





دانشگاه شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطا

زینب جهانبانی

اساتید راهنما

دکتر محمد عطایی

دکتر فرهنگ سرشکی

استاد مشاور

مهندس کرامت قنبری

شهریور ۱۳۹۴

تقدیم به

پدر و مادر بزرگوارم که در طول زندگی از هیچ تلاشی برای موفقیتم فروگذار نبوده‌اند،

استادانم که شوق هر چه بیشتر آموختن را در من زنده کردند؛

و برادر و خواهرم که وجودشان شادی بخش و صفایشان مایه آرامش من است.

تقدیر و تشکر

در درجه اول پرودگار متعال را سپاس می‌گویم که توفیق اجرای این پایان‌نامه را تحت عنوان پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، عنایت فرمود. آرزو دارم این تحقیق و تحقیق‌های دیگری که انجام خواهیم داد بهانه‌ای برای کشف قدرت بی‌انتهایش و حرکتی در جهت رضایی او باشد.

به حکم وظیفه و ادب باید از بزرگوارانی که در مراحل مختلف تحقیق مرا یاری رساندند تشکر و قدردانی نمایم :

از جناب آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر فرهنگ سرشکی که راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و مشوق همیشگی من در طول انجام این پروژه بودند.

جناب آقای مهندس کرامت قنبری (مدیریت محترم واحد HSE شرکت معادن زغال‌سنگ البرز شرقی) که زحمت مشاوره این پروژه را بر عهده داشتند.

جناب آقایان دکتر رضا خالوکاکائی و دکتر سید رحمان ترابی که زحمت داروی این پروژه را متقبل شدند.

پدر و مادر عزیزم، این معلمان بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یابوری بی‌چشم‌داشت برای من بوده‌اند و همواره با دعای خیر و تشویقشان در زندگی یاری‌ام نمودند.

و خواهر مهربانم خانم زهرا جهانبانی و دوست عزیزم خانم حدیث مرادی و خانواده محترم ایشان که در این دوره همواره همراه و پشتیبان من بوده‌اند.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب زینب جهانبانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن از دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: ارزیابی ریسک خود سوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطا تحت راهنمایی آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر فرهنگ سرشکی 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » 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 افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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

خودسوزی یا اکسیداسیون مستقیم زغال سنگ یکی از مشکلات مهم در معادن زغال سنگ محسوب می شود. پدیده خودسوزی زغال سنگ یک خطر جدی و دارای نتایج زیان بار اقتصادی، پیامدهای نامطلوب زیست محیطی و خسارت ها و مشکلات ناخواسته در زمینه سلامتی است. برای جلوگیری از این نتایج، فرآیندهایی که منجر به وقوع این پدیده می شوند باید درک و سپس اقدامات لازم برای جلوگیری از آن به عمل آید. هدف از مطالعه حاضر ارزیابی ریسک خودسوزی با استفاده از روش تحلیل درخت خطا در محیط فازی در معادن زغال سنگ است.

در این تحقیق ابتدا سابقه علمی موضوع مورد بررسی قرار گرفته و مهم ترین پارامترها و علل مؤثر در خودسوزی زغال سنگ شناسایی شده اند. سپس با استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA) به ریشه یابی خطر خودسوزی زغال سنگ پرداخته شد. به منظور محاسبه احتمال رویدادهای اساسی و در نهایت رسیدن به نرخ احتمال وقوع رویداد نهایی (خطر خودسوزی زغال سنگ) و با توجه به اینکه رفتار خودسوزی زغال پیچیده بوده و دستیابی به احتمال دقیق رویدادهای اساسی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است، برای تخصیص وزن احتمالات به رویدادهای اساسی از منطق و اعداد فازی استفاده شد. مراحل منطق فازی با انتخاب تیمی متشکل از کارشناسان مجموعه معادن شرکت زغال سنگ البرز شرقی، آغاز و به برآورد نرخ احتمال رویدادهای اساسی ختم شد. برای برآورد احتمال از فرمول توصیه شده توسط انیسواوا استفاده شد. پس از آن نرخ رویداد نهایی با استفاده از روابط مربوطه محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه فاسل-وسلی، مجموعه های برشی حداقل (MCS) رده بندی و بحرانی ترین آنها نیز مشخص شدند.

نتایج نشان می دهد که احتمال وقوع خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره در مجموعه معادن زغال سنگ البرز شرقی ۲۴ درصد و در انباشتگاه های زغال آن در سطح زمین ۱۳ درصد است که

این میزان سطح ریسک بسیار بالایی برای کارکنان درگیر در این صنعت مهم و حیاتی می‌باشد. لذا با توجه به تعیین مجموعه‌های برشی حداقل بحرانی، روش‌های کنترلی به منظور کاهش تأثیرات منفی و جلوگیری از وقوع صدمات و خسارات جانی و مالی پیشنهاد و ارائه شد.

کلمات کلیدی: خودسوزی، معادن زغال‌سنگ، ارزیابی ریسک، روش تحلیل درخت خطا (FTA)، منطق فازی، رویداد اساسی، رویداد نهایی، مجموعه‌های برشی حداقل (MCS).

مقالات مستخرج از پایان نامه

مقالات کنفرانسی چاپ شده

• جهانبانی ز، عطائی م، سرشکی ف و قنبری ک، (۱۳۹۴)، "روش ها و شاخص های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ به منظور کاهش اثرات زیست محیطی آن"، همایش ملی مدیریت محیط زیست و توسعه پایدار، مرکز همایش های بین المللی دانشگاه بهشتی، تهران.

• جهانبانی ز، عطائی م و سرشکی ف، (۱۳۹۴)، "تأثیرات زیست محیطی، دلایل و روش های پیشگیری از خودسوزی زغال سنگ در مناطق ریزشی تونل های معادن زیرزمینی زغال سنگ"، سومین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱: کلیات تحقیق	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مسأله	۳
۳-۱- ضرورت تحقیق	۴
۴-۱- اهداف تحقیق	۵
۵-۱- ساختار تحقیق	۶
فصل ۲: مکانیزم خودسوزی زغال سنگ و بررسی تأثیر پارامترها و عوامل مختلف بر آن	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- چگونگی پیدایش و نحوه تشکیل زغال سنگ	۱۱
۳-۲- انواع آتش سوزی در معادن	۱۳
۱-۳-۲- آتش سوزی باز	۱۴
۲-۳-۲- آتش سوزی داخلی یا خودسوزی	۱۴
۴-۲- مکانیزم خودسوزی زغال سنگ	۱۴
۱-۴-۲- اکسیداسیون در دمای پایین	۱۵
۲-۴-۲- رطوبت	۱۷
۵-۲- بررسی پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ	۱۸
۱-۵-۲- پارامترهای ذاتی	۱۹
۲-۵-۲- پارامترهای زمین شناسی	۳۰
۳-۵-۲- پارامترهای معدنکاری	۳۳
۶-۲- مناطق مستعد بروز پدیده خودسوزی در معادن زغال سنگ	۴۰
۱-۶-۲- منطقه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی	۴۰
۲-۶-۲- منطقه استخراج در روش اتاق و پایه	۴۱
۳-۶-۲- انباشت زغال	۴۴
۴-۶-۲- پایه های مرزی جانبی	۴۴
۵-۶-۲- زغال برجا	۴۵
۶-۶-۲- انباشت گاه های باطله در سطح زمین	۴۵
۷-۲- تأثیرات زیست محیطی، اجتماعی، فیزیکی و اقتصادی خودسوزی زغال سنگ	۴۹
۱-۷-۲- تأثیرات زیست محیطی	۴۹
۲-۷-۲- تأثیرات اجتماعی	۴۹

۴۹.....	۲-۷-۳- تأثیرات فیزیکی
۵۱.....	۲-۸- جمع‌بندی
۵۳.....	فصل ۳: بررسی سابقه علمی موضوع
۵۴.....	۳-۱- مقدمه
۵۴.....	۳-۲- بررسی سابقه علمی خودسوزی
۵۷.....	۳-۳- روش‌های کیفی و کمی ارزیابی ریسک
۵۷.....	۳-۳-۱- روش‌های کیفی
۶۰.....	۳-۳-۲- روش‌های کمی
۶۳.....	۳-۴- بررسی سابقه علمی روش تحلیل درخت خطای فازی
۷۲.....	۳-۵- جمع‌بندی
۷۵.....	فصل ۴: مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال‌سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی
۷۶.....	۴-۱- مقدمه
۷۷.....	۴-۲- تعاریف و مفاهیم
۷۹.....	۴-۳- مدیریت ریسک
۸۰.....	۴-۳-۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک
۸۰.....	۴-۳-۲- شناسایی ریسک
۸۱.....	۴-۳-۳- تحلیل و ارزیابی ریسک
۸۲.....	۴-۳-۴- پاسخ به ریسک
۸۳.....	۴-۳-۵- نظارت و کنترل ریسک
۸۴.....	۴-۴- مروری بر روش تحلیل درخت خطا
۸۴.....	۴-۴-۱- کاربردهای روش
۸۶.....	۴-۴-۲- مفاهیم و نمادهای مورد استفاده در درخت خطا
۸۹.....	۴-۴-۳- اصول روش
۹۰.....	۴-۴-۴- مراحل روش تحلیل درخت خطا
۹۲.....	۴-۴-۵- مزایا و معایب روش تحلیل درخت خطا
۹۴.....	۴-۵- تئوری فازی
۹۴.....	۴-۵-۱- مجموعه‌های فازی
۹۶.....	۴-۵-۲- منطق فازی
۹۶.....	۴-۵-۳- سیستم فازی
۱۰۱.....	۴-۶- ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال‌سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی
۱۰۱.....	۴-۶-۱- منطقه مورد مطالعه
۱۰۷.....	۴-۶-۲- روش بررسی
۱۳۱.....	۴-۶-۲- کنترل و پاسخ به ریسک‌های بحرانی
۱۳۹.....	۴-۷- جمع‌بندی
۱۴۳.....	فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۴۴.....	۵-۱- نتیجه گیری
۱۴۹.....	۵-۲- پیشنهادها
۱۵۰.....	منابع فارسی
۱۵۲.....	منابع لاتین

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

شکل ۱-۱: مراحل انجام تحقیق و ساختار پایان‌نامه	۷
شکل ۱-۲: مراحل تشکیل زغال و زغال با درجات بلوغ مختلف	۱۳
شکل ۲-۲: مراحل خودسوزی زغال سنگ	۱۸
شکل ۳-۲: نمایش نتایج آزمایش حرارت حجمی برای زغال سنگ دارت‌بروک	۲۰
شکل ۴-۲: وابستگی نرخ اکسیداسیون زغال منطقه هانتروالی به اندازه ذرات در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد	۲۳
شکل ۵-۲: وابستگی نرخ اکسیداسیون زغال منطقه هانتروالی به اندازه ذرات در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد	۲۴
شکل ۶-۲: نرخ خودسوزی زغال به عنوان تابعی از زمان در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد	۲۶
شکل ۷-۲: رابطه بین خودسوزی با خاکستر محتوی زغال سنگ‌های استرالیا	۲۸
شکل ۸-۲: ارتباط بین دمای زغال و سرعت پیشروی جبهه کار	۳۵
شکل ۹-۲: محل و نقاط نظارت و پایش در یک پهنه روش جبهه کار طولانی	۳۸
شکل ۱۰-۲: منطقه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی - خطرات	۴۱
شکل ۱۱-۲: سیستمی از پهنه‌های جدا شده به وسیله پایه‌های حائل و نواحی وقوع خطر خودسوزی	۴۳
شکل ۱۲-۲: آرایشی از پهنه‌ها و نواحی وقوع خطر خودسوزی در منطقه استخراج شده	۴۳
شکل ۱۳-۲: (الف) نمایش شماتیک یک انباشت‌گاه، (ب) هندسه انباشت‌گاه	۴۶
شکل ۱۴-۲: خودسوزی انباشت‌گاه در یک معدن در هانتروالی	۴۶
شکل ۱۵-۲: باطله کربن‌دار در معرض خودسوزی شدید. با وجود سوختن شدید، نشانه کمی در بالای سطح انباشت‌گاه وجود دارد	۴۷
شکل ۱۶-۲: مدل پیش‌بینی تمرکز اکسیژن در یک انباشت‌گاه باطله پس از ۶ ماه	۴۷
شکل ۱۷-۲: مدل پیش‌بینی دما در انباشت‌گاه باطله پس از یک سال	۴۸
شکل ۱۸-۲: مدل پیش‌بینی پروفیل دما با دو انباشت‌گاه باطله هم‌جوار	۴۸
شکل ۱۹-۲: نمونه‌هایی از تأثیرات خودسوزی زغال سنگ	۵۰
شکل ۲۰-۲: نمونه‌هایی از تأثیرات خودسوزی زغال سنگ	۵۰
شکل ۱-۳: درخت خطای سیستم تهویه معدن گانسو	۶۹
شکل ۲-۳: نمودار مربوط به اعداد فازی مثلثی متغیرهای زبانی	۷۰
شکل ۱-۴: فرآیند مدیریت ریسک	۷۹
شکل ۲-۴: نمادهای مورد استفاده در ساختار درخت خطا	۸۹
شکل ۳-۴: عدد فازی مثلثی	۹۵
شکل ۴-۴: عدد فازی دوزنقه‌ای	۹۵
شکل ۵-۴: نمایش یک سیستم فازی	۹۷

- شکل ۴-۶: مقایسه روش‌های مختلف غیر فازی کردن ۱۰۰
- شکل ۴-۷: مراحل اجرای تحقیق ۱۰۷
- شکل ۴-۸: درخت خطای مربوط به خطر خودسوزی زغال‌سنگ در معدن زیرزمینی طزره ۱۱۰
- شکل ۴-۹: درخت خطای مربوط به خطر خودسوزی در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین ۱۱۰
- شکل ۴-۱۰: پنج مرحله منطق فازی در تعیین نرخ رویدادها ۱۱۱
- شکل ۴-۱۱: متغیرهای زبانی مورد استفاده کارشناسان ۱۱۴
- شکل ۴-۱۲: نمودار میزان اهمیت برش‌های حداقل در خطر خودسوزی زغال‌سنگ در معدن زیرزمینی طزره ۱۳۰
- شکل ۴-۱۳: نمودار میزان اهمیت برش‌های حداقل در خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین ۱۳۰

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲: تقسیم‌بندی زغال سنگ‌ها، درجات و خصوصیات مربوط به آنها	۱۲
جدول ۲-۲: طبقه‌بندی تمایل به خودسوزی ذاتی	۱۹
جدول ۳-۲: رابطه بین نرخ خودسوزی و اکسیداسیون زغال سنگ	۲۱
جدول ۱-۳: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با خودسوزی	۵۵
جدول ۲-۳: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با درخت خطای فازی	۶۴
جدول ۱-۴: پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ در لایه‌های زغالی منطقه پشکلات	۱۰۴
جدول ۲-۴: پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ در لایه‌های زغالی منطقه کلاریز	۱۰۵
جدول ۳-۴: پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ در لایه‌های زغالی منطقه رزمجا	۱۰۶
جدول ۴-۴: رویدادهای میانی، توسعه‌نیافته و هم‌چنین رویدادهای اساسی خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۰۸
جدول ۵-۴: رویدادهای میانی، توسعه‌نیافته و هم‌چنین رویدادهای اساسی خطر خودسوزی در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین	۱۰۹
جدول ۶-۴: جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان	۱۱۲
جدول ۷-۴: مشخصات مربوط به کارشناسان شرکت کننده در نظرسنجی	۱۱۳
جدول ۸-۴: نمرات وزنی کارشناسان انتخاب شده	۱۱۳
جدول ۹-۴: وزن متغیرهای زبانی در کمی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی	۱۱۶
جدول ۱۰-۴: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۱۶
جدول ۱۱-۴: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین	۱۱۶
جدول ۱۲-۴: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۱۷
جدول ۱۳-۴: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۱۷
جدول ۱۴-۴: نتایج حاصل از نظرسنجی توسط کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین	۱۱۸
جدول ۱۵-۴: نتایج حاصل از نظرسنجی توسط کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۱۹

جدول ۴-۱۶: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۲۰
جدول ۴-۱۷: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	۱۲۱
جدول ۴-۱۸: نتایج حاصل از غیر فازی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۲۳
جدول ۴-۱۹: نتایج حاصل از غیر فازی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	۱۲۳
جدول ۴-۲۰: نرخ احتمال هر رویداد پایانی در تبدیل اعداد امکانی به احتمالی (FP) برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۲۴
جدول ۴-۲۱: نرخ احتمال هر رویداد پایانی در تبدیل اعداد امکانی به احتمالی (FP) برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	۱۲۵
جدول ۴-۲۲: مجموعه های برشی حداقل برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۲۶
جدول ۴-۲۳: مجموعه های برشی حداقل برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	۱۲۶
جدول ۴-۲۴: نرخ احتمال رویدادهای نهایی و میانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۲۷
جدول ۴-۲۵: نرخ احتمال رویدادهای نهایی و میانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	۱۲۷
جدول ۴-۲۶: نرخ احتمال، میزان اهمیت و رده بندی مجموعه های برشی حداقل و مقادیر $FVI(i)$ برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	۱۲۸
جدول ۴-۲۷: نرخ احتمال، میزان اهمیت و رده بندی مجموعه های برشی حداقل و مقادیر $FVI(i)$ برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	۱۲۹
جدول ۴-۲۸: میزان هوای لازم بر اساس مقدار گازهای متان و دی اکسید کربن متصاعد شده	۱۳۷

فصل ۱: کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

زغال سنگ، بعد از نفت، بیشترین سهم را در سبد انرژی جهان دارد. مهم ترین کاربرد زغال سنگ در دنیا برای تأمین انرژی و سوخت نیروگاه ها است. هم اکنون ۴۰٪ برق جهان در نیروگاه های زغال سنگی تولید می شود. علاوه بر این از زغال سنگ در تهیه کک برای صنایع فولادسازی و غیره استفاده می شود.

معدنکاری زغال سنگ با مخاطرات زیادی همراه است. به عنوان مثال، از اوایل قرن هجده میلادی که در انگلستان معدنکاری زیرزمینی زغال سنگ شروع شد، انفجار گاز متان به عنوان یکی از مخاطرات مهم معدنکاری زیرسطحی زغال سنگ مطرح گردید. علاوه بر انفجار گاز متان، معدنکاری زغال سنگ با مخاطرات دیگری مانند تخریب سفره های آب زیرزمینی، ایجاد گودال پس از برداشت مواد معدنی، آلودگی های زیست محیطی و خودسوزی زغال^۱ همراه است (کیارستمی، ۱۳۹۳).

بنابراین شناسایی، ارزیابی و کنترل این خطرات امری ضروری است. به همین دلیل در این تحقیق به بررسی و ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال سنگ با استفاده از روش مدیریتی تحلیل درخت خطا^۲ پرداخته می شود.

در این فصل ابتدا مسأله مورد نظر بررسی و سپس هدف از انجام مطالعه، ضرورت انجام آن و در نهایت ساختار این تحقیق بیان شده است.

^۱- Coal Spontaneous Combustion

^۲- Fault Tree Analysis= FTA

۱-۲- بیان مسأله

آتش‌سوزی‌های ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ، یکی از مشکلات مهم در صنعت معدنکاری زغال در سراسر جهان محسوب می‌شود که نه تنها زندگی معدنکاران را به خطر می‌اندازد، بلکه باعث به وجود آمدن آلودگی‌های زیست‌محیطی و افزایش هزینه‌های اقتصادی می‌شود (Mohalik et al., 2009). پارامترهای زیادی بر قابلیت خودسوزی زغال مؤثر هستند که آن‌ها را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی کرد (Singh, 2013):

الف) مشخصات ذاتی زغال شامل: نوع زغال، درجه دگرگونی زغال، ترکیب پتروگرافی، خواص فیزیکی و دانه‌بندی و درصد مواد فرار و گوگرد خودسوزی قبلی.

ب) مشخصات زمین‌شناسی شامل: ضخامت لایه، شیب لایه، عمق لایه، ضخامت طبقات پوششی، استحکام و مقاومت زغال کمر بالا و کمر پایین.

ج) مشخصات معدنکاری که روش استخراج، تهویه، عرض پهنه استخراجی، چگونگی پر کردن محل‌های استخراج‌شده و باقی‌مانده زغال استخراج نشده را شامل می‌شود.

می‌توان با شناخت، ارزیابی و کنترل این پارامترها خودسوزی زغال را پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل کرد. زغال در اثر جذب سطحی^۱ اکسیژن شروع به افزایش دما و درجه حرارت می‌کند. در دمای حدود ۳۰۰-۱۵۰ درجه فارنهایت و در نتیجه افزایش واکنش‌های شیمیایی، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، گاز متان، هیدروژن و هیدروکربن‌های مختلف تولید می‌شود، در ادامه و با افزایش نرخ حرارت در دمای ۷۵۰-۸۰۰ درجه فارنهایت و وجود اکسیژن کافی، احتراق اولیه ایجاد و در نهایت باعث خودسوزی و حریق در معدن می‌گردد.

به طور کلی، سه نوع فرآیند در ایجاد خودسوزی زغال‌سنگ رخ می‌دهد (Yuan & Smith, 2012):

^۱- Adsorption

الف) جذب فیزیکی اکسیژن.

ب) جذب شیمیایی^۱ که منجر به شکل گیری کمپلکس های اکسیژن و زغال می شود و

ج) فرآیند اکسیداسیون که در آن واکنش شیمیایی بین زغال سنگ و اکسیژن اتفاق افتاده و گازهایی مثل مونوکسید کربن، دی اکسید کربن و بخار آب منتشر می شوند.

۱-۳- ضرورت تحقیق

اگرچه در دنیای امروز منابع سوخت اصلی شامل نفت و گازند، ولی زغال سنگ هنوز هم یکی از بزرگترین منابع انرژی مورد استفاده بشر است. بنابراین شناسایی ذخایر زغال سنگ و ارزیابی خطرات آن امری ضروری تلقی می شود.

یکی از خطرات موجود در معادن زغال سنگ، خطر خودسوزی زغال سنگ است. خودسوزی در معادن زغال سنگ علاوه بر وارد کردن خسارات مالی، صدمات جانی و قربانیان زیادی را به همراه داشته است. تمامی معادن زغالی در یک درجه از خودسوزی قرار ندارند، بنابراین ارزیابی ریسک^۲ خودسوزی یک نیاز اولیه برای مدیریت خودسوزی در معادن زغالی است، بنابراین بهره گیری از روش های مؤثر به منظور پیش بینی و پیش گیری از خطر خودسوزی در معادن زغال سنگ، امری لازم به حساب می آید. ارزیابی ریسک یکی از مراحل فرآیند مدیریت ریسک^۳ می باشد که پس از شناسایی خطرات و محاسبه ریسک هر کدام از آنها صورت می گیرد. در ارزیابی، ریسک ها اولویت بندی شده و ریسک های بحرانی تعیین می شوند. سپس اقدامات لازم برای مدیریت، کنترل و کاهش آنها شناسایی می شود. بنابراین ارزیابی ریسک اطلاعاتی را جهت ایجاد یک سیستم ایمن کار فراهم می کند.

^۱- Absorption

^۲- Risk Assessment

^۳- Risk Management

ارزیابی ریسک روش‌های متعددی را شامل می‌شود و چون یک معدن زغال‌سنگ را می‌توان یک سیستم پیچیده به حساب آورد، لذا در این تحقیق برای ارزیابی ریسک خودسوزی از تحلیل درخت خطا که نسبت به روش‌های دیگر برای این سیستم‌ها برتری دارد، استفاده می‌شود.

به کارگیری شیوه متداول در حل درخت خطا می‌تواند منجر به افزایش اطلاعات ناکافی در تحلیل ریسک یا افزایش خطای تخمینی آنالیز شود. هم‌چنین می‌توان گفت که مقوله خودسوزی زغال‌سنگ با عدم قطعیت همراه است؛ لذا برای غلبه بر آن مشکلات، در این تحقیق درخت خطای فازی^۱ به کار می‌رود، بر اطلاعات ناقص است. تئوری فازی و تئوری احتمال، که در آنالیز درخت خطای فازی^۱ به کار می‌روند، بر اطلاعات ناقص کمی و غلط و مبهم مقابله می‌کند.

۴-۱- اهداف تحقیق

در حالت کلی هدف از بررسی و انجام فرآیند مدیریت و ارزیابی ریسک در هر سیستم کمینه کردن احتمال وقوع حوادث و ریسک‌ها می‌باشد. در این تحقیق برای ارزیابی ریسک خودسوزی از روش تحلیل درخت خطا استفاده می‌شود. تحلیل درخت خطا یک تکنیک ارزشیابی است که از آن می‌توان برای تعیین علل مختلف یک رخداد خطرناک پیش‌بینی شده، استفاده کرد. هم‌چنین سعی شده است تا با بررسی منابع علمی معتبر و تحقیقات انجام شده‌ی گذشته به بررسی مسأله مورد تحقیق پرداخته و کلیه پارامترها و علل مؤثر بر خودسوزی زغال تعیین شوند. سپس همه راه‌هایی که می‌توانند سبب بروز این وضعیت ناخواسته و نامطلوب شوند جستجو می‌شود. سپس به صورت نظام‌مند، تمامی دلایل خرابی را در یک ساختار بالا به پائین که شبیه درخت است، مرتب کرده و در نهایت از این ساختار و ادغام آن با تئوری فازی برای محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی^۲ استفاده شده است. در واقع هدف از انجام این مطالعه تعیین احتمال وقوع خودسوزی زغال در معادن زغال‌سنگ، اولویت‌بندی ریسک‌ها و تعیین ریسک‌های بحرانی می‌باشد.

^۱- Fuzzy Fault Tree Analysis= FFTA

^۲- Top Event

۱-۵- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر در ۵ فصل گردآوری شده است، که به شرح زیر می‌باشد:

فصل اول شامل بیان کلی مسأله مورد بررسی، ضرورت و اهداف تحقیق است.

در فصل دوم این تحقیق مکانیزم خودسوزی زغال و تأثیر پارامترهای مختلف بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از مرور کارهای قبلی انجام شده، کلیه این عوامل و علل شناسایی شده و مورد بحث قرار گرفته‌اند. در پایان این فصل نیز تأثیرات خودسوزی بر مسائل زیست محیطی، اجتماعی، فیزیکی و اقتصادی خودسوزی زغال‌سنگ و روش‌ها و شاخص‌های بررسی پتانسیل این پدیده، آورده شده است.

فصل سوم با عنوان بررسی سابقه علمی، به بیان تاریخچه‌ای از کارهای صورت گرفته در زمینه خودسوزی زغال و روش تحلیل درخت خطای فازی پرداخته شده است و روش‌های کیفی و کمی ارزیابی ریسک نیز بیان شدند.

در فصل چهارم، روش تحلیل درخت خطا و نیز منطق فازی مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی به بررسی و ارزیابی خطر خودسوزی زغال‌سنگ در معدن زیرزمینی و نیز در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین در مجموعه معادن شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی پرداخته شده است.

در نهایت در فصل پنجم این تحقیق، نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه شده است.

ساختار کلی پروژه و روند انجام آن در شکل ۱-۱ نشان داده شده است و می‌تواند در مطالعه این

پایان‌نامه مفید باشد.



شکل ۱-۱: مراحل انجام تحقیق و ساختار پایان نامه

فصل ۲: مکانیزم خودسوزی زغال سنگ و بررسی

تأثیر پارامترها و عوامل مختلف بر آن

۲-۱- مقدمه

اگرچه در دنیای امروز منابع سوخت اصلی شامل نفت و گازند، ولی زغال سنگ هنوز هم یکی از بزرگترین منابع انرژی مورد استفاده بشر و یکی از منابع انرژی مهم در جهان به شمار می آید. مجموع ذخایر زغال سنگ های بیتومینه و قهوه ای جهان تا عمق حدود هزار متری حدود ۳۵ تریلیون تن تخمین زده شده است که فراوان ترین سوخت فسیلی جهان به شمار می آید (Bouska, 1981). فهرست کشورهای تولیدکننده زغال سنگ، بر اساس نقد و بررسی آماری از انرژی جهانی در سال ۲۰۰۹، منتشر شده که در آن چین، ایالات متحده آمریکا و استرالیا به ترتیب در رده های اول تا سوم کشورهای تولیدکننده بیش از ۵ میلیون تن زغال سنگ هستند (www.BP.com).

معدنکاری در جهان به دو روش سطحی و زیرزمینی صورت می گیرد. مخاطرات و حوادث موجود در معادن زیرزمینی بیشترین سهم را در بدنام کردن این روش معدنکاری از دیدگاه ایمنی دارند. خودسوزی در زغال سنگ و مواد باطله کربن دار، مشکل مهمی در صنعت زغال سنگ محسوب می شود. خودسوزی زغال می تواند در انباشتگاه های زغال در سطح زمین، در مناطق تخریب شده در زیر زمین، در لایه های زغال در معادن سطحی رخ داده و هم چنین به عنوان خطر مهمی برای ایمنی در معادن زیرزمینی زغال سنگ باشد (Glenn et al., 2015).

صرف نظر از تولید گازهای سمی، سوختن در باطله‌های زغال در زیر زمین می‌تواند یک منبع احتراق برای گاز متان و گرد و غبار موجود در هوای معدن ایجاد کرده و منجر به انفجار شود (Glenn et al., 2015). خودسوز بودن زغال و درجه‌ی خودسوزی آن به پارامترها و عوامل مختلفی بستگی دارد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ، عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری است. پارامترهای ذاتی به عنوان اساسی‌ترین پارامترها نقش بسیار مهمی در خودسوزی زغال دارند. بنابراین شناخت چگونگی پیدایش و نحوه تشکیل زغال سنگ می‌تواند به عنوان کمک مهمی در این زمینه باشد. در ادامه، نحوه تشکیل زغال سنگ، مکانیزم خودسوزی آن و پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۲-۲- چگونگی پیدایش و نحوه تشکیل زغال سنگ

زغال سنگ، سنگی است مرطوب که از نظر وزنی پنجاه درصد و از نظر حجمی هفتاد درصد آن از مواد کربنی تشکیل شده است (Rice, 1993). این سنگ از پیت^۱، یعنی تجمع رسوبات آلی منشاء گرفته از گیاهان، در طی تدفین و سپری کردن مراحل به نام مراحل زغالی‌شدن^۲ تشکیل می‌شود. زغالی‌شدن با نرخ‌ها و در محیط‌های مختلف رخ می‌دهد. آغازکننده مرحله زغالی‌شدن، تجزیه بیوشیمیایی مواد آلی است. اما با افزایش عمق تدفین، دما و فشار زیاد شده و باعث ادامه تغییرات فیزیکیوشیمیایی در زغال می‌شود و در نهایت، زغال با درجه‌های زغال‌شدگی مختلف را به وجود می‌آورد که عبارتند از لیگنیت^۳ (زغال قهوه‌ای- نارس)، ساب بیتومینه^۴ (زغال نیمه‌قیری)، بیتومینه^۵ (زغال قیری)، آنترایست^۶ (زغال سخت)

^۱- Peat

^۲- Coalification

^۳- Lignite

^۴- Sub- Bituminous

^۵- Bituminous

^۶- Anthracite

فصل دوم: کانیزم خودسوزی زغال سنگ و بررسی تاثیر پارامترها و عوامل مختلف بر آن

و گرافیت^۱ (جدول ۱-۲ و شکل ۱-۲). این تغییرات شامل افزایش ارزش حرارتی^۲ و کربن ثابت^۳ و کاهش مواد فرار^۴ و رطوبت^۵ زغال می شود. البته این تغییرات با زمان زمین شناسی نیز در ارتباط می باشد (Rice, 1993).

جدول ۱-۲: تقسیم بندی زغال سنگ ها، درجات و خصوصیات مربوط به آنها (Stach et al., 1975).

Coal Type and Peat		Total Water Content (%)	Energy Content a.f.* (KJ/Kg)	Volatiles d.a.f.** (%)	Vitrinite Reflection in Oil (%)
UNECE	USA (ASTM)				
Peat	Peat				
Ortho-Lignite	Lignite	75	6,700		
Meta-Lignite		35	16,500		0.3
Sub-bituminous Coal	Sub-bituminous Coal	25	19,000		0.45
		10	25,000	45	0.65
Bituminous Coal	High Volatile Bituminous Coal			40	0.75
				35	1.0
	Medium Volatile Bituminous Coal	Hard Coking Coal		20	1.2
	Low Volatile Bituminous Coal			19	1.6
				14	1.9
Anthracite	Semi-Anthracite	3	36,000	10	2.2
	Anthracite				

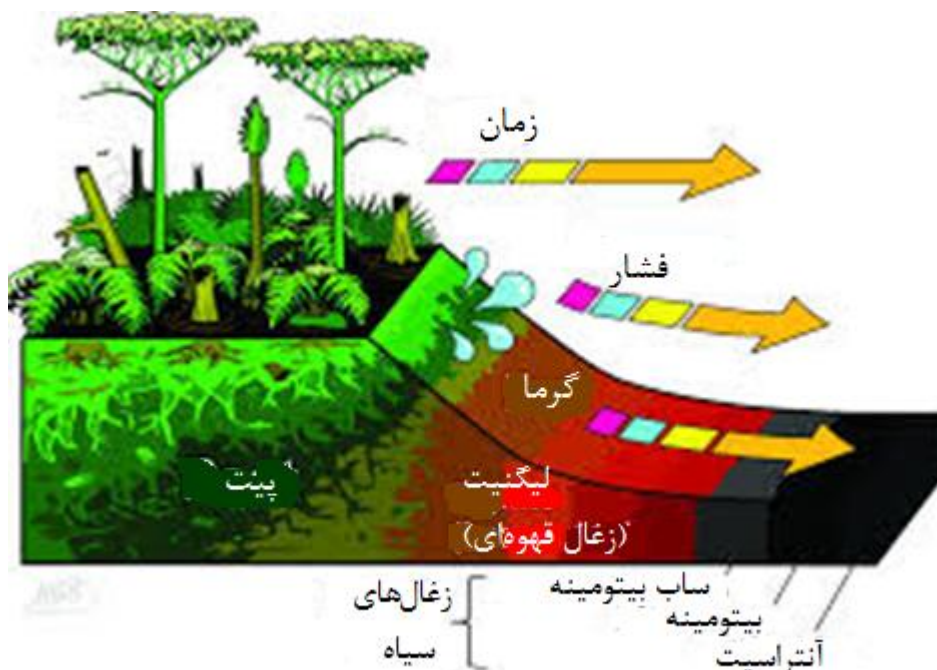
¹- Graphite

²- Heating Value

³- Fix Carbon

⁴- Volatile Matter

⁵- Moisture



شکل ۱-۲: مراحل تشکیل زغال و زغال با درجات بلوغ مختلف (Greb et al., 2006).

طبق جدول ۱-۲، در طی مراحل زغالی شدن، تمام زغال‌ها با درجه‌های زغال‌شدگی مختلف افزایش در مقدار کربن و کاهش در مقدار اکسیژن و هیدروژن را نشان می‌دهند. برای زغال‌های با درجه زغال‌شدگی پایین، کاهش اکسیژن در طی مراحل زغالی شدن غالب است، در حالی که برای زغال‌های با درجه زغال‌شدگی بالا، محتوای هیدروژن به سرعت کاهش می‌یابد. همراه با این تغییرات، مواد فراری مانند آب، گاز دی‌اکسید کربن، نیتروژن و متان با مقادیر مختلف آزاد می‌شود. در طی مراحل اولیه زغالی شدن، مقدار زیاد دی‌اکسید کربن تولید می‌شود ولی در مراحل بعدی، مقدار اندکی گاز نیتروژن و مقادیر زیادی گاز متان تولید می‌شود (Zou et al., 2013).

۳-۲- انواع آتش‌سوزی در معادن

به طور کلی آتش‌سوزی‌ها در معادن به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۲-۳-۱- آتش سوزی باز

این نوع آتش سوزی از طریق وجود یک عامل یا منبع خارجی مانند اصطکاک، آتشباری، جوشکاری، انفجار گاز و اتصال کابل ها در معادن اتفاق می افتد و با چشم قابل دیدن است.

۲-۳-۲- آتش سوزی داخلی یا خودسوزی

نوعی از آتش سوزی است که بدون وجود یک منبع یا عامل خارجی رخ می دهد. در معادن زغال سنگ هر کجا زغال در معرض هوا قرار می گیرد، جذب سطحی اکسیژن رخ می دهد و بدون وجود یک منبع خارجی گرما تولید می شود. اگر گرمای تولید شده از محیط دور نشود، دمای زغال بالا می رود و سرعت واکنش افزایش خواهد یافت. افزایش سرعت واکنش ممکن است باعث شود که زغال شروع به سوختن کند. نرخ گسترش خودسوزی به صورت یک تابع نمایی افزایش می یابد. شرایط لازم برای بروز چنین اتفاقی وجود اکسیژن کافی و نبودن سیستم تهویه صحیح برای انتقال گرمای ایجاد شده می باشد (عطایی، ۱۳۹۰).

خودسوزی نوعی از آتش سوزی است که با چشم قابل مشاهده نیست و در خود زغال سنگ اتفاق می افتد.

۲-۴- مکانیزم خودسوزی زغال سنگ

خودسوزی زغال سنگ خطری بزرگ در عملیات استخراج معادن زیرزمینی زغال سنگ از نظر ایمنی و بهره وری است. اگر چه اکثر مطالعات به اکسیداسیون مواد آلی به عنوان علت اصلی خودسوزی اشاره دارند، اما مکانیزم دقیق آن هنوز به طور کامل به دلیل حضور بسیاری از عوامل داخلی و خارجی مؤثر بر شروع و توسعه خودسوزی درک نشده است (Xie et al., 2011).

فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی که باعث ظهور پدیده خودسوزی می شوند شامل اکسیداسیون زغال سنگ و دیگر مواد کربن دار، جذب رطوبت توسط زغال و واکنش های شیمیایی هستند. این فرآیندهای پیچیده تحت تأثیر عوامل ذاتی یا داخلی زغال سنگ و عوامل خارجی مثل شرایط محیطی، زمین شناسی و شیوه های مدیریت می باشند. اکسیداسیون در دمای پایین زغال در تأمین گرما سهمیه هر چند که

فرآیندهای دیگری نیز ممکن است قابل توجه باشند (Glenn et al., 2015). در ادامه، اکسیداسیون زغال سنگ در دمای پایین و تأثیر رطوبت بر خودسوزی زغال سنگ مورد بحث قرار گرفته است.

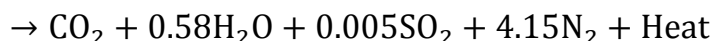
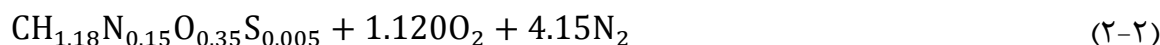
۲-۴-۱- اکسیداسیون در دمای پایین

واکنش بین اکسیژن و زغال سنگ بسیار پیچیده بوده و با وجود بیش از یک قرن تحقیق، مکانیزم دقیق آن هنوز به طور کامل شناخته نشده است. اما مکانیزم پیشنهاد شده برای توصیف این پدیده که چندین فرآیند گرمازا را شامل می‌شود، به شرح زیر است (Glenn et al., 2015):

- جذب فیزیکی اکسیژن بر روی سطح زغال.
 - جذب شیمیایی اکسیژن که منجر به تشکیل ترکیبات زغال و اکسیژن بر روی سطح زغال می‌شود.
 - اکسیداسیون مستقیم که در آن اکسیژن با زغال سنگ دچار واکنش شیمیایی شده و منجر به تولید گازهایی از جمله دی‌اکسید کربن، آب و مونواکسید کربن می‌شود. در دماهای بالاتر، گازهای دیگری مانند هیدروژن، متان، اتان و دیگر هیدروکربن‌ها نیز تشکیل می‌شوند.
- از بین این فرآیندها، فرآیند آخر گرمای بیشتری را نسبت به بقیه تولید می‌کند.
- در ساده‌ترین حالت، اکسیداسیون به صورت واکنش بین اکسیژن و کربن به منظور تشکیل CO_2 و گرما در نظر گرفته می‌شود (معادله ۲-۱):



حرارت تولید شده توسط این واکنش 394 kJ/mol ، که برای زغال سنگ بیتومینه با مواد فرار بالا و ۸۵ درصد کربن معادل $27/9 \text{ kJ/g}$ از زغال سنگ است ($27/9 \text{ MJ/kg}$). با این حال، علاوه بر کربن، اجزاء آلی زغال سنگ نیز شامل هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و واکنش‌های متعدد دیگری می‌توانند به طور همزمان رخ دهند. بنابراین، اکسیداسیون زغال سنگ در هوا می‌تواند به شکل بهتری (معادله ۲-۲) نشان داده شود:



در این واکنش‌ها با فرض احتراق کامل در آنها، تمام کربن به CO_2 تبدیل می‌شود، اما در زغال‌سنگی

که در معرض خودسوزی قرار دارد، مقدار قابل توجهی از CO نیز ممکن است تولید شود (معادله 2-3):



مقدار حرارت تولید شده به وسیله این واکنش 170 kJ/mol می‌باشد.

برخی از CO ناشی از شکست ترکیبات زغال‌سنگ و اکسیژن (تشکیل شده توسط جذب شیمیایی)

تکامل یافته و حتی در غیاب اکسیژن هوا تولید می‌شود. نسبت CO تولید شده با افزایش دما، افزایش

می‌یابد و همچنین گازهای دیگری، از جمله هیدروژن و هیدروکربن‌ها، ممکن است تولید شوند.

واکنش نه تنها با زغال‌سنگ بلکه با دیگر مواد معدنی مرتبط، به ویژه پیریت، و دیگر مواد معدنی

سولفیدی نیز می‌تواند به تولید گرما کمک کند. واکنش پیریت با اکسیژن در حضور آب به صورت معادله

(2-4) بیان می‌شود:



هر چند که گاهی اوقات پیشنهاد شده است که پیریت نقش مهمی در تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ

ایفا می‌کند، اما بعید به نظر می‌رسد که پیریت، به جز در مواردی که با نسبت بالا حضور دارد، یک منبع

اصلی از حرارت و گرما باشد. تجربیات نشان داده است که در سطوح پیریت کمتر از ۵٪، اثر آن بر خودسوزی

زغال‌سنگ می‌تواند نادیده گرفته شود. با این حال، در حالی که پیریت در خودسوزی زغال‌سنگ نسبتاً

بی‌اهمیت است، اما ممکن است به عنوان یک عامل مهم نسبت به مواد کربن‌دار در باطله‌های معدنی به

وفور حضور داشته باشد.

جذب فیزیکی گاز بر روی سطح زغال‌سنگ یک فرآیند گرمازا است، بنابراین می‌تواند به تولید گرما

کمک کند. نیروهای درگیر در جذب فیزیکی بسیار ضعیف‌تر از پیوند شیمیایی که در طول واکنش

اکسیداسیون رخ می‌دهد و در بالا شرح داده شده است، هستند و از این رو گرمای تولید شده به وسیله جذب فیزیکی به نسبت کمتری می‌باشد. جذب فیزیکی با گرمای جذب کمتر از 20 kJ/mol مشخص می‌شود (Glenn et al., 2015).

