





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه ی یک سیستم طبقه بندی مهندسی برای ارزیابی خطر حریق در معادن  
زیرزمینی زغال سنگ (مطالعه موردی: مجموعه معادن البرز شرقی)

## حدیث مرادی

اساتید راهنما

دکتر محمد عطایی

دکتر فرهنگ سرشکی

اساتید مشاور

مهندس کرامت قنبری

مهندس امیر صفاری

شهریور ۱۳۹۴

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است:

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز، هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره‌آوردی‌گران سنگ‌تراز این ارزان‌داشتن تا به خاک پستان‌نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم‌گوزن‌خوار محسنتان را

بزداید.

بوسه بر دستان پر مهرتان

## تقدیر و تشکر

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده نوازی‌هایش پایان نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاری‌گیشان نبود، هرگز این پایان نامه به اتمام نمی‌رسید.

بدون شک جایگاه معلّم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم، اما از آن جایی که تجلیل از معلّم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه:

از زحمات اساتید گرانقدرم آقایان **دکتر محمد عطایی و دکتر فرهنگ سرشکی** که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند صمیمانه سپاس‌گزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم. هم‌چنین از زحمات اساتید مشاورم جناب آقای **مهندس قنبری** (مدیریت محترم واحد HSE شرکت معادن زغال‌سنگ البرز شرقی) و **مهندس امیر صفاری** به خاطر همکاری بی‌دریغشان در این عرصه صمیمانه سپاس‌گزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

از جناب آقایان **دکتر رضا خالوکاکائی و دکتر سیّد رحمان ترابی** که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند صمیمانه کمال تشکر را دارم.

سپاس آخر را از مهربان‌ترین همراهان زندگیم، پدر و مادرم دارم که حضورشان در فضای زندگیم مصداق بی‌ریای سخاوت بوده است.

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

## تعهد نامه

اینجانب حدیث مرادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن از دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **ارائه‌ی یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی تحت راهنمایی آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر فرهنگ سرشکی متعهد می‌شوم.**

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

آتش‌سوزی یکی از حوادث خطرناکی است که نه تنها در معادن بلکه در هر جای دیگر سبب ایجاد خسارت‌های فراوان مالی و تلفات جانی بسیار می‌شود. آتش‌سوزی‌های معدنی جریان کار عادی روزانه را در معادن بر هم زده و خسارت‌های سنگین و حوادث ناگواری را به وجود می‌آورند.

خطر بزرگی که آتش‌سوزی‌های معدنی دربردارند شامل مسمومیت افراد در اثر تنفس گاز منواکسید کربن ناشی از سوختن زغال، سوختن داربست‌های چوبی، خسارت و نابودی تجهیزات داخل معدن، آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازها و خروج دود فراوان از معدن، ایجاد مشکل در تهویه معدن و غیره می‌باشد. در این تحقیق برای ارزیابی خطر حریق، ابتدا خلاصه‌ای از مهم‌ترین کارهای انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است، سپس پارامترهای مؤثر بر انواع حریق شناسایی شدند. در ادامه برای تعیین ضریب اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر بر حریق در معادن زغال‌سنگ از کارشناسان و متخصصان مربوطه نظرسنجی شد، سپس برای وزن‌دهی پارامترهای مؤثر بر حریق از دو روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP) و روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) استفاده شد.

در نهایت برای به دست آوردن وزن هر پارامتر، پارامترهای مهم و کلیدی شناسایی شدند و یک سیستم طبقه‌بندی جدیدی بر مبنای پارامترهای مهم و کلیدی پیشنهاد شد. این سیستم پیشنهادی اندیس پتانسیل حریق در معادن (MFPI) نامیده شد. مطابق این سیستم قابلیت حریق در معادن در ۳ کلاس پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی شدند.

در ادامه اطلاعات مجموعه معادن شرکت البرز شرقی جمع‌آوری شدند. برای ارزیابی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی محلهایی از این مجموعه با توجه به تأثیر پارامتر موجود در سیستم طبقه‌بندی امتیازدهی شد و کلاس هر یک از محل‌ها در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی MFPI تعیین شد.

برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از سیستم طبقه‌بندی ارائه شده آمار حریق مجموعه البرز شرقی طی ده سال از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۳۹۴ مورد بررسی قرار گرفت که مقایسه این نتایج با حوادثی که در این مجموعه رخ داده است تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** آتش‌سوزی، معادن زغال‌سنگ، سیستم طبقه‌بندی کمی، روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)، روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)، اندیس پتانسیل حریق در معادن (MFPI).

## مقالات مستخرج از پایان نامه

### مقالات کنفرانسی چاپ شده

- مرادی ح، عطایی م، سرشکی ف، (۱۳۹۴)، " تأثیرات زیست محیطی خودسوزی در معادن زغال سنگ و راه های ابتکاری تشخیص و کنترل آن"، سومین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران.
- مرادی ح، عطایی م، سرشکی ف، قنبری ک، صفاری ا، (۱۳۹۴)، "روش های تشخیص حریق در معادن زغال سنگ به منظور کاهش توسعه و اثرات زیست محیطی آن"، همایش ملی مدیریت محیط زیست و توسعه پایدار، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

# فهرست مطالب

صفحه

عنوان

|    |                                                              |
|----|--------------------------------------------------------------|
| ۱  | فصل ۱: کلیات تحقیق.....                                      |
| ۲  | ۱-۱- مقدمه.....                                              |
| ۳  | ۲-۱- بیان مسأله.....                                         |
| ۵  | ۳-۱- ضرورت تحقیق.....                                        |
| ۶  | ۴-۱- اهداف تحقیق.....                                        |
| ۷  | ۵-۱- ساختار تحقیق.....                                       |
| ۹  | فصل ۲: حریق در معادن.....                                    |
| ۱۰ | ۱-۲- مقدمه.....                                              |
| ۱۱ | ۲-۲- تئوری‌های حریق.....                                     |
| ۱۱ | ۱-۲-۲- مثلث حریق.....                                        |
| ۱۲ | ۲-۲-۲- هرم حریق.....                                         |
| ۱۲ | ۳-۲-۲- چرخه بقاء حریق.....                                   |
| ۱۳ | ۳-۲- فازهای حریق.....                                        |
| ۱۵ | ۴-۲- تفاوت بین سوختن و حریق.....                             |
| ۱۷ | ۵-۲- چهارچوبی برای تجزیه و تحلیل حریق در معادن زغال‌سنگ..... |
| ۱۷ | ۱-۵-۲- زیر سیستم A (شروع حریق، توسعه و کنترل آن).....        |
| ۱۹ | ۲-۵-۲- زیر سیستم B (توسعه و گسترش دود و کنترل آن).....       |
| ۱۹ | ۳-۵-۲- زیر سیستم C (گسترش حریق و کنترل آن).....              |
| ۱۹ | ۴-۵-۲- زیر سیستم D (تشخیص حریق، هشدار و جلوگیری از آن).....  |
| ۱۹ | ۵-۵-۲- زیر سیستم E (کنترل و تخلیه).....                      |
| ۱۹ | ۶-۵-۲- زیر سیستم F (خدمات نجات در معادن).....                |
| ۲۰ | ۶-۲- انواع آتش‌سوزی در معادن.....                            |
| ۲۲ | ۱-۶-۲- آتش‌سوزی باز.....                                     |
| ۲۸ | ۲-۶-۲- آتش‌سوزی بسته.....                                    |
| ۳۶ | ۷-۲- جمع‌بندی.....                                           |
| ۳۷ | فصل ۳: سابقه علمی موضوع.....                                 |
| ۳۸ | ۱-۳- مقدمه.....                                              |
| ۳۹ | ۲-۳- بررسی سابقه علمی موضوع.....                             |
| ۴۳ | ۳-۳- روش‌های ارزیابی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ.....         |
| ۴۴ | ۱-۳-۳- پیش‌گیری حریق در معادن زیرزمینی.....                  |
| ۴۴ | ۲-۳-۳- تشخیص حریق در معادن زیرزمینی.....                     |

|     |                                                                                                                |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۴۹  | ۳-۳-۳- حفاظت و کنترل حریق در معادن زیرزمینی.....                                                               |
| ۵۹  | ۴-۳- جمع‌بندی.....                                                                                             |
| ۶۱  | فصل ۴: بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر حریق.....                                                               |
| ۶۲  | ۱-۴- مقدمه.....                                                                                                |
| ۶۲  | ۲-۴- بررسی عوامل مؤثر بر حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.....                                                  |
| ۶۳  | ۱-۲-۴- عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز.....                                                                         |
| ۶۵  | ۲-۲-۴- عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ.....                                                                     |
| ۶۶  | ۱-۲-۲-۴- عوامل ذاتی.....                                                                                       |
| ۷۲  | ۲-۲-۲-۴- عوامل زمین‌شناسی.....                                                                                 |
| ۷۵  | ۳-۲-۲-۴- عوامل معدنکاری.....                                                                                   |
| ۷۹  | ۳-۴- جمع‌بندی.....                                                                                             |
| ۸۱  | فصل ۵: ارائه سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر حریق.....                                                 |
| ۸۲  | ۱-۵- مقدمه.....                                                                                                |
| ۸۳  | ۲-۵- تعیین پارامترهای مؤثر بر حریق.....                                                                        |
| ۸۵  | ۳-۵- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی.....                                                                     |
| ۸۸  | ۱-۳-۵- نظرسنجی متخصصان.....                                                                                    |
| ۸۸  | ۲-۳-۵- محاسبه اعداد فازی.....                                                                                  |
| ۸۹  | ۳-۳-۵- تشکیل ماتریس معکوس فازی.....                                                                            |
| ۸۹  | ۴-۳-۵- محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها.....                                                                     |
| ۹۰  | ۵-۳-۵- غیر فازی کردن وزن پارامترها.....                                                                        |
| ۹۰  | ۴-۵- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر بر حریق در معادن زغال‌سنگ با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی..... |
| ۹۰  | ۱-۴-۵- نظرسنجی از متخصصان.....                                                                                 |
| ۱۰۲ | ۲-۴-۵- اعتبارسنجی پرسش‌نامه‌ها.....                                                                            |
| ۱۰۲ | ۱-۲-۴-۵- تعریف روایی.....                                                                                      |
| ۱۰۳ | ۲-۲-۴-۵- تعریف پایایی.....                                                                                     |
| ۱۰۴ | ۳-۲-۴-۵- محاسبه ضریب آلفای کرونباخ تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار SPSS 20.....                             |
| ۱۰۷ | ۳-۴-۵- یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش FDAHP.....                                                        |
| ۱۰۷ | ۱-۳-۴-۵- یافتن وزن انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.....                                              |
| ۱۰۸ | ۲-۳-۴-۵- یافتن وزن پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز.....                                                        |
| ۱۱۱ | ۳-۳-۴-۵- یافتن وزن پارامترهای اصلی (ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری).....                                          |
| ۱۱۲ | ۴-۳-۴-۵- یافتن وزن پارامترهای ذاتی.....                                                                        |
| ۱۱۵ | ۵-۳-۴-۵- یافتن وزن پارامترهای زمین‌شناسی.....                                                                  |
| ۱۱۷ | ۶-۳-۴-۵- یافتن وزن پارامترهای معدنکاری.....                                                                    |
| ۱۱۹ | ۴-۴-۵- وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر حریق با استفاده از روش FDAHP.....                                          |
| ۱۲۲ | ۵-۵- روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES).....                                                                       |
| ۱۲۳ | ۱-۵-۵- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی.....                                                                          |

|          |                                                                                          |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۲۵..... | ۵-۵-۲- ماتریس اندرکنش.....                                                               |
| ۱۲۶..... | ۵-۵-۳- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش.....                                                   |
| ۱۲۸..... | ۵-۵-۴- نمودار علّت- اثر.....                                                             |
| ۱۳۱..... | ۵-۵-۵- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر بر حریق با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ (RES)..... |
| ۱۴۰..... | ۵-۶- تشکیل فهرست‌های رده‌بندی سیستم طبقه‌بندی.....                                       |
| ۱۴۸..... | ۵-۷- تعریف اندیس پتانسیل حریق معادن (MFPI).....                                          |
| ۱۴۹..... | ۵-۸- مطالعه موردی.....                                                                   |
| ۱۴۹..... | ۵-۸-۱- منطقه مورد مطالعه.....                                                            |
| ۱۵۰..... | ۵-۸-۲- رده‌بندی مناطق مجموعه البرزشرقی از نظر پتانسیل حریق.....                          |
| ۱۵۳..... | ۵-۹- جمع‌بندی.....                                                                       |
| ۱۵۵..... | <b>فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....</b>                                                |
| ۱۵۶..... | ۶-۱- نتیجه‌گیری.....                                                                     |
| ۱۵۸..... | ۶-۲- پیشنهادها.....                                                                      |
| ۱۵۹..... | <b>منابع فارسی.....</b>                                                                  |
| ۱۶۰..... | <b>منابع لاتین.....</b>                                                                  |
| ۱۶۷..... | <b>پیوست.....</b>                                                                        |

# فهرست شکل؛

صفحه

عنوان

|    |                                                                                                  |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۸  | شکل ۱-۱: ساختار تحقیق.....                                                                       |
| ۱۱ | شکل ۱-۲: مثلث حریق.....                                                                          |
| ۱۲ | شکل ۲-۲: هرم حریق.....                                                                           |
| ۱۳ | شکل ۳-۲: چرخه بقای حریق.....                                                                     |
| ۱۳ | شکل ۴-۲: فازهای حریق.....                                                                        |
| ۱۵ | شکل ۵-۲: سوختن بدون شعله و احتراق شعله‌ور.....                                                   |
| ۱۶ | شکل ۶-۲: روند انتشار سوختن.....                                                                  |
| ۱۷ | شکل ۷-۲: IFEG؛ چهارچوبی برای ارزیابی مهندسی حریق.....                                            |
| ۱۸ | شکل ۸-۲: طراحی منحنی حریق برای سوختن زغال سنگ.....                                               |
| ۱۸ | شکل ۹-۲: منحنی روند کامل حریق.....                                                               |
| ۲۰ | شکل ۱۰-۲: انواع آتش سوزی در معادن.....                                                           |
| ۲۰ | شکل ۱۱-۲: عقب‌زدگی دود در یک کارگاه استخراج.....                                                 |
| ۲۱ | شکل ۱۲-۲: پرده‌های هوایی برای از بین بردن خطر عقب‌زدگی.....                                      |
| ۲۲ | شکل ۱۳-۲: انواع آتش سوزی در معادن زیرزمینی.....                                                  |
| ۲۴ | شکل ۱۴-۲: نمونه‌ای از آتش سوزی در قسمت محرکه نوار نقاله.....                                     |
| ۲۵ | شکل ۱۵-۲: آتش سوزی در طول نوار نقاله.....                                                        |
| ۲۹ | شکل ۱۶-۲: نمونه‌ای از احتراق خودبه خودی.....                                                     |
| ۳۰ | شکل ۱۷-۲: نرخ افت یا افزایش گرما در برابر افزایش حرارت.....                                      |
| ۳۰ | شکل ۱۸-۲: چهار شرط لازم برای احتراق خودبه خودی زغال سنگ.....                                     |
| ۳۱ | شکل ۱۹-۲: نمودار تکامل فرآیند خودسوزی زغال.....                                                  |
| ۳۳ | شکل ۲۰-۲: مناطق خطر احتراق خودبه خودی در جبهه کار طولانی.....                                    |
| ۳۴ | شکل ۲۱-۲: مناطق خطر احتراق خودبه خودی در پهنه‌های استخراجی مداوم.....                            |
| ۳۵ | شکل ۲۲-۲: مناطق احتمال احتراق خودبه خودی در پهنه‌های به هم پیوسته.....                           |
| ۴۴ | شکل ۱-۳: طبقه‌بندی روش‌های ارزیابی خطر حریق در معادن زغال سنگ زیرزمینی.....                      |
| ۴۷ | شکل ۲-۳: تشخیص ویدیویی آتش‌گیری زغال سنگ.....                                                    |
| ۵۱ | شکل ۳-۳: نحوه‌ی تزریق نیتروژن مایع به زیرسطح.....                                                |
| ۵۲ | شکل ۴-۳: تزریق آب به دپوی باطله با روش تزریق مستقیم و اسپری آب.....                              |
| ۵۴ | شکل ۵-۳: نمودار طرح کلی از سیستم کف سه‌فازی برای خاموش کردن حریق در معادن زغال سنگ زیرزمینی..... |
| ۵۶ | شکل ۶-۳: طرح شماتیکی از تعادل دینامیکی فشار در یک اتاق و پایه.....                               |
| ۵۸ | شکل ۷-۳: نمونه‌ای از سیستم مه‌پاشی برای مهار حریق.....                                           |
| ۶۴ | شکل ۱-۴: مثلث کوارد.....                                                                         |

- شکل ۴-۲: عوامل مؤثر در آتش‌سوزی باز..... ۶۵
- شکل ۴-۳: عوامل ذاتی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ..... ۶۶
- شکل ۴-۴: افزایش زغال‌شدگی طی فشار، گرما و زمان..... ۶۷
- شکل ۴-۵: عوامل زمین‌شناسی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ..... ۷۲
- شکل ۴-۶: عوامل معدنکاری مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ..... ۷۵
- شکل ۵-۱: عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ..... ۸۴
- شکل ۵-۲: عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی در معادن زغال‌سنگ..... ۸۴
- شکل ۵-۳: عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی در معادن زغال‌سنگ..... ۸۵
- شکل ۵-۴: الگوریتم اجرای روش دلفی فازی..... ۸۷
- شکل ۵-۵: تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی..... ۸۸
- شکل ۵-۶: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به انواع آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ با توجه به نظرات متخصصان..... ۹۷
- شکل ۵-۷: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظر متخصصان..... ۹۸
- شکل ۵-۸: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری با توجه به نظر متخصصان..... ۹۹
- شکل ۵-۹: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل ذاتی با توجه به نظر متخصصان..... ۹۹
- شکل ۵-۱۰: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل زمین‌شناسی با توجه به نظر متخصصان..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۱: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل معدنکاری با توجه به نظر متخصصان..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱۲: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی انواع آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۳: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۴: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای اصلی مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۵: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای ذاتی..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۶: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای زمین‌شناسی..... ۱۱۶
- شکل ۵-۱۷: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای معدنکاری..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۸: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۹: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۲۰: مفهوم تفکر سیستمی..... ۱۲۴
- شکل ۵-۲۱: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها..... ۱۲۴
- شکل ۵-۲۲: مفهوم ماتریس اندرکنش در RES برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۳: روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش در روش RES..... ۱۲۷
- شکل ۵-۲۴: شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش..... ۱۲۹
- شکل ۵-۲۵: نمودار علت-اثر تعمیم داده شده به N پارامتر..... ۱۳۰
- شکل ۵-۲۶: نمودار علت-اثر برای پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز..... ۱۳۳
- شکل ۵-۲۷: هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز..... ۱۳۴
- شکل ۵-۲۸: وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز با روش سیستم مهندسی سنگ..... ۱۳۵
- شکل ۵-۲۹: نمودار علت-اثر برای پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ..... ۱۳۷
- شکل ۵-۳۰: هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ..... ۱۳۸
- شکل ۵-۳۱: وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ با روش سیستم مهندسی سنگ..... ۱۳۹

شكل ٥-٣٢: موقعيت منطقة مورد مطالعه..... ١٥٠

# فهرست جدول‌ها

## عنوان

## صفحه

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۱-۳: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه.....                  | ۳۹  |
| جدول ۲-۳: برتری حس بویایی در مقایسه با سنسورهای CO.....                                            | ۴۵  |
| جدول ۳-۳: حدود قابلیت انفجار گازهای ناشی از حریق.....                                              | ۴۹  |
| جدول ۱-۵: طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها.....                                       | ۹۱  |
| جدول ۲-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی..... | ۹۱  |
| جدول ۳-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی..... | ۹۲  |
| جدول ۴-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی..... | ۹۲  |
| جدول ۵-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی..... | ۹۳  |
| جدول ۶-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی..... | ۹۳  |
| جدول ۷-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی..... | ۹۴  |
| جدول ۸-۵: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی.....                            | ۹۴  |
| جدول ۹-۵: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز.....                                  | ۹۵  |
| جدول ۱۰-۵: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل اصلی مؤثر بر خودسوزی.....                                 | ۹۵  |
| جدول ۱۱-۵: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل ذاتی.....                                                 | ۹۶  |
| جدول ۱۲-۵: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل زمین‌شناسی.....                                           | ۹۶  |
| جدول ۱۳-۵: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل معدنکاری.....                                             | ۹۷  |
| جدول ۱۴-۵: قابلیت اعتماد انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان.....     | ۱۰۵ |
| جدول ۱۵-۵: قابلیت اعتماد عوامل مؤثر در آتش‌سوزی باز با توجه به نظر متخصصان.....                    | ۱۰۵ |
| جدول ۱۶-۵: قابلیت اعتماد عوامل اصلی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان.....           | ۱۰۵ |
| جدول ۱۷-۵: قابلیت اعتماد عوامل ذاتی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان.....           | ۱۰۶ |
| جدول ۱۸-۵: قابلیت اعتماد عوامل زمین‌شناسی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان.....     | ۱۰۶ |
| جدول ۱۹-۵: قابلیت اعتماد عوامل معدنکاری مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان.....       | ۱۰۶ |
| جدول ۲۰-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.....         | ۱۰۷ |
| جدول ۲۱-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.....            | ۱۰۷ |
| جدول ۲۲-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز.....                        | ۱۰۹ |
| جدول ۲۳-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز.....                      | ۱۱۰ |
| جدول ۲۴-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۳ پارامتر اصلی.....                                    | ۱۱۱ |
| جدول ۲۵-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی پارامترهای اصلی.....                                      | ۱۱۲ |
| جدول ۲۶-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۹ پارامتر ذاتی.....                                    | ۱۱۳ |
| جدول ۲۷-۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی پارامترهای ذاتی.....                                      | ۱۱۴ |
| جدول ۲۸-۵: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۷ پارامتر زمین‌شناسی.....                              | ۱۱۵ |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۵-۲۹: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی پارامترهای زمین‌شناسی.....                        | ۱۱۶ |
| جدول ۵-۳۰: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۹ پارامتر معدنکاری.....                        | ۱۱۷ |
| جدول ۵-۳۱: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی پارامترهای معدنکاری.....                          | ۱۱۸ |
| جدول ۵-۳۲: وزن نهایی غیرفازی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز.....                          | ۱۱۹ |
| جدول ۵-۳۳: وزن نهایی غیرفازی پارامترهای مؤثر بر خوسوزی در معادن زغال‌سنگ.....              | ۱۲۰ |
| جدول ۵-۳۴: کدهای انتخابی در روش کدگذاری نیمه عددی خبره.....                                | ۱۲۶ |
| جدول ۵-۳۵: شمای کلی از یک جدول حاصله از یک ماتریس اندرکنش.....                             | ۱۳۱ |
| جدول ۵-۳۶: ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز.....            | ۱۳۲ |
| جدول ۵-۳۷: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز با روش سیستم‌های مهندسی سنگ.....     | ۱۳۴ |
| جدول ۵-۳۸: ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ.....        | ۱۳۶ |
| جدول ۵-۳۹: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ با روش سیستم‌های مهندسی سنگ..... | ۱۳۸ |
| جدول ۵-۴۰: وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر حریق.....                                          | ۱۴۱ |
| جدول ۵-۴۱: وزن نرمال شده پارامترهای مورد استفاده در سیستم طبقه‌بندی.....                   | ۱۴۲ |
| جدول ۵-۴۲: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها.....                            | ۱۴۳ |
| جدول ۵-۴۳: بازه‌بندی اندیس پتانسیل حریق در معدن.....                                       | ۱۴۹ |
| جدول ۵-۴۴: محاسبه اندیس پتانسیل حریق معادن برای مناطق مجموعه البرز شرقی.....               | ۱۵۱ |
| جدول ۵-۴۵: رده‌بندی نهایی به دست آمده برای مناطق مجموعه البرز شرقی.....                    | ۱۵۲ |

# فصل ۱: کلیات تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

فعالیت‌های معدنی در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی در قیاس با سایر فعالیت‌های صنعتی دارای تفاوت‌هایی است که عمدتاً ناشی از ماهیت و خصوصیات حاکم بر کار در معادن می‌باشد. وجود تجهیزات خاص مورد استفاده در کارگاه‌های استخراج و دیگر محیط‌های کاری در این معادن از یک‌سو و نیاز به سیستم‌های تهویه، بارگیری، باربری و شرایط پایدارسازی و تحکیم ویژه در این مکان‌ها از سوی دیگر، شرایط کاری متفاوتی را نسبت به سایر فعالیت‌های کاری ایجاد می‌کند.

این مسئله حتی در معادن زغال‌سنگ به دلیل سایر محدودیت‌های عملیاتی، مانند وجود گاز متان در لایه‌های زغالی و به تبع آن احتمال انفجار گاز متان، تجمع گرد زغال در هوای معدن و پتانسیل انفجار ناشی از آن، سفره‌های آب زیرزمینی، نور ناکافی محیط و شیب زیاد لایه‌های زغالی شرایط به مراتب حادث‌تری را از بعد ایمنی در عملیات استخراج و پیش‌روی معدنکاران قرار می‌دهد (Rmlu, 2007).

یکی از خطرات مهمی که در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ باعث مرگ و خسارت‌های جبران ناپذیری می‌شود خطر حریق در این معادن است. بنابراین لازم است عوامل مؤثر بر حریق به طور دقیق شناسایی شوند و راه‌های پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل حریق مورد ارزیابی قرار گیرد؛ لذا در این پایان‌نامه به بررسی خطر حریق در معادن زیرزمینی به ویژه در معادن زغال‌سنگ پرداخته شده است.

در این فصل کلیاتی در مورد حریق، هدف از انجام این مطالعه و ضرورت انجام تحقیق بیان شده است؛ در انتها نیز فرآیندهای انجام شده در فصل‌های مختلف این تحقیق بیان خواهد شد.

## ۱-۲- بیان مسأله

آتش<sup>۱</sup> عبارت است از یک سری عملیات شیمیایی و اکسیداسیون سریع حرارت‌زای مواد قابل اشتعال<sup>۲</sup> (واکنش‌های گرمازا<sup>۳</sup>) که معمولاً به صورت گرما و شعله ظاهر می‌شود. وقوع هر آتش نیاز به زمینه‌های فیزیکی و شیمیایی محل وقوع دارد. اصولاً عوامل مؤثر در آتش‌سوزی متعدد می‌باشد ولی برای ایجاد آتش وجود ۳ عامل اکسیژن، حرارت و مواد قابل اشتعال که به مثلث آتش معروف است ضروری است و در صورت حذف حداقل یکی از آن‌ها ادامه حریق ممکن نیست (گل‌محمدی، ۱۳۹۱).

برای شروع هر آتش‌سوزی لزوماً نیاز به درجه حرارت کافی می‌باشد، حتی در مواقعی که حریق شروع شده باشد، اگر درجه حرارت کاهش یابد دامنه حریق محدود و بالاخره خاموش می‌شود. حرارت لازم در مطالعه آتش‌گیری مواد با سه اصطلاح تعریف می‌شود که عبارتند از: (گل‌محمدی، ۱۳۹۱):

الف: نقطه شعله‌زنی<sup>۴</sup>

ب: نقطه آتش‌گیری<sup>۵</sup>

ج: درجه اشتعال<sup>۶</sup>

**نقطه شعله‌زنی** درجه حرارتی است که در آن درجه حرارت، یک ماده سوختنی مایع به اندازه کافی بخار می‌شود و به محض نزدیک شدن شعله یا جرقه به آن باعث شعله‌ور شدن و شروع حریق می‌شود. فشار هوا در تعیین نقطه شعله‌زنی مؤثر است و در فشارهای کم‌تر، نقطه شعله‌زنی پایین‌تر است.

<sup>1</sup> - Fire

<sup>2</sup> - Flammable Material

<sup>3</sup> - Exothermic Reaction

<sup>4</sup> - Flash Point

<sup>5</sup> - Fire Point

<sup>6</sup> - Ignition Temperature (IT)

نقطه آتش‌گیری بیان‌کننده حداقل دمای مورد نیاز برای شروع حریق در یک مخلوط مایع- بخار در فضای مظروف می‌باشد که در نزدیکی سطح مایع توسط یک شعله محرک باعث آتش‌گیری آن برای مدت حداقل ۵ ثانیه می‌شود ولی الزاماً به معنای ادامه حریق نیست.

**درجه اشتعال (درجه خودبه‌خود سوزی)<sup>۱</sup>** کم‌ترین درجه حرارت مورد نیاز برای ادامه احتراق ماده سوختنی یا آتش‌گیری آن بدون محرک خارجی می‌باشد.

آتش‌سوزی یکی از حوادث خطرناکی است که نه تنها در معادن بلکه در هر جای دیگر سبب ایجاد خسارت‌های فراوان مالی و تلفات جانی بسیار می‌شود. معمولاً در هنگام وقوع حریق کسانی که در صحنه حضور دارند با مشاهده شعله‌های آتش و حرارت زیاد آن دچار هراس و آشفتگی می‌شوند و به همین خاطر امکان انجام عکس‌العمل مناسب از آن‌ها سلب می‌شود که این موضوع خود در گسترش دامنه آتش و بالا رفتن میزان ضایعات تأثیر می‌گذارد.

آتش‌سوزی‌های معدنی جریان کار عادی روزانه را در معادن بر هم زده و خسارت‌های سنگین و حوادث ناگواری را به وجود می‌آورند. آتش‌سوزی در معدنی که دارای گاز متان و گرد زغال هستند، ممکن است موجب انفجار آن‌ها شود.

خطر بزرگی که آتش‌سوزی‌های معدنی دربردارند عبارتند از مسمومیت افراد در اثر تنفس گاز منواکسید کربن ناشی از سوختن زغال، سوختن داربست‌های چوبی، سوختن سایر مواد سوختنی موجود در معدن و غیره. اگر یک دست قاب چوبی با سطح مقطع ۴ تا ۵ مترمربع آتش بگیرد به طول ۲ کیلومتر فضای کارگاه‌ها و گالری‌های زیرزمینی را مسموم و خفه‌کننده می‌سازد و به همین خاطر آتش‌سوزی در معدن عموماً با مسمومیت و مرگ کارگرانی که در محل مشغول کار هستند همراه است (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

تجاری که در اثر عوامل و خسارت‌های اقتصادی ناشی از بروز آتش‌سوزی کسب شده است نشان می‌دهد که هزینه‌ی وسایل معدنی پیش‌گیرنده آتش بسیار کم‌تر از خسارت‌هایی است که در اثر آتش‌سوزی به وجود

<sup>۱</sup> - Auto ignition Temperature

می‌آید. به لحاظ اهمیت موضوع حریق در معادن و تأثیری که در ایمنی معدن و سلامت افراد در کارگاه‌های زیرزمینی بر جای می‌گذارد لازم است شناخت دقیقی از مسائل مربوط به حریق به دست آید.

### ۱-۳- ضرورت تحقیق

در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مانند سایر محیط‌های کاری عوامل خطرزای متفاوتی وجود دارد که هر یک از این عوامل باعث بروز مشکلات خاص خود می‌شوند، شناسایی این عوامل خطرزا در محیط کاری معادن زغال‌سنگ و شیوه مقابله با آن‌ها یکی از ضرورت‌های مهم به شمار می‌آید.

تاکنون این امکان به وجود نیامده است که بتوان معدن‌کاری را به‌طور کامل ایمن ساخت ولی درعین‌حال باید نهایت تلاش به عمل آید تا با استفاده از دانش فنی و فناوری نوین و سایر امکانات موجود خطرات را به حداقل رسانید (صفاری، ۱۳۹۲).

معدن زیرزمینی زغال‌سنگ به‌صورت شبکه‌ای از تونل‌های زیرزمینی است که به‌صورت دنبال لایه و یا موازی لایه حفر می‌شوند و توسط شبکه‌های دیگری از حفاریات زیرزمینی جهت ایجاد کارگاه‌های استخراج توسعه می‌یابند. خصوصیات و ماهیت کار در معادن زیرزمینی و به‌خصوص در معادن زغال‌سنگ از یک‌سو و مشکلات غیرمترقبه ناشی از کار در این معادن از سوی دیگر ایجاد حریق را در این معادن ممکن می‌سازد. وجود سیستم‌های تهویه اصلی و موضعی جهت ترقیق آلودگی هوای محیط این معادن (انواع گاز و گردوغبار) و نیاز به اکسیژن‌رسانی به کارکنان و جهت جریان هوا در حفاریات زیرزمینی و مشکلاتی که در اثر حریق در معادن زیرزمینی ایجاد می‌شود، تصمیم‌گیری و فرار را در هنگام آتش‌سوزی مشکل‌تر می‌سازد.

حریق معدنی ناشی از حرارت یک عامل خارجی یا داخلی، یکی از خطرهای جدی در معادن زغال‌سنگ به حساب می‌آید. عملکرد ترمودینامیکی دود ناشی از حریق که در اثر فشار ترمودینامیکی هوا حاصل می‌شود، مقدار و جهت جریان هوا را در سیستم‌های تهویه تغییر می‌دهد و در نتیجه باعث بی‌نظمی و آشفتگی جریان هوا در سیستم‌های تهویه معدن می‌شود. افزایش غلظت گاز در مناطق مختلف می‌تواند مشکلات حادی را همچون

تغییر میزان تراکم گاز در مسیرها و توسعه سطح مثلث انفجار گازی به علت حرارت زیاد جریان‌های دود که خیلی آسان سبب انفجار گاز متان در معادن زغال‌سنگ می‌شود را ایجاد کند. سازماندهی، تصمیم‌گیری و شیوه واکنش در شرایط اضطراری در هنگام بروز حریق در معادن زیرزمینی یکی از مهمترین ارکان موفقیت در حل بحران به حساب می‌آید (Hou et al., 2009).

ارزیابی خطر حریق یک نیاز اصلی برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت حریق برای معادن زغالی است؛ لذا بهره‌گیری از روش‌های مؤثری که موجبات پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل خطر حریق در معادن زغال‌سنگ را فراهم می‌آورد امری ضروری است.

برای مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ، متخصصان بسیاری با استفاده از پارامترهای مختلف، شرایط معادن زغال‌سنگ را بررسی کردند. تحقیقات و مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که روش‌های ارائه شده برای ارزیابی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ تمامی پارامترهای مؤثر بر حریق و وزن این پارامترها را مورد توجه قرار نداده‌اند. همچنین نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه واحد برای ارزیابی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ نمی‌انجامد.

در تحقیقات انجام شده پارامترهای مؤثر بر حریق به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. این در حالی است که حریق به پارامترهای زیادی وابسته است و این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ با هم می‌باشند؛ بنابراین دستیابی به یک روش که بتوان با استفاده از آن خطر حریق را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد از اهداف کلیدی محققان بخش ایمنی معادن زغال‌سنگ به شمار می‌آید.

## ۱-۴- اهداف تحقیق

با توجه به این که در مطالعات و کارهای انجام شده پیشین پارامترهای مؤثر بر حریق به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند و به وزن و درجه اهمیت پارامترهای مؤثر بر حریق توجهی نشده است. هدف از انجام و ارائه این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- کلیه پارامترهای مؤثر بر انواع حریق در معادن زیرزمینی زغال سنگ شناسایی شود و میزان اهمیت این پارامترها از طریق دو روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و سیستم‌های مهندسی سنگ مورد ارزیابی قرار گیرند.

- برای ارزیابی خطر حریق در معادن زیرزمینی زغال سنگ سیستم طبقه‌بندی مهندسی ارائه شده است.

## ۱-۵- ساختار تحقیق

این پایان نامه در ۶ فصل تنظیم شده است، که مطابق شکل ۱-۱ می‌باشد:

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

در فصل دوم این تحقیق تئوری حریق و انواع حریق در معادن زیرزمینی آورده شده است.

در فصل سوم با عنوان بررسی سابقه علمی موضوع، تاریخچه‌ای مختصر از کارهای صورت گرفته در این

زمینه، مهم‌ترین روش‌های پیش‌بینی و کنترل حریق در معادن زغال سنگ آورده شده است.

در فصل چهارم تأثیر پارامترهای مختلف بر انواع حریق در معادن زیرزمینی زغال سنگ مورد بررسی قرار

گرفته است.

در فصل پنجم، برای وزن‌دهی به پارامترهای مؤثر بر حریق از دو روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و

سیستم مهندسی سنگ استفاده شد. ابتدا کلیات این دو روش مورد بررسی قرار گرفتند، سپس با استفاده از این

دو روش و نظرسنجی‌های صورت گرفته از متخصصان در زمینه صنعت معدن پارامترهای کلیدی و مؤثر بر حریق

شناسایی شدند و سیستم طبقه‌بندی جدیدی برای ارزیابی خطر حریق در معادن زغال سنگ ارائه شده است. در

پایان به منظور اعتبارسنجی روش ارائه شده، مطالعه موردی در معادن شرکت البرز شرقی انجام شده است

در فصل ششم، نتایج حاصل از این تحقیق و نیز پیشنهادهایی برای مطالعات آینده ارائه شده است



شکل ۱-۱: ساختار کلی تحقیق

## فصل ۲: حریت در معادن

## ۲-۱- مقدمه

علی رغم افزایش منابع تجدید پذیر انرژی فسیلی، هنوز هم معادن زغال سنگ نقش عمده‌ای در تأمین انرژی دارد. با ای حال آتش‌سوزی‌های زیرزمینی به طور گسترده صنعت معدن زغال سنگ را تهدید می‌کند به ویژه برای معادن زغال سنگی با حجم بالایی از گازهای قابل احتراق که باعث انفجار و حریق در معادن زغال سنگ می‌شود (Zhou & Ma, 2013).

یکی از جدی‌ترین خطراتی که در یک معدن زیرزمینی وجود دارد، خطر حریق در این معادن می‌باشد، میزان خسارت ناشی از حریق در معادن زیرزمینی وابسته به ماهیت و مقدار مواد قابل اشتعال، آرایش سیستم تهویه، مدت زمان حریق، میزان گسترش محصولات حریق، محل احتراق و زمان پاسخ به حریق می‌باشد (Gillies & Wu, 2004).

آتش‌سوزی به مدت طولانی در معادن زیرزمینی زغال سنگ به یک نگرانی مهم و جدی در سراسر جهان تبدیل شده است. آتش‌سوزی در معادن گاز و حرارت زیادی تولید می‌کند و می‌تواند منجر به مرگ، توقف تولید و از دست دادن تجهیزات و در نهایت موجب تعطیلی معدن می‌شود (Zhou & Luo, 2011).

آتش‌سوزی‌های زیرزمینی و زیرسطحی در رسوبات زغال سنگ، طولانی‌ترین نوع آتش‌سوزی‌ها هستند که اگر به طور مداوم ادامه یابد خسارت‌های قابل توجه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را در پی خواهد داشت (Stracher & Taylor, 2004).

## ۲-۲- تئوری‌های حریق

نظریات مختلفی در مورد فرآیند سوختن وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

(۱) مثلث حریق

(۲) هرم حریق

(۳) چرخه‌ی بقاء حریق

از بین این سه تئوری، اولین تئوری جزء قدیمی‌ترین و شناخته شده‌ترین نظریه‌ها بوده و سوختن بدون شعله را توضیح می‌دهد، دومین تئوری بر شیمی حریق و ارتباط آن با سوختن شعله‌دار را مربوط بوده و تئوری سوم، ناشناخته‌ترین تئوری و در واقع بسط مثلث حریق است که به جنبه‌های فیزیکی مرتبط با سوختن شعله‌دار می‌پردازد (جهانگیری، ۱۳۹۱).

### ۲-۲-۱- مثلث حریق

این نظریه که قدیمی‌ترین تئوری است هم‌چنان معتبر است و به صورت ساده سه نیاز اساسی و لازم برای حریق را که شامل سوخت، حرارت و اکسیژن است را توضیح می‌دهد. مطابق شکل ۲-۱ چنانچه این سه عامل در کنار یکدیگر قرار بگیرند مثلثی پدید می‌آید که آن را مثلث حریق گویند.

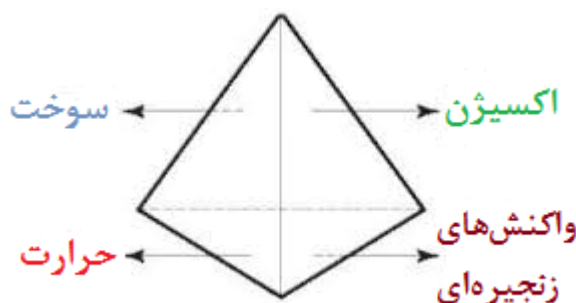


شکل ۲-۱: مثلث حریق (Rein, 2009)

براساس این تئوری هرگاه یکی از اجزای مثلث وجود نداشته باشد حریق اتفاق نمی‌افتد؛ البته این جمله امروزه چندان صحیح نیست زیرا بدون حضور اکسیژن و بدون وجود حرارت که فقط شکلی از انرژی است می‌توان به حریق دست یافت؛ لذا امروزه اضلاع مثلث حریق به صورت سوخت، انرژی و عامل اکسیدکننده تغییر یافته است (جهانگیری، ۱۳۹۱).

