت است. با توجه به این که در این پژوهش از روش تحلیل درخت خطا استفاده شده است به علت عدم دقت در اطلاعات رویداد اساسی، نتیجه کلی نیز دارای عدم قطعیت است. برای برطرف کردن این مساله، منطق فازی را می توان با روش تحلیل درخت خطا استفاده کرد. همچنین با توجه به کمبود اطلاعات برای تعیین نرخ شکست اجزاء سیستم می بایستی میزان نرخ شکست به صورت غیر قطعی برآورد شود که برای افزایش دقت و رفع عدم قطعیت از منطق فازی استفاده شده است. در ادامه مراحل تعیین احتمال رویدادها آورده شده است:

مرحله ۱: انتخاب و تعیین وزن متخصصان

در این مرحله از نظر کارشناسان و متخصصانی استفاده شده است که علاوه بر این که بایستی شناخت کامل از حوادث مربوط به تونل سازی به روش چالزنی و انفجار داشته باشند، با روش تحلیل درخت فازی نیز آشنا باشند تا نتیجه حاصل دقیق و مورد صحت باشد. در این تحقیق از نظرات ۱۱ متخصص که شامل مدیران و مهندسان مشغول در شرکت زغال سنگ البرز شرقی بودند استفاده شده است. قابل ذکر است این متخصصان اهمیت وزنی یکسانی ندارند. امتیاز و اهمیت هر یک از این کارشناسان از مطالعه‌ای که تاجی و محزون برای وزارت نیرو در سال ۱۳۸۱ انجام داده‌اند، برداشت شده است (تاجی و محزون، ۱۳۸۱). نحوه‌ی امتیازدهی به متخصصان در جدول ۲-۴ آورده شده است.

جدول ۲-۴: جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان (تاجی و محزون، ۱۳۸۱)

پارامتر	طبقه‌بندی	امتیاز
سمت	سر آشبار (کارشناس انفجار)	۱/۹
	سرپرست عملیات انفجار	۱/۸
	پیمانکار حفاری و انفجار	۱/۷
	کارشناس طراحی انفجار	۱/۶
	سرپرست کارگاه	۱/۵
	ناظر استخراج	۱/۴
	مسئول معدن	۱/۳
	ناظر زمین‌شناسی	۱/۲
	اپراتور	۱/۱
میزان سابقه کاری (سال)	۲۱-۲۵	۱/۱ ^۴
	۱۶-۲۰	۱/۱ ^۳
	۱۱-۱۵	۱/۱ ^۲
	۵-۱۰	۱/۱
مدرك تحصیلی	دکتری	۱/۲
	کارشناسی ارشد	۱/۱
	کارشناسی	۱
	دیپلم	۰/۹
	زیر دیپلم	۰/۸

بعد از مشخص شدن معیارهای ارزیابی کارشناسان در مرحله قبل، وزن آنها تعیین می‌شود. نمره وزن نهایی هر کارشناس از تقسیم مجموع نمرات کسب شده توسط وی بر مجموع نمرات کسب شده توسط کلیه کارشناسان شرکت‌کننده در مطالعه به دست آمده است (Renjith et al., 2010; Lavasani et al., 2015). امتیاز وزنی هر کارشناس بر اساس معیارهای تعیین شده، در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴: مشخصات و امتیازات وزنی کارشناسان

شماره	عنوان	تجربه (سال)	تحصیلات	شاخص وزنی	امتیاز وزنی متخصص
۱	مسئول معدن	۱۷	دکتری	۳/۸۳۱	۰/۰۹۴۴
۲	مسئول معدن	۲۵	کارشناس	۳/۷۶۴۱	۰/۰۹۲۷
۳	مسئول معدن	۲۴	کارشناس	۳/۷۶۴۱	۰/۰۹۲۷
۴	ناظر استخراج	۹	کارشناس ارشد	۳/۶	۰/۰۸۸۷
۵	مسئول معدن	۲۴	کارشناس ارشد	۳/۸۶۴۱	۰/۰۹۵۲
۶	سرپرست کارگاه	۸	کارشناس	۳/۶	۰/۰۸۸۴
۷	مسئول معدن	۱۳	کارشناس	۳/۵۱	۰/۰۸۶۵
۸	مسئول معدن	۱۳	کارشناس ارشد	۳/۶۱	۰/۰۸۹۰
۹	ناظر استخراج	۱۰	کارشناس ارشد	۳/۶	۰/۰۸۸۷
۱۰	مسئول معدن	۱۶	کارشناس ارشد	۳/۷۳۱	۰/۰۹۱۹
۱۱	ناظر استخراج	۱۴	کارشناس ارشد	۳/۷۱	۰/۰۹۱۴

مرحله ۲: کمی‌سازی نظر کارشناسان

در این گام از تحقیق، برای کمی‌سازی نظر کارشناسان انتخابی در مورد رویدادهای اساسی، از متغیرهای زبانی استفاده شده است. این متغیرهای زبانی شامل خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) هستند. در جدول ۴-۴ نمونه‌ای از پرسشنامه ارسال شده برای دریافت نظرات کارشناسان که در پیوست الف آورده شده است، نشان داده شده است.

برای فازی‌سازی و تبدیل نظرات کارشناسان از حالت کیفی به کمی از اعداد دوزنقه‌ای که در شکل ۳-۴ دامنه‌ی فازی ترم‌های زبانی آن آورده شده و همچنین رابطه‌های ۳-۶ تا ۳-۱۰ تابع عضویت دوزنقه‌ای، استفاده شده است. در جدول ۴-۵ وزن متغیرهای زبانی کارشناسان که معادل توابع عضویت دوزنقه‌ای است، آمده است. همچنین نتایج نظرسنجی از متخصصان در مورد هر رویداد اساسی در جدول ۴-۶ آمده است.

جدول ۴-۴: نمونه‌ای از پرسشنامه ارسالی به کارشناسان (پارامترهای مؤثر در اختلال در شبکه تهویه)

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
اختلال در لوله‌های هوای فشرده					
از کار افتادن فن					
آسیب دیدگی در داکت‌های انتقال هوا					

جدول ۴-۵: وزن متغیرهای زبانی در کمی کردن نظر کارشناسان (Lavasani et al., 2015)

وزن ترم‌های زبانی	ترم‌های زبانی
۰/۲	خیلی کم (VL)
۰/۴	کم (L)
۰/۷	متوسط (M)
۰/۹	زیاد (H)
۱	خیلی زیاد (VH)

جدول ۴-۶: نظرات کارشناسان در مورد هر رویداد اساسی

رویداد اساسی	شماره کارشناس										
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
BE ₁	H	H	H	VH	VH	H	VH	M	VH	VH	VH
BE ₂	VH	H	H	VH	VH	H	H	M	VH	VH	VH
BE ₃	VH	H	VH	VH	VH	L	VH	VH	H	H	VH
BE ₄	H	H	L	H	VH	M	H	H	VH	H	H
BE ₅	H	H	VH	H	VH	M	VH	VH	VH	M	VH
BE ₆	H	H	VH	VH	VH	VH	H	H	VH	VH	H
BE ₇	H	M	H	M	M	M	M	VH	VH	L	M
BE ₈	M	M	M	H	VH	M	H	VH	VH	H	VH
BE ₉	M	M	M	H	H	M	L	H	H	H	H
BE ₁₀	H	M	H	VH	VH	H	VH	H	H	H	M
BE ₁₁	H	M	M	H	VH	H	VH	VH	VH	M	M
BE ₁₂	M	M	H	M	VH	L	H	H	VH	H	H
BE ₁₃	M	H	M	M	VH	L	M	H	H	L	H
BE ₁₄	M	M	M	M	H	M	M	M	M	L	H
BE ₁₅	H	H	VH	M	VH	VL	H	H	H	H	VH
BE ₁₆	M	M	H	M	VH	M	VH	L	H	VH	H
BE ₁₇	M	H	H	M	VH	H	VH	M	VH	VH	H
BE ₁₈	M	M	H	M	H	H	H	H	H	VH	H
BE ₁₉	H	M	M	M	VH	H	H	M	H	H	H
BE ₂₀	M	M	M	H	VH	H	H	L	VH	H	VH
BE ₂₁	M	M	L	M	H	L	H	M	M	L	M
BE ₂₂	H	H	L	M	VH	L	VH	H	H	M	H
BE ₂₃	M	M	H	M	H	M	VH	L	H	M	VH
BE ₂₄	H	H	VH	VH	VH	VH	H	H	VH	VH	H
BE ₂₅	H	H	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	VH	H
BE ₂₆	M	L	H	H	H	L	L	VH	H	H	VH
BE ₂₇	H	M	H	H	VH	L	L	H	H	VH	H
BE ₂₈	M	L	M	H	M	L	H	M	M	L	H
BE ₂₉	H	VH	H	H	VH	H	H	VH	VH	H	VH
BE ₃₀	H	H	VH	L	VH	VH	H	VH	M	H	H
BE ₃₁	M	H	VH	VL	VH	VH	M	L	VH	VH	H
BE ₃₂	H	H	VH	H	VH	VH	M	H	VH	VH	VH
BE ₃₃	M	VH	VH	VH	VH	VH	H	VH	VH	VH	H
BE ₃₄	M	M	VH	H	H	H	L	H	VH	H	H
BE ₃₅	M	H	VH	VH	VH	VH	H	VH	VH	VH	VH
BE ₃₆	M	M	VH	VH	H	H	VH	H	VH	VH	M

مرحله ۳: اجماع نظر کارشناسان

در این مرحله برای جمع‌بندی و اجماع نظر کارشناسان طبق رابطه ۳-۱۱ امتیاز وزنی هر کارشناس در وزن ترم‌های زبانی او ضرب می‌شود که عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در مورد هر رویداد اساسی در جدول ۴-۷ آورده شده است.