۲-۴-۲- رطوبت

واکنش رطوبت با زغال سنگ منبع قابل توجهی از گرما است که می‌تواند به طور بالقوه‌ای به خطر خودسوزی کمک کند. دو فرآیند اصلی گرمازا که با رطوبت مرتبط هستند، شامل چگالش بخار آب به آب مایع و جذب آب بر روی سطح داخلی زغال سنگ می‌باشند. رطوبت نیز ممکن است بر واکنش اکسیداسیون تأثیر گذاشته و با برخی مواد معدنی مانند پیریت واکنش دهد.

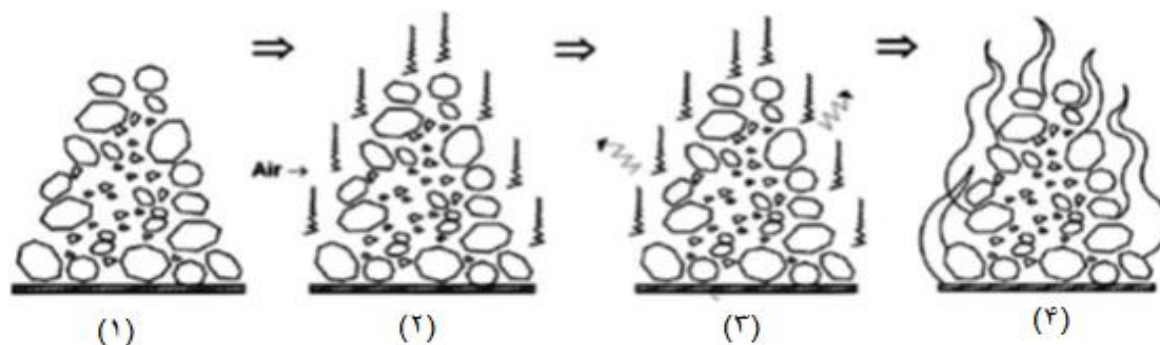
هنگامی که بخار آب به آب مایع متراکم می‌شود، حدود 40 kJ/mol گرما آزاد می‌کند (یا $2/3 \text{ MJ/kg}$). حتی زمانی که آب روی سطح زغال سنگ جذب می‌شود، گرمای بیش‌تری آزاد می‌شود. اگر این گرما تلف نشود، می‌تواند به طور قابل توجهی منجر به افزایش درجه حرارت شود. این دو فرآیند (یعنی تبخیر آب مایع و دفع بخار آب) برگشت‌پذیر بوده و در نتیجه پتانسیل کاهش درجه حرارت را دارا می‌باشند. زغال‌های خشک شده و یا نیمه‌خشک با درجه زغال‌شدگی پایین را می‌توان به طور قابل توجهی با استفاده از جذب رطوبت تحت تأثیر قرار داد.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده و در شرایط آزمایشگاهی، افزایش قابل توجه دما به دلیل تأثیر رطوبت در برخی از زغال سنگ‌های خشک با درجه پایین زغال‌شدگی بسیار بیشتر از زمانی است که زغال سنگ، خود دارای رطوبت باشد (Glenn et al., 2015).

به طور کلی چند گام در فرآیند این واکنش وجود دارد که به رسمیت شناخته شده‌اند. در دمای زیر 40 درجه سانتی‌گراد، واکنش بین زغال سنگ و اکسیژن عمدتاً به علت جذب فیزیکی و شیمیایی اکسیژن در منافذ زغال سنگ است. گام بعدی تشکیل سطح ناپایدار ترکیب‌های اکسیژن زغال سنگ برای تولید

پراکسیدها و هیدروپراکسیدها است. مقدار کمی از محصولات گازی در این درجه حرارت وجود دارد. با افزایش دما بین ۴۰ درجه سانتی گراد و ۷۰ درجه سانتی گراد، ترکیبات ناپایدار اکسیژن به محصولات گازی و ترکیب‌های پایدار اکسیژن شکسته می‌شوند. در درجه حرارت بیش از ۷۰ درجه سانتی گراد ترکیب‌های پایدار اکسیژن باعث اکسیداسیون در زغال سنگ شده و محصولات گازی بیشتری تولید می‌شود که این گازها عمدتاً شامل دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، متان، هیدروژن، اتان، اتیلن و دیگر هیدروکربنها هستند (Xie et al., 2011).

در شکل ۲-۲ مراحل خودسوزی زغال سنگ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: مراحل خودسوزی زغال سنگ - (۱) توده زغالی با دانه‌بندی متفاوت. (۲) خودسوزی اولیه به وسیله نفوذ هوا. (۳) اتلاف گرما به وسیله هدایت، انتقال و تابش. (۴) رسیدن دمای سوختن به یک میزان بحرانی و شروع خودسوزی زغال (Sipila et al., 2012).

۲-۵- بررسی پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

آتش‌سوزی ناشی از خودسوزی در معادن زغال سنگ هم در معادن سطحی و هم زیرزمینی اتفاق می‌افتد. ۷۵٪ از آتش‌سوزی‌ها به علت خودسوزی رخ می‌دهند (Singh, 2013). زغال سنگ ماده‌ای پیچیده با خواص شیمیایی و فیزیکی به طور گسترده متفاوتی، از جمله واکنش است. علاوه بر واکنش ذاتی خود زغال سنگ، عوامل دیگری نیز وجود دارند که بر نرخ اکسیداسیون تأثیر می‌گذارند و شامل پارامترهای ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری هستند (Glenn, 2015).

۲-۵-۱- پارامترهای ذاتی

الف) تمایل به خودسوزی^۱

برخی از زغال سنگ‌ها نسبت به دیگر زغال سنگ‌ها تمایل به خودسوزی بیشتری را از خود نشان می‌دهند. برای ارزیابی استعداد خودسوز بودن زغال و همچنین خطرات موجود در یک لایه یا محیط معدن باید آزمایش‌هایی بر روی زغال معدنکاری شده یا تحت تأثیر عملیات معدنکاری انجام شود (MDG 1006, 2011).

نمونه‌هایی از آزمایش‌های علمی برای تعیین خواص زغال سنگ در رابطه با خودسوزی عبارتند از:

- آزمایش‌های کوچک مقیاس مانند R_{70} و آزمون زغال سنگ مرطوب (یا آزمون بیمیش^۲)
- آزمایش حجمی^۳ برای شبیه‌سازی لایه و شرایط منطقه تخریب.

جدول ۲-۲، یک طبقه‌بندی در رابطه با تمایل به خودسوز بودن زغال سنگ را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲: طبقه‌بندی تمایل به خودسوزی ذاتی (MDG 1006, 2011)

طبقه‌بندی تمایل به خودسوزی ذاتی ^۴ (ISCP) (بر اساس شرایط مناطق کوینزلند ^۵ و نیو ولز جنوبی ^۶)			
میزان R_{70} در نیو ولز جنوبی ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	میزان R_{70} در کوینزلند ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	نرخ تمایل به خودسوزی	کلاس ISCP
$R_{70} < 1$	$R_{70} < 0.5$	کم (L)	I
$1 \leq R_{70} < 2$	$0.5 \leq R_{70} < 1$	کم - متوسط (LM)	II
$2 \leq R_{70} < 4$	$1 \leq R_{70} < 2$	متوسط (M)	III
$4 \leq R_{70} < 8$	$2 \leq R_{70} < 4$	زیاد (H)	IV
$8 \leq R_{70} < 16$	$4 \leq R_{70} < 8$	خیلی زیاد (VH)	V
$16 \leq R_{70} < 32$	$8 \leq R_{70} < 16$	فوق العاده زیاد (UH)	VI
$R_{70} \geq 32$	$R_{70} \geq 16$	بیش از حد زیاد (EH)	VII

¹- Propensity of Spontaneous Combustion

²- Beamish

³- Bulk test

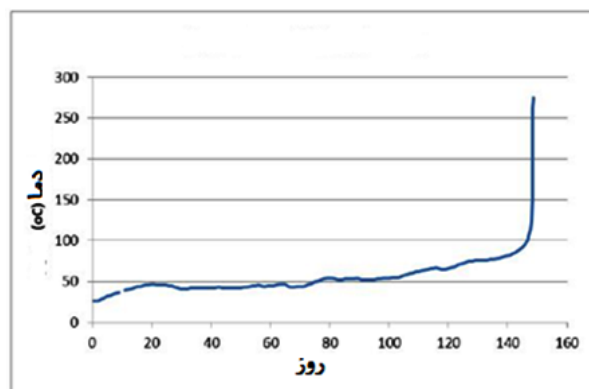
⁴- Intrinsic Spontaneous Combustion Propensity Classification

⁵- Queensland

⁶- New South Wales

در حالی که انجام آزمایش برای تعیین تمایل به خودسوزی در زغال سنگ مفید است، اما خواص زغال سنگ در لایه ها و در نقاط مختلف معدن متفاوت خواهد بود و دقیقاً نمی توان آن را در آزمایشگاه شبیه سازی کرد.

شکل ۲-۳ نمونه ای از آزمایش حجمی را نشان می دهد. این آزمایش بیان می کند که توسعه و پیشرفت خودسوزی زغال سنگ گاهی اوقات نامنظم و غیر قابل پیش بینی است (MDG 1006, 2011).



شکل ۲-۳: نمایش نتایج آزمایش حرارت حجمی برای زغال سنگ دارت بروک^۱ (MDG 1006, 2011)

ب) درجه زغال شدگی^۲

درجه زغال شدگی زغال سنگ به مشخصات بقایای گیاهی که از آن تشکیل شده و مقدار تغییری که مواد آلی آن در طول دوره شکل گیری داشته اند، بستگی دارد. به طور کلی، تمایل به خودسوزی زغال سنگ در ارتباط معکوس با درجه زغال شدگی آن است (Glenn et al., 2015). با کاهش درجه زغال شدگی، سطح اکسیژن، رطوبت و مواد فرار زغال سنگ افزایش یافته و کربن محتوی کاهش می یابد. زغال های با درجه زغال شدگی پایین تر، سرعت اکسیداسیون سریع تری داشته و تمایل به خودسوزی بیشتری را از خود نشان می دهند (MDG 1006, 2011). افزایش مقدار کربن محتوی و با آن کاهش میزان اکسیژن محتوی، شایع ترین معیارهای پذیرفته شده در مورد افزایش درجه زغال شدگی می باشند. به عنوان مثال آنتراسیت با

¹- Dartbrook

²- Rank of Coal

فصل دوم: مکانیزم خودسوزی زغال سنگ و بررسی تاثیر پارامترها و عوامل مختلف بر آن

بالاترین درجه زغال‌شدگی، کندترین فرآیند اکسیداسیون را داراست، در حالی که لیگنیت با درجه زغال‌شدگی پایین، به سرعت اکسید شده و اغلب اظهار داشته‌اند که نمی‌تواند پس از استخراج ذخیره شود (Morris & Atkinson, 1988).

زغال سنگ‌های قهوه‌ای و ساب‌بیتومینه بسیار مستعد به خودسوزی بوده و در طول ذخیره‌سازی و حمل و نقل برای جلوگیری از ابتلا به خودسوزی باید به دقت مدیریت شوند. واکنش نسبی زغال سنگ در جدول ۲-۳، نشان داده شده است. در این جدول نرخ اکسیداسیون در طیف وسیعی از زغال سنگ‌های آمریکا تحت دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقایسه شده‌اند.

اگر چه همبستگی قوی بوده، اما دقیق نیست و در نتیجه نمی‌تواند به تنهایی به عنوان یک پیش‌بینی کننده قابل اعتماد مورد استفاده قرار گیرد، به ویژه زمانی که زغال سنگ‌های با درجه زغال‌شدگی مشابه با هم مقایسه می‌شوند. به عنوان مثال، برخی از زغال سنگ‌ها سوابق شناخته شده‌ای در ارتباط با خودسوزی را دارا هستند، در حالی که دیگر زغال سنگ‌ها با درجه زغال‌شدگی مشابه (حتی از همان معدن) ممکن است هیچ مشکلی را نشان ندهند (Glenn et al., 2015).

جدول ۲-۳: رابطه بین نرخ خودسوزی و اکسیداسیون زغال سنگ (Glenn et al., 2015)

درجه زغال‌شدگی	کربن کل (٪)، خاکستر خشک آزاد شده (daf))	نرخ اکسیداسیون نسبی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد	نرخ خودسوزی نسبی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد
بیتومینه با مواد فرار پایین	۹۰-۹۱	۱/۰	۰/۵
بیتومینه با مواد فرار متوسط	۸۸-۹۰	۱/۶	-
بیتومینه با مواد فرار بالا (A)	۸۲-۸۷	۲/۰	۱/۷
بیتومینه با مواد فرار بالا (B)	۸۰-۸۳	۵/۸	۶/۱
بیتومینه با مواد فرار بالا (C)	۷۹-۸۰	۱۲	۸/۵
ساب‌بیتومینه (A)	۷۷-۷۹	۲۰	۱۴
ساب‌بیتومینه (B)	۷۵	۴۷	۲۸
ساب‌بیتومینه (C)	۷۰-۷۴	۶۸	۱۲
لیگنیت (زغال قهوه‌ای)	۷۳	۲۴۰	۵۱

ج) ترکیبات سنگ شناسی^۱

نتایج به دست آمده از آزمایش های اکسیداسیون ۵ نمونه زغالی از زغال سنگ های با درجه زغال شدگی بالا تا بیتومینه با درجه پایین، در رابطه با ترکیبات سنگ شناسی نشان می دهند که در دمای بالاتر از ۱۶۵ درجه فارنهایت، در بین ماسرال های زغال، اکسینیت^۳ نرخ خودسوزی بیشتری نسبت به ویترینیت^۴ و اینرتینیت^۵ را داراست. (Morris & Atkinson, 1988). هم چنین با افزایش مقادیر ویترینیت و لیپتینیت^۶ تمایل به خودسوزی افزایش و با افزایش اینرتینیت، تمایل زغال به خودسوزی کاهش می یابد.

درجه زغال شدگی نسبت به ترکیبات سنگ شناسی نقش مهم تری را در پدیده خودسوزی زغال دارد

(صفاری، ۱۳۹۲).

د) دما^۷

نرخ اکسیداسیون زغال به طور نمایی با دما افزایش می یابد. متوسط افزایش نرخ اکسیداسیون حدوداً

دو برابر $(\frac{2}{3} - \frac{1}{4})$ به ازای افزایش هر ۱۸ درجه فارنهایت است

(Morris & Atkinson, 1988; Glenn et al., 2015).

ه) تردی و شکنندگی^۸ (اندازه ذرات^۹)

اندازه ذرات نقش مهمی در تعیین نرخ اکسیداسیون زغال سنگ و دیگر مواد کربن دار دارد. با این حال،

میزان تأثیر به شدت به نوع مواد و شرایطی که تحت آن اکسیداسیون رخ می دهد، بستگی دارد

(Glenn et al., 2015).

^۱- Petrographic Composition

^۲- Maceral

^۳- Exinite

^۴- Vitrinite

^۵- Inertinite

^۶- Liptinite

^۷- Temperature

^۸- Brittleness

^۹- Particle Size

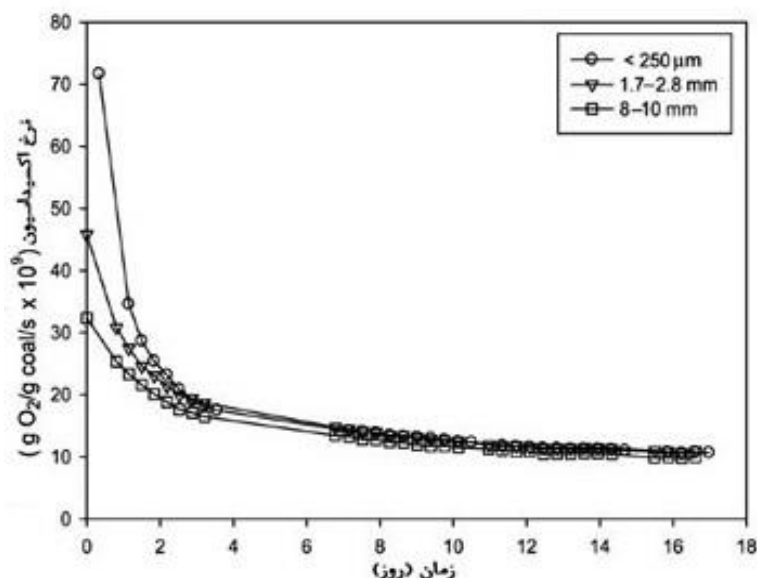
فصل دوم: مکانیزم خودسوزی زغال سنگ و بررسی تاثیر پارامترها و عوامل مختلف بر آن

در طول عملیات معدنکاری، زغال سنگ شکسته شده و سطح تأثیر آن افزایش می‌یابد. هر چه سطح تأثیر افزایش یابد به دلیل مجاورت بیشتر اکسیژن با زغال، خطر خودسوزی افزایش می‌یابد. مناطقی از معدن که احتمال وجود زغال شکسته شده در آنها است، عبارتند از (Morris & Atkinson, 1988؛ MDG 1006, 2011):

- اطراف پایه‌ها یا سنگ‌شکنی‌ها
- اطراف کارگاه‌های استخراج
- اطراف نوار نقاله‌ها
- گسل‌ها و دایک‌ها
- در منطقه تخریب شده

شکل ۲-۴ مقایسه‌ای از نرخ اکسیداسیون در سه اندازه مختلف از زغال‌های منطقه هانتروالی^۱ در دمای

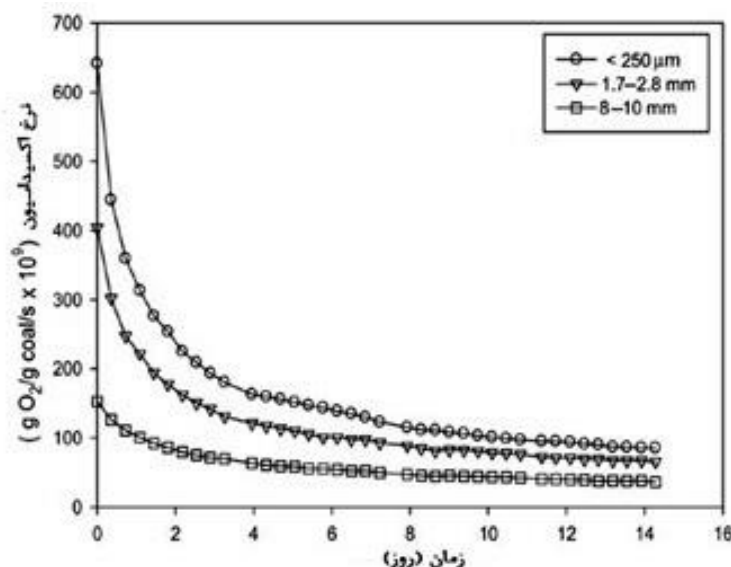
۷۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: وابستگی نرخ اکسیداسیون زغال منطقه هانتروالی به اندازه ذرات در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد (Glenn et al., 2015)

¹ - Hunter Valley

پس از چند روز، میزان اکسیداسیون اساساً مستقل از اندازه ذرات شد، که نشان می‌دهد میزان مصرف اکسیژن به علت واکنش شیمیایی کمتر از میزان اکسیژنی است که می‌تواند از زغال سنگ منتشر شود. در شکل ۵-۲ برای همین زغال سنگ در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، اندازه ذرات اثر بیشتری بر نرخ کلی اکسیداسیون داشت. این تصویر بیان گر آن است که میزان مصرف اکسیژن بیشتر از میزان اکسیژنی است که می‌تواند از واکنش منتشر شود (Glenn et al., 2015).



شکل ۵-۲: وابستگی نرخ اکسیداسیون زغال منطقه هانتروالی به اندازه ذرات در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (Glenn et al., 2015)

(و) رطوبت محتوی^۱

تمام زغال سنگ‌ها دارای رطوبت ذاتی هستند که مقدار آن به درجه زغال‌شدگی بستگی دارد. همچنین رطوبت محتوی لایه زغال با نفوذپذیری^۲ لایه و درجه اشباع^۳ متفاوت است. اگر رطوبت از فضای خالی لایه زهکشی شود، آنگاه با گاز پر خواهد شد (MDG 1006, 2011).

^۱- Moisture Content

^۲- Permeability

^۳- Degree of Saturation

رطوبت می تواند به طور مستقیم بر اکسیداسیون مواد کربن دار تأثیر بگذارد، اما بسیاری از گزارش ها در تناقض با این مسأله هستند. برخی از تحقیقات نشان داده اند که رطوبت باعث افزایش نرخ اکسیداسیون شده، در حالی که دیگر تحقیقات اظهار دارند که نرخ اکسیداسیون در حضور رطوبت کاهش یافته است. در یک مطالعه جامع از زغال سنگ لیگنیت از داکوتای شمالی^۱ در ایالات متحده، بیان شد که نرخ اکسیداسیون با افزایش رطوبت تا حدود ۲۰٪، افزایش می یابد، اما پس از آن در رطوبت محتوی بالاتر، کاهش یافته است. همچنین در مطالعه دیگری که بر روی زغال سنگ های بیتومینه انجام شد، دریافتند که نرخ اکسیداسیون در میزان رطوبت محتوی خاصی به بالاترین میزان خود رسیده است. برخی دیگر از محققان ادعا می کنند که رطوبت اثر کاتالیزوری در واکنش اکسیداسیون داشته و به واکنش سرعت می بخشد (Glenn et al., 2015).

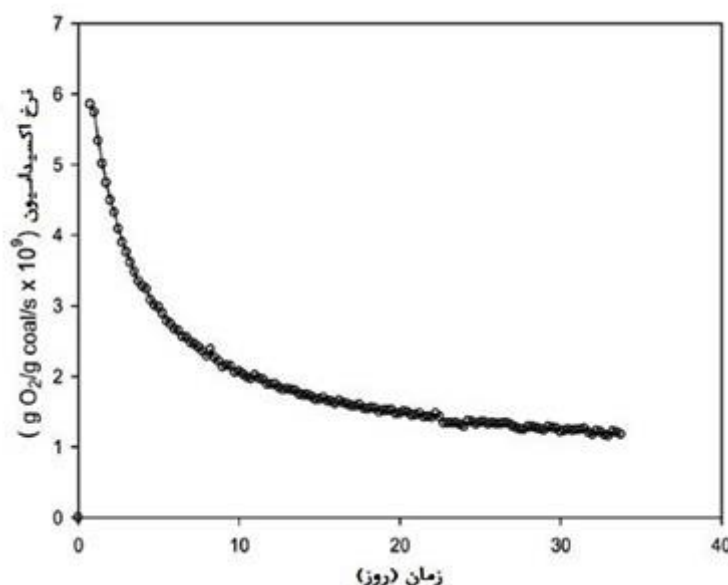
رطوبت همچنین می تواند به طور غیر مستقیم بر میزان اکسیداسیون تأثیر بگذارد. گرمای تولید شده از طریق جذب سطحی می تواند باعث افزایش دما شده و در نتیجه افزایش نرخ اکسیداسیون را منجر شود (Glenn et al., 2015).

بنابراین به طور کلی بسته به شرایط معدن، رطوبت می تواند موجب حذف یا اضافه شدن گرما شود. تبخیر آب از سطح به حرارت نیاز دارد (گرمای نهان تبخیر). این حرارت گرفته شده از سطح باعث خنک شدن و افت درجه حرارت بر روی سطح زغال سنگ می شود. از سوی دیگر، اگر بخار آب بر روی سطح زغال سنگ متراکم شود، گرمای حاصل از تراکم (در تقابل با تبخیر) باعث افزایش دمای سطح زغال سنگ شده و نرخ خودسوزی و اکسیداسیون افزایش می یابد (MDG 1006, 2011).

^۱ - North Dakota

ز) عمر زغال سنگ^۱

اکسیداسیون در دمای پایین زغال سنگ و دیگر مواد باطله‌ای که از آن مشتق شده‌اند، دارای نرخ کاهشی در طول زمان مشخص است. در شکل ۲-۶، نرخ اکسیداسیون نمونه‌ای از زغال سنگ به عنوان تابعی از زمان در درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است.



شکل ۲-۶: نرخ خودسوزی زغال به عنوان تابعی از زمان در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد (Glenn et al., 2015)

نرخ اکسیداسیون مواد تازه، زمانی دارای بیشترین مقدار است که برای اولین بار در معرض اکسیژن قرار گرفته، اما به سرعت و در طی یک دوره نسبتاً کوتاه کاهش می‌یابد. نرخ اکسیداسیون با گذشت زمان کاهش می‌یابد و بعد از گذشت مدتی دارای مقادیر محدودی است. اگر چه ممکن است انتظار رود که این نرخ در نهایت به صفر کاهش می‌یابد، اما آزمایش‌ها نشان داده است که اکسیداسیون می‌تواند در طول سال‌های بسیاری ادامه یابد. به عنوان مثال در آزمایش انجام شده توسط پانک^۲ و تارابا^۳ در سال ۱۹۹۶، نرخ اکسیداسیون قابل توجهی در نمونه‌ها پس از ۳ سال قرار گرفتن در معرض هوا اندازه‌گیری شد. یا حتی در

^۱- Coal Ageing

^۲- Panek

^۳- Taraba

آزمایش دیگری که توسط بیر^۱ در سال ۱۹۹۴ انجام شد، مشاهده شد که اکسیداسیون پس از ۳۵ سال همچنان ادامه داشت (Glenn et al., 2015).

ج) پیریت محتوی^۲

از انتشار اولین مقاله در رابطه با خودسوزی توسط پلات^۳ در سال ۱۶۸۶ تا اواسط قرن نوزدهم، فرض بر این بود که سولفور^۴ موجود در پیریت علت اصلی خودسوزی است. با این حال، مشاهده شد که زغال سنگ حتی در غیاب سولفید نیز اکسیژن را جذب کرده و خودسوزی اتفاق می افتد. با انجام تحقیقات بیشتر و اصلاح این دیدگاه، نظریه فعلی حاکی بر این است که پیریت نقشی فرعی در پیشرفت خودسوزی را ایفا می کند (Morris & Atkinson, 1988).

مواد معدنی حاوی سولفور، پیریت آهن (FeS_2) و مارکازیت^۵ در زغال سنگ ممکن است به صورت رگه ای بسیار کریستاله و یا ریز دانه در سراسر لایه وجود داشته باشند. هنگامی که به صورت رگه ای ظاهر می شوند، سطحی از زغال که در معرض اکسیژن قرار می گیرد نسبتاً کوچک بوده و نرخ اکسیداسیون نیز کوچک می باشد. اما زمانی که مواد معدنی به صورت ریزدانه هستند، سطح قابل توجهی از زغال در معرض اکسیژن قرار گرفته و گرمای بیشتری تولید شده که سبب افزایش دمای زغال و همچنین افزایش نرخ خودسوزی می شود. به طور کلی پیریت زمانی اثر قابل توجهی بر اکسیداسیون دارد که تمرکز آن بیشتر از ۲٪ باشد (MDG 1006, 2011).

^۱- Beier

^۲- Pyrite Content

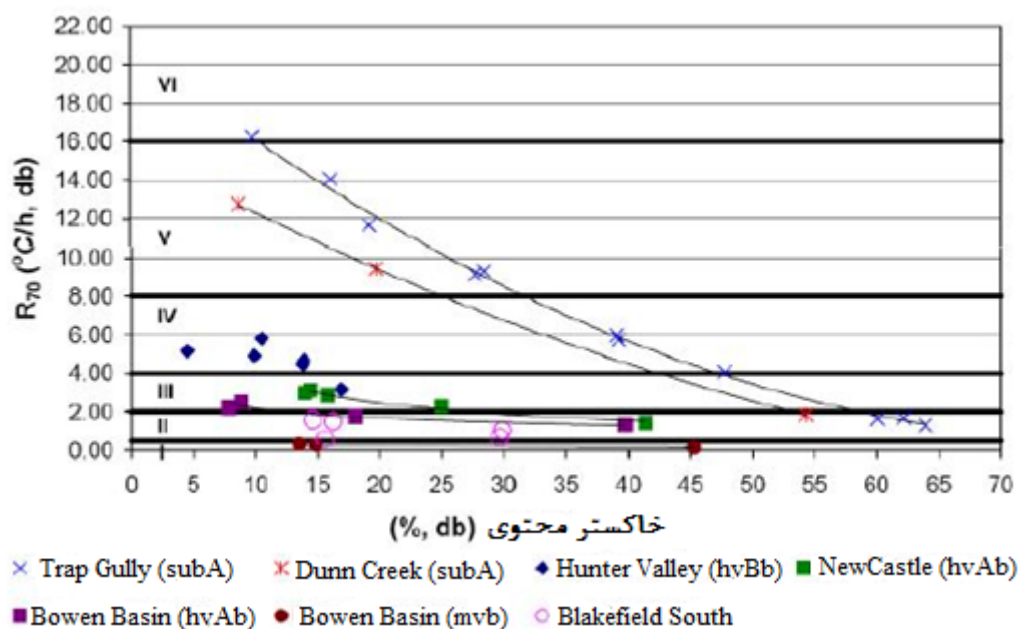
^۳- R. Plott

^۴- Sulphur

^۵- Marcasite

ط) خاکستر محتوی^۱

به طور کلی وجود مقادیر کم از مواد غیر قابل احتراق در زغال سنگ به معنی تمایل پایین تر به خودسوزی است. در زغال سنگ های حاوی خاکستر زیاد، به دلیل وجود برخی ترکیبات مانند اکسید آلومینیوم^۲، سیلیس^۳ و کلسیم کلراید^۴ که درصد زیادی از خاکستر را تشکیل می دهند باعث یک اثر تأخیری در اکسیداسیون شده و در نتیجه R_{70} دارای مقدار کمی بوده و تمایل به خودسوزی کاهش می یابد. با این حال برخی ترکیبات خاکستر مانند ترکیبات آهن، کربنات ها و آهک می توانند باعث افزایش واکنش پذیری شده و اثر شتاب دهنده ای در خودسوزی به وجود آورند اما چون میزان آنها در زغال کم است، تأثیر چندانی ندارند. طبق شکل ۲-۷، با افزایش خاکستر محتوی، میزان R_{70} کاهش و تمایل به خودسوزی نیز کاهش می یابد (MDG 1006, 2011؛ صفاری، ۱۳۹۲).



شکل ۲-۷: رابطه بین خودسوزی با خاکستر محتوی زغال سنگ های استرالیا (MDG 1006, 2011)

^۱- Ash Content

^۲- Alumina

^۳- Silica

^۴- Calcium Chloride

ی) گازخیزی لایه

خودسوزی هم می‌تواند در معادن با لایه‌های گازخیز که عمده‌ی ترکیب این گازها را متان تشکیل می‌دهد و هم بدون وجود لایه‌های گازخیز رخ دهد. نتایج خودسوزی در معادن با لایه‌های گازخیز قابل اشتعال ممکن است فاجعه‌بار باشد، پس جلوگیری از هر گونه آتش‌سوزی در هر معدنی حیاتی به نظر می‌رسد (MDG 1006, 2011).

عامل اصلی در کاهش خطر خودسوزی حضور متوسط تا بالایی از گاز در لایه است. به طور معمول، اکسیداسیون سطوح داخلی زغال سنگ با دور کردن گازهای لایه به هوای معدن به تعویق می‌افتد. بنابراین هر آرایش قابل توجهی از گاز متان می‌تواند شانس اکسیداسیون در حال توسعه به آتش‌سوزی را کاهش دهد (MDG 1006, 2011). وجود گاز و مخصوصاً گاز متان در درز و شکاف‌های موجود در لایه می‌تواند یک مانع در پدیده خودسوزی زغال سنگ به حساب آید زیرا وجود گاز در لایه، اجازه ترکیب شدن زغال با اکسیژن موجود در هوا را نمی‌دهد (صفاری، ۱۳۹۲).

اگر در طول عملیات معدنکاری عمل گازکشی لایه انجام شود، چون درز و شکاف‌های موجود در لایه دارای میزان گاز کمتری هستند بنابراین سطح بیشتری از زغال در معرض اکسیژن قرار گرفته و سرعت اکسیداسیون و خودسوزی زغال سنگ افزایش می‌یابد (MDG 1006, 2011).

ک) خواص فیزیکی^۱

برخی از خواص فیزیکی مانند تخلخل، سختی، هدایت حرارتی و گرمای ویژه می‌توانند بر میزان اکسیداسیون زغال سنگ تأثیر بگذارند.

¹ - Physical Properties

۲-۵-۲- پارامترهای زمین شناسی

الف) ضخامت لایه^۱

هرچه ضخامت لایه بیشتر باشد مساحت بیشتری از زغال سنگ در معرض اکسیژن قرار گرفته و اکسیداسیون و خودسوزی در لایه افزایش می یابد. زمانی که ضخامت لایه زیاد بوده و تنها قسمتی از آن استخراج می شود و بقیه زغال در بالا و پایین لایه باقی گذاشته می شود، این ضخامت باقی مانده در معرض خطر اکسیداسیون و خودسوزی می باشد (MDG 1006, 2011).

به منظور رسیدن به یک نرخ تولید قابل قبول در لایه های ضخیم، چون باقی گذاشتن قسمتی از لایه در منطقه استخراج شده مقرون به صرفه نیست، باید آن لایه را استخراج کرد، در چنین حالتی نرخ پیشروی آهسته بوده و باعث می شود زغال مدت زمان بیشتری در معرض اکسیژن قرار گرفته و در نتیجه نرخ اکسیداسیون و خودسوزی افزایش یابد.

حجم زغال سنگ شکسته شده با افزایش ضخامت لایه افزایش یافته که در نتیجه آن، پتانسیل خودسوزی زغال نیز افزایش می یابد (MDG 1006, 2011؛ Morris & Atkinson, 1986).

ب) شیب لایه

زمانی که لایه شیب دار باشد، کنترل خودسوزی پیچیده تر خواهد شد چون جریان های انتقالی که از اختلاف دما ناشی می شوند منجر به ایجاد جریان هوا در منطقه تخریب شده می شوند. وجود جریان هوا در منطقه تخریب، استخراج، در باطله ها و کارهای معدنی قدیمی باعث افزایش اکسیداسیون و خودسوزی می شود.

¹ - Seam thickness

به طور کلی با افزایش شیب لایه، درصد استخراج آن کاهش و زغال بیشتری در کارگاه استخراج باقی می‌ماند. هرچه زغال رها شده بیشتر باشد، خطر خودسوزی نیز افزایش می‌یابد (Morris & Atkinson, 1986; Michaylov, 2002).

ج) عمق لایه^۱

عمق لایه لزوماً بر خطر خودسوزی تأثیرگذار نیست. اما به طور کلی و با این حال، با افزایش عمق لایه، دمای طبیعی لایه و در نتیجه دمای زغال سنگ برجا افزایش و پتانسیل خودسوزی لایه زغال نیز زیاد می‌شود (Morris & Atkinson, 1986).

با افزایش عمق لایه میزان بار و فشار وارد بر پایه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش فشار سبب ایجاد شکستگی در لایه شده و در نهایت احتمال خودسوزی در لایه افزایش می‌باشد (MDG 1006, 2011). زمانی که استخراج در اعماق نسبتاً کم صورت می‌گیرد، بین درز و شکاف‌های موجود در سطح و ترک‌ها و حفرات لایه ارتباط به وجود آمده و سبب می‌شود که جریان هوا از سطح به منطقه استخراج شده وارد شود و خطر خودسوزی افزایش یابد (MDG 1006, 2011).

د) ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی^۲

ساختارهایی مانند گسل^۳، دایک^۴ و درزه‌های باز^۵ که ممکن است با مناطق ضعف همراه باشند، باعث ورود اکسیژن به داخل لایه زغالی می‌شوند. از طرف دیگر این ساختارها مشکلات زیادی ایجاد کرده، ممکن است به کانون‌های افزایش تنش در منطقه تبدیل شوند، بنابراین به توجه ویژه‌ای نیاز دارند. همچنین به نگهداری اضافی نیاز داشته و باعث کاهش نرخ استخراج می‌شوند. نرخ استخراج پایین‌تر سبب می‌شود که

^۱- Depth of Cover

^۲- Structures & Geological Anomalies

^۳- Fault

^۴- Dyke

^۵- Open Joints

سطح بیشتری از زغال در معرض اکسیژن قرار گرفته و در نتیجه پتانسیل خودسوزی افزایش یابد (Singh, 2013; MDG 1006, 2011).

مناطق دارای گسل، دایک و درزه‌های باز باعث ایجاد شکستگی‌های بیشتر در لایه‌های زغال شده و سبب می‌شوند که زغال مدت زمان بیشتری در معرض اکسیژن قرار گرفته و خودسوزی افزایش یابد. بنابراین این ساختارها اغلب بر خودسوزی زغال تأثیر می‌گذارند (Morris & Atkinson, 1986; Singh, 2013).

ه) تصاعد آنی زغال سنگ^۱

تصاعد آنی زغال سنگ معمولاً در سازندهای سخت نسبت به سازندهای نرم‌تر اتفاق می‌افتند. چون این زغال‌ها با درجه پایین زغال‌شدگی هستند، بنابراین استعداد بیشتری به خودسوزی دارند. با این حال، زمانی که تصاعد آنی و خودسوزی‌های زغالی به طور همزمان اتفاق می‌افتند مراقبت‌های ویژه‌ای باید انجام شود چون محصولات حاصل از تصاعد آنی مانند ذرات ریز زغال یا گاز متان خطرناک بوده و سبب به وجود آمدن و افزایش خطر خودسوزی می‌شوند (Morris & Atkinson, 1986; Singh, 2013).

طی تحقیقاتی که در گذشته در معدن زغال سنگ اکابیرا^۲ انجام شده، مشخص شد که خودسوزی و تصاعد آنی زغال سنگ با عمق افزایش می‌یابند. عوامل مرتبط با تصاعد آنی زغال سنگ در این مطالعه عبارتند از (Morris & Atkinson, 1986; Singh, 2013):

- شرایط زمین‌شناسی
- ویژگی‌ها و شرایط سقف و کف
- ویژگی‌های سنگ و زغال
- روش معدنکاری
- گاز محتوی

¹- Coal Outbursts

²- Akabira

- نفوذپذیری مخزن گاز

- فشار روباره

- فعالیتهای آتش فشانی

و) گرادیان زمین گرمایی^۱

گرادیان زمین گرمایی به طور مستقیم بر خطر خودسوزی و آتش سوزی تأثیر نمی گذارد. با این حال زمانی که شیب زمین گرمایی بالا است، درجه حرارت لایه ها در کارهای معدنی به سرعت با افزایش روباره و عمق نسبت به زمانی که گرادیان زمین گرمایی کم است، افزایش می یابد (Morris & Atkinson, 1986).

۲-۵-۳- پارامترهای معدنکاری

الف) روش معدنکاری^۲

هر چه روش استخراج کامل تر باشد، زغال کمتری در منطقه تخریب بر جا می ماند. تخریب کامل تر، خطر خودسوزی کمتری نیز به همراه دارد چون میزان زغال کمتری در معرض جریان هوا قرار می گیرد. روش استخراج جبهه کار طولانی^۳ کامل تر از روش هایی است که در آنها از ماشین استخراج پیوسته^۴ استفاده می شود.

زمانی که استخراج به صورت جزئی انجام می شود، مانند روش اتاق و پایه^۵، بخشی از لایه در معرض جریان هوا قرار گرفته و خطر خودسوزی افزایش می یابد.

به طور کلی روش استخراج جبهه کار طولانی مکانیزه دارای خطر کمتری برای خودسوزی نسبت به روش استخراج اتاق و پایه و استخراج جبهه کار طولانی دستی است. چون سرعت استخراج در روش جبهه کار

¹ - Geothermal gradient

² - Mining Method

³ - Longwall Mining Method

⁴ - Continuous Miner Machine

⁵ - Room & Pillar

طولانی دستی از همه روش‌ها کمتر است و زغال مدت زمان بیشتری در معرض اکسیداسیون قرار گرفته و خطر خودسوزی در آن بیشتر می‌شود (Morris & Atkinson, 1986؛ Singh, 2013).

اقدامات احتیاطی در روش‌های معدنکاری برای جلوگیری از خودسوزی عبارتند از (Morris & Atkinson, 1986):

- تهویه مناسب برای انتقال گرما.
- حذف تمامی زغال‌های خرد و شکسته شده.
- زمانی که نتوان زغال‌های خرد شده را جا به جا و حذف کرد، باید جریان هوا قطع شود.
- اقدامات احتیاطی در مقابل تصاعد آبی با استفاده از نگهداری‌های مناسب.
- پایه‌های زغالی نباید به جا گذاشته و رها شوند.

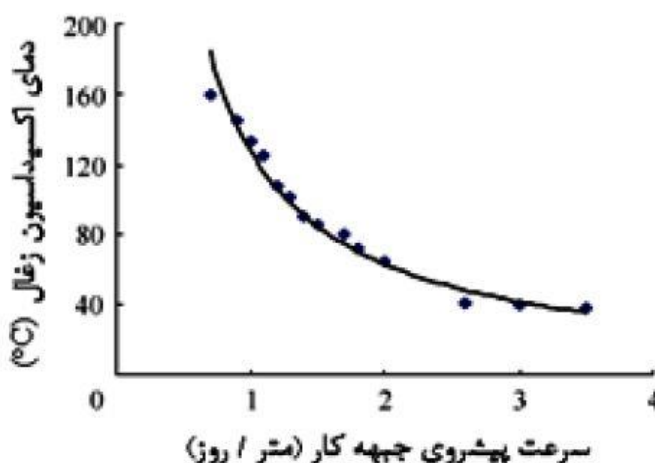
ب) سرعت پیشروی^۱ (نرخ استخراج)

نرخ پیشروی یکی از عوامل و فاکتورهایی است که در ظهور پدیده خودسوزی زغال مؤثر است. نرخ استخراج به عواملی از قبیل عرض پهنه (یا طول جبهه کار) کارگاه استخراج، فاکتورهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی و تجهیزات استخراجی بستگی دارد. وجود عوامل زمین‌شناسی مانند دایک، گسل، توده‌های نفوذی و درزه‌های باز، که در بخش‌های قبل به آن‌ها اشاره شد، باعث ایجاد شکستگی‌های بیشتر و کاهش نرخ استخراج می‌شوند. کاهش سرعت پیشروی سبب افزایش نرخ خودسوزی می‌شود (MDG 1006, 2011).

در شکل ۲-۸ تأثیر نرخ پیشروی بر اکسیداسیون نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

با افزایش نرخ استخراج، دمای اکسیداسیون کاهش یافته است (Bo-tao et al., 2009).

¹ - Rate of Advance



شکل ۸-۲: ارتباط بین دمای اکسیداسیون زغال و سرعت پیشروی جبهه کار (Bo-tao et al., 2009)

اندازه طول جبهه کار نیز همواره مورد بحث مهندسين معدن بوده است. به طور کلی در روش جبهه کار طولانی، روز به روز طول جبهه کار، بلندتر انتخاب می شود. هر چه طول جبهه کار افزایش یابد، سرعت پیشروی کمتر شده و زغال مدت زمان بیشتری در معرض جریان هوای ناشی از فشار تهویه قرار می گیرد و خطر خودسوزی افزایش می یابد (عطایی، ۱۳۹۰؛ Morris & Atkinson, 1986).