## ۲-۲-۲- هرم حریق

اساس این نظریه بر واکنش رادیکال‌ها استوار است. تئوری هرم حریق، دارای وجه چهارمی به نام واکنش زنجیره‌ای سوختن بوده و سه وجه دیگر آن را همان اضلاع مثلث حریق تشکیل می‌دهند. هرم حریق در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

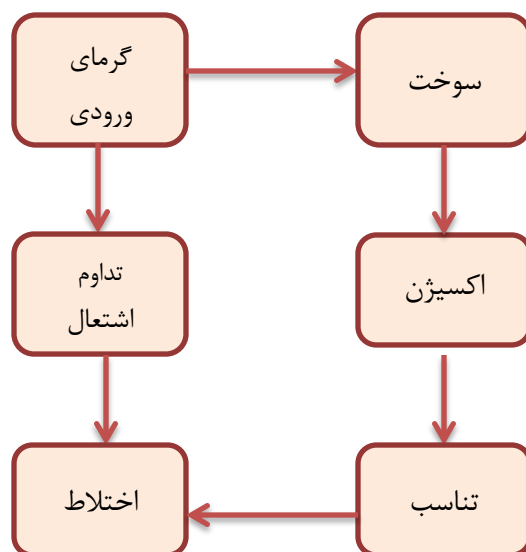


شکل ۲-۲: هرم حریق (ابراهیمی، ۱۳۷۹)

## ۲-۲-۳- چرخه بقاء حریق

این نظریه که به وسیله‌ی داوسون پاول<sup>۱</sup> ارائه شده است، فرآیند احتراق را به ۶ بخش که در شکل ۳-۲ آورده شده است تقسیم‌بندی می‌کند. تئوری چرخه بقاء حریق، مثلث حریق را بسط می‌دهد. مثلث حریق بیان می‌کند که اگر سوخت، اکسیدکننده و انرژی به نسبت صحیحی گرد هم آیند، حریق به وجود خواهد آمد و نظریه چرخه بقاء حریق مفاهیم نقطه شعله‌زنی، درجه آتش‌گیری (گرمای ورودی) و حدود اشتعال‌پذیری (اختلاط) را بدان می‌افزاید (جهانگیری، ۱۳۹۱).

<sup>۱</sup> - Dawson Powell

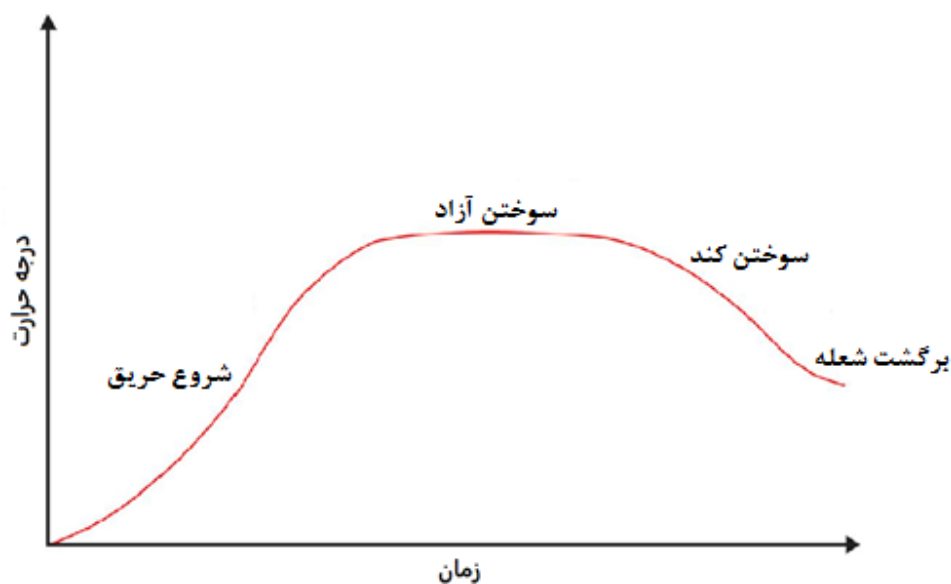


شکل ۲-۳: چرخه بقای حریق

## ۲-۳- فازهای حریق

مطابق شکل ۲-۴ حریق شامل ۴ فاز است، سه فاز اول در همه حریق‌ها وجود دارد ولی فاز آخر الزاماً در

تمام حریق‌ها وجود ندارد.



شکل ۲-۴: فازهای حریق (گل محمدی، ۱۳۹۱)

فازهای حریق عبارتند از (Stolard & Abrahmas, 1999):

### الف - فاز اول (شروع حریق)

در این مرحله، اکسیژن کافی در دسترس نمی‌باشد و بیش‌ترین محصولات آن دی‌اکسیدکربن و مونواکسید کربن است. حرارت شعله در این مرحله حدود هزار درجه‌ی فارنهایت می‌باشد. گسترش حریق در این مرحله تصاعدی بوده و مدت زمان رسیدن به اوج حرارت کوتاه و کم‌تر از نیم‌ساعت است.

### ب - فاز دوم (سوختن آزاد)

در این مرحله، علاوه بر هوای داخل محوطه‌ی حریق جریان هوای بیرون نیز به دلیل اختلاف حرارت به داخل آتش کشیده می‌شود و همین هوا به دلیل گرم شدن باعث حریق می‌شود. در این فاز به تدریج درصد اکسیژن رو به کاهش رفته و به حدی می‌رسد که حریق بدون شعله می‌شود. تداوم این فاز وابسته به وسعت فضا و دسترسی به هوا و سوخت می‌باشد.

### ج - فاز سوم (سوختن کند)

در این مرحله حریق فاقد شعله است. وسعت حریق در این مرحله محدود شده و مراکز حریق تبدیل به نقاط منفصل می‌شود. نکته اساسی در این فاز تراکم و فشار زیاد گازها می‌باشد. در پایان این مرحله به تدریج مواد قابل احتراق به زغال یا خاکستر تبدیل شده و حریق نیز به تدریج سرد می‌شود.

### د - فاز چهارم (برگشت شعله)

این فاز الزاماً در همه حریق‌ها وجود ندارد ولی اگر تراکم گازهای قابل احتراق در هوا بالا باشد به دلیل اختلاط با هوا مجدداً آتش گرفته و باعث برگشت شعله می‌شود که لزوماً تداوم زیادی نخواهد داشت.

## ۲-۴- تفاوت بین سوختن و حریق

سوختن، احتراق سوخت جامد بدون انتشار شعله در درجه حرارت پایین است (Ohlemiller, 2002). تفاوت اساسی میان سوختن و احتراق شعله‌ور، واکنش اکسیداسیون و میزان حرارت آزاد شده می‌باشد. شکل ۲-۵ دو نوع سوختن بدون شعله و احتراق شعله‌ور را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: سوختن بدون شعله و احتراق شعله‌ور (Rein, 2009)

در مقایسه با احتراق شعله‌ور، واکنش سوختن درجه حرارت و گرمای کمتری تولید می‌کند و نرخ گسترش کمتری دارد. به عنوان مثال در شرایط محیطی در واکنش سوختن میزان دمای تولیدی ۵۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان گرمای تولید شده ۶-۱۲ کیلوژول بر گرم است. در حالی که در واکنش احتراق میزان دمای تولیدی ۱۵۰۰-۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان گرمای تولید شده ۱۶-۳۰ کیلوژول بر گرم است (Rein, 2009). در دمای پایین، سوختن یک واکنش اکسیداسیون ناقص است که در اثر آن گازهای سمی و محرک و ذرات معلق تولید می‌شود. نسبت دی‌اکسیدکربن به مونواکسیدکربن در واکنش سوختن ۱ است در حالی که در واکنش احتراق این نسبت حدوداً ۱۰ می‌باشد (Purser, 2002 ; Rein et al., 2009).

گذر از فرآیند سوختن به احتراق و رسیدن آتش سوزی به سطح آزاد یکی از نگرانی‌ها و مسائل مهم در معادن زیرزمینی زغال سنگ می‌باشد. این انتقال، یک احتراق خودبه‌خودی گاز است که واکنش سوختن را پشتیبانی می‌کند و گرمای لازم را برای انجام واکنش مهیا می‌سازد. این انتقال زمانی اتفاق می‌افتد که در داخل منافذ شرایط بحرانی ایجاد شود، این شرایط عبارتند از: اشتعال مخلوط گاز در داخل خلل و فرج‌ها و انتشار بیش از حد گرمای منتشر شده توسط واکنش‌های اکسیداسیون. افزایش سطح اکسیژن و جریان هوا به شدت می‌تواند اثر این انتقال را افزایش دهد (Rein, 2009).

روند انتشار سوختن از طریق مواد داخلی قابل احتراق را با توجه به جریان مواد اکسیدکننده می‌توان در دو

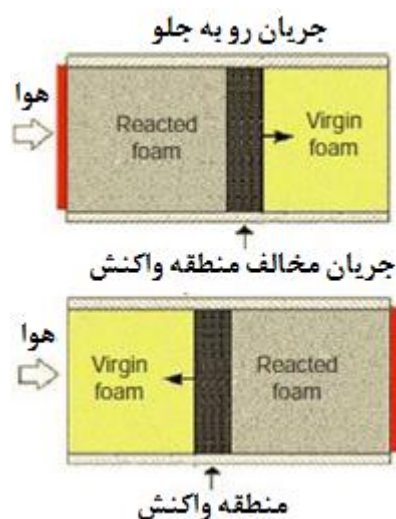
حالت بررسی کرد:

- انتشار مخالف

- انتشار رو به جلو

در سوختن مخالف، جهت انتشار واکنش در خلاف جهت جریان اکسیدکننده و در سوختن رو به جلو جهت

انتشار در همان جهت جریان اکسیدکننده می‌باشد که در شکل ۲-۶ قابل مشاهده است.

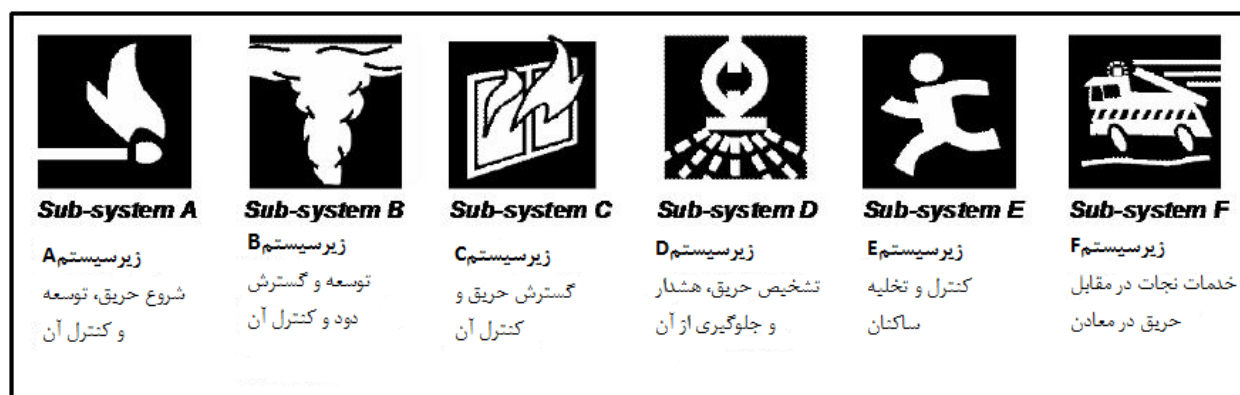


شکل ۲-۶: روند انتشار سوختن (Rein et al., 2006)

این دو حالت با استفاده از مکانیزم‌های انتقال جرم و گرما و واکنش‌های شیمیایی از هم متمایز می‌شوند. در انتشار رو به جلو، اکسیژن از طریق منافذ موجود، در زمان سوختن واکنش ایجاد می‌کند و سپس از طریق سوخت مورد استفاده جریان گاز اکسیژن ادامه می‌یابد، حرارت به سمت سوخت پیش‌روی می‌کند و در نتیجه گرمای زیادی تولید می‌شود. در انتشار مخالف، جریان اکسیژن در منطقه سوختن با سوخت واکنش می‌دهد و به سمت سوخت سوخته در پشت جبهه کار می‌رود و گرمای پیش از سوخت را کاهش می‌دهد (Rein et al., 2006).

## ۲-۵- چهارچوبی برای تجزیه و تحلیل حریق در معادن زغال سنگ

در معادن زغال سنگ برای تخلیه افراد تحت شرایط اضطراری از سیستم<sup>۱</sup> IFEG استفاده شده است. این سیستم شامل ۴ زیرسیستم مطابق شکل ۲-۷ است (Mendham et al., 2012).



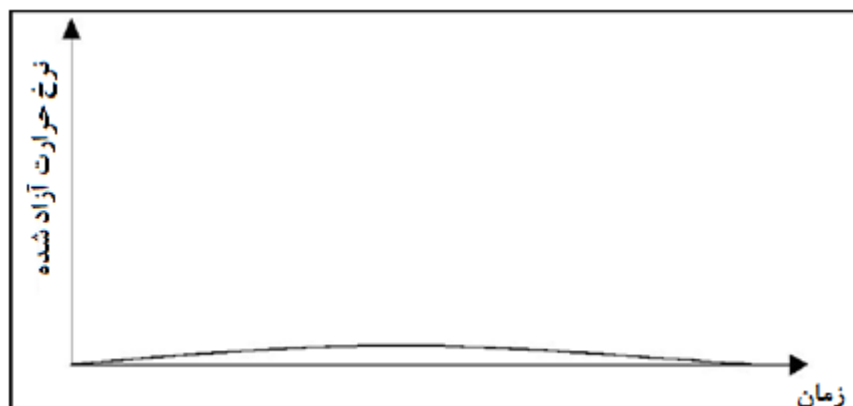
شکل ۲-۷: IFEG؛ چهارچوبی برای ارزیابی مهندسی حریق (ABCB, 2005)

## ۲-۵-۱- زیر سیستم A (شروع حریق، توسعه و کنترل آن)

اولین گام مهم در تجزیه و تحلیل توسعه حریق در معدن، طراحی حریق است. طرح حریق؛ شکل حریق، خصوصیات حریق از نظر رشد، فروپاشی آن و سرعت حرارت آزاد شده در طول زمان را نشان می‌دهد. برای تشخیص سریع حریق می‌بایستی آتش‌سوزی را در مراحل اولیه رشد خود تشخیص داد و کنترل کرد.

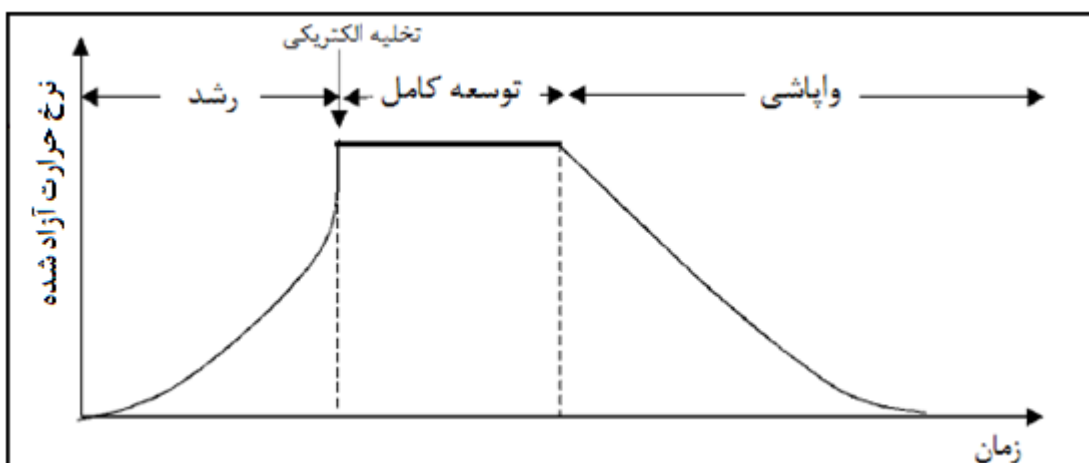
<sup>1</sup> - International Fire Engineering Guidelines

شکل ۸-۲ یک طرح حریق را توصیف می‌کند که ناشی از سوختن سوخت می‌باشد و هرگز به مرحله‌ی اشتعال نمی‌رسد. طبق این نمودار نرخ حرارت آزاد شده در طول زمان کاهش می‌یابد و یا سوخت تبدیل به زغال می‌شود و برای جلوگیری از احتراق، حرارت از سطح برداشته و حذف می‌شود (Mendham et al., 2012).



شکل ۸-۲: طراحی منحنی حریق برای سوختن زغال سنگ (Edwards, 2002)

قوس منحنی در شکل بالا حرارت تجربی زغال سنگ را در آزمون‌های آزمایشی نشان می‌دهد. این منحنی را می‌توان با شکل ۹-۲ مقایسه کرد. این منحنی طرحی از حریق را نشان می‌دهد که به سرعت حرارت افزایش می‌یابد. این نوع حریق بزرگ است و می‌بایستی سریع شناسایی شود. در این نوع آتش‌سوزی میزان مونواکسیدکربن آزاد شده بسیار کم است و توسط سنسورهای گاز مونواکسیدکربن تشخیص داده نمی‌شود.



شکل ۹-۲: منحنی روند کامل حریق (ABCB, 2005)

## ۲-۵-۲- زیر سیستم B (توسعه و گسترش دود و کنترل آن)

در این زیرسیستم تشخیص سریع دود برای جلوگیری از حریق مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای کنترل و برآورد دود در یک معدن می‌توان از نرم افزارهای مدل سازی<sup>۱</sup> CFD استفاده کرد (Mendham et al., 2012).

## ۲-۵-۳- زیر سیستم C (گسترش حریق و کنترل آن)

با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل کمی، از جمله روش درخت رویداد<sup>۲</sup>، روش‌های شبیه‌سازی احتمال و روش مونت کارلو می‌توان نتایج احتمالاتی مربوط به گسترش حریق را بررسی کرد. شناخت تأثیر حریق بر عناصر ساختاری در محل آسیب دیده در معدن برای مدیریت سقوط سقف معدن و در نتیجه حفظ خروجی اضطراری ضروری است. شروع شرایط غیر قابل تحمل از جمله گرما، دود، بخارهای سمی و پتانسیل انفجار به احتمال مساوی عوامل کلیدی برای فرار کارگران و رسیدن به پناهگاه می‌باشد (Mendham et al., 2012).

## ۲-۵-۴- زیر سیستم D (تشخیص حریق، هشدار و جلوگیری از آن)

سیستم IIEFG اساس محکمی برای تجزیه و تحلیل حریق و سیستم‌های جلوگیری از حریق فراهم می‌کند. از سال ۲۰۱۲ سیستم IFEG به عنوان یک روش خاص برای تشخیص حریق در نظر گرفته شد. این زیرسیستم، روش‌های مختلف تشخیص حریق را مورد بررسی قرار می‌دهد (Mendham et al., 2012).

## ۲-۵-۵- زیر سیستم E (کنترل و تخلیه)

این زیرسیستم زمان صرف شده برای حوادثی را که باعث تخلیه معدن می‌شود را تخمین می‌زند. این کار باعث تعیین زمان لازم برای کارکنان معدن برای رسیدن به یک محل امن می‌شود (Mendham et al., 2012).

## ۲-۵-۶- زیر سیستم F (خدمات نجات در معادن)

این زیرسیستم شامل ایجاد مکان‌های ایمن در معادن و بررسی روش‌های کنترل و اطفای حریق است.

<sup>۱</sup> - Computational Fluid Dynamics

<sup>۲</sup> - Event tree analysis

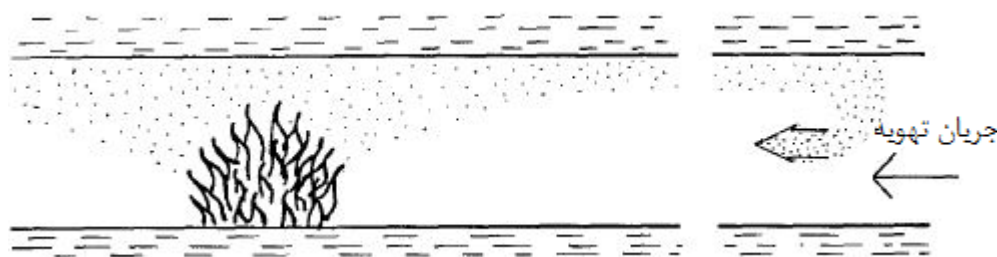
## ۲-۶- انواع آتش‌سوزی در معادن

به طور کلی انواع آتش‌سوزی در معادن در شکل ۲-۱۰ آورده شده است.



شکل ۲-۱۰: انواع آتش‌سوزی در معادن (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲)

مقابله با حریق در معادن زیرزمینی بسیار خطرناک‌تر از مقابله با حریق در تأسیسات سطحی است. افزایش میزان مونواکسید کربن و بخارهای سمی خطرات جدی را ایجاد می‌کند. دود و محصولات احتراق ناشی از آتش‌سوزی در معدن ممکن است در برابر تهویه‌ای که صورت می‌گیرد فاصله قابل توجهی را طی کند که با توجه به گسترش آتش و شیب محل مورد نظر در معدن می‌باشد. افزایش شیب مسیر، به عقب برگرداندن دود کمک می‌کند، این جریان هم‌رفتی که با گسترش آتش ایجاد می‌شود به عقب‌زدگی دود<sup>۱</sup> معروف است و در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. در معادن زیرزمینی با توجه به عقب‌زدگی دود، گازهای سمی ممکن است در یک فاصله نسبتاً طولانی ادامه داشته باشند (Morris & Atkinson, 1987).

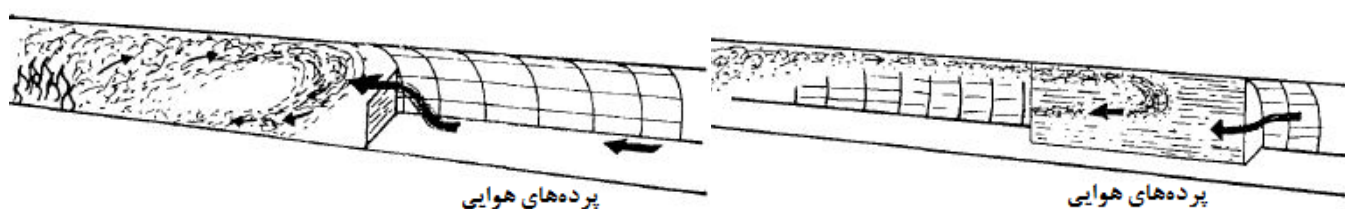


شکل ۲-۱۱: عقب‌زدگی دود در یک کارگاه استخراج (Morris & Atkinson, 1987)

<sup>۱</sup> - Back lush of smoke

خطرات مرتبط با این پدیده عبارت‌اند از (Morris & Atkinson, 1987):

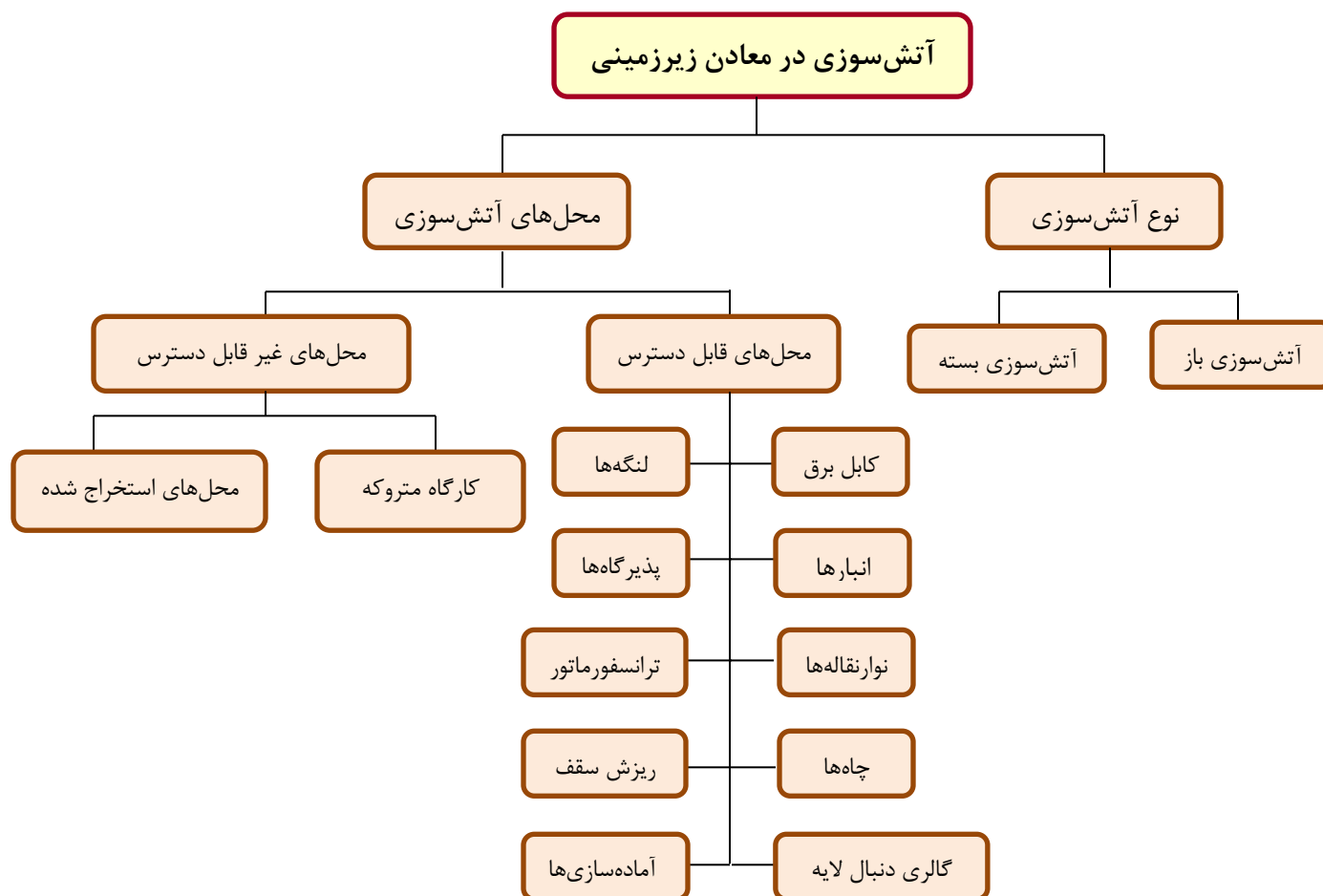
- جریان گرما در نزدیکی سقف و گسترش آن در مواقعی باعث سقوط سقف در اثر سوختن وسایل نگهداری چوبی می‌شود.
  - تولید گازهای قابل اشتعال و در نتیجه افزایش خطر انفجار
  - افزایش مقاومت دود با افزایش سرعت هوای تهویه
  - غیر قابل دسترس ساختن آتش در بخش‌های انتهایی
- برای از بین بردن این خطر می‌توان مطابق شکل ۲-۱۲ سرعت جریان هوا را با محدود کردن آن با پرده‌های هوایی<sup>۱</sup> افزایش داد.



شکل ۲-۱۲: پرده‌های هوایی برای از بین بردن خطر عقب‌زدگی دود (Morris & Atkinson, 1987)

- حریق‌های ایجاد شده در معادن زیرزمینی بر حسب منشأ به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند که در شکل ۲-۱۳ نوع آتش‌سوزی و محل‌های آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی نشان داده شده است.
- الف- آتش‌سوزی باز یا آتش‌سوزی با منابع خارجی
  - ب- آتش‌سوزی بسته
- تفاوت بین این دو نوع آتش‌سوزی علائم ظهور آن‌ها می‌باشد.

<sup>1</sup> - Brattice barriers



شکل ۲-۱۳: انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲)

## ۲-۶-۱- آتش‌سوزی باز

آتش‌سوزی باز عبارت است از سوختن اشیا و لوازم مختلف موجود در معدن از طریق منابع خارجی (منتصر

کوهساری، ۱۳۸۲). انواع مکان‌های آتش‌سوزی‌های باز در معدن عبارت‌اند از:

- آتش‌سوزی در دستگاه نوارنقاله
- آتش‌سوزی در ایستگاه توزیع برق
- آتش‌سوزی وسایل حمل و نقل در دهانه‌ی ورودی گالری و گالری تهویه
- آتش‌سوزی وسایل و تجهیزات کارگاه

- آتش‌سوزی در گالری‌هایی که تهویه کمکی انجام می‌گیرد
- آتش‌سوزی در اماکن بالای چاه‌های قائم<sup>۱</sup> و چاه شیب‌دار<sup>۲</sup>
- آتش‌سوزی در پذیرگاه‌ها و سلول‌های کناری آن‌ها
- آتش‌سوزی در دنبال لایه‌ها<sup>۳</sup>، عمود بر لایه‌ها و سایر حفریات افقی
- آتش‌سوزی در دوپیل‌ها<sup>۴</sup> و دیگر حفریات شیب‌دار

### الف - آتش‌سوزی نوارنقاله

سیستم‌های نوار نقاله داخل معادن یکی از مهم‌ترین مکان‌های ایجاد خطر آتش‌سوزی به شمار می‌روند. سیستم‌های نوار نقاله دارای موتورهای با قدرت زیاد و قطعات متحرک بسیاری می‌باشند که بازرسی و کنترل آن‌ها مشکل است و اغلب دارای حجم زیادی مواد سوختنی مانند روغن‌ها، گریس و تسمه بوده و از طرفی برای حمل و نقل زغال خرد شده به کار می‌روند که ممکن است به آسانی آتش بگیرند (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

بخش عمده و مهم خطر در یک سیستم نقاله در قسمت محرکه می‌باشد، که در اثر موارد زیر به وجود می‌آید:

- بروز اشکال برقی، اصطکاک یا جرقه در طول نقاله
- حرارت اصطکاکی ناشی از خراب شدن غلطک
- مالش و کشیده شدن تسمه روی پایه یا اشیاء دیگر

<sup>1</sup> - Shaft

<sup>2</sup> - Slope

<sup>3</sup> - Drift

<sup>4</sup> - Raise

شکل ۲-۱۴ آتش‌سوزی ایجاد شده در قسمت محرکه سیستم نقاله را نشان می‌دهد، این آتش‌سوزی ناگهانی و شدید است و با حرارت بسیار زیاد همراه می‌باشد، بنابراین فرصت محدودی برای تشخیص اولیه تا توسعه و تبدیل به آتش‌سوزی بزرگ در دسترس خواهد بود (Litton & Peresa, 2012).



شکل ۲-۱۴: نمونه‌ای از آتش‌سوزی در قسمت محرکه نوار نقاله (Litton & Peresa, 2012)

تنها وسیله و روش مناسب برای جلوگیری از چنین آتش‌سوزی‌هایی، نصب وسایل و دستگاه‌هایی است که ترکیبی از کار تشخیص و آتش‌نشانی را در تمام قسمت محرکه سیستم نوار نقاله انجام می‌دهد. این دستگاه شامل سیستم‌های اتوماتیک پاشیدن اسپری و یا دستگاه‌های مختلفی شامل تشخیص‌دهنده آتش با پودر خشک می‌باشد (Litton & Peresa, 2012).

تشخیص وقوع آتش‌سوزی در طول نوار نقاله خیلی مشکل است. زیرا تعداد زیادی منابع بالقوه احتراق وجود دارند و امکان خاموش شدن آتش‌سوزی‌ها برای مدت طولانی قبل از تبدیل آتش‌سوزی باز وجود دارد. بازرسی و کنترل‌های منظم و سیستم‌های نظارت مداوم که بتوانند آتش‌سوزی‌ها را تشخیص دهند و بعضی از انواع آژیر را به صدا درآورند مورد نیاز می‌باشد (Litton & Peresa, 2012).

شکل ۲-۱۵ آتش‌سوزی در طول نوار نقاله را نشان می‌دهد. عملیات اطفای حریق در چنین حالتی فقط شامل استفاده از شیلنگ آب می‌باشد. آتش‌سوزی تسمه نقاله بسیار فراوان است، لذا در زیرزمین می‌بایست تسمه نقاله‌های ضد آتش و ضد استاتیکی به کار برده شود.



شکل ۲-۱۵: آتش‌سوزی در طول نوارنقاله (Litton & Peresa, 2012)

در اثر داغ شدن کوپلینگ، ابری از روغن قابل اشتعال در پیرامون آن جمع می‌شود که کمک زیادی به آتش‌سوزی می‌کند. برای پیش‌گیری از آتش‌سوزی می‌توان کوپلینگ‌های آبی و یا نوع دیگر کوپلینگ را جایگزین کوپلینگ روغن کرد (Litton & Peresa, 2012).

## ب- آتش‌سوزی برقی

متداول‌ترین نوع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی، آتش‌سوزی‌های الکتریکی ناشی از کابل‌ها و یا داخل جعبه‌های تقسیم می‌باشد. اگر قدرت وسایل و دستگاه‌های نصب شده در معادن زغال‌سنگ زیاد باشد، مقدار انرژی آزاد شده نیز به همان میزان بالا بوده و اگر خرابی و یا قطعی پیش آید انرژی زیادی به صورت حرارت و یا جرقه و قوس پخش و منتشر می‌شود (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

آتش‌سوزی‌های برقی ممکن است در کابل‌ها، کلیدها، ترانسفورماتورها و داخل موتورهای ایجاد شود.

خطرات اصلی در ارتباط با آتش‌سوزی‌های برقی عبارت‌اند از:

- سوختگی افراد در اثر شعله‌های ناگهانی
- احتراق مواد عایق کننده، روغن‌ها، پلاستیک‌ها، چوب و زغال‌سنگ
- تولید محصولات تقطیر و گازهای بسیار سمی
- خطرات ناشی از تهویه و یا عملیات معدنکاری به علت کاهش نیروی برق
- احتراق توده‌های انباشته گاز متان و محل‌های خروج گاز

- مرگ در اثر برق گرفتگی

### ج- آتش‌سوزی در بالای چاه‌های عمودی و چاه‌های شیب‌دار

هنگام آتش‌سوزی در چاه‌های عمودی یا دوپل‌ها که به وسیله‌ی آن‌ها هوای تازه برای تهویه‌ی معدن در جریان است، در اولین مرحله لازم است که اقداماتی به منظور ممانعت از انتشار مواد مشتعل کننده به داخل حفریات معدن به عمل آورد، این اقدامات عبارت‌اند از (Hwang & Litton, 1984):

- معکوس کردن جریان هوا

- متوقف کردن بادبزنی‌های اصلی تهویه (چنانچه در هوای داخل معدن گاز متان وجود نداشته باشد)

- بستن درب‌های ضد حریق در دهانه‌ی چاه برای کاهش بازدهی بادبزنی‌ها

- بستن درب‌های ضد حریق در پذیرگاه‌های تحتانی

- کوتاه کردن جریان تهویه

در موقع بروز آتش‌سوزی در چاه‌های عمودی که در مسیر آن هوای آلوده خروجی وجود دارد جهت جریان تهویه‌ای تغییر داده نمی‌شود (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

اطفای حریق در چاه‌های عمودی و دوپل‌ها صرف نظر از این که جهت جریان تهویه به کدام سمت است، از بالا به پایین به وسیله اسپری آب و یا پاشیدن کف انجام می‌شود (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

### د- آتش‌سوزی در پذیرگاه‌ها و سلول‌های کناری آن‌ها

در مواردی که آتش‌سوزی در پذیرگاه، در محلی که دارای هوای ورودی آزاد به معدن است حتماً عمل معکوس کردن جهت جریان هوا انجام شود و یا این که مسیر جریان هوا کوتاه شود. این عمل به منظور جلوگیری از حریق در پذیرگاه تحتانی که دارای هوای خروجی است صورت می‌گیرد، در این حالت جهت جریان نرمال تهویه حفظ شده و فقط از ورود مقدار هوا به داخل معدن کاسته می‌شود.

باید اقداماتی به عمل آورد تا از نفوذ آتش به پشت استحکامات بتونی پذیرگاه تحتانی و سلول‌ها جلوگیری به عمل آید زیرا در این سلول‌ها تجهیزات گران قیمتی از قبیل تأسیسات پمپاژ اصلی، پست‌های ترانسفورماتورهای زیرزمینی، گاراژهای لکوموتیو و نظایر آن نصب شده است؛ لذا باید سعی شود اقداماتی از قبیل بستن درب‌های ضد حریق، ایجاد پرده‌های آبی و غیره به عمل آید تا آتش‌سوزی به این حفریات نفوذ نکند. در هنگام وقوع آتش‌سوزی در گاراژهای شارژ باطری باید جریان هوا به گاراژ را زیاد کرد، شارژ باطری‌ها را متوقف و آن‌ها را از گاراژ خارج کرد. این عمل به منظور جلوگیری از انفجار گاز هیدروژن که از شارژ باطری‌ها حاصل می‌شود انجام می‌گیرد (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

#### ه- آتش‌سوزی در دنبال لایه‌ها، عمود بر لایه‌ها و سایر حفریات افقی

در موقع بروز آتش‌سوزی در حفریاتی که در ابتدای جریان هوای تهویه قرار دارند اقداماتی باید از قبیل معکوس کردن جریان هوای تهویه، کوتاه کردن جریان هوا، کاستن از مقدار هوا به محل حریق و نظایر آن به عمل آید تا از ورود گازهای سمی حاصل از آتش‌سوزی به حفریات دیگری که افراد در آنجا مشغول کار هستند ممانعت به عمل آید. در موقع بروز آتش‌سوزی در دنبال لایه‌ها، در قسمت‌های مختلف باید جریان نرمال تهویه حفظ شود (Hwang & Litton, 1984).

اطفای حریق در حفریات افقی از طرف جریان هوای آزاد انجام می‌شود. در مواردی که اطفای حریق از طرف ورود هوای آزاد مقدور نباشد، اطفای حریق از جهت مخالف یعنی از سمت هوای خروجی انجام می‌شود. البته در این موارد جریان هوای تهویه‌ای معکوس می‌شود. برای جلوگیری از انتشار آتش‌سوزی از جهت مخالف در موقع معکوس کردن بادبزن در جهت مخالف پرده‌های آبی ایجاد می‌شود و همچنین کلیه وسایل قابل اشتعال از مسیر خارج شده و پرده‌های غیر قابل اشتعال در مسیر نصب می‌شود (Hwang & Litton, 1984).

## ز- آتش سوزی در دویل ها و دیگر حفريات شیب دار

هنگام حریق در دویل های زغال ریز و دیگر حفريات شیب دار که از آنها جریان هوای تازه عبور می کند روش تهویه ای اتخاذ می شود که از نفوذ گازهای حاصل از سوختن به حفرياتی که اشخاص در آنها کار می کنند جلوگیری شود.

اگر حریق در حفرياتی که جریان هوا در آنها از پایین به بالا ایجاد شده باشد در این صورت جریان تهویه نرمال باید حفظ شود ولی برای کم کردن فعالیت حریق مقدار هوای ورودی به منطقه حریق را کاهش می دهند. اگر جریان هوا در حفريات شیب دار از بالا به پایین باشد ممکن است موقع حریق در اثر اختلاف فشار حرارتی این جریان برعکس شود که در این صورت ورود اشخاص برای اطفای حریق از بالا ممنوع است و حریق از قسمت تحتانی اطفاء می شود (مدنی، ۱۳۸۹).

برای جلوگیری از توسعه حریق از حفريات شیب دار به حفريات دیگر باید درب های ضد حریق که در دهانه حفريات شیب دار و همچنین حفريات مجاور نصب شده اند بسته شوند. در صورت نبودن درب های ضد حریق از موانعی از قبیل پرده برزنتی یا دیوار گلی و یا دیوار چوبی استفاده می کنند (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

## ۲-۶-۲- آتش سوزی بسته

آتش سوزی بسته به آتش سوزی گفته می شود که قابل مشاهده نمی باشد و معمولاً در محل های استخراج شده و کارگاه های متروکه رخ می دهد. خودسوزی یک نوع آتش سوزی بسته و یکی از دلایل عمده آتش سوزی در معادن زیرزمینی می باشد. برای متمایز شدن خودسوزی از آتش سوزی، وقوع آن را با عنوان «گرمایش» یا «احتراق خودبه خودی» بیان می کنند (مدنی، ۱۳۷۳).

احتراق خودبه خودی یکی از خطرات اجتناب ناپذیر در معادن زغال سنگ در سراسر جهان است. احتراق خودبه خودی در معادن زیرزمینی، معادن روباز، معادن قدیمی و متروکه، محل انباشت و ذخیره سازی زغال، در هنگام حمل و نقل ها و در مکان های دفع باطله می تواند به وجود آید (Mohalik et al., 2009).

شکل ۱۶-۲ احتراق خودبه‌خودی در معدن روباز زغال در نیو ساوت ولز<sup>۱</sup> استرالیا را نشان می‌دهد.



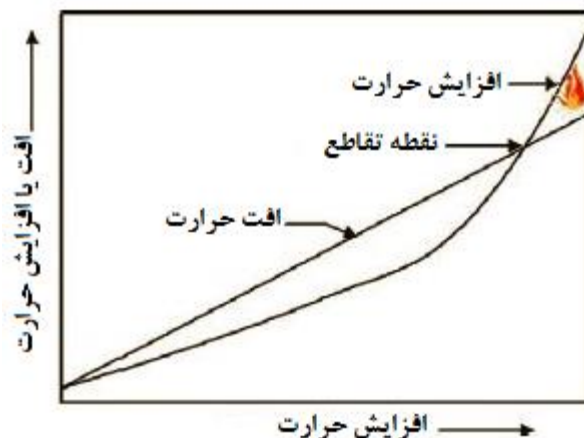
شکل ۱۶-۲: نمونه‌ای از احتراق خودبه‌خودی ([http:// www.cargolaw.com](http://www.cargolaw.com))

فرآیند اکسیداسیون زغال یک فرآیند شیمیایی در دمای پایین است و شامل ترکیب اکسیژن با عناصر قابل احتراق است که در آن گرمای قابل ملاحظه‌ای آزاد شده و اغلب همراه با نور است، خصوصیات این ترکیب بسته به نرخ و درجه حرارت فرآیند اکسیداسیون متفاوت است (Grewer, 1994).

یکی از نتایج فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ پدیده احتراق خودبه‌خودی است که شرایط محیطی را برای جمع‌آوری گرما فراهم می‌کند و اجازه ادامه اکسیداسیون زغال سنگ را می‌دهد. فرآیند اکسیداسیون؛ گرما، دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن را منتشر می‌کند (Grewer, 1994).