جدول ۴-۷: اعداد فازی اجماع نظر کارشناسان برای هر رویداد اساسی

اعداد فازی اجماع نظر کارشناسان				رویداد	اعداد فازی اجماع نظر کارشناسان				رویداد
m ₁	m ₂	m ₃	m ₄		m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	
۰/۵۹۸	۰/۷۴۴	۰/۷۷۱	۰/۸۹	BE ₁₀	۰/۶۸۳	۰/۸۱	۰/۸۶۵	۰/۹۳۷	BE ₁
۰/۵۶۲	۰/۷۱۲	۰/۷۴۹	۰/۸۶۳	BE ₁₁	۰/۶۸۳	۰/۸۱	۰/۸۶۴	۰/۹۳۷	BE ₂
۰/۵۱	۰/۶۶۴	۰/۶۸۲	۰/۸۱۹	BE ₁₂	۰/۶۸۲	۰/۸۰۱	۰/۸۶۴	۰/۹۱۹	BE ₃
۰/۴۱۷	۰/۵۸۱	۰/۵۹	۰/۷۴۵	BE ₁₃	۰/۵۶۵	۰/۷۱	۰/۷۲۸	۰/۸۵۶	BE ₄
۰/۳۳۶	۰/۵۲۲	۰/۵۲۲	۰/۷۰۸	BE ₁₄	۰/۶۵۵	۰/۷۸۷	۰/۸۴۱	۰/۹۱۸	BE ₅
۰/۵۷۴	۰/۷۰۲	۰/۷۳۷	۰/۸۴۷	BE ₁₅	۰/۷۰۸	۰/۸۳۱	۰/۸۸۵	۰/۹۵۴	BE ₆
۰/۵۰۲	۰/۶۵۶	۰/۶۸۴	۰/۸۱۱	BE ₁₆	۰/۴۲۶	۰/۵۹۴	۰/۶۱۳	۰/۷۶۳	BE ₇
۰/۵۹۳	۰/۷۳۸	۰/۷۷۴	۰/۸۸۳	BE ₁₇	۰/۵۶۴	۰/۷۱۴	۰/۷۵	۰/۸۶۴	BE ₈
۰/۵۳۷	۰/۶۹۶	۰/۷۰۵	۰/۸۵۵	BE ₁₈	۰/۴۴۴	۰/۶۱۲	۰/۶۱۲	۰/۷۸	BE ₉
۰/۳۲۹	۰/۵۰۱	۰/۵۰۱	۰/۶۷۴	BE ₂₈	۰/۵۱	۰/۶۷۳	۰/۶۸۲	۰/۸۳۷	BE ₁₉
۰/۶۹۱	۰/۸۱۸	۰/۸۶۳	۰/۹۴۵	BE ₂₉	۰/۵۲۹	۰/۶۷۹	۰/۷۰۶	۰/۸۲۹	BE ₂₀
۰/۵۹۸	۰/۷۳۵	۰/۷۷	۰/۸۷۲	BE ₃₀	۰/۳	۰/۴۷۸	۰/۴۷۸	۰/۶۵۵	BE ₂₁
۰/۵۳۶	۰/۶۶	۰/۷۱۳	۰/۸۰۱	BE ₃₁	۰/۴۹۳	۰/۶۴۳	۰/۶۶۱	۰/۷۹۳	BE ₂₂
۰/۶۸	۰/۸۰۸	۰/۸۶۲	۰/۹۳۵	BE ₃₂	۰/۴۵۷	۰/۶۲۱	۰/۶۴	۰/۷۸۴	BE ₂₃
۰/۷۱۶	۰/۸۳۵	۰/۹۰۷	۰/۹۵۴	BE ₃₃	۰/۷۰۸	۰/۸۳۱	۰/۸۸۵	۰/۹۵۴	BE ₂₄
۰/۵۳۴	۰/۶۸۴	۰/۷۰۲	۰/۸۳۴	BE ₃₄	۰/۷۴۴	۰/۸۵۸	۰/۹۳	۰/۹۷۲	BE ₂₅
۰/۷۱۷	۰/۸۳۵	۰/۹۰۷	۰/۹۵۴	BE ₃₅	۰/۴۷۱	۰/۶۱۷	۰/۶۳۵	۰/۷۶۲	BE ₂₆
۰/۶۰۸	۰/۷۴۹	۰/۷۹۵	۰/۸۹	BE ₃₆	۰/۵۱۶	۰/۶۶۲	۰/۶۸	۰/۸۰۸	BE ₂₇

مرحله ۴: غیر فازی‌سازی

با استفاده از رابطه ۳-۱۴ نتایج حاصل از غیر فازی کردن نظرات کارشناسان برای هر رویداد اساسی در جدول ۴-۸ آورده شده است.

جدول ۴-۸: نتایج حاصل از غیر فازی کردن اعداد فازی هر یک از رویدادهای اساسی

رویداد	FPS	رویداد	FPS	رویداد	FPS
BE ₁	۰/۸۲۱	BE ₁₃	۰/۵۸۳	BE ₂₅	۰/۸۷۳
BE ₂	۰/۸۲	BE ₁₄	۰/۵۲۲	BE ₂₆	۰/۶۲
BE ₃	۰/۸۱۳	BE ₁₅	۰/۷۱۴	BE ₂₇	۰/۶۶۵
BE ₄	۰/۷۱۳	BE ₁₆	۰/۶۶۱	BE ₂₈	۰/۵۰۱
BE ₅	۰/۷۹۷	BE ₁₇	۰/۷۴۵	BE ₂₉	۰/۸۲۷
BE ₆	۰/۸۴۱	BE ₁₈	۰/۶۹۷	BE ₃₀	۰/۷۴۲
BE ₇	۰/۵۹۸	BE ₁₉	۰/۶۷۵	BE ₃₁	۰/۶۷۵
BE ₈	۰/۷۲۱	BE ₂₀	۰/۶۸۴	BE ₃₂	۰/۸۱۸
BE ₉	۰/۶۱۲	BE ₂₁	۰/۴۷۸	BE ₃₃	۰/۸۵
BE ₁₀	۰/۷۴۹	BE ₂₂	۰/۶۴۶	BE ₃₄	۰/۶۸۷
BE ₁₁	۰/۷۱۹	BE ₂₃	۰/۶۲۴	BE ₃₅	۰/۸۵
BE ₁₂	۰/۶۶۸	BE ₂₄	۰/۸۴۱	BE ₃₆	۰/۷۵۸

مرحله ۵: استفاده از تبدیل فرمول امکان به احتمال

نتایج حاصل از غیر فازی سازی، به صورت امکانی است اما در درخت خطا بر اساس احتمال رویدادها محاسبات مربوطه انجام می شوند، که به همین خاطر باید اعداد به دست آمده از مرحله قبل، از حالت امکانی به احتمالی تبدیل شوند. برای تبدیل امکان به احتمال از رابطه ۳-۱۵ استفاده شده است که نتایج تبدیل در جدول ۴-۹ درج شده است.

جدول ۴-۹: نرخ احتمال به دست آمده برای هر رویداد اساسی

رویداد	FP	رویداد	FP	رویداد	FP
BE ₁	۰/۰۴۱	BE ₁₃	۰/۰۰۹	BE ₂₅	۰/۰۶۲
BE ₂	۰/۰۴۱	BE ₁₄	۰/۰۰۶	BE ₂₆	۰/۰۱۱
BE ₃	۰/۰۳۹	BE ₁₅	۰/۰۲	BE ₂₇	۰/۰۱۵
BE ₄	۰/۰۲	BE ₁₆	۰/۰۱۴	BE ₂₈	۰/۰۰۵
BE ₅	۰/۰۳۵	BE ₁₇	۰/۰۲۴	BE ₂₉	۰/۰۴۳
BE ₆	۰/۰۴۸	BE ₁₈	۰/۰۱۸	BE ₃₀	۰/۰۲۴
BE ₇	۰/۰۱	BE ₁₉	۰/۰۱۶	BE ₃₁	۰/۰۱۶
BE ₈	۰/۰۲۱	BE ₂₀	۰/۰۱۷	BE ₃₂	۰/۰۴
BE ₉	۰/۰۱۱	BE ₂₁	۰/۰۰۴	BE ₃₃	۰/۰۵۱
BE ₁₀	۰/۰۲۵	BE ₂₂	۰/۰۱۳	BE ₃₄	۰/۰۱۷
BE ₁₁	۰/۰۲۱	BE ₂₃	۰/۰۱۱	BE ₃₅	۰/۰۵۱
BE ₁₂	۰/۰۱۵	BE ₂₄	۰/۰۴۸	BE ₃₆	۰/۰۲۷

مرحله ۶: تعیین احتمال رویدادهای نهایی و میانی

بعد از محاسبه احتمال هر کدام از رویدادهای اساسی، نرخ احتمال رویدادهای میانی (IE_i) و نهایی (TE_i) با استفاده از رابطه‌های ۳-۴ و ۳-۵ به دست آمد که در جدول ۴-۱۰ آورده شده است.

جدول ۴-۱۰: نرخ احتمال رویدادهای میانی و نهایی

رویداد	نوع رویداد	نرخ احتمال	رویداد	نوع رویداد	نرخ احتمال
TE ₁	نهایی	۰/۴۶۲	IE ₃	میانی	۰/۲۱۲
TE ₂	نهایی	۰/۴۶۲	IE ₄	میانی	۰/۱۵۸
TE ₃	نهایی	۰/۴۲۵	IE ₅	میانی	۰/۰۷۸
TE ₄	نهایی	۰/۴۵۱	IE ₆	میانی	۰/۱۵۴
TE ₅	نهایی	۰/۲۹۲	IE ₇	میانی	۰/۱۳۹
TE ₆	نهایی	۰/۳۶۳	IE ₈	میانی	۰/۰۵۷
TE ₇	نهایی	۰/۳۸۷	IE ₉	میانی	۰/۱۵۴
IE ₁	میانی	۰/۱۵۹	IE ₁₀	میانی	۰/۱۰۵
IE ₂	میانی	۰/۱۸۸	IE ₁₁	میانی	۰/۱۳۸

مرحله ۷: تعیین میزان اهمیت و رتبه‌بندی مجموعه‌های برشی

تا این قسمت از کار، احتمال رویدادهای میانی و نهایی به دست آمد، حال برای انجام کارهای نظارتی و احتیاطی لازم است رویدادهای میانی و اساسی رتبه‌بندی شوند تا بتوان بعد از تعیین ریسک‌های بحرانی، اقدامات لازم برای کنترل آن ارائه شود. بدین منظور با استفاده از فرمول ۳-۱۷ میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل مشخص و رتبه بندی شده که نتایج آن در جدول‌های ۴-۱۱ تا ۴-۲۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۱: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی پرتاب سنگ از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۱۳۴	نداشتن دانش کافی	BE ₂₅
۲	۰/۱۰۴	کمبود تجربه	BE ₆
۳	۰/۱۰۴	عدم دقت	BE ₂₄
۴	۰/۰۹	ترتیب انفجار	BE ₁
۵	۰/۰۹	زمان نامناسب تأخیر	BE ₂
۶	۰/۰۵۵	مقدار کم بارسنگ	BE ₁₀
۷	۰/۰۵۳	گل‌گذاری کم	BE ₁₇

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۸	۰/۰۴۶	عدم مهارت کافی آتشکار	BE ₈
۹	۰/۰۴۵	مقدار کم فاصله ردیفی	BE ₁₁
۱۰	۰/۰۴۴	انتخاب نادرست خرج	BE ₁₅
۱۱	۰/۰۳۹	شیب نامناسب چال	BE ₁₈
۱۲	۰/۰۳۲	قطر زیاد چال	BE ₁₂
۱۳	۰/۰۳۱	کم بودن طول چال	BE ₁₆
۱۴	۰/۰۲۴	غیر ممکن بودن پیش‌بینی	BE ₂₆
۱۵	۰/۰۲۳	عدم وجود نظارت و بازرسی	BE ₉
۱۶	۰/۰۲	کیفیت خرج‌گذاری	BE ₇
۱۷	۰/۰۱۹	اضافه حفاری	BE ₁₃
۱۸	۰/۰۱۳	برآورد اشتباه از عوارض طبیعی	BE ₁₄
۱۹	۰/۰۱	نقص فنی دستگاه	BE ₂₈

جدول ۴-۱۲: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی لرزش هوا از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۱۳۴	نداشتن دانش کافی	BE ₂₅
۲	۰/۱۰۴	کمبود تجربه	BE ₆
۳	۰/۱۰۴	عدم دقت	BE ₂₄
۴	۰/۰۹	ترتیب انفجار	BE ₁
۵	۰/۰۹	زمان نامناسب تأخیر	BE ₂
۶	۰/۰۵۵	مقدار کم بارسنگ	BE ₁₀
۷	۰/۰۵۳	گل‌گذاری کم	BE ₁₇
۸	۰/۰۴۶	عدم مهارت کافی آتشکار	BE ₈
۹	۰/۰۴۵	مقدار کم فاصله ردیفی	BE ₁₁
۱۰	۰/۰۴۴	انتخاب نادرست خرج	BE ₁₅
۱۱	۰/۰۳۹	شیب نامناسب چال	BE ₁₈
۱۲	۰/۰۳۲	قطر زیاد چال	BE ₁₂
۱۳	۰/۰۳۱	کم بودن طول چال	BE ₁₆
۱۴	۰/۰۲۴	غیر ممکن بودن پیش‌بینی	BE ₂₆
۱۵	۰/۰۲۳	عدم وجود نظارت و بازرسی	BE ₉
۱۶	۰/۰۲	کیفیت خرج‌گذاری	BE ₇
۱۷	۰/۰۱۹	اضافه حفاری	BE ₁₃
۱۸	۰/۰۱۳	برآورد اشتباه از عوارض طبیعی	BE ₁₄
۱۹	۰/۰۱	نقص فنی دستگاه	BE ₂₈