در بریتانیا، حداقل نرخ پیشروی جبهه کار حدود ۵/۵ متر در هفته به ازای هر کارگر در نظر گرفته

می شود (Morris & Atkinson, 1986).

ج) جهت پیشروی^۱

در روش جبهه کار طولانی به دو طریقه پیشروی^۲ و یا پسروی^۳ ممکن است استخراج صورت بگیرد. در صورتی که زغال دارای خاصیت خودسوزی باشد، برای جلوگیری از آن باید ارتباط هوا با زغال را قطع کرد، که در روش پسرو جدا کردن پهنه های استخراجی راحت تر و ساده تر صورت می گیرد. در روش پیشرو به دلیل باقی ماندن گرد زغال و همچنین امکان نشت هوا به قسمت استخراج شده، مشکل آتش سوزی بیشتر از روش پسرو می باشد. بنابراین در روش پسرو نشت هوا به قسمت های استخراج شده، کمتر و خودسوزی

^۱- Advance Direction

^۲- Advance Long Wall

^۳- Retreating Long Wall

نیز کمتر از روش پیشرو می باشد و در شرایط با خطر خودسوزی بالای زغال روش پسرو بر روش پیشرو ارجحیت دارد (عطایی، ۱۳۹۰).

د) اختلاف فشار تهویه^۱ و نشت هوا^۲

جریان هوا در معادن لزوماً با اختلاف فشار در ارتباط است. اختلاف فشار بین دو ناحیه در یک معدن سبب خواهد شد که جریان هوا از ناحیه ای با فشار بیشتر به ناحیه ای با فشار کمتر جریان یافته و نشت هوا اتفاق بیافتد. این اختلاف فشار به وسیله ی بادبزنها و تهویه طبیعی ایجاد می شود (MDG 1006, 2011).

توزیع فشار در زیر زمین و مقدار هوایی که در امتداد هر مسیر جریان می یابد، به مقاومت جریان هوا بستگی دارد. این امر می تواند از جریان تهویه برنامه ریزی نشده و نشت هوا منجر شود. اختلاف فشار بالای هوای تهویه به عنوان عامل مهمی به ظهور پدیده خودسوزی کمک می کند. با افزایش فشار تهویه، نشت هوا از طریق شکستگی های زغالی افزایش و میزان احتمال خودسوزی نیز بیشتر می شود (Morris & Atkinson, 1986).

ه) سیستم تهویه

فرضیه های ضروری معدنکاری مؤثر و اقتصادی و ایمن، سیستم تهویه قابل اطمینان معدن و تأثیر تهویه مناسب می باشد. بر اساس آمار، سیستم تهویه معدن می تواند ۸۰-۹۰ درصد گاز را در کل معدن، ۷۰-۸۰ درصد گاز در سطح زغال سنگ، ۲۰-۳۰ درصد گرد و خاک و ۶۰-۷۰ درصد گرما در عمق را از بین ببرد (Meng, 2013).

¹- Ventilation Pressure Difference

²- Air Leakage

تهویه نقش مهم و پیچیده‌ای را در خودسوزی زغال سنگ در معادن زیرزمینی ایفا می‌کند. بایستی توجه داشت که اگر در این گونه معادن عمل تهویه به نحو صحیحی انجام شود، می‌توان از بروز خودسوزی و در نتیجه آتش‌سوزی در معدن جلوگیری کرد.

در مورد این معادن شبکه تهویه بایستی به نحوی طرح شود که از عبور هوا که از عبور هوا از شکاف مواد معدنی که به عنوان لنگه یا حریم بر جای مانده‌اند و نیز از نفوذ هوا به قسمت‌های پر شده و به طور کلی از هر عاملی که تماس دائم هوا را با ماده معدنی خودسوز برقرار می‌سازد، جلوگیری شود. برای کم کردن تراوش هوا در قسمت‌های استخراج شده، اگر روش استخراج به حالت پیشرو است، از طریقه تهویه کناری و در حالتی که روش استخراج پسرو است از روش مرکزی استفاده می‌کنند. هم‌چنین اگر تونل‌های عبور هوا در سنگ حفر شود، از نشت هوا به خارج معدن جلوگیری خواهد شد. از آن جا که هر گونه نشت هوا در نتیجه اختلاف فشار صورت می‌گیرد، لذا در حوالی کارگاه‌های استخراج که قسمتی از ماده معدنی خودسوز به صورت لنگه یا حریم در آن جا بر جای می‌ماند، بایستی فشار هوا به حداقل ممکن برسد. از جمله عوامل دیگری که ممکن است خودسوزی ماده معدنی را تسریع کند، تغییر جهت جریان هوا است؛ لذا در این قبیل معادن، شبکه بایستی به گونه‌ای طرح شود که جهت جریان هوا در تمام قسمت‌ها همواره در یک جهت باقی بماند (مدنی، ۱۳۸۷).

و) ضریب بازیابی (نسبت استخراج) و میزان افت زغال سنگ

نسبت بین حجم زغال استخراج شده از لایه به کل زغال موجود در لایه، ضریب بازیابی نامیده می‌شود. هرچه این ضریب بیشتر باشد، خطر خودسوزی زغال سنگ کاهش می‌یابد.

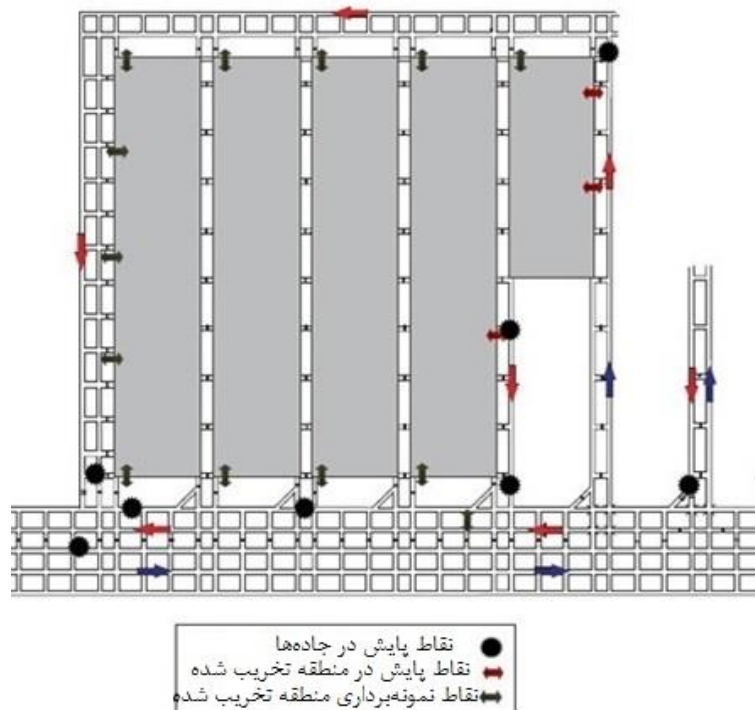
هر چه نسبت استخراج زغال سنگ بیشتر باشد، زغال کمتری بر جای مانده و میزان افت ماده معدنی کمتر خواهد بود. با کاهش میزان افت ماده معدنی میزان خطر خودسوزی زغال سنگ نیز کاهش می‌یابد زیرا

سطح کمتری از زغال در معرض اکسیژن و جریان هوا قرار می‌گیرد (Morris & Atkinson, 1986, MDG 1006, 2011).

ز) تأثیر سیستم نظارت و پایش^۱

تشخیص افزایش سطح اکسیژن در مناطق تخریب شده و نشانه‌های اولیه از حرارت و گرما به سیستم‌های نظارت و بازرسی مؤثر بستگی دارد. محل و تعداد نقاط نظارت و پایش، پارامترهای حیاتی در اثربخشی به سیستم هستند (MDG 1006, 2011).

شکل ۹-۲ محل و نقاط نظارت و پایش را در یک پهنه روش جبهه کار طولانی نشان می‌دهد. اگر سیستم نظارت و بازرسی به درستی طراحی، اجرا و نگهداری نشده باشد، خطر خودسوزی تا زمانی که به صورت یک مشکل جدی پیشرفت کند، تشخیص داده نمی‌شود. هم‌چنین اگر اطلاعات به سرعت ارائه نشوند، تصمیمات و اقدامات اصلاحی ممکن است به تعویق بیافتد (MDG 1006, 2011).



شکل ۹-۲: محل و نقاط نظارت و پایش در یک پهنه روش جبهه کار طولانی (MDG 1006, 2011)

¹ - Effectiveness of Monitoring System

ح) اندازه پایه^۱

اندازه پایه‌ها تأثیری مستقیم بر حرارت و خودسوزی دارند. در حالت ایده آل، اندازه پایه‌ها باید طوری انتخاب شود که در طول زمان شکسته نشده و پایدار باقی بماند. این اندازه به مقاومت زغال سنگ، عمق روباره و تأثیر دیگر کارهای معدنی در مجاورت پایه بستگی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش زیاد تصاعد گاز متان، به عنوان نشانه‌ای از خرد شدن، در اطراف پایه‌ها است که در نهایت می‌تواند منجر به خودسوزی شود (Morris & Atkinson, 1986).

ط) شرایط سقف^۲

شرایط ضعیف سقف، توانایی ایجاد خودسوزی را افزایش می‌دهد. در نقاطی که در آنها ریزش اتفاق می‌افتد، حفره ایجاد می‌شود که باید به وسیله مواد یا وسایل نگهداری مانند چوب، نگهداری و پشتیبانی شوند. چنین مناطقی اغلب مکان‌هایی هستند که ممکن است دچار خودسوزی شوند. هم‌چنین با توجه به ماهیت خود، این مناطق همواره با گاز متان پر شده و احتمال ایجاد پدیده خودسوزی بیشتر می‌شود (Morris & Atkinson, 1986).

ی) تأثیر چوب^۳

وجود چوب و نگهداری‌های چوبی، خطر بروز پدیده خودسوزی را افزایش می‌دهند. برخی بر این عقیده‌اند که نگهداری‌های چوبی رها شده در مواد باطله باعث ریزش زغال سقف و ایجاد حفره شده و در نتیجه احتمال خودسوزی را افزایش می‌دهند. به طور کلی در روش‌هایی که از چوب به عنوان وسیله نگهداری استفاده می‌شود، خطرات آتش‌سوزی و خودسوزی بیشتر از دیگر روش‌های استخراجی است (عطایی، ۱۳۹۰؛ Morris & Atkinson, 1986).

^۱- Pillar Size

^۲- Roof Conditions

^۳- Effect of Timber

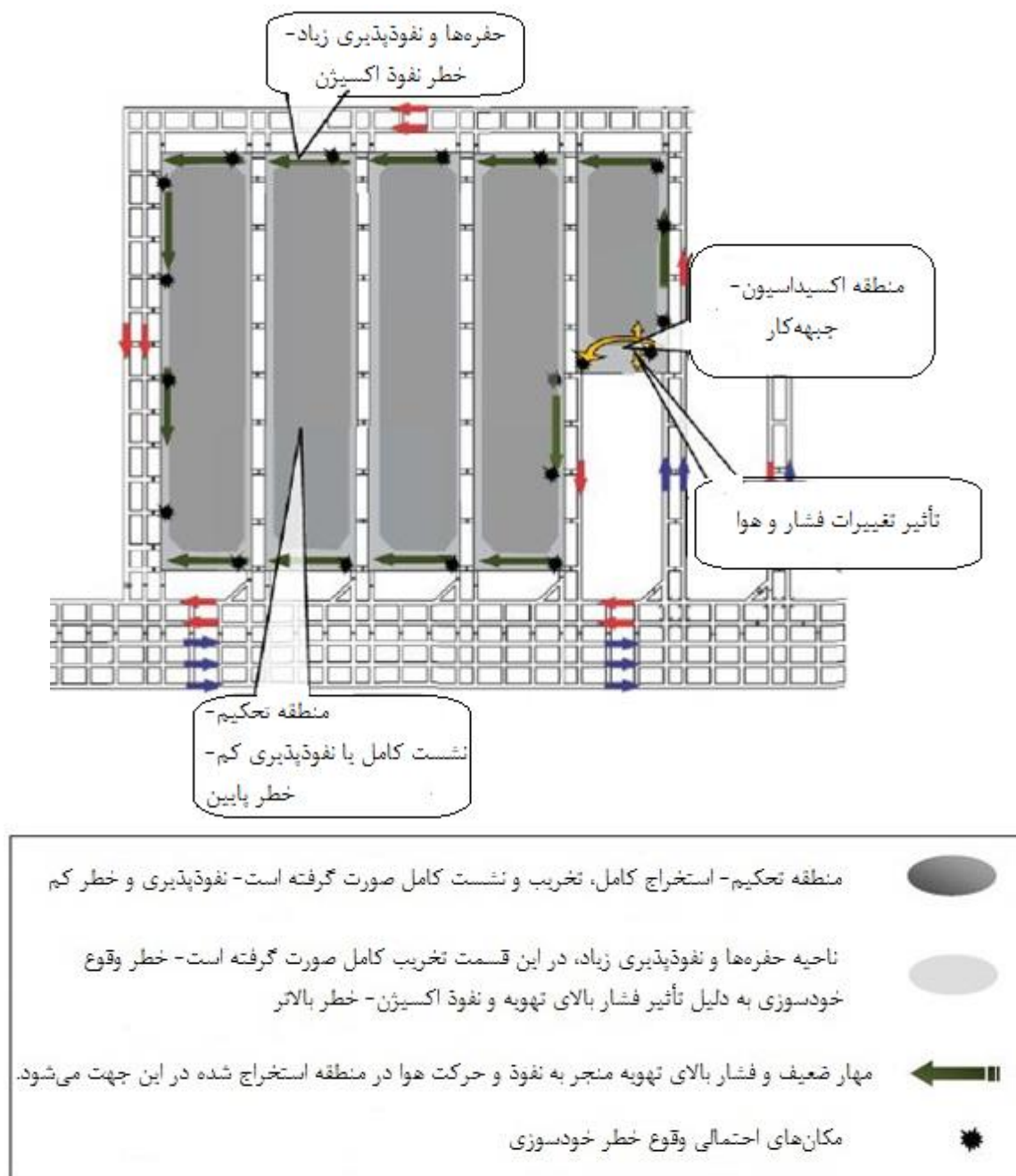
۲-۶- مناطق مستعد بروز پدیده خودسوزی در معادن زغال سنگ

اطلاع از ویژگی‌های خودسوزی و مکان‌هایی که در یک معدن ممکن است دچار خودسوزی شوند، برای توسعه طرح مدیریت خودسوزی^۱ (SCMP) ضروری است. پیشگیری، تشخیص زود هنگام و کنترل خطر خودسوزی، تا زمانی که پتانسیل بروز خطر و مکان ایجاد آن به درستی شناسایی نشود، مؤثر نخواهد بود. مناطقی که در یک معدن زغال سنگ دارای پتانسیل بروز پدیده خودسوزی هستند، عبارتند از (MDG 1006, 2011):

۲-۶-۱- منطقه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی

بروز پدیده خودسوزی در منطقه تخریب شده بیشتر از سایر قسمت‌های دیگر معدن است. خطر خودسوزی در منطقه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی، زمانی که راه‌هایی وجود داشته باشد که بسته نشده‌اند و جریان هوا می‌تواند از طریق آن‌ها وارد این قسمت شود، بیشتر می‌شود. عامل اصلی جلوگیری از خودسوزی جدا نگه داشتن زغال از اکسیژن به وسیله انباشتن گاز بر روی لایه است. خودسوزی در منطقه تخریب شده ممکن است به دلیل نشت هوا به این قسمت و پشت سیستم‌های نگهداری رخ دهد. این منطقه دارای بیشترین خطر در قسمت زغال‌های خرد شده، حفره‌ها، تخریب ناقص و نزدیکی راه‌های تهویه است. نفوذپذیری بیشتر هوا و فشار بالای تهویه باعث می‌شوند که هوا به منطقه تخریب شده وارد شود و سپس اکسیژن به زغال‌های رها شده در این ناحیه برسد که با توجه به میزان زغال رها شده و حجم هوای نشت پیدا کرده پدیده اکسیداسیون زغال و تولید گرما اتفاق می‌افتد. شکل ۲-۱۰ قسمت‌هایی را در منطقه استخراج روش جبهه کار طولانی نشان می‌دهد که ممکن است دچار خودسوزی شوند. در این قسمت‌ها اگر اقدامات پیشگیرانه مانند کارگاه‌های استاندارد و بسته شده و اختلاف فشار تهویه کافی نباشند، پدیده خودسوزی توسعه می‌یابد.

¹- Spontaneous Combustion Management Plan= SCMP



شکل ۲-۱۰: منطقه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی - خطرات (MDG 1006, 2011)

۲-۶-۲- منطقه استخراج شده در روش اتاق و پایه

در روش اتاق و پایه نیز همانند روش جبهه کار طولانی، خودسوزی می‌تواند به روش‌های زیر کنترل

شود:

- تحکیم منطقه که در آن تخریب کامل صورت می گیرد.

- نرخ استخراج منظم و بالا.

- حداقل کردن اختلاف فشار در سراسر منطقه بسته شده.

- بازرسی و نگهداری از مناطق بسته شده برای کنترل نشت.

- نمونه برداری و تجزیه و تحلیل هوای منطقه بسته شده.

کمبود هر یک از این اقدامات کنترلی خطر خودسوزی را افزایش خواهد داد.

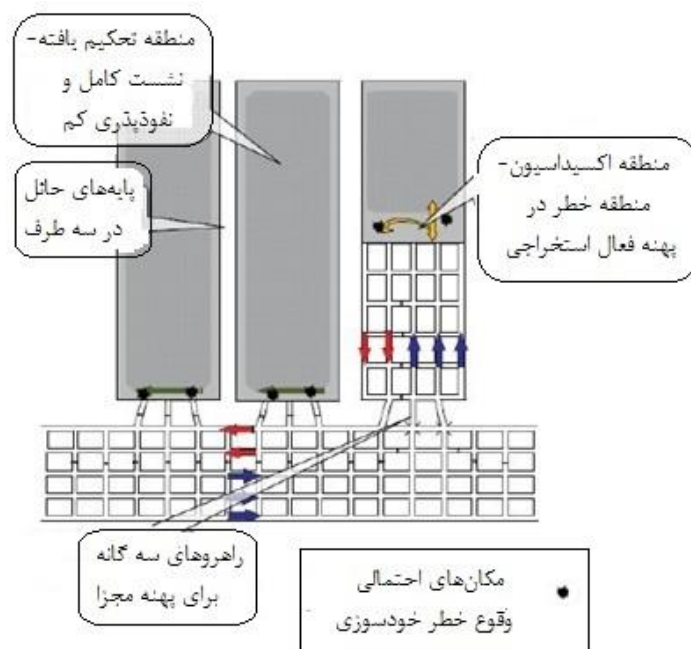
خودسوزی در مناطق بسته شده به دلیل نشت هوا به این مناطق یا وجود مقداری زیادی هوا رخ می دهد. به علاوه، مشکلات ساختاری لایه و کنترل سقف ممکن است باعث شود مقداری زغال در منطقه استخراج شده باقی بماند. استخراج ناقص ممکن است منجر به تخریب تأخیری، حرکت جریان هوای بیشتر به این منطقه و در نهایت سبب خطر وقوع خودسوزی زغال سنگ شود.

نرخ استخراج به وسیله ماشین استخراج پیوسته کمتر از روش جبهه کار طولانی می باشد.

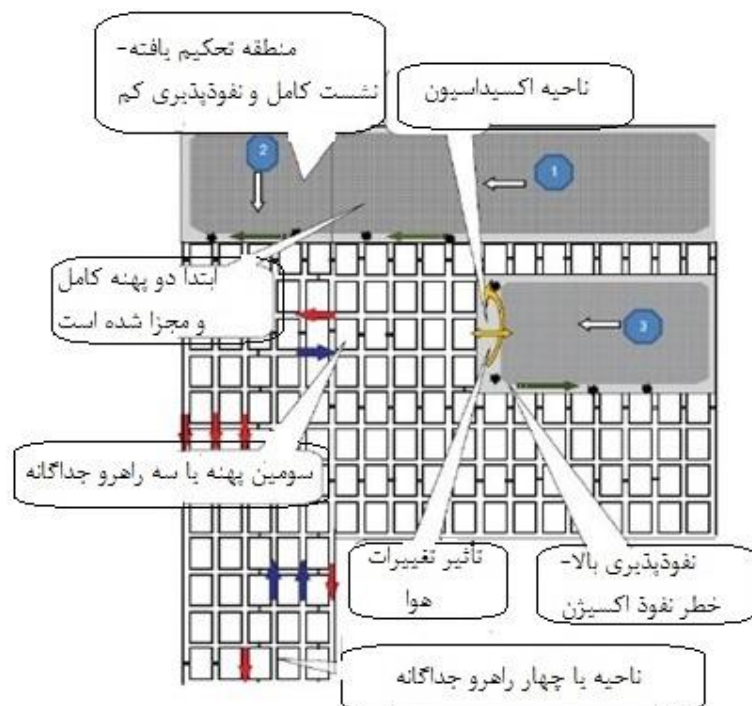
شکل ۲-۱۱ سیستمی از پهنه های جدا شده به وسیله پایه های حائل و مناطق وقوع خطر خودسوزی را نشان می دهد. با کاهش عمق روباره، احتمال وقوع خطر از طریق درزه ها وجود دارد و مناطق خطر در تمام لبه های منطقه استخراج شده گسترش یافته اند.

شکل ۲-۱۲ آرایشی از پهنه ها را نشان می دهد که در آن پهنه ها به وسیله پایه های حائل جدا نشده اند و به وسیله یک خط از کارگاه های استخراج به اندازه قابل کنترل کاهش یافته اند. همچنین مناطق وقوع خطر خودسوزی در منطقه استخراج شده نیز در این شکل نشان داده شده اند. در عوض به اندازه ای کاهش یافته اند.

فصل دوم | مکانیزم خودسوزی زغال سنگ و بررسی تاثیر پارامترها و عوامل مختلف بر آن



شکل ۲-۱۱: سیستمی از پهنه‌های جدا شده به وسیله پایه‌های حائل و نواحی وقوع خطر خودسوزی (MDG 1006, 2011)



شکل ۲-۱۲: آرایشی از پهنه‌ها و نواحی وقوع خطر خودسوزی در منطقه استخراج شده (MDG 1006, 2011)

۲-۶-۳- انباشت زغال^۱

خودسوزی ممکن است در انباشت‌های زغالی که در اثر ریزش زغال به وجود می‌آیند، توسعه یابد. انباشت زغال را می‌توان به انباشت‌گاه‌های سطحی که در آنها خودسوزی توسعه می‌یابد، تشبیه کرد. شرایط توسعه خودسوزی در انباشت زغال عبارتند از:

- جریان تهویه محدود در سراسر انباشت زغال یا ریزش‌ها
- ارتفاع و حجم انباشت زغال
- نفوذ رطوبت
- نظارت بی‌اثر

ذخیره‌سازی طولانی مدت زغال سنگ در یک انبار می‌تواند شرایط مناسب برای ایجاد پدیده خودسوزی را دارا باشد.

۲-۶-۴- پایه‌های مرزی جانبی^۲

دلایل خودسوزی در پایه‌ها عبارتند از:

- اختلاف فشار بالا بین جریان هوای ورودی و خروجی
- شکستگی در مرز جانبی
- خرد شدن پایه‌ها
- حضور تجمعی از زغال‌های شکسته شده
- گذرگاه‌های هوا با اختلاف فشار بالا
- زغال با تمایل به خودسوزی بالا

^۱- Stowage

^۲- Rib Side Pillar

- مسیرهای نشت مرتبط با ترک‌ها، شکستگی‌ها، گسل‌ها، درزه‌ها و گمانه‌های بسته نشده در لایه.
 - راهروهای با برش جعبه‌ای که بادبزنی معدن در آن واقع شده، منجر به ایجاد فشار تهویه بالا در زمین شده که ممکن است به وسیله‌ی انفجار در طول ساخت برش جعبه‌ای آسیب دیده باشند.
- شاتکریت یا مواد عایق‌کاری معادل گاهی اوقات به منظور کنترل پایداری سقف و پایه‌های مرزی و همچنین کاهش مسیرهای نشت، تونل‌های دنباله لایه و چاه‌های متقاطع در لایه به کار می‌روند. شاتکریت گاهی اوقات یک عامل کمک کننده به مهار و کشف خودسوزی‌ها یا کاهش دهنده نشت هوا است.

۲-۶-۵- زغال برج^۱

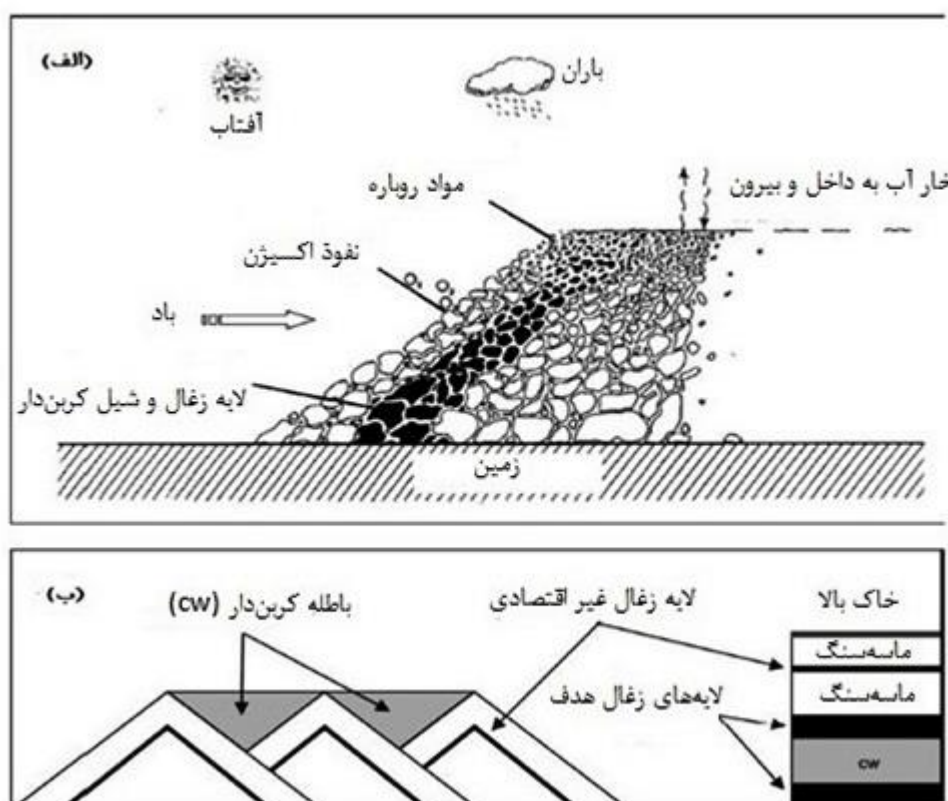
خودسوزی ممکن است در زغال سنگ سقف یا کف که به وسیله همگرایی، ترک خورده یا شکسته شده‌اند، رخ دهد. زغال‌های کف یا سقف که در طول فرآیند معدنکاری فرو ریخته‌اند، در شرایط مطلوب می‌توانند دچار خودسوزی شوند.

۲-۶-۶- انباشت گاه‌های باطله^۲ در سطح زمین

انباشت گاه‌های باطله بسیار ناهمگن بوده و تمایل زیادی به خودسوزی دارند (شکل ۲-۱۳). در برخی موارد، خودسوزی با دود و تصاعد بخار یا حتی شعله باز دیده می‌شود (شکل ۲-۱۴)، در حالی که در موارد دیگر مانند شکل ۲-۱۵ ممکن است خودسوزی شدیدی در اعماق انباشت گاه رخ داده و در سطح دیده نشود (Glenn et al., 2015).

^۱- In-situ Coal

^۲- Spoil Pile or Stockpile



شکل ۲-۱۳: (الف) نمایش شماتیک یک انباشت گاه، (ب) هندسه انباشت گاه (Glenn et al., 2015)



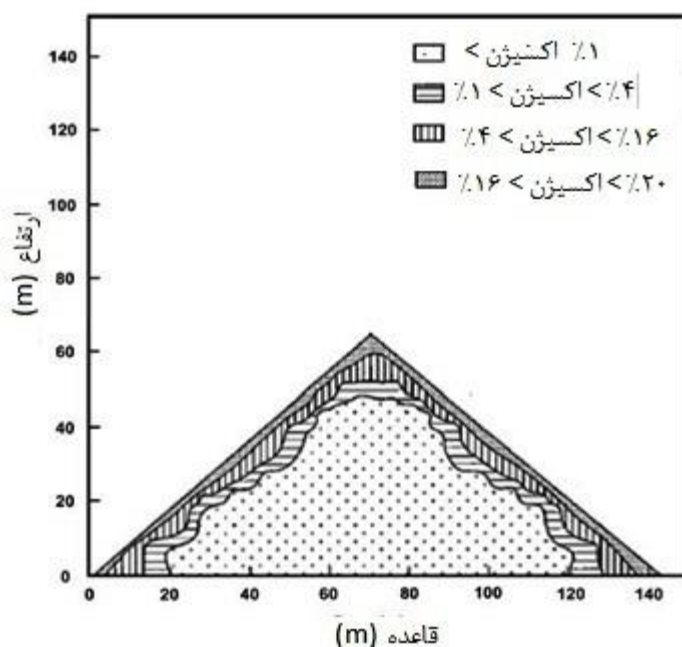
شکل ۲-۱۴: خودسوزی انباشت گاه در یک معدن در هانتروالی^۱ (Glenn et al., 2015)

¹ - Hunter Valley

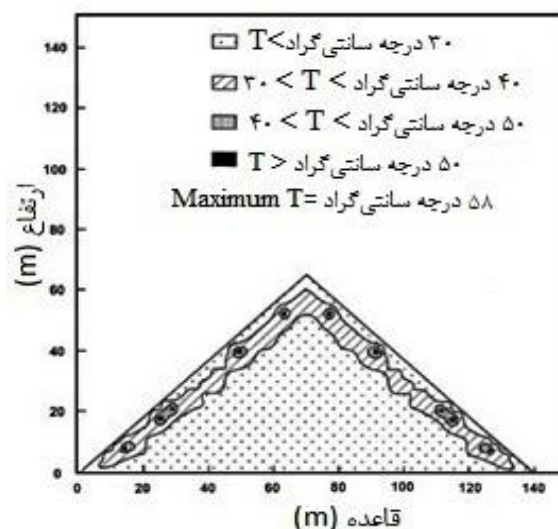


شکل ۲-۱۵: باطله کربن دار در معرض خودسوزی شدید. با وجود سوختن شدید، نشانه کمی در بالای سطح انباشت گاه وجود دارد (Glenn et al., 2015)

شبیه سازی انباشت گاه های باطله با استفاده از مدل سازی عددی پیش بینی می کند که اکسیژن با مواد واکنش دهنده ی نزدیک سطح انباشت گاه مصرف می شود (شکل ۲-۱۶). این بدان معنا است که زمانی که فضای داخلی تا حد زیادی از تمایل به خودسوزی جدا شده است، خودسوزی در نزدیکی سطح انباشت گاه اتفاق می افتد. شکل ۲-۱۷ پروفیل دمایی شبیه سازی همان انباشت گاه را پس از یک سال نشان می دهد.

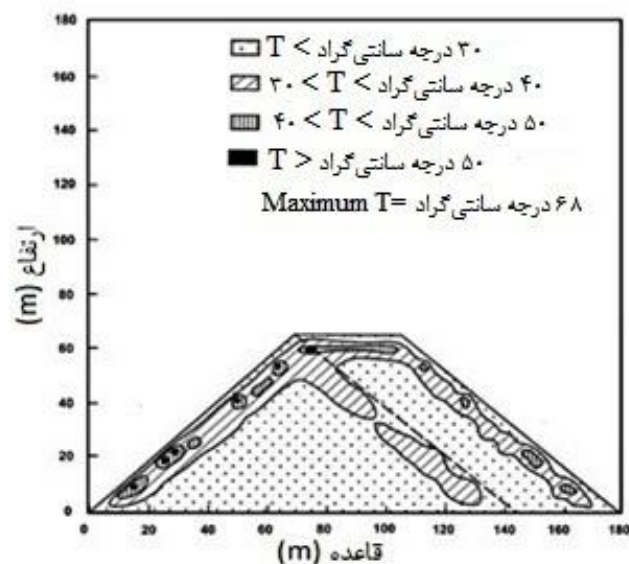


شکل ۲-۱۶: مدل پیش بینی تمرکز اکسیژن در یک انباشت گاه باطله پس از ۶ ماه (Glenn et al., 2015)



شکل ۲-۱۷: مدل پیش‌بینی دما در انباشت‌گاه باطله پس از یک سال (Glenn et al., 2015)

با این حال، از آنجا که معمولاً انباشتگاه‌ها به وسیله قرار دادن مواد تازه در نزدیکی انباشتگاه‌های موجود ساخته می‌شوند، مقدار زیادی از مواد داغ ممکن است در اعماق انباشتگاه به پایان برسند (شکل ۲-۱۸). اگر مواد پوشاننده به اندازه کافی متخلخل بوده، و یا دارای ترک‌هایی باشند که هوا از طریق آنها به داخل نفوذ کند، این بسته‌های مواد داغ به سوختن ادامه پیدا کرده و در نهایت خودسوزی‌هایی ایجاد می‌شوند که کنترل و یا حتی آشکارسازی آنها مشکل خواهد بود (Glenn et al., 2015).



شکل ۲-۱۸: مدل پیش‌بینی پروفیل دما با دو انباشتگاه باطله همجوار (Glenn et al., 2015)

۷-۲- تأثیرات زیست محیطی، اجتماعی، فیزیکی و اقتصادی خودسوزی زغال سنگ

۷-۲-۱- تأثیرات زیست محیطی

- به غیر از تغییر چشم انداز، معادن زغال سنگ با افزایش ذرات گرد و غبار، انفجار، حمل و نقل و انتشار گازهای سمی و خطرناک باعث آلودگی هوا می شوند.
- انتشار گرما از طریق آتش سوزی های زغالی باعث افزایش دمای محلی نیز می شود.
- باران اسیدی

۷-۲-۲- تأثیرات اجتماعی

خودسوزی در معادن زغال سنگ باعث مرگ پرسنل، اختلالات روانی در بازماندگان فاجعه، مهاجرت کارگران معدن و افزایش جمعیت شهرنشینی می شود (Gangopadhyay, 2008؛ Ham, 2005).

۷-۲-۳- تأثیرات فیزیکی

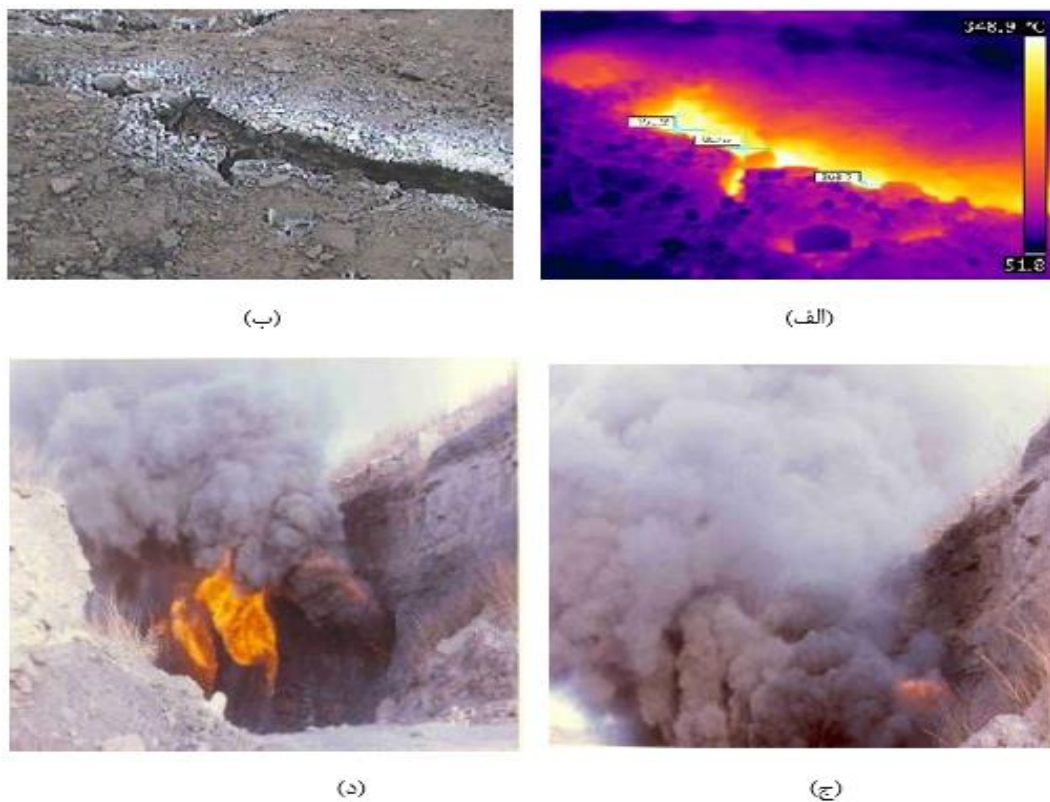
تأثیرات فیزیکی معدنکاری زغال و خودسوزی شامل موارد زیر می باشد

(Gangopadhyay, 2008؛ Ham, 2005):

- نشست سطح زمین و فرسایش خاک
 - تغییر در الگوی زهکشی و سطح آب های محلی
 - کاهش کیفیت آب های سطحی و زیرزمینی
 - تغییر کاربری و انقراض پوشش گیاهی و جانوری
- علاوه بر این تأثیرات منفی بیان شده، خودسوزی موجب از دست رفتن زغال سنگ می شود. در اشکال ۲-۱۹ و ۲-۲۰ نمونه هایی از تأثیرات خودسوزی زغال سنگ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۹: نمونه‌هایی از تأثیرات خودسوزی زغال سنگ (Glenn et al., 2015)



شکل ۲-۲۰: نمونه‌هایی از تأثیرات خودسوزی زغال سنگ: الف و ب- نمونه‌ای از خودسوزی در یک معدن روباز در هند. ج و د- نمونه‌هایی از خودسوزی همراه با آزاد شدن دود و گاز در یک معدن روباز در هند (Singh, 2013)

۲-۱۰- جمع بندی

در جمع بندی کلی از مجموعه مطالب این فصل چنین برمی آید که خودسوزی زغال سنگ یکی از دلایل ایجاد آتش سوزی در معادن زغال محسوب می شود که دارای تأثیرات زیان آور اجتماعی، زیست محیطی، فیزیکی و اقتصادی است. از طرف دیگر پدیده خودسوزی زغال سنگ یک فرآیند پیچیده است که پارامترهای مختلفی نیز در آن تأثیرگذار است؛ لذا در این فصل ابتدا به بررسی پدیده خودسوزی زغال سنگ پرداخته شد و سپس تأثیر هر یک از پارامترها و عوامل مؤثر در آن نیز مورد بحث قرار گرفت. بنابراین ارزیابی و تخمین خطر خودسوزی در معادن زغال سنگ یک نیاز اصلی برای مدیریت خودسوزی به حساب می آید که باید در تمامی عمر یک معدن صورت پذیرد.

در این تحقیق برای بررسی خطر خودسوزی زغال سنگ از روش تحلیل درخت خطا که یکی از روش های مدیریت و ارزیابی ریسک است و نسبت به روش های دیگر برتری دارد، استفاده می شود. در فصل چهارم به بررسی این پدیده با استفاده از روش تحلیل درخت خطا پرداخته خواهد شد.

فصل ۳: بررسی سابقه علمی موضوع

۳-۱- مقدمه

خودسوزی زغال سنگ خطر قابل توجهی در معادن زغال سنگ و تهدیدی جدی برای استخراج این معادن در سراسر جهان به شمار می آید. اگر این خطر در مراحل اولیه تشخیص و کنترل نشود، به راحتی می تواند منجر به احتراق گاز، انفجار، خفگی، مرگ و از دست رفتن منابع و تجهیزات شود. سالیانه حدود ۳۰۰ نوع آتش سوزی ناشی از خودسوزی در معادن زغال سنگ چین رخ می دهد و حدود ۱۰۰ میلیون تن زغال دچار خودسوزی شده و از بین می رود. برای غلبه بر این مشکل و جلوگیری و کنترل آن، لازم است تحقیقات و پژوهش های بنیادی بر روی این موضوع انجام گیرد. برای این منظور باید تلاش هایی را که قبلاً درباره موضوع پژوهش انجام گرفته است، بررسی کرد و پژوهش جدید را با پژوهش های پیشین ارتباط داد. این امر را می توان با شیوه بررسی نظریه ها و پیشینه های عملی مربوط به موضوع امکان پذیر کرد، این نکته از آن رو مهم است که از پیشرفت های تازه نظری (نظریه های جدید) و پژوهش هایی که در این زمینه به عمل آمده آگاه شویم، زیرا بررسی های علمی - عملی بخش مهم و لازم فرآیند علمی را تشکیل می دهد (خاکی، ۱۳۹۰؛ Xue & Cui, 2004).

۳-۲- بررسی سابقه علمی خودسوزی

اولین بررسی در زمینه خودسوزی در معادن زغال سنگ در سال ۱۹۱۰ میلادی انجام شده است و از آن زمان تاکنون تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. در جدول ۳-۱ به چند مورد از این تحقیقات اشاره شده است.

جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با خودسوزی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Bhattacharya (۱۹۷۱)	در این کار آزمایشگاهی نرخ گرمای خروجی از زغال‌های مختلف بررسی و ارزیابی شد. محققان در این آزمایش دریافتند که نرخ گرمای تولیدی در زغال با توازن ناکافی رطوبت موجود در زغال افزایش می‌یابد که این امر به خاطر توازن‌های متفاوت رطوبت هوا و زغال است.
Banerjee (۱۹۷۲)	در این تحقیق دماهای نقطه تقاطعی (^۱ CPT) نمونه‌های مختلف زغال هندوستان با استفاده از دمای نقطه تقاطعی تعیین شد.
Ghosh (۱۹۸۶)	در این مطالعه بیان شد که وجود پیریت در زغال باعث افزایش تمایل زغال به خودسوزی می‌شود، و در صورت حضور آب در لایه زغال نیز دمای زغال افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین نتیجه‌گیری شد که اسپری آب و سیلاب آبی به عنوان یک راه‌حل مؤثر جهت کنترل خودسوزی زغال نمی‌تواند مطرح گردد.
Glasser & Brooks (۱۹۸۶)	در این مطالعه یک مدل یک بعدی شامل سه معادله دیفرانسیل توصیف دما، غلظت اکسیژن و تغییرات فشار در یک ذخیره زغال‌سنگ ارائه شد.
Riley et al. (۱۹۸۷)	در این کار پژوهشی به بررسی عوامل تأثیرگذار در پدیده خودسوزی زغال در کشتی‌های حمل دریایی زغال پرداخته شد. در این مطالعه مشخص شد که عوامل ذاتی از پارامترهای مؤثر در خودسوزی هستند. همچنین مشخص شد که شرایط محیطی شامل تغییر در میزان رطوبت محیط پیرامون و حرکت هوا از میان انباشت‌های زغالی نیز ممکن است سهمی در خودسوزی زغال داشته باشند.
Brooks & Glasser (۱۹۸۸)	در این مطالعه برای پیش‌بینی خودسوزی زغال‌سنگ تجزیه و تحلیل عددی صورت گرفت و مدلی به نام منطقه دودکش ^۲ ارائه شد.
Defaveri et al. (۱۹۸۹)	در این تحقیق با انجام مطالعات آزمایشگاهی دریافتند که پدیده خودسوزی زغال نقش مهمی را در طراحی توده‌های انباشت‌گاهی آن در معادن ایفا می‌کند.
Singh et al. (۱۹۹۰)	در این مطالعه برای توسعه ارزیابی خطر خودسوزی زغال در جبهه‌کار بلند معدن یک سیستم تخصصی ارائه شد.
Carras & Young (۱۹۹۴)	در این تحقیق محققان پدیده خودسوزی زغال را در انباشت‌گاه‌های زغال و باطله‌های آن مطالعه نمودند. از مطالعه آن‌ها مدل‌های مختلف خودسوزی زغال به دست آمد. آن‌ها بیان کردند که باید تأثیر اندازه ذرات و رطوبت محتوی نیز در نرخ اکسایش زغال و باطله‌های مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند.

^۱- Croosing Point Temperature

^۲- Chimney region

ادامه جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با خودسوزی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Krishnaswamy Et al. (۱۹۹۶)	در این مطالعه در ذخیره‌های باز بدون در نظر گرفتن انتقال رطوبت، یک مدل ریاضی دو بعدی برای پیش‌بینی خودسوزی زغال توسعه داده شد.
Pis et al. (۱۹۹۶)	در این کار تحقیقاتی با استفاده از آنالیزهای حرارتی تفاضلی (DTA ^۱) به مطالعه رفتار خودسوزی زغال‌های تازه و اکسیده پرداختند.
Panigrahi et al. (۱۹۹۷)	در این تحقیق آزمایشاتی برای تعیین شاخص روسی U انجام شد. ۱۰ نمونه زغالی با استفاده از این روش مورد آنالیز قرار گرفتند.
Sujanti & Zhang (۱۹۹۹)	در این مطالعه تأثیر گازخیزی، اندازه ذرات و نوع زغال در ظهور پدیده خودسوزی زغال‌سنگ بررسی و ارزیابی شد.
Singh et al. (۲۰۰۲)	در این مطالعه در منطقه سبز استرالیا برای ارزیابی خطر خودسوزی لایه‌های زغالی یک سیستم مدیریتی ارائه شد.
Kucuk et al. (۲۰۰۳)	در این پژوهش به ارزیابی خصوصیات خودسوزی زغال لیگنیت در کشور ترکیه پرداخته شد. تأثیرات میزان جریان گاز، رطوبت زغال، رطوبت هوا و اندازه ذرات در خودسوزی نمونه‌های زغالی با استفاده از روش نقطه تقاطعی مورد ارزیابی قرار گرفت.
Panigrahi & Bhattacharjee (۲۰۰۴)	در این تحقیق مطالعات میدانی وسیعی برای بررسی مشکل آتش‌سوزی در پایه‌های زغالی در یکی از معادن زغال‌سنگ هندوستان انجام شد. در این مطالعه روش نمونه‌برداری مخصوصی برای جمع‌آوری گاز موجود در نمونه‌ها از طریق حفر گمانه در پایه‌های انتخابی و آشکارسازی گازهای چندگانه طراحی شد تا بدین طریق تجزیه و تحلیل ترکیبات نمونه‌های برجا انجام شود.
Xue & Winkelmann (۲۰۰۵)	در این تحقیق به آشکارسازی خودسوزی زغال‌سنگ در معدن زیرزمینی منطقه معدنی دارت‌بروک با استفاده از تکنیک رادون پرداخته شد.
Beamish & Schultz (۲۰۰۸)	در این تحقیق تأثیر رطوبت محتوی بر نرخ خودسوزی زغال‌های ساب‌بیتومینه بررسی و ارزیابی شد.
Baris & Didari (۲۰۰۹)	در این مطالعه تأثیرات دما و اندازه ذرات بر خودسوزی زغال‌های بیتومینه با مواد فرار بالا در کشور ترکیه بررسی و ارزیابی شد.
Lang & Fu-bao (۲۰۱۰)	در این مطالعه یک سیستم ارزیابی جامع برای خطر خودسوزی زغال در معادن زیرزمینی ارائه شد.
Sahu et al. (۲۰۱۱)	در این تحقیق برای پیش‌بینی خودسوزی زغال‌سنگ در کشور هند از مدل‌های منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. برای اجرای این مدل‌ها، ۳۰ نمونه زغالی با درجه‌های زغال‌شدگی متفاوت از مناطق مختلف این کشور جمع‌آوری شدند.

¹- Differential Thermal Analysis

ادامه جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با خودسوزی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Wu et al. (۲۰۱۲)	در این مطالعه محققان از روش رادون برای آشکارسازی منابع خودسوزی‌های زغالی در معدن بولیانتا ^۱ در کشور شندانگ ^۲ استفاده کردند.
Beamish et al. (۲۰۱۲)	بررسی تأثیر پیریت بر خودسوزی زغال‌سنگ.
Morla et al. (۲۰۱۳)	پیش‌بینی و کنترل خودسوزی در لایه‌های ضخیم زغال.
Song et al. (۲۰۱۴)	در این تحقیق خطر خودسوزی زغال در انباشتگاه‌های زغالی با استفاده از روش AHP فازی به طور کامل و جامع بررسی و ارزیابی شد.
صفاری (۱۳۹۲)	ارائه یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال‌سنگ.

تمامی معادن زغالی در یک درجه از خودسوزی قرار ندارند، بنابراین ارزیابی ریسک خودسوزی می‌تواند یک نیاز اولیه برای مدیریت خودسوزی در معادن زغالی باشد، بنابراین استفاده از روش‌هایی که در پیش‌بینی و جلوگیری از خطر خودسوزی در معادن زغال‌سنگ مؤثر عمل کنند، امری ضروری تلقی می‌شود.

در این تحقیق به بررسی و ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال‌سنگ با استفاده از روش مدیریتی FTA پرداخته می‌شود. ارزیابی ریسک روش‌های متعدد کیفی و کمی را شامل می‌شود که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۳-۳- روش‌های کیفی و کمی ارزیابی ریسک

۳-۳-۱- روش‌های کیفی

روش‌های کیفی بر اساس فرآیندهای تخمین تحلیلی و توانایی مهندسين- مدیران بنا شده است. در بعضی مواقع نتایج این روش‌ها مقدمه‌ای برای تکنیک‌های کمی و ترکیبی می‌باشد و در تحلیل این روش‌ها از ماحصل کیفی مدیران و مهندسين پروژه استفاده می‌شود. آنالیز کیفی ریسک فرآیند ارزیابی احتمال و

¹- Bulianta

²- Shendong

پیامد ریسک‌های شناسایی شده به صورت کیفی می‌باشد. در ادامه در رابطه با هر کدام از این تکنیک‌ها مختصری ارائه بیان می‌گردد.

الف) روش چه می‌شود اگر^۱؟

نام واقعی این روش از عبارت "اگر این امر رخ دهد پیامدهای آن چه خواهد شد" مشتق شده و هدف اصلی از اجرای آن اعمال توجه و تمرکز به اثرات رویدادهای ناخواسته بر روی سیستم می‌باشد. اساس این روش آنالیز با طرح سؤالاتی که با عبارت ساده "چه می‌شود اگر...؟" و یافتن پاسخ‌های واقعی و دقیق آنها قرار دارد. در صورتی که تکنیک توسط افراد باتجربه و دارای دانش کافی از سیستم اجرا شود، می‌تواند یک ابزار بسیار مفید در تجزیه و تحلیل ایمنی سیستم‌ها باشد (Reniers et al., 2005).

ب) روش ماتریس ریسک^۲

فرآیند تحلیل ریسک یک روش سیستماتیک و جامع برای شناسایی، ارزیابی و کنترل خطرات در یک سیستم می‌باشد. باید خطرات و دلایل پیدایش آنها را شناسایی کرد. در مرحله بعد باید اثرات آنها را تحلیل کرد. بیشتر روش‌های تحلیل ریسک از یک درجه‌بندی احتمالی استفاده می‌کنند. بعضی از خطرات ممکن است به احتمال زیاد رخ دهند، اما عواقب بسیار جزئی داشته باشند. هم‌چنین ممکن است احتمال وقوع آن کم باشد اما عواقب آن بسیار وخیم باشد. این دو ریسک را باید به طور متفاوتی کنترل کرد (Hathaway & Markos, 1989).

ج) روش تحلیل مقدماتی خطر^۳

تکنیک تحلیل مقدماتی خطر برای اولین بار در اوایل دهه‌ی ۵۰ میلادی در ایالات متحده آمریکا برای تحلیل ایمنی موشک‌های با پیش‌برنده مایع به کار گرفته شد. پس از این کاربرد موفقیت‌آمیز، استفاده از

¹- What if Analysis

²- Risk Matrix

³- Preliminary Hazard Analysis= PHA

این تکنیک در صنایع مختلف از جمله صنایع شیمیایی، هسته‌ای و غیره نیز گسترش یافت (Mohammadfam, 2005).

تجزیه و تحلیل مقدماتی خطر یک روش آنالیز نیمه کمی سیستم بوده که برای ارزیابی و مستندسازی ریسک خطرات سیستم‌های جدید و یا تغییر یافته به کار می‌رود. همچنین در سیستم‌های نسبتاً ساده و کوچک، این روش به عنوان یک روش جامع و کامل برای تجزیه و تحلیل خطرات کاربرد دارد (Rausand, 2005؛ Halvani & Zare, 2009).

در تجزیه و تحلیل‌های دقیق و مفصل از قبیل روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن و روش تحلیل درخت خطا، این روش به عنوان گام مقدماتی و پیش‌نیاز برای تجزیه و تحلیل به کار می‌رود (Sundararajan, 2008).

در صورتی که خطرات و پیامدهای بالقوه خطر به درستی شناسایی گردد، این روش میزان ریسک نزدیک به ریسک واقعی را مشخص می‌کند (Mohr, 2002).

د) روش مطالعه عملیات و خطر^۱

تکنیک مطالعه عملیات و خطر عبارت است از یک روش قانونمند شناسایی خطرات فرآیند و تعیین اثرات آنها بر روی سیستم. در این روش یک تیم از مهندسين با استفاده از یکسری کلمات کلیدی انحرافات احتمالی فرآیند از حالات استاندارد و همچنین اثرات احتمالی آنها را بررسی می‌کنند. در این روش ابتدا سیستم به واحدهای مطالعاتی کوچکتر تقسیم شده و سپس از طریق طرح سؤالاتی با استفاده از کلمات کلیدی از قبل تعریف شده نظیر بیش از حد، بالاتر از، کمتر از و غیره و پاسخ به آنها، انحرافات احتمالی سیستم و اثرات آنها ارزیابی می‌شود (محمدفام، ۱۳۹۰).

^۱- Hazard & Operability Study= HAZOP

ه) روش تجزیه و تحلیل ایمنی مشاغل^۱

روش آنالیز ایمنی شغل، روش مطالعه دقیق و سیستماتیک جهت شناسایی و ارزیابی خطرات موجود یا بالقوه در هر فرآیند یا شغل است. در این روش شغل به مراحل پی در پی شکسته می‌شود و در گام بعد، خطرات هر مرحله شناسایی و عدد ریسک آنها به دست می‌آید و در نهایت بهترین راه حل کنترل جهت حذف یا کاهش این خطرات، ارائه می‌شود. از این روش می‌توان در تدوین یک برنامه مدیریت ایمنی و پیشگیری از حوادث بهره برد. همچنین در انتخاب وسایل حفاظت فردی مورد نیاز می‌توان استفاده کرد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۵).

و) روش تحلیل خطرات بالقوه^۲

در این روش ارزیابی خطرات با طبقه‌بندی آنها شروع می‌شود. با طبقه‌بندی خطرات، اهمیت نسبی خطرات شناسایی شده و روش‌های مقابله با خطرات ارائه می‌شود. تجزیه و تحلیل خطرات در این روش مستلزم ارزیابی و سنجش دو عامل شدت و فراوانی حوادث می‌باشد. منظور از شدت توان بالقوه خسارتی است که منابع انسانی و سایر منابع سازمان در معرض آن قرار دارند و منظور از تواتر نیز تعداد وقوع و به عبارتی احتمال وقوع خسارت طی مدت معینی می‌باشد. بنابراین تجزیه و تحلیل خطرات مستلزم ارزیابی و سنجش شدت بالقوه خسارات و فراوانی آنهاست (جعفری و طبری، ۱۳۹۰).

۳-۲- روش‌های کمی

بر اساس روش‌های کمی، ریسک می‌تواند به عنوان یک کمیت بررسی شود که توسط یک رابطه ریاضی تخمین زده شده و بر اساس داده‌های تصادفی ثبت شده در محیط کار بیان می‌شود. آنالیز کمی ریسک تحلیل عددی ریسک‌های پروژه و پیامدهای آن روی اهداف بلند مدت یک سیستم می‌باشد. انواع روش‌های پرکاربرد در ادامه آمده است.

^۱- JSA

^۲- Hazard Analysis= HAZAN

الف) روش تحلیل درخت رویداد^۱

روش تحلیل درخت رویداد به بررسی پیامدها و حوادث ممکنه ناشی از وقوع خطر می‌پردازد و تمامی "سناریوی گسترش خطر" را مشخص می‌سازد. این روش به عنوان مدلی جامع با آنالیز زیر سیستم‌ها، مجموعه‌ها، نرم‌افزارها، محیط و خطای انسانی به کار برده می‌شود و به طور وسیعی در حوزه‌هایی همچون نیروگاه هسته‌ای، فضاپیماها، صنایع شیمیایی و غیره کاربرد موفقیت آمیزی داشته است.

تحلیل درخت رویداد یکی از تکنیک‌هایی است که برای شناسایی و ارزیابی توالی وقایع در یک سناریوی حادثه بالقوه، که در امتداد یک رویداد اولیه می‌آیند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش از رویدادی اولیه در ابتدای درخت رویداد آغاز می‌شود، با شناسایی رویدادهای محوری ادامه پیدا می‌کند و به شناسایی وضعیت‌های پایانی (پیامدها) ختم می‌شود.

نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که این تکنیک در ارزیابی ریسک‌های طراحی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد، نه یک فرآیند پیچیده و سخت (عسکری و همکاران، ۱۳۸۸).

ب) روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن^۲

روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آن یکی از پرکاربردترین روش‌ها در آنالیز ریسک می‌باشد و اولین بار در سال ۱۹۴۹ توسط ارتش آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. این روش یک تکنیک مهندسی به منظور مشخص کردن و حذف خطاها، مشکلات و اشتباهات بالقوه موجود در سیستم، فرآیند تولید و ارائه خدمات، قبل از وقوع می‌باشد و می‌کوشد تا حد ممکن خطرات بالقوه موجود در محدوده‌ای که در آن ارزیابی ریسک انجام می‌گیرد و نیز علل و اثرات مرتبط با آن خطرات را شناسایی و الویت‌بندی نماید (Nedeljakova, 2007).

^۱- Event Tree Analysis= ETA

^۲- Failure Mode & Effect Analysis= FMEA

ج) روش تحلیل درخت خطا

تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا یا روش درخت علت به عنوان یکی از قوی‌ترین ابزارهای تجزیه و تحلیل فرآیند ایمنی سیستم به ویژه در هنگام ارزیابی سیستم‌های بسیار پیچیده و دقیق محسوب می‌شود (محمدفام، ۱۳۹۰). درخت خطا مدل گرافیکی از چندین ترکیب موازی و سری خطاهاست که منجر به وقوع رویداد نامطلوب می‌گردند، رویداد نامطلوب هر سیستم در درخت تحت عنوان رویداد نهایی نامیده می‌شود (اصفهانی، ۱۳۸۹). برای ساخت درخت خطا، دلایل وقوع رویداد رأس که رویدادهای واسطه نام دارند تعیین می‌شوند، سپس رویدادهای واسطه به عنوان رویدادهای نهایی فرض شده و دلایل وقوع آنها بررسی می‌شوند و این تحلیل تا رسیدن به رویدادهای اساسی ادامه می‌یابد (Abdelgawad, 2011).

روش تحلیل درخت خطا برای اولین بار در سال ۱۹۶۲-۱۹۶۱ در آزمایشگاه‌های تلفن بل^۱ به وجود آمد و سپس توسط آقای واتسون^۲ جهت تعیین و بهبود قابلیت اطمینان سیستم کنترل موشک‌های قاره‌پیما توسعه یافت. این تکنیک در سال‌های بعد توسط مهندسين شرکت هواپیمایی بوئینگ از جمله دیوید هاسل^۳ گسترش یافته و به صورت قانونمند درآمد، اولین مقاله درباره آن در سال ۱۹۶۵ در سمپوزیوم ایمنی سیستم‌ها که توسط دانشگاه واشنگتن و شرکت بوئینگ برپا شده بود، ارائه گردید.

از سال ۱۹۶۵ استفاده از تکنیک تحلیل درخت خطا به صنایع مختلف نظیر هوافضا، هسته‌ای، شیمیایی و غیره گسترش یافت و از آن به‌طور گسترده‌ای جهت تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و ایمنی سیستم‌ها استفاده شد (Ericson, 2005; Limnios, 2007) و از آن زمان تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است.

¹- Bell

²- H. R. Watson

³- David Hassl

چون یک معدن زغال سنگ را می توان یک سیستم پیچیده به حساب آورد، لذا در این تحقیق برای ارزیابی ریسک خودسوزی از تحلیل درخت خطا که نسبت به روش های دیگر برای این سیستم ها برتری دارد، استفاده شده است. همچنین به دلیل اینکه رفتار خودسوزی زغال پیچیده بوده و دستیابی به احتمال دقیق رویدادهای اساسی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است؛ بنابراین در این تحقیق در محاسبه احتمال این رویدادها از منطق فازی به همراه روش تحلیل درخت خطا استفاده شده است.

۳-۴- بررسی سابقه علمی روش تحلیل درخت خطای فازی

اولین بار تئوری فازی جهت استفاده در تکنیک تحلیل درخت خطا توسط زاده در سال ۱۹۶۸ با استفاده از یک متدولوژی کاملی جهت فائق آمدن بر مشکلات ناشی از عدم قطعیت و ابهامات در خصوص احتمالات رویدادهای اساسی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه احتمال درگاه های "و" و "یا" جهت تخمین احتمالات وقوع رویدادهای اساسی، ذهنی می باشد؛ لذا از تئوری فازی جهت فائق آمدن بر این مشکل استفاده شده است که نتایج حاصله مطابق و سازگار با شرایط واقعی بوده است (کلاسنگیانی و امیدواری، ۱۳۹۴).

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه تحلیل درخت خطای فازی انجام شده است. برخی از مهم ترین مطالعات انجام شده پیشین به دقت مورد مطالعه قرار گرفته اند که خلاصه ای از کارهای انجام گرفته شده در جدول ۳-۲ آورده شده است.

جدول ۳-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با درخت خطای فازی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Furuta & Shiraishi (۱۹۸۴)	بررسی اهمیت فازی در تحلیل درخت خطا.
B. Misra & G. Weber (۱۹۸۹)	ارائه روشی جدید برای تحلیل درخت خطای فازی.
Singer (۱۹۹۰)	بررسی تحلیل درخت خطا بر اساس منطق فازی.
Liang & J.Wang (۱۹۹۳)	تحلیل درخت خطای فازی با استفاده از احتمال شکست. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است: (۱) استفاده از اعداد فازی مثلثی در نمایش امکان شکست رویدادهای اساسی در محیط فازی بسیار موثر است. (۲) شاخص اهمیت فازی اطلاعات مفیدی را در بهبود ایمنی کلی سیستم فراهم می‌کند. بعد از رسم درخت خطا، امکان شکست رویداد نهایی و برآورد اهمیت رویدادهای اساسی محاسبه می‌شود. بنابراین پس از محاسبه امکان شکست رویدادهای اساسی، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند امکان شکست رویداد نهایی و اولویت اهمیت رویدادهای اساسی را به دست آورند.
Sawyer & Rao (۱۹۹۴)	تحلیل درخت خطای سیستم‌های مکانیکی فازی.
Suresh et al. (۱۹۹۶)	بررسی عدم قطعیت در تحلیل درخت خطا: یک رویکرد فازی. این مقاله یک مطالعه مقایسه‌ای روش‌های احتمالاتی و فازی برای ارزیابی عدم قطعیت رویداد نهایی را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، این مقاله یک رویکرد جدید برای رتبه‌بندی اجزای سیستم یا رویدادهای اساسی بر اساس: (۱) سهم آن‌ها در احتمال شکست رویداد نهایی. (۲) سهم عدم اطمینان آن‌ها در عدم اطمینان رویداد نهایی بر اساس تئوری نقاط فازی را توضیح داده است.
Kim et al. (۱۹۹۶)	کاربرد تحلیل درخت خطای چند سطحی با استفاده از اعداد فازی.
Lin & Wang (۱۹۹۷)	ترکیب تحلیل درخت خطا با استفاده از مجموعه‌های فازی.
Pan & Yun (۱۹۹۷)	ادغام درخت خطای فازی با درگاه‌های فازی. در این تحقیق روش جدیدی برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم و همچنین شاخص اهمیت جدیدی برای رویدادهای اساسی پیشنهاد شده است.

ادامه جدول ۳-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با درخت خطای فازی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Chanda & Bhattacharjee (۱۹۹۸)	بررسی روش قابلیت اطمینان به منظور برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه انتقال با استفاده از مدل درخت خطای فازی.
C.F. Guimarees & F.F. Ebecken (۱۹۹۹)	FTA فازی: بررسی سیستم درخت خطای فازی در آنالیز عدم قطعیت.
Yuhua & Datao (۲۰۰۵)	در این مطالعه احتمال شکست خطوط لوله انتقال نفت و گاز با استفاده از تحلیل درخت خطای فازی برآورد شده که میزان احتمال شکست فازی این رویداد، 6.4603×10^{-3} است.
Shu et al. (۲۰۰۶)	در این مطالعه از مجموعه‌های فازی برای تحلیل درخت خطا در مونتاژ صفحه مدار چاپ‌شده استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان برای یافتن بحرانی‌ترین جزء سیستم به منظور بهبود قابلیت اطمینان کمک کند.
He et al. (۲۰۰۷)	روش تحلیل درخت خطای فازی بر اساس منطق فازی. در این تحقیق روش تحلیل درخت خطا بر اساس منطق فازی با ویژگی‌های زیر فراهم شده است: • قابلیت اطمینان و اطلاعات ناکافی در نظر گرفته شده و متغیرهای فازی با روش‌های احتمالاتی به تصویر کشیده شده است. • قوانین استنتاج فازی تقویت شده‌اند. از طریق ادغام این روش با منطق فازی، یک بنیان برای ایجاد پایگاه داده علمی ارائه شده است.
Ferdous et al. (۲۰۰۹)	روش تحلیل درخت خطای فازی برای پشتیبانی کامپیوتر. در این تحقیق احتمال فازی رویداد نهایی محاسبه شده است. علاوه بر آن، شاخص وزن‌دهی فازی و تکنیک اندازه‌گیری اهمیت برش‌ها در این روش اطلاعات ارزشمندی را در مورد حساسیت رویداد اساسی، حساسیت مسیر و حدود احتمالی برای بهبود عملکرد کلی سیستم را فراهم می‌کند. ویژگی‌های کلیدی در این روش عبارتند از: (۱) قابلیت مدیریت درخت‌های بزرگ و پیچیده (۲) تنظیم و حداقل کردن عدم اطمینان داده (۳) آنالیز قابلیت اطمینان آنالیز حساسیت
Tyagi et al. (۲۰۱۰)	روش تئوری مجموعه فازی با تحلیل درخت خطا. این رویکرد می‌تواند به طور گسترده‌ای برای بهبود قابلیت اطمینان و به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی از یک سیستم استفاده شود.

ادامه جدول ۳-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با درخت خطای فازی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Renjith et al. (۲۰۱۰)	تحلیل درخت خطای فازی دو بعدی برای آزادسازی کلر از صنعت آلکالی- کلر با استفاده از نظرسنجی از متخصصان.
Lavasani et al (۲۰۱۱)	کاربرد درخت خطای فازی در خطوط لوله ساحلی نفت و گاز.
Mentes et al. (۲۰۱۱)	کاربرد درخت خطای فازی در سیستم‌های پهلویی. نتایج نشان می‌دهد که روش ارزیابی ریسک درخت خطای فازی انعطاف‌پذیرتر و سازگارتر از آنالیز درخت خطای معمول در تشخیص عیب و برآورد خطر است.
Yanfu & Min (۲۰۱۲)	رویکردی برای ادغام درخت خطای فازی با شبکه‌های بیزین.
Wang et al. (۲۰۱۳)	عملگرهای جدید در اعداد فازی مثلثی و کاربرد آنها در تجزیه و تحلیل خطای سیستم.
Wang et al. (۲۰۱۳)	این تحقیق روشی ترکیبی از تئوری نقاط فازی و تحلیل درخت خطا برای کمی‌سازی درخت خطای آتش‌سوزی و انفجار مخازن نفت خام ^۱ (COTFE) در محیط فازی را مطالعه کرده و احتمال رخداد آن را ارزیابی می‌کند. نتایج نشان دادند که: (۱) مقدار احتمال وقوع COTFE با استفاده از روش فازی حدود ۱۲٪ کمتر از مقادیر محاسبه شده با روش معمول است. درخت خطای فازی اطلاعات جزئی در مورد رتبه‌بندی اصطلاحات زبانی را فراهم می‌کند، در حالی که این اطلاعات در درخت خطای معمول ناشناخته هستند.
Gierczak (۲۰۱۴)	ارزیابی کمی ریسک پروژه‌های حفاری افقی جهت‌دار MINI، MIDI و MAXI با به کارگیری آنالیز درخت خطای فازی. هدف از این کار توسعه یک مدل ریاضی جدید برای ارزیابی کیفی و کمی سازه‌های مختلف حفاری افقی جهت‌دار می‌باشد که اجازه می‌دهد ویژگی نصب و راه‌اندازی را در نظر بگیرد.
Purba (۲۰۱۴)	روش مبتنی بر قابلیت اطمینان فازی برای ارزیابی رویدادهای اساسی تحلیل درخت خطا در ارزیابی احتمالاتی ایمنی نیروگاه هسته‌ای.

^۱- Crude Oil Tank Fire and Explosion

ادامه جدول ۳-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با درخت خطای فازی

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Shi et al. (۲۰۱۴)	ارزیابی درخت خطای فازی بر اساس AHP بهبودیافته برای حوادث آتش‌سوزی و انفجار در مخازن فولادی ذخیره‌سازی نفت. در این مطالعه درخت خطای آتش‌سوزی و انفجار حوادث برای مخازن ذخیره‌سازی نفت ^۱ (FEASOST) ترسیم شده است و تعداد ۴۰ رویداد اساسی ^۲ به صورت سیستماتیک اتفاق افتاده است. درخت خطا می‌تواند برای دیگر مخازن نفتی توسعه یابد، زیرا رویدادهای اساسی شناسایی شده در اینجا کمابیش در تمام واحدهای ذخیره‌سازی مشترک هستند.
Aiyou et al. (۲۰۱۴)	تجزیه و تحلیل خطر آتش‌سوزی شهری بر اساس ادغام روش تحلیل درخت خطا و تئوری فازی مثلثی. در این تحقیق مشاهده شد که روش ارزیابی و آنالیز خطر آتش‌سوزی ساختمان‌های شهری در چین هنوز کامل نیست. روش ادغام درخت خطای خطر آتش‌سوزی ساختمان‌های شهری و تئوری فازی مثلثی با توسعه پی در پی و بهبود مهندسی ایمنی آتش در چین به طور مداوم کامل شده و نقش مهم فزاینده‌ای را ایفا می‌کند.
Senol et al. (۲۰۱۵)	آنالیز درخت خطای آلودگی محموله شیمیایی با استفاده از روش فازی. در این مطالعه، علل ریشه‌ای آلودگی محموله شیمیایی بررسی و تجزیه و تحلیل شده است. احتمال تمام علل ریشه‌ای و مشارکت عددی آنها در درخت خطا اندازه‌گیری شده است. به دلیل اینکه یک زمینه جدید در هر دو سیستم گزارش‌دهی و مکانیزم بازخورد در کشتی‌ها انجام نشده است، هیچ ارزش دقیقی برای آلودگی محموله شیمیایی وجود ندارد. برای غلبه بر این ابهام، تحلیل درخت خطای فازی توسط کارشناسان مشاور در این زمینه اجرا شده است. در مقایسه با مورد واقعی، نتایج این مطالعه در راستای مورد واقعی بوده است.
Rajakarunakaran et al. (۲۰۱۵)	کاربرد درخت خطای فازی و نظرسنجی از متخصصان برای ارزیابی ریسک در ایستگاه سوخت‌گیری گاز مایع. نتایج نشان می‌دهد که چارچوب قابلیت اطمینان فازی یک روش جایگزین بسیار خوبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان داده‌ها، هنگامی که داده‌های کمی شکست، کافی و یا در دسترس نیست را ارائه می‌دهد.

^۱ - Fire and Explosion Accidents of Steel Oil Storage Tanks

^۲ - Basic Event

از مطالب جدول ۳-۲ که شامل مروری بر منابع مختلف موجود در زمینه‌های مختلف است، برمی‌آید تاکنون مطالعات وسیعی در مورد روش تحلیل درخت خطای فازي انجام گرفته است. اما مطالعات زیادی به بررسی این روش در موضوعات و زمینه‌های معدن نپرداخته‌اند. از انجام این روش، می‌توان به یک مورد در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد که در آن منگ^۱ به بررسی و کاربرد این روش در سیستم تهویه معادن زیرزمینی پرداخته است. در ادامه، روند و نتایج این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

این تحقیق در معدنی بزرگ با دو شاخه از تهویه خروجی و در گانسو^۲ انجام شده است. شکست‌های ناگزیر در این معدن شامل توقف جریان هوا^۳، جریان معکوس^۴، چرخه هوا^۵، مسیر کوتاه جریان هوا^۶، نشت هوا^۷ و گاز مضر^۸ می‌باشد. همچنین سیستم نظارت بازخورد^۹، که اگر نتواند شکست را به طور مؤثر بازخورد کند، می‌تواند به راحتی منجر به شکست کل سیستم شود. در این مطالعه روش تحلیل درخت خطای فازي برای محاسبه احتمال شکست رویداد نهایی که در آن "خرابی سیستم تهویه معدن" است، استفاده شده است. درخت خطای مربوط به این شکست در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.

¹- Jun Meng

²- Gansu

³- Wind Interruption

⁴- Reverse Wind

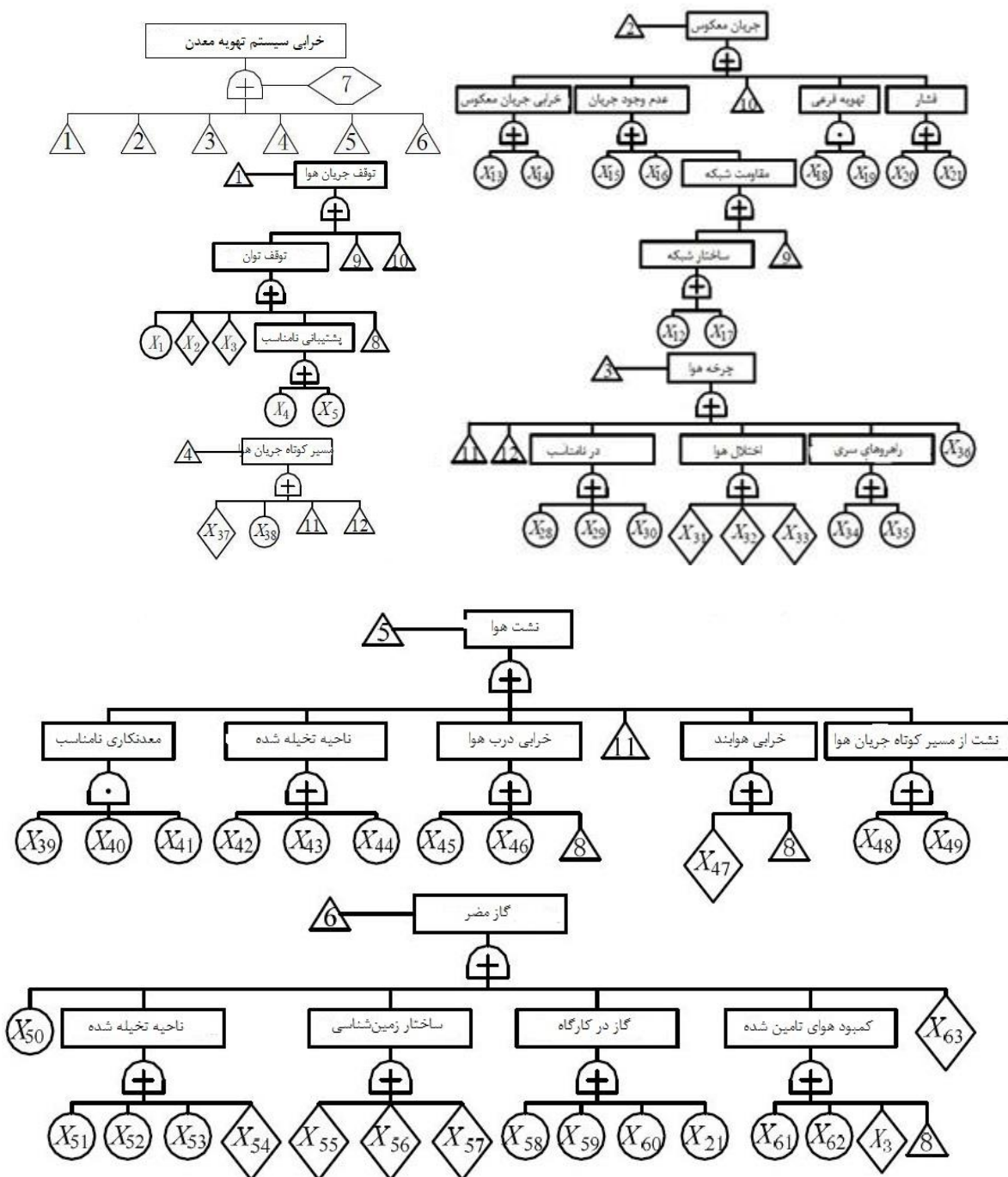
⁵- Air Circulation

⁶- The Wind Short Circuit

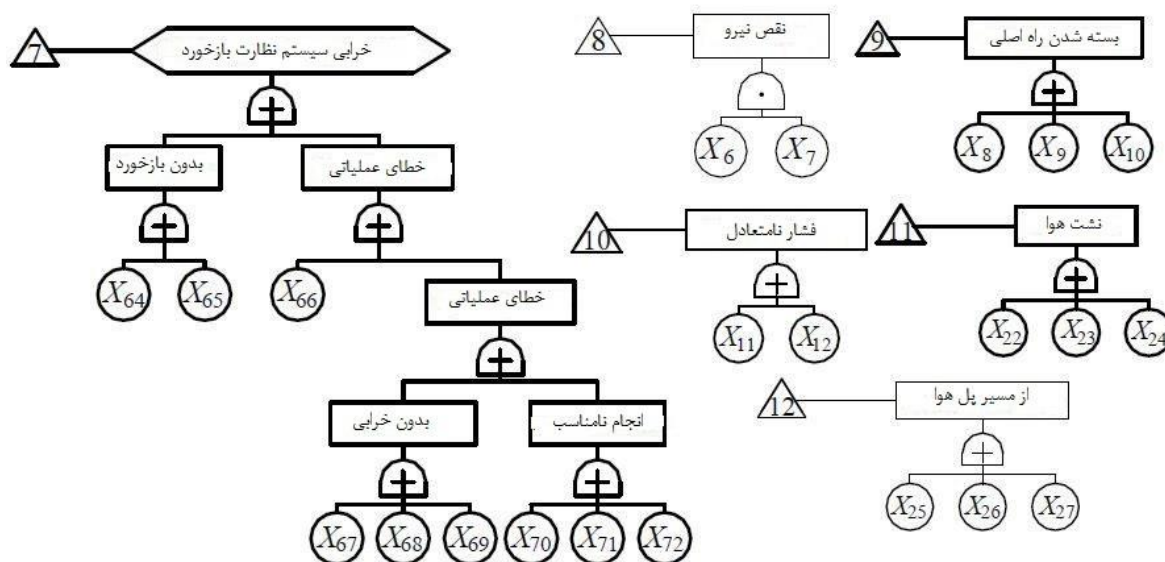
⁷- Air Leakage

⁸- Harmful Gas

⁹- Monitor Feedback System

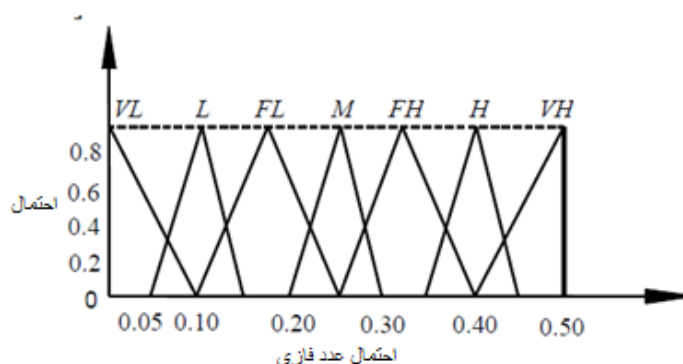


شکل ۳-۱: درخت خطای سیستم تهویه معدن گانسو (Meng, 2013)



ادامه شکل ۳-۱: درخت خطای سیستم تهویه معدن گانسو (Meng, 2013)

پس از رسم ساختار درخت خطا، باید احتمال هر کدام از رویدادهای اساسی مشخص باشد تا بتوان احتمال رویداد نهایی را محاسبه کرد. چون رفتار گسیختگی سیستم تهویه معدن پیچیده است بنابراین دستیابی به احتمال دقیق این رویدادها دشوار بوده و با عدم قطعیت همراه هستند. به همین دلیل در محاسبه احتمال آن‌ها اعداد فازی مثلثی به کار برده شده و میزان احتمال مربوط به آن‌ها با استفاده از روش 3σ مشخص شده است. روند کار به این صورت است که ابتدا متغیرهای زبانی تعریف می‌شوند، سپس با استفاده از نظرسنجی از متخصصان و استفاده از این روش، احتمال رویدادهای اساسی به دست می‌آیند. نمودار اعداد فازی مثلثی اصطلاحات زبانی این تحقیق در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: نمودار مربوط به اعداد فازی مثلثی متغیرهای زبانی (Meng, 2013)

همان طور که در شکل ۳-۲ مشاهده می شود، مجموعه به صورت {بسیار پایین، پایین، نسبتاً پایین، متوسط، نسبتاً بالا، بالا، بسیار بالا} تعریف شده که به صورت خلاصه $\{VL, L, FL, M, FH, H, VH\}$ است. در مورد نحوه محاسبه این روش می توان گفت که هر کدام از رویدادهای اساسی که مقدار احتمال آنها با استفاده از نظرسنجی مشخص می شود دارای یک تابع توزیع احتمال نرمال هستند، پس احتمال هر کدام به صورت عدد فازی مثلثی (l, m, u) بدین صورت است:

مقدار میانه، m و σ واریانس است. بر اساس 3σ ، هر فاصله به صورت $[m - 3\sigma, m + 3\sigma]$ در سطح اعتماد ۹۹٫۷٪ است. اگر $l = u = 3\sigma$ باشد، در این صورت مقدار هر احتمال $(m - 3\sigma, m, m + 3\sigma) = (l, m, u)$ است.

پس از محاسبه احتمال فازی مثلثی همه رویدادهای اساسی به این طریق، با استفاده از نوع درگاه ها و همچنین روابط زیر احتمال رویداد نهایی نیز که به صورت یک عدد فازی مثلثی است، به دست می آید.

$$\tilde{P}_{SJ}^{AND} = (l_{AND}, m_{AND}, u_{AND}) = \prod_{i=1}^n p_i = (\prod_{i=1}^n l_i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n u_i) \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{SJ}^{OR} = (l_{OR}, m_{OR}, u_{OR}) &= \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{p}_i)\right) \\ &= (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{l}_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{m}_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{u}_i)) \end{aligned} \quad (2-3)$$

پارامتر دیگری که در این تحقیق استفاده شده است، میزان اهمیت فازی^۱ است. این پارامتر که برای هر رویداد اساسی محاسبه می شود، مشخص می کند که کدام رویداد تأثیر بزرگتر و بیشتری بر سیستم دارد. به طور کلی نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

¹- The Degree of Fuzzy Importance

• آنالیز کیفی

تعداد ۵۴۹ مجموعه برشی حداقل، ۵۳۱ مجموعه برشی حداقل مرتبه دوم و ۱۸ مجموعه برشی حداقل مرتبه سوم در این درخت وجود دارد و دلیل آن شکست سیستم نظارت بازخورد است. بنابراین دارای تعداد زیادی مجموعه برشی حداقل است و ترکیب‌های بسیاری از رویدادها وجود دارد که می‌توانند دارای شکست باشند.

• آنالیز کمی

احتمال فازی رویداد نهایی (۰/۰۰۹، ۰/۰۱۴، ۰/۰۰۹) است و به این معنی است که احتمال شکست سیستم تهویه معدن با به کار بردن محاسبات فازی مثلثی برابر با ۰/۰۲۳ ~ ۰/۰۰۵ است. ماکزیمم آن برابر با ۲/۳ درصد، مینیمم قابلیت اطمینان فقط ۹۷/۷ درصد در سطح اعتماد ۹۹/۷ درصد است، بنابراین می‌تواند به راحتی منجر به شکست کل سیستم شود. احتمال هر رویداد نیز کاملاً بالا است، مثلاً احتمال فازی "چرخه هوا" (۰/۰۰۶۵، ۰/۰۰۷۹، ۰/۰۰۶۵)، که ماکزیمم آن ۱۴/۴ درصد است.

۳-۵- جمع‌بندی

همان‌طور که در فصل‌های قبلی بیان شد، یکی از خطراتی که در معادن زغال‌سنگ جهان به طور مکرر به وقوع می‌پیوندد، خطر خودسوزی زغال‌سنگ است. استفاده از روش‌های ارزیابی خطر خودسوزی یک نیاز مهم و اساسی محسوب شده و باید تلاش کرد تا آن را به حداقل رساند.