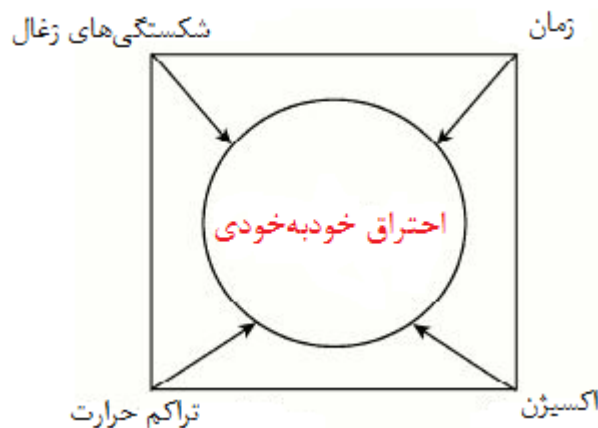
حرارت خودپایدار زغال زمانی شروع می‌شود که نرخ افزایش گرما سریع‌تر از نرخ اتلاف آن باشد. هنگامی که گرمای خودبه‌خودی آغاز می‌شود، شرایط محیطی که موجب این فرآیند شده حفظ می‌شود و درجه حرارت زغال سنگ افزایش می‌یابد تا زمانی که به درجه اشتعال رسیده و احتراق آغاز شود. شکل ۱۷-۲، در نقطه‌ی تقاطع درجه حرارتی را نشان می‌دهد که اکسیداسیون شتاب پیدا می‌کند و باعث اشتعال و احتراق می‌شود (Kim et al., 1993).

<sup>1</sup> - New South Wales



شکل ۲-۱۷: نرخ افت یا افزایش گرما در برابر افزایش حرارت (Kim et al., 1993).

چهار شرط لازم برای احتراق خودبه‌خودی زغال‌سنگ مطابق شکل ۲-۱۸ می‌باشد.



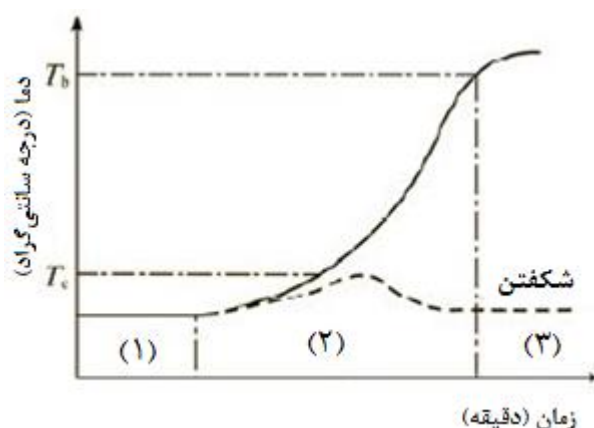
شکل ۲-۱۸: چهار شرط لازم برای احتراق خودبه‌خودی زغال‌سنگ (Lu, 2009)

خودسوزی یک فعل و انفعال فیزیکی و شیمیایی است، در ابتدا زغال اکسیژن را به طور سطحی جذب و با نفوذ اکسیژن به داخل زغال باعث افزایش دما می‌شود و اگر گرمای ایجاد شده خنثی نشود، فعل و انفعالات شیمیایی تشدید خواهد شد. نتیجه این فعل و انفعالات شیمیایی عبارتند از: منواکسید کربن، دی‌اکسید کربن، گاز متان، هیدروژن و هیدروکربن‌های مختلف (Hadden & Rein, 2010).

خودسوزی زغال‌سنگ هم در عمق کم و هم در عمق زیاد رخ می‌دهد. در عمق کم دسترسی به منبع اکسیژن زیاد است ولی اتلاف حرارتی وجود دارد، ولی در عمق زیاد میزان اکسیژن محدود است و از اتلاف جریان حرارت هم‌رفتی جلوگیری می‌شود (Hadden & Rein, 2010).

خودسوزی زغال سنگ با مقدار کمی جریان هوا از طریق طبقات شکسته، ترک‌ها و چاه‌های معدن تغذیه می‌شود. این مکان‌ها اجازه‌ی گردش اکسیژن را به مناطق زیرسطحی می‌دهد و مانع از گسترش اتلاف حرارتی می‌شود. این عمل عمدتاً توسط تبخیر آب و انتقال گرما صورت می‌گیرد (Hadden & Rein, 2010).

تکامل فرآیند خودسوزی زغال سنگ مطابق شکل ۲-۱۹ می‌باشد.



شکل ۲-۱۹: نمودار تکامل فرآیند خودسوزی زغال (Liang et al., 2008)

(۱) دوره نهفتگی، (۲) دوره احتراق خودبه‌خودی، (۳) دوره سوختن

در بعضی مواقع دما به قدری افزایش می‌یابد که موجب آتش‌سوزی می‌شود. شرایط لازم برای بروز چنین فرآیندی، وجود اکسیژن کافی برای ایجاد خودسوزی و فقدان یک سیستم تهویه است تا گرمای حاصله را انتقال دهد. سرعت اکسیژن به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما تقریباً دو برابر می‌شود تا هنگامی که به نقطه اشتعال می‌رسد (Hadden & Rein, 2010).

با مشاهده نشانه‌های زیر احتمال وقوع خودسوزی در معدن وجود دارد (Singh, 2013):

- کاهش مقدار اکسیژن موجود در هوای معدن و زیاد شدن گازهای متان، هیدروژن، مونواکسید کربن و

دی‌اکسید کربن

- افزایش دما، ظهور قطرات آب در دیواره کارگاه و ستون‌های چوبی

- گرم شدن مواد معدنی و افزایش دمای محیط کارگاه

- تصاعد بوی مخصوص موادی که همراه زغال هستند

- افزایش رطوبت هوا در نزدیکی محل حریق که با پیدایش مه غلیظ همراه است
- به علت افزایش گازهای مسموم کننده و غیر قابل تنفس و کاهش مقدار اکسیژن، حالت سردرد و تهوع به کارگران شاغل دست می‌دهد.

پیش‌گیری، تشخیص اولیه و کنترل احتراق خودبه‌خودی زمانی مؤثر خواهد بود که محل خطر به درستی شناسایی شود. شدیدترین نوع خودسوزی در معادن زغال‌سنگ، در محل‌های تخریب شده و یا در کارگاه‌هایی که زغال آن کاملاً کنده نشده است مانند مدخل‌های ورودی و خروجی کارگاه‌ها رخ می‌دهد با این حال محل‌هایی که احتمال خودسوزی در آن‌ها وجود دارد عبارتند از (MDG 1006, 2011):

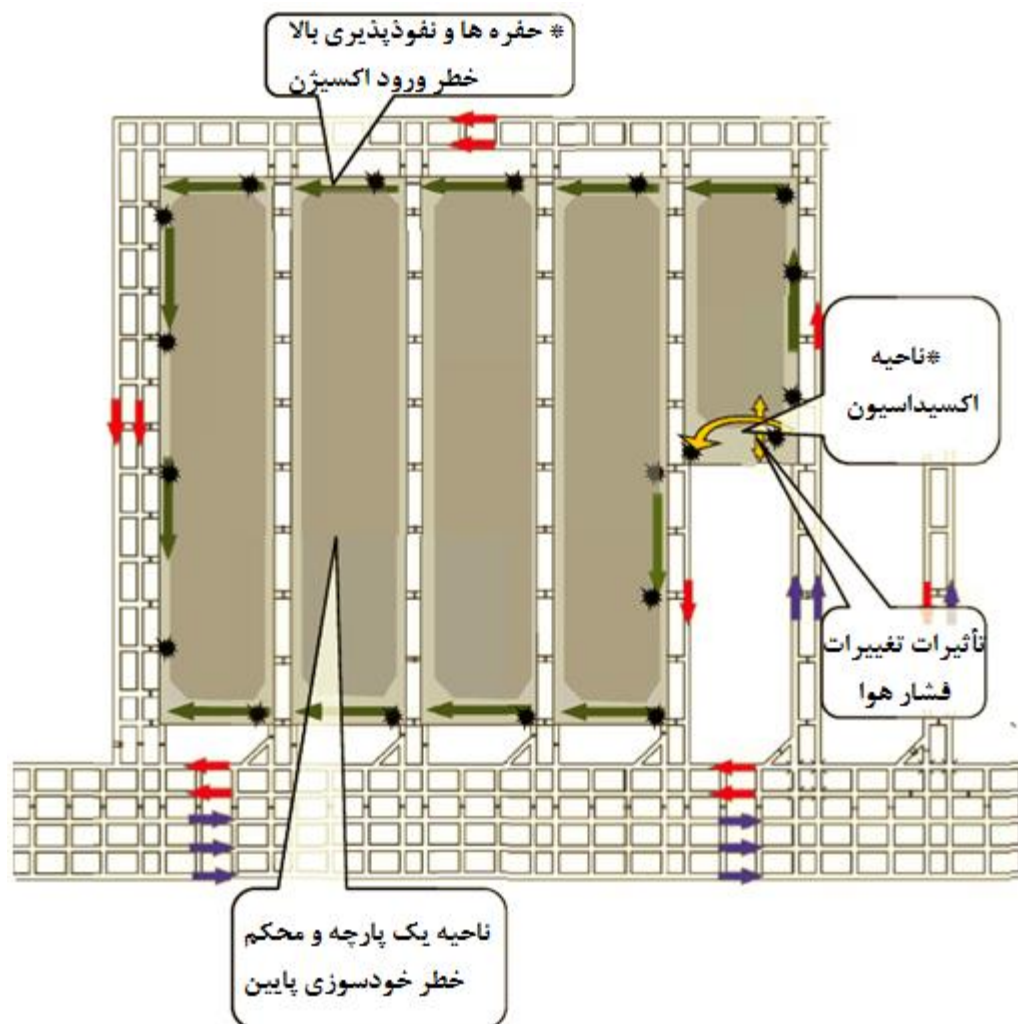
### الف - منطقه استخراجی جبهه کار طولانی<sup>۱</sup>

خطر احتراق خودبه‌خودی در مناطق تخریب شده جبهه کار طولانی زیاد است. تعداد مسیرهای جریان به این مناطق زیاد است؛ لذا برای جلوگیری از خطر احتراق خودبه‌خودی بایستی این مسیرها مسدود شوند. احتراق خودبه‌خودی در منطقه تخریب شده جبهه کار طولانی از طریق کشیده شدن هوا به پشت سقف نگهداری یا نشست در لبه‌های منطقه تخریب رخ می‌دهد (MDG 1006, 2011).

بیش‌ترین خطر احتراق خودبه‌خودی در لبه‌ی مناطق تخریب شده است که در آن حفره‌ها و منافذ زیادی وجود دارد. نفوذپذیری و فشار بالای تهویه اجازه ورود هوا را به منطقه تخریب می‌دهد (MDG 1006, 2011). برخی از سیستم‌های استخراجی همراه با نشست محدود با طراحی ستون‌های زنجیری پایدار، به علت وجود حفره‌ها در منطقه، اجازه‌ی افزایش هوا را در سرتاسر مسیرهای منطقه تخریب شده می‌دهد.

شکل ۲-۲۰ در یک منطقه استخراج جبهه کار طولانی، مناطقی را که احتمال خطر احتراق خودبه‌خودی زغال‌سنگ وجود دارد را نشان می‌دهد. این نواحی بحرانی در شرایطی به وجود می‌آیند که جریان هوای نشت یافته، اکسیژن لازم را برای پیشرفت اکسایش مواد قابل اشتعال به طور پیوسته فراهم می‌کند، اما آن قدر کافی نیست که گرما را با همان سرعتی که ایجاد می‌شود از محل دور کند (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

<sup>۱</sup> - Longwall Extraction Area



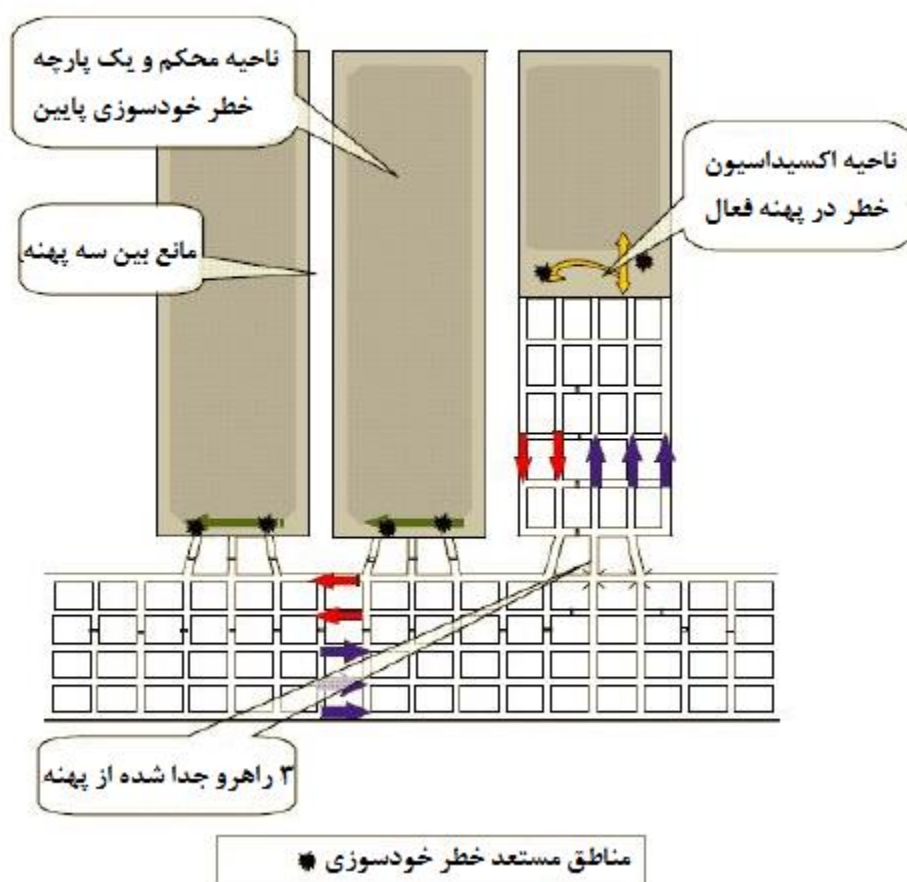
- \* زون محکم و یک پارچه - استخراج و نشست به صورت کامل - نفوذپذیری پایین - خطر احتراق خودبه خودی پایین
- \* منطقه ای شامل حفره ها و نفوذپذیری بالا - فشار تهویه باعث ورود اکسیژن به منطقه می شود و احتمال خطر خودبه خودی بالا
- \* فشار تهویه بالا باعث ورود هوا و حرکت هوا به داخل منطقه ی تخریب در این جهت می شود
- \* مناطقی که احتمال خطر احتراق خودبه خودی وجود دارد

شکل ۲-۲۰: مناطق خطر احتراق خودبه خودی در جبهه کار طولانی (MDG 1006, 2011)

ب- منطقه استخراجی اتاق و پایه<sup>۱</sup>

در مناطق مسدود و بسته نشت هوا به داخل منطقه یا وجود منطقه مسدود شده غنی از اکسیژن، باعث احتراق خودبه خودی می شود. وزن سنگین، وجود درزه ها و مشکلات کنترل سقف باعث می شود که زغال سنگ اضافی در منطقه تخریب باقی بماند. همچنین استخراج ناقص زغال سنگ باعث حرکت بیش تر هوا به منطقه تخریب می شود و باعث به وجود آمدن خطر احتراق خودبه خودی می شود (MDG 1006, 2011).

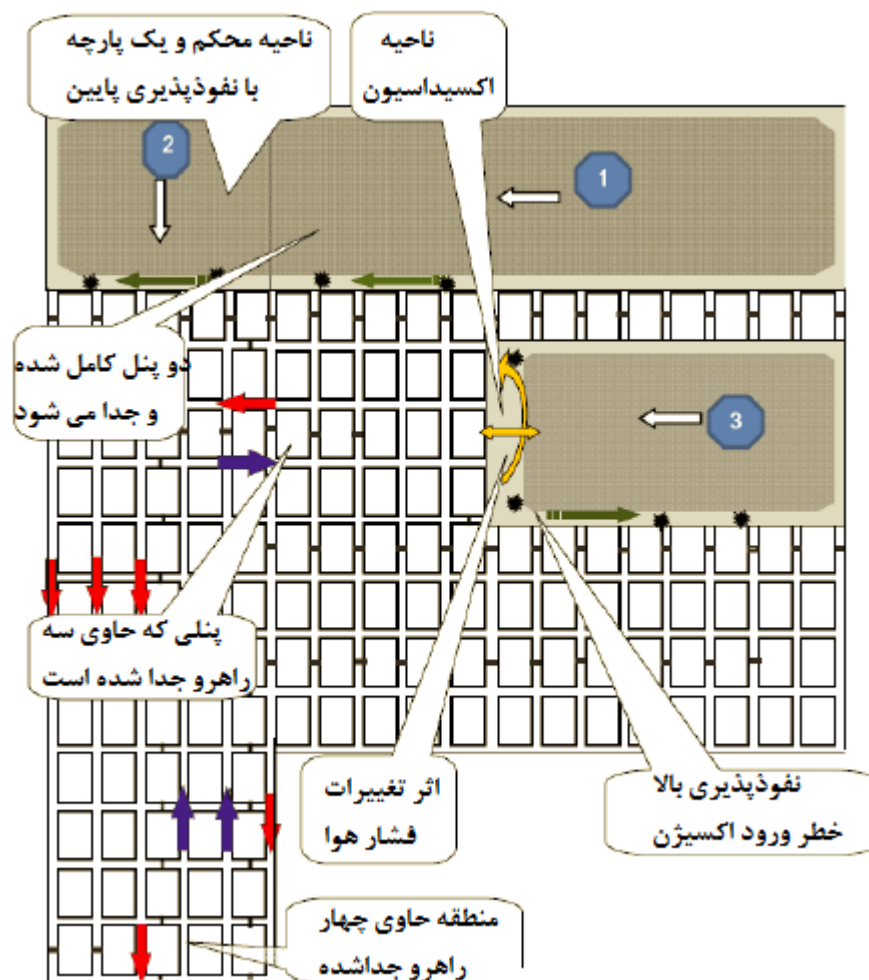
شکل ۲-۲۱ یک سیستم از پهنه های جدا شده و موانع و محل هایی را نشان می دهد که در آن احتراق خودبه خودی می تواند اتفاق بیفتد.



شکل ۲-۲۱: مناطق خطر احتراق خودبه خودی در پهنه های استخراجی مداوم (MDG 1006, 2011)

<sup>۱</sup> - Bord & Pillar Extraction Area

شکل ۲-۲۲ آرایشی از پهنه‌ها را نشان می‌دهد که در آن پهنه‌ها به وسیله موانع از هم جدا نشده‌اند.



شکل ۲-۲۲: مناطق احتمال احتراق خودبه‌خودی در پهنه‌های به هم پیوسته (MDG 1006, 2011)

ج- کارگاه‌هایی که در مناطق گسله ایجاد شده‌اند

د- مناطقی که دارای اختلاف فشار زیاد است، مانند پل‌های تهویه، درب‌های تهویه و دیوارها

ه- گالری‌های دنبال لایه

و- محل‌های ریزش سقف

ز- انباشته‌های خرده زغال در راهروهای ورودی هوا

- لایه‌های زغال‌سنگ براساس استعداد خودسوزی به لایه‌های با ریسک زیاد، متوسط و کم تقسیم می‌شوند.
- تدابیر موجود برای جلوگیری از خودسوزی در لایه‌های با ریسک زیاد به شرح زیر است (Wu & Liu, 2011):
- تا آن‌جا که ممکن است از روش جبهه‌کار پس‌رو استفاده شود
  - پیشروی سریع جبهه‌کار
  - در روش جبهه‌کار طولانی پیش‌رو با ریسک زیاد به خودسوزی زغال، باید با مواد پرکننده دارای تحکیم یک‌نواخت، حداقل در راهرو اصلی تقویت شود تا نشت هوا به منطقه پر شده کاهش یابد.
  - برای تمام جبهه‌کارهای با ریسک زیاد و متوسط باید ایستگاه‌های تزریق بنتونیت انجام شود و لوله‌های تزریق در نواحی گسله تعبیه شود.
  - وقتی که یک جبهه‌کار تعطیل می‌شود، بیش‌ترین احتمال خودسوزی در نزدیکی مسیر انتهایی جبهه‌کار وجود دارد؛ لذا ضروری است که کار جدا کردن و مسدود سازی محل مزبور در اسرع وقت انجام شود.
  - نمونه‌گیری منظم هوا و ردیابی ناحیه برای تشخیص زود هنگام خودسوزی

## ۲-۷- جمع‌بندی

با توجه به مطالب این فصل، حریق یکی از خطرات مهم در معادن زغالی به شمار می‌آید که دارای تأثیرات زیان‌آور اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی است. به لحاظ اهمیت موضوع حریق در معادن و تأثیری که در ایمنی معدن و سلامت افراد در کارگاه‌های زیرزمینی بر جای می‌گذارد لازم است شناخت دقیقی از مسائل مربوط به حریق کسب کنیم. در فصل سوم با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه حریق به بررسی روش‌های پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل حریق پرداخته خواهد شد.

## فصل ۳: سابقہ علمی موضوع

## ۳-۱- مقدمه

آتش‌سوزی‌های معادن زیرزمینی بدون استثناء خطرناک و حادثه آفرین هستند، زیرا علاوه بر خطرات ناشی از آتش‌سوزی سطحی، عوارض خطرناک دیگری را نیز به علّت محدودیت‌هایی که در زیرزمین وجود دارد را در بر می‌گیرد. بسیاری از آتش‌سوزی‌های بزرگ که موجب تلفات جانی و سبب خسارات مالی فراوان می‌شوند، اگر در سطح زمین به وقوع بپیوندند در مدت زمان کوتاهی شناسایی و کنترل می‌شوند، ولی وضعیت در زیرزمین دارای پیچیدگی‌هایی است، از جمله تشخیص آتش‌سوزی به علّت راه‌های دسترسی محدود و وسعت کم کارگاه‌ها مشکل‌تر است و از طرفی افراد آتش‌نشان با خطرات بیش‌تری روبه‌رو هستند. بنابراین ارزیابی خطر حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ امری ضروری تلقی می‌شود. برای این منظور باید تلاش‌هایی را که قبلاً درباره حریق انجام گرفته است بررسی کرد و پژوهش جدید را با پژوهش‌های پیشین ارتباط داد.

این امر را می‌توان با شیوه بررسی نظریه‌ها و پیشینه‌های علمی مربوط به موضوع امکان‌پذیر کرد، این نکته از آن رو مهم است که از نظریه‌های جدید و پژوهش‌هایی که در این زمینه به عمل آمده آگاه شویم، زیرا بررسی‌های علمی- عملی بخش مهم و لازم فرآیند پژوهش علمی را تشکیل می‌دهد (صفاری، ۱۳۹۲).

## ۳-۲- بررسی سابقه علمی موضوع

شناسایی، پیش‌گیری و کنترل حریق در معدنکاری زیرزمینی به علت مسائل ایمنی و اقتصادی ناشی از آن توجه محققان زیادی را به خود اختصاص داده است. برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده پیشین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

| مؤلف<br>(سال انتشار)     | توضیح مختصر                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Grekov (1971)            | در این تحقیق پارامترهای بهینه برای تزریق کربن دی‌اکسید به منطقه آتش‌سوزی مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق مشخص شد که میزان کربن دی‌اکسید مورد نیاز برای جلوگیری از انفجار به میزان نشت هوا به منطقه حریق بستگی دارد. |
| Lavtsevich (1973)        | بررسی مدل‌های تصادفی سیستم‌های شناسایی حریق در آتش‌سوزی‌های ناشی از گاز متان در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی.                                                                                                                |
| Litton et al. (1981)     | در این تحقیق مطالعاتی در زمینه رشد، ساختار و شناسایی حریق در تونل‌ها و معادن انجام گرفت.                                                                                                                                |
| Chaiken et al. (1983)    | در این تحقیق که یک مطالعه موردی بود مشکلات حریق در معدن آنتراسیت سنترالیا <sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت.                                                                                                            |
| Hwang & Litton (1984)    | در این مطالعه شرایط بحرانی در هنگام بروز حریق در معادن مورد مطالعه قرار گرفته است.                                                                                                                                      |
| Morris & Atkinson (1987) | در این مطالعه آن‌ها به بررسی کاربرد روش‌های مستقیم برای مهار حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ پرداختند.                                                                                                                  |
| Morris (1987)            | وی به بررسی تأثیر گازهای بی‌اثر در مهار حریق در معادن پرداخت.                                                                                                                                                           |
| Gerwer (1994)            | در این تحقیق مکانیزم خودسوزی زغال‌سنگ به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مجموعه فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ را در ۷ مرحله خلاصه کرد.                                                                               |
| Zhang et al. (1999)      | در این تحقیق سنسورهای تلفیقی برای تشخیص آتش‌گیری زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی زغال مورد بررسی قرار گرفتند.                                                                                                                |
| Ronald et al. (2000)     | ارائه چک لیست‌هایی برای بررسی آمادگی در برابر حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.                                                                                                                                          |

<sup>1</sup> - Centralia

ادامه جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

| مؤلف<br>(سال انتشار)    | توضیح مختصر                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Michalski & Gray (2001) | در این تحقیق کاربرد خاکستر در کنترل حریق در معادن مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مشخص شد که استفاده از خاکستر در معادن زیرزمینی یک روش کارآمد و مقرون به صرفه برای جلوگیری از مشکلات حریق و فرونشست در معدن می‌باشد.                                                                                          |
| Singh et al. (2002)     | در این تحقیق برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال‌سنگ سیستم طبقه‌بندی ارائه شد. این سیستم با توجه به پارامترهای ذاتی و معدنکاری مؤثر بر خودسوزی امتیازدهی شد.                                                                                                                                                             |
| Colaizzi (2004)         | او کاربرد دوغاب سلولی را در پیش‌گیری، کنترل و مهار حریق در لایه‌های زغالی مورد بررسی قرار داد، با استفاده از این روش خطرات مرتبط با حریق در معادن زغال‌سنگ به حداقل مقدار ممکن کاهش یافت، تجهیزات این روش نسبت به سایر روش‌های دیگر کم هزینه‌تر و قابل حمل است.                                                    |
| Gillies & Wu (2004)     | در این مطالعه موردی حریق در معادن زغال‌سنگ شبیه‌سازی شد و اثرات آن را روی سیستم تهویه معدن مورد بررسی قرار گرفت.                                                                                                                                                                                                   |
| Kim (2004)              | در این مطالعه محل حریق در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی متروکه مشخص شد. طبق نتایج این مطالعه اندازه‌گیری گرادیان فشار اثر ارتباطات در هر گمانه را بررسی می‌کند و جریان گازهای زیرزمینی یک مسیر خطی مستقیم را به سمت نقطه مکش دنبال می‌کند. عمق گمانه هیچ تأثیری در اندازه‌گیری فشار و غلظت گاز ندارد.                    |
| Singh & Ray (2004)      | آن‌ها در این مطالعه به کنترل آتش‌سوزی‌های باز خطرناک در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی پرداختند.                                                                                                                                                                                                                          |
| Xue & Cui (2004)        | در این تحقیق روش‌های ابتکاری برای شناسایی و کنترل احتراق خودبه‌خودی زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه سه روش مادون قرمز، رادون و روش کلئیدی مطرح شد. از بین این سه روش، روش کلئیدی درصد اطمینان بالاتری دارد.                                                                         |
| Smith & Thimons (2006)  | این دو محقق به بررسی حریق در معادن آمریکا پرداختند، در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی ایالات متحده به خصوص در غرب این کشور که میان درجه زغال‌شدگی پایین است، احتراق خودبه‌خودی خطر جدی به شمار می‌آید. هم‌چنین برای جلوگیری، تشخیص و کنترل احتراق خودبه‌خودی با استفاده از روش مدل‌سازی CFD روش‌های جدیدی را ارائه دادند. |
| Gervet (2007)           | در این تحقیق به بررسی این که چگونه خودسوزی و آتش‌گیری زغال‌سنگ باعث افزایش و توزیع گرما در سطح جهانی می‌شود پرداخته شده است.                                                                                                                                                                                       |
| Kuenzer et al. (2007)   | بررسی اثرات زیست محیطی آتش‌گیری کنترل نشده‌ی زغال‌سنگ در دو منطقه در شمال مرکزی چین                                                                                                                                                                                                                                |
| Ray & Singh (2007)      | تحولات اخیر و روش‌های کنترل حریق در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی مورد مطالعه قرار گرفت.                                                                                                                                                                                                                                 |

ادامه جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

| مؤلف<br>(سال انتشار)     | توضیح مختصر                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Singh et al.<br>(2007)   | در این مطالعه به بررسی شاخص گازهای حریق معادن و کاربرد آن‌ها در آتش‌سوزی‌های معادن زغال‌سنگ هند پرداخته شده است.                                                                                                                                                                                                             |
| Zhang et al.<br>(2007)   | در این مطالعه مشخصات حرارتی و آتش‌گیری زغال‌سنگ مورد مطالعه قرار گرفت.                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Wachowicz<br>(2008)      | در این تحقیق آتش‌سوزی‌های زیرزمینی معادن زغال‌سنگ سخت در لهستان مورد بررسی قرار گرفته است.                                                                                                                                                                                                                                   |
| Grayson (2009)           | در این مطالعه با استفاده از داده‌های اسناد <sup>۱</sup> MSHA به تجزیه و تحلیل خطر نمونه آزمایشی برای حریق و انفجار در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ پرداخته شده است.                                                                                                                                                               |
| Hui & Chao<br>(2010)     | ارائه یک روش جدید برای تشخیص منبع حریق در معادن زیرزمینی برای جلوگیری از احتراق خودبه‌خودی در معادن سولفیدی.                                                                                                                                                                                                                 |
| Lang & Fu-bao<br>(2010)  | در این تحقیق که در کشور چین انجام شد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی <sup>۲</sup> (AHP)، پارامترهای مؤثر بر خودسوزی وزن‌دار شدند و در نهایت یک سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی خطر خودسوزی ارائه شد.                                                                                                                       |
| Jian & Xiao<br>(2011)    | در این مطالعه خطر توسعه حریق‌های زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای در معادن زغال‌سنگ مورد ارزیابی قرار گرفت.                                                                                                                                                                                                                        |
| Liu et al. (2011)        | در این تحقیق روش جانمایی منابع احتراق برای احتراق خودبه‌خودی مواد معدنی سولفیدی مورد مطالعه قرار گرفت، در این مقاله روش مکان‌یابی منبع حریق براساس اسکن تصاویر مادون قرمز برای تعیین نقطه‌ای که بالاترین درجه حرارت را دارد و باعث اشتعال در سطح سنگ می‌شود ارائه شده است. عمق تشخیص ایده‌آل در این تحقیق بیش از ۵ متر نیست. |
| Taku et al. (2011)       | در این تحقیق از اندازه‌گیری‌های مغناطیسی برای توصیف خودسوزی زغال‌سنگ استفاده شده است.                                                                                                                                                                                                                                        |
| Xie et al. (2011)        | بررسی تشخیص زود هنگام احتراق خودبه‌خودی زغال‌سنگ با توسعه یک سیستم غنی‌سازی اتیلن در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.                                                                                                                                                                                                                |
| Yanming et al.<br>(2011) | در این تحقیق کاربرد روش <sup>۳</sup> FDTD از شبیه‌سازی <sup>۴</sup> GPR برای تشخیص حریق در معادن زغال‌سنگ استفاده شده است، در این تحقیق از معادلات حلقه ماکسول استفاده شد. نتایج عددی حاصل از این تحقیق نشان داد که کاربرد این روش در تشخیص حریق کاملاً درست و امکان‌پذیر است.                                               |

<sup>۱</sup>- Mine Safety and Health Administration

<sup>۲</sup>- Analytical Hierarchy Process

<sup>۳</sup>- Finite- difference time- domain

<sup>۴</sup>- Ground- penetrating rada

ادامه جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

| مؤلف<br>(سال انتشار)          | توضیح مختصر                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zhang et al.<br>(2011)        | در این مطالعه کاربرد دستگاه‌های مهر و موم سریع جدید در حریق معادن مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج این مطالعه، این دستگاه‌ها کاملاً مقرون به صرفه هستند، زمان نصب و راه‌اندازی آن‌ها در طول آزمایش کمتر از ۹ دقیقه است، با استفاده از این دستگاه‌ها نرخ نشت هوا کم‌تر از ۵ درصد است بنابراین یک عامل کلیدی خوبی برای مسدود کردن هوا می‌باشد. |
| Zhou & Luo<br>(2011)          | در این تحقیق استفاده از برنامه شبیه‌سازی <sup>۱</sup> MFIRE برای بهبود حریق در معادن مورد مطالعه قرار گرفته است.                                                                                                                                                                                                                                 |
| Litton & Perera<br>(2012)     | بررسی معیارهای تشخیص آتش‌سوزی در نوار نقاله‌های زیرزمینی.                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Mahdipour & Dadkhah<br>(2012) | در این مطالعه به بررسی تشخیص اتوماتیک حریق براساس محاسبات نرم <sup>۲</sup> پرداخته شده است.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Pandey et al.<br>(2012)       | بررسی نقش بازدارنده‌های حریق در جلوگیری از گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ و کنترل حریق در معادن زغال‌سنگ.                                                                                                                                                                                                                                            |
| Perera et al.<br>(2012)       | بررسی تأثیر سرعت هوا بر شناسایی حریق در نوار نقاله‌های زیرزمینی.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Selivanova<br>(2012)          | در این مطالعه به بررسی کنترل احتراق در منطقه با استفاده از روش مقاومت الکتریکی برای گازکشی زغال‌سنگ زیرزمینی پرداخته شد.                                                                                                                                                                                                                         |
| Xiaofei et al.<br>(2012)      | در این مطالعه به بررسی احتمال خطر مدل ماکروسکوپی هشدار اولیه بر تهویه، گاز، غبار و حریق در معادن زغال‌سنگ پرداخته شده است.                                                                                                                                                                                                                       |
| Mendham (2013)                | تشخیص سریع و زود هنگام حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Tao et al. (2013)             | بهینه‌سازی توزیع انرژی تهویه برای کنترل خودسوزی زغال‌سنگ در پهنه‌های مهر و موم شده در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ.                                                                                                                                                                                                                                   |
| Saffari et al.<br>(2013)      | در این تحقیق خطر خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ <sup>۳</sup> (RES) مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت یک سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال‌سنگ بر مبنای ۱۵ پارامتر ارائه شد.                                                                                                                              |
| Singh (2013)                  | در این تحقیق خودسوزی و حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مورد بررسی قرار گرفت                                                                                                                                                                                                                                                                      |

<sup>۱</sup> - Mine Fire

<sup>۲</sup> - Soft Computing

<sup>۳</sup> - Rock Engineering Systems

ادامه جدول ۳-۱: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه

| مؤلف<br>(سال انتشار)  | توضیح مختصر                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zhau et al. (2013)    | در این مطالعه روشی جدید برای کنترل حریق در یک معدن با استفاده از نیتروژن مایع مطرح شد، طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، این روش در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی سودمند است و سود بالایی دارد و در پیش‌گیری حریق در معادن زغال‌سنگ بزرگ مقیاس کاربرد گسترده‌ای دارد. |
| Mendham et al. (2014) | در این مقاله به بررسی سنسورهای مونواکسید کربن به عنوان عامل مؤثر در تشخیص حریق در معادن زغال‌سنگ پرداخته شده است.                                                                                                                                                                 |
| Cuiping et al. (2015) | شبیه‌سازی خطر حریق در معادن زیرزمینی براساس مدل ماشین‌های سلولی، این شبیه‌سازی شامل بررسی تأثیر عوامل مختلف از اثرات حریق‌های زیرزمینی است.                                                                                                                                       |
| Hansen (2015)         | بررسی روش‌های محاسبه نرخ حرارت آزاد شده از آتش‌سوزی‌های لوازم نقلیه در معادن زیرزمینی.                                                                                                                                                                                            |
| Liming & Smith (2015) | در این مطالعه برای مقابله با حریق در تسمه نوار نقاله اثر شرایط محلی از قبیل باران، رطوبت، سرعت جریان آب و... با استفاده از مدل CFD شبیه‌سازی شد.                                                                                                                                  |
| Palm et al. (2015)    | در این مطالعه آزمایش‌های مهار حریق در معدن تپست بورت <sup>۱</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های صورت گرفته نشان داد که زمان رسیدن به شاخص‌های مهار حریق بین ۱۵ تا ۳۰ دقیقه است، همچنین عامل محدود کننده هوا است و مصرف هوا به شدت به فشار فیزیکی وابسته می‌باشد.              |
| Zhenlu et al. (2015)  | در این مطالعه روش‌های کنترل خودسوزی <sup>۲</sup> از قبیل فوم سه‌فازی و روش مه‌پاشی <sup>۳</sup> در معدن روباز آنجیالینگ <sup>۴</sup> مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج این مطالعه روش‌های فوم سه‌فازی و مه‌پاشی روش‌های مؤثر و مطمئن برای کنترل خودسوزی می‌باشند.                 |

در ادامه پرکاربردترین روش‌های ارزیابی حریق در معادن زغال‌سنگ مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۳- روش‌های ارزیابی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ

مجموعه حالات بررسی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ را می‌توان در ۳ گروه اصلی طبقه‌بندی کرد، این

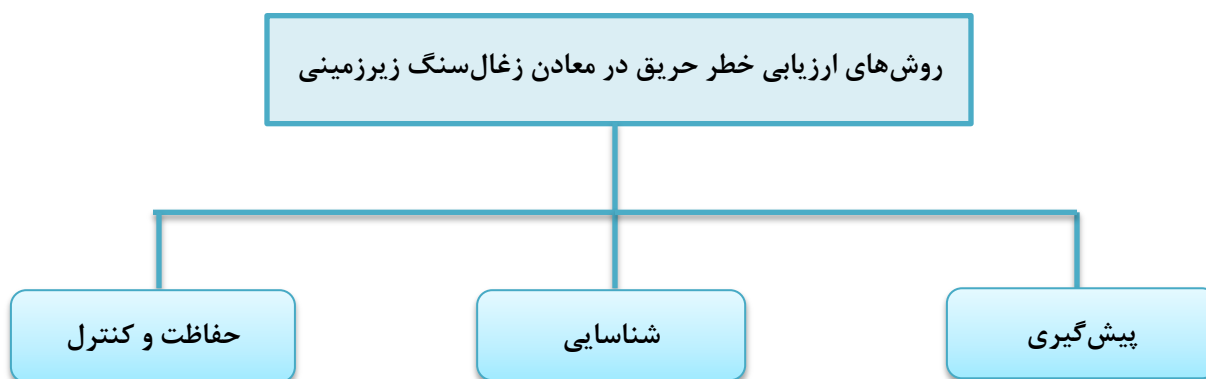
طبقه‌بندی در شکل ۳-۱ آورده شده است.

<sup>۱</sup>- Tistborttet

<sup>۲</sup>- Spontaneous Combustion

<sup>۳</sup>- Water mist

<sup>۴</sup>- Anjialing



شکل ۳-۱: طبقه‌بندی روش‌های ارزیابی خطر حریق در معادن زغال سنگ زیرزمینی

### ۳-۳-۱- پیش‌گیری<sup>۱</sup> حریق در معادن زیرزمینی

بهترین تشخیص و حفاظت از تجهیزات هرگز نمی‌تواند عدم وجود یک پیش‌گیری خوب را جبران کند، بنابراین از بین سه عامل پیش‌گیری، شناسایی و حفاظت، اجرای روش‌های پیش‌گیری ساده‌تر و کم هزینه‌تر می‌باشد. سه عامل مهم که بی‌توجهی به هر یک از آنها باعث آتش‌سوزی می‌شود عبارتند از:

۱- اجرای عملیات پاک‌سازی در معدن

۲- نظارت و سرپرستی

۳- استفاده صحیح از تجهیزات

### ۳-۳-۲- تشخیص<sup>۲</sup> حریق در معادن زیرزمینی

روش‌های شناسایی حریق در معادن به شرح زیر می‌باشد:

#### الف- حس بویایی افراد

کارگران معدن بیش‌تر بر این باورند که بهترین آشکارساز حریق، حس بویایی است. این باور با استفاده از آزمون‌های مربوط به حرارت ناشی از اصطکاک تسمه نقاله پشتیبانی شده است. هنگامی که کارگران معدن ۶۰۰

<sup>۱</sup> - Prevention

<sup>۲</sup> - Detection

فوت در پایین دست دچار سوزش دستگاه تنفسی شدند هنوز آشکارسازهای بسیار حساس الکتریکی فعال نشده بودند (Van Der Wat, 1981). در جدول ۲-۳ برتری حس بویایی در مقایسه با سنسورهای CO نیز قابل مشاهده است (Rockett, 1980). با این حال تنها اتکاء به حس بویایی خطرناک است.