جدول ۴-۱۳: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی لرزش زمین از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۱۴۵	نداشتن دانش کافی	BE ₂₅
۲	۰/۱۱۳	کمبود تجربه	BE ₆
۳	۰/۱۱۳	عدم دقت	BE ₂₄
۴	۰/۰۹۷	ترتیب انفجار	BE ₁
۵	۰/۰۹۷	زمان نامناسب تأخیر	BE ₂
۶	۰/۰۴۹	عدم مهارت کافی آشکار	BE ₈
۷	۰/۰۴۷	انتخاب نادرست خرج	BE ₁₅
۸	۰/۰۳۹	مقدار زیاد فاصله ردیفی	BE ₂₀
۹	۰/۰۳۷	مقدار زیاد بارسنگ	BE ₁₉
۱۰	۰/۰۳	طول زیاد چال	BE ₂₂
۱۱	۰/۰۲۷	گل‌گذاری زیاد	BE ₂₃
۱۲	۰/۰۲۶	غیر ممکن بودن پیش‌بینی	BE ₂₆
۱۳	۰/۰۲۵	عدم وجود نظارت و بازرسی	BE ₉
۱۴	۰/۰۲۳	کیفیت خرج‌گذاری	BE ₇
۱۵	۰/۰۱۴	برآورد اشتباه از عوارض طبیعی	BE ₁₄
۱۶	۰/۰۱۲	نقص فنی دستگاه	BE ₂₈
۱۷	۰/۰۱	قطر کم چال	BE ₂₁

جدول ۴-۱۴: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی دزد کردن چال از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۱۳۷	نداشتن دانش کافی	BE ₂₅
۲	۰/۱۰۶	کمبود تجربه	BE ₆
۳	۰/۱۱۳	عدم دقت	BE ₂₄
۴	۰/۰۹۷	ترتیب انفجار	BE ₁
۵	۰/۰۹۷	زمان نامناسب تأخیر	BE ₂
۶	۰/۰۹	شرایط نگهداری ماده منفجره	BE ₃₂
۷	۰/۰۸۶	آسیب‌دیدگی در سیم رابط انفجار	BE ₃
۸	۰/۰۷۷	اختلال در اتصالات مدار انفجار	BE ₅
۹	۰/۰۵۳	طول مدت انبار کردن	BE ₃₀
۱۰	۰/۰۴۷	عدم مهارت کافی آشکار	BE ₈
۱۱	۰/۰۴۴	خرابی در دستگاه (سیستم) شروع انفجار	BE ₄
۱۲	۰/۰۳۵	وجود رطوبت در انبار	BE ₃₁
۱۳	۰/۰۲۵	غیر ممکن بودن پیش‌بینی	BE ₂₆

جدول ۴-۱۵: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی انفجار ناگهانی از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۱۷۶	از کار افتادن فن	BE ₃₅
۲	۰/۱۷۵	عدم تهویه مناسب	BE ₃₃
۳	۰/۱۴۷	عدم توجه به دستورالعمل‌ها	BE ₂₉
۴	۰/۱۳۴	آسیب‌دیدگی در سیم رابط انفجار	BE ₃
۵	۰/۱۱۹	اختلال در اتصالات مدار انفجار	BE ₅
۶	۰/۰۹۲	آسیب‌دیدگی در داکت‌های انتقال هوا	BE ₃₆
۷	۰/۰۷۲	عدم مهارت کافی آتشکار	BE ₈
۸	۰/۰۶۹	خرابی در دستگاه (سیستم) شروع انفجار	BE ₄
۹	۰/۰۵۸	اختلال در لوله‌های هوای فشرده	BE ₃₄
۱۰	۰/۰۵	عدم وجود علائم هشدار	BE ₂₇
۱۱	۰/۰۳۶	عدم وجود نظارت و بازرسی	BE ₉
۱۲	۰/۰۳۳	کیفیت خرج‌گذاری	BE ₇

جدول ۴-۱۶: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی وجود قطعات درشت از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۱۷	نداشتن دانش کافی	BE ₂₅
۲	۰/۱۳۲	کمبود تجربه	BE ₆
۳	۰/۱۳۲	عدم دقت	BE ₂₄
۴	۰/۱۱۳	زمان نامناسب تأخیر	BE ₂
۵	۰/۰۵۵	انتخاب نادرست خرج	BE ₁₅
۶	۰/۰۴۶	مقدار زیاد فاصله ردیفی	BE ₂₀
۷	۰/۰۴۳	مقدار زیاد بارسنگ	BE ₁₉
۸	۰/۰۳۱	گل‌گذاری زیاد	BE ₂₃
۹	۰/۰۳	غیر ممکن بودن پیش‌بینی	BE ₂₆
۱۰	۰/۰۱۴	نقص فنی دستگاه	BE ₂₈
۱۱	۰/۰۱۱	قطر کم چال	BE ₂₁

جدول ۴-۱۷: رتبه‌بندی رویدادهای اساسی مربوط به رویداد نهایی وجود قطعات بسیار ریز از لحاظ احتمال

وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۱۶	نداشتن دانش کافی	BE ₂₅
۲	۰/۱۲۴	کمبود تجربه	BE ₆
۳	۰/۱۲۴	عدم دقت	BE ₂₄
۴	۰/۱۰۶	زمان نامناسب تأخیر	BE ₂
۵	۰/۰۶۵	مقدار کم بارسنگ	BE ₁₀
۶	۰/۰۶۳	گل‌گذاری کم	BE ₁₇
۷	۰/۰۵۴	مقدار کم فاصله ردیفی	BE ₁₁
۸	۰/۰۵۲	انتخاب نادرست خرج	BE ₁₅
۹	۰/۰۴	قطر زیاد چال	BE ₁₂
۱۰	۰/۰۲۹	غیر ممکن بودن پیش‌بینی	BE ₂₆
۱۱	۰/۰۱۳	نقص فنی دستگاه	BE ₂₈

جدول ۴-۱۸: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به پرتاب سنگ از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۴۵۹	خطای طراحی	IE ₃
۲	۰/۴۰۷	خطای عملیاتی	IE ₂
۳	۰/۳۴۴	عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده	IE ₁

جدول ۴-۱۹: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به لرزش هوا از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۴۵۹	خطای طراحی	IE ₃
۲	۰/۴۰۷	خطای عملیاتی	IE ₂
۳	۰/۳۴۴	عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده	IE ₁

جدول ۴-۲۰: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به لرزش زمین از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۴۴۳	خطای عملیاتی	IE ₂
۲	۰/۳۷۴	عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده	IE ₁
۳	۰/۳۷۱	خطای طراحی	IE ₄

جدول ۴-۲۱: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به دزد کردن چال از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۳۵۲	عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده	IE ₁
۲	۰/۳۴۰	عدم دقت در عملیات چالزنی	IE ₆
۳	۰/۱۷۳	افت کیفیت ماده منفجره	IE ₅

جدول ۴-۲۲: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به انفجار ناگهانی از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۴۷۵	وجود گرد زغال	IE ₇
۲	۰/۱۹۶	استفاده از مواد دارای الکتریسیته ساکن و آتش‌زا	IE ₈

جدول ۴-۲۳: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به وجود قطعات درشت از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۴۳۸	عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده	IE ₁
۲	۰/۴۲۴	خطای عملیاتی	IE ₉
۳	۰/۲۸۹	خطای طراحی	IE ₁₀

جدول ۴-۲۴: رتبه‌بندی رویدادهای میانی مربوط به وجود قطعات بسیار ریز از لحاظ احتمال وقوع

رتبه	اهمیت رویداد	نام رویداد	نماد رویداد
۱	۰/۴۱۱	عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده	IE ₁
۲	۰/۳۹۸	خطای عملیاتی	IE ₉
۳	۰/۳۵۷	خطای طراحی	IE ₁₁

مرحله ۸: رتبه‌بندی رویدادهای نهایی

با توجه به محاسبات مراحل قبل، نرخ احتمال رویدادهای نهایی مؤثر در ریسک تونل‌سازی مجموعه معدنی برناکی که با استفاده از روش چالزنی و انفجار انجام می‌شود، به دست آمد. در این مرحله بایستی ۷ رویداد نهایی ریسک تونل‌سازی برای تشکیل ماتریس ریسک طبقه‌بندی شوند. برای طبقه‌بندی، میانگین و انحراف معیار احتمال ۷ رویداد نهایی محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن میانگین احتمالات برای سطح احتمال متوسط، می‌توان طبقه‌بندی‌ها را به دست آورد. برای این کار انحراف معیار را از میانگین کم و زیاد کرده تا

مرکز دسته، طبقه‌بندی قبل و بعد از سطح احتمال متوسط تعیین شود و همین روند نیز برای سایر دسته‌ها تکرار می‌شود. در ادامه نصف انحراف معیار از مرکز هر دسته کم و زیاد می‌شود تا حد پایین و بالای دسته بندی مشخص شود در نتیجه طبق جدول ۴-۲۵ رتبه‌بندی می‌شوند که نتایج آن در جدول ۴-۲۶ نشان آورده شده است.

جدول ۴-۲۵: رتبه‌بندی احتمال وقوع ریسک

رتبه	سطح احتمال	احتمال (درصد)
۵	بسیار محتمل	≥ 50
۴	محتمل	$43/75 - 50$
۳	ممکن	$37/43 - 43/75$
۲	نا محتمل	$31/11 - 37/43$
۱	بسیار نا محتمل	$\leq 31/11$

جدول ۴-۲۶: رتبه‌بندی احتمال وقوع رویدادهای نهایی ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار

رتبه	نرخ احتمال	نام رویداد	نماد رویداد
۴	۴۶/۱۹	پرتاب سنگ	TE ₁
۴	۴۶/۱۹	لرزش هوا	TE ₂
۳	۴۲/۴۹	لرزش زمین	TE ₃
۴	۴۵/۱۴	دزد کردن چال	TE ₄
۱	۲۹/۱۹	انفجار ناگهانی	TE ₅
۲	۳۶/۲۷	وجود قطعات درشت	TE ₆
۳	۳۸/۶۵	وجود قطعات بسیار ریز	TE ₇

۴-۲-۳- تعیین شدت پیامد

برای محاسبه شدت پیامد رویدادهای نهایی مؤثر در ریسک تونل‌سازی مجموعه معدنی برناکی که با استفاده از روش چالزنی و انفجار انجام می‌شود از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی استفاده شده است که شرح مراحل این روش در ادامه آمده است.