در این فصل با توجه به تحقیق حاضر و بررسی تحقیقات و منابع علمی مختلف می‌توان چنین گرفت که در روش‌ها و تحقیقات قبلی احتمال وقوع خودسوزی و همچنین احتمال وقوع جزئی‌ترین عوامل به وجود آورنده آن را در نظر نگرفته‌اند. بنابراین استفاده از یک روش که بتوان با استفاده از آن قابلیت و احتمال وقوع خودسوزی زغال را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد، امری ضروری به حساب می‌آید.

مدیریت و ارزیابی ریسک به روش تحلیل درخت خطا یکی از این روش‌ها است. به دلیل اینکه رفتار خودسوزی زغال پیچیده بوده و دستیابی به احتمال دقیق رویدادهای اساسی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است؛ بنابراین در این تحقیق در محاسبه احتمال این رویدادها از منطق فازی به همراه روش تحلیل درخت خطا استفاده خواهد شد.

در این فصل با توجه به مطالعه کارهای قبلی صورت گرفته، کاربرد این روش در فعالیت‌ها و صنایع مختلف بررسی شد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود در این مطالعات از این روش در صنایع و زمینه‌های معدنی کمتر استفاده شده است.

بنابراین در این تحقیق و در فصل بعد، خطر خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

فصل ۴: مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی

در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

۴-۱- مقدمه

در یک سیستم، چه ساده و چه پیچیده، وجود خطر و حادثه دور از انتظار نیست؛ لذا برای داشتن یک محیط ایمن شایسته است که این خطرات شناسایی و جهت کنترل و پیشگیری از آنها اقدام شود. یکی از این فعالیت‌ها، مدیریت و ارزیابی ریسک است که برای شناسایی و جلوگیری از حوادثی که ممکن است منجر به نتایج زیان‌باری شوند، انجام می‌شود.

ارزیابی ریسک یک فرآیند لازم و سیستماتیک در ارزیابی شدت رویداد و عواقب فعالیت‌های انسانی بر روی سیستم‌ها با خصوصیات پر خطر و تشکیل یک ابزار مفید برای سیاست ایمنی می‌باشد. تنوع در فرآیندهای آنالیز ریسک این‌گونه است که تکنیک‌های متعدد و مناسب زیادی برای انجام این کار وجود دارد (Koulouriotis et al., 2009).

در ارزیابی ریسک پس از شناسایی خطرات، برنامه کنترل باید اجرا شود تا خطرات شناسایی شده به کلی از بین برده شده یا به نوعی تحت کنترل در آیند. این که برنامه کنترل خطر را باید از کدام خطر یا خطرات آغاز کرد نیاز به تعیین اولویت خطرات دارد. برای تعیین اولویت خطرات، اولین کار محاسبه ریسک آنها می‌باشد. ریسک را می‌توان به عنوان یک کمیت که قابل اندازه‌گیری است و یا به صورت روابط ریاضی با استفاده از داده‌های تصادفی بیان نمود (Koulouriotis et al., 2009). در واقع ارزیابی ریسک ابزاری در خدمت مدیر یا تحلیل‌گر ریسک است که بر مبنای آن می‌تواند ریسک را اولویت‌بندی کرده، زمینه‌های مناسب برای کاهش ریسک را شناسایی کند.

مدیریت و ارزیابی ریسک نخستین بار به منظور استفاده در کارخانجات مواد شیمیایی خطرناک توسعه یافتند ولی پس از گذشت مدت زمانی در کلیه فعالیت‌ها از جمله فعالیت‌های صنعتی خصوصاً معدنکاری مورد استفاده قرار گرفتند. در واقع استفاده از چنین ساختارهایی نوعی پیشگیری از وقوع حوادث ناگوار است. امروزه در کشورهایی که به پیشگیری اهمیت ویژه‌ای می‌دهند، ساختارهای مدیریت ریسک بیش از هر جای دیگر گسترش یافته‌اند از جمله این کشورها می‌توان کشور استرالیا را نام برد که به خوبی از این ساختارها در صنعت معدنکاری خود بهره می‌گیرد (Tweedal et al., 1997).

۴-۲- تعاریف و مفاهیم

به منظور درک صحیح ایمنی سیستم در ابتدا مفاهیم و اصول ایمنی و ریسک و فرآیند مدیریت ریسک

تعریف و مورد بررسی قرار می‌گیرد (فام، ۱۳۹۰):

- **ایمنی^۱:** در فرهنگ لغات اصطلاح ایمنی به معنی امنیت، آسایش، سلامتی و ... است و از لحاظ تعریف عبارتست از میزان فرار از خطر.
- **سیستم^۲:** عبارتست از مجموعه افراد، تجهیزات، قوانین، روش‌ها و دستورالعمل‌ها که به منظور اجرای یک فعالیت معین در یک محیط خاص کنار یکدیگر قرار می‌گیرند.
- **خطر^۳:** به شرایطی اطلاق می‌شود که دارای پتانسیل رساندن آسیب و صدمه به کارکنان، خسارت به وسایل، تجهیزات، ساختمان‌ها و از بین بردن مواد یا کاهش قدرت کارایی در اجرای یک عمل از قبل تعیین شده باشد.
- **شدت خطر^۴:** عبارتست از یک توصیف طبقه‌بندی شده از سطح خطرات بر اساس پتانسیل واقعی یا مشاهده شده آن‌ها در ایجاد جراحت، صدمه و یا آسیب.

1- Safety

2- System

3- Hazard

4- Hazard Severity

- **احتمال خطر^۱:** عبارتست از امکان بروز شرایط خاص در یک وضعیت معین یا محیط کاری.
- **حادثه^۲:** واقعه برنامه ریزی نشده و بعضاً صدمه آفرین یا خسارت رسان که انجام، پیشرفت، یا ادامه طبیعی یک فعالیت یا کار را مختل می سازد.
- **شبه حادثه^۳:** رویدادهایی هستند که هر چند می توانند باعث صدمه یا جراحت شوند ولی به موارد فوق منجر نشده و به اصطلاح به خیر می گذرند.
- **رویداد^۴:** به وقایعی می گویند که شرایط لازم برای مرگ یا آسیب های جدی و صدمه به تجهیزات یا محیط زیست را به طور بالقوه داشته باشد (هر رویدادی که منجر به آسیب های جانی یا مالی شده است یا می تواند بشود). بنابراین رویداد مجموع حادثه و شبه حادثه می باشد.
- **ریسک^۵:** عبارتست از امکان وقوع حادثه بر حسب احتمال وقوع و شدت آن.
- **شکست یا نقص^۶:** عدم توانایی یک جزء، وسیله یا سیستم در اجرای عملکرد مورد انتظار و یا انجام یک عمل یا فعل ناخواسته را نقص یا شکست گویند.
- **قابلیت اعتماد^۷:** عبارتست از حد اطمینانی که یک محصول یا سیستم می تواند کارکرد معین خود را تحت شرایط عملیاتی و محیطی از پیش تعریف شده برای یک مدت معین انجام دهد.

¹- Hazard Probability

²- Accident

³- Near Miss

⁴- Incident

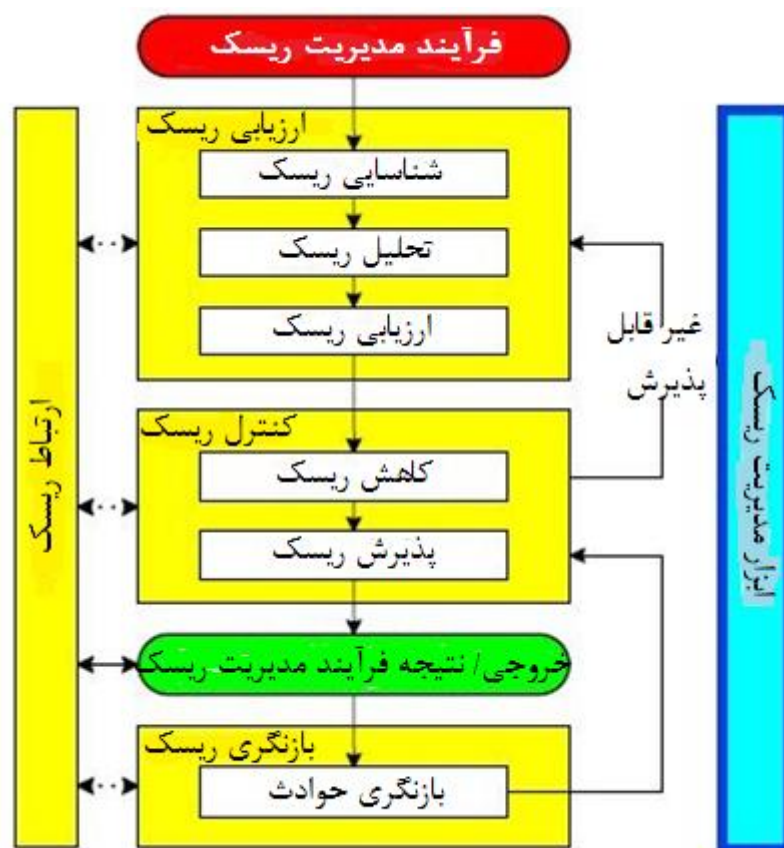
⁵- Risk

⁶- Failure

⁷- Reliability

۳-۴- مدیریت ریسک

فرآیند مدیریت ریسک طبق شکل ۴-۱ شامل فرآیند برنامه ریزی مدیریت ریسک^۱، شناسایی ریسک^۲، تحلیل ریسک^۳، ارزیابی ریسک^۴، پاسخ به ریسک و نظارت و کنترل ریسک^۵ می باشد (Greenfield, 2000؛ Standish, 2012).



شکل ۴-۱: فرآیند مدیریت ریسک (ICH Q9 EWG, 2006)

- 1- Risk Management Planning
- 2- Risk Identification
- 3- Risk Analysis
- 4- Risk Assessment
- 5- Risk Monitoring and Control

۴-۳-۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک

برنامه‌ریزی مدیریت ریسک، فرآیند تصمیم‌گیری در مورد تعیین اهداف و چگونگی فعالیت‌های مدیریت ریسک می‌باشد. قبل از هر چیزی باید اهداف و گستره‌ی مدیریت ریسک در پروژه تعیین شود زیرا بسیاری از ابتکارات مدیریت ریسک به دلیل عدم توجه به تعیین اهداف آن با شکست مواجه شده‌اند (PMI, 2000).

۴-۳-۲- شناسایی ریسک

در این مرحله ریسک‌هایی که پروژه را تحت تأثیر قرار می‌دهند شناسایی و خصوصیات آنها مستندسازی می‌شوند. این مرحله اساسی‌ترین و بحرانی‌ترین مرحله فرآیند مدیریت ریسک می‌باشد زیرا ریسکی که به درستی شناسایی نشده باشد را نمی‌توان به طور فعال مدیریت و کنترل کرد. هدف از این مرحله شناسایی تمامی ریسک‌ها اعم از بزرگ و کوچک نیست بلکه سعی بر آن است که ریسک‌های بارز و چشمگیر شناسایی شوند (Standish, 2012؛ Tweedale et al., 1997).

به منظور شناسایی ریسک‌ها لازم است که تمامی سناریوهای احتمالی و ممکن پروژه توسط تیم مدیریت ریسک و متخصصین امر مورد توجه و بررسی قرار گیرند. شناسایی ریسک می‌بایست توسط تیمی از اشخاص، با تنوعی از تخصص فنی در زمینه‌های مرتبط صورت پذیرد. تکنیک‌ها و ابزارهای بسیاری برای شناسایی ریسک‌ها وجود دارد اما از هیچ یک از آنها نمی‌توان انتظار شناسایی تمام ریسک‌ها، بزرگ و کوچک، را داشت. رایج‌ترین این تکنیک‌ها عبارتند از (PMI, 2000):

- **مرور اسناد^۱:** بازنگری و بررسی پروژه‌های مشابه قبلی به منظور شناسایی ریسک‌ها که اصولاً اولین گامی است که توسط تیم مدیریت ریسک اجرا می‌شود.

¹ - Documentation Review

- **طوفان ذهنی^۱:** رایج ترین تکنیک شناسایی ریسک می باشد، هدف از اجرای آن به دست آوردن لیستی جامع از ریسک ها می باشد. بر اساس این تکنیک تیم مدیریت ریسک و عده ای از متخصصین گرد هم جمع شده و ریسک های ممکنه در زمان اجرای پروژه را بررسی و شناسایی می کنند.
- **تکنیک دلفی^۲:** تکنیک دلفی روشی است برای اجماع متخصصین بر روی یک موضوع مانند ریسک پروژه. بر اساس این تکنیک به منظور شناسایی ریسک ها، پرسش نامه هایی بین متخصصین پخش می شود و سپس پاسخ ها گردآوری و آنالیز می شوند.
- **مصاحبه^۳:** ریسک ها را می توان از طریق مصاحبه با مدیران باتجربه و متخصصین موضوع شناسایی کرد.
- **چک لیست^۴:** برای شناسایی ریسک ها می توان بر اساس اطلاعات گذشته و دانشی که از پروژه های مشابه قبلی و سایر منابع اطلاعاتی گردآوری شده چک لیستی تهیه کرد. موارد در نظر گرفته شده در چک لیست باید تمامی ریسک های ممکنه در پروژه را در بر گیرد. مزیت استفاده از چک لیست شناسایی سریع و ساده ریسک ها می باشد اما باید در نظر داشت که تهیه لیستی کامل از تمامی ریسک ها تقریباً غیر ممکن است.

۴-۳-۳- تحلیل و ارزیابی ریسک

همانگونه که در شکل ۴-۱ نشان داده شد، تحلیل ریسک و ارزیابی ریسک به ترتیب مراحل بعد از شناسایی ریسک هستند و شدیداً با هم در ارتباط اند. هدف از اجرای این دو مرحله به ترتیب تعیین احتمال وقوع و پیامدهای حاصل از هر ریسک و تعیین اولویت و درجه اهمیت هر ریسک به منظور شناسایی ریسک های بحرانی (ریسک هایی که به کنترل و مدیریت بیشتری نیاز دارند) می باشد. برای این منظور از دو

1- Brainstorming

2- Delphi Technique

3- Interviewing

4- Checklist

تکنیک تحلیل کیفی ریسک و تحلیل کمی ریسک استفاده می‌شود (Standish, 2012؛ PMI, 2000). هر

کدام از این دو تکنیک روش‌های خاص خود را دارند که در فصل سوم به آنها اشاره شد.

یکی از روش‌های مورد استفاده در تکنیک کمی، روش تحلیل درخت خطا است. در این تحقیق، برای

بررسی و ارزیابی خطر خودسوزی در معادن زغال سنگ از این روش استفاده می‌شود؛ لذا در ادامه به بحث

در مورد روش تحلیل درخت خطا پرداخته خواهد شد.

۴-۳-۴- پاسخ به ریسک

برنامه‌ریزی پاسخ در مقابل ریسک، فرآیند تهیه راه‌حل‌ها و واکنش‌هایی است که به منظور 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).

استراتژی پاسخ به ریسک می‌تواند انتقال ریسک، اجتناب از ریسک، کاهش اثر ریسک، پذیرش ریسک

و غیره را شامل شود (PMI, 2000):

- **اجتناب^۱:** تغییر برنامه‌ی مدیریت پروژه به شکلی که تهدید حذف شود و روی اهداف پروژه تأثیر

نگذارد. این اقدام از نوع پیشگیرانه است.

- **انتقال^۲:** انتقال مسئولیت مدیریت و پاسخ به تهدید به بخشی دیگر

- **کاهش اثر ریسک^۳:** اجرای اقداماتی به منظور کاهش احتمال وقوع و یا تأثیر تهدید و یا هر دو

اقداماتی که برای استفاده بهینه از فرصت‌ها استفاده می‌شود عبارتند از:

^۱- Risk Avoidance

^۲- Risk Transfer

^۳- Risk Mitigation

- بهره‌برداری از ریسک^۱: این اقدام موازی اقدام اجتناب از ریسک است و در واقع هدف اجرای اقداماتی در راستای ایجاد اطمینان از وقوع فرصت است.
- سهم کردن دیگران در ریسک^۲: تقسیم کردن فرصت یا بخشی دیگر که توان بیشتری در استفاده از فرصت را دارد.
- ارتقاء ریسک^۳: اجرای اقداماتی به منظور افزایش احتمال وقوع یا تأثیر فرصت و یا هر دو اقداماتی که هم برای استفاده‌ی بهینه از فرصت‌ها و هم برای مهار تهدیدها استفاده می‌شود عبارتند از:
- پذیرش^۴: این روش ساده‌ترین روش برای رویارویی با ریسک می‌باشد. در این شرایط احتمال وقوع ریسک وجود داشته و میزان تأثیر ریسک بر روی پروژه در حدود تحمل تیم پروژه و سازمان می‌باشد.
- پاسخ احتمالی: اقداماتی که تنها در صورتی اتفاقات خاصی به وقوع بپیوندند اجرا خواهند گردید.

۴-۳-۵- نظارت و کنترل ریسک

نظارت و کنترل ریسک فرآیندهای کنترل ریسک‌های شناسایی شده، نظارت بر ریسک‌های باقی‌مانده، تعیین ریسک‌های جدید، تضمین اجرای طرح‌های مقابله با ریسک و ارزیابی تأثیر آنها در کاهش ریسک را شامل می‌شود. نظارت و کنترل ریسک یک فرآیند مستمر در تمامی طول عمر پروژه می‌باشد. فرآیند نظارت و کنترل ریسک منجر به گردآوری مطالب مفیدی می‌شود که می‌توانند در گرفتن تصمیم‌های مؤثر فوری هنگام وقوع ریسک مفید واقع شوند. هدف از فرآیند نظارت و کنترل ریسک تعیین این است که آیا (Tweedale et al., 1997; Greenfield, 2000):

➤ طرح‌های مقابله با ریسک همانگونه که طراحی شده‌اند، اجرا می‌شوند.

¹- Risk Exploit

²- Risk Sharing

³- Risk Enhancement

⁴- Risk Acceptance

در سیستم یا فرآیند ارزیابی می‌کند. دقیق به این دلیل که ارتباط و نقش رویدادها را به صورت تکی یا ترکیبی از آنها در وقوع رویداد اصلی مورد بررسی قرار می‌دهد و چند سونگر از این جهت که تجزیه و تحلیل گر را قادر می‌سازد که اثرات بالقوه رویدادهای احتمالی موجود در ساختمان درخت خطا بر روی رویداد اصلی را ارزیابی کند.

به دلیل انعطاف‌پذیری‌های موجود در این تکنیک، از آن در مرحله طراحی از عمر سیستم نیز استفاده می‌شود. تحلیل درخت خطا قادر است که نقص‌های بالقوه در طی فاز طراحی را پیش‌بینی کرده و تغییرات و تصحیحات ضروری را مشخص سازد. از این روش هم‌چنین می‌توان در طول فاز عملیاتی نیز برای تعیین ماهیت رویدادهای مطلوب یا نامطلوب ناشی از فعالیت سیستم استفاده کرد (محمدفام، ۱۳۹۰؛ Vesely, 2002).

علاوه بر موارد فوق، روش تحلیل درخت خطا در موارد زیر نیز کاربرد دارد (Clemens, 1993):

- ارزیابی سیستم‌های با انرژی بالا (رویدادهای با شدت و ریسک بالا).
- زمانی که عوامل بالقوه فراوانی در سیستم دخالت داشته باشند.
- برای کمک به طراحی سیستم و بهبود طراحی سیستم‌های پیچیده.
- برای شناخت خطای منفرد^۱.
- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر رویداد نهایی.
- نوعاً در فاز طراحی و توسعه اعمال می‌شود ولی ممکن است در فازهای ساخت، مونتاژ، تست و ارزیابی و ... نیز اعمال شود.
- این روش هم بر روی سیستم موجود و هم بر روی سیستمی که در حال طراحی است، اعمال می‌شود.

¹ - single failures

۴-۲- مفاهیم و نمادهای مورد استفاده در درخت خطا

در ساخت درخت خطا از نمادهای مختلفی استفاده می‌شود که تجزیه و تحلیل‌گر را قادر می‌سازد نوع رویدادها و همچنین ارتباط آنها با همدیگر را به صورت تصویری نشان دهد. در شکل ۴-۲ نمادهای اصلی مورد استفاده در تکنیک تحلیل درخت خطا نشان داده شده است. با درک معانی، مفاهیم و کاربردهای ویژه این نمادها، ساخت درخت خطا ساده‌تر و راحت‌تر خواهد شد. مفاهیم بعضی از اصطلاحات معمول در تکنیک تحلیل درخت خطا به شرح زیر می‌باشد (محمدفام، ۱۳۹۰؛ Kecojevic & Zhang, 2013):

- **رویداد^۱:** یک عنصر دو ارزشی است که اگر تغییرات ناشی از آن در جهت مثبت باشد به آن رویداد نرمال و در غیر این صورت به آن رویداد ناخواسته و یا رویداد خطا می‌گویند.
- **رویداد اصلی^۲ (بالایی یا نهایی):** رویدادی که در بالاترین نقطه درخت خطا جای می‌گیرد و علل به وجود آورنده آن شناسایی و تحلیل می‌شوند. رویداد اصلی در هر درخت خطا منحصر به فرد بوده و می‌تواند یک حادثه (انفجار، تصاعد گاز سمی و ...)، از کار افتادن سیستم و یا یک رویداد مطلوب باشد.
- **رویداد میانی^۳:** هر رویدادی در ساختمان درخت خطا به استثنای رویداد اصلی که مورد تحلیل بیشتر قرار گرفته و علل به وجود آورنده آن تایید می‌شود، رویداد میانی نامیده می‌شود.
- **رویداد پایانی^۴ (انتهایی / اولیه):** رویدادی که نمی‌توان علل به وجود آورنده آن را تعیین کرد. رویدادهای اساسی^۵ و رویدادهای توسعه‌نیافته^۶ انواع رویدادهای پایانی هستند.

¹- Event

²- Top event

³- Intermediate Event

⁴- Terminal event

⁵- Basic event

⁶- Undeveloped event

- **رویداد اساسی:** رویدادی است که دیگر نتوان آن را تجزیه کرد. به عبارت دیگر این رویداد در پایین ترین سطح یک درخت قرار دارد و مسیر درخت به آن محدود می شود. این رویدادها می توانند خطاهای سخت افزاری، فیزیکی، نرم افزاری، شیمیایی، خطاهای انسانی، خطاهای سیستم و ... باشند.
- **رویدادهای توسعه نیافته:** رویدادهایی که به دلایل زیر بیشتر از حد موجود تحلیل نمی شوند.
 - به دلیل فقدان اطلاعات کافی در مورد علل به وجود آورنده قابل ارزیابی بیشتر نباشند.
 - تشریح و تعیین علل به وجود آورنده رویداد در سطح زیر سیستم نتواند کمکی به افزایش دانش و فهم تجزیه و تحلیل گر در زمینه رویداد اصلی بکند.
 - به وسیله سیستم یا زیرسیستمی که در خارج از حدود سیستم مورد مطالعه قرار دارد ایجاد شده باشد.
- **رویداد خانه‌ای^۱:** رویدادی است که در شرایط نرمال سیستم، رخ دادن آن پیش بینی می شود. این رویداد با عملکرد نرمال سیستم توانایی منجر شدن به خطا را دارد. این رویداد هم چنین می تواند از یک منبع خارج از سیستم مورد تحلیل ناشی شود. رویداد خانه‌ای در تجزیه و تحلیل درخت خطا در دو حالت روشن و خاموش و یا بلی و خیر به کار گرفته می شود. احتمال رویداد خانه‌ای در دو حالت یاد شده به ترتیب برابر یک و صفر می باشد.
- **نمادهای انتقال^۲:** شاخه‌های مختلف درخت خطا ممکن است در یک برگه جای نگیرند که به کمک نماد انتقال به^۳ به برگه دیگر منتقل می شود. در برگه دیگر در ابتدا نماد انتقال از^۴ درج و سپس بقیه درخت رسم می شود.

¹- House event

²- Transfer symbol

³- Transfer out

⁴- Transfer in

- **درگاه‌ها^۱:** رویدادهای مختلف در بدنه درخت خطا توسط درگاه‌ها به همدیگر وصل می‌شوند. درگاه‌ها با توجه به نوع خود یک یا چند ورودی دارند ولی تنها دارای یک خروجی می‌باشند.
- **درگاه "و"^۲:** برای بیان حالتی استفاده می‌شود که رویداد خروجی در زمانی اتفاق می‌افتد که فقط و فقط باید همه رویدادهای ورودی اتفاق بیافتد.
- **درگاه "یا"^۳:** برای بیان حالتی استفاده می‌شود که رویداد خروجی در زمانی رخ دهد که حداقل یکی از رویدادهای ورودی رخ دهند.
- **مجموعه برشی^۴:** گروهی از رویدادهای اساسی هستند که اگر همگی اتفاق بیافتند، باعث رویداد اصلی (بالایی) می‌شوند.
- **مجموعه برشی حداقل^۵:** کمترین گروهی از رویدادهای اساسی هستند که اگر همگی اتفاق بیافتند، باعث رویداد اصلی (بالایی) می‌شوند. هر یک از برش‌های حداقل نمایانگر یک راه احتمالی برای وقوع رویداد اصلی می‌باشد. بدین ترتیب که با رخ دادن رویدادهایی که در یک برش حداقل قرار دارد، رویداد اصلی به وجود خواهد آمد.
- **درخت خطای معادل^۶:** یک ساختار سری از ساختارهای موازی برش‌های حداقل درخت خطای معادل را شکل می‌دهد.

¹- Gates

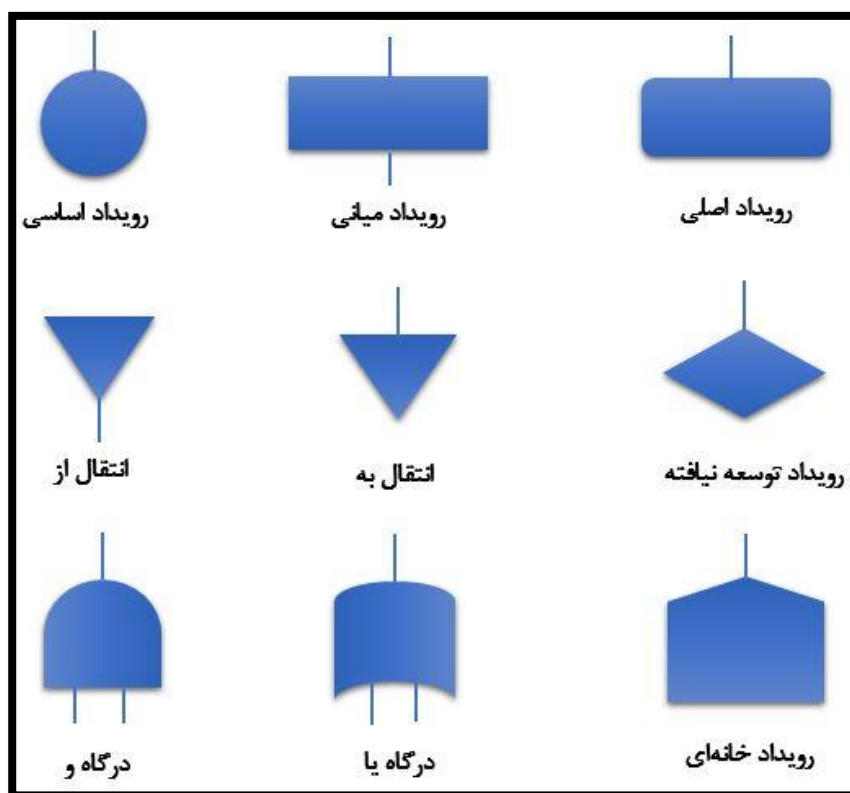
²- And gates

³- Or gates

⁴- Cut set

⁵- Minmal cut set = MCS

⁶- Equivalent fault tree



شکل ۴-۲: نمادهای مورد استفاده در ساختار درخت خطا (Kecojevic & Zhang, 2013; Vesely, 2002)

۴-۳- اصول روش

روش تحلیل درخت خطا، ابزار تجزیه و تحلیل استنباطی و هم‌چنین دیاگرام گرافیکی 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.

به طور کلی تکنیک تحلیل درخت خطا تکنیکی است که از آن می‌توان برای شناسایی آن دسته از

رویدادهایی که لازم است برای به وقوع پیوستن یک رویداد مطلوب و یا نامطلوب رخ دهند، استفاده کرد.

این تکنیک برای تجزیه و تحلیل رویدادها، متکی بر یک روش قیاسی است، بدین شکل که تجزیه و تحلیل

را از یک رویداد اصلی (کل) شروع کرده و سعی می‌کند که علل به وجود آورنده آن را در قالب رویدادهای

میانی و پایانی (جزء) شناسایی و تعیین کند. یکی از توانمندی‌های تکنیک که باعث شده است استفاده از

آن شکل گسترده‌تری به خود گیرد، توانایی آن در تمیز دادن رویدادهایی که بایستی برای وقوع رویداد فوقانی خود رخ دهند- که با درگاه "و" مشخص می‌شوند- با رویدادهایی که وقوع همه آن‌ها برای رخ دادن رویداد فوقانی لازم نیست- که با درگاه "یا" مشخص می‌شوند- می‌باشد. با استفاده از این تکنیک علاوه بر اینکه امکان تجزیه و تحلیل کیفی وجود دارد می‌توان در صورت وجود داده‌های کمی برای رویدادهای پایانی، تجزیه و تحلیل را کمی کرده و احتمال وقوع رویداد اصلی را نیز تعیین کرد (محمدفام، ۱۳۹۰).

۴-۴-۴- مراحل روش تحلیل درخت خطا

به طور کلی روش تحلیل درخت خطا نیاز به اجرای گام‌های زیر دارد (محمدفام، ۱۳۹۰):

- شناسایی هدف برای تحلیل درخت خطا
- تعریف رویداد نهایی درخت خطا
- تعریف دامنه تحلیل درخت خطا
- تعریف سطح تحلیل
- تعریف مقررات پایه‌ای برای تحلیل درخت خطا
- ایجاد درخت خطا
- ارزیابی درخت خطا
- تفسیر و ارائه نتایج

تحلیل درخت خطا می‌تواند هم به صورت کمی^۱ و هم به صورت کیفی یا نظری^۲ انجام شود

(محمدفام، ۱۳۹۰).

^۱- Quantitative

^۲- Qualitative / Subjective

الف) تحلیل کیفی

تحلیل کیفی به منظور محاسبه مجموعه برشی حداقل انجام می‌شود. یک مجموعه برشی، ترکیبی از رویدادهای اساسی است که منجر به وقوع رویداد نهایی می‌شوند و یک مجموعه برشی حداقل (MCS)، ترکیبی از این مجموعه است (عبداله‌زاده و راستگو، ۱۳۹۳؛ عبدالله‌زاده و راستگو، ۱۳۹۱).

هر یک از مجموعه‌های برشی حداقل نمایانگر یک راه احتمالی برای وقوع رویداد نهایی می‌باشد. بدین ترتیب که با رخ دادن رویدادهایی که در یک برش حداقل قرار دارد رویداد نهایی به وجود خواهد آمد. بنابراین تجزیه و تحلیل آنها ارزیابی اهمیت هر یک از راه‌های احتمالی بروز رویداد اصلی است (محمدفام، ۱۳۹۰).

ب) تحلیل کمی

در تحلیل کمی درخت خطا برای محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی باید احتمال وقوع هر یک از رویدادهای اساسی معلوم باشد. با معلوم بودن احتمال وقوع هر یک از رویدادهای اساسی، می‌توان با توجه به نوع درگاه‌های مورد استفاده، احتمال رویداد نهایی را به دست آورد.

احتمال وقوع رویداد نهایی یا رویدادهای میانی که درگاه ارتباطی آنها "و" است با به کارگیری رابطه (۱-۴) و احتمال وقوع رویداد نهایی یا رویدادهای میانی که درگاه ارتباطی آنها "یا" است با استفاده از رابطه (۲-۴) به دست می‌آید (Lavasani et al., 2011):

$$P = \prod_{i=1}^n p_i \quad (1-4)$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (2-4)$$

که در آن P : احتمال وقوع رویداد خروجی درگاه، n : تعداد رویدادهای ورودی درگاه و p_i : احتمال وقوع هر یک از رویدادهای ورودی درگاه می‌باشد.

۴-۵- مزایا و معایب روش تحلیل درخت خطا

مزایا و معایب روش تحلیل درخت خطا به شرح زیر می باشد

(Abdelgawad, 2011):

الف) مزایا

- ارزیابی احتمالات ترکیبات مختلف خطاها در یک سیستم پیچیده.
- نقاط منفرد و خطاهای با علل مشترک قابل شناسایی و ارزیابی است.
- با شناسایی نقاط آسیب پذیر سیستم، امکان به کارگیری منابع لازم برای کنترل ریسک های تعیین شده فراهم می شود.
- از این تکنیک می توان برای پیکره بندی مجدد سیستم برای کاهش آسیب پذیری آن استفاده کرد.
- ابزار مفیدی برای شناسایی ریشه علت های نقص تجهیزات است.
- این روش یک نمایش دیداری از سیستم و منابع آن که دچار نقص می شوند، را ارائه می کند.
- روش تحلیل درخت خطا این اجازه را فراهم می آورد 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 می باشد.
- این روش کمی و کیفی است و امکان برآورد های احتمالی یک عیب یا حادثه را فراهم می کند.
- درخت خطا را می توان به عنوان یک ابزار فعال برای کمک به ایجاد استراتژی های پاسخ پیشگیرانه مورد استفاده قرار داد. با درک منطق پشت هر رویداد ریسک، استراتژی های پاسخ پیشگیرانه برای کنترل علل ریشه ای آن در مراحل اولیه قبل از رخداد ریسک، می تواند طراحی شود.

- تجزیه و تحلیل درخت خطا و آنالیز حساسیت اطلاعات ارزشمندی را برای آنالیز ریسک با اولویت‌بندی سهم حوادث در وقوع رویداد نهایی فراهم می‌کند. با استفاده از چنین رویکردی تیم پروژه می‌تواند بر روی ایجاد استراتژی پیشگیرانه برای حداقل کردن علل ریشه‌ای حوادث تمرکز کند.
- درخت خطا می‌تواند برای انجام بررسی‌های ریشه‌ای، پس از شناسایی هر ریسک مورد استفاده قرار گیرد. با تجزیه و تحلیل منطقی بین علل ریشه‌ای مختلف، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند درک کنند که چرا یک واقعه ریسک روی می‌دهد.
- 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 هر بار 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 نگردد، درخت خطا دقیق نخواهد بود.
- همان‌طور که در بخش ۳-۳-۴ گفته شد، در تحقیق حاضر برای بررسی و ارزیابی ریسک خطر خودسوزی زغال سنگ از روش تحلیل درخت خطا استفاده شده است. به دلیل اینکه رفتار خودسوزی زغال پیچیده بوده و به دست آوردن احتمال دقیق رویدادهای اساسی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است؛ لذا در محاسبه احتمال این رویدادها از منطق فازی به همراه این روش استفاده خواهد شد.

در ادامه به منظور روشن تر شدن این موضوع به بیان تئوری فازی پرداخته می شود.

۴-۵- تئوری فازی

اکثر اتفاقات و رویدادهایی که در زندگی روزمره برای ما اتفاق می افتد دارای ابهام می باشند. ابهام ممکن است با شکل، مکان، رنگ، ترکیب و محتوی رویدادها همراه باشد و معناها چه بودن آنها را تشریح می کنند. یعنی انسان با استفاده از معانی مختلف، چه بودن و ماهیت آنها را تشریح و توصیف می کند.

پایه و اساس مجموعه ها و منطق فازی به وسیله پروفسور لطفی زاده مطرح شده است. وی در سال ۱۹۶۵ اولین مقاله خود را در زمینه فازی تحت عنوان مجموعه های فازی منتشر کرد که جرقه اولیه ای از پرتو یک جهان بینی در عرصه ریاضیات و علوم بود. در دهه ۱۹۹۰ پیشرفت های زیادی در زمینه سیستم های فازی ایجاد شد. اما با وجود شفاف شدن تصویر سیستم های فازی، هنوز فعالیت های بسیاری باید انجام شود و بسیاری از راه حل ها و روش ها همچنان در ابتدای راه قرار دارد (عطائی، ۱۳۸۹).

۴-۵-۱- مجموعه های فازی

مجموعه های فازی در ریاضیات جدید به مجموعه هایی اطلاق می شوند که عضویت بعضی یا تمام اعضا کاملاً روشن و مشخص نیست و عناصر آن به طور نسبی متعلق به آن مجموعه هستند. یک مجموعه فازی تعمیم یک مجموعه کلاسیک است که اجازه می دهد تا تعلق هر مقداری را در بازه $[0,1]$ اختیار کند. در مجموعه های فازی بر خلاف مجموعه های قطعی، عناصر به دو دسته عضو و غیر عضو تقسیم نمی شوند، بلکه بر اساس آن چه ما تعریف می کنیم، میزان عضویت عناصر مختلف در مجموعه های فازی بین صفر و یک متغیر است. هیچ روش قطعی برای تعیین تابع عضویت وجود ندارد و این مسأله بیش از همه یک مقوله حسی و تجربی می باشد (عطائی، ۱۳۸۹).

➤ نمایش توابع عضویت

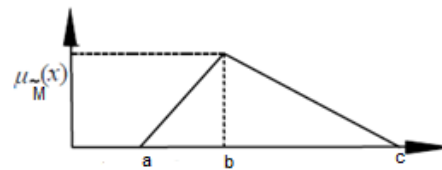
روش‌های متداولی برای نمایش توابع عضویت وجود دارد که عبارت از نمایش ترسیمی^۱، نمایش به صورت جدول و لیست و نمایش عددی^۲ هستند.

در نمایش عددی، یک عدد فازی ممکن است به صورت مثلثی^۳ یا دوزنقه‌ای^۴ بیان 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 دوزنقه‌ای 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 تغییر کند (عطایی، ۱۳۸۹).

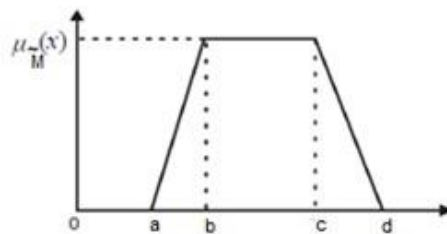
در شکل ۳-۴ و ۴-۴ به ترتیب عدد فازی مثلثی و دوزنقه‌ای همراه با توابع عضویت آنها دیده می‌شود.

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases}$$



شکل ۳-۴: عدد فازی مثلثی (عطایی، ۱۳۸۹)

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases}$$



شکل ۴-۴: عدد فازی دوزنقه‌ای (عطایی، ۱۳۸۹)

1- Graphical Representation
2- Analytic Representation
3- Triangular Fuzzy Number = T.F.N
4- Trapezoidal Fuzzy number

۴-۵-۲- منطق فازی

استدلال^۱ با مجموعه‌های فازی، منطق فازی نامیده می‌شود. منطق فازی در حل مسائلی که درک آنها مشکل است، ابزاری توانمند به شمار می‌رود. در منطق فازی به جای دو ارزشی بودن، طیفی از ارزش‌ها، در بازه بسته‌ای بین صفر و یک وجود خواهد داشت. با این طیف می‌توان عدم قطعیت را به خوبی نمایش داد. تمایز عمده منطق فازی با منطق چندارزشی آن است که در منطق فازی مفهوم یک عبارت نیز می‌تواند مبهم باشد. در منطق فازی می‌توانیم جملاتی را که معمولاً در محاوره‌های روزانه برای ارزش‌گذاری مسائل استفاده می‌کنیم، از قبیل کاملاً درست است، کم و بیش درست است و ... را به کار بندیم (عطائی، ۱۳۸۹).

۴-۵-۳- سیستم فازی

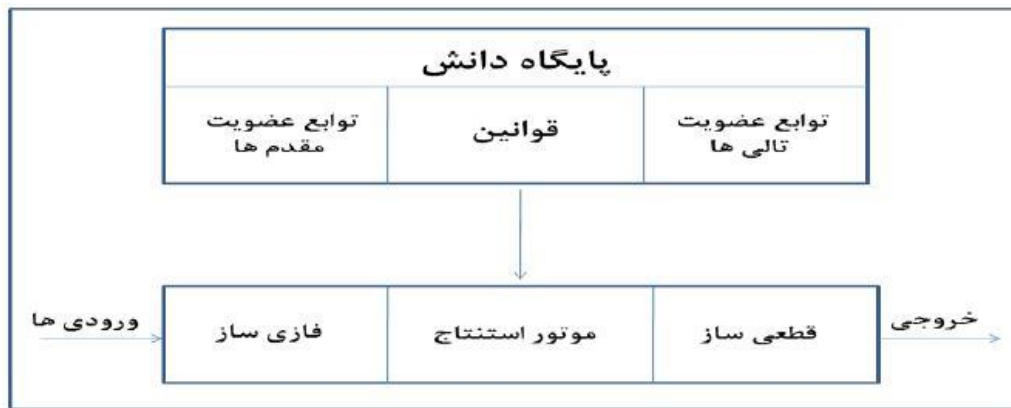
در سیستم‌های عملی، اطلاعات مهم از دو منبع سرچشمه می‌گیرند. یکی از منابع افراد خبره می‌باشند که دانش و آگاهی خود را در مورد سیستم با زبان طبیعی تعریف می‌کنند. منبع دیگر اندازه‌گیری‌ها و مدل‌های ریاضی هستند که از قواعد فیزیکی مشتق شده‌اند. بنابراین یک مسأله مهم ترکیب این دو نوع اطلاعات در طراحی سیستم‌ها است. بدین منظور باید دانش بشری را در چهارچوبی مشابه مدل‌های ریاضی فرموله کرد. این تبدیل توسط یک سیستم فازی انجام می‌شود. سیستم‌های فازی پدیده‌های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند. در شکل ۴-۵ یک سیستم فازی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود یک سیستم فازی شامل سه بخش فازی‌ساز^۲، موتور استنتاج فازی^۳ و غیرفازی‌ساز^۴ می‌باشد (عطائی، ۱۳۸۹).

¹- Reasoning

²- Fuzzifier

³- Fuzzy inference engine

⁴- Defuzzifier



شکل ۴-۵: نمایش یک سیستم فازی (Ross, 2010)

الف) فازی سازی^۱

مرحله تعریف مجموعه های فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی، فازی سازی نامیده می شود. برای تعریف این مجموعه های فازی باید دانش اولیه ای از دامنه تعریف هر کدام از این متغیرها وجود داشته باشد. در طبقه بندی توابع عضویت، داده های ورودی به صورت مجموعه های فازی مثل بالا، متوسط، پایین و ... تقسیم می شود که دامنه تمام داده های ورودی به وسیله چنین متغیرهایی با نسبت دادن درجه عضویت تقسیم بندی می شود (عطائی، ۱۳۸۹).