جدول ۲-۳: برتری حس بویایی در مقایسه با سنسورهای CO (Rockett, 1980)

| حدافل نرخ قابل تشخیص در سوزاندن چوب (lb/hr) |                  | جریان هوا (cfm) |
|---------------------------------------------|------------------|-----------------|
| توسط کارگران                                | توسط سنسورهای CO |                 |
| ۱-۱/۱                                       | ۱-۱/۳            | ۳۰۰۰            |
| ۱-۱/۲-۱/۷                                   | ۲۳               | ۵۰۰۰            |
| ۳-۳۰                                        | ۴۲               | ۹۰۰۰            |

## ب- آشکارسازهای نوع نقطه‌ای<sup>۱</sup>

طبق مقررات نوشته شده در سال ۱۹۷۰، آشکارسازهای نقطه‌ای قابل اعتمادترین آشکارسازهای در دسترس هستند. در محل‌هایی که سوخت و منابع اشتعال نسبتاً محدود است مانند محل‌هایی که میان‌برها<sup>۲</sup> بسته می‌شوند استفاده از آشکارسازهای نوع نقطه‌ای در دمای زیر ۱۰۰ درجه فارنهایت مؤثر می‌باشد ولی در کل این آشکارسازها زمانی فعال می‌شوند که درجه حرارت هوای اطراف از ۱۳۵ درجه فارنهایت به ۱۸۰ درجه فارنهایت برسد یا نرخ درجه حرارت به طور معمول در هر دقیقه ۱۵ درجه فارنهایت افزایش یابد (Van Der Wat, 1981). شناساگرهای نوع نقطه‌ای در مواردی که حرارت ناشی از حریق به سرعت افزایش می‌یابد و همچنین در مواردی که سرعت واکنش مهم نباشد کارایی خوبی دارند. با افزایش مقدار جریان تهویه، درجه حرارت پایین دست حریق کاهش می‌یابد (Van Der Wat, 1981).

شناساگرهای نوع نقطه‌ای ممکن است در چند نقطه دود را تشخیص دهند. در این شناساگرها گاز یا دود در یک شبکه لوله از یک یا چند نقطه ورودی از فاصله دور به مرکز نمونه‌گیری کشیده می‌شود. این روش در اکثر معادن استرالیا قابل استفاده می‌باشد (Mendham et al., 2012).

<sup>۱</sup> - Point Type Detection

<sup>۲</sup> - Crosscut

طراحی این شناساگرها برای تشخیص حریق یک سری محدودیت‌های ذاتی دارد که باعث تأخیر در تشخیص حریق می‌شود. قبل از اینکه هشدار و زنگ خطر فعال شود، دود و گرما می‌بایستی از منبع حریق به نزدیک‌ترین آشکارساز نقطه‌ای برسد، تأخیر در رسیدن دود، گاز یا حرارت به آشکارسازها زمان در دسترس کافی برای تخلیه<sup>۱</sup> (ASET) را قبل از وقوع حادثه را کاهش می‌دهد (Mendham et al., 2012).

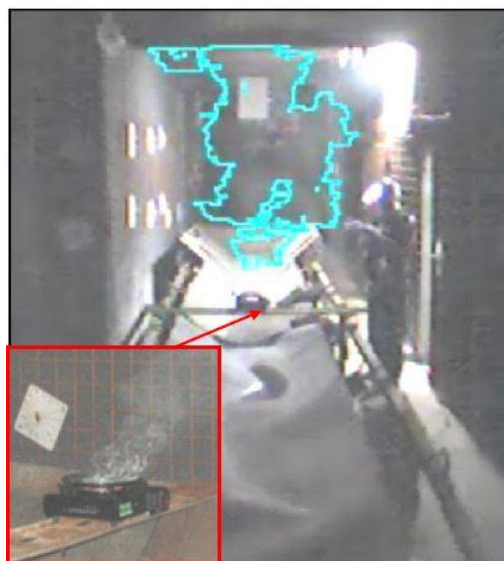
تشخیص نادرست حریق، نه تنها ASTE را برای فرار معدنکاران کاهش می‌دهد، همچنین تعداد راه‌های مه‌ار حریق را نیز کاهش می‌دهد و باعث افزایش گسترش حریق می‌شود (Mendham et al., 2012). مانع اصلی در این سیستم‌های تشخیص زودهنگام حریق، آلودگی فیزیکی است که ناشی از آلاینده‌های استخراج از معدن است. به عنوان مثال آشکارسازهای دود از نوع نقطه‌ای با استفاده از روش‌های تشخیص یونیزاسیون یا روش‌های تشخیص فوتوالکتریک به راحتی با گرد و غبار زغال‌سنگ آلوده می‌شوند که باعث آلام کاذب می‌شود (Mendham et al., 2012).

### ج - سیستم<sup>۲</sup> VBFD

VBFD یک نوع سیستم تشخیص دود و شعله است که با استفاده از دوربین‌های مداربسته اطلاعات و زمان‌های واقعی را ضبط کرده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. دوربین‌های VBFD به عنوان یک راه‌حل برای حل مشکلات آلودگی آلاینده‌های هوا روش مناسبی می‌باشد و برای تشخیص اولیه حریق در معادن زیرزمینی و محیط‌های مشابه مناسب و قابل اعتماد می‌باشد. شکل ۲-۳ یک تصویر VBFD گرفته شده در یک معدن را نشان می‌دهد که دود منتشر شده به وسیله سیستم VBFD مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (Mendham et al., 2012).

<sup>1</sup> - Available Safe Evacuation Time

<sup>2</sup> - Volume Type Fire Detection



شکل ۳-۲: تشخیص ویدیویی آتش‌گیری زغال‌سنگ (Mendham et al., 2012)

## د- شناساگرهای CO

شناساگرهای کربن مونواکسید، مجموعه‌ای فعال هستند که در محیط‌هایی که میزان کربن مونواکسید بالای ۱۰ ppm می‌باشد عملکرد خوبی دارند. این شناساگرها در ابتدا و انتهای نوار نقاله قرار می‌گیرند و حدود ۱۰۰۰ فوت طول نوار نقاله را افزایش می‌دهد. (Miller, 1979).

حریق‌ها از منابع مختلفی از قبیل موتورهای دیزلی، انفجار، برش و جوش تولید می‌شوند و با توجه به میزان CO تولیدی و نرخ افزایش غلظت CO از هم متمایز می‌شوند. رشد الگوی یک حریق قبل از فوران شعله‌ها، نسبتاً آهسته است و به طور مداوم غلظت CO افزایش می‌یابد. میزان و زمان افزایش غلظت CO و شعله‌ور شدن حریق وابسته به اشتعال‌پذیری سوخت مورد نظر دارد (Van Der Wat, 1981).

الگوهای CO تولید شده از موتورهای دیزلی، انفجار، برش و جوش شبیه به U برعکس می‌باشد؛ در این الگو ابتدا نرخ افزایش CO سریع است و حدود چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه می‌باشد، سپس غلظت CO تقریباً ثابت می‌ماند مگر این‌که سایر سوخت‌ها مشتعل شوند و منجر به آتش‌سوزی شود. پس از این‌که دود ناشی از دیزل و انفجار توسط هوای تهویه رقیق شد غلظت CO پایین می‌آید. این الگوها در عرض چند دقیقه آشکار

می‌شوند و منبع تولید را شناسایی می‌کنند ولی نمی‌توانند تضمین کنند که CO ناشی از منابع و محل‌های دیگر موجب حریق نشود، برای استفاده از این الگوها نیاز است که بدانیم موتورهای دیزلی کجا و چگونه فعالیت می‌کنند (Miller, 1979).

به دلیل وجود آلارم‌های کاذب و نادرست نمی‌توان تنها به شناساگرهای CO اکتفاء کرد؛ عواملی که باعث آلارم کاذب می‌شوند عبارت‌اند از (Miller, 1979):

- دودهای گرم گریس‌ها و روغن‌ها
- گازهای خروجی از تجهیزات دیزلی شامل اکسیدهای نیتروژن و کربن؛ اگر غلظت این گازها حدود ۱۰ ppm باشد شناساگر CO فعال شده و میزان CO را ۵ ppm نشان می‌دهد.
- جوشکاری، برشکاری و آتشکاری می‌توانند باعث فعال شدن شناساگرهای CO شوند.
- شناساگرهای CO با وجود ضعف‌هایی که دارند ولی در حال حاضر بهترین وسیله در دسترس هستند که به حریق حساس است و در مناطق فعال معادن در حال توسعه‌اند. به جای کنار گذاشتن شناساگرهای CO، مدیریت خوب بهترین راه برای کاهش و به حداقل رساندن آلارم نادرست می‌باشد.
- یک راه‌حل بالقوه برای بهبود مشکل رانش سنسور گاز و تأخیر در شناسایی حریق، تعیین حجم حریق می‌باشد. تعیین حجم حریق شامل استفاده از یک نوع شناساگر است که در آن فضای کل، یا حداقل بخش قابل توجهی از آن برای رشد اولیه حریق مانیتور شده است (Mendham et al., 2012).

## ه- شناساگرهای CO<sub>2</sub>

این شناساگرها در ترکیب با شناساگرهای CO مزاحمت ایجاد می‌کند، عملکرد این شناساگرها با افزایش نسبت CO/CO<sub>2</sub> افزایش می‌یابد. (Van Der Wat, 1981).

### ۳-۳-۳- حفاظت و کنترل<sup>۱</sup> حریق در معادن زیرزمینی

اصولاً در معادن برای خاموش کردن حریق از روش‌هایی استفاده می‌کنند که اغلب بر مبنای جلوگیری از رسیدن اکسیژن به محل آتش‌سوزی و سرد شدن مواد سوختنی محیط اطراف پایه‌گذاری شده است (جهانگیری، ۱۳۹۱).

پرکاربردترین روش‌های اطفای حریق در معادن به شرح زیر می‌باشد:

#### الف- مجزا کردن محل آتش‌سوزی (روش سدبندی)<sup>۲</sup>

در مواقعی که مهار کردن حریق مشکل و غیرممکن باشد، می‌توان محل آتش‌سوزی را مجزا کرد. به این منظور دیوارهایی در تمام راهروهای اطراف محل حریق احداث می‌کنند که این دیوارها به دو صورت موقت و دائمی احداث می‌شوند (Kuchta, 1978).

در هنگام دیوارکشی دائمی باید توجه کاملی به میزان ترکیب محصولات حریق داشت که مقدار آن از حد ضریب قابلیت انفجار گازها تجاوز نکند. در غیر این صورت امکان خطر بروز انفجار می‌باشد.

فریچه<sup>۳</sup> حدود قابلیت انفجار گازهایی را که معمولاً در آتش‌سوزی‌ها اندازه‌گیری می‌شوند را طبق جدول ۳-۳ تعیین کرد (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

جدول ۳-۳: حدود قابلیت انفجار گازهای ناشی از حریق (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲)

| حدود انفجار |         | محصولات حریق |         | محصولات حریق   |
|-------------|---------|--------------|---------|----------------|
| حداکثر %    | حداقل % | حداکثر %     | حداقل % |                |
| ۱۴          | ۵       | ۹۵           | ناچیز   | متان           |
| ۷۲          | ۱۳      | ۶            | ۱       | مونواکسید کربن |
| ۷۲          | ۴       | ۵            | ۱       | هیدروژن        |
| -           | -       | ۹            | ۰/۱     | دی‌اکسید کربن  |
| -           | -       | ۲۰/۵         | ۹       | اکسیژن         |
| -           | -       | ۹۳           | ۲       | ازت            |

<sup>۱</sup> - Protection

<sup>۲</sup> - barrage Method

<sup>۳</sup> - Fritzche

حدود قابلیت انفجار گازها برای هر یک از گازها به تنهایی صادق است، محصولات حریق متشکل از گازهای مختلف است که در اتمسفر محل حریق وجود دارد. در این صورت، حد پایین ضریب قابلیت انفجار گازها از فرمول لوشاتلیه (رابطه ۱-۳) به دست می‌آید (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

$$\frac{\%CH_4}{5} + \frac{\%CO}{13} + \frac{\%(H_2 + CnHm)}{4} = Q \quad (1-3)$$

دیوار دائمی را زمانی باید احداث کرد که  $Q = 0.6$  باشد و چنانچه  $Q > 0.6$  باشد به دلیل امکان بروز خطر انفجار، باید از احداث آن اجتناب کرد (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

### ب- وارد کردن گازهای بی‌اثر

اگر برای خاموش کردن مستقیم حریق امکان دسترسی به محل حریق نباشد، یا به کار بردن روش‌های دیگر مؤثر نباشد، حریق را از طریق وارد کردن گازهای خنثی به منطقه ایزوله شده خاموش می‌کنند. امروزه برای غلبه بر حریق به خصوص حریق‌های خیلی بزرگ از گازهای بی‌اثر استفاده می‌شود (Gosh et al., 1980).

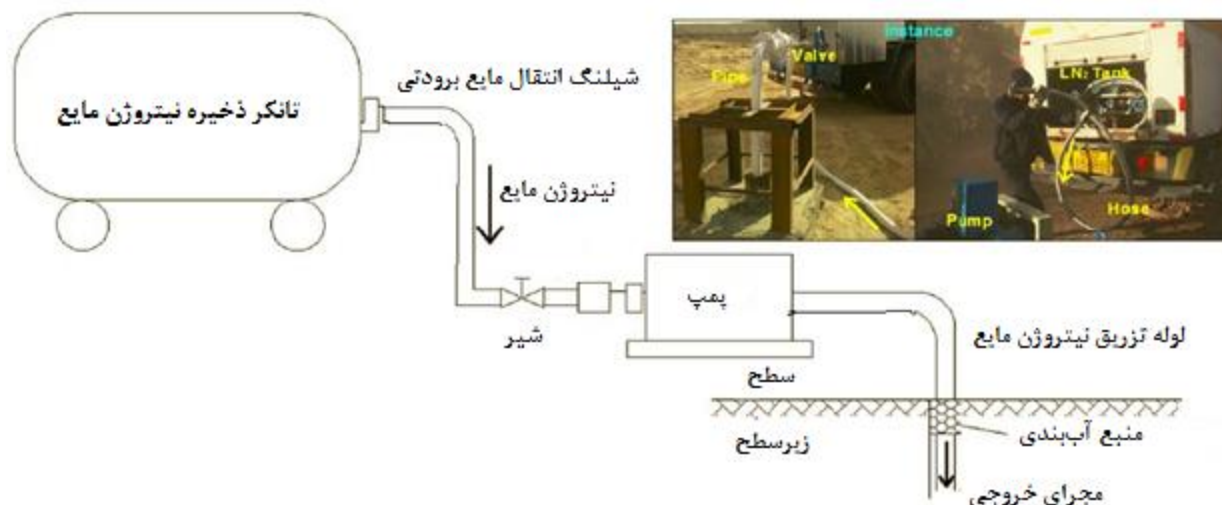
### - گاز نیتروژن (گاز ازت)

نیتروژن را می‌توان به دو صورت می‌توان برای کنترل حریق به کار برد:

- به صورت مایع از طریق یک تانکر

- یا به صورت گاز از طریق شبکه لوله‌کشی

تجهیزات لازم برای تزریق نیتروژن مایع شامل یک مخزن، رفت و برگشت پمپ گاز در دمای پایین، حمل و نقل مایع در لوله‌ی نرم و یک لوله‌ی تزریق نیتروژن است که در شکل ۳-۳ قابل مشاهده می‌باشد. پمپ در دمای پایین نیتروژن مایع را به خطوط لوله تزریق می‌کند و در دمای پایین نیتروژن مایع به طور مستمر قادر به جذب گرما به مقدار زیاد در منطقه حریق است (Zhou & Ma, 2013).



شکل ۳-۳: نحوه‌ی تزریق نیتروژن مایع به زیرسطح (Zhou & Ma, 2013).

تزریق گاز نیتروژن به پشت کارگاه باعث خشک شدن فضای پشت کارگاه می‌شود و همچنین درصد اکسیژن را پایین می‌آورد (Zhou & Ma, 2013).

میزان کم شدن اکسیژن در نتیجه تخلیه آن به وسیله گاز ازت را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\text{غلظت اولیه} \times e^{-m} \quad (2-3)$$

در این رابطه  $m$  میزان تغییرات حجم مطابق قانون ارشمیدس است. هنگامی که گاز ازت وارد فضای مسدود می‌شود، به اندازه‌ی وزن هوای هم حجمش، اکسیژن خارج می‌شود (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

### – گاز دی‌اکسیدکربن

در جایی که هدف استفاده از یک گاز بی‌اثر برای سرد کردن و پاک‌سازی دودها باشد اغلب از گاز دی‌اکسید کربن استفاده می‌شود (Morris, 1987).

گاز دی‌اکسیدکربن محاسن زیادی دارد اما فراوانی نیتروژن با مشخصات مناسب‌تر برای مقاصد خنثی‌سازی باعث شده تا مصرف دی‌اکسیدکربن به طور قابل توجهی کاهش پیدا کند. با این حال در مواردی به جای نیتروژن باید از دی‌اکسیدکربن استفاده کنیم که به شرح زیر می‌باشد (CMRS, 1981):

- در مناطقی که مهروموم شده و جریان هوا فاکتور مهمی به شمار نمی‌آید.

- در مناطق تخریب شده در جاهایی که جریان هوا فاکتور مهمی به شمار می آید.
- در جاهایی که جریان هوا از حریق به طرف گمانه‌ها می‌باشد.

### ج- تزریق آب

آب یکی از ارزان‌ترین و مؤثرترین وسیله برای مهار حریق است، آب را به دو صورت می‌توان به کار برد:

- تزریق مستقیم آب به محل حریق و دیوی باطله با استفاده از لوله‌های آب طبق شکل ۳-۴
- اسپری کردن آب



شکل ۳-۴: تزریق آب به دیوی باطله با روش تزریق مستقیم و اسپری آب (Chaiken & Bayles, 1988)

اسپری آب، پرده‌ای از آب را به وجود می‌آورد که می‌تواند به راحتی حریق را خاموش کند. با این روش بخار آب به وجود آمده می‌تواند لایه‌ی عایقی را به وجود آورند که اثر خنک‌کنندگی بهتری برای محیط اطراف فراهم می‌کند، در این حالت میزان آب کم‌تری مورد نیاز می‌باشد. این عامل از گسترش حریق جلوگیری می‌کند. در بعضی از حالات ترکیب دو روش گفته شده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Takashi et al., 1983).

### د- انتشار کف

در جاهایی که امکان استفاده از آب برای مهار حریق وجود ندارد از کف استفاده می‌شود. در جاهایی که سرعت گسترش حریق زیاد است و حریق عمیق است استفاده از کف مؤثر نمی‌باشد (Ray & Singh, 2007). این روش به طور گسترده برای کنترل خودسوزی مناطق استخراج جبهه‌کار طولانی معادن چک مورد استفاده قرار گرفت (Ray & Singh, 2007).

انتشار کف به محل حریق باعث کاهش نشت هوا به منطقه استخراج شده، کاهش درجه حرارت و کاهش نرخ جذب اکسیژن توسط زغال سنگ می شود (Ray & Singh, 2007).

دو نوع کفی که در معادن بیش تر مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از:

#### • کف پر توسعه<sup>۱</sup>

کف پر توسعه یک نوع کف مکانیکی است که برای آتش سوزی های باز نسبتاً بزرگ مانند آتش سوزی های نوارنقاله یا آتش سوزی های جاده ای به خصوص زمانی که آتش سوزی نزدیک و قابل دسترس نباشد کاربرد دارد. این کف قابل استفاده در فواصل طولانی نیست و در همان محل مورد استفاده افزایش حجم پیدا می کند (Eisner & Smith, 1956).

استفاده از کف پر توسعه در حالات زیر محدود می شود (Linacre, 1969):

- در گالری هایی که ارتفاع بالای ۳ متر می باشد
- در آتش سوزی های عمیق در جاهایی که آتش سوزی باعث سقوط سقف می شود
- در معادن گازی که تمایل به تشکیل مخلوط انفجاری دارند
- در جاده های معدن با شیب بیش تر از ۱۰ در ۱ و یا عمق بیش از ۱۵ در ۵
- در جاده هایی که سیم کشی برقی وجود دارد مانند جاده های باربری

#### • کف سه فاز<sup>۲</sup>

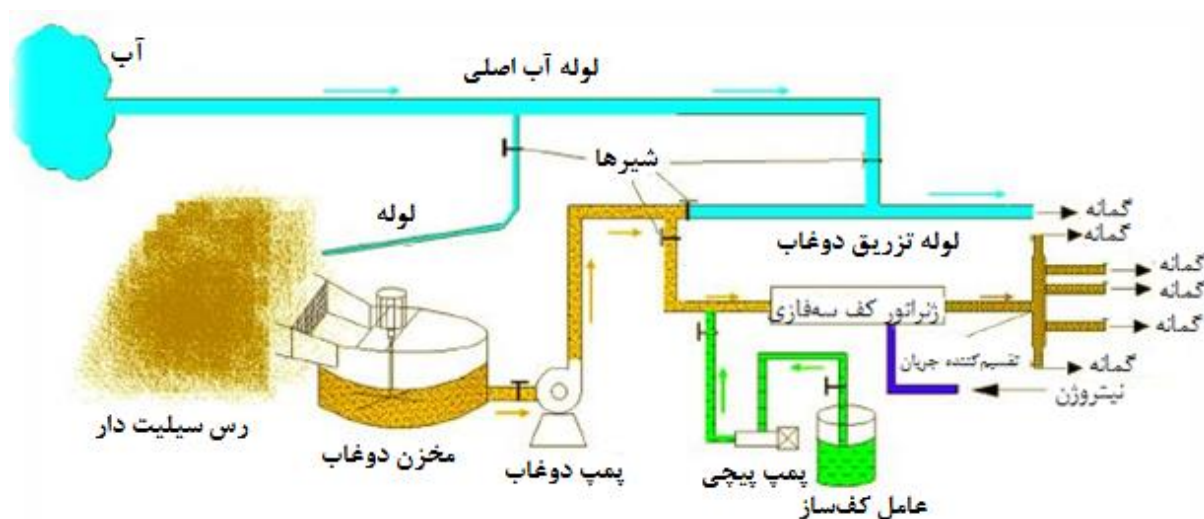
کف سه فاز، که می تواند در پیشگیری از حریق و خود سوزی در معادن زیرزمینی زغال سنگ به کار رود، از مواد غیر قابل احتراق (خاکستر بادی، گل زرد، و غیره)، گاز بی اثر (نیتروژن) و آب، که همگی مواد مؤثر برای کنترل آتش هستند، تشکیل شده است. ابتدا، عامل کف ساز به خاکستر بادی یا گل زرد اضافه شده، و پس از آن گاز نیتروژن تزریق می شود (Wang et al., 2011).

<sup>1</sup> - High expansion foam

<sup>2</sup> - Three- phase foam

در مقایسه با تکنولوژی و مواد موجود قبلی برای کنترل آتش سوزی، کف سه‌فازی مزایای استفاده از هر دو روش گاز بی‌اثر و دوغاب در کنترل آتش را ارائه می‌دهد (Wang et al., 2011).

شکل ۳-۵ یک سیستم کف سه‌فازی را جهت مهار حریق در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی نشان می‌دهد. این سیستم شامل دستگاه دوغاب، دستگاه عرضه نیتروژن و ژنراتور کف سه‌فازی و تقسیم جریان می‌باشد. این دستگاه‌ها به وسیله‌ی شیلنگ‌های فشار بالا و شیلنگ‌های آتش‌نشانی به هم متصل شده‌اند. در طی فرآیند کنترل حریق، آب لوله‌های اصلی برای کنترل مستقیم حریق استفاده می‌شود. از شاخه اصلی، یک شاخه لوله آب به سمت مخزن دوغاب کشیده می‌شود. با اضافه کردن رس سیلت‌دار به آب دوغاب آماده می‌شود سپس دوغاب به لوله تزریق تحویل داده می‌شود. بخشی از دوغاب به طور مستقیم به گمانه‌ها تزریق می‌شود و بخش دیگر آن برای تولید کف سه‌فازی به لوله‌های ویژه‌ای تحویل داده می‌شود، سپس عامل کف ساز به دوغاب از طریق یک پمپ پیچی اضافه می‌شود. دوغاب و عامل کف ساز با هم مخلوط شده و سپس به ژنراتور کف سه‌فازی وارد می‌شود. برای تولید کف سه‌فازی منبع گاز نیتروژن به ژنراتور کف سه‌فازی متصل می‌شود. برای اطمینان از تزریق هم‌زمان به چندین گمانه و بهبود بهره‌وری کنترل حریق یک جریان تقسیم‌کننده طراحی شده است سپس در نهایت کف به گمانه‌ها تزریق می‌شود (Zhenlu et al., 2015).



شکل ۳-۵: نمودار طرح کلی از سیستم کف سه‌فازی برای خاموش کردن حریق در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی؛ این سیستم قادر به دستیابی سیستم تزریق آب، دوغاب و تزریق فوم سه‌فازی با توجه به شرایط خاص حریق است (Zhenlu et al., 2015).

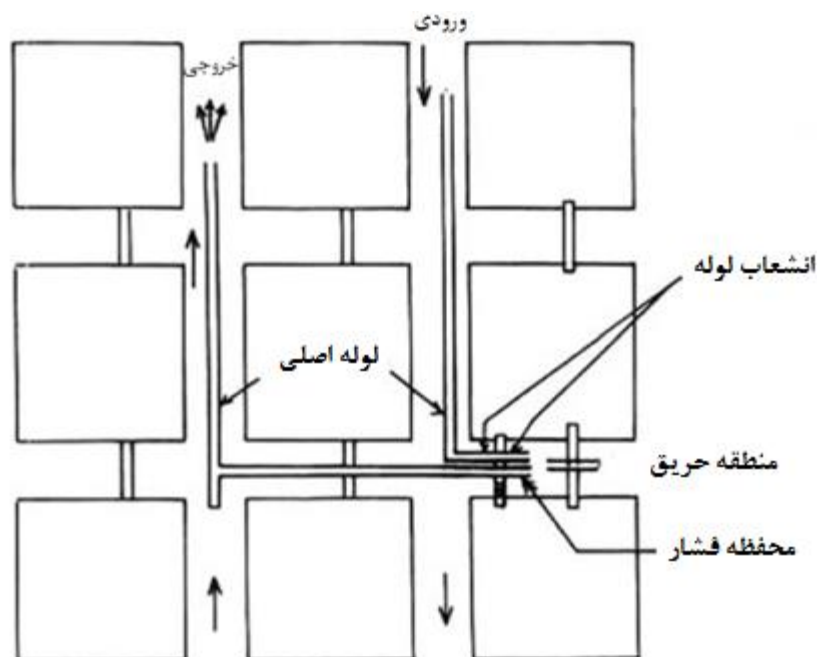
ه- تعادل دینامیکی فشار<sup>۱</sup>

در اکثر آتش‌سوزی‌های زیرزمینی، مناطق آسیب دیده به وسیله‌ی انفجار مسدود و بسته شده و جداسازی سیستم‌های نگهداری باعث حذف نشت هوا می‌شود طوری که با توجه به کمبود اکسیژن دچار التهاب می‌شود. با این حال تجربه نشان داده شده است که اغلب ایجاد کارگاه‌هایی تحت اختلاف فشار قابل توجهی از هوا غیر ممکن است. اگر فشار در سراسر کارگاه‌ها خنثی شود می‌توان از نشت هوا جلوگیری کرد. این اختلاف فشار در سراسر منطقه مهروموم شده و کارگاه‌ها را می‌توان با استفاده از روش تعادل دینامیکی فشار خنثی کرد (Bhowmick et al., 1992).

در این روش فشار متعادل را می‌توان از طریق تنظیم آگاهانه سرعت جریان هوا به دست آورد، برای این کار ابتدا باید شبکه‌ی تهویه را در اطراف منطقه‌ی آسیب دیده تنظیم کرد، سپس در مرحله بعد فشار باقی‌مانده توسط تنظیم نرخ جریان هوا از طریق لوله‌های فشار متعادل می‌شود (Bhowmick et al., 1992).

فشار متعادل جریان در لوله‌های اتصال به وسیله‌ی فشار تهویه‌ی معدن تأمین می‌شود. اتاق فشار برای حفظ تعادل فشار با ایجاد یک مانع آجری نازک با درب در فاصله‌ی ۲ تا ۳ متری از کارگاه‌های جدا شده قرار دارند. کارگاه‌های جدا شده باید در نزدیکی محل حریق باشند. برای اتصال فشار محفظه‌ی اصلی دو لوله گذاشته می‌شود. لوله‌ی نمونه‌برداری هوا در سراسر کارگاه‌های جدا شده برای اندازه‌گیری اختلاف فشار استفاده شده است (Bhowmick et al., 1992). اختلاف فشار در سراسر کارگاه با تنظیم نرخ جریان هوا از طریق این لوله‌ها متعادل می‌شود. شکل ۳-۶ طرح شماتیکی از تعادل دینامیکی فشار را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> - Dynamic Balancing of Pressure



شکل ۳-۶: طرح شماتیکی از تعادل دینامیکی فشار در یک اتاق و پایه (Ray & Singh, 2007)

برای استفاده بهینه از روش تعادل دینامیکی فشار باید شرایط زیر مهیا باشد (Ray & Singh, 2007):

- منطقه‌ی مسدود شده نباید از طریق ترک‌ها و شکاف‌ها با سطح زمین در ارتباط باشد.
- میزان اختلاف فشاری که می‌تواند با تنظیم جریان هوا از طریق مدارهای تهویه خنثی شود، وابسته به طرح تهویه زون آسیب دیده می‌باشد. میزان تنظیم جریان هوا از طریق مدارهای تهویه صورت می‌گیرد بدون این‌که تأثیری بر تهویه‌ی معدن داشته باشد.
- برای خنثی کردن اختلاف فشار در آتش‌سوزی کارگاه باید موارد زیر رعایت شود (Ray & Singh, 2007):
- برای پی بردن به طیف وسیعی از تغییرات فشار، افت فشار باید ۲۴ ساعته در سراسر کارگاه کنترل شود.
- نرخ جریان هوا از طریق مدارهای مربوط به معدن تا حد امکان تنظیم شود طوری که اختلاف فشار در سراسر کارگاه به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد.

- فشار باقی مانده در سراسر کارگاه ناشی از تفاوت فشار اتمسفر یا فشار تولید شده توسط هرگونه تغییر در سیستم تهویه معدن می باشد که توسط نرخ جریان هوا می بایستی کنترل و خنثی شود که این کار به وسیله فشار محفظه اصلی و لوله های اتصال فشار صورت می گیرد.

## و- تهویه معکوس<sup>۱</sup>

تهویه معکوس یکی از مهم ترین روش ها برای کنترل حریق در مواقع اضطراری می باشد. موقعیت اضطراری در حریق باز بلافاصله پس از انفجار رخ می دهد. هدف اصلی این روش معکوس کردن فن برای جلوگیری از آلودگی کل فضای معدن با بخارهای سمی ناشی از جریان حریق می باشد. در ایالات متحده در معادن زیرزمینی زغال سنگ و فلزی از فن معکوس استفاده می شود (Hinsley, 1966).

قبل از معکوس کردن جریان هوا موارد زیر باید در نظر گرفته شود (Prasad & Rakeh, 1992):

- موقعیت و وسعت محل آتش سوزی و موقعیت بازماندگان
  - شرایط محل کار از قبیل میزان درجه حرارت و حضور گازهای سمی و قابل اشتعال
  - خطر احتمال انفجار
  - احتمال انفجار یا آتش سوزی در نزدیکی چاه قائم یا شیب دار
- به غیر از موارد فوق نوع و شرایط فن باید مورد بررسی قرار بگیرد. در مورد فن های گریز از مرکز، هم چنان که چرخه ی فن در حالت عادی به چرخش درمی آید جهت و جریان هوا را به کمک سیستم تهویه معکوس می کند. هم چنان که فن معکوس در جهت اصلی خود کار می کند باید راه های هوایی اضافی برای دور هوا ایجاد شود. طبق مقررات موجود در کشور هند، هر جزء مکانیکی سیستم تهویه در معادن زغال سنگ باید نوعی نصب و نگهداری شود که در صورت لزوم هوا را معکوس کند (Nagpur, 1994).

<sup>1</sup> - Reversal of Ventilation

طبق مقررات کشور روسیه، فن‌های اصلی معدن باید شرایطی را داشته باشند که هر ۱۰ دقیقه جریان هوا را به داخل معکوس کند (Hinsley, 1996).

در معادن استرالیا امکان معکوس کردن جریان تهویه در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی وجود ندارد، زیرا بسیاری از معادن استرالیا دارای گاز متان هستند و معکوس کردن جریان تهویه در مناطق تخریب شده خطرناک است (Ray & Singh, 2007).

### ز- مه پاشی<sup>۱</sup>

سیستم‌های مه‌پاشی به آسانی در دسترس هستند، طراحی و ساخت آن‌ها ساده است، نگهداری آن‌ها راحت است، در کنترل آتش‌سوزی‌های مختلف مؤثر است، غیر سمی است، از سایر سیستم‌های دیگر برای کنترل حریق ارزان‌تر است و هیچ مشکل زیست‌محیطی ایجاد نمی‌کند (Ray & Singh, 2007).

اگر روش مه‌پاشی در منطقه‌ای که دچار حریق شده است اعمال شود، با حل گازهای سمی در محلول در طول احتراق هوا را پاک می‌کند، دودها و گردوغبار را از بین می‌برد و در نتیجه دید بهبود می‌یابد (Mawhinney & Richardson, 1996). این سیستم در شکل ۷-۳ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳: نمونه‌ای از سیستم مه‌پاشی برای مهار حریق (Ray & Singh, 2007).

<sup>۱</sup> - Water Mist

## ۳-۴- جمع بندی

ارزیابی و تخمین خطر حریق در معادن زغال سنگ یک نیاز اصلی و اولیه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت حریق به حساب می آید که باید در تمامی عمر یک معدن صورت پذیرد. در این فصل روش های مختلف ارزیابی خطر حریق که توسط دانشمندان مختلف ارائه شده بود ارائه شد. در سری تحقیقات انجام شده، تمامی پارامترهای کلیدی مورد توجه قرار داده نشدند و نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه واحد و اساسی برای ارزیابی خطر حریق در معادن زغال سنگ نمی انجامد؛ لذا دستیابی به یک روش که بتوان با استفاده از آن خطر حریق در معادن زغال سنگ را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد، یکی از اهداف محققان به شمار می آید. برای این منظور باید تمامی پارامترهای مؤثر بر حریق شناسایی شود که در فصل چهارم به بررسی این عوامل پرداخته خواهد شد.



## فصل ۴: بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر انواع حریق

#### ۴-۱- مقدمه

حریق یکی از مخاطرات جبران ناپذیر در معادن زغال سنگ است که باعث خسارات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی می شود. همان طور که در فصل دوم به آن اشاره شد، حریق در معادن زیرزمینی به دو گروه آتش سوزی باز و آتش سوزی بسته تقسیم بندی می شود. اکثر آتش سوزی های بسته ناشی از خودسوزی زغال سنگ است. پارامترهای مختلفی باعث وقوع این آتش سوزی ها می شود. در این تحقیق از آن جایی که هدف بررسی حریق در معادن زغال سنگ و ارائه ی سیستم طبقه بندی در این زمینه است؛ لذا به بررسی همه جانبه ی پارامترهای مختلف براساس منابع معتبر موجود پرداخته شده است.

در بررسی پدیده حریق در معادن زیرزمینی زغال سنگ، محققان بسیاری تأثیر پارامترهای مختلف بر انواع حریق را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعات انجام شده، به طور مناسبی تأثیر پارامترهای مختلف و انواع روش های کنترلی حریق را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. ایراد مهم این مطالعات این است که تمامی این مطالعات ترکیب تأثیرات پارامترهای مختلف بر انواع حریق را بررسی نکرده و به وزن و درجه اهمیت هر یک از پارامترها اشاره ای نکردند. در ادامه این فصل مهم ترین پارامترهای مؤثر بر حریق مورد بحث قرار گرفته اند.

#### ۴-۲- بررسی عوامل مؤثر بر حریق در معادن زیرزمینی زغال سنگ

در تمام بخش ها و تجهیزات موجود در یک معدن زیرزمینی زغال سنگ احتمال حریق وجود دارد، بررسی این که چه عواملی باعث بروز حریق می شود بسیار مهم می باشد. با توجه به این که در معادن زیرزمینی حریق به

دو گروه آتش‌سوزی باز و بسته تقسیم‌بندی می‌شود از طرف دیگر بیش‌تر آتش‌سوزی‌های بسته ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ است. لذا می‌بایستی عوامل مؤثر در آتش‌سوزی باز و خودسوزی را مورد بررسی قرار دهیم.

#### ۴-۲-۱- عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز

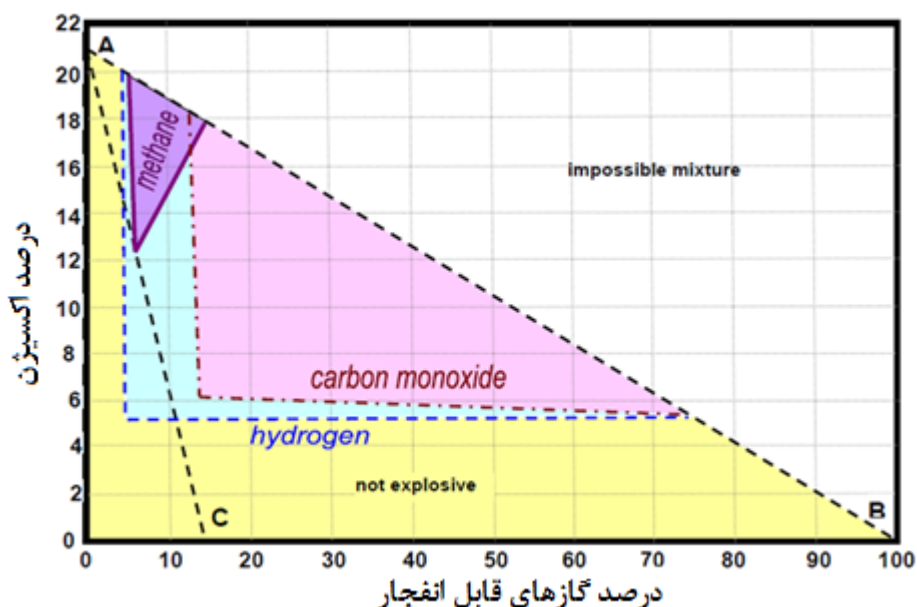
همان‌طور که در فصل دوم به آن اشاره شد، آتش‌سوزی باز شامل سوختن اشیاء و لوازم مختلف موجود در معدن است. این نوع آتش‌سوزی عمدتاً بر اثر یکی از عوامل زیر رخ می‌دهد:

- ایجاد جرقه‌های الکتریکی در اثر وضعیت نادرست تجهیزات برقی و عایق‌کاری نادرست کابل‌های برق
- استفاده از مواد منفجره و چاشنی‌های غیر مجاز
- کاربرد چوب در بخش‌های مختلف معدن
- روغن‌های معدنی و چربی
- جوشکاری و تخلیه الکتریسیته ساکن
- گاز هوای فشرده
- رسیدن شعله چراغ‌های معدنی به مواد سوزا
- سطوح داغ مانند سیستم‌های اگزوز
- دیزل، برق ماشین‌آلات و تجهیزات مکانیکی
- جرقه زدن و گرم شدن تیغه‌های زغال‌بری
- اصطکاک ناشی از یاتاقان‌های معیوب، زنجیرهای نوار نقاله<sup>۱</sup>، درام‌ها، چرخ‌ها و محورها، مالش تسمه نوار نقاله با برخی از اشیاء و سیستم ترمز در وسایل نقلیه معدن (Denton et al., 2012).

<sup>۱</sup> - Conveyor Idlers

<sup>۲</sup> - Drums

- انفجار گاز متان: طبق مثلث کوارد<sup>۱</sup> که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است ترکیب متان با هوا در ۴/۵ تا ۱۴ درصد با اکسیژن کافی قابل انفجار است ولی اگر اکسیژن از ۱۲ درصد کم تر باشد این مخلوط قابل انفجار نیست (MDG 1006, 2011).



شکل ۴-۱: مثلث کوارد (Cheng & Luo, 2011)

- انفجار گرد زغال: منبع اصلی انفجار گرد زغال حرارت است. اکثر اوقات انفجار گرد زغال بعد از انفجار متان صورت می گیرد چون در موقع انفجار متان حرارت زیاد تولید می شود و علاوه بر آن موج انفجار تولید ابری از گرد زغال می کند که این ابر قابل انفجار است.

حداقل مقدار گرد زغال قابل انفجار باید ۴۰ گرم در متر مکعب هوا معلق باشد. اگر در ترکیب هوا متان موجود باشد حداقل این ترکیب پایین تر است، بنابراین برای جلوگیری از حریق در معادن گازدار باید مقدار گرد زغال موجود در نظر گرفته شود (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

عوامل مؤثر در آتش سوزی باز در معادن زیرزمینی زغال سنگ در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> - Coward's triangle



شکل ۴-۲: عوامل مؤثر در آتش‌سوزی باز

#### ۴-۲-۲- عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ

هر حادثه ناشی از احتراق خودبه‌خودی، هرچقدر هم که ناچیز باشد، اگر در مراحل اولیه به طور مؤثر و کارآمد تشخیص داده نشود می‌تواند به آتش‌سوزی باز یا انفجار گاز با نتایج ویرانگر تبدیل شود. بنابراین باید پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ مورد بررسی قرار بگیرد (Bagchi & Sahu, 2010).

مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ را می‌توان به سه دسته عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری تقسیم می‌شود که در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۴-۲-۱- عوامل ذاتی

کلیه عوامل ذاتی مؤثر در خودسوزی زغال سنگ در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.