مرحله ۱: نظرسنجی از متخصصان

در این مرحله از متخصصان انتخاب شده خواسته شد تا نظر خود را در مورد شدت پیامد رویدادهای نهایی که در مقایسه با هم هستند و با توجه به جدول ۳-۱ و فرم شماره ۲ پیوست ب، اعلام کنند. در جدول ۴-۲۷ فرم شماره ۲ نشان داده شده است که این فرم نیز در پیوست ب آورده شده است. نتایج حاصل از نظرسنجی از کارشناسان در جداول ۴-۲۸ تا ۴-۳۸ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۷: ماتریس مقایسه زوجی بین معیارهای تصمیم‌گیری برای تعیین شدت پیامد

C ₁ : پرتاب سنگ				C ₂ : لرزش هوا				C ₃ : لرزش زمین				C ₄ : دزد کردن چال							
C ₅ : انفجار ناگهانی				C ₆ : وجود قطعات درشت				C ₇ : وجود قطعات بسیار ریز											
معیار i				ترجیح معیار i بر معیار z				شدت پیامد یکسان				ترجیح معیار z بر معیار i				معیار z			
C ₁	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₂	
C ₁	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₃	
C ₁	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₄	
C ₁	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₅	
C ₁	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₆	
C ₁	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₇	
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₃	
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₄	
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₅	
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₆	
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₇	
C ₃	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₄	
C ₃	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₅	
C ₃	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₆	
C ₃	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₇	
C ₄	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₅	
C ₄	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₆	
C ₄	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₇	
C ₅	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₅	
C ₅	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₆	
C ₅	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₇	
C ₆	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₆	

جدول ۴-۲۸: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۱

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۴	۳	۰/۱۶۷	۰/۳۳۳	۴	۲	۱	C ₁
۲	۱	۰/۱۴۳	۰/۳۳۳	۲	۱	۰/۵	C ₂
۱	۰/۵	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۱	۰/۵	۰/۲۵	C ₃
۵	۴	۰/۲	۱	۴	۳	۳	C ₄
۸	۶	۱	۵	۸	۷	۶	C ₅
۳	۱	۰/۱۶۷	۰/۲۵	۲	۱	۰/۳۳۳	C ₆
۱	۰/۳۳۳	۰/۱۲۵	۰/۲	۱	۰/۵	۰/۲۵	C ₇

جدول ۴-۲۹: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۲

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۵	۵	۰/۱۴۳	۰/۲	۵	۵	۱	C ₁
۳	۳	۰/۲	۰/۳۳۳	۰/۲	۱	۰/۲	C ₂
۵	۵	۰/۲	۰/۲	۱	۵	۰/۲	C ₃
۵	۵	۰/۲	۱	۵	۳	۵	C ₄
۵	۵	۱	۵	۵	۵	۷	C ₅
۳	۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۳۳۳	۰/۲	C ₆
۱	۰/۳۳۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۳۳۳	۰/۲	C ₇

جدول ۴-۳۰: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۳

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۲	۰/۵	۰/۳۳۳	۰/۲۵	۰/۳۳۳	۳	۱	C ₁
۱	۰/۵	۰/۳۳۳	۰/۲۵	۰/۳۳۳	۱	۰/۳۳۳	C ₂
۳	۱	۲	۰/۳۳۳	۱	۳	۳	C ₃
۳	۰/۵	۰/۳۳۳	۱	۳	۴	۴	C ₄
۳	۱	۱	۳	۰/۵	۳	۳	C ₅
۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲	C ₆
۱	۱	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۱	۰/۵	C ₇

جدول ۴-۳۱: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۴

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۶	۱	۱	۶	۵	۵	۱	C ₁
۴	۴	۰/۲	۱	۱	۱	۰/۲	C ₂
۴	۱	۰/۱۶۷	۳	۱	۱	۰/۲	C ₃
۳	۱	۰/۲۵	۱	۰/۳۳۳	۱	۰/۱۶۷	C ₄
۴	۴	۱	۴	۶	۵	۱	C ₅
۱	۱	۰/۲۵	۱	۱	۰/۲۵	۱	C ₆
۱	۱	۰/۲۵	۰/۳۳۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۶۷	C ₇

جدول ۴-۳۲: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۵

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۱	۰/۲	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۳	۳	۱	C ₁
۱	۰/۲	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۵	۱	۰/۳۳۳	C ₂
۳	۰/۳۳۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۲	۰/۳۳۳	C ₃
۹	۲	۰/۱۱۱	۱	۹	۹	۹	C ₄
۹	۹	۱	۹	۹	۹	۹	C ₅
۵	۱	۰/۱۱۱	۰/۵	۳	۵	۵	C ₆
۱	۰/۵	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۳۳۳	۱	۱	C ₇

جدول ۴-۳۳: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۶

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۵	۲	۱	۲	۳	۵	۱	C ₁
۳	۱	۰/۲	۰/۲	۰/۳۳۳	۱	۰/۲	C ₂
۴	۲	۱	۰/۳۳۳	۱	۳	۰/۳۳۳	C ₃
۵	۳	۱	۱	۳	۵	۰/۵	C ₄
۳	۵	۱	۱	۱	۵	۱	C ₅
۲	۱	۰/۲	۰/۳۳۳	۰/۵	۱	۰/۵	C ₆
۱	۰/۵	۰/۳۳۳	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳۳۳	۰/۲	C ₇

جدول ۴-۳۴: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۷

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۱	۰/۱۲۵	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۹	۸	۱	C ₁
۱	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۱	۰/۱۲۵	C ₂
۱	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۱	۰/۱۱۱	C ₃
۹	۸	۱	۱	۹	۹	۹	C ₄
۹	۸	۱	۱	۹	۹	۹	C ₅
۷	۱	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۷	۷	۸	C ₆
۱	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۱	۱	C ₇

جدول ۴-۳۵: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۸

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۸	۷	۰/۱۱۱	۰/۲	۵	۵	۱	C ₁
۶	۴	۰/۱۱۱	۰/۲۵	۰/۳۳۳	۱	۰/۲	C ₂
۷	۵	۰/۱۱۱	۰/۲۵	۱	۳	۰/۲	C ₃
۰/۱۴۳	۰/۱۶۷	۰/۱۱۱	۱	۴	۴	۵	C ₄
۹	۹	۱	۹	۹	۹	۹	C ₅
۳	۱	۰/۱۱۱	۶	۰/۲	۰/۲۵	۰/۱۴۳	C ₆
۱	۰/۳۳۳	۰/۱۱۱	۷	۰/۱۴۳	۰/۱۶۷	۰/۱۲۵	C ₇

جدول ۴-۳۶: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۹

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۴	۱	۲	۵	۱	۳	۱	C ₁
۴	۱	۱	۵	۱	۱	۰/۳۳۳	C ₂
۱	۰/۲۵	۲	۰/۳۳۳	۱	۱	۱	C ₃
۵	۰/۲۵	۴	۱	۳	۰/۲	۰/۲	C ₄
۶	۵	۱	۰/۲۵	۰/۵	۱	۰/۵	C ₅
۴	۱	۰/۲	۴	۴	۱	۱	C ₆
۱	۰/۲۵	۰/۱۶۷	۰/۲	۱	۰/۲۵	۰/۲۵	C ₇

جدول ۴-۳۷: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۱۰

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۳	۴	۰/۲	۰/۲	۳	۲	۱	C ₁
۳	۰/۲۵	۰/۱۶۷	۰/۲	۰/۵	۱	۰/۵	C ₂
۲	۲	۰/۲۵	۰/۱۶۷	۱	۲	۰/۳۳۳	C ₃
۴	۴	۱	۱	۶	۵	۵	C ₄
۶	۶	۱	۱	۴	۶	۵	C ₅
۳	۱	۰/۱۶۷	۰/۲۵	۰/۵	۴	۰/۲۵	C ₆
۱	۰/۳۳۳	۰/۱۶۷	۰/۲۵	۰/۵	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	C ₇

جدول ۴-۳۸: ماتریس مقایسه زوجی رویدادهای نهایی از نظر متخصص شماره ۱۱

C ₇	C ₆	C ₅	C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	
۶	۲	۰/۱۱۱	۸	۷	۴	۱	C ₁
۲	۰/۵	۰/۱۱۱	۲	۲	۱	۰/۲۵	C ₂
۲	۰/۵	۰/۱۱۱	۳	۱	۰/۵	۰/۱۴۳	C ₃
۲	۰/۵	۰/۱۱۱	۱	۰/۳۳۳	۰/۵	۰/۱۲۵	C ₄
۹	۹	۱	۹	۹	۹	۹	C ₅
۲	۱	۰/۱۱۱	۲	۲	۲	۰/۵	C ₆
۱	۰/۵	۰/۱۱۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۱۶۷	C ₇

مرحله ۲: محاسبه اعداد فازی

در این مرحله با توجه به نظرات کارشناسان و استفاده از روابط ۳-۱۸ تا ۳-۲۱ اعداد فازی محاسبه شده تا برای ماتریس زوجی جامع نظرات کارشناسان استفاده شود.

مرحله ۳: تشکیل ماتریس معکوس فازی

ماتریس مقایسه زوجی جامع نظرات کارشناسان که درایه‌های آن شامل سه مؤلفه حداکثر، میانگین و حداقل اعداد نظرسنجی‌ها است تشکیل می‌شود. این ماتریس بر اساس اعداد فازی که در مرحله قبل محاسبه شد و اطلاعات به دست آمده از نظرات کارشناسان، می‌باشد. جدول ۴-۳۹ این ماتریس را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳۹: ماتریس مقایسه زوجی جامع نظرات کارشناسان

	C ₁			C ₂			C ₃			C ₄			C ₅			C ₆			C ₇		
	α_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}	α_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}	α_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}	α_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}	α_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}	α_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}	α_{ij}	δ_{ij}	γ_{ij}
C ₁	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
C ₂	۰/۱۵	۰/۲۶۶	۰/۱۲۵	۱	۱	۱	۰/۶۴	۰/۱۲	۰/۵	۰/۱۱۱	۰/۳۹۳	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۴۳	۰/۱۸	۰/۱۳۱۹	۰/۳۹۵	۲/۳۱۸	۱
C ₃	۳	۰/۳۱۹	۰/۱۱۱	۱/۵۶۲	۰/۵	۱	۱	۱	۳	۰/۳۴۶	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۴۳	۰/۱۸۹۶	۰/۱۴۳	۲/۴۶۲	۱	۱
C ₄	۹	۱/۶۵۴	۰/۱۲۵	۲/۵۴۶	۰/۳	۹	۲/۸۸۸	۰/۳۳۳	۱	۱	۱	۱	۰/۳۷۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۶۷	۱/۳۹۸	۰/۱۶۷	۳/۳۰۹	۰/۱۴۳	۱
C ₅	۹	۳/۷۵۱	۰/۵	۵/۴۵۳	۱	۹	۳/۶۵۹	۰/۵	۹	۰/۲۵	۲/۶۹۶	۰/۲۵	۱	۱	۱	۵/۳۶۰	۱	۱	۵/۹۶۵	۳	۱
C ₆	۸	۰/۷۵۸	۰/۱۴۳	۱/۲۵	۰/۲۵	۷	۱/۱۱۷	۰/۲	۶	۰/۱۲۵	۰/۷۱۵	۰/۱۲۵	۰/۱۸۷	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۱	۱	۲/۶۵۱	۱	۱
C ₇	۱	۰/۲۹۵	۰/۱۲۵	۰/۴۳۱	۰/۱۶۷	۱	۰/۴۰۶	۰/۱۴۳	۷	۰/۳۰۲	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۱۶۸	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۳۷۷	۰/۱۴۳	۱	۱	۱	۱

مرحله ۴: محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها

در این مرحله، با استفاده از رابطه ۳-۲۳ اعداد فازی و رابطه ۳-۲۴ وزن فازی محاسبه می‌شود.

مرحله ۵: غیرفازی‌سازی وزن پارامترها

در این مرحله به منظور غیرفازی کردن وزن پارامترها، طبق رابطه ۳-۲۵ میانگین هندسی مؤلفه‌های عدد

فازی وزن پارامترها محاسبه شده است. نتایج مراحل ۴ و ۵ در جدول ۴-۴۰ آورده شده است.