ب) استنتاج فازی^۲

قلب یک سیستم فازی یک پایگاه قواعد فازی^۳ است که از قواعد اگر ... آن گاه ... تشکیل شده است. این مجموعه قواعد بر اساس دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی به دست می آید. موتور استنتاج فازی با انجام پردازش هایی روی قوانین فازی و سایر داده های موجود در پایگاه اطلاعات، پاسخ مورد نظر را که به شکل عبارات زبانی فازی یا مقادیر فازی می باشد، تعیین می کند. سیستم های فازی مختلف از اصول و روش های متفاوتی برای ترکیب قواعد فازی استفاده می کنند.

^۱- Fuzzification

^۲- Fuzzy inference

^۳- Rule base

در مرحله استنتاج فازی، تعدادی قاعده فازی به صورت قواعد اگر ... آن گاه ... تعریف می شود. هر قاعده فازی دارای دو بخش مقدمه^۱ و نتیجه^۲ می باشد. در قسمت مقدمه اجزا توسط عملگرهای AND و OR به هم مربوط می شوند. در استنتاج فازی، خروجی با توجه به تابع عضویت تعیین شده و برآورد قواعد و محاسبه نتیجه فازی به دست می آید. برای استدلال و استنتاج ترکیب منطقی، از خروجی های قواعد اگر ... آن گاه ... استفاده می شود و متناظر با شرایط قسمت اگر، می توان قاعده منطقی خروجی را نوشت. در این روش نحوه ترکیب^۳ قواعد در نتایج خروجی فازی مؤثر است و منطق فازی از همه قواعد نوشته شده، برای برآورد خروجی استفاده می کند. ورودی یک تابع عضویت، در صورت دارا بودن شرایط بیان شده در قسمت اگر، یک خروجی خواهد داد. هر قاعده ای که درجه عضویتی غیر صفر داشته باشد، فعال می شود. لذا اگر از توابع عضویت گاوسی استفاده شود، تمام قواعد فعال خواهند شد. مقدار خروجی نهایی فازی به صورت سطح منحنی از ترکیب نتایج قواعد نوشته شده حاصل می شود (عطائی، ۱۳۸۹).

در روش ممدانی^۴ از عملگر MIN برای AND و از عملگر MAX برای OR که به روش استنتاج MIN-MAX معروف است، استفاده می شود. در این روش اگر عبارات قسمت اگر توسط عملگر AND به هم ارتباط داده شده باشند، برای ترکیب این عبارات و به دست آوردن خروجی واحد از قاعده مورد نظر، مینیمم خروجی هر یک از این عبارات محاسبه می شود. همچنین اگر قواعد فازی توسط عملگر OR به هم ارتباط داده شده باشند، برای ترکیب قواعد فعال شده و به دست آوردن خروجی واحد از روی خروجی های این قواعد، ماکزیمم خروجی های هر یک از این عبارات محاسبه می شود. در روش دیگری تحت عنوان استنتاج SUM-PROD از ضرب برای عملگر AND و از جمع برای عملگر OR استفاده می شود.

1- Premise

2- Conclusion

3- Aggregation

4- Mamdani

به طور خلاصه، نقطه شروع ساخت یک موتور استنتاج فازی، به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر- آنگاه فازی از دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی می‌باشد؛ مرحله بعدی، ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد است (عطائی، ۱۳۸۹).

ج) غیر فازی‌سازی^۱

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^۲ تبدیل کرد. بعضی مواقع ممکن است بخواهیم سطح خروجی فرآیند استنتاج فازی را در قالب یک عدد معمولی بیان کنیم. فرآیند تبدیل اعداد فازی به اعداد حقیقی قطعی، غیر فازی‌سازی نامیده می‌شود.

برای غیرفازی کردن روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آنها عبارتند از (عطایی، ۱۳۸۹):

- **روش گرانیگاه^۳:** در این روش گرانیگاه سطح به دست آمده در مرحله استنتاج محاسبه شده و بر محور افقی تصویر می‌شود. بنابراین در این روش میانگین وزن دار مقادیر متغیر خروجی به دست می‌آید (وزن هر مقدار خروجی درجه عضویت آن است). چون این روش تمام نقاط حوزه تعریف و درجه عضویت آنها را در نظر می‌گیرد، دقیق‌ترین روش غیرفازی کردن می‌باشد.
- **روش نصف‌کننده سطح^۴:** در این روش نقطه‌ای تعیین خواهد شد که اگر از آن نقطه خط قائمی رسم شود، سطح به دو قسمت مساوی تقسیم خواهد شد.

¹- Defuzzification

²- Crisp

³- Center of Area (centeriod)

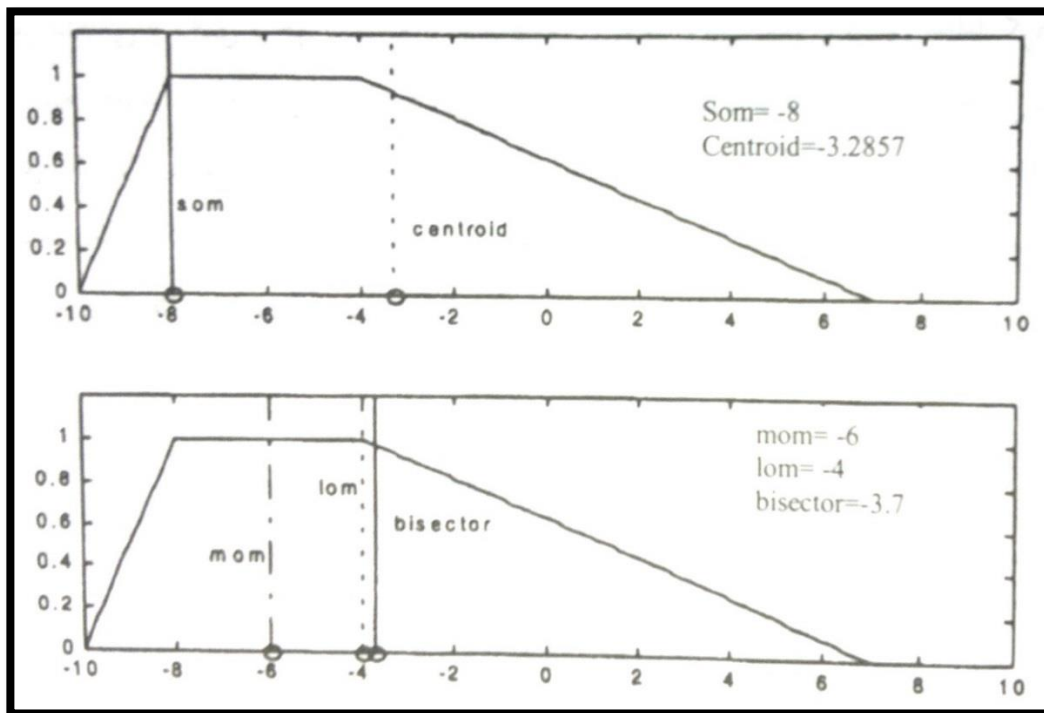
⁴- Bisector

• روش میانگین حداکثرها^۱: در این روش میانگین تمام مقادیری که دارای بیشترین درجه عضویت هستند، تعیین می شود.

• روش کوچکترین حداکثرها^۲: در این روش کوچکترین مقدار از بین تمام مقادیری که دارای بیشترین درجه عضویت هستند، تعیین می شود.

• روش بزرگترین حداکثرها^۳: در این روش بزرگترین مقدار از بین تمام مقادیری که دارای بیشترین درجه عضویت هستند، تعیین می شود.

در شکل ۴-۶ سطح به دست آمده در مرحله استنتاج فازی نشان داده شده است که با استفاده از روش های مختلف غیر فازی کردن به عدد قطعی تبدیل شده است.



شکل ۴-۶: مقایسه روش های مختلف غیر فازی کردن (عطایی، ۱۳۸۹)

¹- Mean of Maximum = MOM

²- Smallest of Maximum = SOM

³- Largest of Maximum = LOM

۴-۶- ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

ارزیابی مخاطرات شامل دو مقوله کمی و کیفی است. در این خصوص از تکنیک‌های مختلفی نظیر تحلیل درخت خطا می‌توان استفاده کرد. تحلیل درخت خطا یک روش ارزیابی کمی است. البته این کار زمانی انجام می‌شود که ارزیاب اطلاعات کافی در مورد نرخ و احتمال شکست تجهیزات داشته باشد. تحلیل درخت خطا یک روش جزء‌گرا است که در این حالت یک رویداد به عنوان رویداد نهایی مشخص شده و با روش منطقی رو به پایین (از کل به جزء) علت‌ها و ریشه‌های وقوع رویداد نهایی تعیین می‌شود. با مشخص شدن تمامی مقادیر احتمال رویدادها از ابتدا تا انتها، مقدار احتمال رخداد یک وضعیت نهایی و اغلب ناگوار سیستم تعیین می‌شود. بنابراین تجزیه و تحلیل درخت خطا یکی از مدل‌های مطلوب ارزیابی مخاطرات به شمار می‌رود. گاهی اوقات به دلیل عدم اطلاعات کافی، برآورد دقیق میزان شکست از اجزا یا احتمال وقوع رویدادهای ناخواسته دشوار است. علاوه بر این، به علت عدم دقت در اطلاعات رویداد پایانی، نتیجه کلی نیز دارای عدم قطعیت می‌باشد. برای جلوگیری از چنین شرایطی، رویکرد فازی و ترکیب آن با نظر متخصصان را می‌توان با روش تحلیل درخت خطا به کار برد تا ابهام و عدم وجود داده در رویدادهای اساسی را کاهش دهد (میرزا و همکاران، ۱۳۹۳).

۴-۶-۱ منطقه مورد مطالعه

شرکت معادن زغال سنگ البرز شرقی یکی از بزرگترین تولیدکننده‌های کنسانتره زغال سنگ به منظور استفاده در کوره‌های کک‌سازی ذوب آهن اصفهان به شمار می‌رود. شرکت معادن زغال سنگ البرز شرقی فعالیت اکتشافی خود را از سال ۱۳۴۹ آغاز و از سال ۱۳۵۱ به موازات ادامه فعالیت اکتشافی رسماً شروع به بهره‌برداری نمود. همانطور که از اسم شرکت استنباط می‌گردد، حوزه فعالیت آن در شرق سلسله جبال البرز به طول ۲۲۰ کیلومتر گسترش دارد. توان تولید سالانه شرکت ۳۰۰ هزار تن زغال سنگ کنسانتره است

و عمده مصرف کنندگان زغال تولیدی شرکت، ذوب آهن اصفهان و کک سازی زرند کرمان می باشند. عمده فعالیت این شرکت در سه منطقه معدنی طزره، تخت و رضی و کارخانه زغال شویی متمرکز می باشد.

منطقه طزره در موقعیت ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه طول، و عرض ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه جغرافیایی قرار گرفته و متوسط ارتفاع منطقه ۲۲۰۰ متر است. طزره در فاصله ۷۰ کیلومتری شهرستان شاهرود واقع می باشد. از لحاظ زمین شناسی، منطقه طزره از مناطق زغال خیز تریاس- ژوراسیک است، امتداد لایه های آن شرقی- غربی می باشد که از غرب به منطقه کلاریز و از شرق به منطقه رزمجا محدود می شود. در اواسط سال ۱۳۴۸ برای اولین بار ناحیه زغال خیز طزره توسط زمین شناسان ایرانی و شوروی سابق مورد بررسی مقدماتی قرار گرفت. روش های استخراج در معدن طزره، پلکانی معکوس و جبهه کار طولانی می باشد.

منطقه طزره، خود شامل چهار معدن اصلی کلاریز، مجموعه مادر، کلمدر برناکی و رزمجا در کنار معادن خصوصی دیگر می باشد و به طور کلی توان تولید در این مجموعه، ۱۲۵ هزار تن در سال می باشد.

برای بررسی لایه های منطقه زغالی طزره از نظر خودسوزی، از نتایج کار صفاری که در سال ۱۳۹۲ یک سیستم طبقه بندی مهندسی برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ را ارائه کردند، استفاده شده است. وی در تحقیق خود پس از تعیین پارامترهای مؤثر در خودسوزی زغال سنگ، برای تعیین ضریب اهمیت هر یک از این پارامترها از نظر کارشناسان مربوطه استفاده کرد. سپس برای ارائه سیستم طبقه بندی، نظرات کیفی کارشناسان را با استفاده از دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)^۱ و سیستم های مهندسی سنگ (RES)^۲ تجزیه و تحلیل و وزن هر پارامتر را مشخص نمود. با محاسبه و تعیین وزن هر پارامتر، سیستم طبقه بندی جدیدی با نام اندیس پتانسیل خودسوزی زغال سنگ (CSCPi)^۳ به صورت کمی

¹- Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

²- Rock Engineering Systems

³- Coal Spontaneous Combustion Potential index

درآمد. این سیستم طبقه‌بندی در مجموع به زغال‌ها امتیازی از ۰ تا ۱۰۰ را اختصاص داده و سپس قابلیت خودسوزی زغال سنگ را در ۳ کلاس پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی می‌کند (صفاری، ۱۳۹۲).

مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با حوادث رخ داده در زمینه خودسوزی زغال سنگ در منطقه طزره، تطابق خوبی را نشان داده و همه لایه‌های زغال در این منطقه دارای اندیس خودسوزی متوسط و بالا هستند. مثلاً لایه K5 در منطقه پشکلات دارای اندیس خودسوزی بالائی است که با توجه به آمار حوادث، این لایه (تونل مادر) در سال ۱۳۸۵ دچار خودسوزی شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این مناطق دارای پتانسیل بروز خودسوزی هستند و ارزیابی خودسوزی در آن‌ها امری لازم و ضروری است که باید در طول مراحل مختلف عمر معدن برای کاهش و جلوگیری از خسارات و صدمات جانی و مالی، انجام شود.

جداول ۴-۱ تا ۴-۳، به ترتیب پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ در ۳ منطقه پشکلات، کلاریز و رزمجا برای لایه‌های مختلف را نشان می‌دهند. در مورد لایه K5 در منطقه پشکلات (تونل مادر) می‌توان گفت که این لایه دارای میزان پیریت زیاد (۵-۸ درصد)، خاکستر کم (کمتر از ۱۰ درصد)، گازخیزی کم (کمتر از ۵ مترمکعب بر تن)، ضخامت زیاد، شیب زیاد (۴۵-۶۰ درجه)، از لحاظ تکتونیکی دارای گسل بزرگ با ریزش‌های بزرگ است. نرخ پیشروی کمتر از ۱ متر در روز و روش پر کردن، تخریبی است. هم‌چنین روش استخراج در این لایه، روش جبهه‌کار طولانی دستی است که در مقایسه با روش‌های استخراج جبهه‌کار طولانی مکانیزه، اتاق و پایه و جبهه‌کار کوتاه روشی است که بیشترین پتانسیل بروز پدیده خودسوزی را دارد. بنابراین شرایط برای بروز پدیده خودسوزی در این لایه زغالی کاملاً مهیا بوده است (صفاری، ۱۳۹۲).

در این تحقیق ارزیابی ریسک خطر خودسوزی زغال سنگ در مجموعه معادن شرکت زغال سنگ البرز شرقی در قسمت معدن زیرزمینی طزره و در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین با استفاده از روش تحلیل درخت خطای فازی مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل دخت خطای فازی

جدول ۴-۱: پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ در لایه‌های زغالی منطقه پشکلات (صفاری، ۱۳۹۲)

پارامتر لایه	درجه زغال‌شدگی	درصد پیریت	درصد رطوبت	درصد خاکستر	گازخیزی (m ³ / ton)	ضخامت لایه (متر)	شیب لایه (درجه)	وجود گسل در لایه	روش استخراج	جهت پیشروی	نرخ پیشروی (متر/روز)	روش پرکردن	ضریب استخراج
P18	بیتومینه	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۱۵-۳۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
P15	بیتومینه	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۳۰-۴۵	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
P10	بیتومینه	۱-۲	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۱۵-۳۰	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
P3	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۳۰-۴۵	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K25	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۱۵-۳۰	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K23	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۳۰-۴۵	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K21	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۱۵-۳۰	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K19U	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۴۰-۶۰	< ۵	< ۱/۲	۳۰-۴۵	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K25L	آنتراسیت	۲-۵	۳-۵	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۱۵-۳۰	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K14	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۳۰-۴۵	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K13	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	۵-۱۰	< ۱/۲	۳۰-۴۵	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K12	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۴۰-۶۰	< ۵	< ۱/۲	۱۵-۳۰	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K10	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	< ۱۰	< ۵	۲/۴-۳/۲	۴۵-۶۰	گسل بزرگ با ریزش‌های بزرگ	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K9	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	۵-۱۰	< ۱/۲	۳۰-۴۵	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K8	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۳۰-۴۵	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K6	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۳۰-۴۵	کمتر از دو عدد گسل کوچک نتر ۵۰۰	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K5	آنتراسیت	۵-۸	< ۳	< ۱۰	< ۵	لایه ضخیم با روش چند برش	۴۵-۶۰	گسل بزرگ با ریزش‌های بزرگ	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۲: پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ در لایه های زغالی منطقه کلاریز (صفاری، ۱۳۹۲)

پارامتر / لایه	درجه زغال شدگی	درصد پیریت	درصد رطوبت	درصد خاکستر	گازخیزی (m ³ / ton)	ضخامت لایه (متر)	شیب لایه (درجه)	وجود گسل در لایه	روش استخراج	جهت پیشروی	نرخ پیشروی (متر/روز)	روش پرکردن	ضریب استخراج
P18	بیتومینه	۱-۲	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
P15	بیتومینه	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
P10	آنتراسیت	۱-۲	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	۱/۲-۲/۴	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K28	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K25	آنتراسیت	< ۱	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	۱/۲-۲/۴	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K23	آنتراسیت	۱-۲	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	۱/۲-۲/۴	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K19	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	۱/۲-۲/۴	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K10	آنتراسیت	۵-۸	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	۱/۲-۲/۴	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K8	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K6	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K5	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	۱/۲-۲/۴	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K4	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	< ۵	< ۱/۲	۶۰-۹۰	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل دخت خطای فازی

جدول ۳-۴: پارامترها و عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ در لایه های زغالی منطقه رزمجا (صفاری، ۱۳۹۲)

پارامتر / لایه	درجه زغال شدگی	درصد پیریت	درصد رطوبت	درصد خاکستر	گازخیزی (m ³ / ton)	ضخامت لایه (متر)	شیب لایه (درجه)	وجود گسل در لایه	روش استخراج	جهت پیشروی	نرخ پیشروی (متر/روز)	روش پرکردن	ضریب استخراج
K21	آنتراسیت	۱-۲	< ۳	۲۰-۴۰	۵-۱۰	< ۱/۲	۳۰-۴۵	ناموجود	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K20	آنتراسیت	۲-۵	۳-۵	۲۰-۴۰	۵-۱۰	< ۱/۲	۳۰-۴۵	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K19	آنتراسیت	< ۱	۳-۵	۲۰-۴۰	۵-۱۰	۱/۲-۲/۴	۳۰-۴۵	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K17	آنتراسیت	۲-۵	< ۳	۲۰-۴۰	۱۵-۱۰	۲/۴-۳/۲	۳۰-۴۵	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K10	آنتراسیت	۸-۱۰	۳-۵	۲۰-۴۰	۱۵-۱۰	۳/۲-۵	۳۰-۴۵	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K8	آنتراسیت	۲-۵	۵-۷	۲۰-۴۰	۱۵-۱۰	۲/۴-۳/۲	۳۰-۴۵	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰
K5	آنتراسیت	۲-۵	۷-۱۲	۲۰-۴۰	۵-۱۰	۳/۲-۵	۳۰-۴۵	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	جبهه کار طولانی دستی	پسرو	< ۱	تخریبی	۶۵-۸۰

۴-۶-۲- روش بررسی

در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل درخت خطا اقدام به تعیین احتمال خودسوزی در معادن زغال سنگ البرز شرقی گردید. با توجه به کمبود اطلاعات برای تعیین نرخ شکست اجزاء سیستم لازم است میزان نرخ شکست به صورت غیر قطعی برآورد گردد که برای افزایش دقت و رفع عدم قطعیت از منطق فازی استفاده شده است. برای افزایش دقت محاسبات از فرمول مرکز گرانیگاه برای غیر فازی کردن این مدل استفاده گردید. این فرمول تا حد بسیاری مشکل غیر فازی کردن را حل می کند. مراحل اجرای این تحقیق در شکل ۴-۷ ارائه شده است.



شکل ۴-۷: مراحل اجرای تحقیق

در این تحقیق بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده در معادن زغال سنگ البرز شرقی، رویدادهای میانی، توسعه‌نیافته و هم‌چنین رویدادهای اساسی خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره و هم‌چنین خطر خودسوزی در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین، تهیه شد که در جدول ۴-۴ و ۴-۵ لیست این رویدادها نشان داده شده است. سپس با توجه به نتایج جدول ۴-۴ و ۴-۵، درخت خطای مربوطه رسم شده است که این درخت خطا پایه اصلی برای محاسبات نرخ شکست سیستم گردید (شکل ۴-۸ و ۴-۹).

جدول ۴-۴: رویدادهای میانی، توسعه‌نیافته و هم‌چنین رویدادهای اساسی خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد
T	خودسوزی زغال سنگ	نهایی	X9	روش معدنکاری	اساسی
E1	سیستم تهویه	میانی	X10	جهت پیشروی	اساسی
E2	قرار گرفتن سطح زغال در معرض اکسیژن	میانی	X11	گازخیزی لایه	اساسی
E3	شکستگی در پایه‌های زغال	میانی	X12	زغال‌های رها شده در منطقه استخراج	توسعه‌نیافته
E4	انباشت زغال در هر نقطه از معدن	میانی	X13	اندازه ذرات (تردی یا شکنندگی)	اساسی
X1	خرابی سیستم پایش	توسعه‌نیافته	X14	حفر تونل	توسعه‌نیافته
X2	شبکه تهویه معدن	اساسی	X15	بار وارد بر پایه	اساسی
X3	دما	اساسی	X16	عمر پایه	اساسی
X4	میزان حجم هوا	اساسی	X17	طراحی پایه	اساسی
X5	روش تهویه	اساسی	X18	ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی	اساسی
X6	میزان تولید	اساسی	X19	تأثیر چوب یا وسیله نگهداری	اساسی
X7	شیب لایه	اساسی	X20	ریزش سقف ضعیف	
X8	سرعت پیشروی	اساسی	X21	زغال جمع شده در داخل قیف‌های تخلیه	اساسی

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۵: رویدادهای میانی، توسعه نیافته و همچنین رویدادهای اساسی خطر خودسوزی

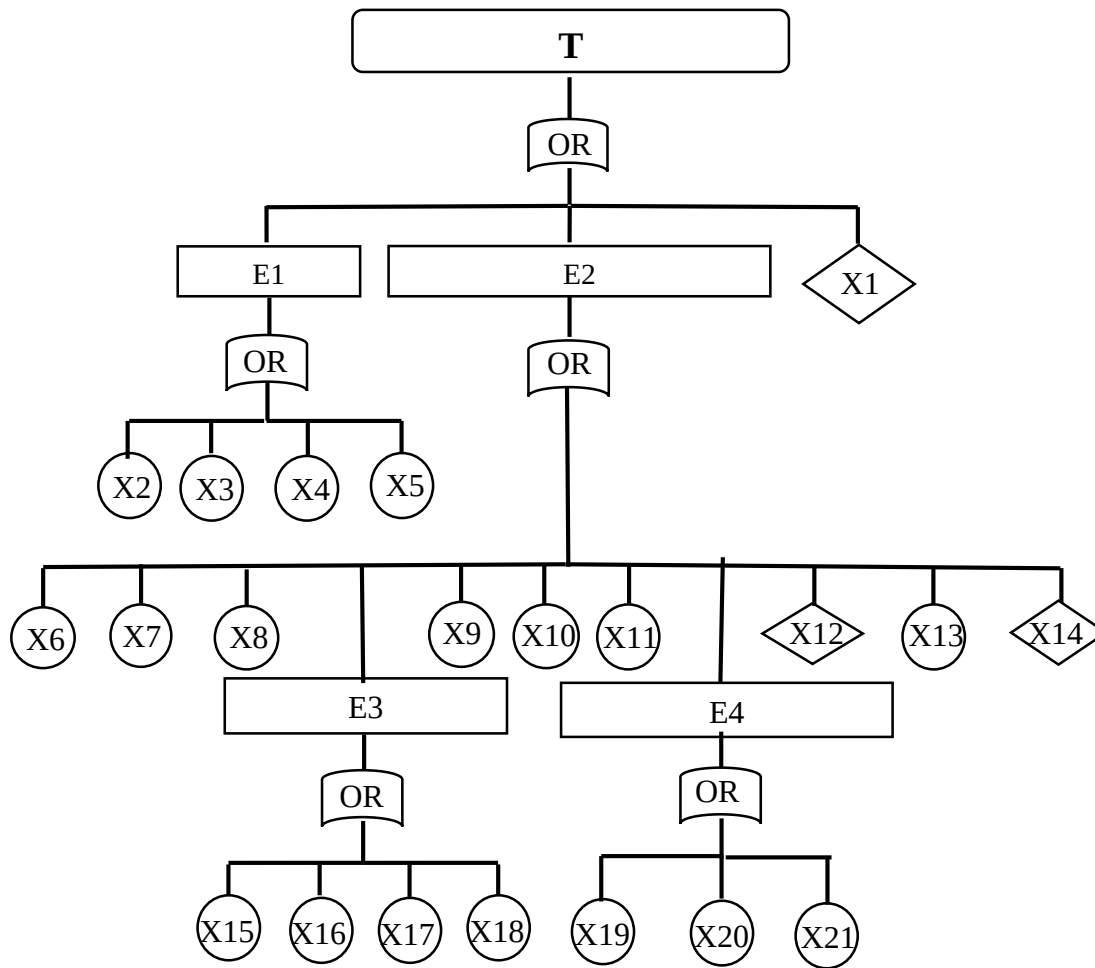
در انباشتگاه های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد
T	خودسوزی در انباشتگاه های زغال در سطح زمین	نهایی	X4	ساختار انباشتگاه	اساسی
E1	دسترسی به اکسیژن	میانی	X5	زمان انباشتن	اساسی
X1	خرابی سیستم پایش	توسعه نیافته	X6	نفوذپذیری لایه پوشاننده	اساسی
X2	کانی های همراه	اساسی	X7	اندازه ذرات	اساسی
X3	میزان رطوبت	اساسی	X8	قرار گرفتن در معرض باد	اساسی

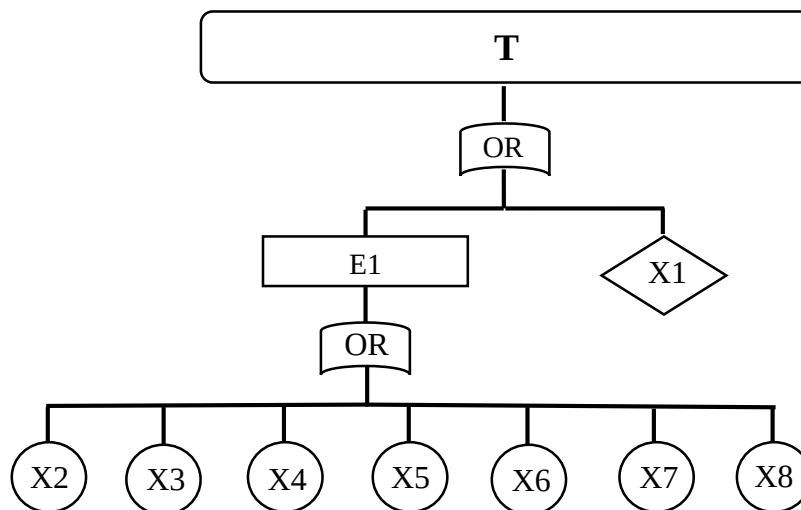
در منطقه معدنی طزره (منطقه مورد مطالعه)، برای استخراج و معدنکاری زغال سنگ از روش جبهه کار طولانی دستی استفاده می شود. نرخ استخراج (سرعت پیشروی) کمتر از ۱ متر در روز، ضریب استخراج (میزان تولید) ۸۰-۶۵ و جهت پیشروی معدنکاری، پسرو است. برای پر کردن قسمت های استخراج شده نیز از روش پر کردن تخریبی استفاده می شود.

لایه های زغالی این منطقه از نظر درجه زغال شدگی، بیتومینه و آنتراسیت بوده و شیب لایه ها از ۱۵ تا ۹۰ درجه تغییر می کند که می توان گفت این لایه ها دارای شیب زیادی هستند. گازخیزی لایه ها از کمتر از ۵ مترمکعب بر تن تا ۱۵ مترمکعب بر تن تغییر کرده و اکثر لایه ها دارای گازخیزی کمتر از ۵ مترمکعب بر تن هستند. از لحاظ ساختارهای زمین شناسی و تکتونیکی نیز، وجود گسل در منطقه گزارش شده است. بنابراین نوع روش استخراج، نرخ پیشروی کم، پر کردن تخریبی، وجود گسل، شیب زیاد و گازخیزی کم لایه ها می توانند عواملی برای بروز پدیده خودسوزی در این منطقه باشند که در مجموع می توان نتیجه گرفت لایه های این منطقه پتانسیل بروز پدیده خودسوزی زغال را دارا هستند.

تونل های زیرزمینی این منطقه نیز به ۲ روش تهویه مصنوعی از نوع دهشی و تهویه طبیعی، تهویه شده و میزان حجم هوا برای تهویه این تونل ها در معدن پشکلات ۲۷، در کلاریز ۱۶/۳ و در رزمجا ۳۴/۳ واحد مترمکعب بر ثانیه است.



شکل ۴-۸: درخت خطای مربوط به خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره



شکل ۴-۹: درخت خطای مربوط به خطر خودسوزی در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین

با استفاده از درخت خطای ایجاد شده و در نظر گرفتن رویدادهای پایانی با توجه به اینکه اطلاعات لازم در خصوص تعیین احتمال شکست رویداد پایانی وجود نداشت از منطق فازی جهت تعیین نرخ احتمال استفاده شد. اجرای منطق فازی دارای ۵ مرحله بود که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. این مراحل با انتخاب تیمی متشکل از متخصصان و کارشناسان مربوطه شروع و به برآورد احتمال ختم شد. برای برآورد احتمال از فرمول مرکز گرانیگاه و فرمول انیسوا^۱ استفاده شد. در ادامه نحوه اجرای منطق فازی بیان شده است.



شکل ۴-۱۰: پنج مرحله منطق فازی در تعیین نرخ رویدادها

الف) مرحله ۱: انتخاب کارشناسان

هنگامی که اطلاعات کافی وجود نداشته باشد، از نظر کارشناسان استفاده می‌شود. کارشناس به کسی گفته می‌شود که دارای اطلاعات کافی از سیستم مورد ارزیابی داشته و با روش تحلیل درخت خطا آشنا باشد. در این تحقیق ۱۴ کارشناس از مجموعه زغال سنگ البرز شرقی جهت تعیین وزن انتخاب گردید. قابل ذکر است که این کارشناسان اهمیت وزنی یکسانی ندارند. به همین دلیل برای تعیین وزن اهمیت کارشناسان

¹ - Onisawa

از روش ارائه شده توسط لواسانی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ و رنجیت^۲ و همکارانش استفاده شده است (Renjith et al., 2010؛ Lavasani et al., 2014).

در تعیین وزن اهمیت کارشناسان از معیارهای عنوان، تجربه کاری، تحصیلات و سن استفاده شده است. نمره اهمیت هر یک از این عوامل از مطالعه‌ای که رنجیت و همکارانش انجام داده‌اند، گرفته شده است (Renjith et al., 2010). نحوه امتیازدهی کارشناسان در جدول ۴-۶ و مشخصات مربوط به ۱۴ کارشناس شرکت کننده در نظرسنجی در رابطه با معیارهای عنوان، تجربه، سن و تحصیلات در جدول ۴-۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶: جدول امتیازدهی بر اساس ویژگی‌های کارشناسان (Renjith et al., 2010)

ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	عنوان	مدیر، معاون	۴
		بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۳
		سرپرست کارگاه، سرکارگر	۲
		اپراتور	۱
۲	تجربه (سال)	۳۰	۴
		۲۰-۳۰	۳
		۱۰-۲۰	۲
		۵-۱۰	۱
۳	تحصیلات	دکترای معدن	۵
		کارشناس و کارشناس ارشد معدن	۴
		دیپلم	۳
		دارای مدرک فنی	۲
		زیر دیپلم	۱
۴	سن (سال)	>۵۰	۴
		۴۰-۵۰	۳
		۳۰-۴۰	۲
		<۳۰	۱

^۱- Lavasani

^۲- Renjith

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۷: مشخصات مربوط به کارشناسان شرکت کننده در نظرسنجی

شماره	عنوان	تجربه (سال)	تحصیلات	سن (سال)
۱	سرپرست پیشروی تونل بزرگ	۷	کارشناس ارشد	۳۷
۲	سرپرست کارگاه	۱۲	کارشناس	۳۲
۳	سرپرست استخراج	۱۵	کارشناس	۳۳
۴	سرپرست کارگاه	۱۳	کارشناس	۳۵
۵	معاونت معدنی	۱۵	کارشناس ارشد	۴۵
۶	سرپرست استخراج	۱۸	کارشناس	۴۶
۷	سرپرست ایمنی تونل بزرگ	۹	کارشناس	۳۷
۸	سرپرست ایمنی تونل کلاریز	۱۳	کارشناس	۳۱
۹	سرپرست معدن رزمجا	۱۷	کارشناس ارشد	۳۸
۱۰	سرپرست ایمنی معدن رزمجا	۷	کارشناس	۲۹
۱۱	سرپرست خدمات فنی تونل بزرگ	۱۲	کارشناس ارشد	۳۷
۱۲	سرپرست خدمات فنی معدن رزمجا	۵	کارشناس	۳۳
۱۳	سرپرست نظارت	۱۱	کارشناس	۴۰
۱۴	سرپرست استخراج	۱۰	کارشناس	۳۸

ب) تعیین وزن کارشناسان و کمی سازی نظرات آنها

بعد از مشخص شدن معیارهای ارزیابی کارشناسان در مرحله قبل، وزن آنها تعیین گردید. نمره وزن

نهایی هر کارشناس از تقسیم مجموع نمرات کسب شده توسط وی تقسیم بر مجموع نمرات کسب شده

توسط کلیه کارشناسان شرکت کننده در مطالعه به دست آمده است. نمره وزن هر کارشناس بر اساس

معیارهای تعیین شده در مرحله ۱، در جدول ۴-۸ نشان داده شده است.

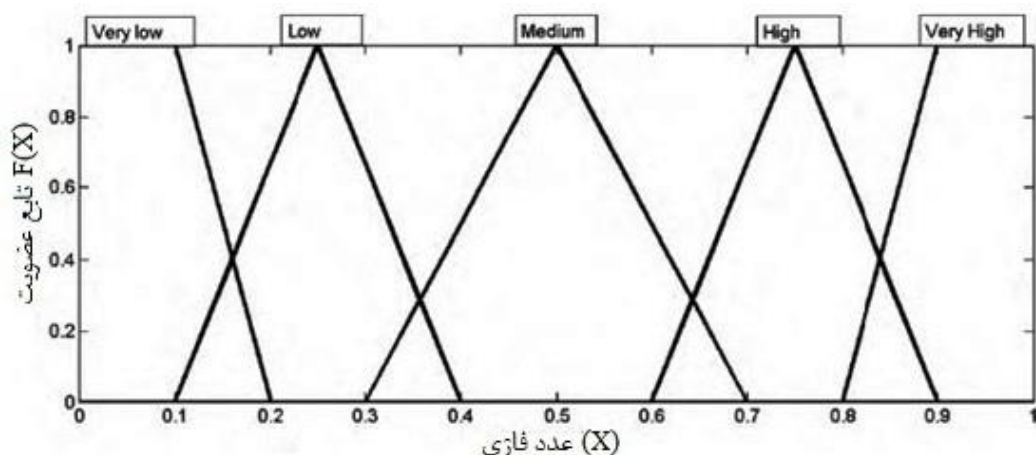
جدول ۴-۸: نمرات وزنی کارشناسان انتخاب شده

تعداد کارشناسان	عنوان	تجربه (سال)	تحصیلات	سن (سال)	شاخص وزنی	نمره وزنی هر کارشناس
۱	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	۰/۰۶۷
۲	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	۰/۰۶۷
۳	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	۰/۰۷۴
۴	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	۰/۰۶۷
۵	مدیر، معاون	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۴۰-۵۰	۱۳	۰/۰۸۷
۶	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۴۰-۵۰	۱۱	۰/۰۷۴

ادامه جدول ۴-۸: نمرات وزنی کارشناسان انتخاب شده

تعداد کارشناسان	عنوان	تجربه (سال)	تحصیلات	سن (سال)	شاخص وزنی	نمره وزنی هر کارشناس
۷	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۰	۰/۰۶۷
۸	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	۰/۰۷۴
۹	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	۰/۰۷۴
۱۰	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	<۳۰	۹	۰/۰۶۰
۱۱	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	۰/۰۷۴
۱۲	سرپرست کارگاه، سرکارگر	۵-۱۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۹	۰/۰۶۰
۱۳	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	۰/۰۷۴
۱۴	بازرس، دستیار مدیر، کنترل کننده	۱۰-۲۰	کارشناس و کارشناس ارشد	۳۰-۴۰	۱۱	۰/۰۷۴
				جمع: ۱۴۸	جمع: ۱	

برای کمّی سازی نظرات کارشناسان یا تعیین وزن نظرات آنها در خصوص رویدادهای پایانی، از متغیرهای زبانی استفاده شده است. پنج متغیر زبانی به کار رفته شامل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد هستند که به طور خلاصه به صورت {VL، L، M، H، VH} است. برای فازی نمودن این بخش از عدد فازی دوزنقه‌ای استفاده شده است که شکل ۴-۱۱ بیان کننده دامنه فازی متغیرهای زبانی به کار رفته در این تحقیق و روابط (۳-۴) نیز نشان دهنده تابع عضویت دوزنقه‌ای مربوط به اعداد فازی مورد نظر است.



شکل ۴-۱۱: متغیرهای زبانی مورد استفاده کارشناسان (Renjith et al., 2010)

$$f_{VH}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.8 \\ \frac{x-0.8}{0.1} & 0.8 < x \leq 0.9 \\ 1 & 0.9 < x \leq 1 \end{cases} \quad (3-4)$$

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

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

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

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

نظرات کارشناسان با استفاده از روش ارائه شده توسط چن^۱ و هوانگ^۲ در سال ۱۹۹۲، و همچنین رنجیت و همکارانش در سال ۲۰۱۰، به صورت کمی درآمد و وزن آنها تعیین گردید (Chen & Hwang, 1992; Renjith et al., 2010).

جدول ۴-۱۰ تا جدول ۴-۱۳ نمونه‌هایی از فرم‌های نظرسنجی ارسال شده را نشان می‌دهند. در این فرم از کارشناسان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیت هر یک از پارامترها امتیاز خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد را به آنها اختصاص دهند که وزن متغیرهای زبانی کارشناسان که در کمی‌سازی نظر آنان در رابطه با هر رویداد پایانی استفاده شده است، در جدول ۴-۹ نشان داده است.