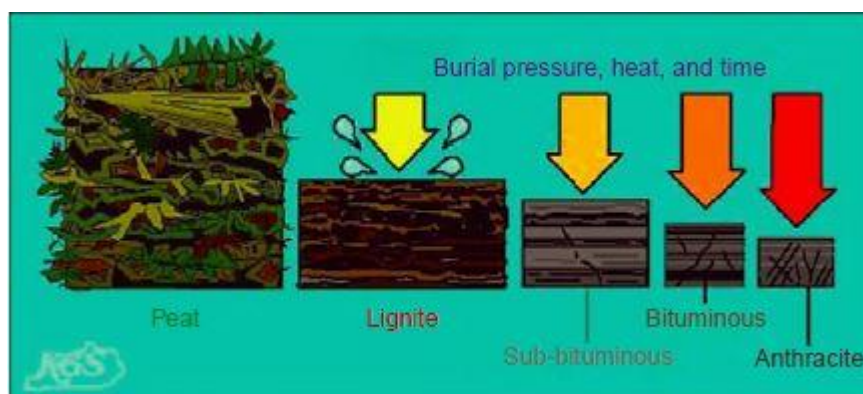


شکل ۴-۳: عوامل ذاتی مؤثر در خودسوزی زغال سنگ

الف - درجه زغال شدگی<sup>۱</sup>

زغال سنگ‌هایی با درجه زغال شدگی پایین‌تر بیش‌تر مستعد ابتلا به حرارت خودبه‌خودی هستند. زغال سنگ‌هایی با درجه زغال شدگی بالا، دارای مقدار زیادی کربن و درصد کمی اکسیژن است. آنتراسیت<sup>۲</sup> نوعی زغال سنگ با درجه زغال شدگی بالا می‌باشد و سرعت اکسیداسیون در آن کند است، در حالی که لیگنیت<sup>۳</sup> نوعی زغال سنگ با درجه زغال شدگی پایین است و با توجه به سرعت بالای اکسیداسیون آن، نمی‌توان آن را بعد از استخراج برای مدت طولانی ذخیره کرد (Jones & Vais, 1991).

اولین گام در زغال شدگی، با توجه به وزن رسوبات پوشاننده، طبق شکل ۴-۴ حذف آب است. در زغال سنگ‌هایی با درجه زغال شدگی بالا، میزان کربن افزایش می‌یابد و میزان غلظت اکسیژن و هیدروژن کاهش می‌یابد (Hessley et al., 1986).



شکل ۴-۴: افزایش زغال شدگی طی فشار، گرما و زمان (<http://www.uky.edu/KGS/Coal>)

مکانیزم‌هایی برای افزایش درجه زغال شدگی وجود دارد که عبارت‌اند از (Burnham & Sweeney, 1989):

۱- عمق دفن، با افزایش عمق فشار و حرارت افزایش می‌یابد و درجه زغال شدگی افزایش می‌یابد.

۲- فعالیت‌های آذرین و تکتونیکی

۳- مایع‌های هیدروترمال (جریان سیال در دمای بالا)

<sup>۱</sup> - Rank of Coal

<sup>۲</sup> - Anthracite

<sup>۳</sup> - Lignite

۴- بازتاب ویتترینیت ( $R_0$ )، این شاخص درصد نور منعکس شده از سطح جلا خورده ویتترینیت می باشد و طبق رابطه ۴-۱ با توجه به تغییر غلظت کربن و اکسیژن به دست می آید. برای هر ۱۰ درجه سانتی گراد افزایش دما، بازتاب ویتترینیت دو برابر می شود.

$$R_0\% = 12 \exp \left[ -3.3 \left( \frac{H}{C} \right) \right] - \left( \frac{O}{C} \right) \quad (۴-۱)$$

### ب- ترکیب سنگ شناسی<sup>۱</sup>

ناهنجاری در این رابطه را می توان به ترکیب سنگ زغال نسبت داد. با این حال این پدیده هنوز به طور کامل درک نشده و نیاز به مطالعه بیش تری دارد. به این منظور کمیسیون ملی زغال سنگ یک سری از آزمایش ها اکسیداسیون را بر روی ترکیبات سنگ دست چین شده زغال انجام داد. براساس این آزمایش ها زغال هایی که حاوی ویتترینیت و اکسینیت هستند احتراق خودبه خودی بالایی دارند و زغال هایی که حاوی اینترتینیت هستند کم تر دچار احتراق خودبه خودی می شوند (Santosh & Sahu, 2011-2012). درجه زغال شدگی نسبت به ترکیبات سنگ شناسی نقش مهم تری را در پدیده احتراق خودبه خودی ایفا می کند (Walters, 1996).

### ج- دمای ذاتی زغال سنگ

با افزایش دمای زغال جذب اکسیژن سریع تر می شود. با افزایش دمای زغال سنگ به ازای هر ۱۸ درجه فارنهایت نرخ اکسیداسیون تقریباً دو برابر می شود و خودسوزی زغال افزایش می یابد (Bagchi & Sahu, 2010).

### د- خواص فیزیکی

تعدادی از خواص فیزیکی مانند تخلخل، سختی، هدایت حرارتی و گرمای ویژه می تواند بر اکسیداسیون زغال سنگ تأثیر بگذارد. به عنوان مثال با افزایش تخلخل قابلیت خودسوزی زغال افزایش می یابد.

<sup>۱</sup> Petrographic Composition

## ه- گرمایش ناشی از حرکت زمین

در معدن حرارت به وسیله حرکت زمین می‌تواند تولید شود بنابراین می‌تواند یکی از دلایل حرارت خودبه‌خودی زغال‌سنگ باشد (Santosh & Sahu, 2011-2012).

## و- اندازه ذرات<sup>۱</sup>

زغال‌سنگ جامد به دلیل سطح کوچک و نفوذپذیری پایین، خطر بسیار کمی در برابر احتراق خودبه‌خودی دارد. با این حال به طور کلی زمانی که زغال‌سنگ در معدن می‌شکند یا در اثر فشار سقف از هم پاشیده می‌شود یا در اثر سقوط خرد می‌شود بیش‌تر تحت اثر احتراق خودبه‌خودی قرار می‌گیرند زیرا هر چه ابعاد زغال کاهش می‌یابد سطح بیش‌تری از زغال تحت تأثیر اکسیژن قرار می‌گیرد (Santosh & Sahu, 2011-2012).

## ز- رطوبت محتوی<sup>۲</sup>

زغال‌سنگ‌ها دارای رطوبت ذاتی هستند به طوری که مقدار آن‌ها به نوع زغال و درجه زغال‌شدگی آن و نفوذپذیری لایه زغالی بستگی دارد (Santosh & Sahu, 2011-2012).  
اثر رطوبت بر روی حرارت خودبه‌خودی نامشخص است، گاهی اوقات مقدار کمی رطوبت می‌تواند باعث ایجاد حرارت خوبه‌خودی شود در حالی که در برخی موارد مقدار زیادی رطوبت می‌تواند گرمایش را به تأخیر بی‌اندازد. با این حال خشک شدن و خیس شدن متناوب زغال‌سنگ در یک ذخیره سطحی فرآیند گرمایش را سرعت می‌بخشد (Abhishek & sahu, 2010).

## ح- خاکستر محتوی<sup>۳</sup>

با افزایش میزان خاکستر محتوی، حرارت خودبه‌خودی زغال‌سنگ کاهش می‌یابد. بخش‌هایی از خاکستر مانند آهک، سودا و ترکیبات آهن اثر شتاب‌دهنده دارند ولی میزان آن‌ها در زغال کم است در حالی که مواد

<sup>۱</sup>- Particle Size

<sup>۲</sup>- Moisture content

<sup>۳</sup>-Ash Content

معدنی دیگر از قبیل آلومینیوم<sup>۱</sup> و سیلیس<sup>۲</sup> که درصد قابل توجهی از زغال را تشکیل می‌دهند باعث اثر تأخیری در فرآیند اکسیداسیون می‌شود (Kaymakci & Didari, 2002).

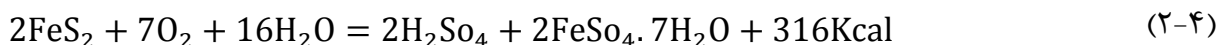
### ط - پیریت محتوی<sup>۳</sup>

قبلاً این باور بود که حرارت تکامل یافته از اکسیداسیون پیریت ناشی از حرارت خودبه‌خودی زغال‌سنگ است ولی در حال حاضر ثابت شده است که وجود پیریت در زغال‌سنگ درجه حرارت زغال را افزایش می‌دهد بنابراین باعث تسریع در فرآیند گرمایش زغال می‌شود (Santosh & Sahu, 2011-2012).

وجود پیریت در زغال باعث خرد شدن می‌شود و سطح بیش‌تری از زغال تحت تأثیر جریان هوا و اکسیژن قرار می‌گیرد و فرآیند اکسیداسیون سرعت می‌گیرد (Santosh & Sahu, 2011-2012). برای این که پیریت در فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ تأثیر قابل توجهی داشته باشد باید غلظت آن در زغال بیش‌تر از ۲ درصد باشد (MDG 1006, 2011).

### ی - گوگرد<sup>۴</sup>

تأثیر گوگرد مربوط به اضافه کردن کریستال سبز، سولفات آهن می‌باشد که در رابطه ۴-۲ نشان داده شده است. اغلب می‌توان با کربنات کلسیم، منیزیم و آهن ++ وجود آن را در زغال‌سنگ خنثی کرد.



زغال‌سنگ سولفات‌ه در حضور اکسید آهن بیش‌تر با اکسیژن واکنش می‌دهد بنابراین وجود گوگرد گرمایش خودبه‌خودی زغال را افزایش می‌دهد (Santosh & Sahu, 2011-2012).

### ک - ضریب انتقال حرارت<sup>۵</sup>

هرچقدر زغال‌سنگ فشرده‌تر باشد انتقال حرارتی در آن بیش‌تر است (Santosh & Sahu, 2011-2012).

<sup>۱</sup>- Alumina

<sup>۲</sup>- Silica

<sup>۳</sup>-Pyrite content

<sup>۴</sup>-Sulphur

<sup>۵</sup>- Thermal Conductivity

## ل- گازخیزی زغال

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 می افتد. بنابراین هر آرایش قابل توجهی از گاز متان می تواند شانس اکسیداسیون در حال توسعه به آتش سوزی را کاهش دهد (MDG 1006, 2011). اگر حفرات زغال از گاز خالی شوند ترکیب های اکسیژن و زغال شکل می گیرند بنابراین با گذشت زمان سطح بیش تری از زغال در معرض اکسیداسیون قرار می گیرد که نتیجه آن گرمایش زغال سنگ و شروع پدیده خودسوزی است (Ramlu, 2007).

زغال هایی که میزان گاز متان آنها بالای ۸ مترمکعب در هر تن زغال است، دچار اکسایش نمی شوند. بنابراین عامل اصلی کاهش خطر احتراق خودبه خودی زغال سنگ حضور گاز متان است زیرا میزان نفوذ اکسیژن را به حفره ها و شکستگی های زغال سنگ کاهش می دهد (صفاری، ۱۳۹۲).

## ۴-۲-۲- عوامل زمین‌شناسی

کلیه عوامل زمین‌شناسی مؤثر در خودسوزی و گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: عوامل زمین‌شناسی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ

## الف - ضخامت لایه

ضخامت زیاد لایه زغال‌سنگ خطر خودسوزی را افزایش می‌دهد، این افزایش خطر خودسوزی ناشی از

موارد زیر می‌باشد:

- با افزایش ضخامت لایه زغالی حجم زغال‌های شکسته و خرد شده افزایش می‌یابد که باعث افزایش

خودسوزی زغال می‌شود (MGD 1006, 2011).

- با افزایش ضخامت لایه زغالی سطح بیش‌تری از زغال در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد زیرا نمی‌توان در یک برش استخراجی، تمام ضخامت لایه را استخراج کرد لذا مقادیر زیادی زغال در سقف یا کف کارگاه استخراج باقی می‌ماند که خود منبع خطر است (Santosh & Sahu, 2011-2012).

- با افزایش ضخامت لایه زغالی باید لایه زغال را در چند مرحله استخراج کرد، در این حالت نرخ پیشروی آهسته است و لایه زغال مدت بیش‌تری در معرض جریان هوا قرار دارد که خود عامل مؤثر در خودسوزی می‌باشد (MGD 1006, 2011).

### ب- گرادیان زمین گرمایی<sup>۱</sup>

گرادیان زمین گرمایی به طور مستقیم بر حرارت خودبه‌خودی زغال‌سنگ تأثیر نمی‌گذارد. با این حال در جایی که شیب زمین گرمایی بالاست دمای لایه‌های زغالی با سرعت بیش‌تری افزایش می‌یابد و لایه‌های زغالی تمایل بیش‌تری به گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی خواهند داشت (Santosh & Sahu, 2011-2012).

### ج- شیب لایه

با افزایش شیب لایه حرارت خودبه‌خودی و خودسوزی زغال‌سنگ افزایش می‌یابد زیرا با افزایش شیب یک جریان هم‌رفتی ناشی از تفاوت درجه حرارت به وجود می‌آید که منجر به ورود جریان هوا به منطقه تخریب می‌شود (Abhishek & Sahu, 2010).

### د- عمق قرارگیری لایه

تأثیر عمق لایه بر خودسوزی زغال‌سنگ را می‌توان از دو دیدگاه بررسی کرد (صفاری، ۱۳۹۲):

- با افزایش عمق بار وارد به پایه‌های زغالی افزایش می‌یابد در این حالت زغال خرد می‌شود که خود یکی از دلایل خودسوزی زغال‌سنگ می‌باشد.

<sup>1</sup> - Geothermal Gradient

- با کاهش عمق لایه بین درزه و شکستگی‌های سطح و شکستگی و حفرات بالای لایه ارتباط به وجود می‌آید و باعث می‌شود که جریان هوا از سطح زمین به نواحی استخراج شده نفوذ کند که باعث افزایش خطر خودسوزی زغال می‌شود.

#### ه- تئوری باکتری‌ها

تجربیات عملی در معادن استرالیا و آفریقای جنوبی نشان داده است که تجزیه میکروبیولوژیکی چوب همراه با افزایش دما است که به خودسوزی کمک می‌کند. بنابراین از رها کردن چوب در فضای استخراج شده یا در محل‌های متروکه باید خودداری کرد، زیرا فرو ریختن زغال سقف کارگاه بر روی این قطعات، به خودسوزی و اشتعال زغال کمک خواهد کرد (Santosh & Sahu, 2011-2012).

#### و- وضعیت گسل‌ها

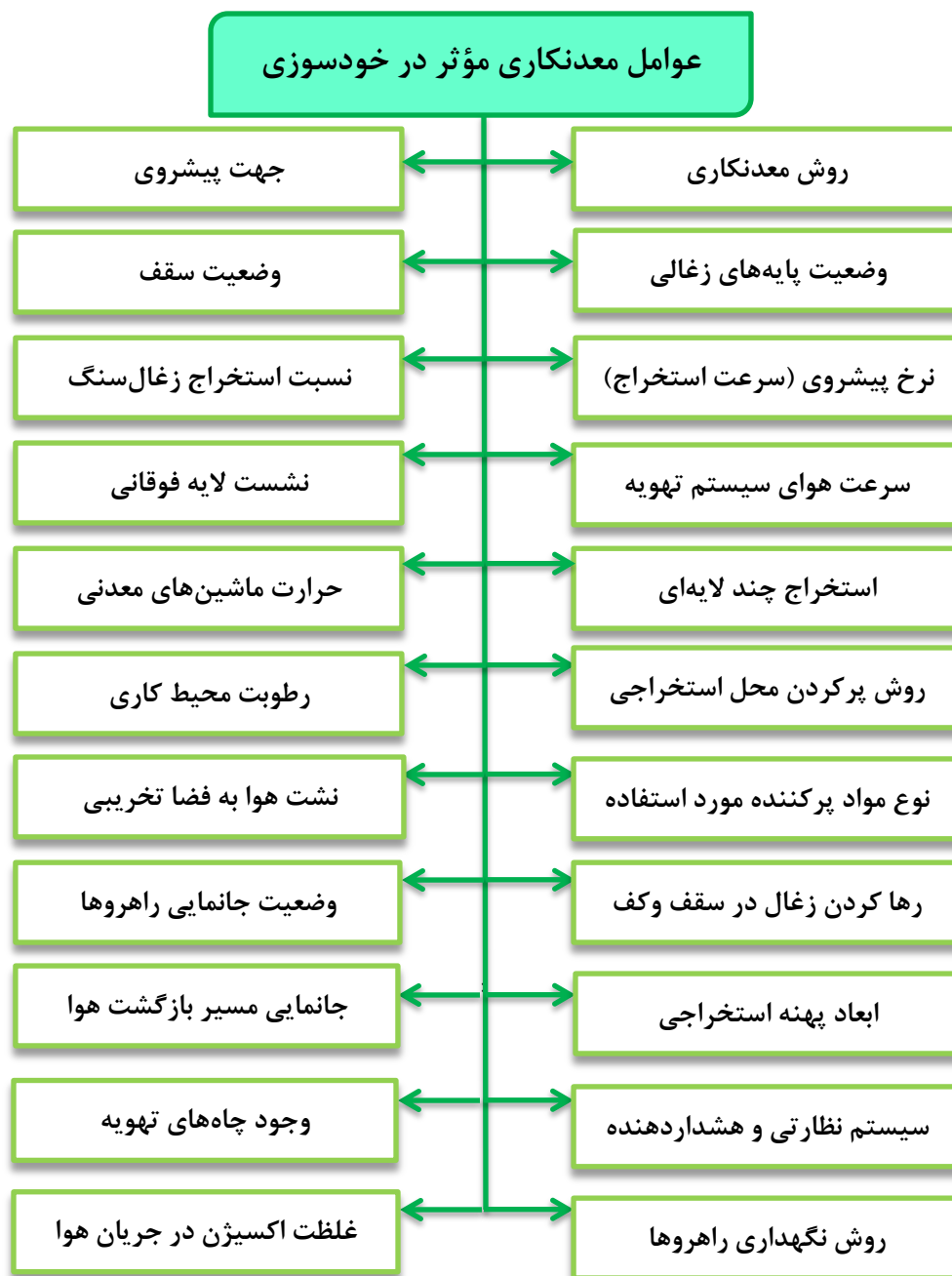
در عملیات استخراجی جبهه‌کار بلند و یا روش‌های دیگر، وجود گسل در طول سینه‌کار باعث ریزش سقف و تجمع زغال در کف کارگاه می‌شود. این امر علاوه بر تأثیرات منفی در میزان تولید، باعث خودسوزی زغال سنگ می‌شود (Bagchi & Sahu, 2010).

#### ز- وجود لایه‌های نزدیک هم

در مواردی که لایه‌های زغالی به فاصله کمی از یکدیگر قرار گرفته باشند، با استخراج یکی از لایه‌ها، لایه‌های دیگر تحت تأثیر استخراج لایه مذکور قرار می‌گیرد و نشست ایجاد می‌شود و در نتیجه، درز و شکاف برمی‌دارد که با نفوذ هوا در آن‌ها، خودسوزی زغال سنگ اتفاق می‌افتد (منتصر کوهساری، ۱۳۸۲).

## ۴-۲-۳- عوامل معدنکاری

عوامل معدنکاری مؤثر در خودسوزی زغال سنگ در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶: عوامل معدنکاری مؤثر در خودسوزی زغال سنگ

## الف - روش معدنکاری

اگر روش استخراج کامل تر باشد و زغال کمتری در سقف لایه، کف لایه و به صورت پایه‌های نگهداری از دست رود آن روش استخراج ایمن تر و خطر خودسوزی در آن کم تر است. بنابراین روش استخراج اتاق و پایه خطر بیش‌تری نسبت به روش استخراج جبهه کار طولانی دارد (MGD 1006, 2011).

هم چنین در روش استخراجی اتاق و پایه از ماشین استخراجی پیوسته<sup>۱</sup> استفاده می‌شود در حالی که در روش جبهه کار طولانی از شیرر لودر<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. بنابراین سرعت استخراج در روش اتاق و پایه کم تر است و این روش بیش‌تر مستعد خودسوزی می‌باشد (MGD 1006, 2011).

## ب - جهت پیشروی<sup>۳</sup>

جهت استخراج بر روی اکسیداسیون زغال و خودسوزی آن تأثیر مهمی دارد به این صورت که در سیستم‌های استخراج پیشرو<sup>۴</sup> در مقایسه با سیستم‌های استخراج پسرو<sup>۵</sup> میزان هوای بیش‌تری به فضای استخراج شده نشت می‌کند (Santosh & Sahu, 2011-2012). این نشت ناشی از اختلاف فشار هوای تهویه است که باعث اکسیداسیون و در نتیجه خودسوزی زغال می‌شود (MGD 1006, 2011).

## ج - وضعیت پایه‌های زغالی

برای بررسی شرایط پایه‌ها عمدتاً باید اندازه و قدرت پایه‌ها را مورد بررسی قرار دهیم. این عامل تأثیر مستقیم بر حرارت خودبه‌خودی زغال سنگ دارد. در حالت ایده‌آل، اندازه پایه‌ها به مقاومت زغال سنگ، عمق پوشش و تأثیر فعالیت‌های دیگر در پهنه بستگی دارد. افزایش انتشار متان نشانه خرد شدن زغال در اطراف ستون است. خرد شدن پایه‌ها یک مشکل عمده است که در اثر آن مسیرهای نشتی جریان هوا ایجاد می‌شود که متعاقباً باعث گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ می‌شود (Santosh & Sahu, 2011-2012).

<sup>۱</sup>- Continuous Miner Machine

<sup>۲</sup>- Shearer Loader

<sup>۳</sup>- Advance Direction

<sup>۴</sup>- Advance Longwall

<sup>۵</sup>- Retreating Longwall

## د- شرایط سقف

سقف ضعیف امواج ضربه‌ای را از خود عبور می‌دهد و باعث افزایش ترک و حفره روی سقف می‌شود و نفوذپذیری اکسیژن و جریان هوا افزایش می‌یابد. این مناطق به دلیل ماهیت خود، مستعد احتراق متان و حرارت خودبه‌خودی زغال‌سنگ هستند (Santosh & Sahu, 2011-2012).

## ه- نرخ پیشروی<sup>۱</sup>

این عامل وابسته به زمان، عرض پهنه (طول جبهه‌کار) و تجهیزات استخراجی است. به این صورت که هر چه طول جبهه‌کار افزایش یابد، سرعت پیشروی کم‌تر می‌شود و زغال زمان زیادتری در معرض جریان تهویه می‌ماند. در این حالت پتانسیل احتراق خودبه‌خودی افزایش می‌یابد (Singh et al., 2002).

## و- نسبت استخراج زغال‌سنگ

نسبت استخراج زغال‌سنگ، نسبت حجم زغال استخراج شده از لایه به کل زغال موجود در لایه است که هر چه این نسبت به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ کاهش می‌یابد. (Santosh & Sahu, 2011-2012).

## ز- سرعت هوای سیستم تهویه

سیستم تهویه و سرعت جریان هوا یک عامل پیچیده در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ است زیرا از یک طرف جریان هوا تأمین‌کننده اکسیژن است و نقش کلیدی را در سرعت واکنش اکسیداسیون ایفا می‌کند و از طرف دیگر سیستم تهویه مناسب باعث پراکندگی و اتلاف گرمای تولید شده ناشی از اکسایش زغال می‌شود و مانع از تجمع گرما می‌شود (صفاری، ۱۳۹۲).

اختلاف فشار بین دو ناحیه در یک معدن باعث می‌شود که جریان هوا از منطقه‌ای با فشار بالا به منطقه‌ای که فشار پایین است منتقل شود. مقدار جریان هوا در امتداد هر مسیر به مقاومت موجود در برابر جریان هوا

<sup>1</sup> - Rate of Advance

بستگی دارد، این عامل می‌تواند باعث جریان تهویه ناخواسته و نشت هوا شود. تهویه بالا و دیفرانسیل فشار باعث نشت هوا به داخل منطقه می‌شود و در مناطق مسدود شده و در اطراف ستون‌ها خطر احتراق خودبه‌خودی افزایش می‌یابد (MGD 1006, 2011).

### ح - نشت هوا به داخل فضای تخریب شده

برای ایجاد شرایطی که در آن احتراق خودبه‌خودی رخ دهد وجود اکسیژن و گرما لازم است. این مورد را می‌توان هنگام نشست هوا از طریق شکاف در زغال‌سنگ‌های جامد مشاهده کرد. این وضعیت در مسیر گذرگاه‌های هوا، در اطراف درب‌های تنظیم کننده و دیگر مکان‌های مشابه که احتمال نشست بالاست قابل مشاهده است (Abhishek & Sahu, 2010).

مقدار نشت جریان هوا به نواحی استخراج شده به مشخصات قسمت استخراج شده بستگی دارد. مشخصات قسمت استخراج شده یعنی این که در محل استخراج شده تخریب صورت گرفته است یا اینکه از روش‌های پرکردن استفاده شده است که میزان نشت هوا در روش‌های مختلف پر کردن نیز متفاوت می‌باشد به طوری که در روش پرکردن هیدرولیکی مقدار نشت به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد در حالی که در روش‌های تخریبی میزان نشت به حداکثر خود می‌رسد (صفاری، ۱۳۹۲).

### ط - استخراج چند لایه‌ای<sup>۱</sup>

استخراج در لایه‌ای که در بالا یا پایین لایه‌های دیگر قرار دارد که آن لایه‌ها قابلیت استخراج را دارند به خاطر شرایطی مانند سقف ضعیف، نشت هوا و غیره خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال افزایش می‌یابد. در هر جا که یک موقعیت چند لایه‌ای وجود دارد، هم در استخراج لایه اول و هم در استخراج لایه‌ها بالا و پایین خطر گرمایش خودبه‌خودی وجود دارد (صفاری، ۱۳۹۲).

<sup>۱</sup> - Multi-seam Working

## ۴-۳- جمع‌بندی

همان طور که در فصل‌های قبل به آن اشاره شد، حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ به دو گروه حریق باز و حریق بسته (خودسوزی) تقسیم‌بندی می‌شود. در این فصل پارامترهای مؤثر بر انواع حریق در معادن زغال‌سنگ معرفی شدند. هم چنین تأثیر این پارامترها بر حریق مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیقات انجام شده، پارامترهای مؤثر بر حریق به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفتند و به وزن پارامترهای مؤثر توجهی نشده است، در فصل بعدی به بررسی اهمیت پارامترهای مؤثر و ارائه یک سیستم طبقه‌بندی مبتنی بر پارامترهای مهم و کلیدی پرداخته خواهد شد.



# فصل ۵: ارائه سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای

## ارزیابی خطر حریق

## ۵-۱- مقدمه

آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی به خصوص در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ به مراتب جدی‌تر و خطرناک‌تر است زیرا گرما و محصولات ناشی از احتراق، در محل محصور جمع می‌شوند (مدنی، ۱۳۷۳). بنابراین ارزیابی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ یک نیاز اصلی است که باید طی عمر یک معدن مد نظر قرار بگیرد. زیرا این موضوع از لحاظ ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی دارای اهمیت فراوان است.

در این تحقیق با توجه به مرور برخی از منابع معتبر و شناخته شده جهان و نیز شناسایی بسیاری از پارامترهای مهم و مؤثر، تلاش شده است تا با جمع‌آوری این پارامترها در یک سیستم طبقه‌بندی، تلاش کلیه محققین این علم و نیز تلاش‌های پیشین به صورت یک روش هوشمند برای ارزیابی خطر حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ پیشنهاد شود.

مهم‌ترین مرحله در ارائه سیستم طبقه‌بندی و ارزیابی یک پدیده با تعداد مشخصی پارامتر، تعیین وزن هر پارامتر بر پدیده اصلی است. از آن جایی که کلیه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی، همواره بر اساس تعدادی پارامتر مرکب و در ارتباط با هم ارائه می‌شوند، تأثیر توأم هر یک از پارامترها، ارزیابی پدیده نهایی را دشوار می‌کند؛ لذا تعیین وزن هر پارامتر، همواره دغدغه اصلی در ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی بوده است (حسینی، ۱۳۷۸).

در این تحقیق برای وزن‌دهی پارامترهای موجود در سیستم طبقه‌بندی از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی<sup>۱</sup> (FDAHP) و نیز روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) استفاده شده است.

## ۵-۲- تعیین پارامترهای مؤثر بر حریق

در سیستم‌های طبقه‌بندی همواره سعی می‌شود با کم‌ترین تعداد پارامترها بهترین قضاوت صورت گیرد؛ لذا برای ارائه‌ی سیستم طبقه‌بندی جدید و پیش‌بینی اندیس پتانسیل حریق معادن (MFPI<sup>۲</sup>)، استفاده از تمامی پارامترهای اشاره شده در فصل چهارم از لحاظ مهندسی امر پسندیده‌ای نیست. از طرفی همه پارامترهای مورد اشاره در فصل چهارم دارای شاخص کمی و آزمایشگاهی نیستند. هم‌چنین تعدادی از پارامترهای مورد اشاره با همدیگر هم‌پوشانی داشته و طبیعت برخی از پارامترها تعداد دیگری از پارامترها را دربرمی‌گیرند.

در توسعه اندیس پتانسیل حریق معادن، سه اصل اساسی زیر مورد توجه قرار گرفته است (صفاری، ۱۳۹۲):

۱- از کم‌ترین تعداد پارامترها برای طبقه‌بندی استفاده شده است.

۲- از به کارگیری پارامترهای هم‌ارزش، هم‌ارز و دارای هم‌پوشانی پرهیز شود.

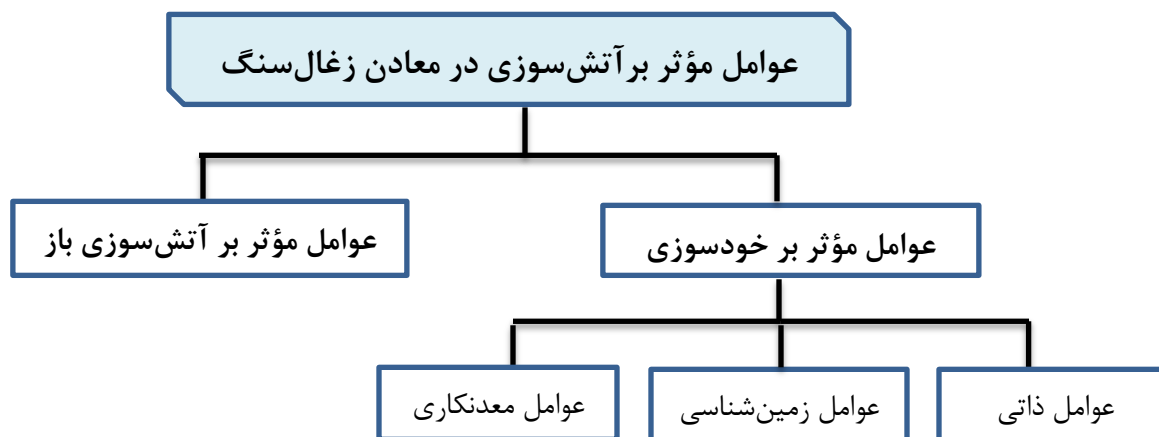
۳- از به کارگیری پارامترهایی که قابلیت اندازه‌گیری ندارند پرهیز شود.

طبق شکل ۵-۱ عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن ۳ اصل فوق تعدادی از پارامترهای اولیه حذف شدند. پارامترهای آورده شده در شکل ۵-۲ و ۵-۳ تقریباً تمامی عوامل مؤثر بر حریق را به خوبی پوشش می‌دهند؛ لذا می‌توان با استفاده از این پارامترها، به دیدی روشن از قابلیت حریق دست یافت.

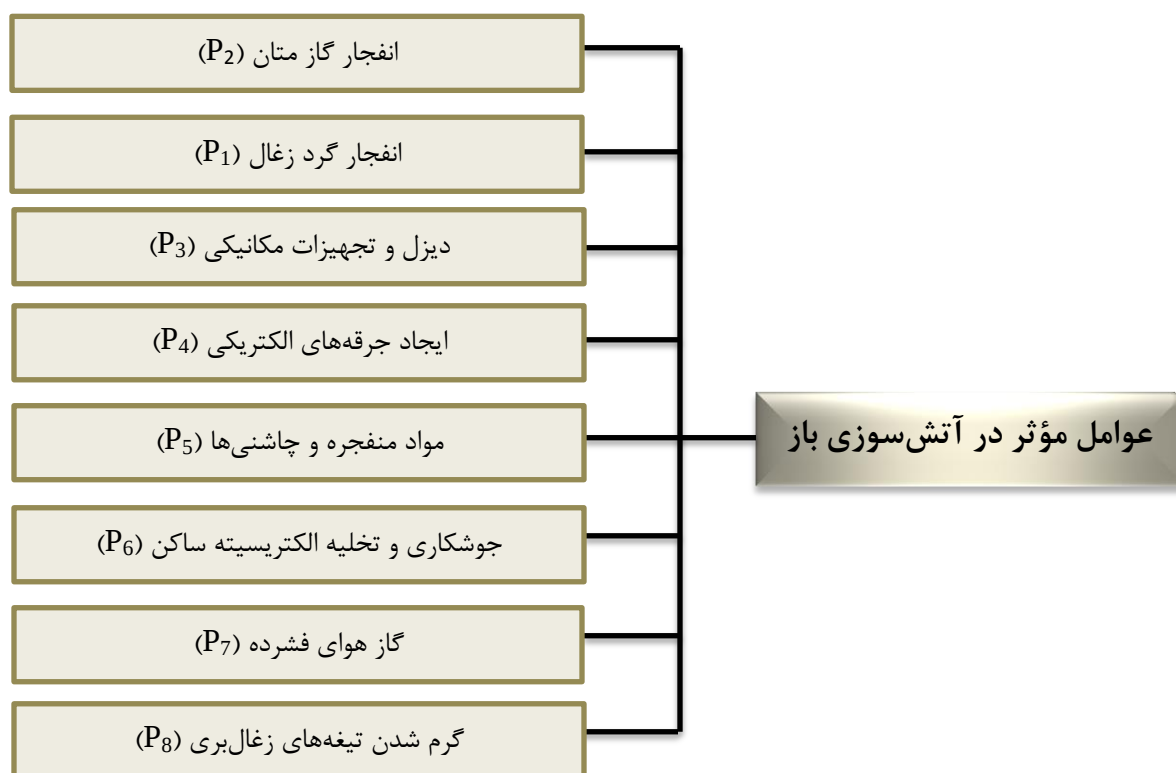
در ادامه، مراحل مختلف روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی و سیستم‌های مهندسی سنگ در دو بخش جداگانه آورده شده است و سپس سیستم طبقه‌بندی جدید ارائه شده است.

<sup>۱</sup> - Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

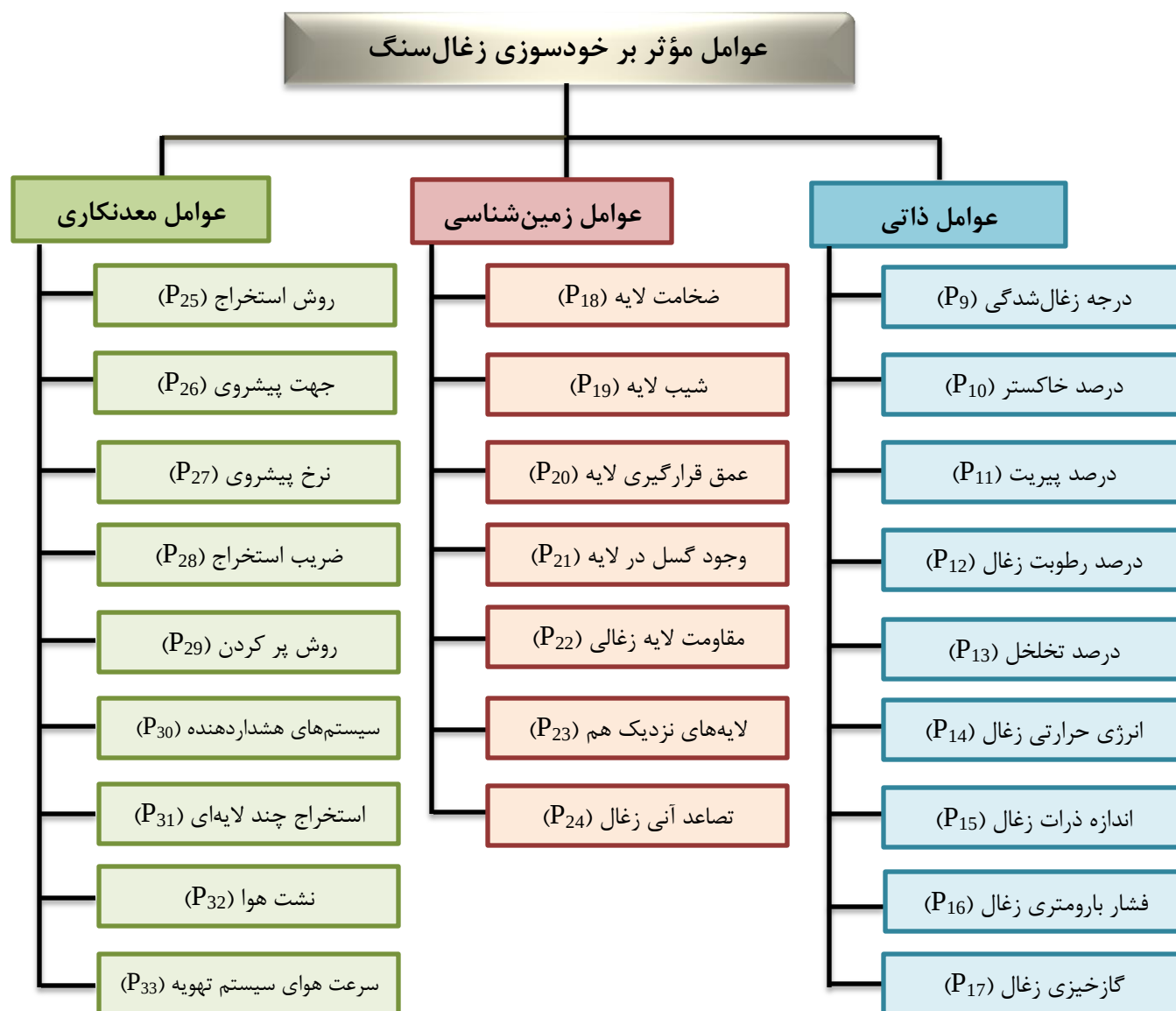
<sup>۲</sup> - Mine Fire Potential Index



شکل ۵-۱: عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی در معادن زغال سنگ



شکل ۵-۲: عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی در معادن زغال سنگ



شکل ۵-۳: عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی در معادن زغال سنگ

### ۵-۳- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی

استفاده از دانش و دیدگاه تخصصی یک مجموعه در تصمیم‌گیری پیرامون مسائلی که ماهیت کیفی دارند بسیار راه‌گشا است. تکنیک دلفی یکی از روش‌های کسب دانش گروهی است که در تصمیم‌گیری پیرامون مسائل کیفی نیز کاربرد دارد (Habibi et al., 2014).

محققان زیادی تعریف ارائه شده توسط لینسون<sup>۱</sup> و توراف<sup>۲</sup> را به کار بردند که تکنیک دلفی را به صورت «روشی برای ساختاردهی یک فرآیند ارتباط گروهی تعریف کنند به طوری که این فرآیند به گروهی از افراد، به عنوان یک کل، امکان حل یک مسئله پیچیده را می‌دهد». هدف اصلی روش دلفی دستیابی به قابل اعتمادترین اجماع گروهی از نظرات خبرگان به واسطه یک سری از پرسش نامه‌های متمرکز همراه با بازخورد کنترل شده می‌باشد. با کسب اجماع گروهی از خبرگان به وسیله این فرآیند، محققان می‌توانند مسائل را شناسایی نموده و اولویت بندی کنند و چهارچوبی را برای تشخیص آن‌ها توسعه دهند (نصیریانی و همکاران، ۱۳۸۷).

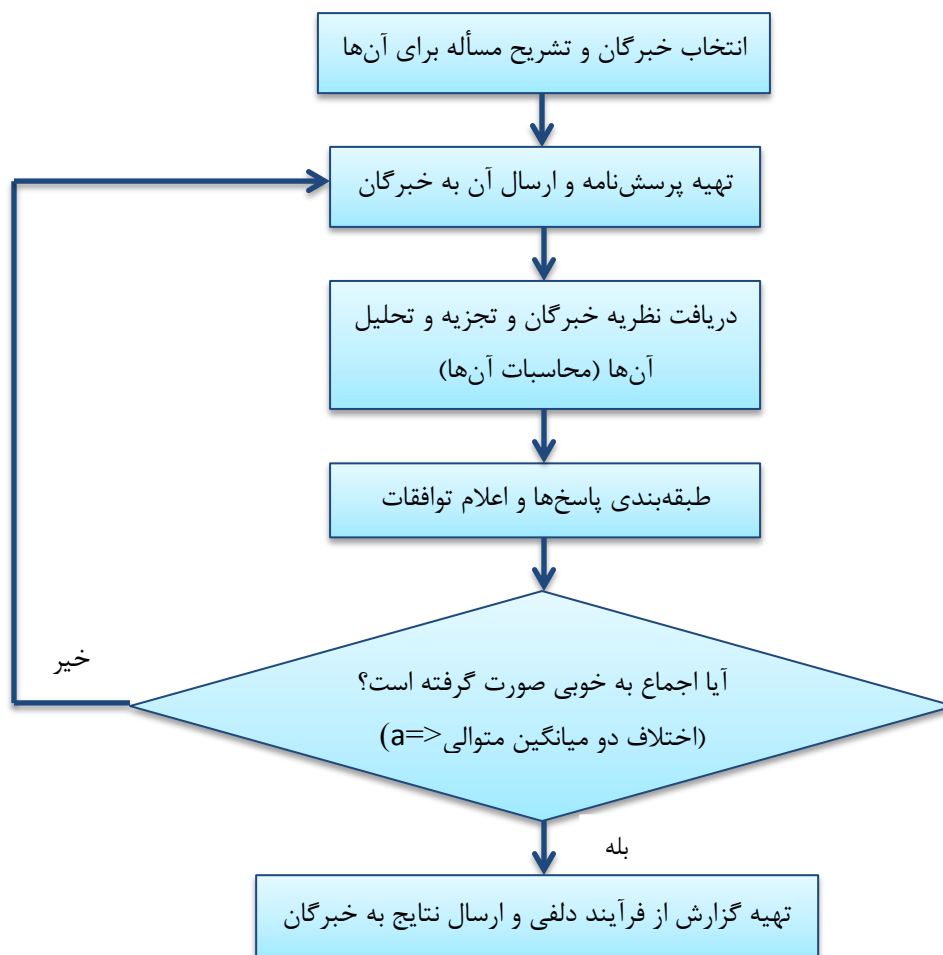
روش سنتی دلفی، همیشه از همگرایی پایین نظرات متخصصان، هزینه اجرایی بالا و احتمال حذف نظرات برخی از افراد رنج برده است. هم‌چنین تصمیمات اتخاذ شده توسط خبرگان، براساس صلاحیت فردی آن‌ها بوده و به شدت ذهنی است. در این گونه موارد استفاده از اعداد قطعی منجر به نتایجی دور از واقعیت خواهد شد. بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (با به کارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلند مدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی بپردازیم. بدین ترتیب اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان دریافت اخذ نموده و مورد تحلیل قرار می‌دهیم. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می‌شود. در روش دلفی فازی معمولاً خبرگان نظریات خود را در قالب حداقل مقدار، ممکن‌ترین مقدار و حداکثر مقدار (اعداد فازی مثلثی) ارائه می‌دهند. سپس میانگین نظر خبرگان (اعداد ارائه شده) و میزان اختلاف نظر هر فرد خبره از میانگین محاسبه شود. در مرحله بعد این اطلاعات برای اخذ نظریات جدید به خبرگان ارسال می‌شود. سپس هر فرد خبره براساس اطلاعات حاصل از مرحله قبل، نظریه جدیدی را ارائه می‌دهد یا نظریه قبلی خود را اصلاح می‌کند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که میانگین اعداد فازی به اندازه کافی با ثبات شود (عطایی، ۱۳۸۹).