جدول ۴-۴۰: تعیین وزن رویدادهای نهایی

	وزن فازی			عدد فازی			وزن غیرفازی
C ₁	۰/۱۶۱	۰/۱۵۲	۰/۱۷۷	۰/۳۷۴	۱/۳۵۸	۴/۸۶۵	۰/۱۶۲۹
C ₂	۰/۱۰۳	۰/۰۶۵	۰/۰۷۲	۰/۲۳۹	۰/۵۸۴	۱/۹۸۲	۰/۰۷۸۴
C ₃	۰/۱۱۵	۰/۰۸۱	۰/۱۱۵	۰/۲۶۷	۰/۷۲۴	۳/۱۶۱	۰/۱۰۲۳
C ₄	۰/۰۹۳	۰/۱۷۳	۰/۲۱	۰/۲۱۶	۱/۵۴۴	۵/۷۵۸	۰/۱۴۹۸
C ₅	۰/۳۳۸	۰/۳۹۱	۰/۲۳۹	۰/۷۸۷	۳/۴۹۲	۶/۵۷۵	۰/۳۱۶۲
C ₆	۰/۱۱۵	۰/۰۹۷	۰/۱۴۶	۰/۲۶۸	۰/۸۶۹	۴/۰۰۳	۰/۱۱۷۷
C ₇	۰/۰۷۶	۰/۰۴۲	۰/۰۴۱	۰/۱۷۶	۰/۳۷۲	۱/۱۲۹	۰/۰۵۰۶

پس از محاسبه وزن نهایی پیامد هر یک از رویدادهای نهایی، برای طبقه‌بندی شدت پیامد رویدادهای نهایی، از مراحل طبقه‌بندی احتمال رویدادهای نهایی که قبلاً توضیح داده شده استفاده می‌شود که نتیجه آن طبق جدول ۴-۴۱، ارائه شده است. با توجه به رتبه‌بندی شدت پیامد ریسک ارائه شده، رتبه شدت پیامد هر یک از رویدادهای نهایی به وجود آورنده‌ی ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار در جدول ۴-۴۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴۱: رتبه‌بندی شدت پیامد ریسک

پیامد (درصد)	سطح پیامد	رتبه
≥ 27	بسیار زیاد	۵
$18/3 - 27$	زیاد	۴
$9/6 - 18/3$	متوسط	۳
$0/9 - 9/6$	کم	۲
$\leq 0/9$	بسیار کم	۱

جدول ۴-۴۲: رتبه‌بندی شدت پیامد رویدادهای نهایی به وجود آورنده ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار

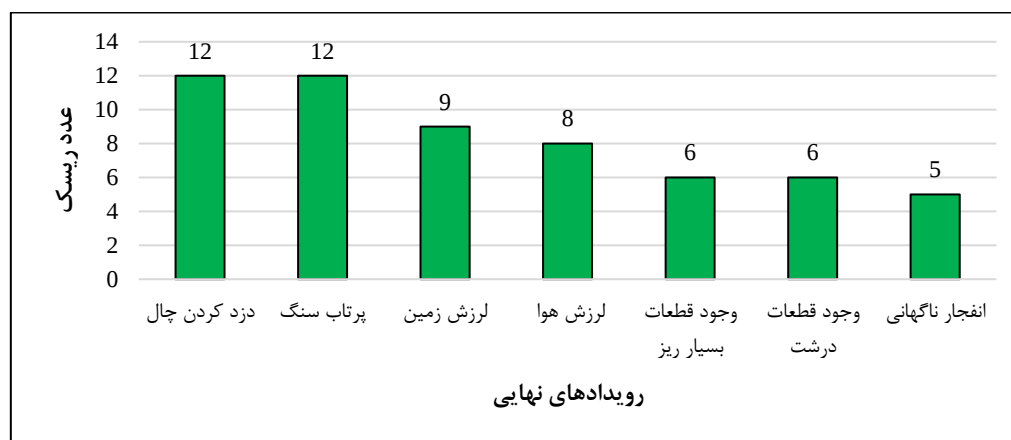
نماد رویداد	نام رویداد	شدت پیامد	رتبه
TE ₁	پرتاب سنگ	۱۶/۲۹	۳
TE ₂	لرزش هوا	۷/۸۴	۲
TE ₃	لرزش زمین	۱۰/۲۳	۳
TE ₄	دزد کردن چال	۱۴/۹۸	۳
TE ₅	انفجار ناگهانی	۳۱/۶۲	۵
TE ₆	وجود قطعات درشت	۱۱/۷۷	۳
TE ₇	وجود قطعات بسیار ریز	۵/۰۶	۲

۴-۲-۴- تعیین عدد ریسک

به منظور برآورد نهایی ریسک تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی که پیشروی‌های آن با استفاده از روش چالزنی و انفجار است، پس از تعیین رتبه‌ی احتمال و شدت پیامد هر یک از رویدادهای نهایی به وجود آورنده ریسک، لازم است که عدد ریسک آن‌ها محاسبه و تعیین شود. چنانچه در فصل پیشین ذکر شد از حاصل ضرب دو فاکتور احتمال و شدت پیامد، عدد ریسک به دست می‌آید. اعداد کمی احتمال وقوع و شدت پیامد هر یک از رویدادهای نهایی در جدول ۴-۴ آورده شده است و عدد ریسک رویدادهای نهایی در شکل ۴-۹ آورده شده است. همچنین ماتریس ریسک هر یک از رویدادهای نهایی نیز در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴: عدد ریسک تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی

نماد رویداد	نام رویداد	احتمال وقوع	شدت پیامد	عدد ریسک	کلاس ریسک
TE ₁	پرتاب سنگ	۴	۳	۱۲	نامطلوب
TE ₂	لرزش هوا	۴	۲	۸	قابل تحمل
TE ₃	لرزش زمین	۳	۳	۹	قابل تحمل
TE ₄	دزد کردن چال	۴	۳	۱۲	نامطلوب
TE ₅	انفجار ناگهانی	۱	۵	۵	قابل صرف نظر
TE ₆	وجود قطعات درشت	۲	۳	۶	قابل تحمل
TE ₇	وجود قطعات بسیار ریز	۳	۲	۶	قابل تحمل



شکل ۴-۹: عدد ریسک تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی

احتمال وقوع رویداد	۵					
	۴		لرزش هوا	دزد کردن چال پرتاب سنگ		
	۳		وجود قطعات بسیار ریز	لرزش زمین		
	۲			وجود قطعات درشت		
	۱					انفجار ناگهانی
ریسک		۱	۲	۳	۴	۵
		شدت پیامد رویداد				

شکل ۴-۱۰: ماتریس ریسک تونل سازی در مجموعه معدنی برناکی

با عنایت به ماتریس ریسک حاصل شده، دزد کردن چال و پرتاب سنگ به عنوان رویدادهای نامطلوب، لرزش زمین، لرزش هوا، وجود قطعات بسیار ریز و وجود قطعات درشت به عنوان رویدادهای قابل تحمل و انفجار ناگهانی به عنوان رویدادی با کلاس ریسک قابل صرف نظر، در نظر گرفته شدند.

۴-۲-۵- پاسخ به ریسک

ریسک‌هایی که بیش‌تر از ظرفیت تحمل ریسک سازمان هستند، اثر قابل توجهی بر عملکرد و توانایی سازمان در دستیابی به اهداف‌شان دارند (عطائی، ۱۳۹۵). هدف این گام بررسی ریسک‌های مختلف تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار و نحوه برخورد با آن‌ها است. به همین دلیل در این بخش از تحقیق حاضر با توجه به رتبه‌بندی‌های صورت گرفته برای رویدادهای اساسی، میانی و نهایی، پاسخ‌هایی برای کنترل آن‌ها در دو بخش پاسخ‌های مدیریتی و فنی ارائه شده است.

الف - پاسخ‌های مدیریتی

- استقرار، نظارت و کنترل سیستم مدیریت HSE در معدن
- آموزش دستورالعمل‌های مرتبط با ایمنی و آتشکاری ایمن

- نظارت و بازرسی دائم بر عملیات آتشباری به وسیله سرپرست معدن
- بازرسی تونل و سینه کار پیش از شروع نوبت کاری توسط مسئول ایمنی
- استفاده از وسایل حفاظت فردی و گروهی

ب - پاسخ‌های فنی

عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده (IE₁)

- به کارگیری تیم متخصص برای بررسی دقیق شرایط زمین‌شناسی در مسیر پیشروی تونل
- کنترل و بررسی پیوسته عوارض طبیعی و برداشت داده‌ها پس از هر نوبت آتشکاری و پیشروی

خطای عملیاتی (مربوط به رویدادهای نهایی TE₁، TE₂، TE₃، TE₆، TE₇)

- برگزاری دوره‌های آموزشی برای آتشبار
- تأیید صلاحیت آتشکار توسط سازمان‌های ذیصلاح
- تمیز کردن کامل چال برای آماده‌سازی خرج‌گذاری
- نظارت و بازرسی دائم بر عملکرد چالزن و آتشکار (توسط سرپرست معدن و مسئول ایمنی)
- بازرسی و کنترل دستگاه چالزن پس از هر نوبت کاری

خطای طراحی (مربوط به رویدادهای نهایی TE₁، TE₂، TE₃، TE₆، TE₇)

- برگزاری کلاس‌های آموزشی به منظور طراحی مناسب الگوی انفجاری
- بررسی نتایج انفجار حاصل از الگوی فعلی
- تأیید آتشباری بر اساس طرح مصوب توسط مسئول فنی معدن
- استفاده از افراد متخصص و دارای صلاحیت در زمینه طراحی الگوی انفجار

دزد کردن چال (TE₄) و انفجار ناگهانی (TE₅)

- کنترل دستگاه آتش‌کن، سیم‌های رابط هر چاشنی و اتصالات مربوطه قبل از شروع هر نوبت انفجار

- برگزاری کلاس‌های آموزشی به منظور بستن صحیح اتصالات مدار
- استفاده از چاشنی الکتریکی ایمن و سیم‌های روپوش‌دار
- لقی‌گیری سنگ‌های سقف نزدیک به سینه‌کار تونل برای جلوگیری از سقوط به روی سیم‌های مدار و آسیب زدن به آن‌ها

افت کیفیت ماده منفجره (IE₅)

- شرایط نگهداری مواد منفجره و چاشنی‌ها در انبارهای جداگانه و بر اساس تاریخ و مطابق دستورالعمل‌های کارخانه سازنده
- نصب دماسنج و رطوبت‌سنج به منظور کنترل‌های مربوطه
- تهویه انبار مواد ناریه

وجود گرد زغال (IE₇)

- بررسی هوای اطراف سینه کار قبل از خرج‌گذاری توسط مسئول ایمنی
- نصب سیستم پایش خودکار به منظور اندازه‌گیری میزان گاز زغال‌سنگ
- عدم خرج‌گذاری در هوایی که درصد گاز زغال‌سنگ آن از درصد مشخص تجاوز کرده است
- استفاده از دستگاه‌های آتش‌کن ویژه معادن زغال‌سنگ
- عدم استفاده از هوای فشرده برای تمیز کردن چال
- بازدید مستمر از لوله‌های انتقال هوای فشرده
- بررسی مرتب و دوره‌ای داکت‌های انتقال هوا
- بررسی محاسبات تهویه هنگام تغییر در شبکه‌های حفاری معدن
- بازدید از فن‌های انتقال هوا
- تدوین برنامه تعمیر و نگهداری مناسب فن‌های تهویه

- مجهز بودن مسئول پیشروی به دستگاه گازسنج و گزارش میزان گاز زغال سنگ قبل و بعد از شروع

انفجار به سرپرست معدن

استفاده از مواد دارای الکتریسته ساکن و آتش‌زا (IE8)

- برگزاری دوره آموزشی ایمنی برای تمامی افرادی شاغل در تونل
- ممنوعیت حمل هرگونه وسیله‌ای انفجاری از طریق نصب علائم ایمنی و هشداردهنده در تونل‌ها
- اطمینان از آگاهی افراد در مورد حمل هرگونه وسیله‌ای انفجاری در معدن زغال سنگ

۴-۳- جمع‌بندی

در ابتدای این فصل ۷ رویداد نهایی مؤثر در ریسک تونل‌سازی در مجموعه معدنی برناکی شناسایی و علل ریشه‌ای آن در قالب درخت خطا نشان داده شد. پس از آن با استفاده از روش تئوری فازی، احتمال رویداد نهایی که مؤلفه اول ریسک است محاسبه شد. در گام بعد از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی برای محاسبه شدت پیامد استفاده شد و در نهایت عدد ریسک و سطح ریسک رویدادهای نهایی مشخص شد و بر این اساس دزد کردن چال و پرتاب سنگ به عنوان بحرانی‌ترین حوادث تعیین و رویدادهای لرزش زمین، لرزش هوا، وجود قطعات بسیار ریز، وجود قطعات درشت و انفجار ناگهانی در رتبه‌های پایین‌تری قرار گرفت و برای کنترل آن‌ها، پاسخ‌هایی در دو بخش مدیریتی و فنی ارائه شد.