^۱- Chen

^۲- Hwang

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۹: وزن متغیرهای زبانی در کمتی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی (Lavasani et al., 2014)

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

جدول ۴-۱۰: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی

زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

اهمیت هر پارامتر و علت					علل بروز خودسوزی زغال
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	
					خرابی سیستم پایش
					قرار گرفتن سطح زغال در معرض اکسیژن
					سیستم تهویه

جدول ۴-۱۱: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی

زغال سنگ در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین

اهمیت هر پارامتر و علت					خودسوزی در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین	
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم		
					خرابی سیستم پایش	عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ
					قرار گرفتن در معرض باد	
					اندازه ذرات	
					نفوذپذیری لایه پوشاننده	
					زمان نوسازی (زمان انباشتن)	
					ساختار انباشتگاه	
					میزان رطوبت	
					کانی‌های همراه	

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۱۲: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

اهمیت هر پارامتر و علت					علل بروز خودسوزی به دلیل قرار گرفتن سطح زغال در معرض اکسیژن	
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم		
					اندازه ذرات (تردی یا شکنندگی)	
					شیب لایه	
					زغال‌های رها شده در منطقه استخراج	
					گازخیزی لایه	
					جهت پیشروی	
					روش معدنکاری	
					سرعت پیشروی	
					میزان تولید	
					حفر تونل	
					ریزش سقف ضعیف	عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ
					تأثیر چوب یا وسیله نگهداری	
					زغال جمع شده در داخل قیف‌های تخلیه	
					ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی	شکستگی در پایه‌های زغالی
					طراحی پایه	
					عمر پایه	
					بار وارد بر پایه	

جدول ۴-۱۳: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

اهمیت هر پارامتر و علت					علل بروز خودسوزی به دلیل سیستم تهویه	
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم		
					روش تهویه	عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ
					میزان حجم هوا	
					دما	
					شبکه تهویه معدن	

در جدول ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نیز به ترتیب نظر کارشناسان شرکت کننده در نظرسنجی در رابطه با هر رویداد پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین و خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طرز نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۴: نتایج حاصل از نظرسنجی توسط کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین

شماره کارشناس	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
نتایج حاصل از نظرسنجی ها توسط کارشناسان														
رویدادهای پایانی در رابطه با خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	خرابی سیستم پایش	خیلی زیاد	کم	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	زیاد
	کانی های همراه	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	متوسط
	میزان رطوبت	خیلی زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	کم	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
	ساختار انباشت گاه	خیلی زیاد	کم	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	کم	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	خیلی زیاد	زیاد
	زمان انباشتن	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	خیلی زیاد	زیاد
	نفوذ پذیری لایه پوشاننده	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	متوسط	خیلی زیاد
	اندازه ذرات	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	کم	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد
	قرار گرفتن در معرض باد	خیلی زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۱۵: نتایج حاصل از نظرسنجی توسط کارشناسان در رابطه با رویدادهای پایانی در خطر خودسوزی زغال سنگ در

معدن زیرزمینی طزره

شماره کارشناس	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
نتایج حاصل از نظرسنجی‌ها توسط کارشناسان														
رویدادهای پایانی در رابطه با خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره	خرابی سیستم پایش	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	زیاد	خیلی زیاد	کم	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد
	شبکه تهویه معدن	زیاد	متوسط	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	کم	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد
	دما	خیلی زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	کم	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد
	میزان حجم هوا	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	خیلی زیاد	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد
	روش تهویه	خیلی زیاد	کم	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	کم	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد
	میزان تولید	خیلی زیاد	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط
	شیب لایه	خیلی زیاد	کم	متوسط	متوسط	متوسط	کم	زیاد	کم	کم	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
	سرعت پیشروی	خیلی زیاد	زیاد	کم	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط
	روش معدنکاری	زیاد	متوسط	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	خیلی زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
	جهت پیشروی	متوسط	کم	کم	زیاد	کم	متوسط	خیلی کم	زیاد	کم	متوسط	متوسط	متوسط	کم
	گازخیزی لایه	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	کم	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد
	زغال‌های رها شده در منطقه استخراج	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
	اندازه ذرات	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	کم	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
	حفر تونل	متوسط	متوسط	متوسط	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	کم	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
	بار وارد بر پایه	متوسط	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	کم	زیاد	متوسط	متوسط	کم
	عمر پایه	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	کم	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	کم
	طراحی پایه	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	کم
	ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی	خیلی زیاد	کم	متوسط	متوسط	زیاد	کم	متوسط	متوسط	کم	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
	تأثیر چوب یا وسیله نگهداری	زیاد	زیاد	متوسط	کم	متوسط	کم	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	خیلی زیاد
	ریزش سقف ضعیف	متوسط	متوسط	کم	کم	متوسط	کم	زیاد	زیاد	کم	متوسط	زیاد	متوسط	کم
	زغال جمع شده در داخل قیف-های تخلیه	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	خیلی زیاد

ج) مرحله ۳: اجماع نظر کارشناسان

برای اجماع نظر کارشناسان، نمره وزن هر کارشناس در نمره متغیرهای زبانی او ضرب شده است. این کار طبق رابطه (۴-۴) و بر اساس مطالعه کلمن و وینکلر و رنجیت و همکارانش، انجام شده است (Renjith et al., 2010؛ Clemen & Winkler, 1999).

$$M_i = \sum_{j=1}^n W_j A_{ij} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (4-4)$$

که در این رابطه:

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

W_j : وزن کارشناس j

m : تعداد رویدادهای پایانی

n : تعداد کارشناسان

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

عدد فازی اجماع نظر کارشناسان برای رویدادهای پایانی خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی

طزره و همچنین رویدادهای پایانی خطر خودسوزی در انباشتگاههای زغال در سطح زمین به ترتیب در

جدول ۴-۱۶ و ۴-۱۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۶: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نماد رویداد	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
X1	خرابی سیستم پایش	(۰/۴۴۵۶، ۰/۶۰۵۹۵، ۰/۶۲۰۷۵، ۰/۷۶۶۳)
X2	شبکه تهویه معدن	(۰/۵۶۷۹، ۰/۷۱۲۸، ۰/۷۳۵، ۰/۸۵۷۷)
X3	دما	(۰/۶۹۶، ۰/۸۱۲۴، ۰/۸۷۷۵، ۰/۹۲۸۸)
X4	میزان حجم هوا	(۰/۶۱۶۶، ۰/۷۵۵۱۵، ۰/۷۹۶۷۵، ۰/۸۹۳۷)
X5	روش تهویه	(۰/۵۹۵۴، ۰/۷۲۶۹، ۰/۷۶۸۵، ۰/۸۵۸۴)
X6	میزان تولید	(۰/۴۸۷۶، ۰/۶۳۹۹، ۰/۶۵۵۵، ۰/۷۹۲۲)
X7	شیب لایه	(۰/۳، ۰/۴۷۴۷، ۰/۴۸۱۴، ۰/۶۴۹۶)

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

ادامه جدول ۴-۱۶: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نماد رویداد	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
X8	سرعت پیشروی	(۰/۴۸۲۳، ۰/۶۴۱۶۵، ۰/۶۵۵۷۵، ۰/۸۰۱)
X9	روش معدنکاری	(۰/۳۴۵۵، ۰/۵۲۲۶، ۰/۵۳، ۰/۶۹۹۷)
X10	جهت پیشروی	(۰/۲۴۰۸، ۰/۳۹۵۶۵، ۰/۴۰۳۰۵، ۰/۵۶۵۵)
X11	گازخیزی لایه	(۰/۶۴۳۲، ۰/۷۷۱۰۵، ۰/۸۱۳۲۵، ۰/۸۹۸۹)
X12	زغال‌های رها شده در منطقه استخراج	(۰/۵۰۹۴، ۰/۶۷۲۷۵، ۰/۶۷۲۷۵، ۰/۸۳۶۱)
X13	اندازه ذرات (تردی یا شکنندگی)	(۰/۰۵۱۰۸، ۰/۶۶۷۸، ۰/۶۷۴۵، ۰/۸۲۴۸)
X14	حفر تونل	(۰/۲۷۷۸، ۰/۴۶۳، ۰/۴۶۳، ۰/۶۴۸۲)
X15	بار وارد بر پایه	(۰/۳۵۸۵، ۰/۵۳۵۲۵، ۰/۵۳۵۲۵، ۰/۷۱۲)
X16	عمر پایه	(۰/۳۸۷۸، ۰/۵۵۷۳۵، ۰/۵۶۵۲۵، ۰/۷۲۷۹)
X17	طراحی پایه	(۰/۳۲۵۴، ۰/۵۱۳۲۵، ۰/۵۱۳۲۵، ۰/۷۰۱۱)
X18	ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی	(۰/۴۲۴۱، ۰/۵۸۳۸، ۰/۵۹۰۵، ۰/۷۴۳۵)
X19	تأثیر چوب یا وسیله نگهداری	(۰/۳۷۳۷، ۰/۵۴۱، ۰/۵۴۸۴، ۰/۷۰۸۵)
X20	ریزش سقف ضعیف	(۰/۳۰۰۴، ۰/۴۷۴۴۵، ۰/۴۷۴۴۵، ۰/۶۴۸۶)
X21	زغال جمع شده در داخل قیف‌های تخلیه	(۰/۵۲۸۱، ۰/۶۸۴۷۵، ۰/۷۰۶۲۵، ۰/۸۴۱۴)

جدول ۴-۱۷: عدد فازی اجماع نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	عدد فازی اجماع نظر کارشناسان
X1	خرابی سیستم پایش	(۰/۴۱۸۵، ۰/۵۸۲۹، ۰/۵۹۷، ۰/۷۴۷۳)
X2	کانی‌های همراه	(۰/۴۹۴۶، ۰/۶۵۷۹۵، ۰/۶۷۲۷۵، ۰/۸۲۱۳)
X3	میزان رطوبت	(۰/۵۵۴۲، ۰/۶۹۹۱، ۰/۷۲۸، ۰/۸۴۴)
X4	ساختار انباشت‌گاه	(۰/۴۵۸۷، ۰/۶۱۵۴، ۰/۶۳۵۵، ۰/۷۷۲۱)
X5	زمان انباشتن	(۰/۵۶۴۲، ۰/۷۱۲۵، ۰/۷۴۸، ۰/۸۶۰۸)
X6	نفوذپذیری لایه پوشاننده	(۰/۵۰۴۸، ۰/۶۶۶۴۵، ۰/۶۸۱۲۵، ۰/۸۲۸۱)
X7	اندازه ذرات	(۰/۵۹۵۱، ۰/۷۳۳۳، ۰/۷۶۱۵، ۰/۸۷۱۵)
X8	قرار گرفتن در معرض باد	(۰/۶۲۰۱، ۰/۷۵۸۹۵، ۰/۷۹۵۲۵، ۰/۸۹۷۸)

د) مرحله ۴: غیر فازی کردن

غیر فازی کردن اعداد فازی روش مهمی برای تصمیم‌گیری در محیط فازی است. در این تحقیق روش مرکز گرانیگاه برای غیر فازی کردن انتخاب شده است. این روش توسط سوگنو^۱ در سال ۱۹۸۵ توسعه یافته است و دقیق‌ترین روش غیر فازی کردن می‌باشد. این روش می‌تواند به شکل رابطه (۴-۵) نشان داده شود (Sugeno, 1999).

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x) x dx}{\int \mu_i(x)} \quad (۴-۵)$$

فرمول فوق می‌تواند برای هر دو عدد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای استفاده شود. غیر فازی کردن عدد فازی

با استفاده از رابطه (۴-۶) به دست می‌آید (Lavasani et al., 2014؛ Lavasani et al., 2011).

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} = \frac{1}{3} (a_1 + a_2 + a_3) \quad (۴-۶)$$

غیر فازی کردن عدد فازی ذوزنقه‌ای $A^{\sim} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ با استفاده از فرمول (۴-۷) به دست

می‌آید (Lavasani et al., 2014؛ Lavasani et al., 2011).

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} \quad (۴-۷)$$

$$= \frac{1}{3} \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4 + a_3 - a_2 - a_1)}$$

عدد به دست آمده از مرحله قبل در رابطه با هر رویداد پایانی، معادل نظر کارشناسان بوده و هنوز به

صورت "امکانی" است. در این مرحله با استفاده از مدل مرکز گرانیگاه (رابطه ۴-۷) و فرمول ذوزنقه‌ای، این

اعداد غیر فازی شده است. نتایج حاصل از محاسبات مربوط به غیر فازی کردن نظر کارشناسان در رابطه با

هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره و همچنین رویدادهای پایانی

¹- Sugeno

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

خطر خودسوزی در انباشت گاه‌های زغال در سطح زمین به ترتیب در جدول ۴-۱۸ و ۴-۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۸: نتایج حاصل از غیر فازی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نماد رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده اجماع نظر کارشناسان	نماد رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده اجماع نظر کارشناسان
X1	خرابی سیستم پایش	۰/۶۰۸۶	X12	زغال‌های رها شده در منطقه استخراج	۰/۶۷۲۶
X2	شبکه تهویه معدن	۰/۷۱۶۷	X13	اندازه ذرات (تردی یا شکنندگی)	۰/۵۱۶۳
X3	دما	۰/۸۲۵۵	X14	حفر تونل	۰/۴۶۲۹
X4	میزان حجم هوا	۰/۷۶۲۸	X15	بار وارد بر پایه	۰/۵۳۵۲
X5	روش تهویه	۰/۷۳۴۷	X16	عمر پایه	۰/۵۵۹۰
X6	میزان تولید	۰/۶۴۲۶	X17	طراحی پایه	۰/۵۱۳۱
X7	شیب لایه	۰/۴۷۵۸	X18	ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی	۰/۵۸۴۸
X8	سرعت پیشروی	۰/۶۴۴۰	X19	تأثیر چوب یا وسیله نگهداری	۰/۵۴۲۳
X9	روش معدنکاری	۰/۵۲۳۷	X20	ریزش سقف ضعیف	۰/۴۷۴۴
X10	جهت پیشروی	۰/۴۰۱۷	X21	زغال جمع شده در داخل قیف‌های تخلیه	۰/۶۸۸۴
X11	گازخیزی لایه	۰/۷۷۹۰			

جدول ۴-۱۹: نتایج حاصل از غیر فازی کردن نظر کارشناسان در رابطه با هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه‌های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	عدد غیر فازی شده اجماع نظر کارشناسان
X1	خرابی سیستم پایش	۰/۵۸۵۲
X2	کانی‌های همراه	۰/۶۶۰۵
X3	میزان رطوبت	۰/۷۰۴۳
X4	ساختار انباشت گاه	۰/۶۱۸۸
X5	زمان انباشتن	۰/۷۱۸۹
X6	نفوذپذیری لایه پوشاننده	۰/۶۶۸۹
X7	اندازه ذرات	۰/۷۳۸۳
X8	قرار گرفتن در معرض باد	۰/۷۶۵۶

ه) مرحله ۵: استفاده از تبدیل فرمول امکان به احتمال

عدد حاصل از مرحله غیر فازی کردن، هنوز به صورت امکانی می باشد. از آنجایی که درخت خطا احتمال می پذیرد؛ لذا باید عدد به دست آمده از مرحله قبل از حالت امکانی به احتمالی تبدیل گردد. به این منظور، از فرمول های ارائه شده توسط انیسواوا (فرمول ۸-۴ و ۹-۴)، استفاده شده است (Lavasani et al., 2014؛ Renjith et al., 2010).

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad (۸-۴)$$

$$k = \left[\frac{(1 - CFP)^{\frac{1}{3}}}{CFP} \right] \times 2.301 \quad (۹-۴)$$

که در این رابطه FP^1 ، نرخ احتمال هر رویداد پایانی و CFP^2 ، عدد امکانی حاصل از مرحله غیر فازی کردن است.

در جدول ۴-۲۰ و ۴-۲۱ نتایج محاسبات نرخ احتمال (FP) هر رویداد پایانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره و هم چنین رویدادهای پایانی خطر خودسوزی در انباشتگاه های زغال در سطح زمین نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۰: نرخ احتمال هر رویداد پایانی در تبدیل اعداد امکانی به احتمالی (FP)

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نام رویداد	نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نام رویداد	نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نام رویداد
۰/۰۱۵۴	زغال های رها شده در منطقه استخراج	۰/۰۱۰۳	خرابی سیستم پایش	X1	
۰/۰۰۵۶	اندازه ذرات (تردی یا شکنندگی)	۰/۰۲۰۵	شبکه تهویه معدن	X2	
۰/۰۰۳۸	حفر تونل	۰/۰۴۲۶	دما	X3	
۰/۰۰۶۳	بار وارد بر پایه	۰/۰۲۷۶	میزان حجم هوا	X4	
۰/۰۰۷۴	عمر پایه	۰/۰۲۳۰	روش تهویه	X5	

¹- Failure Probability

²- Crisp Failure Possibility

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ بر روش تحلیل درخت خطای فازی

ادامه جدول ۴-۲۰: نرخ احتمال هر رویداد پایانی در تبدیل اعداد امکانی به احتمالی (FP)

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نام رویداد	نماد رویداد	نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نام رویداد	نماد رویداد
۰/۰۰۵۴	طراحی پایه	X17	۰/۰۱۲۸	میزان تولید	X6
۰/۰۰۸۸	ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی	X18	۰/۰۰۴۲	شیب لایه	X7
۰/۰۰۶۶	تأثیر چوب یا وسیله نگهداری	X19	۰/۰۱۲۹	سرعت پیشروی	X8
۰/۰۰۴۱	ریزش سقف ضعیف	X20	۰/۰۰۵۹	روش معدنکاری	X9
۰/۰۱۷۱	زغال جمع شده در داخل قیف‌های تخلیه	X21	۰/۰۰۲۳	جهت پیشروی	X10
			۰/۰۳۰۸	گازخیزی لایه	X11

جدول ۴-۲۱: نرخ احتمال هر رویداد پایانی در تبدیل اعداد امکانی به احتمالی (FP)

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین

نرخ احتمال هر رویداد اساسی (FP)	نام رویداد	نماد رویداد
۰/۰۰۸۸	خرابی سیستم پایش	X1
۰/۰۱۴۳	کانی‌های همراه	X2
۰/۰۱۸۹	میزان رطوبت	X3
۰/۰۱۱۰	ساختار انباشت‌گاه	X4
۰/۰۲۰۷	زمان انباشتن	X5
۰/۰۱۵۱	نفوذپذیری لایه پوشاننده	X6
۰/۰۲۳۵	اندازه ذرات	X7
۰/۰۲۸۱	قرار گرفتن در معرض باد	X8

ه) تعیین احتمال رویدادهای نهایی و میانی

بعد از تعیین نرخ احتمال رویدادهای پایانی و هم‌چنین مشخص کردن مجموعه‌های برشی حداقل و به کمک

بانک اطلاعات به دست آمده، نرخ احتمال رویداد نهایی (T) و هم‌چنین رویدادهای میانی به کمک روابط

(۱-۴)، (۲-۴) و (۱۰-۴) محاسبه شد که نتایج این محاسبه در جدول ۴-۲۴ و ۴-۲۵ نشان داده است. در

جدول ۴-۲۲ و ۴-۲۳ نیز مجموعه‌های برشی حداقل برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی

طرز و در انباشت گاه های زغال در سطح زمین نشان داده شده است. (کلاسنگیانی و امیدواری، ۱۳۹۴؛ میرزا و همکاران، ۱۳۹۳).

$$T = 1 - [(1 - MCS_1) \times (1 - MCS_2) \times \dots \times (1 - MCS_n)] \quad (10-4)$$

که در این رابطه:

T: نرخ احتمال رویداد نهایی، MCS_1 : مجموعه برشی حداقل اول، MCS_2 : مجموعه برشی حداقل دوم و ... و MCS_n : مجموعه برشی حداقل n ام.

جدول ۴-۲۲: مجموعه های برشی حداقل برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

شماره	مجموعه برشی حداقل	شماره	مجموعه برشی حداقل
۱	خرابی سیستم پایش	۱۲	زغال های رها شده در منطقه استخراج
۲	شبکه تهویه معدن	۱۳	اندازه ذرات (تردی یا شکنندگی)
۳	دما	۱۴	حفر تونل
۴	میزان حجم هوا	۱۵	بار وارد بر پایه
۵	روش تهویه	۱۶	عمر پایه
۶	میزان تولید	۱۷	طراحی پایه
۷	شیب لایه	۱۸	ساختارها و آنومالی های زمین شناسی
۸	سرعت پیشروی	۱۹	تأثیر چوب یا وسیله نگهداری
۹	روش معدنکاری	۲۰	ریزش سقف ضعیف
۱۰	جهت پیشروی	۲۱	زغال جمع شده در داخل قیف های تخلیه
۱۱	گازخیزی لایه		

جدول ۴-۲۳: مجموعه های برشی حداقل برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین

شماره	مجموعه برشی حداقل	شماره	مجموعه برشی حداقل
۱	خرابی سیستم پایش	۵	زمان انباشتن
۲	کانی های همراه	۶	نفوذپذیری لایه پوشاننده
۳	میزان رطوبت	۷	اندازه ذرات
۴	ساختار انباشت گاه	۸	قرار گرفتن در معرض باد

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۲۴: نرخ احتمال رویدادهای نهایی و میانی برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	نرخ احتمال رویداد
T	خودسوزی زغال سنگ	نهایی	۰/۲۴۱۵
E1	سیستم تهویه	میانی	۰/۱۰۹۱
E2	قرار گرفتن سطح زغال در معرض اکسیژن	میانی	۰/۱۳۹۷
E3	شکستگی در پایه های زغال	میانی	۰/۰۲۷۶
E4	انباشت زغال در هر نقطه از معدن	میانی	۰/۰۲۷۵

جدول ۴-۲۵: نرخ احتمال رویدادهای نهایی و میانی

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	نوع رویداد	نرخ احتمال رویداد
T	خودسوزی در انباشت گاه های زغال در سطح زمین	نهایی	۰/۱۳۲۳
E1	دسترسی به اکسیژن	میانی	۰/۱۲۴۶

با توجه به محاسبات انجام شده در این مرحله، میزان احتمال وقوع خطر خودسوزی در معدن زیرزمینی طزره ۲۴٪ و در انباشت گاه های زغال در سطح زمین، ۱۳٪ است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که خطر خودسوزی دارای سطح ریسک بسیار بالایی در این مناطق است؛ لذا به منظور افزایش ایمنی و جلوگیری از خسارات و صدمات جانی و مالی، باید به وسیله اقدامات کنترلی و پیشگیرانه از میزان احتمال وقوع آن کاست. به این منظور باید ابتدا ریسک ها را اولویت بندی کرده و بعد از تعیین ریسک های بحرانی، اقدامات پاسخ به این ریسک ها انجام شود. در ادامه، ریسک های بحرانی تعیین و سپس اقدامات پاسخ به این ریسک ها بیان می شود.

ز) تعیین میزان اهمیت و رده بندی مجموعه های برشی حداقل

بعد از محاسبه نرخ رویداد نهایی و بر اساس مقدار به دست آمده برای آن، با استفاده از فرمول فاسل - ولسلی^۱ (رابطه ۴-۱۱) میزان اهمیت مجموعه های برشی حداقل (MCS) مشخص و این مجموعه های

¹ - Fussell- Vesely

برشی حداقل رده بندی شدند (Lavasani et al., 2011؛ Lavasani et al., 2014) که نتایج آن در جدول ۴-۲۶ و ۴-۲۷ ارائه شده است.

$$FVI(i) = \frac{MCS_i}{T} \quad (4-11)$$

جدول ۴-۲۶: نرخ احتمال، میزان اهمیت و رده بندی مجموعه های برشی حداقل و مقادیر $FVI(i)$ برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره

نماد رویداد	نام رویداد	نرخ احتمال هر برش حداقل (MCS)	FVI(i)	رده بندی برش های حداقل (MCS)
X1	خرابی سیستم پایش	۰/۰۱۰۳	۰/۰۴۲۶	۱۰
X2	شبکه تهویه معدن	۰/۰۲۰۵	۰/۰۸۴۸	۵
X3	دما	۰/۰۴۲۶	۰/۱۷۶۳	۱
X4	میزان حجم هوا	۰/۰۲۷۶	۰/۱۱۴۲	۳
X5	روش تهویه	۰/۰۲۳۰	۰/۰۹۵۲	۴
X6	میزان تولید	۰/۰۱۲۸	۰/۰۵۳۰	۹
X7	شیب لایه	۰/۰۰۴۲	۰/۰۱۷۳	۱۸
X8	سرعت پیشروی	۰/۰۱۲۹	۰/۰۵۳۴	۸
X9	روش معدنکاری	۰/۰۰۵۹	۰/۰۲۴۴	۱۵
X10	جهت پیشروی	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۹۵	۲۱
X11	گازخیزی لایه	۰/۰۳۰۸	۰/۱۲۷۵	۲
X12	زغال های رها شده در منطقه استخراج	۰/۰۱۵۴	۰/۰۶۳۷	۷
X13	اندازه ذرات (تردی یا شکنندگی)	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۳۱	۱۶
X14	حفر تونل	۰/۰۰۳۸	۰/۰۱۵۷	۲۰
X15	بار وارد بر پایه	۰/۰۰۶۳	۰/۰۲۶۰	۱۴
X16	عمر پایه	۰/۰۰۷۴	۰/۰۳۰۶	۱۲
X17	طراحی پایه	۰/۰۰۵۴	۰/۰۲۲۳	۱۷
X18	ساختارها و آنومالی های زمین شناسی	۰/۰۰۸۸	۰/۰۳۶۴	۱۱
X19	تأثیر چوب یا وسیله نگهداری	۰/۰۰۶۶	۰/۰۲۷۳	۱۳
X20	ریزش سقف ضعیف	۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۶۹	۱۹
X21	زغال جمع شده در داخل قیف های تخلیه	۰/۰۱۷۱	۰/۰۷۰۸	۶

جدول ۴-۲۷: نرخ احتمال، میزان اهمیت و رده بندی مجموعه های برشی حداقل و مقادیر $FVI(i)$

برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین

نماد رویداد	نام رویداد	نرخ احتمال هر برش حداقل (MCS)	$FVI(i)$	رده بندی برش های حداقل (MCS)
X1	خرابی سیستم پایش	۰/۰۰۸۸	۰/۰۶۶۵	۸
X2	کانی های همراه	۰/۰۱۴۳	۰/۱۰۸۰	۶
X3	میزان رطوبت	۰/۰۱۸۹	۰/۱۴۲۸	۴
X4	ساختار انباشت گاه	۰/۰۱۱۰	۰/۰۸۳۱	۷
X5	زمان انباشتن	۰/۰۲۰۷	۰/۱۵۶۴	۳
X6	نفوذ پذیری لایه پوشاننده	۰/۰۱۵۱	۰/۱۱۴۱	۵
X7	اندازه ذرات	۰/۰۲۳۵	۰/۱۷۷۶	۲
X8	قرار گرفتن در معرض باد	۰/۰۲۸۱	۰/۲۱۲۳	۱

بنابراین در این بخش با استفاده از رابطه فاسل- و سلی میزان اهمیت مجموعه های برشی حداقل

مشخص و بر اساس آن رده بندی شدند. همانطور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می شود، بحرانی ترین

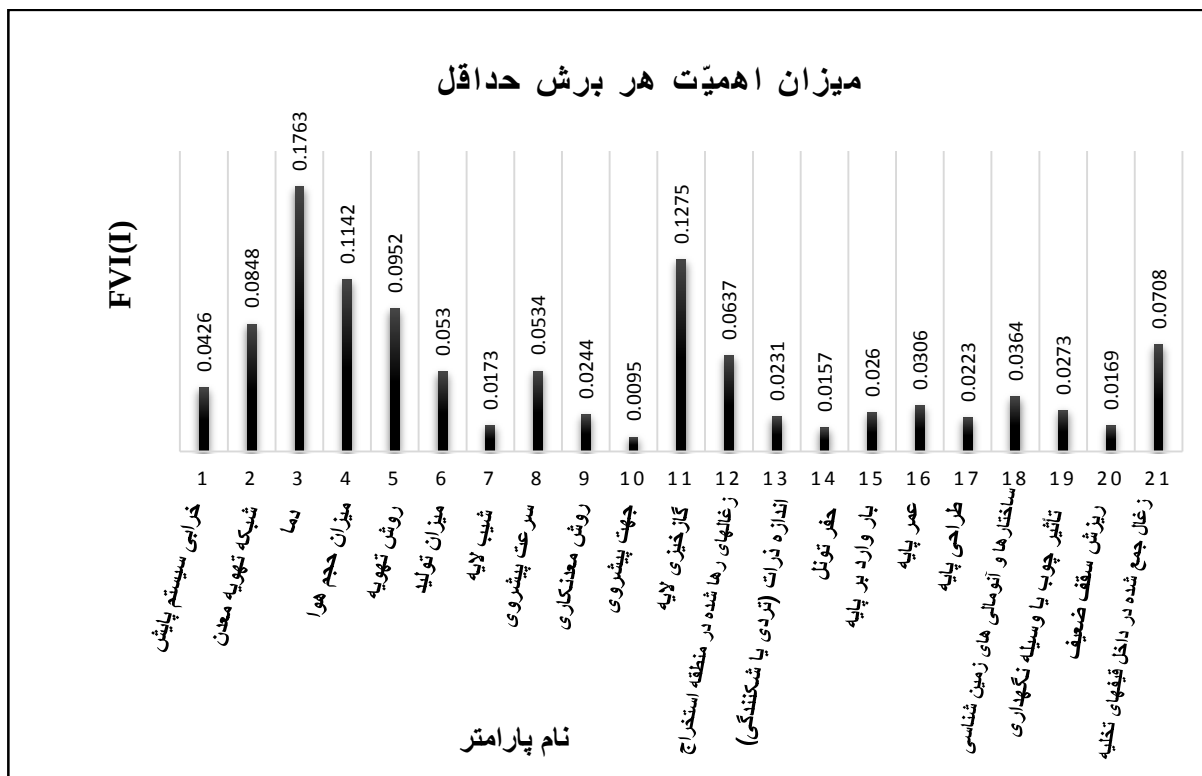
مجموعه های برشی حداقل در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره، دما، گاز خیزی لایه،

میزان حجم هوا، روش تهویه، شبکه تهویه معدن و زغال جمع شده در داخل قیف های تخلیه هستند.

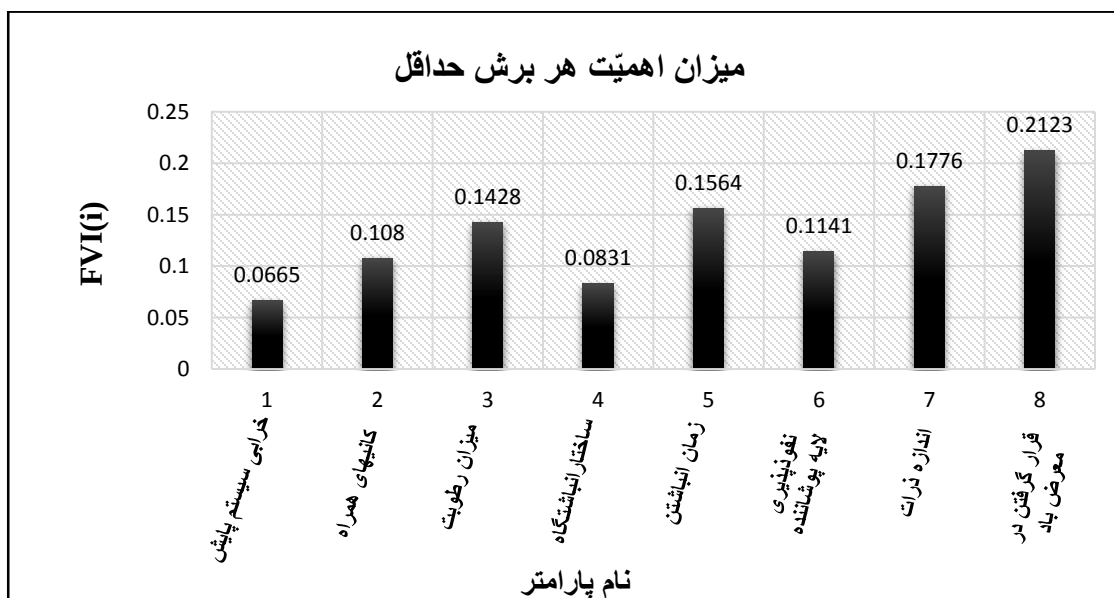
هم چنین با توجه به شکل ۴-۱۳، بحرانی ترین مجموعه های برشی حداقل شناسایی شده در خطر خودسوزی

زغال سنگ در انباشت گاه های زغال در سطح زمین، قرار گرفتن در معرض باد، اندازه ذرات، زمان انباشتن،

میزان رطوبت و نفوذ پذیری لایه پوشاننده هستند.



شکل ۴-۱۲: نمودار میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره



شکل ۴-۱۳: نمودار میزان اهمیت مجموعه‌های برشی حداقل در خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین

۴-۶-۳- کنترل و پاسخ به ریسک‌های بحرانی

در مدیریت ریسک پس از تحلیل و ارزیابی ریسک و تعیین اولویت و درجه اهمیت هر ریسک به منظور شناسایی ریسک‌های بحرانی (ریسک‌هایی که به کنترل و مدیریت بیشتری نیاز دارند)، برنامه واکنش در مقابل ریسک یا پاسخ به ریسک مطرح می‌شود. پاسخ به ریسک شامل یک برنامه کنترل و مستندسازی می‌باشد. برنامه، فرآیندها، سیاست‌ها، اهداف و استانداردهای مسئولیت را برای ادامه مدیریت ریسک پروژه تأمین می‌کند. عموماً، برنامه باید بر پایه این ویژگی بنا نهاده شود که مسئولیت مدیریت ریسک به کسی تخصیص داده شود که بیشترین توانایی را برای کنترل آن در اختیار دارد. پاسخ به ریسک پیشنهاد اقدامات ایمنی و یا پذیرش ریسک است. هدف این مرحله رسیدگی به ریسک‌های مختلف و نحوه برخورد با ریسک می‌باشد. هر چه احتمال وقوع کوچک باشد، خطر پذیرفتنی‌تر است. اگر نتوان خطری را حذف کرد یا آن را پذیرفت، باید ریسک ناشی از آن خطر به وسیله اقدامات مختلف تا سطح پذیرفتنی کاهش یابد.

بنابراین پاسخ به ریسک، یک جزء اساسی مدیریت ریسک و یک استراتژی موفق است که می‌تواند منجر به کاهش تأثیرات منفی ریسک گردد. پاسخ به ریسک یک فرآیند مداوم است و باید در تمام فازهای پروژه به کار رود.

در این بخش اقدامات لازم به منظور کنترل و کاهش ریسک‌های بحرانی تعیین شده در رابطه با خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره و همچنین در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از مرحله قبل، ریسک‌های بحرانی تعیین شده برای خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره، دما، گازخیزی لایه، میزان حجم هوا، روش تهویه، شبکه تهویه معدن و زغال جمع شده در داخل قیف‌های تخلیه است. همچنین بحرانی‌ترین ریسک‌های شناسایی شده در خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین، قرار گرفتن در معرض باد، اندازه ذرات، زمان

انباشتن، میزان رطوبت و نفوذپذیری لایه پوشاننده هستند؛ لذا در زیر، اقدامات لازم برای کنترل و پاسخ به این ریسک‌های بحرانی پیشنهاد و ارائه شده است:

اقدامات لازم برای خطر خودسوزی زغال سنگ در انباشتگاه‌های زغال در سطح زمین:

الف) قرار گرفتن در معرض باد

- دیوها باید طوری ایجاد شوند که کمترین بخش از آن‌ها در معرض وزش باد قرار گیرند. مثلاً اگر بادهای غالب منطقه در بیشتر اوقات سال از سمت شمال می‌وزند، باید دیوها به صورت یک مستطیل ایجاد شوند که طول‌های آن در امتداد شمال – جنوب قرار گیرد.
- محدودیت ارتفاع یک دیوی کوبیده نشده حداکثر ۳ متر و برای دیوی کوبیده و متراکم شده حداکثر ۸ متر است. این شرایط مقاومت در برابر باد را کاهش می‌دهد.
- زوایای تند کناره‌های دیو باید با پهن کردن گرفته شود تا باد به راحتی از روی آن‌ها گذر داشته باشد.
- جناح دیو باید با بولدوزر به سمت پایین با زاویه کم صاف شوند تا از مقاومت باد جلوگیری شود. در قسمت بالا و به ویژه در بخشی که در معرض وزش باد غالب است، نیز دیو باید کوبیده شود.
- هر جایی که امکان‌پذیر است، از سمتی که از وزش باد در امان است (بادپناه) حفاری به داخل دیو انجام شود تا بدین ترتیب باد هم از مسیر حفاری وارد دیو نشود.
- استفاده از دیواره‌های بلند در اطراف دیوها.
- استفاده از محل‌های مسقف.

ب) اندازه ذرات

- اندازه ذرات (زغال‌های خرد شده و کلوخه) را می‌توان از طریق سرندهای مختلف کنترل کرد. از آن جایی که لایه‌های مختلفی از زغال سنگ دیو می‌شوند، جانمایی دیوهای زغال سنگ خام را می‌توان با توجه به اندازه ذرات تعیین کرد.

- اگر انفجار وجود داشته باشد، اندازه ذرات را می‌توان با چالزنی و آتشکاری کنترل نمود.
- در معدنی که گاز وجود نداشته باشد می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند ایردوکس، کاردکس و دینامیت اندازه ذرات را کنترل نمود.

ج) زمان انباشتن

- زمان نگهداری زغال در دیو قبل از بارگیری و ارسال تا حد ممکن کوتاه باشد.
- یک سیستم نوبتی مناسب (اولین محصول زغال اولین نوبت بارگیری) باید به اجرا گذاشته شود تا همیشه قدیمی‌ترین زغال دیو قبل از سایر زغال‌ها بارگیری و ارسال گردد. در این صورت زغال فرصت خودسوزی نخواهد داشت.
- باربرداری باید ابتدا از سمت بادپناه یا از محل قدیمی‌ترین زغال‌ها انجام شود.

د) میزان رطوبت

- سنجش میزان رطوبت در دیوهای زغال.
- اگر میزان رطوبت از حد معینی بیشتر باشد، برای جلوگیری از خودسوزی می‌توان از مواد رطوبت‌گیر مثل رس استفاده کرد.
- برای جلوگیری از خودسوزی می‌توان زغال‌ها را آب‌پاشی نمود، البته باید توجه داشت که آب‌پاشی در کیفیت زغال استخراج شده تأثیری نداشته باشد.
- میزان رطوبت بیشتر برای دیوهای کنسانتره زغال سنگ (زغال سنگ خروجی کارخانه زغال‌شویی) مؤثر است.

ه) نفوذپذیری لایه پوشاننده

- زغال تازه نباید روی زغال قدیمی‌تر که مدت‌هاست در محل دیو باقی مانده ریخته شود زیرا سرعت اکسیداسیون زغال تازه بیشتر است.

- زغال باید در لایه‌های مجزا با ضخامت ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر ریخته شده و با بولدوزر و غلطک پهن و کوبیده و متراکم شود تا خلل و فرج آن به حداقل ممکن رسیده و مانع از عبور جریان هوا در داخل دیو شود.

- دیوهای بلند مدت حتی وقتی به خوبی کوبیده شده باشند، با خطر فرسایش باد و باران در سطح بیرونی خود مواجه هستند که به درون سطح نفوذ نموده و می‌تواند با تخریب و کاهش کیفیت زغال، مشکلات محیطی ایجاد کند. لازم است ترکیبی از قیر رقیق روی سطوح خارجی دیوهای بلند مدت پاشیده شود. با به هم چسباندن ذرات زغال نوعی قشر بیرونی (پوسته) مقاوم در برابر هوا ایجاد می‌شود (قیر مشکلی برای ویژگی‌های حرارتی ایجاد نمی‌کند).

- نمونه‌گیری از لایه پوشاننده و تعیین میزان نفوذپذیری.

و) کانی‌های همراه

- نمونه‌گیری از زغال سنگ‌های دیو شده و آنالیز نمونه‌ها.
- انجام مراقبت‌های ویژه در صورت وجود کانی‌های با پتانسیل خودسوزی بالا در نمونه‌ها.
- اضافه کردن ناخالصی به زغال سنگ‌های دیو شده.

ز) ساختار انباشت‌گاه

- دیو باید حالت رمپ شکل (سطح شیب‌دار) داشته باشد تا مشخصه‌های دیوسازی زیر راحت‌تر حاصل شوند:
- دیوی در حال احداث: به صورت لایه لایه در حالت رمپی شکل قرار گرفته و مرتباً توسعه پیدا کند. زغال هم‌زمان با پهن شده در لایه‌های ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر، کوبیده و متراکم گردد.
- دیوی تکمیل شده: ارتفاع کم، جناح‌های صاف و با زاویه کم جهت کاهش مقاومت باد، لایه لایه و رمپی شکل.

- جهت جلوگیری از خودسوزی، زغال‌ها با فاصله دپو شوند تا تمامی آنها در یک محل تجمع نداشته باشند و بتوان آنها را راحت‌تر جا به جا نمود.

ح) خرابی سیستم پایش

- وجود سیستم‌های اندازه‌گیری.
 - وجود سیستم‌های اندازه‌گیری پرتابل (دستی).
 - آموزش کاربران جهت راه‌اندازی سیستم در صورت خراب بودن آن (در دسترس بودن تعمیرکاران).
- اقدامات لازم برای خطر خودسوزی زغال‌سنگ در معدن زیرزمینی طزره:

الف) دما

- لازم است سنسورهایی برای اندازه‌گیری درجه حرارت مورد استفاده قرار گرفته و برنامه منظم روزانه‌ای برای بررسی درجه حرارت و دما به اجرا گذاشته شود. در صورت بالا بودن دما هشدارهای لازم از طریق آلارم داده شود.
- فواصل زمانی سنجش درجه حرارت نباید از یک هفته تجاوز نماید.
- جلوگیری از افزایش دما تنها در اثر تهویه صحیح به دست می‌آید. بنابراین باید هوای کافی به تمام قسمت‌های معدن و به ویژه کارگاه‌های استخراج برسد.
- افزایش مداوم دما معمولاً نشان‌گر گسترش گرما است و نواحی تحت تأثیر باید به دقت مراقبت و پایش شوند. افزایش دما تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که هر لحظه احتمال وقوع آتش‌سوزی وجود دارد. بنابراین لازم است ابتدا منطقه مشکوک مشخص و بعد از محصور کردن آن، یک برنامه عملیاتی برای مقابله با خطر اجرا شود.
- ثابت نگه‌داشتن و یا تحت کنترل بودن دمای هوا در معادن زغال‌سنگ.
- کنترل میزان دبی، گرمی و سردی هوا با استفاده از رادیاتورها در اتاق تهویه معدن.

ب) گازخیزی لایه

- کنترل میزان تصاعد گاز در هنگام استخراج زغال سنگ.
- در صورت گازکشی کارگاه‌ها، برای جلوگیری از خودسوزی در نواحی خالی شده از گاز، می‌توان از نیتروژن مایع که در تبخیر کننده‌ها به گاز تبدیل شده و به محل مورد نظر تزریق می‌شود، یا از تزریق بنتونیت استفاده کرد.

ج) میزان حجم هوا

- زمانی که میزان هوا کافی نباشد، تهویه به طور کامل صورت نمی‌گیرد و در حالتی که میزان حجم هوا زیادتر از حد لزوم باشد سبب به وجود آمدن اشکالاتی نظیر خودسوزی خواهد شد. بنابراین باید میزان حجم هوای لازم برای تهویه معدن را با توجه به عوامل مختلف محاسبه و به کار برد. از جمله این عوامل عبارتند از بیشترین تعداد افرادی که در یک زمان در داخل معدن مشغول به کارند، بیشترین میزان گازی که متصاعد می‌شود، حداکثر میزان استخراج و غیره (مدنی، ۱۳۸۷).
- در معادن زغال میزان حجم هوا به میزان گازهای متصاعد شده به ازای استخراج هر تن زغال بستگی دارد. در این صورت میزان حجم هوا را طوری در نظر می‌گیرند که در حین بیشترین مقدار استخراج نیز قادر به رقیق کردن گازها تا حد مجاز باشد. در جدول ۴-۲۸، میزان هوای لازم بر اساس مقدار گازهای متان و دی‌اکسید کربن متصاعد شده به ازای استخراج هر تن زغال نشان داده شده است (مدنی، ۱۳۸۷).
- کنترل کردن دبی هوای ورودی با استفاده از تنظیم کننده‌ها و درب‌های تهویه.
- به روز رسانی طرح‌های تهویه معدن در هر شش ماه.
- طراحی سیستم تهویه و تهیه نقشه تهویه و محاسبه میزان حجم هوا.

فصل چهارم | مدیریت و ارزیابی ریسک خودسوزی در معادن زغال سنگ به روش تحلیل درخت خطای فازی

جدول ۴-۲۸: میزان هوای لازم بر اساس مقدار گازهای متان و دی اکسید کربن متصاعد شده (مدنی، ۱۳۸۷).

میزان متان و دی اکسید کربن حاصله به ازای استخراج هر تن زغال بر حسب متر مکعب	هوای لازم جهت رقیق کردن گازهای حاصله از یک تن زغال (متر مکعب در دقیقه)	طبقه گازخیزی معدن
۵ تا	۱	بدون گاز
۵ تا	۱	۱
۵ تا ۱۰	۱/۲۵	۲
۱۰ تا ۱۵	۱/۵۰	۳
بیشتر از ۱۵	بایستی میزان هوای لازم را برای رقیق کردن تا ۷۵ درصد محاسبه نمود (حداقل ۱/۵۰)	ماوراء طبقه

د) روش تهویه

- بررسی روش های مختلف تهویه (دمشی، مکشی، صعودی، نزولی، مرکزی و غیره) و در نهایت انتخاب روش تهویه مناسب.
- به منظور کم کردن تراوش هوا در قسمت های استخراج شده، اگر روش استخراج به حالت پیشرو است، از طریقه تهویه کناری و در حالتی که روش استخراج پسرو است از روش مرکزی استفاده شود (مدنی، ۱۳۸۷).

ه) شبکه تهویه معدن

- شبکه تهویه باید به گونه ای طرح شود که از عبور هوا از شکاف مواد معدنی که به عنوان لنگه یا حریم برجای مانده اند و نیز از نفوذ هوا به قسمت های پر شده و به طور کلی از هر عاملی که تماس دائم هوا را با زغال برقرار می سازد، جلوگیری شود (مدنی، ۱۳۸۷).
- شبکه تهویه باید به گونه ای طراحی شود تا اختلاف فشار بین راهروهای مجاور در طول مناطق تخریب شده، به حداقل برسد.
- کم کردن اختلاف فشار در امتداد منطقه استخراج شده.