یکی از کارآمدترین این تکنیک‌ها، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی است.

<sup>۱</sup> - Linson

<sup>۲</sup> - Toraf

مراحل اجرایی روش دلفی فازی در واقع ترکیبی از اجزای روش دلفی و انجام تحلیل‌ها بر روی اطلاعات با استفاده از تعاریف نظریه‌ی مجموعه‌های فازی است. الگوریتم اجرای روش دلفی فازی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است (جعفری، ۱۳۸۶).



شکل ۴-۵: الگوریتم اجرای روش دلفی فازی (جعفری، ۱۳۸۶)

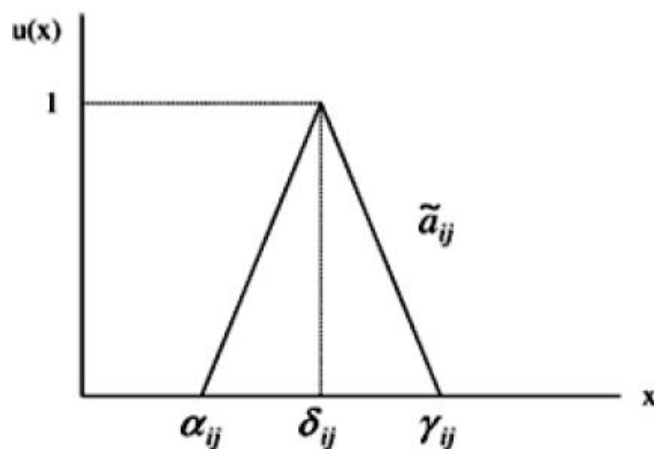
گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرات خبرگان مورد استفاده قرار داد، اما در این تحقیق برای سهولت انجام محاسبات از اعداد فازی مثلثی استفاده خواهد شد. مراحل اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی در ادامه آمده است.

## ۵-۳-۱- نظرسنجی متخصصان

در این مرحله ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای مؤثر بر یک پدیده یا تصمیم به صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظرسنجی به عمل می‌آید (عطایی، ۱۳۸۹).

## ۵-۳-۲- محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی  $(\tilde{a}_{ij})$  نظرهای حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرند. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر اساس توابع عضویت مختلف همچون روش مثلثی و یا حالت ذوزنقه‌ای محاسبه کرد. با توجه به کاربرد زیاد و سهولت محاسبه روش مثلثی، محاسبه اعداد فازی در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. در این حالت در روش فازی دلفی یک عدد فازی به صورت رابطه (۵-۱) تا (۵-۴) تعریف می‌شود (Liu & Chen, 2007).



شکل ۵-۵: تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی (Liu & Chen, 2007)

$$\tilde{a}_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (۵-۱)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (۵-۲)$$

$$\delta_{ij} = \left( \prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (3-5)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (4-5)$$

در روابط فوق  $\beta_{ijk}$  نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر  $i$  بر پارامتر  $j$  از دیدگاه متخصص  $k$  ام است و  $\alpha_{ij}$  و  $\gamma_{ij}$  به ترتیب حدّ بالا و پایین نظرهای پرسش شوندگان و  $\delta_{ij}$  میانگین هندسی نظرهای پرسش شوندگان است. بدیهی است که مؤلفه‌های عدد فازی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که  $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$  در ضمن مقادیر این مؤلفه‌ها در بازه  $[1/9, 9]$  تغییر می‌کند (عطایی، ۱۳۸۹).

### ۵-۳-۳- تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل، ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترهای مختلف به شرح رابطه (۵-۵) تشکیل می‌شود (Liu & Chen, 2007).

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}], \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5-5)$$

یا به صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\delta_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1,1,1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (1/\gamma_{13}, 1/\delta_{13}, 1/\alpha_{13}) & (1/\gamma_{23}, 1/\delta_{23}, 1/\alpha_{23}) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

### ۵-۳-۴- محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها

وزن فازی نسبی پارامترها از روابط (۵-۶) و (۵-۷) محاسبه می‌شوند (Liu & Chen, 2007).

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n} \quad (6-5)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (7-5)$$

که در آن  $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$  نماد ضرب اعداد فازی و  $\oplus$  نماد جمع اعداد فازی است.  $\tilde{W}_i$  یک بردار سطری است که نشان‌دهنده وزن فازی پارامتر  $i$  ام می‌باشد.

### ۵-۳-۵- غیر فازی کردن وزن پارامترها

در این مرحله به منظور غیر فازی کردن وزن پارامترها، طبق رابطه (۵-۸) میانگین هندسی مؤلفه‌های عدد فازی وزن پارامترها به دست می‌آید و بدین ترتیب وزن پارامترها به صورت یک عدد قطعی بیان می‌شوند (Liu & Chen, 2007).

$$W_i = \left( \prod_{j=1}^3 w_{ij} \right)^{1/3} \quad (۵-۸)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از آن جایی که تکنیک فازی دلفی بر مبنای تجربیات و نظرات تعدادی از متخصصان یک علم استوار است، لذا به نظر می‌رسد نتایج به دست آمده از این روش می‌تواند رهیافت مناسبی برای ارزیابی اهمیت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده و یک مفهوم باشد. به استناد تمامی منطق‌های ریاضی و به ویژه خاصیت فوق، در ادامه این تحقیق از این تکنیک برای ارزیابی پارامترهای مؤثر بر حریق استفاده شده است.

### ۵-۴- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر بر حریق در معادن زغال‌سنگ با استفاده

#### از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی

#### ۵-۴-۱- نظرسنجی از متخصصان

پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر حریق در معادن زغال‌سنگ، به منظور استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی جهت تعیین وزن پارامترهای مختلف، فرم‌های نظرسنجی شامل کلیه پارامترهای شکل ۵-۱ تا ۵-۳ تهیه شده و جهت تکمیل شدن برای ۱۵ تن از متخصصان در داخل کشور ارسال شد. این ۱۵ فرم تکمیل شده و دریافت شد که برای ورودی روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲-۵ تا ۷-۵ فرم‌های نظرسنجی ارسال شده به متخصصان را نشان می‌دهند. در این فرم‌ها از متخصصان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیت هر یک از پارامترها با استفاده از یک طیف پنج گزینه‌ای، امتیاز بسیار با اهمیت (۹)، با اهمیت (۷)، اهمیت متوسط (۵)، کم اهمیت (۳)، و یا بدون اهمیت (۱) را به آن‌ها اختصاص دهند که این طیف در جدول ۱-۵ آورده شده است.

جدول ۱-۵: طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها (Saaty & Alexander, 1981)

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

جدول ۲-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی

| اهمیت هر پارامتر |          |             |          |                | انواع حریق    |
|------------------|----------|-------------|----------|----------------|---------------|
| بدون اهمیت       | کم اهمیت | اهمیت متوسط | با اهمیت | بسیار با اهمیت |               |
|                  |          |             |          |                | آتش‌سوزی باز  |
|                  |          |             |          |                | آتش‌سوزی بسته |

جدول ۳-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی

| اهمیت هر پارامتر |          |             |          |                | پارامترها                       | عوامل مؤثر در آتش‌سوزی باز |
|------------------|----------|-------------|----------|----------------|---------------------------------|----------------------------|
| بدون اهمیت       | کم اهمیت | اهمیت متوسط | با اهمیت | بسیار با اهمیت |                                 |                            |
|                  |          |             |          |                | انفجار گرد زغال                 |                            |
|                  |          |             |          |                | انفجار گاز متان                 |                            |
|                  |          |             |          |                | دیزل و تجهیزات مکانیکی          |                            |
|                  |          |             |          |                | ایجاد جرقه‌های الکتریکی         |                            |
|                  |          |             |          |                | مواد منفجره و چاشنی‌ها          |                            |
|                  |          |             |          |                | جوشکاری و تخلیه الکتریسیته ساکن |                            |
|                  |          |             |          |                | گاز هوای فشرده                  |                            |
|                  |          |             |          |                | گرم شدن تیغه‌های زغال‌بری       |                            |

جدول ۴-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی

| اهمیت هر پارامتر |          |             |          |                | معیارهای ارزیابی خودسوزی |
|------------------|----------|-------------|----------|----------------|--------------------------|
| بدون اهمیت       | کم اهمیت | اهمیت متوسط | با اهمیت | بسیار با اهمیت |                          |
|                  |          |             |          |                | عوامل ذاتی               |
|                  |          |             |          |                | عوامل زمین‌شناسی         |
|                  |          |             |          |                | عوامل معدنکاری           |

جدول ۵-۵: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی

| اهمیت هر یک از پارامترها |          |             |          |            | پارامترها               |            |
|--------------------------|----------|-------------|----------|------------|-------------------------|------------|
| بسیار با اهمیت           | با اهمیت | اهمیت متوسط | کم اهمیت | بدون اهمیت |                         |            |
|                          |          |             |          |            | درجه زغال‌شدگی          | عوامل ذاتی |
|                          |          |             |          |            | درصد خاکستر             |            |
|                          |          |             |          |            | درصد پیریت              |            |
|                          |          |             |          |            | درصد رطوبت زغال         |            |
|                          |          |             |          |            | درصد تخلخل              |            |
|                          |          |             |          |            | میزان انرژی حرارتی زغال |            |
|                          |          |             |          |            | اندازه میانگین ذرات     |            |
|                          |          |             |          |            | فشار بارومتری زغال      |            |
|                          |          |             |          |            | گازخیزی زغال            |            |

جدول ۵-۶: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی

| اهمیت هر یک از پارامترها |          |             |          |            | پارامترها                 |                  |
|--------------------------|----------|-------------|----------|------------|---------------------------|------------------|
| بسیار با اهمیت           | با اهمیت | اهمیت متوسط | کم اهمیت | بدون اهمیت |                           |                  |
|                          |          |             |          |            | ضخامت لایه                | عوامل زمین‌شناسی |
|                          |          |             |          |            | شیب لایه                  |                  |
|                          |          |             |          |            | عمق قرارگیری لایه         |                  |
|                          |          |             |          |            | وضعیت گسل‌ها              |                  |
|                          |          |             |          |            | مقاومت لایه‌ی زغال        |                  |
|                          |          |             |          |            | تصادد آبی زغال            |                  |
|                          |          |             |          |            | وجود لایه‌های نزدیک به هم |                  |

جدول ۵-۷: فرم نظرسنجی ارسال شده به متخصصان داخلی برای تعیین ضریب اهمیت عوامل مؤثر در آتش‌سوزی

| اهمیت هر یک از پارامترها |          |             |          |                | پارامترها                     | عوامل معدنکاری |
|--------------------------|----------|-------------|----------|----------------|-------------------------------|----------------|
| بدون اهمیت               | کم اهمیت | اهمیت متوسط | با اهمیت | بسیار با اهمیت |                               |                |
|                          |          |             |          |                | روش استخراج                   |                |
|                          |          |             |          |                | جهت پیشروی (پیشرو یا پسرو)    |                |
|                          |          |             |          |                | سرعت هوای سیستم تهویه         |                |
|                          |          |             |          |                | روش پرکردن محل استخراج شده    |                |
|                          |          |             |          |                | ضریب استخراج                  |                |
|                          |          |             |          |                | نرخ پیشروی (سرعت استخراج)     |                |
|                          |          |             |          |                | سیستم‌های نظارتی و هشداردهنده |                |
|                          |          |             |          |                | نشت هوا به فضای تخریب شده     |                |
|                          |          |             |          |                | استخراج چند لایه‌ای           |                |

با توجه به فرم موجود، ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. ماتریس‌های مذکور با استفاده از معادله (۵-۵) در جداول پیوست ۲ آورده شده است. همچنین نتایج کلی نظرسنجی‌ها در جدول ۵-۸ تا جدول ۵-۱۳ آورده شده است.

جدول ۵-۸: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی

| متخصصان       | ۱                                               | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|---------------|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|               | امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| آتش‌سوزی باز  | ۹                                               | ۷ | ۹ | ۷ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۷  | ۹  | ۷  | ۹  | ۹  | ۹  |
| آتش‌سوزی بسته | ۹                                               | ۹ | ۹ | ۷ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹  | ۷  | ۷  | ۹  | ۹  | ۹  |

جدول ۵-۹: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز

| متخصصان                    | ۱                                               | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|----------------------------|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|                            | امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| انفجار گرد زغال            | ۹                                               | ۹ | ۹ | ۵ | ۷ | ۷ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹  | ۹  | ۷  | ۹  | ۹  | ۹  |
| انفجار گاز متان            | ۹                                               | ۹ | ۹ | ۵ | ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ۷ | ۹  | ۹  | ۷  | ۹  | ۹  | ۹  |
| دیزل و تجهیزات مکانیکی     | ۵                                               | ۷ | ۷ | ۹ | ۷ | ۷ | ۳ | ۵ | ۹ | ۳  | ۵  | ۷  | ۵  | ۷  | ۷  |
| ایجاد جرقه الکتریکی        | ۷                                               | ۷ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ۹ | ۷  | ۷  | ۷  | ۹  | ۹  | ۹  |
| مواد منفجره و چاشنی‌ها     | ۹                                               | ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۵ | ۹  | ۹  | ۷  | ۷  | ۹  | ۹  |
| جوشکاری و تخلیه الکتریسیته | ۷                                               | ۷ | ۵ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۱ | ۹ | ۹  | ۹  | ۹  | ۷  | ۹  | ۹  |
| گاز هوای فشرده             | ۷                                               | ۹ | ۹ | ۵ | ۷ | ۵ | ۳ | ۵ | ۵ | ۵  | ۹  | ۵  | ۵  | ۷  | ۷  |
| گرم شدن تیغه‌های زغال‌بری  | ۳                                               | ۵ | ۵ | ۵ | ۱ | ۳ | ۱ | ۳ | ۵ | ۷  | ۷  | ۳  | ۵  | ۹  | ۹  |

جدول ۵-۱۰: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل اصلی مؤثر بر خودسوزی

| متخصصان          | ۱                                               | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|------------------|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|                  | امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| عوامل ذاتی       | ۹                                               | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۹ | ۷ | ۷ | ۷ | ۷  | ۹  | ۷  | ۹  | ۹  | ۹  |
| عوامل زمین‌شناسی | ۵                                               | ۳ | ۷ | ۷ | ۱ | ۷ | ۳ | ۳ | ۷ | ۵  | ۷  | ۵  | ۵  | ۵  | ۵  |
| عوامل معدنکاری   | ۹                                               | ۷ | ۹ | ۷ | ۷ | ۷ | ۷ | ۷ | ۹ | ۷  | ۷  | ۷  | ۷  | ۹  | ۹  |

جدول ۵-۱۱: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل ذاتی

| متخصصان                 | ۱                                               | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|-------------------------|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|                         | امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| درجه زغال‌شدگی          | ۹                                               | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ۷  | ۷  | ۵  | ۷  | ۹  | ۹  |
| درصد خاکستر             | ۹                                               | ۷ | ۷ | ۷ | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۷ | ۳  | ۹  | ۵  | ۵  | ۹  | ۹  |
| درصد پیریت              | ۷                                               | ۳ | ۷ | ۷ | ۳ | ۹ | ۵ | ۷ | ۷ | ۱  | ۷  | ۳  | ۳  | ۷  | ۷  |
| درصد رطوبت زغال         | ۷                                               | ۵ | ۹ | ۹ | ۵ | ۹ | ۷ | ۷ | ۷ | ۷  | ۹  | ۳  | ۷  | ۹  | ۹  |
| درصد تخلخل              | ۵                                               | ۵ | ۹ | ۹ | ۳ | ۷ | ۷ | ۹ | ۷ | ۷  | ۷  | ۳  | ۳  | ۹  | ۹  |
| میزان انرژی حرارتی زغال | ۱                                               | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۷  | ۹  | ۵  | ۹  | ۹  | ۹  |
| اندازه میانگین ذرات     | ۷                                               | ۵ | ۹ | ۹ | ۷ | ۷ | ۹ | ۹ | ۵ | ۹  | ۷  | ۵  | ۵  | ۵  | ۵  |
| فشار بارومتری زغال      | ۳                                               | ۵ | ۹ | ۵ | ۵ | ۵ | ۳ | ۵ | ۵ | ۷  | ۷  | ۳  | ۵  | ۷  | ۷  |
| گازخیزی زغال            | ۳                                               | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۷ | ۷ | ۹ | ۷ | ۹  | ۹  | ۵  | ۷  | ۹  | ۹  |

جدول ۵-۱۲: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل زمین‌شناسی

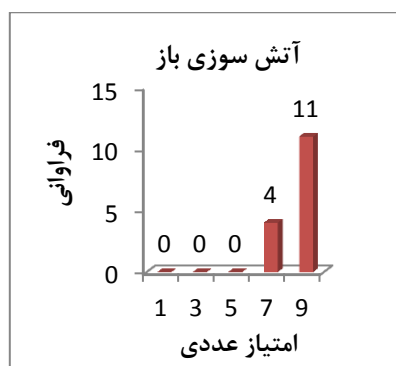
| متخصصان                   | ۱                                               | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|---------------------------|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|                           | امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| ضخامت لایه                | ۹                                               | ۵ | ۳ | ۹ | ۵ | ۷ | ۹ | ۷ | ۵ | ۳  | ۷  | ۵  | ۷  | ۹  | ۹  |
| شیب لایه                  | ۹                                               | ۵ | ۳ | ۷ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۳  | ۷  | ۵  | ۷  | ۹  | ۹  |
| عمق قرارگیری لایه         | ۷                                               | ۵ | ۵ | ۷ | ۵ | ۷ | ۹ | ۹ | ۳ | ۵  | ۷  | ۵  | ۷  | ۷  | ۷  |
| وضعیت گسل‌ها              | ۵                                               | ۳ | ۵ | ۷ | ۳ | ۹ | ۹ | ۹ | ۵ | ۵  | ۷  | ۵  | ۵  | ۵  | ۵  |
| مقاومت لایه زغال          | ۵                                               | ۵ | ۷ | ۷ | ۵ | ۷ | ۷ | ۷ | ۳ | ۷  | ۷  | ۵  | ۵  | ۹  | ۹  |
| تصادف آبی زغال            | ۳                                               | ۵ | ۹ | ۵ | ۵ | ۷ | ۹ | ۹ | ۵ | ۹  | ۷  | ۳  | ۵  | ۹  | ۹  |
| وجود لایه‌های نزدیک به هم | ۵                                               | ۷ | ۳ | ۷ | ۵ | ۷ | ۹ | ۷ | ۵ | ۵  | ۹  | ۳  | ۳  | ۵  | ۵  |

جدول ۵-۱۳: نتایج کلی نظرسنجی‌ها از عوامل معدنکاری

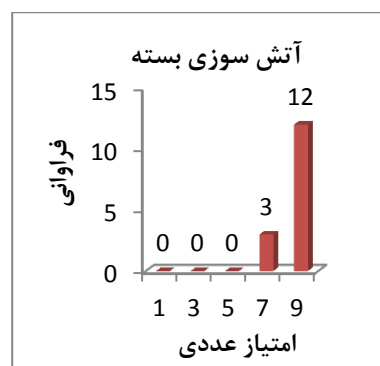
| متخصصان                                         | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| روش استخراج                                     | ۹ | ۷ | ۵ | ۹ | ۷ | ۵ | ۵ | ۳ | ۷ | ۵  | ۷  | ۷  | ۷  | ۹  | ۹  |
| جهت پیشروی                                      | ۹ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۱ | ۳ | ۵  | ۳  | ۷  | ۷  | ۵  | ۵  |
| نرخ پیشروی                                      | ۹ | ۵ | ۵ | ۹ | ۷ | ۵ | ۷ | ۹ | ۳ | ۵  | ۵  | ۷  | ۷  | ۹  | ۹  |
| نسبت استخراج                                    | ۷ | ۵ | ۵ | ۷ | ۵ | ۷ | ۷ | ۹ | ۳ | ۵  | ۵  | ۵  | ۵  | ۷  | ۷  |
| روش پرکردن ناحیه استخراجی                       | ۹ | ۷ | ۳ | ۹ | ۷ | ۷ | ۳ | ۳ | ۳ | ۷  | ۷  | ۷  | ۵  | ۹  | ۹  |
| سیستم‌های هشداردهنده                            | ۹ | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۵ | ۹ | ۷ | ۵ | ۷  | ۷  | ۵  | ۷  | ۹  | ۹  |
| استخراج چند لایه‌ای                             | ۹ | ۵ | ۵ | ۷ | ۵ | ۷ | ۷ | ۷ | ۳ | ۳  | ۷  | ۵  | ۵  | ۵  | ۵  |
| نشت هوا به مناطق تخریبی                         | ۹ | ۵ | ۷ | ۵ | ۵ | ۷ | ۹ | ۹ | ۳ | ۵  | ۵  | ۷  | ۵  | ۵  | ۵  |
| سرعت هوای سیستم تهویه                           | ۷ | ۷ | ۹ | ۹ | ۷ | ۹ | ۹ | ۹ | ۹ | ۷  | ۷  | ۷  | ۹  | ۹  | ۹  |

به منظور بررسی فراوانی امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای مؤثر توسط متخصصان، هیستوگرام مربوط

به هر پارامتر ۵-۶ تا ۵-۱۱ است.

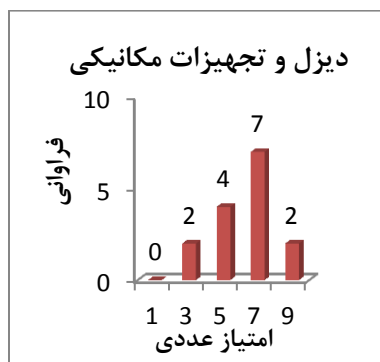


ب

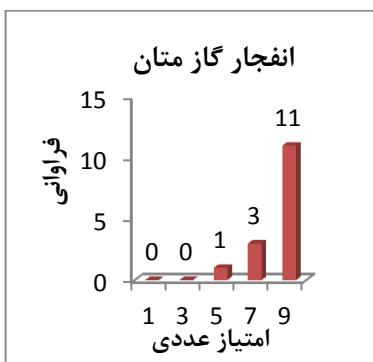


الف

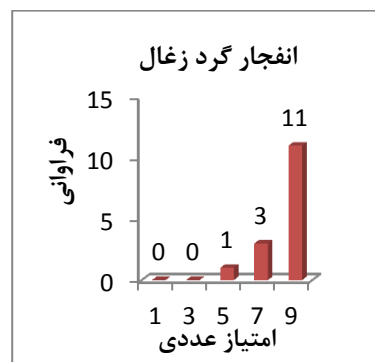
شکل ۵-۶: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به انواع آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ با توجه به نظرات متخصصان



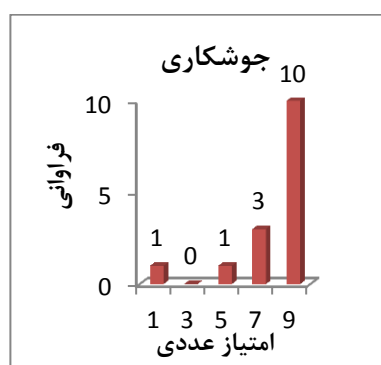
ج



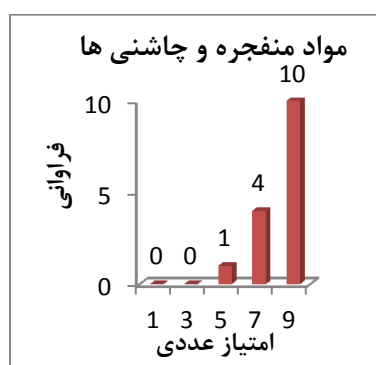
ب



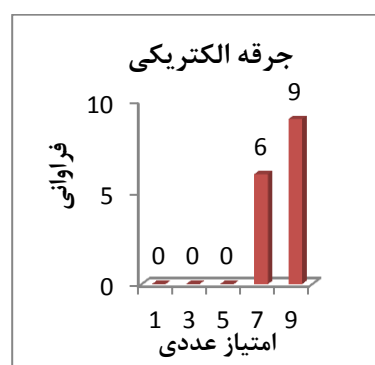
الف



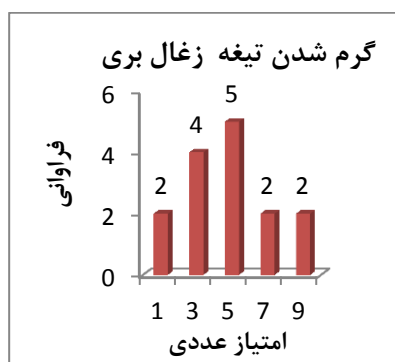
و



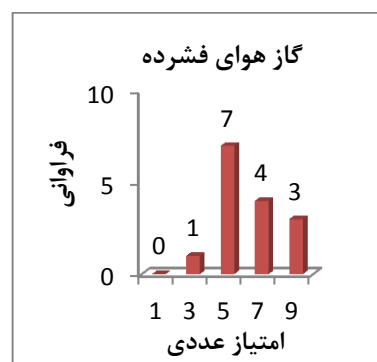
ه



د

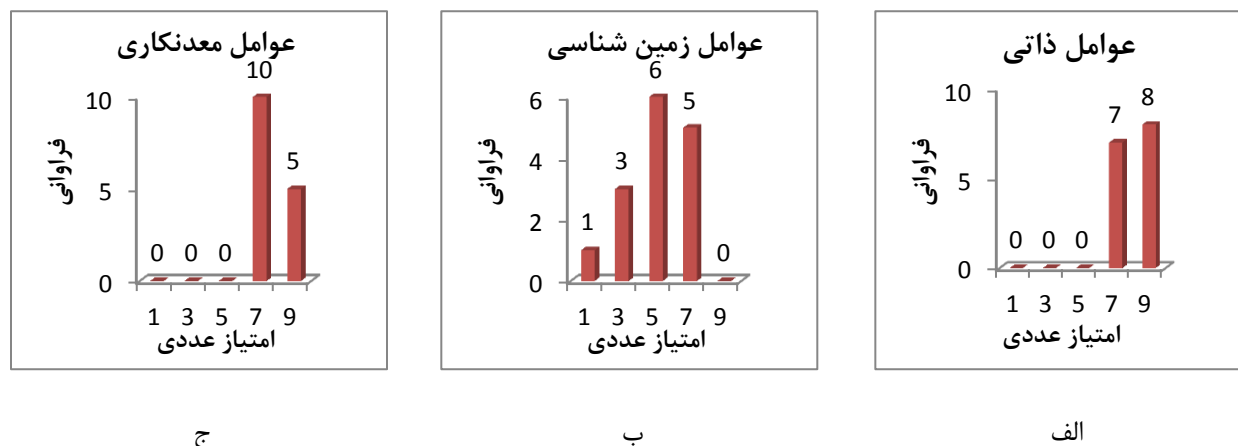


ح

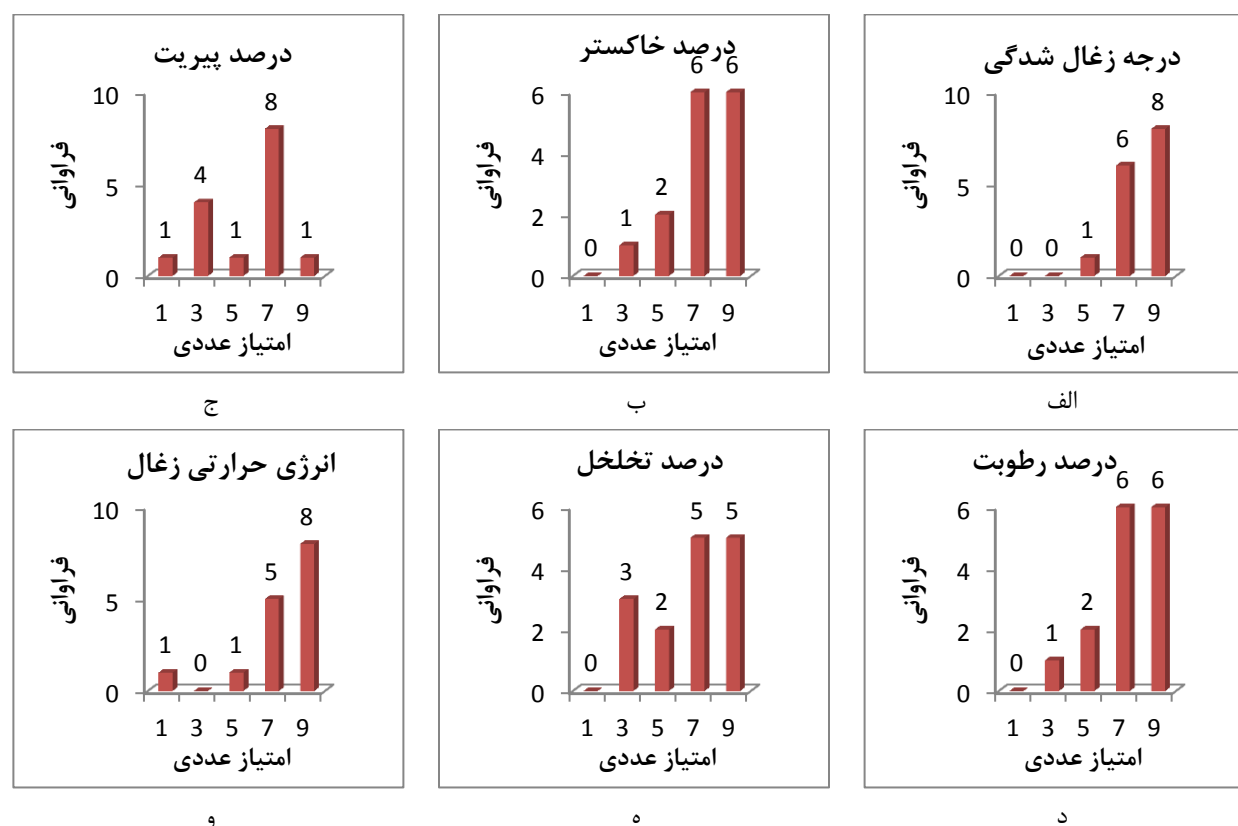


ز

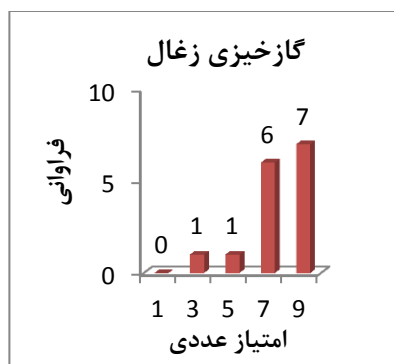
شکل ۵-۷: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظر متخصصان



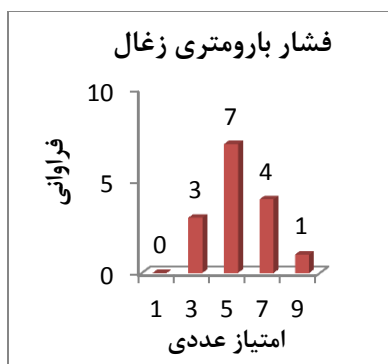
شکل ۵-۸: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری با توجه به نظر متخصصان



شکل ۵-۹: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل ذاتی با توجه به نظر متخصصان



ط

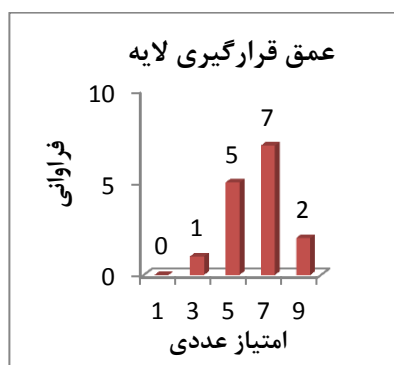


ح

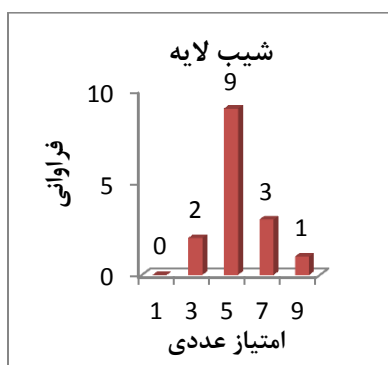


ز

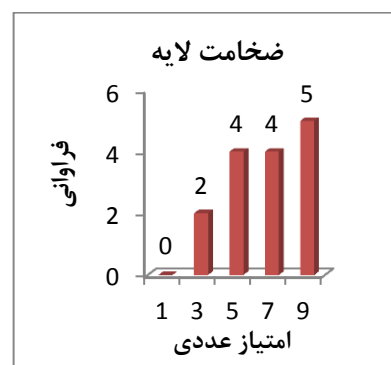
ادامه شکل ۵-۹: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل ذاتی با توجه به نظر متخصصان



ج



ب



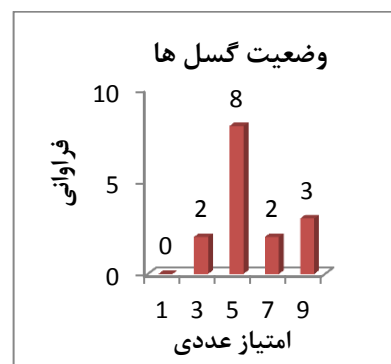
الف



و

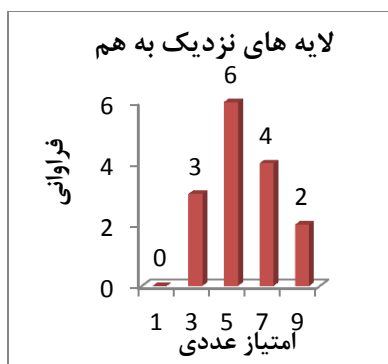


ه



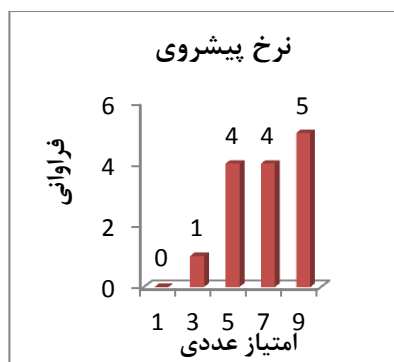
د

شکل ۵-۱۰: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل زمین شناسی با توجه به نظر متخصصان

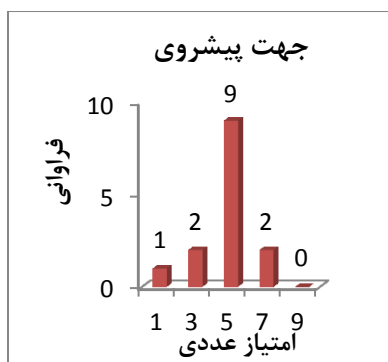


ز

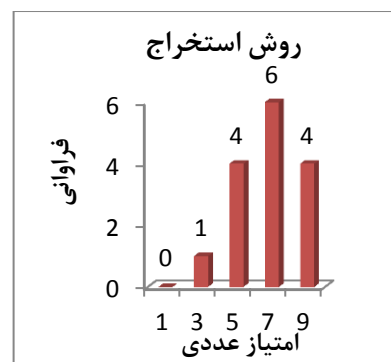
ادامه شکل ۵-۱۰: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل زمین شناسی با توجه به نظر متخصصان



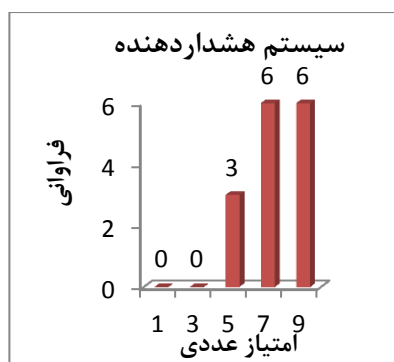
ج



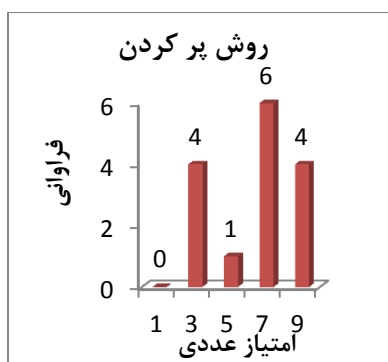
ب



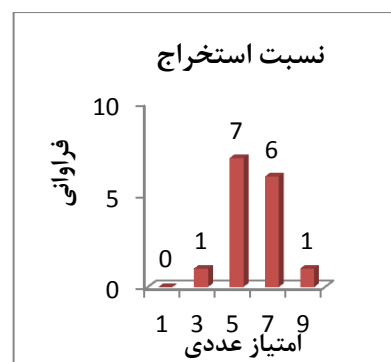
الف



و

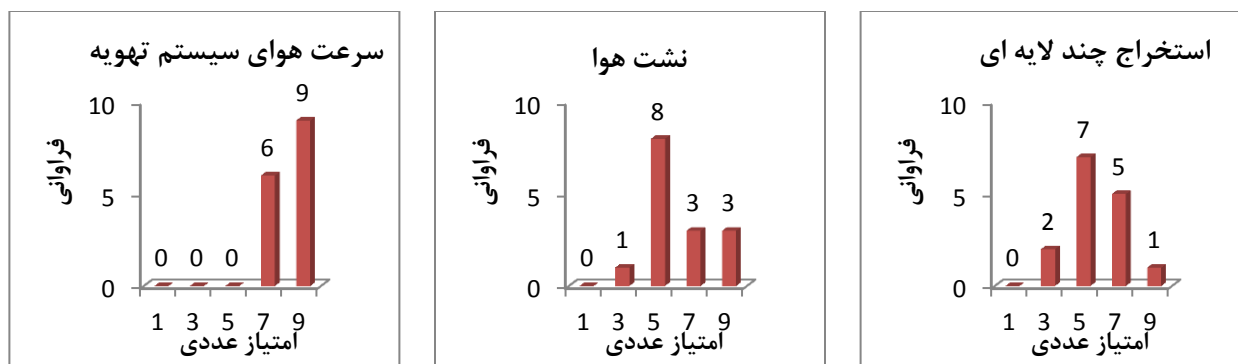


ه



د

شکل ۵-۱۱: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل معدنکاری با توجه به نظر متخصصان



ط ح ز  
ادامه شکل ۵-۱۱: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل معدنکاری با توجه به نظر متخصصان

## ۵-۴-۲- اعتبارسنجی پرسش‌نامه‌ها

هر وسیله اندازه‌گیری در ارزشیابی‌ها باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد که آن وسیله برای منظوری که ساخته می‌شود مفید واقع شود. متخصصان ارزشیابی برای آزمون‌های مختلف ویژگی‌های زیادی را برشمرده‌اند. از جمله می‌توان عینیت، سهولت اجرا، عملی بودن، سهولت تعبیر و تفسیر روایی و پایایی را نام برد. از میان این ویژگی‌ها، مهم‌ترین مورد ذکر شده، روایی و پایایی (اعتبارسنجی) می‌باشد (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱). که در ادامه به تعریف پایایی و مهم‌ترین روش‌های تعیین پایایی و نیز روش مورد استفاده برای پایایی پرسش‌نامه‌های استفاده شده در این تحقیق پرداخته خواهد شد.

## ۵-۴-۲-۱- تعریف روایی

روایی اصطلاحی است که به هدفی که آزمون برای تحقق بخشیدن به آن درست شده است اشاره می‌کند. به عبارت دیگر، آزمونی دارای روایی است که برای اندازه‌گیری آن چه مورد نظر است مناسب باشد. معمولاً به منظور برآورد میزان روایی پرسش‌نامه و سؤالات مطرح شده در آن، از نظر خبرگان، کارشناسان مسلط به موضوع تحقیق و پرسش‌نامه استفاده می‌شود. اعمال نظر و اصلاحات خبرگان، محقق را از روایی پرسش‌نامه و تطابق موضوع با سؤالات و قابلیت استفاده و به جا بودن سؤالات مطرح شده مطمئن ساخته و

مشخص خواهد نمود که سوالات پرسش نامه تا چه اندازه قدرت توضیح دهی مدل و آزمون فرضیات را خواهند داشت (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

#### ۵-۴-۲- تعریف پایایی

پایایی<sup>۱</sup> قابلیت تکرار روش و یکی از ویژگی‌های ابزار اندازه‌گیری پرسش‌نامه یا مصاحبه است. منظور از اعتبار یا پایایی ابزار اندازه‌گیری نیز این است که اگر سنجش، تحت شرایط مشابه مجدداً تکرار شود، نتایج حاصل تا چه حد، مشابه و قابل اعتماد است. ابزار سنجشی معتبر است که دارای ویژگی‌های سازگاری و باز پدیدآوری باشد. یعنی بتوان آن را در موارد متعدد بکار برد و در همه موارد نتیجه یکسانی تولید نماید. اندازه‌گیری‌های نامناسب و ناکافی می‌تواند هر تحقیق علمی را ناروا و بی اعتبار سازد. یک ابزار سنجش بدون احراز پایایی دارای روایی نخواهد بود (Kurder & Rechardson, 1937).