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

تونل‌سازی به خاطر ریسک‌های موجود در آن همواره مورد توجه بوده و از اهمیت ویژه و به سزائی برخوردار است، به همین خاطر بایستی با مدیریت صحیح، از احتمال وقوع و یا پیامدهای آن کاست. ضعف و کاستی در مدیریت بالاخص در مبحث مدیریت ریسک از عوامل اصلی به تعویق افتادن و زیاد شدن هزینه‌ها در مبحث تونل‌سازی است. از مهم‌ترین بخش‌های فرآیند مدیریت ریسک، ارزیابی ریسک در پروژه است که هدف اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس میزان تأثیر و احتمال وقوع است. در واقع شناسایی و مدیریت ریسک نسبت به کاهش و یا حذف آن دارای اهمیت بیشتری است.

در پروژه‌های تونل‌سازی بالاخص در ساختارهای سنگی سخت به علت ماهیت زمین‌شناسی آن‌ها در قیاس با سایر پروژه‌های مشابه، همواره درصد بسیار بالایی از ریسک موجود است؛ لذا مدیریت صحیح و به جا باعث کاهش احتمال وقوع یا اثر پیامدهای منفی بر اهداف پروژه خواهد شد.

رتبه‌بندی ریسک‌ها، به دلیل محدودیت‌های مالی و زمانی، یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های ارزیابی ریسک است که پاسخ‌دهی مناسب و درست به آن‌ها، کمک شایانی در انجام هرچه موفق‌تر فرآیند مدیریت ریسک می‌کند. در واقع هدف از رتبه‌بندی ریسک‌ها پرداختن به مهم‌ترین آن‌ها با توجه به محدود بودن منابع است.

با کمک روش‌های کمی و کیفی می‌توان رتبه‌بندی ریسک‌های یک پروژه را انجام داد. با توجه به اینکه ارزیابی ریسک در پروژه‌های پرمخاطره نظیر پروژه‌های تونل‌سازی از جمله کارهای ضروری و مهم برای مدیریت ریسک لحاظ می‌شود؛ لذا در این تحقیق ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک در پروژه تونل‌سازی کوچک مقطع (مطالعه موردی: مجموعه معدنی برناکی، شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی) انجام شد. در همین راستا از روش تحلیل درخت خطای فازی برای محاسبه احتمال و از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی برای

تعیین شدت پیامد رویدادهای نهایی استفاده شد. در این فصل به بررسی نتایج حاصل از این پژوهش و بیان پیشنهاداتی در رابطه با بهبود کار و کاهش خطرات پرداخته شده است.

۵-۲- نتیجه‌گیری

در ابتدای این پژوهش، آخرین تحقیقات مختلف انجام شده در موضوع ارزیابی ریسک با دقت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت تا نقاط ضعف و قوت آن‌ها مشخص شود. با بررسی این تحقیقات مشخص شد که در زمینه ارزیابی ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار، به خصوص در معادن زغال‌سنگ با در نظر گرفتن توجه به ابعاد مختلف این ریسک، هیچ‌گونه پژوهش جامع و کاملی صورت نگرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که:

- کلیه پارامترها و عوامل مؤثر در ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار، مورد ارزیابی قرار گرفتند. ۷ عامل اصلی شامل پرتاب سنگ، لرزش هوا، لرزش زمین، دزد کردن چال، انفجار ناگهانی، وجود قطعات درشت و وجود قطعات بسیار ریز به عنوان رویدادهای نهایی در ساختار ریسک مربوطه شناسایی و برای هر یک از این عوامل درخت خطا ترسیم شد.
- با نظرسنجی از ۱۱ کارشناس خبره در این زمینه، میزان اهمیت رویدادهای اساسی تأثیرگذار در رویداد نهایی مربوطه مشخص شد.
- با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی احتمال رویدادهای نهایی به دست آمد. هر یک از رویدادهای نهایی رتبه‌بندی شدند که رویدادهای پرتاب سنگ، لرزش هوا و دزد کردن چال بالاترین رتبه را از بین سایر رویدادها با احتمال وقوع یکسان ۴، به دست آوردند.
- شدت پیامد ۷ رویداد نهایی با استفاده از نظرسنجی از کارشناسان و توسط روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی، محاسبه شد که در بین رویدادهای نهایی بالاترین رتبه مربوط به انفجار ناگهانی با شدت پیامد ۵ بود.

- با تشکیل ماتریس ریسک، رویدادهای با ریسک بالا در تونل‌سازی مشخص شدند. با بررسی ماتریس ریسک، رویدادهای نهایی دزد کردن چال و پرتاب سنگ در محدوده با ریسک بالا قرار گرفتند. در نهایت برای کنترل و کاهش ریسک‌های بحرانی، پاسخ به ریسک برای هریک از رویدادها ارائه شد.

۵-۳- پیشنهادات

ارزیابی ریسک پروژه‌ها به ویژه پروژه‌های معدنی یکی از اساسی‌ترین بخش‌ها در بررسی نحوه عملکرد و خروجی این پروژه‌ها به خصوص در پروژه‌های تونل‌سازی است. تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار به دلیل ماهیت و پیچیدگی‌های زیاد آن در مراحل مختلف آن، نیازمند ارزیابی ریسک است. نتایج حاصل از این کار تحقیقاتی می‌تواند در به ثمر رساندن پژوهش‌های بعدی برای کاهش و کنترل هرچه بهتر ریسک‌های مرتبط با تونل‌سازی در معادن به ویژه معادن زغال‌سنگ، کمک شایسته‌ای کند. موارد زیر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:

- پیشنهاد می‌شود با استفاده از سایر روش‌ها در تعیین احتمال وقوع و شدت پیامد و انجام مطالعات جدید در سایر معادن زغالی و غیرزغالی می‌توان ارزیابی جامع‌تری از ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار داشت.

- پیشنهاد می‌شود برای سایر چرخه‌های اصلی معادن نیز از این روش استفاده شود.
- پیشنهاد می‌شود، سایر پارامترها و رویدادهای تأثیرگذار در ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار، که در این تحقیق شناسایی نشده باشند در تحقیقات بعدی ارزیابی و مطالعات دقیق‌تری در این زمینه انجام شود.

منابع و مراجع

الف

استوار ر، (۱۳۹۱)، آتشکاری در معادن: تئوری‌های انفجار، معادن روباز، حفر تونل، چاپ هشتم، جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

اصفهانی س.ح، (۱۳۸۹)، تحلیل درخت خطا، کالج برتر، تهران

امیری س، و نعمتیان ح، (۱۳۹۵)، مدیریت ریسک پروژه‌های ساخت تونل به روش تصمیم‌گیری چند معیاره و مقایسه مدل‌های مختلف رتبه‌بندی ریسک، کنفرانس بین‌المللی مهندسی شهرسازی، عمران و معماری، دانشگاه جامع علمی-کاربردی.

آذر ع، رجب‌زاده ع، (۱۳۸۹)، تصمیم‌گیری کاربردی (رویکرد MADM)، نشر قلم.

آزاد ع، عطائی م، سرشکی ف، قنبری ک، (۱۳۹۱)، مدیریت و ارزیابی ریسک حوادث معدن طزره، اولین کنگره ملی زغال‌سنگ، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.

ب

باقرپور ر، یاراحمدی ر، و خادمیان ا، (۱۳۹۳)، ارزیابی و کنترل ریسک ایمنی در معادن زیرزمینی زغال ایران، دومین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، کرمان، دانشگاه صنعتی شاهرود و معادن زغال‌سنگ کرمان.

بخت‌آور ع، و شهریار ک، (۱۳۸۵)، ارزیابی ریسک حوادث با تاکید بر شدن و احتمال وقوع (مطالعه موردی معادن زغال‌سنگ کرمان)، ششمین همایش ایمنی، بهداشت و محیط زیست در معادن و صنایع معدنی، تهران، شرکت معدنی و صنعتی چادرملو.

برخورداری ا، شیرازی ج، و حلوانی غ، (۱۳۹۱)، شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک فرآیند تونل‌سازی با بکارگیری از تکنیک آنالیز ایمنی شغل، فصلنامه علمی-پژوهشی دانشکده بهداشت یزد، شماره ۳، پاییز، صفحات ۱۰۳-۱۱۲.

ت

تاجی م، (۱۳۸۹)، رساله دکتری: مدل کمی ارزیابی عملکرد انفجار و مقدار درخواست بهینه شدن عملیات انفجار در معادن روباز، دانشگاه آزاد اسلامی شاهرود.

تاجی م، محزون ع، (۱۳۸۱)، استانداردسازی نظرات کارشناسی و خبرگان در سیکل مواد ناریه کشور، حراست وزارت نیرو.

ج

حسین‌پور آهنگری ع، (۱۳۸۸)، آنالیز و تحلیل پیامدهای ناشی از حادثه خروج از خط قطار با روش آنالیز درخت وقایع (ETA)، دومین کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه‌آهن (ICRARE 2009)، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

خ

خیرخواه ج، و امیری م، (۱۳۹۸)، ارزیابی ریسک زیست محیطی سد باطله معدن مس سونگون با استفاده از روش FMEA، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۳۲، صفحات ۱۷۳-۱۸۹.

د

درهمی و، باصولی م، (۱۳۸۱)، تحلیل درخت خطا با استفاده از منطق فازی، دومین کنفرانس ملی مهندسی صنایع، یزد، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه یزد.

ر

رمضان‌نیا ر، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد: ارزیابی ریسک زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در تونل سازی مکانیزه (مطالعه موردی تونل انتقال آب نوسود)، دانشگاه صنعتی شاهرود.

رمضان‌نیا ر، عطائی م، و میرزایی نصیرآباد ح، (۱۳۹۳ الف)، ارزیابی ریسک پروژه‌های عمرانی و معدنی در حوزه‌ی مطالعاتی مدیریت ریسک پروژه، دومین کنفرانس ملی پویایی مدیریت، توسعه‌ی اقتصادی و مدیریت مالی، شیراز، شرکت پژوهشی پندار اندیش رهپو.

رمضان‌نیا ر، عطائی م، و میرزایی نصیرآباد ح، (۱۳۹۳ ب)، مدیریت ریسک عملیاتی با نگرشی ویژه بر مبحث پروژه‌های تونل‌سازی، دومین کنفرانس ملی پویایی مدیریت، توسعه‌ی اقتصادی و مدیریت مالی، شیراز، شرکت پژوهشی پندار اندیش رهپو.

ص

صیادی ا.ر، حیاتی م، و آذر ع، (۱۳۹۰)، ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از روش تخصیص خطی، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، شماره ۱، جلد ۲۲، بهار، صفحات ۲۸-۳۸.

صیادی ا.ر، منجری م، شریفی م.ر، (۱۳۹۲)، ارائه رویکردی جهت ارزیابی ریسک در معادن روباز با استفاده از روش FAHP و Fuzzy TOPSIS، نشریه علمی-پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۶، پاییز و زمستان، صفحات ۴۵-۵۸.

ع

عامری سیاهوئی م ر، عطائی م، سرشکی ف، و رفیعی ر، (۱۳۹۸)، ارزیابی و مدیریت ریسک ایمنی با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در معادن روباز کرومیت فاریاب نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره ۴، شماره ۱۲، صفحات ۵۷-۷۲.