- شبکه بایستی به گونه‌ای طرح شود که جهت جریان هوا در تمام قسمت‌ها در یک جهت باقی بماند زیرا تغییر جریان هوا می‌تواند به عنوان عاملی در تسریع خودسوزی زغال باشد (مدنی، ۱۳۸۷).
- کنترل روزانه وضعیت و میزان پارامترهای هوا، فشار، دبی، سرعت و ... و درج برای شبکه تهویه.
- تهیه نمودار تغییرات هر یک از پارامترهای ذکر شده و بررسی و استفاده از آن‌ها.

و) زغال جمع شده در داخل قیف‌های تخلیه

- تخلیه زغال سنگ از درون قیف‌های تخلیه.

ز) زغال‌های رها شده در منطقه استخراج

- جمع‌آوری و خارج نمودن زغال‌های رها شده در منطقه استخراج و از جبهه کار معادن در صورت دارا بودن پتانسیل خودسوزی.

ذ) سرعت پیشروی

افزایش سرعت پیشروی در کارگاه‌های استخراج در یک بلوک استخراجی، سبب کاهش پتانسیل خودسوزی می‌شود. بنابراین:

- انتخاب میزان مناسب سرعت پیشروی در کارگاه‌های استخراج می‌تواند به عنوان یکی از موانع در خودسوزی زغال سنگ باشد.

- با توجه به اینکه اکثر لایه‌های موجود در منطقه دارای ضخامت کم و شیب زیادی هستند، به جای استفاده از سیستم تمام مکانیزه شیرر لودر، می‌توان از سیستم نیمه مکانیزه رنده و ناو زنجیری استفاده کرد تا سرعت پیشروی افزایش و زمان در معرض قرار گرفتن زغال کاهش و خودسوزی کاهش یابد.

ط) میزان تولید

- با توجه به اینکه اکثر لایه‌های موجود در منطقه دارای ضخامت کم و شیب زیادی هستند، به جای استفاده از سیستم تمام مکانیزه شیرر لودر، می‌توان از سیستم نیمه مکانیزه رنده و ناو زنجیری استفاده

کرد تا سرعت پیشروی افزایش، میزان تولید افزایش، میزان افت زغال کاهش و خودسوزی نیز کاهش یابد.

- کنترل میزان تولید بر اساس برنامه تولید سالیانه و بر اساس آن برنامه تولید ماهیانه معدن.

ی) خرابی سیستم پایش

- تعمیر سیستم پایش در صورت خرابی.
- داشتن دستگاه‌های پایش پرتابل (دستی).
- داشتن سیستم‌های پایش آنلاین.

ک) ساختارها و آنومالی‌های زمین‌شناسی

- بررسی آنومالی‌های زمین‌شناسی.
- توسعه مدل زمین‌شناسی و نقشه خطر.
- اکتشاف به روز و کافی.
- به روز کردن مدل‌های زمین‌شناسی و نقشه‌ها همراه با پیشرفت معدنکاری.
- بررسی موارد مشابه در معادن دیگر.

ل) عمر پایه

- طراحی و تعیین میزان عمر پایه در معادن زغال سنگی که روش استخراج آن اتاق و پایه و ... می‌باشد.
- مشخص نمودن عمر لنگه‌های زغال در کارگاه‌های با روش استخراج جبهه کار طولانی.

م) تأثیر چوب یا وسیله نگهداری

بعد از خودسوزی در زغال سنگ تأثیر چوب به عنوان وسیله نگهداری می‌تواند مشکلات را زیاد کرده و

یا دچار حریق گردد. بنابراین چوب دارای پتانسیل حریق در زغال می‌باشد؛ لذا:

- حذف چوب و وسایل نگهداری بعد از پایان عملیات استخراج تا حد امکان.

۴-۷- جمع بندی

خودسوزی زغال سنگ یکی از مخاطرات موجود در معادن زیرزمینی و سطحی زغال سنگ است که اثرات آن از افزایش مختصر مونوکسید کربن موجود در هوا تا آتش سوزی و انفجار در معدن تغییر می کند. خودسوزی زغال سنگ به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که می توان با شناخت، ارزیابی و کنترل این پارامترها، آن را کاهش داد.

در تحقیق حاضر برای بررسی و ارزیابی این خطر از روش مدیریت و ارزیابی ریسک تحلیل درخت خطا استفاده شد. تحلیل درخت خطا یکی از روش های کمی ارزیابی ریسک است که با استفاده از آن می توان علل ریشه ای یک حادثه خطرناک پیش بینی شده را تعیین کرد. هم چنین می توان احتمال وقوع این رویدادهای ریشه ای و در نهایت رویداد نهایی را محاسبه کرد.

در این تحقیق ابتدا با بررسی منابع مختلف و بحث و گفتگو با کارشناسان مربوطه، پارامترها و علل مختلف وقوع خطر خودسوزی تعیین شدند. سپس با استفاده از روش تحلیل درخت خطا ساختار درخت خطای خطر خودسوزی زغال سنگ رسم شد. چون خودسوزی زغال سنگ با عدم قطعیت همراه است، بنابراین برای غلبه بر این مشکل برای تعیین احتمال رویدادهای پایانی از منطق فازی و نظر کارشناسان استفاده شد. سپس مقادیر فازی رویدادهای پایانی تعیین و غیر فازی شده و از اعداد امکانی به صورت عدد احتمالی تبدیل شدند و در نهایت میزان احتمال خطر خودسوزی (رویداد نهایی) در معدن زیرزمینی طزره و در انباشت گاه های زغال در سطح زمین مشخص شد و همچنین میزان اهمیت هر مجموعه برشی حداقل به دست آمد. با استفاده از این پارامتر، مجموعه های برشی حداقل رده بندی و بحرانی ترین آنها مشخص شدند. سپس اقدامات لازم برای کنترل و کاهش این خطرات شناسایی و پیشنهاد شدند.

بر اساس محاسبات انجام شده، میزان احتمال رویداد نهایی که در اینجا خطر خودسوزی زغال سنگ است، در معدن زیرزمینی طزره ۲۴ درصد و در انباشت گاه های زغال در سطح زمین، ۱۳ درصد است که

می‌توان با استفاده از اقدامات کنترلی ارائه شده در این تحقیق، میزان احتمال به دست آمده را کاهش داد و تا حدودی از وقوع آن جلوگیری کرد.

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، احتمال وقوع خطر خودسوزی زغال‌سنگ به عنوان یکی از مهم‌ترین خطرات معدنکاری زغال در معدن زیرزمینی طزره و در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا، کارهای گذشته انجام شده در مورد خودسوزی زغال‌سنگ بررسی شدند و با استفاده از آن‌ها تحقیق حاضر شکل گرفت. هم‌چنین مکانیزم و مراحل خودسوزی زغال‌سنگ بیان شد. در مرحله بعد پارامترها و عوامل مهم و مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ بررسی شدند. با مطالعه تحقیقات گذشته می‌توان نتیجه گرفت که این تحقیقات، احتمال وقوع خودسوزی و هم‌چنین احتمال وقوع جزئی‌ترین عوامل به وجود آورنده آن را در نظر نگرفته‌اند. بنابراین استفاده از یک روش که بتوان با استفاده از آن قابلیت و احتمال خودسوزی زغال را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد، ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به موارد ذکر شده و به دلیل اینکه یک معدن زغال‌سنگ را می‌توان یک سیستم پیچیده به حساب آورد، در این تحقیق برای بررسی خطر خودسوزی زغال‌سنگ از روش تحلیل درخت خطا که یکی از روش‌های مدیریت و ارزیابی ریسک است و نسبت به روش‌های دیگر برتری دارد، استفاده شده است. هم‌چنین با توجه به مطالعه کارهای قبلی صورت گرفته در فعالیت‌ها و صنایع مختلف، از این روش در صنایع و زمینه‌های معدنی کمتر استفاده شده است.

در ادامه با بررسی منابع مختلف و بحث و گفتگو با کارشناسان مجموعه زغال‌سنگ البرز شرقی، پارامترها و علل مختلف وقوع خطر خودسوزی در معدن زیرزمینی طزره و در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین،

تعیین شدند. سپس رویدادهای اساسی، توسعه نیافته، میانی و رویداد نهایی که همان خطر خودسوزی زغال سنگ است مشخص و با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، ساختار درخت خطای آن در معدن زیرزمینی طزره و در انباشت گاه‌های زغال در سطح زمین، رسم شد.

در مرحله بعد برای محاسبه احتمال رویدادهای پایانی و در نهایت رسیدن به نرخ احتمال وقوع خطر خودسوزی زغال سنگ و با توجه به اینکه رفتار خودسوزی زغال پیچیده بوده و دستیابی به احتمال دقیق رویدادهای پایانی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است؛ در محاسبه احتمال این رویدادها از منطق فازی به همراه روش تحلیل درخت خطا استفاده شد.

برای استفاده از رویکرد و اعداد فازی برای محاسبه احتمال رویدادهای پایانی مهم و مؤثر مشخص شده در قابلیت خودسوزی زغال سنگ، با استفاده از پرسش‌نامه نظرات کیفی ۱۴ نفر از کارشناسان مجموعه معادن البرز شرقی تجزیه و تحلیل شد. قابل ذکر است که این کارشناسان اهمیت وزنی یکسانی نداشته، به همین دلیل وزن اهمیت آنها مشخص شد. در تعیین وزن اهمیت کارشناسان از معیارهای عنوان، تجربه کاری، تحصیلات و سن استفاده شده است.

سپس به منظور دستیابی به احتمال دقیق این رویدادها و کمی‌سازی نظر کارشناسان از متغیرهای زبانی خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (H)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) و برای فازی نمودن این بخش از عدد فازی دوزنقه‌ای استفاده شد. در مرحله بعد عدد فازی اجماع نظر کارشناسان برای رویدادهای پایانی خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره و همچنین رویدادهای پایانی خطر خودسوزی در انباشت گاه‌های زغال در سطح زمین محاسبه و سپس با به کار بردن روش گرانیگاه و فرمول دوزنقه‌ای غیر فازی شدند.

در مرحله بعد عدد به دست آمده از مرحله غیر فازی کردن که هنوز به صورت امکانی (CFP) است، طبق فرمول انیسواوا به حالت احتمالی (FP) تبدیل شد و نرخ احتمال هر رویداد پایانی و در نهایت نرخ

احتمال رویداد نهایی به دست آمد. بر اساس محاسبات انجام شده نرخ احتمال رویداد نهایی، که در این تحقیق خطر خودسوزی زغال سنگ است، در معدن زیرزمینی طزره ۲۴ درصد و در انباشت گاه های زغال در سطح زمین، ۱۳ درصد است. بنابراین دارای میزان نرخ احتمال شکست بالائی است.

در مرحله بعد به منظور کاهش میزان نرخ احتمال خطر خودسوزی زغال سنگ و همچنین کنترل و جلوگیری از آن، برش های حداقل (MCS) مشخص و میزان اهمیت آنها طبق رابطه فاسل - و سلی محاسبه و بر اساس آن رده بندی شدند. این رده بندی در معدن زیرزمینی طزره و در انباشت گاه های زغال در سطح زمین را می توان به صورت زیر ارائه داد:

- رده بندی مجموعه های برشی حداقل بر اساس میزان اهمیت آنها از زیاد به کم در معدن زیرزمینی طزره به ترتیب زیر است:

دما، گازخیزی لایه، میزان حجم هوا، روش تهویه، شبکه تهویه معدن، زغال جمع شده در داخل قیف های تخلیه، زغال های رها شده در منطقه استخراج، سرعت پیشروی، میزان تولید، خرابی سیستم پایش، ساختارها و آنومالی های زمین شناسی، عمر پایه، تأثیر چوب یا وسیله نگهداری، بار وارد بر پایه، روش معدنکاری، اندازه ذرات، طراحی پایه، شیب لایه، ریزش سقف ضعیف، حفر تونل و جهت پیشروی.

- رده بندی مجموعه های برشی حداقل بر اساس میزان اهمیت آنها از زیاد به کم در انباشت گاه های زغال در سطح زمین به ترتیب زیر است:

قرار گرفتن در معرض باد، اندازه ذرات، زمان انباشتن، میزان رطوبت، نفوذپذیری لایه پوشاننده، کانی های همراه، ساختار انباشت گاه و خرابی سیستم پایش.

با استفاده از محاسبات انجام شده می توان نتیجه گرفت که بحرانی ترین مجموعه های برشی حداقل در خطر خودسوزی زغال سنگ در معدن زیرزمینی طزره، دما، گازخیزی لایه، میزان حجم هوا، روش تهویه، شبکه تهویه معدن و زغال جمع شده در داخل قیف های تخلیه هستند. همچنین بحرانی ترین مجموعه های

برشی حداقل شناسایی شده در خطر خودسوزی زغال‌سنگ در انباشت‌گاه‌های زغال در سطح زمین، قرار گرفتن در معرض باد، اندازه ذرات، زمان انباشتن، میزان رطوبت و نفوذپذیری لایه پوشاننده هستند.

در نهایت برای کنترل و کاهش تأثیرات منفی ریسک‌های بحرانی و مهندسی کردن آن، برنامه واکنش در مقابل ریسک یا پاسخ به ریسک برای هر یک از آنها ارائه شد. برنامه پاسخ به ریسک و اقدامات مهندسی باعث می‌شود که ریسک‌های بحرانی کنترل و در نتیجه میزان احتمال وقوع رویداد نهایی کاهش و میزان ایمنی سیستم افزایش یافته و از وقوع صدمات و خسارات جانی و مالی جلوگیری به عمل آید.

هم‌چنین از انجام این تحقیق می‌توان نتایج زیر را گرفت:

- تحقیق انجام گرفته توسط تیاگی^۱ و همکارانش در مورد تحلیل درخت خطا نشان داد که بررسی احتمال شکست رویداد پایانی، مبنای اصلی تحلیل درخت خطا می‌باشد که به کمک منطق فازی کمی می‌گردد. استفاده از منطق فازی در درخت خطا هم ارزیابی‌ها را ساده‌تر نموده و هم می‌تواند باعث افزایش دقت در محاسبات شود (Tyagi et al., 2010). این مسأله با نتیجه‌ای که از مطالعه حاضر به دست آمد هم‌خوانی دارد.

- استفاده از روش فازی در این تحقیق سبب شده که مشکل ناشی از ابهام و عدم دقت ناشی از ذهنی بودن اطلاعات کاهش یابد.

- با توجه به مطالعات صورت گرفته، احتمال شکست رویداد پایانی به کمک اعداد فازی به وسیله کارشناسان مختلف متفاوت خواهد بود. در این شرایط صحت انتخاب عدد فازی برای نشان دادن رویداد پایانی، بسیار اساسی است. در نهایت این روش می‌تواند با کاهش عدم قطعیت و ابهامات موجود، به بهبود قابلیت اطمینان و کاهش میزان خسارات و صدمات وارد به سیستم کمک نماید.

¹- Tyagi

- در این تحقیق با استفاده از روش فازی نه تنها به کارشناسان وزن داده شد، بلکه با استفاده از غیر فازی کردن وزن رویدادهای پایانی، وزن هر رویداد مورد سنجش قرار گرفت. وجه افتراق روش به کار رفته در مطالعه تیاگی و همکارانش با مطالعه حاضر در همین قسمت بوده که شاید نقطه قوت مطالعه حاضر در خصوص کمی سازی و افزایش دقت محاسبه ضریب هر رویداد انتهایی به شمار می رود (Tyagi et al., 2010).
- یکی از مهم ترین مسائلی که در مطالعه تیاگی و همکاران به آن اشاره نشده، این است که تمامی رویدادها در تحلیل درخت خطا به طور مستقل از یکدیگر حادث می شوند و وابستگی بین المان ها صفر در نظر گرفته شده است.
- انجام این مطالعه کمک می کند تا با نگاه جدیدتر و نوآورانه تری به تکنیک درخت خطا پرداخت. روش های مرسوم تحلیل درخت خطا نیاز به یک پایگاه داده برای رویدادهای پایانی دارد ولی تلفیق تحلیل درخت خطا با منطق فازی، محدودیت های عدم وجود داده و بانک اطلاعاتی را تا حدودی مرتفع نموده و می توان به کمک منطق فازی رویدادهای پایانی کیفی را کمی ساخت. با این کار عدم قطعیت نیز تا حدود زیادی بهبود می یابد. بدین وسیله می توان نرخ رویداد نهایی را محاسبه نمود. همچنین می توان با کمی کردن رویدادهای پایانی، میزان نرخ مشارکت هر رویداد پایانی را در میزان رویداد نهایی به دست آورد و با توجه به احتمال و اولویت هر رویداد پایانی با اقدامات اصلاحی مناسب آنها را مرتفع نمود.
- محدود بودن تعداد کارشناسان و استفاده از کارشناسانی با ویژگی های متفاوت از محدودیت های عمده این مطالعه به شمار می رود. عدم آزمایش تجربی به منظور تعیین صحت و دقت نتایج به دست آمده از دیگر محدودیت های این مطالعه به شمار می رود. ارائه روشی برای کمی کردن رویدادهای با پایه کیفی از نقاط قوت این مطالعه به شمار می رود.

۵-۲- پیشنهادها

در نهایت پیشنهاداتی ارائه می‌شود که می‌توان از آنها به عنوان بهبود تحقیقات صورت گرفته در این پایان‌نامه و یا به عنوان خط‌مشی جهت انجام تحقیقات بعدی استفاده کرد.

- با توجه به اینکه روش ارائه شده در این تحقیق برای اولین بار در معادن ایران استفاده شده است؛ لذا پیشنهاد می‌شود که حوادث و خطرانی مانند آتش‌سوزی باز، انفجار گاز متان، انفجار گرد و غبار، انفجار گرد زغال، انفجار خودبه‌خودی سنگ، ریزش‌ها، نشست سطح زمین، گازدهی لایه‌های زغال و موارد دیگر را با استفاده از آن ارزیابی و بررسی کرد.

- برای انجام محاسبات فازی و همچنین محاسبه میزان اهمیت هر ریسک، روش‌های مختلفی وجود دارد؛ لذا پیشنهاد می‌شود که از دیگر روش‌ها نیز استفاده شود.

- پیشنهاد می‌شود که رویکرد فازی به همراه روش تحلیل درخت خطا به صورت دو بعدی نیز به کار رود.

- بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته به این نتیجه منتهی شده که وابستگی بین المان‌ها در درخت خطا صفر نمی‌باشد. با توجه به این مشکل، در سال ۲۰۱۰ درخت خطایی به نام درخت خطای پویا^۱ برای اولین مرتبه توسط کلیک^۲ و همکارانش ارائه شد که وابستگی بین علل ریشه‌ای را نشان می‌دهد. درخت خطای پویا، بسط روش تحلیل استاندارد درخت خطا (FT) است و به طور خاص برای تحلیل سیستم‌های بر مبنای کامپیوتر، توسعه یافته است (Celik et al., 2010). در تحقیق حاضر نیز بر همین اساس، فرض شد که بین درگاه‌های درخت خطا وابستگی وجود ندارد که پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی مد نظر قرار گیرد.

^۱- Dynamic Fault Tree = DFT

^۲- Celik

منابع فارسی

- اصفهانی ح، (۱۳۸۹)، "ارزیابی ریسک با روش تحلیل درخت خطا"، چاپ اول، انتشارات کالج برتر، تهران.
- جعفری ع و رعا ضی طبری م، (۱۳۹۰)، "ارزیابی ریسک خطرات کار در واحد تقطیر یکی از پالایشگاه‌های کشور با روش Hazan"، شرکت پالایش نفت آبادان، اداره ایمنی و کنترل ترافیک HSE.
- خاکی غ، (۱۳۹۰)، "روش تحقیق با رویکردی به پایان‌نامه نویسی"، چاپ اول، انتشارات مرکز تحقیقات علمی کشور با همکاری کانون فرهنگی انتشاراتی درایت، تهران، ص ۱۶۵-۱۶۸.
- صفاری ا، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "ارائه یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال‌سنگ"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود.
- صفاری ا، (۱۳۹۲)، "تاثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ و راه‌کارهای جلوگیری از آن در دیوهای کارخانه زغال‌شویی"، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران.
- عبدالله‌زاده غ و راستگو س، (۱۳۹۱)، "ارزیابی ریسک در پروژه‌های پل‌سازی با استفاده از آنالیز درخت خطای فازی"، همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مؤسسه آموزش عالی خاوران، ایران، مشهد.
- عبدالله‌زاده غ و راستگو س، (۱۳۹۳)، "ارزیابی ریسک در پروژه‌های پل‌سازی با استفاده از آنالیز درخت خطای فازی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره اول، ص ۸۵-۱۰۰.
- عسکری، حسین‌پور و آهنگری، (۱۳۸۸)، "آنالیز و تحلیل پیامدهای ناشی از حادثه خروج از خط قطار با روش آنالیز درخت وقایع (ETA)"، دومین نفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه- آهن (ICRARE 2009)، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- عطائی م، (۱۳۸۹)، "تصمیم‌گیری چند معیاره فازی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عطائی م، (۱۳۹۰)، "معدنکاری زیرزمینی"، (چاپ سوم)، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، جلد دوم.
- علیزاده س ش، گلبائی ف، شاه طاهری س ج و نصیری پ، (۱۳۸۵)، "شناسایی و ارزیابی خطرات موجود یا بالقوه در یک شرکت تولیدی با استفاده از روش آنالیز ایمنی شغل"، مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هشتم، شماره ۴.
- کلاسنگیانی ح و امیدواری م، (۱۳۹۴)، "ارائه الگویی جهت ارزیابی کمی قابلیت اطمینان برق‌گرفتگی فشار ضعیف در صنعت توزیع برق با استفاده از FTA در محیط فازی"، دو ماهنامه سلامت کار ایران، دوره ۱۲، شماره ۲.

- کیارستمی ک، (۱۳۹۳)، "سوخت فسیلی زغال سنگ و پیامدهای زیست محیطی آن"، مجله رشد زمین شناسی، دوره نوزدهم، شماره ۴، ص ۲۱-۱۴.
- محمدفام ا، (۱۳۹۰)، "مهندسی ایمنی"، چاپ ششم، انتشارات فن آوران، تهران، ص ۳۴.
- مدنی ح، (۱۳۸۷)، "تهویه در معادن"، چاپ ششم، مرکز نشر دانشگاهی تهران.
- میرزا س، جعفری م ج، امیدواری م و لواسانی س م، (۱۳۹۳)، "استفاده از منطق فازی در برآورد احتمال شکست در آنالیز ریسک به روش درخت خطا"، مجله ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت ها، دوره ۲، شماره ۲، ص ۱۲۳-۱۱۳.

- Abdelgawad M. and Fayek A.R., (2011), "Fuzzy reliability analyzer: A quantitative assessment of risk events in the construction industry using fuzzy fault tree analysis", J.Constr. Manage Eng, Vol. 137(4), pp. 294- 302.
- Aiyu W., Shiliang S., Runqiu L., Deming T. and Xiafang T., (2014), "City Fire Risk Analysis based on Coupling Fault Tree Method and Triangle Fuzzy Theory", Procedia Engineering, pp. 204-212.
- Ayyub B.M., (2003), "Risk Analysis in Engineering and Economics", Chapman & Hall/ CRC, ISBN 1-58488-395-2.
- Banerjee S.C., Nandy D.K., Banerjee D.D. and Chakravorty R.N., (1972), "Classification of coal with respect to their Susceptibility to Spontaneous Combustion", MGMI, July 1972, Vol. 69, Issue 2, pp. 15-28.
- Baris K. and Didari V., (2009), "Low Temperature Oxidation of a High Volatile Bituminous Turkish Coal Effects of Temperature and Particle Size", Coal Operators Conference, pp. 296-302.
- Beamish B., Lin Z. and Beamish R., (2012), "Investigating the Influence of Reactive Pyrite on Coal Self-heating", 12th Coal Operators Conference, pp. 294-299.
- Beamish B.B. and Schultz T.J., (2008), "Moisture Content Impact on the Self-Heating Rate of a Highly Reactive Subbituminous Coal", Coal Operators Conference, pp. 155-160.
- Bhattacharya K.K., (1971), "The role of absorption of water vapour in the spontaneous heating of coal", Fuel, Vol. 50, Issue 4, pp. 367-38.
- B. Misra K. and G.Weber G., (1989), "A New Method for Fuzzy Fault Tree Analysis", Microelectron. Reliab, pp. 195-216.
- Bo-tao Q., Qing-guo S., De-ming W., Lei-lin Z. and Qin X., (2009), "Analysis and key control technologies to prevent spontaneous coal combustion occurring at a fully mechanized caving face with large obliquity in deep mines", Journal of Mining Science and Technology (China), Vol. 19, Issue 4, pp. 446-451.
- Bouska V., (1981), "Gepshmistry of Coal", Academia, prague, pp.128-141.
- Brooks K. and Glasser D., (1986), "A Simplified Model of Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles", Fuel, Vol. 65, Issue 8, pp. 1035-1041.
- Brooks K., Svanas N. and Glasser D., (1988), "Evaluating the Risk of Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles", Fuel, Vol. 67, Issue 5, pp. 651-656.
- Carras J. and Young B. C., (1994), "self-heating of coal and related materials: models, application and test methods", Program Energy combustion science, Vol. 20, pp. 1-15.
- Celik M., Lavasani S.M. and Wang J., (2010), "A risk-based modelling approach to enhance ship-ping accident investigation", Safety Science. pp.18-27.
- C.F. Guimarees A. and F.F. Ebecken N., (1999), "Fuzzy FTA: A Fuzzy Fault Tree System for Uncertainty Analysis", Annals of Nuclear Energy, pp. 523-532.

- Chanda R.S. and Bhattacharjee P.K., (1998), "A Reliability Approach to Transmission Expansion Planning Using Fuzzy Fault Tree Analysis Model", Electric Power Systems Research, pp. 101-108.
- Chen S.J. and Hwang C.L., (1992), "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making", 1st Ed. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg, Germany, ISBN: 3-540-54998-6.
- Clemens P.L., (1993), Presentation of Fault Tree Analysis.
- Clemen R.T. and Winkler R.L., (1999), "Combining probability distributions from experts in risk analysis. Risk analysis, pp. 187-203.
- Dallegge T.A. and Barker C.E., (1994), "Coal-Bed methane gas-in-place resource estimates using sorption isotherms and burial history Reconstruction: An Example from the Ferron Sandstone Member of the Mancos Shale", Utah, in: Kirschbaum M.A., Roberts L.N.R. and Biewick L.R.H., Geologic Assessment of Coal in the Colorado Plateau: Arizona, Colorado, New Mexico, and Utah, U.S. Geological Survey Professional Paper 1625-B, pp. 1-26.
- Defaveri D.M., Zonato C., Vidili A. and Ferraiolo G., (1989), "Theoretical and experimental study on the propagation of heat inside deposits of coal", Journal of Hazardous Materials, Institute of Science and Technology of Chemical Engineering University of Genoa, 1st August 1989, pp. 135-140.
- Ericson C., (2005), "Hazard analysis techniques for system safety", John Wiley and Sons.
- Ferdous R., Khan F., Veitch B. and Amyotte P., (2009), "Methodology for Computer Aided Fuzzy Fault Tree Analysis", Process Safety and Environmental, pp. 217-226.
- Furuta H. and Shiraishi N., (1984), "Fuzzy Importance in Fault Tree Analysis", Fuzzy Sets and Systems, pp. 205-213.
- Gangopadhyay P.K., (2008), Ph.D. thesis, "Coalfire related CO₂ emissions and remote sensing", The Netherlands, University of Utrecht, pp. 176, ISBN 978-90-6164-267-1.
- Ghosh R., (1986), "Spontaneous combustion of certain Indian coals-some physicochemical considerations", Fuel, Vol. 65, Issue 8, pp. 1042-1046.
- Gierczak M., (2014), "The Quantitative Risk Assessment of MINI, MIDI and MAXI Horizontal Directional Drilling Projects Applying Fuzzy Fault Tree Analysis", Tunneling and Underground Space Technology, pp. 67-77.
- Glenn B.S., Prakash A., V.Sokol E., (2015), "Spontaneous Combustion in open-cut mines: Australian Experience and Research", Coal and Peat fires: A Global Perspective, Australia.
- Greb S.F., Eble C.F., Peters D.C. and Papp A.R., (2006), "COAL and the Environment", American Geological Institute In cooperation with Illinois Basin Consortium U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory Office of Surface Mining, ISBN: 0-922152-77-2.
- Greenfield M.A., (2000), "Risk Management Tools", Langley Research Center, NASA Publication.
- Halvani G. and Zare M., (2009), "Safety System & Risk Management", 1th ed. Tehran: Sobhan publications, pp. 64-75.[persian].
- Ham B., (2005), "A Review of Spontaneous Combustion Incidents", Coal Operators' Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 237-242.

- Hathaway W.T. and Markos S.H., (1989), "Passenger Carrying Submersibles System Safety Analysis", Department of transportation.
- He L., Huang H. and Zou M., (2007), "Fault Tree Analysis Based on Fuzzy Logic".
<http://www.hseexpert.com>.
- <http://www.tabasenc.ir>.
- ICH Q9 EWG, (2006), Presentation of Quality Risk Management.
- 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.
- Kim C.E., Ju Y.J. and Gens M., (1996), "Multilevel Fault Tree Analysis Using Fuzzy Numbers", Computers Ops Res, Vol. 23, No. 7, pp. 695-703.
- Krishnaswamy S., Agarwal P.K. and Gunn R.D., (1996), "Low-temperature Oxidation of Coal. 3. Modeling Spontaneous Combustion in Coal Stockpile", Fuel, Vol. 75, Issue 3, pp. 353-362.
- Kucuk A., Kadioglu Y. and Gulaboglu M.S., (2003), "A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air", Combustion and Flame, 2003, Volume 133, Issue 3, PP. 255-261.
- Lang L. and Fu-bao Z., (2010), "A Comprehensive Hazard Evaluation System for Spontaneous Combustion of Coal in Underground Mining", International Journal of Coal Geology, Vol. 82, Issue 1-2, pp. 27-36.
- Lavasani S.M., Zendgani A. and Celik M., (2014), "An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry", Process Safety and Environment Protection, DIO: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2014.05.001>.
- Lavasani M.R., Wang J., Yang Z. and Finlay J., (2011), "Application of Fuzzy Fault Tree Analysis on Oil and Gas Offshore Pipelines", Int. J. Mar. Sci. Eng, pp. 29-42.
- Liang G. and J. Wang M., (1993), "Fuzzy Fault Tree Analysis Using Failure Possibility", Microelectron. Reliab, Vol. 33, No. 4, pp. 583-597.
- Limnios N., (2007), "Fault trees (control systems, robotics and manufacturing series)", ISTE Ltd.
- Lin C. and Wang M., (1997), "Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets", Reliability Engineering and System Safety, pp. 205-213.
- MDG 1006, (2011), "Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline", Produced by Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW.
- Meisner F.F., (1984), "Cretaceous and Lower Tertiary coals as source for gas accumulations in the Rocky Mountain Area", in: Woodward J., Meisner F.F. and Clayton J.L. (Eds.), Hydrocarbon source Rocks of the Greater Rocky Mountain Region, Rocky Mountain Association of Geologists Guide Book, pp. 401-431.
- Meng J., (2015), "Reliability Analysis of Ventilation System Based on Fuzzy Fault Tree", Advanced Materials Research, Vols. 634-638, pp. 3670-3677.
- Mendes A. and Helvacioğlu I.H., (2011), "An Application of Fuzzy Fault Tree Analysis for Spread Mooring Systems", Ocean Engineering, pp. 285-294.
- Michaylov M., (2002), "Expert system for assessment of risk from spontaneous combustion", Mining and Mineral Processing, Vol. 44-45, Part 2, pp. 27-35.

- Mitchell D.W., (1990), "MINE FIRES Prevention, Detection, Fighting", United States of America: Maclean Hunter Publishing Company, pp. 167, ISBN 0-92531-10-8.
- Mohalik N.K., Panigrahi D.C. and Singh V.K., (2009), "Application of Thermal Techniques to Assess Proneness of Coal to Spontaneous Heating", Journal of Thermal Anal Calorim, pp. 507-519.
- Mohammadfam I., (2005), "Safety Analysis Techniques", Hamadan: Fanavran publications, chapter 5.[persian].
- Mohr R., (2002), "Preliminary Hazard Analysis. Menomonie", Jacobs Sverdrup, p. 74.
- Morla R., Balusu R., Tanguturi K. and Khanal M., (2013), "Prediction and Control of Spontaneous Combustion in thick Coal Seams", 13th Coal Operators Conference, pp. 232-239.
- Morris R. and Atkinson T., (1986), "Geological and Mining Factors Affecting Spontaneous Heating of Coal", Mining Science and Technology, Vol. 3, pp. 217-231.
- Morris R. and Atkinson T., (1988), "Seam Factor and The Spontaneous Heating of Coal", Mining Science and Technology, Vol. 7, pp. 149-159.
- Nedeljakova I., (2007), "Review of Risk Assessment Methods", Journal of Information, Control and Management System, Vol. 5, No. 2.
- Pan H. and Yun W., (1997), "Fault Tree Analysis with Fuzzy Gates", Computers ind. Engng, Vol. 33, Nos 3-4, pp. 569-572.
- Panigrahi D.C. and Bhattacharjee R.M., (2004), "Development of modified gas indices for early detection of spontaneous heating in coal pillars", Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 104, Issue 7, pp. 367-397.
- Panigrahi D.C., Ojha A., Saxena N.C. and Kejriwal, B.K., (1997), "A study of coal oxygen interaction by using Russian U-Index and its correlation with basic constituents of coal with particular reference to Jharia coal field", 27th international conference of safety in mines research institutes, New Delhi ,India, pp. 493-499.
- Pis J.J., Puente G., Fuente A., Moran A. and Rubiera F., (1996), "A study of the self-heating of fresh and oxidized coals by differential thermal analysis", ThermochimicaActa, Vol. 279, pp. 93-101.
- PMI (Project Management Institute), (2000), A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). Pennsylvania.
- Pophare A.M., Mendhe V.A. and Varade A., (2008), "Evaluation of coal bed Mmethane potential of coal seams of Sawang Colliery", Jharkhand, India, J. Earth Syst. Sci, Vol. 117, No. 2, pp.121-132.
- Purba J., (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, pp. 21-29.
- Rajakarunakaran S., Kumar A.M. and Prabhu V.A., (2015), "Applications of Fuzzy Tree Analysis and Expert Elicitation for Evaluation of Risks in LPG Refuelling Station", Journal of Loss Prevention in the Process Industries", pp. 109123.
- Rausand M., (2005), "Preliminary Hazard Analysis", pp. 3-7.
- Reniers G.L.L., Dullaert W., Ale B.J.M. and Soudan K., (2005), "Developing an external domino prevention framework Hazwin", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp. 127-138.

- Renjith V.R., Madhu G., Lakshmana Gomathi Nayagam V. and 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.
- Rice D.D., (1993), "Composition and origins of coalbed gas", chapter 7 of book: *Hydrocarbon from coal*, AAPG Special Publication A180, *Study in geology* 38, pp. 159-184.
- Riley J.T., Reasoner J.W., Fatemi S.M. and Yates G.S., (1987), "self-heating of coal in barges", *Journal Article Department of Chemistry and Center for Coal Science*, Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky, pp 162-170.
- Ross T., (2010), "Fuzzy Logic with engineering applications: JOHN WILEY & SONS, INC".
- Sahu H.B., Padhee S. and Mahapatra S.S., (2011), "Prediction of Spontaneous Heating Susceptibility of Indian Coals Using Fuzzy Logic and Artificial Neural Network Models", *Expert Systems with Application*, pp. 2271-2282.
- Sawyer J. and Rao S.S., (1994), "Fault Tree Analysis of Fuzzy Mechanical Systems", *Microelectron. Reliab*, Vol. 34, No. 4, pp. 653-667.
- Senol Y.E., Aydogdu Y.V., Sahin B. and Kilic I., (2015), "Fault Tree Analysis of Chemical Cargo Contamination by Using Fuzzy Approach", *International Journal of Expert Systems with Applications*.
- Sensogut C., (1999), "Spontaneous combustion related fire ratios", *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 5, Issue 1, pp. 1009-1014.
- Shi L., Shuai J. and 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*, pp. 529-538.
- Shi X. and Wu K., (2011), "Research and Application of Comprehensive Electromagnetic Detection Technique in Spontaneous Combustion Area of Coalfields", *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol. 3, pp. 195-202.
- Shu M., Cheng C. and Chang J., (2006), "Using intuitionistic fuzzy sets for fault-tree analysis on printed circuit board assembly", *Microelectronics Reliability*, pp. 2139-2148.
- Singer D., (1990), "Fault Tree Analysis Based on Fuzzy Logic", *Computers Chem. Engng*, Vol. 14, No. 3, pp. 259-266.
- Singh R., (2013), "Spontaneous heating and fire in coal mines", *Procedia Engineering*, pp 78-90.
- Singh R.N., Denby B. and Ren T., (1990), "A Knowledge based System for Assessing Spontaneous Combustion Risk in Longwall Mining", *Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 11, Issue 1, pp. 45-54.
- Singh R.N., Shonhardt J.A. and Terezopoulos N., (2002), "A new dimension to studies of spontaneous combustion of coal", *Mineral Resources Engineering*, Vol. 11, Issue 2, pp. 147-163.
- Sipila J., Auerkari P., Heikkila A.M., Tuominen R., Vela I., Itkonen J., Rinne M. and Aaltonen K., (2012), "Risk and mitigation of self-heating and spontaneous combustion in underground coal storage", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 25, Issue 3, pp 617-622.

- Song Z., Zhu H., Jia G. He C., (2014), "Comprehensive Evaluation on Self-ignition Risks of Coal Stockpiles using Fuzzy AHP Approach", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp. 78-94.
- Stach E., Mackowsky M., Teichmuller M., Taylor G.H., Chandra D., and Teichmuller, R., (1975), "Stach's textbook of coal petrography", 2nd ed., Berlin, Gebruder Borntraeger, 425 P.
- 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 modelling and control", 1st. Ed. CRC Press, Florida, USA.
- Sujanti W. and Zhang D., (1999), "A Laboratory Study of Spontaneous Combustion of Coal, the Influence of Inorganic Matter and Reactor Size", Fuel, Vol. 78, Issue 5, pp. 549-556.
- Sundararajan C., (2008), "Safety-Reliability-Risk Assessment: Preliminary Hazard Analysis", pp. 2-3.
- Suresh P.V., Babar A.K. and Raj V.V., (1996), "Uncertainty in Fault Tree Analysis: A Fuzzy Approach", Fuzzy Sets and Systems, pp. 135-141.
- Shu M., Cheng C. and Chang J., (2006), "Using Intuitionistic Fuzzy Sets for Fault Tree Analysis on Printed Circuit Board Assembly" Microelectronics Reliability, pp. 2139-2148.
- Tweedale M. and Joy J., (1997), Risk management handbook for the mining industry.
- Tyagi S.K., Pandey D. and Tyagi R., (2010), "Fuzzy set theoretic approach to fault tree analysis", International Journal of Engineering, Science and Technology, pp. 276-283.
- Vesely B., (2002), "Fault Tree Handbook with Aerospace Applications", Version 1.1, NASA Publication.
- Wang D., Zhang P. and Chen L., (2013), "Fuzzy Fault Tree Analysis for Fire and Explosion of Crude Oil Tanks", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp. 1390-1398.
- Wang J., Nie R., Zhang H. and Chen X., (2013), "New Operators on Triangular Intuitionistic Fuzzy Numbers and their Applications in System Fault Analysis", Information Science, pp. 79-95.
- Wu J., Wu Y., Wang J. and Zhou C., (2012), "Radon Measuring to Detect Coal Spontaneous Combustion Fire Source at Buliant Mine, Shending", 12th Coal Operators Conference, pp. 300-304.
- www.BP.com.
- Xie J., Xue S., Cheng W., Wang G., (2011), "Early detection of spontaneous combustion of coal in underground coal mines with development of an ethylene enriching system", International Journal of Coal Geology, pp 123-127.
- Xue S. and Cui H., (2004), "Innovative Techniques for detection and Control of Underground spontaneous Combustion of Coal", CSIRO Exploration and Mining.
- Xue S. and Winkelmann N., (2005), "Detection of Underground Spontaneous Combustion of Coal with Surface-Based Radon Technique at Dartbrook Mine", Coal Operators Conference, pp. 265-270.
- Yanfu W. and Min X., (2012), "Approach to Integrate Fuzzy Fault Tree with Bayesian Network", International Symposium on Safety Science and Technology, pp. 131-138.

-
- Yuan L. and Smith A.C., (2012), “The effect of ventilation on spontaneous heating of coal”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp. 131-137.
 - Yuhua D. and Datao Y., (2005), “Estimation of Failure Probability of Oil and Gas Transmission Pipelines by Fuzzy Fault Tree Analysis”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp. 83-88.
 - Zou C., Zhu R., Tao S., Hou L., Yuan X., Song Y., Niu J., Dong D., Liu S., Jiyang L., Wang S., Zhang G., (2013), “Unconventional petroleum geology”, Petroleum Industry Press, Published by Elsevier Inc, 372 P.

Abstract

The coal spontaneous combustion is one of the most important problems in in coal mines. The results of spontaneous combustion are serious and negative – damaging economic effects, detrimental environmental consequences and unwanted costs in health problems and, in some cases, human life. To prevent these outcomes, the processes that lead to coal self-heat must be understood and precautions must be taken to avoid fires caused by Spontaneous Combustion. The purpose of the present study was the risk assessment of spontaneous combustion based on Fault Tree Analysis method in fuzzy environment in the coal mines.

In this research, according to a review of all the latest, known and credible studies about coal spontaneous combustion from around the world, many important and effective parameters were identified. Afterwards, the causes of spontaneous combustion coal were determined using FTA method. In order to calculate the probability of basic events and eventually reach the rate of occurrence of the top event (risk of spontaneous combustion coal) and regarding this fact that the spontaneous combustion coal behavior is complex and the possibility of achieving precisely the basic events in the fault tree of this event is difficult and with uncertainty, so fuzzy logic and fuzzy numbers were used to assign probability weight to basic events.

The Fuzzy process began with the selection of an expertise team of Coal Mines of Alborz Sharghi and ended with determination of the probability rate for the basic events. The equation recommended by Onisawa was used to determine the probability rate. Then the probability of top event was determined using the appropriate equations. The critical Minimal Cut Sets (MCS) were determined using Fussell-Vesely equation.

The results show that the probability of the risk of spontaneous combustion coal in underground mine of Coal Mines of Alborz Sharghi (Tazareh) is 24% and it is 13% in coal stock piles on the ground, so that it is the high levels of risk to staff involved in this vital and important industry. Therefore, with respect to determination of Minimal Cut Set, control methods to reduce the negative impacts and prevention of damages and losses of life and financial was proposed and presented.

Keywords

Spontaneous Combustion, Coal Mines, Risk Assessment, Fault Tree Analysis Method (FTA), Fuzzy Logic, Basic Event, Top Event, Minimal Cut Sets (MCS).



Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Risk Assessment of Spontaneous Combustion Coal in Coal Mines
by using Fault Tree Analysis Method**

Zeinab Jahanbani

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Farhang Sereshki

Advisor:

Keramat Ghanbari

September 2015