با توجه به این امر معمولاً دامنه ضریب پایایی از صفر (عدم ارتباط) تا ۱+ (ارتباط کامل) است. لازم به ذکر است که پایایی در یک آزمون می‌تواند از موقعیتی به موقعیت دیگر و از گروهی به گروه دیگر متفاوت باشد (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

برای محاسبه ضریب پایایی ابزار اندازه‌گیری شیوه‌های مختلفی به کار برده می‌شود که در این تحقیق از روش ضریب آلفای کرونباخ<sup>۲</sup> استفاده شده است.

ضریب آلفای کرونباخ یکی از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری اعتمادپذیری و یا پایایی پرسش نامه‌ها است. این روش برای سنجش میزان تک بعدی بودن نگرش‌ها، عقاید و غیره به کار می‌رود. در واقع می‌خواهیم ببینیم تا چه حد برداشت پاسخگویان از سؤالات یکسان بوده است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

آلفای کرونباخ به طور کلی با استفاده از یکی از روابط (۵-۹) یا (۵-۱۰) محاسبه می‌شود.

$$r_a = \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( 1 - \frac{\sum_{j=1}^k \sigma_j^2}{\sigma^2} \right) \quad (۵-۹)$$

<sup>۱</sup> - Reliability

<sup>۲</sup> - Coefficient Alpha Cronbach

$$\alpha = \frac{k\bar{C}}{\bar{V} + (k - 1)\bar{C}} \quad (۱۰-۵)$$

که در این روابط (Cronbach, 1951):

$k$ : تعداد سؤالات (بخش‌های) آزمون؛

$\sigma_j^2$ : واریانس نمرات سؤال (بخش)  $j$ ام؛

$\sigma^2$ : واریانس نمرات کل سؤالات (آزمون)؛

$\bar{C}$ : میانگین کوواریانس بین سؤالات؛

$\bar{V}$ : واریانس میانگین سؤالات می‌باشند.

بدیهی است هرچه قدر شاخص آلفای کرونباخ به ۱ نزدیک‌تر باشد، هم‌بستگی درونی بین سؤالات بیش‌تر و در نتیجه پرسش‌ها همگن‌تر خواهند بود (Cronbach, 1951).

بدیهی است در صورت پایین بودن مقدار آلفا، بایستی بررسی شود که با حذف کدام پرسش‌ها مقدار آن را افزایش داد. ولی به طور کلی اگر ضریب آلفا بیش‌تر از ۰/۷ باشد، آزمون از پایایی قابل قبولی برخوردار است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

#### ۵-۴-۲-۳- محاسبه ضریب آلفای کرونباخ با استفاده از نرم افزار SPSS 20

متغیرها و داده‌های جدول ۵-۸ تا جدول ۵-۱۳ وارد نرم افزار شده و خروجی‌های مورد نظر از نرم افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۱۴ تا جدول ۵-۱۹ آورده شده است.

جدول ۵-۱۴: قابلیت اعتماد انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان

| Reliability of Types of Fire in Underground Coal Mine With Model: ALPHA |                       |            |       |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-------|
| Case Processing Summary                                                 |                       |            |       |
|                                                                         |                       | N          | %     |
| Cases                                                                   | Valid                 | 3          | 100.0 |
|                                                                         | Excluded <sup>a</sup> | 0          | .0    |
|                                                                         | Total                 | 3          | 100.0 |
| a. Listwise deletion based on all variables in the procedure            |                       |            |       |
| Reliability Statistics                                                  |                       |            |       |
| Cronbach's Alpha                                                        |                       | N of Items |       |
| 0.723                                                                   |                       | 15         |       |

جدول ۵-۱۵: قابلیت اعتماد عوامل مؤثر در آتش‌سوزی باز با توجه به نظر متخصصان

| Reliability of Factors Affecting The Open Fire With Model: ALPHA |                       |            |       |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-------|
| Case Processing Summary                                          |                       |            |       |
|                                                                  |                       | N          | %     |
| Cases                                                            | Valid                 | 3          | 100.0 |
|                                                                  | Excluded <sup>a</sup> | 0          | .0    |
|                                                                  | Total                 | 3          | 100.0 |
| a. Listwise deletion based on all variables in the procedure     |                       |            |       |
| Reliability Statistics                                           |                       |            |       |
| Cronbach's Alpha                                                 |                       | N of Items |       |
| 0.711                                                            |                       | 15         |       |

جدول ۵-۱۶: قابلیت اعتماد عوامل اصلی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان

| Reliability of Main Characteristics With Model: ALPHA |                       |            |       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-------|
| Case Processing Summary                               |                       |            |       |
|                                                       |                       | N          | %     |
| Cases                                                 | Valid                 | 3          | 100.0 |
|                                                       | Excluded <sup>a</sup> | 0          | .0    |
|                                                       | Total                 | 3          | 100.0 |
| Reliability Statistics                                |                       |            |       |
| Cronbach's Alpha                                      |                       | N of Items |       |
| 0.701                                                 |                       | 15         |       |

جدول ۵-۱۷: قابلیت اعتماد عوامل ذاتی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان

| Reliability of Intrinsic Characteristics With Model: ALPHA   |                       |            |       |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-------|
| Case Processing Summary                                      |                       |            |       |
|                                                              |                       | N          | %     |
| Cases                                                        | Valid                 | 3          | 100.0 |
|                                                              | Excluded <sup>a</sup> | 0          | .0    |
|                                                              | Total                 | 3          | 100.0 |
| a. Listwise deletion based on all variables in the procedure |                       |            |       |
| Reliability Statistics                                       |                       |            |       |
| Cronbach's Alpha                                             |                       | N of Items |       |
| 0.863                                                        |                       | 15         |       |

جدول ۵-۱۸: قابلیت اعتماد عوامل زمین‌شناسی مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان

| Reliability of Geological Characteristics With Model: ALPHA  |                       |            |       |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-------|
| Case Processing Summary                                      |                       |            |       |
|                                                              |                       | N          | %     |
| Cases                                                        | Valid                 | 3          | 100.0 |
|                                                              | Excluded <sup>a</sup> | 0          | .0    |
|                                                              | Total                 | 3          | 100.0 |
| a. Listwise deletion based on all variables in the procedure |                       |            |       |
| Reliability Statistics                                       |                       |            |       |
| Cronbach's Alpha                                             |                       | N of Items |       |
| 0.784                                                        |                       | 15         |       |

جدول ۵-۱۹: قابلیت اعتماد عوامل معدنکاری مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ با توجه به نظر متخصصان

| Reliability of Mining Characteristics With Model: ALPHA |                       |            |       |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|------------|-------|
| Case Processing Summary                                 |                       |            |       |
|                                                         |                       | N          | %     |
| Cases                                                   | Valid                 | 3          | 100.0 |
|                                                         | Excluded <sup>a</sup> | 0          | .0    |
|                                                         | Total                 | 3          | 100.0 |
| Reliability Statistics                                  |                       |            |       |
| Cronbach's Alpha                                        |                       | N of Items |       |
| 0.701                                                   |                       | 15         |       |

از آن جایی که مقدار آلفای کرومباخ در تمام موارد بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسش نامه‌ها از پایایی قابل قبولی برخوردارند.

### ۵-۴-۳- یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش FDAHP

پس از انجام نظرسنجی و ارزیابی نتایج حاصل از آن، کلیه نتایج حاصله برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی اصلی پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند. در تشکیل ماتریس مذکور با توجه به سابقه کاربرد روش FDAHP در طبقه‌بندی‌های مهندسی (Liu & Chen, 2007)، از تابع عضویت مثلثی و در نتیجه اعداد فازی مثلثی طبق شکل ۵-۵ و روابط (۱-۵) تا (۴-۵) استفاده شده است.

### ۵-۴-۳-۱- یافتن وزن انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ با توجه به جداول پیوست ۱ در جدول ۵-۲۰ آورده شده است.

جدول ۵-۲۰: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ

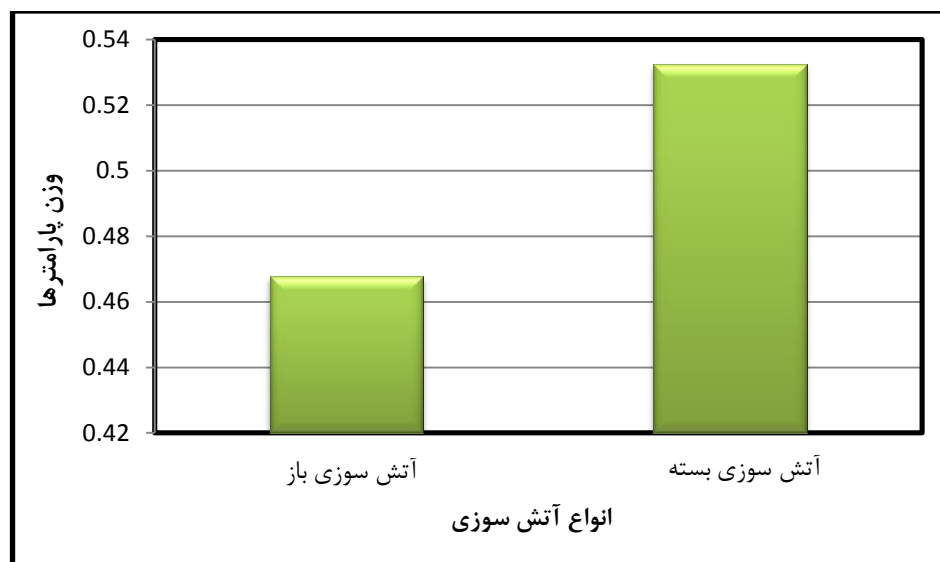
| آتش‌سوزی بسته         | آتش‌سوزی باز          |               |
|-----------------------|-----------------------|---------------|
| (۰/۷۷۸، ۰/۸۹۰، ۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | آتش‌سوزی باز  |
| (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۷۷۸، ۱/۰۱۷، ۱/۲۸۶) | آتش‌سوزی بسته |

با استفاده از روابط (۶-۵) تا (۸-۵) عدد فازی  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی  $\tilde{W}_i$  و وزن غیر فازی جدول ۵-۲۰ محاسبه شده است و در جدول ۵-۲۱ آورده شده است.

جدول ۵-۲۱: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی انواع آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ

| وزن غیر فازی پارامترها | $\tilde{W}_i$<br>(وزن فازی پارامترها) | $\tilde{Z}_i$              |                                                      |                                                |
|------------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                        |                                       | $(\alpha, \delta, \gamma)$ |                                                      |                                                |
| ۰/۴۶۷۷                 | (۰/۳۴۰۳، ۰/۴۶۶۷، ۰/۶۴۲۷)              | (۰/۷۷۸، ۰/۸۹۰، ۱/۰۰۰)      | آتش‌سوزی باز                                         | $\begin{matrix} \delta \\ \alpha \end{matrix}$ |
| ۰/۵۳۲۳                 | (۰/۳۴۰۳، ۰/۵۳۳۳، ۰/۸۲۶۵)              | (۰/۷۷۸، ۱/۰۱۷، ۱/۲۸۶)      | آتش‌سوزی بسته                                        |                                                |
| $\Sigma=1.000$         |                                       | (۰/۴۳۷۴، ۰/۵۲۴۴، ۰/۴۶۲۷)   | $(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$ |                                                |

نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی انواع آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی انواع آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ

#### ۵-۴-۳-۲- یافتن وزن پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۸ پارامتر مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به جداول پیوست ۱ در

جدول ۵-۲۲ آورده شده است.

جدول ۵-۲۲: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز

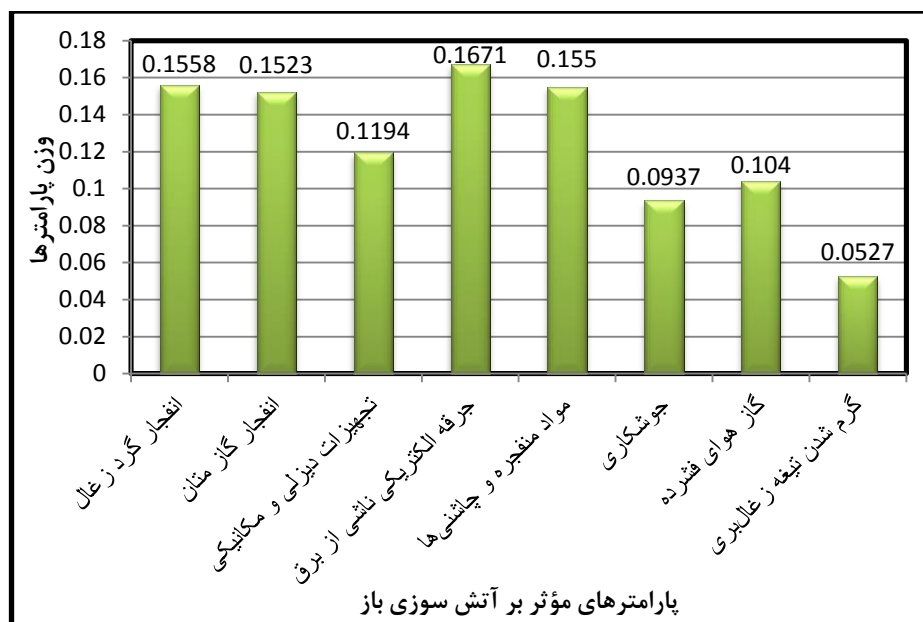
| انفجار گرد زغال       | انفجار گاز متان       | تجهیزات دیزلی و مکانیکی | جرقه الکتریکی ناشی از برق | مواد منفجره و چاشنی‌ها | جوشکاری               | گاز هوای فشرده        | گرم شدن تیغه زغال‌بری |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۷۷۸، ۱/۰۰۰، ۱/۲۸۶) | (۰/۵۵۶، ۱/۳۹۲، ۳/۰۰۰)   | (۰/۵۵۶، ۱/۰۱۱، ۱/۲۸۶)     | (۰/۵۵۶، ۱/۰۱۷، ۱/۸۰۰)  | (۰/۵۵۶، ۱/۱۵۸، ۹/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۳۸۴، ۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۲/۰۶۷، ۹/۰۰۰) |
| (۰/۷۷۸، ۰/۹۹۹، ۱/۲۸۶) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۵۵۶، ۱/۳۹۳، ۳/۰۰۰)   | (۰/۵۵۶، ۱/۰۱۱، ۱/۲۸۶)     | (۰/۵۵۶، ۱/۰۱۷، ۱/۴۰۰)  | (۰/۵۵۶، ۱/۱۵۸، ۷/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۳۸۴، ۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۲/۰۶۷، ۹/۰۰۰) |
| (۰/۳۳۳، ۰/۸۳۲، ۳/۰۰۰) | (۰/۳۳۳، ۰/۸۳۲، ۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰)   | (۰/۳۳۳، ۰/۷۲۶، ۱/۲۸۶)     | (۰/۳۳۳، ۰/۸۴۶، ۳/۰۰۰)  | (۰/۳۳۳، ۰/۹۶۳، ۵/۰۰۰) | (۰/۵۵۶، ۰/۹۹۴، ۱/۸۰۰) | (۰/۴۲۹، ۱/۴۸۴، ۷/۰۰۰) |
| (۰/۷۷۸، ۰/۹۸۹، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۷۸، ۰/۹۸۹، ۱/۸۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۳۷۷، ۳/۰۰۰)   | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰)     | (۰/۷۷۸، ۱/۰۰۶، ۱/۸۰۰)  | (۰/۷۷۸، ۱/۱۴۵، ۷/۰۰۰) | (۰/۷۷۸، ۱/۳۶۹، ۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۲/۰۴۴، ۹/۰۰۰) |
| (۰/۵۵۶، ۰/۹۳۸، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۱۴، ۰/۹۳۸، ۱/۸۰۰) | (۰/۵۵۶، ۱/۳۹۴، ۳/۰۰۰)   | (۰/۵۵۶، ۰/۹۹۴، ۱/۲۸۶)     | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰)  | (۰/۵۵۶، ۱/۱۳۹، ۷/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۳۶۱، ۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۲/۰۳۲، ۹/۰۰۰) |
| (۰/۱۱۱، ۰/۸۶۴، ۱/۸۰۰) | (۰/۱۴۳، ۰/۸۶۴، ۱/۸۰۰) | (۰/۲۰۰، ۱/۲۰۳، ۳/۰۰۰)   | (۰/۱۴۳، ۰/۸۷۴، ۱/۲۸۶)     | (۰/۱۴۳، ۰/۸۷۸، ۱/۸۰۰)  | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۲۰۰، ۱/۱۹۶، ۳/۰۰۰) | (۰/۳۳۳، ۱/۷۸۵، ۹/۰۰۰) |
| (۰/۳۳۳، ۰/۷۲۲، ۱/۰۰۰) | (۰/۳۳۳، ۰/۷۲۲، ۱/۰۰۰) | (۰/۵۵۶، ۱/۰۰۶، ۱/۸۰۰)   | (۰/۳۳۳، ۰/۷۳۱، ۱/۲۸۶)     | (۰/۳۳۳، ۰/۷۳۵، ۱/۰۰۰)  | (۰/۳۳۳، ۰/۸۳۷، ۵/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۴۹۳، ۷/۰۰۰) |
| (۰/۱۱۱، ۰/۴۸۴، ۱/۰۰۰) | (۰/۱۱۱، ۰/۴۸۴، ۱/۰۰۰) | (۰/۱۴۳، ۰/۶۷۴، ۲/۳۳۳)   | (۰/۱۱۱، ۰/۴۸۹، ۱/۰۰۰)     | (۰/۱۱۱، ۰/۴۹۲، ۱/۰۰۰)  | (۰/۱۱۱، ۰/۵۶۰، ۳/۰۰۰) | (۰/۱۴۳، ۰/۶۷۰، ۱/۴۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) |

با استفاده از روابط (۵-۶) تا (۵-۸) عدد فازی  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی  $\tilde{W}_i$  و وزن غیر فازی جدول ۵-۲۲ محاسبه شده است و در جدول ۵-۲۳ آورده شده است.

جدول ۵-۲۳: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز

| وزن غیر فازی<br>پارامترها | $\tilde{W}_i$<br>(وزن فازی پارامترها) | $\tilde{Z}_i$              |                                                      |                   |
|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|-------------------|
|                           |                                       | $(\alpha, \delta, \gamma)$ |                                                      |                   |
| ۰/۱۵۵۸                    | (۰/۰۳۹۳، ۰/۱۵۶۶، ۰/۶۱۴۵)              | (۰/۷۲۲۶، ۱/۲۱۴۸، ۲/۶۱۲۵)   | انفجار گرد زغال                                      | تأثیرات<br>مستقیم |
| ۰/۱۵۲۳                    | (۰/۰۳۹۳، ۰/۰۸۹۰، ۰/۵۷۷۰)              | (۰/۷۲۲۶، ۰/۶۹۰۳، ۲/۴۵۳۴)   | انفجار گاز متان                                      |                   |
| ۰/۱۱۹۴                    | (۰/۰۲۲۹، ۰/۱۲۱۰، ۰/۶۱۵۱)              | (۰/۴۲۰۴، ۰/۹۳۸۹، ۲/۶۱۵۱)   | تجهیزات دیزلی و مکانیکی                              |                   |
| ۰/۱۶۷۱                    | (۰/۰۴۶۵، ۰/۱۵۴۹، ۰/۶۴۷۷)              | (۰/۸۵۴۸، ۱/۲۰۱۴، ۲/۷۵۳۸)   | جرقه الکتریکی ناشی از برق                            |                   |
| ۰/۱۵۵۰                    | (۰/۰۳۸۹، ۰/۱۵۴۳، ۰/۶۲۱۰)              | (۰/۷۱۴۹، ۱/۱۹۷۱، ۲/۶۴۰۴)   | مواد منفجره و چاشنی‌ها                               |                   |
| ۰/۰۹۳۷                    | (۰/۰۱۱۶، ۰/۱۳۵۳، ۰/۵۲۴۰)              | (۰/۲۱۳۵، ۱/۰۴۹۴، ۲/۲۲۸۱)   | جوشکاری                                              |                   |
| ۰/۱۰۴۰                    | (۰/۰۲۴۴، ۰/۱۱۳۱، ۰/۴۰۴۷)              | (۰/۴۴۸۱، ۰/۸۷۷۷، ۱/۷۳۲۱)   | گاز هوای فشرده                                       |                   |
| ۰/۰۵۲۷                    | (۰/۰۰۰۸، ۰/۰۷۵۸، ۰/۳۱۲۸)              | (۰/۱۵۵۷، ۰/۵۸۷۸، ۱/۳۳۰۱)   | گرم شدن تیغه زغال‌بری                                |                   |
| $\Sigma=۱.۰۰۰$            |                                       | (۰/۰۵۴۴، ۰/۱۲۸۹، ۰/۲۳۵۲)   | $(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$ |                   |

نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر آتش سوزی باز

#### ۵-۴-۳- یافتن وزن پارامترهای اصلی (ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری)

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۳ پارامتر اصلی ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری با توجه به جداول

پیوست ۱ در جدول ۵-۲۴ آورده شده است.

جدول ۵-۲۴: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۳ پارامتر اصلی

| پارامترهای ذاتی       | پارامترهای زمین‌شناسی | پارامترهای معدنکاری   |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۰/۷۶۴، ۷/۰۰۰) | (۰/۷۷۸، ۰/۰۵۲، ۱/۲۸۶) | پارامترهای ذاتی       |
| (۰/۱۴۳، ۰/۵۶۷، ۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۱۴۳، ۰/۵۹۶، ۱/۰۰۰) | پارامترهای زمین‌شناسی |
| (۰/۷۷۸، ۰/۹۵۱، ۱/۲۸۶) | (۱/۰۰۰، ۱/۶۷۸، ۷/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | پارامترهای معدنکاری   |

با استفاده از روابط (۵-۶) تا (۵-۸) عدد فازی  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی  $\tilde{W}_i$  و وزن غیر فازی جدول ۵-۲۴ محاسبه

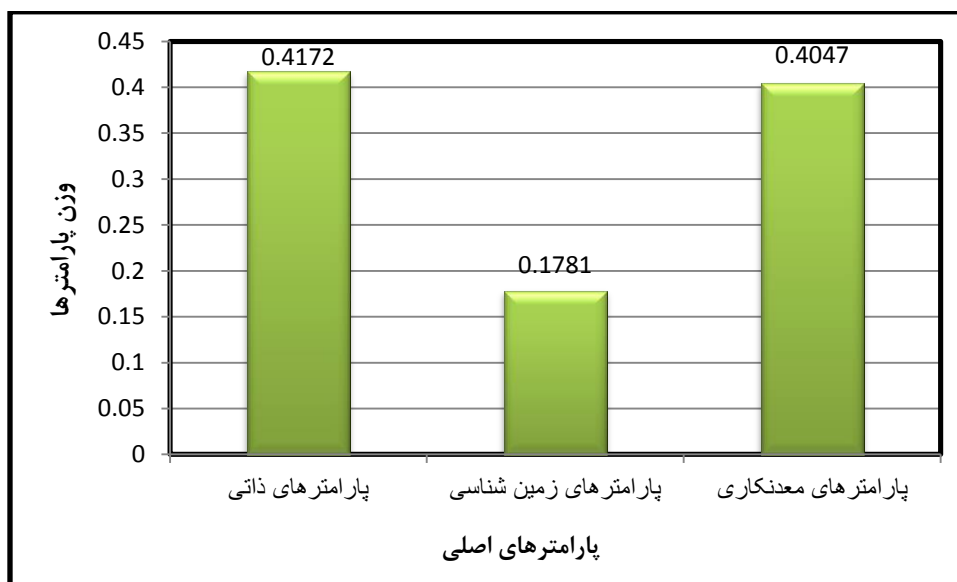
شده است و در جدول ۵-۲۵ آورده شده است.

جدول ۵-۲۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیرفازی پارامترهای اصلی

| وزن غیر فازی<br>پارامترها | $\bar{W}_i$<br>(وزن فازی پارامترها) | $\bar{Z}_i$                |                                                  |           |
|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|-----------|
|                           |                                     | $(\alpha, \delta, \gamma)$ |                                                  |           |
| ۰/۴۱۷۲                    | (۰/۱۷۸۲، ۰/۳۹۷۲، ۰/۹۸۴۶)            | (۰/۹۱۹۷، ۱/۲۲۸۹، ۲/۰۸۰۲)   | پارامترهای ذاتی                                  | پارامترها |
| ۰/۱۷۸۱                    | (۰/۰۵۳۰، ۰/۲۲۵۱، ۰/۴۷۳۳)            | (۰/۲۷۳۴، ۰/۶۹۶۵، ۱/۰۰۰۰)   | پارامترهای زمین‌شناسی                            |           |
| ۰/۴۰۴۷                    | (۰/۱۷۸۲، ۰/۳۷۷۷، ۰/۹۸۴۶)            | (۰/۹۱۹۷، ۱/۱۶۸۶، ۲/۰۸۰۲)   | پارامترهای معدنکاری                              |           |
| $\Sigma=1.000$            |                                     | (۰/۱۹۳۸، ۰/۳۲۳۲، ۰/۴۷۳۳)   | $(\bar{Z}_i \oplus \dots \oplus \bar{Z}_n)^{-1}$ |           |

نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای اصلی مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ در شکل ۵-۱۴ نشان

داده شده است.



شکل ۵-۱۴: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای اصلی مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ

#### ۵-۴-۳-۴- یافتن وزن پارامترهای ذاتی

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۹ پارامتر ذاتی با توجه به جداول پیوست ۱ در جدول ۵-۲۶ آورده

شده است.

جدول ۵-۲۶: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۹ پارامتر ذاتی

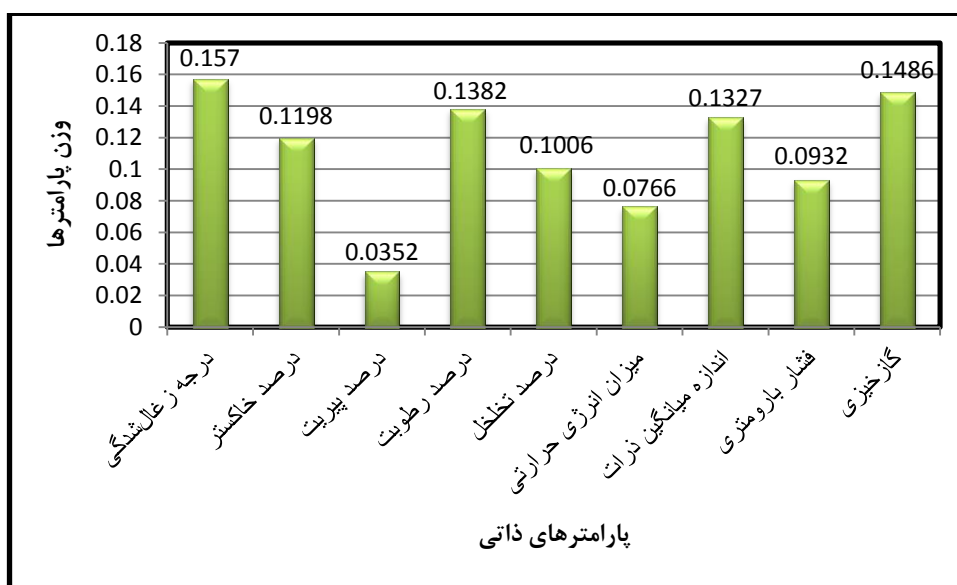
| گازخیزی               | فشار بارومتری<br>زغال | اندازه میانگین<br>ذرات | میزان انرژی<br>حرارتی | درصد تخلخل            | درصد رطوبت زغال       | درصد پیریت            | درصد خاکستر           | درجه زغال‌شدگی        |                            |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| (۰/۷۷۸ ،۱/۰۷۶ ،۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۵۲۴ ،۳/۰۰۰) | (۰/۷۷۸ ،۱/۱۷۶ ،۱/۸۰۰)  | (۰/۷۷۸ ،۱/۱۳۹ ،۹/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۲۷۴ ،۲/۳۳۳) | (۰/۷۷۸ ،۱/۱۱۹ ،۱/۶۶۷) | (۱/۰۰۰ ،۱/۵۷۸ ،۷/۰۰۰) | (۰/۷۷۸ ،۱/۱۱۹ ،۲/۳۳۳) | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | درجه<br>زغال‌شدگی          |
| (۰/۳۳۳ ،۰/۹۶۲ ،۳/۰۰۰) | (۰/۴۲۹ ،۱/۳۶۲ ،۳/۰۰۰) | (۰/۳۳۳ ،۱/۰۵۱ ،۱/۸۰۰)  | (۰/۴۲۹ ،۱/۰۱۸ ،۹/۰۰۰) | (۰/۴۲۹ ،۱/۱۳۹ ،۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹ ،۱/۰۰۰ ،۱/۶۶۷) | (۱/۰۰۰ ،۱/۴۳۴ ،۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | (۰/۴۲۹ ،۰/۸۹۴ ،۱/۲۸۶) | درصد خاکستر                |
| (۰/۱۱۱ ،۰/۶۷۱ ،۲/۳۳۳) | (۰/۱۴۳ ،۰/۹۵۰ ،۲/۳۳۳) | (۰/۱۱۱ ،۰/۷۳۳ ،۱/۴۰۰)  | (۰/۱۴۳ ،۰/۷۱۰ ،۷/۰۰۰) | (۰/۱۴۳ ،۰/۷۹۴ ،۱/۴۰۰) | (۰/۱۴۳ ،۰/۶۹۷ ،۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | (۰/۳۳۳ ،۰/۶۹۷ ،۱/۰۰۰) | (۰/۱۴۳ ،۱/۶۲۳ ،۱/۰۰۰) | درصد پیریت                 |
| (۰/۶۰۰ ،۱/۹۶۲ ،۲/۳۳۳) | (۱/۰۰۰ ،۱/۳۶۲ ،۲/۳۳۳) | (۰/۶۰۰ ،۱/۰۵۱ ،۱/۸۰۰)  | (۰/۶۰۰ ،۱/۰۱۷ ،۷/۰۰۰) | (۰/۷۷۸ ،۱/۱۳۹ ،۲/۳۳۳) | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۴۳۴ ،۷/۰۰۰) | (۰/۶۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۲/۳۳۳) | (۰/۰۰۶ ،۰/۸۹۴ ،۱/۲۸۶) | درصد رطوبت<br>زغال         |
| (۰/۴۲۹ ،۰/۸۴۵ ،۱/۶۶۷) | (۰/۶۰۰ ،۱/۱۹۶ ،۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹ ،۰/۹۲۳ ،۱/۸۰۰)  | (۰/۳۳۳ ،۰/۸۹۴ ،۵/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | (۰/۴۲۹ ،۰/۸۷۸ ،۱/۲۸۶) | (۰/۷۱۴ ،۱/۲۶۰ ،۷/۰۰۰) | (۰/۴۲۹ ،۰/۹۱۰ ،۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹ ،۰/۷۸۵ ،۱/۰۰۰) | درصد تخلخل                 |
| (۰/۳۳۳ ،۰/۹۴۵ ،۱/۲۸۶) | (۰/۳۳۳ ،۱/۳۳۹ ،۳/۰۰۰) | (۰/۱۴۳ ،۱/۰۳۳ ،۱/۸۰۰)  | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | (۰/۲۰۰ ،۱/۱۱۹ ،۳/۰۰۹) | (۰/۱۴۳ ،۰/۹۳۸ ،۱/۶۶۷) | (۰/۱۴۳ ،۱/۴۱۰ ،۷/۰۰۰) | (۰/۱۱۱ ،۰/۹۸۳ ،۲/۳۳۳) | (۰/۱۱۱ ،۰/۸۷۸ ،۱/۲۸۶) | میزان انرژی<br>حرارتی زغال |
| (۰/۵۵۶ ،۰/۹۱۵ ،۲/۳۳۳) | (۰/۷۱۴ ،۱/۲۹۵ ،۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰)  | (۰/۵۵۶ ،۰/۹۶۸ ،۷/۰۰۰) | (۰/۵۵۶ ،۱/۰۸۳ ،۲/۳۳۳) | (۰/۵۵۶ ،۰/۹۵۱ ،۱/۶۶۷) | (۰/۷۱۴ ،۱/۳۶۴ ،۹/۰۰۰) | (۰/۵۵۶ ،۰/۹۵۱ ،۳/۰۰۰) | (۰/۵۵۶ ،۰/۱۸۵۰/۲۸۶)   | اندازه میانگین<br>ذرات     |
| (۰/۴۲۹ ،۰/۷۰۶ ،۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | (۰/۳۳۳ ،۰/۷۷۲ ،۱/۴۰۰)  | (۰/۳۳۳ ،۰/۷۴۷ ،۳/۰۰۰) | (۰/۴۲۹ ،۰/۸۳۶ ،۱/۶۶۷) | (۰/۴۲۹ ،۰/۷۳۴ ،۱/۰۰۰) | (۰/۴۲۹ ،۱/۰۵۳ ،۷/۰۰۰) | (۰/۳۳۳ ،۰/۷۳۴ ،۲/۳۳۳) | (۰/۳۳۳ ،۰/۶۵۶ ،۱/۰۰۰) | فشار بارومتری<br>زغال      |
| (۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰ ،۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰ ،۱/۴۱۶ ،۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹ ،۱/۰۹۳ ،۱/۸۰۰)  | (۰/۷۷۸ ،۱/۰۵۸ ،۳/۰۰۰) | (۰/۶۰۰ ،۱/۱۸۴ ،۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹ ،۱/۰۴۰ ،۱/۶۶۷) | (۰/۴۲۹ ،۱/۴۹۱ ،۹/۰۰۰) | (۰/۳۳۳ ،۱/۰۴۰ ،۳/۰۰۰) | (۰/۳۳۳ ،۰/۹۲۹ ،۱/۲۸۶) | گازخیزی                    |

با استفاده از روابط (۵-۶) تا (۵-۸) عدد فاز  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فاز  $\tilde{W}_i$  و وزن غیر فاز  $\tilde{W}_i$  و وزن غیر فاز  $\tilde{W}_i$  محاسبه شده است و در جدول ۵-۲۷ آورده شده است.

جدول ۵-۲۷: وزن نهایی فاز نسبی و غیرفازی پارامترهای ذاتی

| وزن غیر فاز<br>پارامترها | $\tilde{W}_i$<br>(وزن فاز پارامترها) | $\tilde{Z}_i$              |                                                      |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|
|                          |                                      | $(\alpha, \delta, \gamma)$ |                                                      |
| ۰/۱۵۷۰                   | (۰/۰۴۳۵، ۰/۱۳۲۹، ۰/۶۰۲۳)             | (۰/۸۶۹۸، ۱/۲۰۹۲، ۲/۷۵۸۹)   | درجه زغال‌شدگی                                       |
| ۰/۱۱۹۸                   | (۰/۰۲۴۵، ۰/۱۱۹۰، ۰/۵۱۳۰)             | (۰/۴۸۹۴، ۱/۰۸۲۸، ۲/۳۵۰۲)   | درصد خاکستر                                          |
| ۰/۰۳۵۲                   | (۰/۰۰۰۹، ۰/۰۸۳۰، ۰/۳۵۲۵)             | (۰/۱۸۴۳، ۰/۷۵۵۰، ۱/۶۱۴۸)   | درصد پیریت                                           |
| ۰/۱۳۸۲                   | (۰/۰۳۶۶، ۰/۱۱۹۰، ۰/۵۳۸۱)             | (۰/۷۳۲۲، ۱/۰۸۲۷، ۲/۴۶۵۰)   | درصد رطوبت                                           |
| ۰/۱۰۰۶                   | (۰/۰۲۵۲، ۰/۱۰۴۹، ۰/۴۵۴۵)             | (۰/۵۰۳۳، ۰/۹۵۴۷، ۲/۰۸۲۰)   | درصد تخلخل                                           |
| ۰/۰۷۶۶                   | (۰/۰۱۰۵، ۰/۱۱۶۹، ۰/۴۵۴۱)             | (۰/۲۱۰۱، ۱/۰۶۴۱، ۲/۰۸۰۲)   | میزان انرژی حرارتی                                   |
| ۰/۱۳۲۷                   | (۰/۰۳۴۱، ۰/۱۱۳۲، ۰/۵۸۰۲)             | (۰/۶۲۴۷، ۱/۰۲۹۸، ۲/۶۵۷۷)   | اندازه میانگین ذرات                                  |
| ۰/۰۹۳۲                   | (۰/۰۲۱۰، ۰/۰۸۷۳، ۰/۳۶۹۶)             | (۰/۴۲۱۱، ۰/۷۹۴۹، ۱/۶۹۳۱)   | فشار بارومتری                                        |
| ۰/۱۴۸۶                   | (۰/۰۲۷۱، ۰/۱۲۳۷، ۰/۴۹۸۹)             | (۰/۰۲۷۱، ۰/۱۲۳۷، ۰/۴۹۸۹)   | گاز خیزی                                             |
| $\Sigma=۱.۰۰۰$           |                                      | (۰/۰۵۰۰، ۰/۱۰۹۹، ۰/۲۱۸۳)   | $(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$ |

نمودار ستونی وزن نهایی فاز دلفی پارامترهای ذاتی در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۵: نمودار ستونی وزن نهایی فاز دلفی پارامترهای ذاتی

## ۵-۴-۳-۵- یافتن وزن پارامترهای زمین‌شناسی

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۷ پارامتر ذاتی با توجه به جداول پیوست ۱ در جدول ۵-۲۸ آورده شده است.

جدول ۵-۲۸: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۷ پارامتر زمین‌شناسی

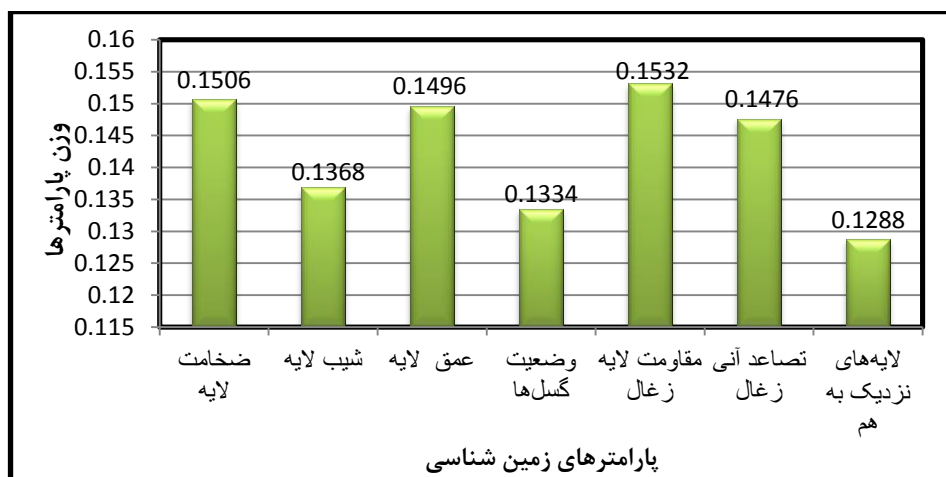
| وجود لایه‌های<br>نزدیک به هم | تصادد آنی زغال        | مقاومت لایه زغال      | وضعیت گسل‌ها          | عمق قرارگیری<br>لایه  | شیب لایه              | ضخامت لایه              |                              |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|
| (۰/۶۰۰، ۱/۱۶۴، ۲/۳۳۳)        | (۰/۳۳۳، ۱/۰۰۶، ۳/۰۰۰) | (۰/۴۲۹، ۰/۹۷۸، ۱/۸۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۱۳۱، ۱/۸۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۰۱۶، ۱/۶۶۷) | (۱/۰۰۰، ۱/۱۰۶، ۱/۸۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰)   | ضخامت لایه                   |
| (۰/۵۵۶، ۱/۰۵۲، ۲/۳۳۳)        | (۰/۳۳۳، ۰/۹۰۹، ۳/۰۰۰) | (۰/۴۲۹، ۰/۹۱۹، ۱/۸۰۰) | (۰/۵۵۶، ۱/۰۲۳، ۱/۸۰۰) | (۰/۵۵۶، ۰/۹۱۹، ۱/۶۶۷) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۴۲۹، ۰/۸۹۴، ۱/۲۸۶)   | شیب لایه                     |
| (۰/۶۰۰، ۱/۱۴۵، ۲/۳۳۳)        | (۰/۵۵۶، ۰/۹۹۰، ۲/۳۳۳) | (۰/۷۱۴، ۱/۰۰۰، ۱/۴۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۱۱۳، ۱/۶۶۷) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۰۸۸، ۱/۸۰۰) | (۰/۱۴۳، ۱/۶۲۳، ۱/۰۰۰)   | عمق<br>قرارگیری لایه         |
| (۰/۴۲۹، ۱/۰۲۹، ۱/۶۶۷)        | (۰/۵۵۶، ۰/۸۸۹، ۱/۶۶۷) | (۰/۵۵۶، ۰/۸۹۹، ۱/۶۶۷) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۶۰۰، ۰/۵۸۵، ۱/۶۶۷) | (۰/۵۵۶، ۰/۹۷۸، ۱/۸۰۰) | (۰/۰۰۶، ۰/۸۹۴، ۱/۲۸۶)   | وضعیت<br>گسل‌ها              |
| (۰/۶۰۰، ۱/۱۴۵، ۲/۳۳۳)        | (۰/۶۰۰، ۰/۹۹۰، ۱/۶۶۷) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۱۱۳، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۰۰۰، ۱/۴۰۰) | (۰/۵۵۶، ۱/۰۸۸، ۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹، ۰/۷۸۵، ۱/۰۰۰)   | مقاومت لایه<br>زغال          |
| (۰/۶۰۰، ۱/۱۵۷، ۳/۰۰۰)        | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۰۱۱، ۱/۶۶۷) | (۰/۶۰۰، ۱/۱۲۵، ۱/۸۰۰) | (۰/۴۲۹، ۱/۰۱۱، ۱/۸۰۰) | (۰/۳۳۳، ۱/۰۱۰، ۳/۰۰۰) | (۰/۱۱۱، ۰/۸۷۸، ۱/۲۸۶)   | تصادد آنی<br>زغال            |
| (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰)        | (۰/۳۳۳، ۰/۸۶۴، ۱/۶۶۷) | (۰/۴۲۹، ۰/۸۷۴، ۱/۶۶۷) | (۰/۶۰۰، ۰/۹۷۲، ۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹، ۰/۸۷۳، ۱/۶۶۷) | (۰/۴۲۹، ۰/۹۵۱، ۱/۸۰۰) | (۰/۵۵۶، ۰/۱۰۸۵۰، ۲/۲۸۶) | وجود لایه‌های<br>نزدیک به هم |

با استفاده از روابط (۵-۶) تا (۵-۸) عدد فازی  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فازی  $\tilde{W}_i$  و وزن غیر فازی جدول ۵-۲۸ محاسبه شده است و در جدول ۵-۲۹ آورده شده است.