عطائی م، (۱۳۹۴)، تصمیم‌گیری چند معیاره فازی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

عطائی م، (۱۳۹۵)، مدیریت ریسک، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

ف

فتوت م، و مافی آ، (۱۴۰۰)، ارزیابی ریسک و آنالیز حوادث ناشی از استخراج معادن زغال سنگ ایران طی دوره زمانی ۱۰ ساله ۱۳۸۸ - ۱۳۹۷، پنجمین کنگره ملی زغالسنگ ایران.

ق

قاسمی ی، اردشیر ع، و امیری م، (۱۳۹۰)، ارزیابی ریسک در پروژه‌های احداث تونل با استفاده از آنالیز درخت خطا (FTA)، همایش ملی سازه، راه، معماری، چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی.

قنبری م، عباسی رستمی س، علوی رستمی س.م، (۱۳۹۰)، انتخاب بهترین چال انفجاری در معدن سنگ آهک نکا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)، هشتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، تهران، دانشکده مهندسی معدن.

ک

کوه دره‌ئی م، (۱۳۹۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد: ارائه رویکردی مبتنی بر ریسک جهت ارزیابی نتایج انفجار در معادن سنگ آهن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و رئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کوه دره‌ئی م، عطائی م، سرشکی ف، محمدی س، (۱۳۹۵)، ارائه یک رویکرد مبتنی بر ارزشیابی ریسک جهت بررسی عملیات انفجار در معادن، دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، کاشان، دانشگاه کاشان.

م

محمدزاده ر، گشتاسبی ک، و شریف‌زاده م، (۱۳۹۰)، ارزیابی ریسک ژئوتکنیکی و انتخاب بهینه رودهدر در تونل‌های معدن زغال‌سنگ طبس، نشریه علمی-پژوهشی معدن، دوره ششم، شماره یازدهم، صفحات ۷۹-۹۰.

محمدفام ا، (۱۳۹۰)، مهندسی ایمنی، چاپ ششم، انتشارات فن‌آوران، تهران.

مصری‌پور ن، و بصیری م، (۱۳۹۱)، انتخاب روش ارزیابی پروژه‌های معدنی با استفاده از روش تلفیقی تحلیل سلسله مراتبی فازی و Topsis فازی، اولین کنفرانس ملی فناوری‌های معدن‌کاری ایران، یزد، دانشگاه یزد.

ن

نخعی پناه خلیل آباد ز، عطائی م، خالوکاکائی ر، و بصیرنژاد م ر، (۱۳۹۷)، کاربرد تحلیل درخت خطای فازی در ارزیابی ریسک خطرات دستگاه سیم برش در معادن سنگ ساختمانی کوثر اصفهان، نشریه مهندسی معدن، دوره ۱۳، شماره ۳۹، صفحات ۴۳-۵۳.

نظارت ح، سرشکی ف، و عطائی م، (۱۳۹۱)، مدیریت ریسک تونل‌سازی مکانیزه با نگاهی بر عوامل زمین‌شناسی، دومین همایش مدیریت بحران در صنعت ساختمان، شریان‌های حیاتی و سازه‌های زیرزمینی، اصفهان، مرکز پژوهشی مهندسی بحران‌های طبیعی شاخص سازان.

و

وظیفه‌دان ر، (۱۳۹۶)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد: ارزیابی ریسک در پروژه‌های تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار با استفاده از روش ترکیبی تحلیل درخت خطا و مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره - مطالعه موردی- تونل‌های پیشروی معادن زغال‌سنگ شرکت صنعتی معدنی شمالشرق، دانشگاه صنعتی شاهرود.

B

Badri, A., Nadeau, S., & Gbodossou, A. (2013). A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1145-1158.

C

Carpentier, S., Gamache, M., & Dimitrakopoulos, R. (2016). Underground long-term mine production scheduling with integrated geological risk management. *Mining Technology*, 125(2), 93-102.

Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), 649-655.

Cheliyan, A. S., & Bhattacharyya, S. K. (2017). Fuzzy fault tree analysis of oil and gas leakage in subsea production systems. *Journal of Ocean Engineering and Science*.

Chen, S. J., & Hwang, C. L. (1992). Fuzzy multiple attribute decision making methods. In *Fuzzy multiple attribute decision making* (pp. 289-486). Springer, Berlin, Heidelberg.

D

Deng, Y., Song, L., Zhou, Z., & Liu, P. (2017). An Approach for Understanding and Promoting Coal Mine Safety by Exploring Coal Mine Risk Network. *Complexity*.

Dowding, C.H. (1992). Suggested method for blast vibration monitoring, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 29(2), 145-156.

F

Faramarzi, F., Mansouri, H., & Farsangi, M. A. E. (2014). Development of rock engineering systems-based models for flyrock risk analysis and prediction of flyrock distance in surface blasting. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(4), 1291-1306.

G

Ghosh, S., & Jintanapakanont, J. (2004). Identifying and assessing the critical risk factors in an underground rail project in Thailand: a factor analysis approach. *International Journal of Project Management*, 22(8), 633-643.

Groves, W. A., Kecojevic, V. J., & Komljenovic, D. (2007). Analysis of fatalities and injuries involving mining equipment. *Journal of safety research*, 38(4), 461-470.

H

Hasanipanah, M., Armaghani, D. J., Monjezi, M., & Shams, S. (2016). Risk assessment and prediction of rock fragmentation produced by blasting operation: a rock engineering system. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 808.

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.

J

Jahanbani, Z., Sereshki, F., Ataei, M., & Ghanbari, K. (2017). Risk Assessment of Fire by using Fuzzy Fault Tree Analysis Case study: Eastern Alborz Coal Mines. *Iran Occupational Health*, 14(3), 46-57.

Jia, Z. W., Jing, G. X., Zhang, Q., & Duan, Z. W. (2004). Fault tree analysis of mining fire occurrence based on triangle fuzzy numerals. *Journal of Safety and Environment/ Anquan Yu Huanjing Xuebao*, 4(6), 62-65.

Joy, J. (2004). Occupational safety risk management in Australian mining. *Occupational medicine*, 54(5), 311-315.

K

Kecojevic, V. and Nor, Z.M., (2009). Hazard identification for equipment-related fatal incidents in the US underground coal mining. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 15(1), pp.1-6.

Kecojevic, V., and Zhang M., (2013), Investigation of Haul Truck-Related Fatal Accidents in Surface Coal Mining in West Virginia, Coal and Energy Research Bureau, Department of Mining Engineering, West Virginia University.

Kinilakodi, H., & Grayson, R. L. (2011). A methodology for assessing underground coal mines for high safety-related risk. *Safety science*, 49(6), 906-911.

- Komljenovic, D., & Kecojevic, V. (2007). Risk management programme for occupational safety and health in surface mining operations. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 7(5), 620-638.
- Komljenovic, D., Groves, W. A., & Kecojevic, V. J. (2008). Injuries in US mining operations—A preliminary risk analysis. *Safety Science*, 46(5), 792-801.
- Kong, B., Cao, Z., Sun, T., Qi, C., & Zhang, Y. (2022). Safety hazards in coal mines of Guizhou China during 2011–2020. *Safety science*, 145, 105493.

L

- Lavasani, M. R., Wang, J., Yang, Z., & Finlay, J. (2011). Application of fuzzy fault tree analysis on oil and gas offshore pipelines. *International Journal of Marine Science and Engineering*, 1(1), 29-42.
- Lavasani, S. M., Ramzali, N., Sabzalipour, F., & Akyuz, E. (2015). Utilisation of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) for quantified risk analysis of leakage in abandoned oil and natural-gas wells. *Ocean Engineering*, 108, 729-737.
- Lei, W. W. C. W. B. (2010). Fault Tree Analysis of Roof Falling Accident in Mine. *Metal Mine*, 3, 041.
- Liu, Y. C., & Chen, C. S. (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering geology*, 89(1), 129-143.

M

- Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 477-523.
- Mark, C., & Gauna, M. (2016). Evaluating the risk of coal bursts in underground coal mines. *International journal of mining science and technology*, 26(1), 47-52.
- Mentes, A., and Helvacioğlu I. H., (2011). An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems. *Ocean Engineering*, pp. 285-294.
- Momeni, M., (2009). New topic in operational research, Tehran University, 11, 187-231.
- 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.

N

- Newham, B., Beamish, B., Brady, M., & Fellowes, M. (2016). Interpreting the Status of an Underground Coal Mine Heating for Valid Risk Management and Control.
- Norouzi Masir, R., Ataei, M., & Mottahedi, A. (2021). Risk assessment of Flyrock in Surface Mines using a FFTA-MCDM Combination. *Journal of Mining and Environment*, 12(1), 191-203.

O

- Omidvari, M., Lavasani S. M. R., & Mirza S., (2014), Presenting of Failure Probability Assessment Pattern by FTA in Fuzzy Logic (case study: distillation tower unit of oil refinery process), *Journal of Chemical Health and Safety*, 21(6), 14-22.
- Orsulak, M., Kecojevic, V., Grayson, L., & Nieto, A. (2010). Risk assessment of safety violations for coal mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 24(3), 244-254.

P

- Paithankar, A. (2011). Hazard identification and risk analysis in mining industry (Doctoral dissertation).
- Pejic, L. M., Torrent, J. G., Querol, E., & Lebecki, K. (2013). A new simple methodology for evaluation of explosion risk in underground coal mines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1524-1529.
- PMI, (2000), A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), Pennsylvania.
- Purba, J. H., (2014). A Fuzzy-based Reliability Approach to Evaluate Basic Events of Fault Tree Analysis for Nuclear Power Plant Probabilistic Safety Assessment. *Annals of Nuclear. Energy*, 70, 21-29.

R

- Radosavljevic, S., Lilic, N., Curcic, S., & Radosavljevic, M. (2009). Risk assessment and managing technical systems in case of mining industry. *Strojniški vestnik*, 55(2), 119-130.
- Rajakarunakaran, S., Kumar, A. M., Prabhu, V. A., (2015). Application of Fuzzy Fault Tree Analysis and Expert Elicitation for Evaluation of Risks in LPG Refuelling Station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 33, 109-123.
- Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). System reliability theory: models, statistical methods, and applications (Vol. 396). John Wiley & Sons.

Renjith, V. R., Madhu, G., Lakshmana Gomathi Nayagam, V., Bhasi, A. B., (2010). Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 103-110.

S

Saaty, T. L., (1980). *Analytic hierarchy process*. John Wiley & Sons, Ltd.

Seccatore, J., Origliasso, C., & De Tomi, G. (2012). Assessing a risk analysis methodology for rock blasting operations. *Electrical Measuring Instruments and Measurements*, 51.

Shi, L., Shuai, J., Xu, K., (2014). Fuzzy Fault Tree Assessment based on Improved AHP for Fire and Explosion Accidents for Steel Oil Storage Tanks, *Journal of hazardous materials*, 278, 529-538.

Smith, G., (1996). Risk Assessment of Explosive Use in an Open Cut Coal Mine, *Safety Superintendent*, pp. 2-3.

Standish, P., (2012), Check Inspectors Safety Seminar The Naked Truth of Risk Assessment and Revealing Hazards and Controlling Risks, NSW Government.

Sugeno, M., (1999). *Fuzzy Modeling and Control*. first ed, CRC Press, Florida, USA.

T

Tao, M., Ren, S. F., Wang, Y. J., & Tao, L. (2007). Analysis of a Blasting Fly Rock Accident by Fault-tree Method, *Blasting*.

Tweeddale, M., Joy, J., (1997), *Risk Management Handbook for the Mining Industry*.

Tyagi, S. K., Pandey, D., Tyagi, R., (2010). Fuzzy set theoretic approach to fault tree analysis, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, pp. 276-283.

V

Verakis, H., (2011). Flyrock: A continuing Blast Safety threat, *International Society of Explosives Engineering*.

Verzani, L. P., Russo, G., Grasso, P., & Cabañas, A. (2015). The Risk Analysis Applied to Deep Tunnels Design—El Teniente New Mine Level Access Tunnels, Chile. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 6* (pp. 1023-1030). Springer, Cham.

W

Wagner, H., (2006). Risk Evaluation and Control in Underground Construction. *International Symposium on Underground Excavation and Tunneling*, 2-4 February, Bangkok, Thailand.

Wang, D., & Chen, S. (2010). Application of FTA in Large Open-Metal Mine Blasting Accidents. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 3, 012.

Wang, D., Zhang, P., Chen, L., (2013). Fuzzy Fault Tree Analysis for Fire and Explosion of Crude Oil Tanks, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1390-1398.

Wang, H., Li, J., Wang, D., & Huang, Z. (2017). A novel method of fuzzy fault tree analysis combined with VB program to identify and assess the risk of coal dust explosions. *PloS one*, 12(8), e0182453.

Y

Yaghoobpour, Z., Givehchi, S., Tabrizi, M.A., Masoudi, F., Nourian, L., (2016). Public Transport Risk Assessment through Fault Tree Analysis. *International Journal of Human Capital in Urban Management*, 1(2), 93-102.

Yan, R., Dunnet, S. J., Jackson, L. M., (2016). Reliability Modeling of Automated Guide Vehicles by the Use of Failure Modes Effects and Criticality Analysis, and Fault Tree Analysis, In *OASIS-Open Access Series in Informatics* (Vol. 50). Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.

Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., (2015). Risk-based Optimal Safety Measure Allocation for Dust Explosions, *Safety Science*, Vol. 74, pp. 79-92.

Z

Zhang, M., Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (2014). Investigation of haul truck-related fatal accidents in surface mining using fault tree analysis. *Safety science*, 65, 106-117.

Zhang, P., Peterson, S., Neilans, D., Wade, S., McGrady, R., & Pugh, J. (2016). Geotechnical risk management to prevent coal outburst in room-and-pillar mining. *International journal of mining science and technology*, 26(1), 9-18.

Zhou, Z., Li, X., Liu, X., & Wan, G. (2012). Safety Evaluation of Blasting Flyrock Risk with FTA Method.

پیوست‌ها

پیوست الف: پرسشنامه شماره ۱

کارشناس محترم شرکت زغال سنگ البرز شرقی

با سلام

احتراماً به منظور بررسی ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار در تونل‌های پیشروی آن شرکت در راستای کاهش حوادث جانی و مالی و هزینه‌ها، ریسک‌های اصلی و علل ریشه‌ای آن مشخص شد. پرسشنامه زیر به منظور تعیین اهمیت هر یک از علل به وجود آورنده ریسک اصلی تهیه شده است. خواهشمند است که سوالات زیر را با دقت مطالعه کرده و نظر خود را در کادر تعیین شده درج نمایید.

با تشکر و تقدیم احترام

سن	تحصیلات	سابقه کاری	سمت فرد پاسخ‌دهنده

جدول پ-۱: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در ریسک تونل‌سازی به روش چالزنی و انفجار

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
پرتاب سنگ					
لرزش هوا					
لرزش زمین					
دزد کردن چال					
انفجار ناگهانی					
وجود قطعات درشت					
وجود قطعات بسیار ریز					

جدول پ-۲: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در پرتاب سنگ، لرزش هوا و وجود قطعات بسیار ریز

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
خطای طراحی					
خطای عملیاتی					
عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده					

جدول پ-۳: پرسشنامه پارامترهای لرزش زمین و وجود قطعات درشت

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
خطای طراحی					
خطای عملیاتی					
عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده					

جدول پ-۴: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
خطای انسانی					
غیر ممکن بودن پیش‌بینی					

جدول پ-۵: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای انسانی

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
کمبود تجربه					
عدم دقت					
نداشتن دانش و مهارت کافی					

جدول پ-۶: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای عملیاتی

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
کیفیت خرج گذاری					
عدم مهارت کافی اشنکار					
عدم وجود نظارت و بازرسی					
عدم دقت در عملیات چالزنی					

جدول پ-۷: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای عدم دقت در عملیات چالزنی

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
نقص فنی دستگاه					
خطای انسانی					

جدول پ-۸: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای طراحی مربوط به پرتاب سنگ و لرزش هوا و وجود قطعات بسیار ریز

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
ترتیب نامناسب انفجار					
زمان نامناسب تأخیر					
مقدار کم بارسنگ					
مقدار کم فاصله ردیفی					
قطر زیاد چال					
اضافه حفاری					
برآورد اشتباه از عوارض طبیعی					
انتخاب نادرست خرج					
کم بودن طول چال					
گل گذاری کم					
شیب نامناسب چال					

جدول پ-۹: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در خطای طراحی مربوط به پرتاب لرزش زمین و وجود قطعات درشت

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
ترتیب انفجار					
زمان نامناسب تأخیر					
مقدار زیاد بارسنگ					
مقدار زیاد فاصله ردیفی					
قطر کم چال					
طول زیاد چال					
برآورد اشتباه از عوارض طبیعی					
انتخاب نادرست خرج					
گل گذاری زیاد					

جدول پ-۱۰: پرسشنامه پارامترهای مؤثر خطای استفاده از مواد دارای الکتریسیته ساکن و آتش‌زا

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
عدم وجود علائم هشدار					
عدم توجه به دستورالعمل‌ها					

جدول پ-۱۱: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در دزد کردن چال

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
زمان نامناسب تأخیر					
آسیب دیدگی در سیم رابط انفجار					
خرابی در دستگاه (سیستم) شروع انفجار					
اختلال در اتصالات مدار انفجار					
کیفیت خرج گذاری					
عدم مهارت کافی آشکار					
عدم وجود نظارت و بازرسی					
عدم دقت در عملیات چالزنی					
عوارض طبیعی پیش‌بینی نشده					
افت کیفیت ماده منفجره					

جدول پ-۱۲: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در افت کیفیت ماده منفجره

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
طول مدت انبار کردن					
وجود رطوبت در انبار					
شرایط نگهداری ماده منفجره					

جدول پ-۱۳: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در انفجار ناگهانی

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
آسیب دیدگی در سیم رابط انفجار					
خرابی در دستگاه (سیستم) شروع انفجار					
اختلال در اتصالات مدار انفجار					
کیفیت خرج گذاری					
عدم مهارت کافی آشکار					
عدم وجود نظارت و بازرسی					
وجود گرد زغال					
استفاده از مواد دارای الکتریسیته ساکن و آتش‌زا					

جدول پ-۱۴: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در وجود گرد زغال سنگ

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
اختلال در شبکه تهویه					
عدم تهویه مناسب					

جدول پ-۱۵: پرسشنامه پارامترهای مؤثر در اختلال در شبکه تهویه

پارامتر	بدون اهمیت	کم اهمیت	اهمیت متوسط	با اهمیت	بسیار با اهمیت
اختلال در لوله‌های هوای فشرده					
از کار افتادن فن					
آسیب دیدگی در داکت‌های انتقال هوا					

پیوست ب: پرسشنامه شماره ۲

کارشناس محترم شرکت زغال سنگ البرز شرقی

با سلام

احتراماً با توجه به پرسشنامه قبلی که در راستای تعیین اهمیت و در نهایت محاسبه احتمال وقوع پارامترهای مختلف تأثیرگذار در ریسک تونل سازی به روش چالزنی و انفجار تونل های پیشروی آن شرکت بود، پرسشنامه زیر به منظور تعیین شدت پیامد ۷ رویداد نهایی مؤثر در ریسک تونل سازی تهیه شده است. لذا خواهشمند است با مطالعه دقیق و تخصیص دادن وقت ارزشمندتان، پرسشنامه زیر را تکمیل نمایید. از همکاری شما صمیمانه تشکر می کنم.

با تشکر و تقدیم احترام

روش پاسخ دادن به پرسشنامه و الگوی امتیازدهی

در مقایسه معیار i با معیار j اگر شدت پیامد هر دو معیار یکسان بود عدد ۱ را علامت بزنید. اگر شدت پیامد معیار لرزش هوا (C₂)، ۲ برابر شدت پیامد معیار لرزش زمین (C₃) بود عدد ۲ در سمت راست پرسشنامه (مانند نمونه تکمیل شده در زیر) و یا اگر شدت لرزش زمین (C₃)، ۳ برابر شدت پیامد لرزش هوا (C₂) بود عدد ۳ از سمت چپ پرسشنامه را علامت بزنید که در جدول های زیر این نمونه آورده شده است. به همین ترتیب برای سایر معیارها همین روند را براساس نظر خود علامت بزنید.

معیار i	ترجیح معیار i بر معیار j								شدت پیامد یکسان	ترجیح معیار j بر معیار i								معیار j
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₃
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₄
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₅
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₆
C ₂	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C ₇

جدول پ-۱۶: پرسشنامه ماتریس مقایسه زوجی بین معیارهای تصمیم‌گیری برای تعیین شدت پیامد

C1: پرتاب سنگ	C2: لرزش هوا	C3: لرزش زمین	C4: دزد کردن چال
C5: انفجار ناگهانی	C6: وجود قطعات درشت	C7: وجود قطعات بسیار ریز	

معیار i	ترجیح معیار i بر معیار j								شدت پیامد یکسان	ترجیح معیار i بر معیار j								معیار j
C1	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C2
C1	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C3
C1	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C4
C1	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C5
C1	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C6
C1	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C2	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C3
C2	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C4
C2	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C5
C2	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C6
C2	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C3	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C4
C3	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C5
C3	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C6
C3	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C4	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C6
C4	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C4	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C6
C4	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C5	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C5	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C6	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7
C6	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	C7

ارزش	اولویت‌ها	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 j کمی بیشتر است.
۵	شدت پیامد قوی	شدت پیامد معیار i نسبت به j بیشتر است.
۷	شدت پیامد خیلی قوی	شدت پیامد معیار i خیلی بیشتر از j است.
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 تدریجی را نشان می‌دهد مثلاً ۸، بیانگر شدت پیامد زیادتر از ۷ و پایین‌تر از ۹ برای i است.

Abstract

Tunneling with the use of drilling and blasting is the most important method than the mechanical technique due to the less initial cost. Obviously, this kind of tunneling method is always faced with a significant risk in coal mining, which, if not well managed, can lead to irreparable damage to life and financial, as well as to prolong and increase its cost. Therefore, by recognizing the risks and proper management, responses to risks can be taken as an effective step to reduce accidents and optimize the blast operation. In this thesis, with the purpose of identifying, assessing, classifying risks can be prevented them from occurring by controlling the root causes of the main risks, and or reduced the severity of the effect. With studding of past research and data collection, risk related to drilling and blasting method of tunneling industrial mineral mines in the Bornaki Coal Mine Complex were identified. The main risks and the causes of their creation are called final (top) Events, intermediate and basic event that they are plotted in a fault free format. The final events affecting the risk of tunneling by drilling and blasting were classified into seven groups including fly rock, air vibration, earthquake, misfire, sudden explosion, large parts and very small parts. The significance of each basic event was questioned through a questionnaire from relevant experts. Fuzzy theory was applied to weight the root causes in order to determine the probability of the basic and intermediate events and resulting in the final events. Then, the Fuzzy Delphi Hierarchy Analysis method was used to calculate the severity of the effect of each of the final events. The risk matrix was formed for the eventual event. The results showed that the most critical risk associated with the final event are misfire and fly rock, after these the risks the ground vibration, air vibration, presence of very small parts, presence of large parts and sudden explosions are the lower ranks. Further, appropriate responses are given for controlling or reducing the risk.

Keywords: Risk, Fuzzy Fault Tree, Tunneling, Drilling and Blasting, Bornaki Mine Complex.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces

**Risk management in small section tunneling projects (Case study:
Bornaki mine complex, Eastern Alborz Coal Company (EACCO))**

By: Javad Rajabi

Supervisors:

Dr. Morteza Javadi Estahbanati

Dr. Mohammad Ataei

Advisor:

Dr. Amir Saffari

February 2022