جدول ۵-۲۹: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی پارامترهای زمین‌شناسی

| وزن غیر فازی<br>پارامترها | $\tilde{W}_i$<br>(وزن فازی پارامترها) | $\tilde{Z}_i$              |                                                      |           |
|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|-----------|
|                           |                                       | $(\alpha, \delta, \gamma)$ |                                                      |           |
| ۰/۱۵۰۶                    | (۰/۰۴۹۸، ۰/۱۵۲۰، ۰/۴۵۰۸)              | (۰/۶۰۸۴، ۱/۰۵۵۱، ۱/۸۲۷۴)   | ضخامت لایه                                           | پارامترها |
| ۰/۱۳۶۸                    | (۰/۰۴۴۶، ۰/۱۳۸۲، ۰/۴۱۴۵)              | (۰/۵۴۵۱، ۰/۹۵۹۲، ۱/۶۸۰۲)   | شیب لایه                                             |           |
| ۰/۱۴۹۶                    | (۰/۰۵۳۶، ۰/۱۵۰۴، ۰/۴۱۵۰)              | (۰/۶۵۴۵، ۱/۰۴۳۹، ۱/۶۸۲۲)   | عمق قرارگیری لایه                                    |           |
| ۰/۱۳۳۴                    | (۰/۰۴۸۲، ۰/۱۲۷۳، ۰/۳۸۶۵)              | (۰/۵۸۹۰، ۰/۸۸۳۶، ۱/۵۶۶۷)   | وضعیت گسل‌ها                                         |           |
| ۰/۱۵۳۲                    | (۰/۰۵۳۰، ۰/۱۵۰۴، ۰/۴۳۵۴)              | (۰/۶۴۷۴، ۱/۰۴۳۹، ۱/۷۶۴۹)   | مقاومت لایه زغال                                     |           |
| ۰/۱۴۷۶                    | (۰/۰۴۲۶، ۰/۱۵۰۲، ۰/۵۰۲۷)              | (۰/۵۲۰۰، ۱/۰۴۲۲، ۲/۰۳۷۶)   | تصادد آبی زغال                                       |           |
| ۰/۱۲۸۸                    | (۰/۰۴۰۱، ۰/۱۳۱۴، ۰/۴۰۵۵)              | (۰/۴۸۹۸، ۰/۹۱۱۸، ۱/۶۴۳۸)   | وجود لایه‌های نزدیک به هم                            |           |
| $\Sigma=1.000$            |                                       | (۰/۰۸۹۱، ۰/۱۴۴۱، ۰/۲۴۶۷)   | $(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$ |           |

نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای زمین‌شناسی در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای زمین‌شناسی

## ۵-۴-۳-۶- یافتن وزن پارامترهای معدنکاری

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۹ پارامتر معدنکاری با توجه به جداول پیوست ۱ در جدول ۵-۳۰ آورده شده است.

جدول ۵-۳۰: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۹ پارامتر معدنکاری

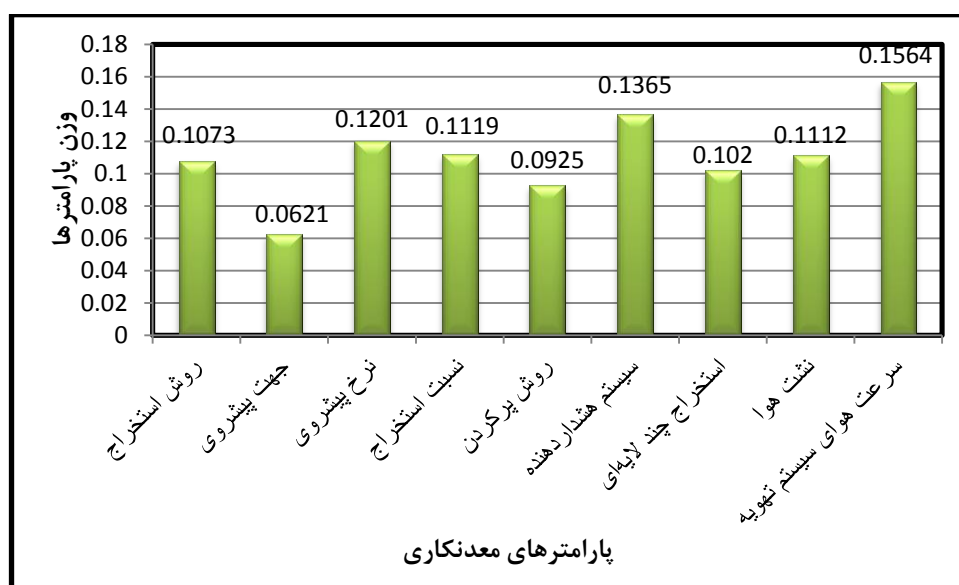
| حجم هوای<br>سیستم تهویه | نشت هوا               | استخراج چند<br>لایه‌ای | سیستم<br>هشداردهنده   | روش پرکردن            | نسبت استخراج          | نرخ پیشروی            | جهت پیشروی            | روش استخراج           |                         |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| (۰/۳۳۳، ۰/۷۹۵، ۱/۲۸۶)   | (۰/۳۳۳، ۱/۱۱۲، ۲/۳۳۳) | (۰/۴۲۹، ۱/۱۹۰، ۲/۳۳۳)  | (۰/۴۲۹، ۰/۸۹۴، ۱/۴۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۱۰۸، ۲/۳۳۳) | (۰/۳۳۳، ۱/۱۲۵، ۲/۳۳۳) | (۰/۳۳۳، ۱/۱۰۶، ۲/۳۳۳) | (۱/۰۰۰، ۱/۴۱۷، ۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | روش استخراج             |
| (۰/۱۱۱، ۰/۵۶۱، ۱/۲۸۶)   | (۰/۱۱۱، ۰/۷۸۵، ۱/۴۰۰) | (۰/۱۴۳، ۰/۸۴۰، ۱/۶۶۷)  | (۰/۱۴۳، ۰/۶۳۱، ۱/۴۰۰) | (۰/۳۳۳، ۰/۷۸۲، ۱/۶۶۷) | (۰/۱۱۱، ۱/۲۵۸، ۱/۴۰۰) | (۰/۱۱۱، ۰/۷۱۰، ۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۴۲۹، ۰/۸۹۴، ۱/۲۸۶) | جهت پیشروی              |
| (۰/۳۳۳، ۰/۷۹۰، ۱/۲۸۶)   | (۰/۷۱۴، ۱/۱۰۶، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۱۸۳، ۱/۸۰۰)  | (۰/۵۵۶، ۰/۸۸۹، ۱/۴۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۱۰۱، ۳/۰۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۱۱۸، ۱/۴۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۴۰۹، ۹/۰۰۰) | (۰/۱۴۳، ۱/۶۲۳، ۱/۰۰۰) | نرخ پیشروی              |
| (۰/۳۳۳، ۰/۷۰۶، ۱/۰۰۰)   | (۰/۷۱۴، ۰/۹۸۹، ۱/۴۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۰۵۸، ۱/۶۶۷)  | (۰/۵۵۶، ۰/۷۹۴، ۱/۴۰۰) | (۰/۷۱۴، ۰/۹۸۵، ۲/۳۳۳) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۷۱۴، ۰/۸۹۴، ۱/۴۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۲۶۰، ۹/۰۰۰) | (۰/۰۰۶، ۰/۸۹۴، ۱/۲۸۶) | نسبت<br>استخراج         |
| (۰/۳۳۳، ۰/۷۱۷، ۱/۲۸۶)   | (۰/۳۳۳، ۱/۰۰۴، ۱/۸۰۰) | (۰/۴۲۹، ۱/۰۷۵، ۲/۳۳۳)  | (۰/۳۳۳، ۰/۸۰۷، ۱/۴۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۳۳۳، ۱/۰۱۶، ۱/۴۰۰) | (۰/۳۳۳، ۰/۹۰۸، ۱/۴۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۲۷۹، ۳/۰۰۰) | (۰/۴۲۹، ۰/۷۸۵، ۱/۰۰۰) | روش پرکردن              |
| (۰/۵۵۶، ۰/۸۸۹، ۱/۲۸۶)   | (۰/۷۱۴، ۱/۲۴۵، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۳۳۲، ۲/۳۳۳)  | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۲۳۹، ۳/۰۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۲۵۹، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۱۲۵، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۵۸۶، ۷/۰۰۰) | (۰/۱۱۱، ۰/۸۷۸، ۱/۲۸۶) | سیستم<br>هشداردهنده     |
| (۰/۳۳۳، ۰/۶۶۸، ۱/۲۸۶)   | (۰/۶۰۰، ۰/۹۳۵، ۱/۴۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰)  | (۰/۴۲۹، ۰/۷۵۱، ۱/۴۰۰) | (۰/۴۲۹، ۰/۹۳۱، ۳/۰۰۰) | (۰/۶۰۰، ۰/۹۴۵، ۱/۴۰۰) | (۰/۵۵۶، ۰/۸۴۵، ۱/۴۰۰) | (۰/۶۰۰، ۱/۱۹۱، ۷/۰۰۰) | (۰/۵۵۶، ۰/۱۸۵۰/۲۸۶)   | استخراج چند<br>لایه‌ای  |
| (۰/۳۳۳، ۰/۷۱۴، ۱/۲۸۶)   | (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۰۷۰، ۱/۶۶۷)  | (۰/۵۵۶، ۰/۸۰۳، ۱/۴۰۰) | (۰/۵۵۶، ۰/۹۹۶، ۳/۰۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۰۱۱، ۱/۴۰۰) | (۰/۵۵۶، ۰/۹۰۴، ۱/۴۰۰) | (۰/۷۱۴، ۱/۲۷۴، ۹/۰۰۰) | (۰/۳۳۳، ۰/۶۵۶، ۱/۰۰۰) | نشت هوا                 |
| (۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰، ۱/۰۰۰)   | (۰/۷۷۸، ۱/۴۰۰، ۳/۰۰۰) | (۰/۷۷۸، ۱/۴۹۸، ۳/۰۰۰)  | (۰/۷۷۸، ۱/۱۲۵، ۱/۸۰۰) | (۰/۷۷۸، ۱/۳۹۴، ۳/۰۰۰) | (۱/۰۰۰، ۱/۴۱۶، ۳/۰۰۰) | (۰/۷۷۸، ۱/۲۶۶، ۳/۰۰۰) | (۰/۷۷۸، ۱/۷۸۴، ۹/۰۰۰) | (۰/۳۳۳، ۰/۹۲۹، ۱/۲۸۶) | حجم هوای<br>سیستم تهویه |

با استفاده از روابط (۵-۶) تا (۵-۸) عدد فاز  $\tilde{Z}_i$ ، وزن فاز  $\tilde{W}_i$  و وزن غیر فاز  $\tilde{W}_i$  جدول ۵-۳۰ محاسبه شده است و در جدول ۵-۳۱ آورده شده است.

جدول ۵-۳۱: وزن نهایی فاز نسبی و غیرفازی پارامترهای معدنکاری

| وزن غیر فاز<br>پارامترها | $\tilde{W}_i$<br>(وزن فاز پارامترها) | $\tilde{Z}_i$              |                                                      |                     |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|---------------------|
|                          |                                      | $(\alpha, \delta, \gamma)$ |                                                      |                     |
| ۰/۱۰۷۳                   | (۰/۰۲۷۹، ۰/۱۱۵۶، ۰/۳۸۲۷)             | (۰/۴۸۹۶، ۱/۰۵۸۷، ۱/۹۳۱۰)   | روش استخراج                                          | پارامترهای معدنکاری |
| ۰/۰۶۲۱                   | (۰/۰۱۰۹، ۰/۰۸۵۹، ۰/۲۵۵۴)             | (۰/۱۹۱۴، ۰/۷۸۶۵، ۱/۲۸۸۷)   | جهت پیشروی                                           |                     |
| ۰/۱۲۰۱                   | (۰/۰۳۷۰، ۰/۱۱۴۹، ۰/۴۰۷۸)             | (۰/۶۴۹۸، ۱/۰۵۲۴، ۲/۰۵۷۷)   | نرخ پیشروی                                           |                     |
| ۰/۱۱۱۹                   | (۰/۰۳۵۶، ۰/۱۰۲۸، ۰/۳۸۲۴)             | (۰/۶۲۵۹، ۰/۹۴۱۰، ۱/۹۲۹۴)   | نسبت استخراج                                         |                     |
| ۰/۰۹۲۵                   | (۰/۰۲۴۲، ۰/۱۰۴۴، ۰/۳۱۳۷)             | (۰/۴۲۵۰، ۰/۹۵۵۷، ۱/۵۸۲۵)   | روش پرکردن                                           |                     |
| ۰/۱۳۶۵                   | (۰/۰۴۱۰، ۰/۱۲۹۳، ۰/۴۱۹۷)             | (۰/۷۲۰۹، ۱/۱۸۴۵، ۲/۱۱۷۹)   | سیستم هشداردهنده                                     |                     |
| ۰/۱۰۲۰                   | (۰/۰۳۰۰، ۰/۰۹۷۱، ۰/۳۶۴۷)             | (۰/۵۲۷۴، ۰/۸۸۹۶، ۱/۸۴۰۲)   | استخراج چند لایه‌ای                                  |                     |
| ۰/۱۱۱۲                   | (۰/۰۳۳۷، ۰/۱۰۳۹، ۰/۳۹۳۲)             | (۰/۵۹۲۰، ۰/۹۵۱۶، ۱/۹۸۴۱)   | نشت هوا                                              |                     |
| ۰/۱۵۶۴                   | (۰/۰۴۶۸، ۰/۱۴۵۵، ۰/۵۶۱۸)             | (۰/۸۲۲۶، ۱/۳۳۲۵، ۲/۸۳۴۵)   | سرعت هوای سیستم تهویه                                |                     |
| $\Sigma=1.000$           |                                      | (۰/۰۵۶۹، ۰/۱۰۹۲، ۰/۱۹۸۲)   | $(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$ |                     |

نمودار ستونی وزن نهایی فاز دلفی پارامترهای زمین شناسی در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است.



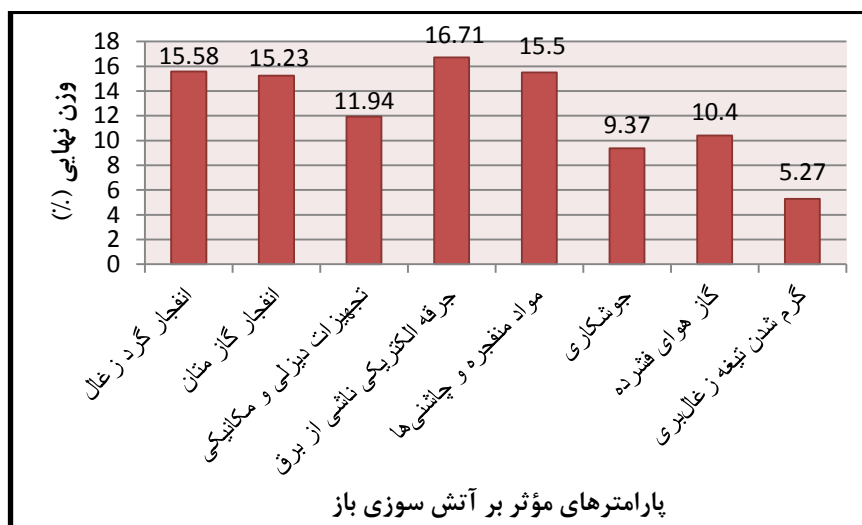
شکل ۵-۱۷: نمودار ستونی وزن نهایی فاز دلفی پارامترهای معدنکاری

## ۵-۴-۴- وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر حریق با استفاده از روش FDAHP

وزن نهایی غیرفازی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز در جدول ۵-۳۲ و شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۵-۳۲: وزن نهایی غیرفازی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز

| پارامترها                 | وزن نهایی | وزن نهایی (%) |
|---------------------------|-----------|---------------|
| انفجار گرد زغال           | ۰/۱۵۵۸    | ۱۵/۵۸         |
| انفجار گاز متان           | ۰/۱۵۲۳    | ۱۵/۲۳         |
| تجهیزات دیزلی و مکانیکی   | ۰/۱۱۹۴    | ۱۱/۹۴         |
| جرقه الکتریکی ناشی از برق | ۰/۱۶۷۱    | ۱۶/۷۱         |
| مواد منفجره و چاشنی‌ها    | ۰/۱۵۵۰    | ۱۵/۵۰         |
| جوشکاری                   | ۰/۰۹۳۷    | ۹/۳۷          |
| گاز هوای فشرده            | ۰/۱۰۴۰    | ۱۰/۴۰         |
| گرم شدن تیغه زغال‌بری     | ۰/۰۵۲۷    | ۵/۲۷          |



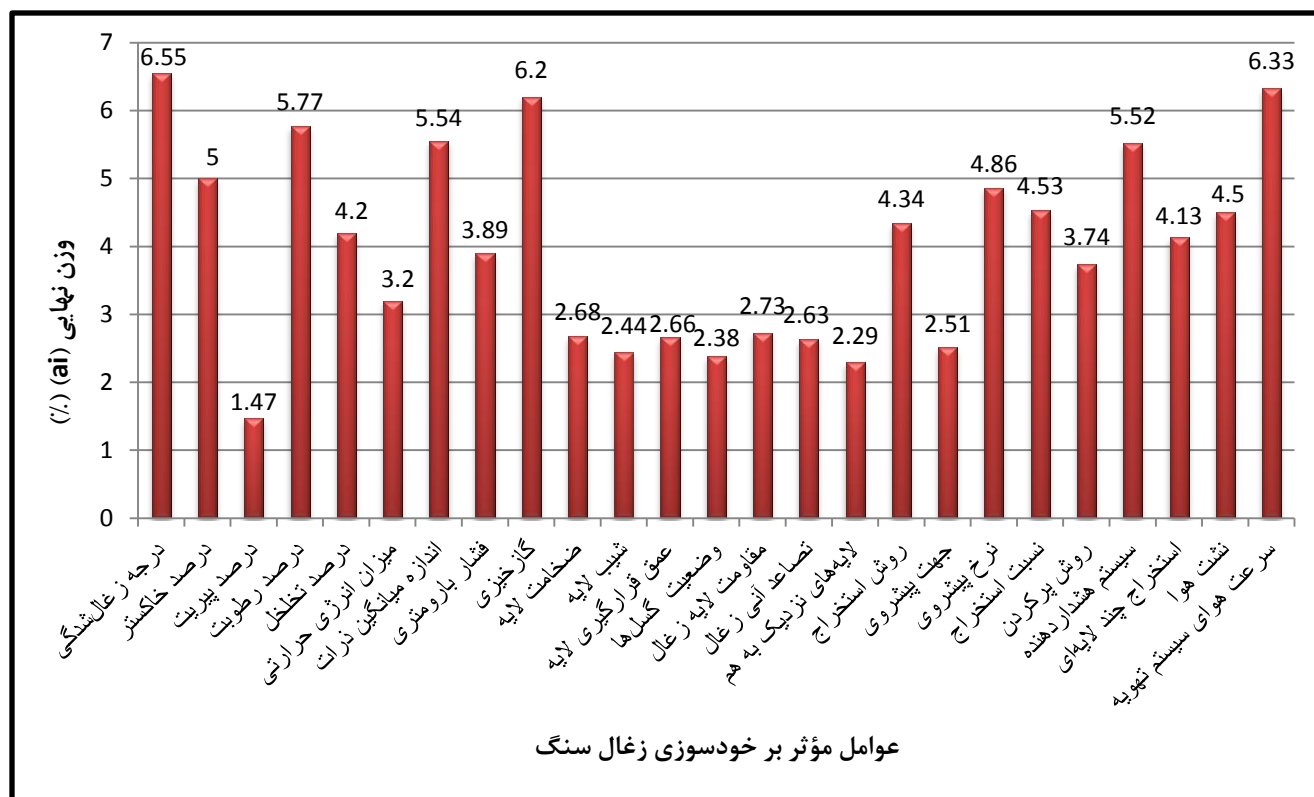
شکل ۵-۱۸: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز

چنان‌چه از شکل ۵-۱۸ مشاهده می‌شود جرقه الکتریکی، انفجار گرد زغال و انفجار گاز متان به ترتیب بیش‌ترین امتیازها و جوشکاری و گرم شدن تیغه‌های زغال‌بری به ترتیب کم‌ترین امتیازها را کسب کرده‌اند.

پس از ضرب نمودن وزن پارامترهای مؤثر بر خودسوزی در وزن پارامترهای اصلی مربوط ، وزن نهایی پارامترهای تأثیرگذار در خطر خودسوزی به دست آمده است که در جدول ۵-۳۳ و شکل ۵-۱۹ آورده شده است.

جدول ۵-۳۳: وزن نهایی غیرفازی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی در معادن زغال سنگ

| وزن عوامل اصلی               | پارامترها                 | وزن پارامترها | وزن نهایی پارامترها | وزن نهایی پارامترها (%) |
|------------------------------|---------------------------|---------------|---------------------|-------------------------|
| عوامل ذاتی<br>(۰/۴۱۷۲)       | درجه زغال شدگی            | ۰/۱۵۷۰        | ۰/۰۶۵۵              | ۶/۵۵                    |
|                              | درصد خاکستر               | ۰/۱۱۹۸        | ۰/۰۵۰۰              | ۵/۰۰                    |
|                              | درصد پیریت                | ۰/۰۳۵۲        | ۰/۰۱۴۷              | ۱/۴۷                    |
|                              | درصد رطوبت                | ۰/۱۳۸۲        | ۰/۰۵۷۷              | ۵/۷۷                    |
|                              | درصد تخلخل                | ۰/۱۰۰۶        | ۰/۰۴۲۰              | ۴/۲۰                    |
|                              | میزان انرژی حرارتی        | ۰/۰۷۶۶        | ۰/۰۳۲۰              | ۳/۲۰                    |
|                              | اندازه میانگین ذرات       | ۰/۱۳۲۷        | ۰/۰۵۵۴              | ۵/۵۴                    |
|                              | فشار بارومتری             | ۰/۰۹۳۲        | ۰/۰۳۸۹              | ۳/۸۹                    |
|                              | گازخیزی                   | ۰/۱۴۸۶        | ۰/۰۶۲۰              | ۶/۲۰                    |
| عوامل زمین شناسی<br>(۰/۱۷۸۱) | ضخامت لایه                | ۰/۱۵۰۶        | ۰/۰۲۶۸              | ۲/۶۸                    |
|                              | شیب لایه                  | ۰/۱۳۶۸        | ۰/۰۲۴۴              | ۲/۴۴                    |
|                              | عمق قرارگیری لایه         | ۰/۱۴۹۶        | ۰/۰۲۶۶              | ۲/۶۶                    |
|                              | وضعیت گسل‌ها              | ۰/۱۳۳۴        | ۰/۰۲۳۸              | ۲/۳۸                    |
|                              | مقاومت لایه زغال          | ۰/۱۵۳۲        | ۰/۰۲۷۳              | ۲/۷۳                    |
|                              | تصادف آبی زغال            | ۰/۱۴۷۶        | ۰/۰۲۶۳              | ۲/۶۳                    |
|                              | وجود لایه‌های نزدیک به هم | ۰/۱۲۸۸        | ۰/۰۲۲۹              | ۲/۲۹                    |
| عوامل معدنکاری<br>(۰/۴۰۴۸)   | روش استخراج               | ۰/۱۰۷۳        | ۰/۰۴۳۴              | ۴/۳۴                    |
|                              | جهت پیشروی                | ۰/۰۶۲۱        | ۰/۰۲۵۱              | ۲/۵۱                    |
|                              | نرخ پیشروی                | ۰/۱۲۰۱        | ۰/۰۴۸۶              | ۴/۸۶                    |
|                              | نسبت استخراج              | ۰/۱۱۱۹        | ۰/۰۴۵۳              | ۴/۵۳                    |
|                              | روش پرکردن                | ۰/۰۹۲۵        | ۰/۰۳۷۴              | ۳/۷۴                    |
|                              | سیستم هشداردهنده          | ۰/۱۳۶۵        | ۰/۰۵۵۲              | ۵/۵۲                    |
|                              | استخراج چند لایه‌ای       | ۰/۱۰۲۰        | ۰/۰۴۱۳              | ۴/۱۳                    |
|                              | نشت هوا                   | ۰/۱۱۱۲        | ۰/۰۴۵۰              | ۴/۵۰                    |
|                              | سرعت هوای سیستم تهویه     | ۰/۱۵۶۴        | ۰/۰۶۳۳              | ۶/۳۳                    |



شکل ۵-۱۹: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

چنانچه از شکل ۵-۱۹ مشاهده می‌شود درجه زغال‌شدگی و سرعت هوای سیستم تهویه بیشترین

امتیازها، پیریت محتوی و وضعیت گسل‌ها کمترین امتیازها را کسب کرده‌اند.

## ۵-۵- روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

در عصر حاضر پیشرفت‌های متعددی در بررسی و تحلیل مسائل پیچیده صورت گرفته است. یکی از روش‌هایی که به تدریج کاربرد زیادی در تحلیل مسائل مختلف پیدا کرده است نگرش سیستمی است. در تفکر سیستمی با در نظر گرفتن تمامی جوانب و عوامل متعدد به بررسی مسأله مورد نظر پرداخته می‌شود.

با پیچیده‌تر شدن مسائل مهندسی و کاربردهای گوناگون، با نگاهی واقع‌بینانه به موضوع درمی‌یابیم که روش‌های مرسوم عددی، تجربی و تحلیلی قادر به در نظر گرفتن تمامی عوامل تاثیرگذار بر یک مسأله خاص نبوده و همواره از بسیاری از ساده‌سازی‌ها در آن‌ها استفاده می‌شود و در نتیجه با محدودیت‌های بی‌شماری در مواجهه با مسائل گوناگون روبرو هستند. رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES) بر مبنای تفکر سیستمی بنا شده است (خالوکاکائی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸).

در هنگام طراحی یک ساختار در یک مسأله، لازم است که علاوه بر در نظر گرفتن تک تک فاکتورها، نحوه تأثیر متقابل این عوامل بر روی یکدیگر نیز در نظر گرفته شود. به عنوان یک روش سیستمی جهت مواجهه با تمام اندرکنش‌ها، می‌توان آن‌ها را در یک ماتریس قرار داد. این کار به عنوان ابزار پایه‌ای به وسیله رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مور استفاده قرار داد (خالوکاکائی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸).

سیستم‌های مهندسی سنگ برای اولین بار توسط هادسون<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است و از آن زمان به طور گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی به کار رفته است. این روش در مطالعات زیست محیطی، مدیریت زباله‌ها و پسماندها، طراحی فاضلاب‌های شهری، آلودگی هوا، پایداری شیب و طراحی سازه‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی میزان خطرات زیست محیطی، میزان آلودگی رودخانه‌ها و مدیریت زباله‌های هسته‌ای نمونه‌هایی از کاربرد این روش است (Frough & Torabi, 2013).

<sup>1</sup> - Hudson

این روش یک سیستم کامل مهندسی است که تمام اهداف اصلی و فرعی یک مسأله را در نظر می‌گیرد که با اطمینان بالا، توانایی وارد نمودن دانش کنونی را در ارزیابی‌ها دارد و قادر است تا در پروژه‌های مهندسی با اهداف گوناگون به کار رود. این رویکرد با در نظر گرفتن مسأله به صورت یک سیستم واقعی و با استفاده از ویژگی‌ها و تفکر سیستمی، امروزه به عنوان راه حلی جدید برای مسائل پیچیده مهندسی به شمار می‌رود (Khalokakaie & Naghadehi, 2012).

## ۵-۱-۵- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی

درباره سیستم تعاریف و نظریه‌های گوناگونی وجود دارد، برتalanffy<sup>۱</sup> از جمله متفکرانی است که کمک شایانی به شناخت و ارائه نظریه سیستمی کرده است، در واقع می‌توان گفت وی واضع نظریه عمومی سیستم‌ها به صورت مدون و علمی است. از نظر برتalanffy سیستم‌ها عبارت‌اند از تعدادی عنصر که با یکدیگر ارتباط دارند. برخی سیستم را مجموعه‌ای از اجزا به هم پیوسته می‌دانند که بین آن‌ها ارتباط منظمی وجود دارد، از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند، بر هم اثر می‌گذارند، به صورت کل عمل می‌کنند و هدف‌دار هستند. کلیت که از ویژگی‌های هر سیستم است از سلسله مراتب تبعیت می‌کند به طوری که هر سیستم درون سیستم دیگر عمل می‌کند و به یکدیگر بستگی دارند (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

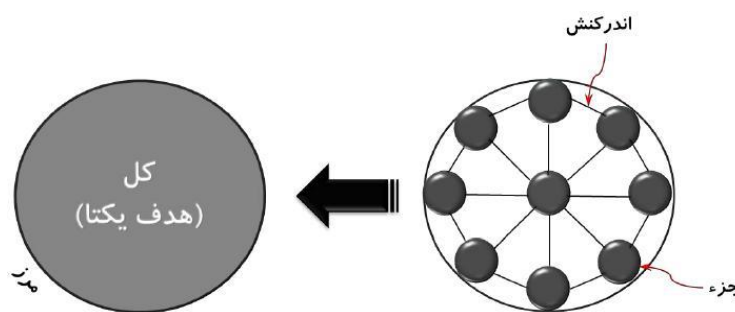
آلن‌بی<sup>۲</sup> سیستم را به صورت گروهی از بخش‌ها و اعضای مستقل و دارای اندرکنش بر روی یکدیگر تعریف می‌کند که این اثرات باعث تغییر در انرژی، ماده و یا اطلاعات می‌شوند. طبق نظر وی، همیشه کل سیستم از جمع تک تک اعضای آن بزرگ‌تر است طبق نظریه جیائو<sup>۳</sup> و هادسون استفاده از رویکرد سیستمی زمانی بسیار ضروری است که با مسائلی روبه‌رو هستیم که از پیچیدگی زیادی برخوردارند، آن چنان که روش‌های مرسوم به تنهایی و به سادگی قادر به حل آن‌ها نیستند (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

<sup>۱</sup> - Bertalanffy

<sup>۲</sup> - Allenby

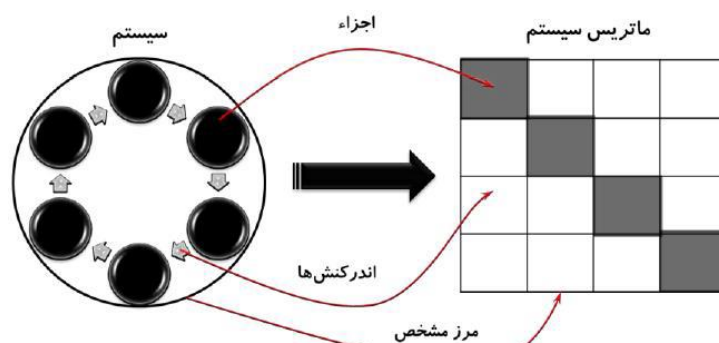
<sup>۳</sup> - Jiao

بنا به نظریه سیستم‌ها که توسط راپوپورت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۸ ارائه شده است، یک سیستم را به عنوان یک "کل"<sup>۲</sup> هدفی یکتا در محدوده‌ی یک مرز مشخص دارا است. به این ترتیب طبق شکل ۵-۲۰ می‌توان سیستم را متشکل از اجزای مؤثر بر هم با یک مرز مشخص فرض کرد. بنابراین کل را می‌توان به صورت پاسخ سیستم ناشی از اندرکنش‌های تمام اجزا و نه با جمع ساده آن اجزا تعریف نمود (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).



شکل ۵-۲۰: مفهوم تفکر سیستمی (زارع نقدهی، ۱۳۹۰)

سیستم‌ها در کاربردهای مختلف معمولاً به صورت ماتریس‌هایی با نام «ماتریس سیستم» نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزاء، اندرکنش‌ها و مرز مشخص را دارا هستند. این مفهوم در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).



شکل ۵-۲۱: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (زارع نقدهی، ۱۳۹۰)

<sup>۱</sup>- Rapoport

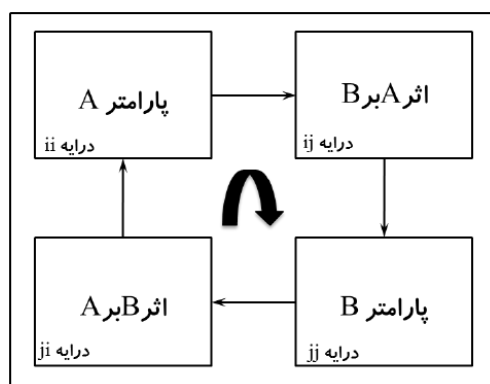
<sup>۲</sup>- Whole

## ۵-۵-۲- ماتریس اندرکنش

در سیستم‌های مهندسی سنگ شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تأثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی مناسب با استفاده از ماتریس اندرکنش<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. ماتریس اندرکنش عنصر کلیدی سیستم‌های مهندسی سنگ است که جهت فهرست کردن پارامترهای مؤثر در یک پروژه و اندرکنش بین آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

ماتریس اندرکنش یک ماتریس مربعی است که بر روی قطر اصلی آن پارامترهای مرتبط با مسأله مورد نظر وجود دارد و عناصر غیر قطری آن اندرکنش و اثرات متقابل هر جفت از پارامترها را نشان می‌دهد. بدین ترتیب مجموع خانه‌های سطری معرف اثری است که پارامترهای موجود در آن سطر ( $P_i$ ) روی دیگر پارامترها دارد و مجموع خانه‌های ستونی معرف تأثیری است که پارامتر موجود در آن ستون ( $P_i$ ) از دیگر پارامترها پذیرفته است. جهت این ماتریس در جهت عقربه‌های ساعت است (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

همان‌طور که در شکل ۵-۲۲ نشان داده شده است پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه پایین سمت راست ماتریس قرار گرفته است. درایه بالا سمت راست نشان دهنده تأثیر A بر روی B و درایه پایین سمت چپ نشان دهنده تأثیر B بر روی A می‌باشد (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).



شکل ۵-۲۲: مفهوم ماتریس اندرکنش در RES برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B (زارع نقدهی، ۱۳۹۰)

<sup>1</sup> - Interaction matrix

### ۵-۳-۵- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش

به طور کلی بعضی از پارامترها نسبت به پارامترهای دیگر، بر روی سیستم تأثیر بیش‌تری خواهند داشت و در مقابل سیستم نیز تأثیر بیش‌تری بر روی برخی پارامترها نسبت به پارامترهای دیگر دارد. کدگذاری ماتریس اندرکنش روشی در جهت تعیین شدت اندرکنش و مقدار غالب بودن پارامترها است.

طبق نظر هادسون، ارائه دهنده‌ی رویکرد RES، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد (زارع نقدهی، ۱۳۹۰):

**الف- روش اول به روش دوتایی<sup>۱</sup>** معروف است. در این شیوه کدگذاری، ساز و کار بین دو عامل به صورت یکی از دو حالت روشن یا خاموش در نظر گرفته می‌شود؛ در صورتی که روشن باشد، درایه مورد نظر مقدار واحد را قبول کرده و در صورتی که ساز و کار مورد نظر به حالت خاموش در نظر گرفته شود، مقدار صفر در درایه مربوط به آن قرار می‌گیرد.

**ب- روش کدگذاری دوم به روش نیمه عددی خبره<sup>۲</sup> (ESQ)** معروف است که در حقیقت نوع تعمیم یافته‌ای از روش دوتایی است که دارای پنج رده‌ی کدگذاری از صفر تا ۴ است هر یک از این اعداد با در نظر گرفتن رابطه بین هر جفت پارامتر، بیانگر مفهوم و معنی ویژه‌ای است که در جدول ۵-۳۴ آورده شده است.

جدول ۵-۳۴: کدهای انتخابی در روش کدگذاری نیمه عددی خبره (Saffari et al., 2013)

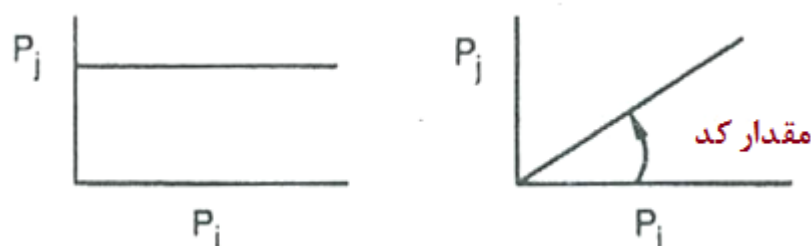
| توضیح                      | کد |
|----------------------------|----|
| عدم وجود اندرکنش           | ۰  |
| اندرکنش ضعیف               | ۱  |
| اندرکنش متوسط              | ۲  |
| اندرکنش قوی                | ۳  |
| اندرکنش اثر بحرانی یا شدید | ۴  |

<sup>۱</sup> - Binary

<sup>۲</sup> - Expert Semi-Quantitative

این روش کدگذاری از حساسیت بیش‌تری نسبت به روش دوتایی برخوردار است. ضعف اصلی روش مربوط به تغییرپذیری بسیار زیاد آن در تخصیص رده‌ها به درایه‌ها که آن را در تشریح کامل ساز و کارهای مربوطه ناتوان ساخته است. از طرفی در این روش، عمل کدگذاری توسط یک کارشناس یا خبره<sup>۱</sup> یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مسأله باعث ذهن‌گرایی کدگذاری‌ها و نتایج به دست آمده می‌شود. با این حال، به دلیل عدم وجود یک روش مرسوم دیگر برای پوشش این ضعف و نیز سادگی استفاده از آن، در حال حاضر این روش از بیش‌ترین کاربرد برخوردار است.

**ج- روش سوم از شیب نمودار عوامل** (در این‌جا برای نمونه  $P_i-P_j$ ) برای کدگذاری استفاده می‌کند. طبق شکل ۵-۲۳، اگر نمودار  $P_i-P_j$  به صورت افقی باشد، در این صورت  $P_j$  به  $P_i$  وابسته نیست. ولی اگر رابطه‌ای خطی بین آن‌ها وجود داشته باشد، ساز و کار مربوطه می‌تواند توسط شیب خط کدگذاری شود که در حقیقت سرعت تغییرات  $P_j$  نسبت به  $P_i$  را نشان می‌دهد. برای استفاده از این روش، بایستی نمودارهای  $P_i-P_j$  برای تمامی درایه‌های غیر اصلی ماتریس مشخص شوند. بدون شک عدم خطی بودن روابط میان عوامل مشکلی است که در بسیاری از موارد وجود خواهد داشت. با این حال اگرچه این روش تعمیمی علمی‌تر از دو روش پیشین به نظر می‌رسد، احتمال مواجهه با اطلاعات ناکافی در مورد بسیاری از کاربردها وجود خواهد داشت.



شکل ۵-۲۳: روش سوم کدگذاری ماتریس اندرکنش در روش RES (زارع نقدهی، ۱۳۹۰)

<sup>۱</sup> - Expert

د- روش چهارم، تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم می‌باشد. در این روش، فرض بر این است که تمام مکانیزم‌ها در درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌توانند به صورت یک معادله مشتقات جزئی ( $PDE^1$ ) بیان شوند. این روش نیز از ضعفی مشترک با آنچه که برای روش سوم بیان شد برخوردار است. علاوه بر این، با وجود این که اعمال معادلات مشتقات جزئی مرتبه دوم راه حل واقعی‌تر به نظر می‌رسد، ولی همین کار می‌تواند در ماتریس‌های بزرگ، بسیار سخت و گاه غیرممکن باشد.

ه- روش پنجم روش صریح<sup>۲</sup> نام دارد. در این حالت فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل ساز و کارهای ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی<sup>۳</sup> آن‌ها فراهم است و می‌توان رفتار واقعی اندرکنش‌ها را مورد بررسی قرار داد. چنین آگاهی و اطلاعاتی هرگز به طور کامل برای یک ماتریس وجود ندارد، ولی در صورت استفاده از تمام اطلاعات موجود، می‌تواند با روش‌های دوم و چهارم تلفیق شده و مورد استفاده قرار گیرد.

روش نیمه عددی خبره از میان روش‌ها، با وجود ضعف‌های آشکار تا حد زیادی موفق بوده و تاکنون بیش‌ترین کاربرد را داشته است.

## ۵-۴-۵- نمودار علّت- اثر

نمودار علّت- اثر پارامترها که از تأثیر ماتریس اندرکنش به دست می‌آید امکان شناسایی پارامترهای غالب طراحی و شدت اندرکنش هر یک بر رفتار سیستم را نشان می‌دهد. در نمودار علّت- اثر پارامترها، اثر یک پارامتر روی سیستم «اثر» و اثر سیستم روی پارامتر «تأثیر» نامیده می‌شود (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

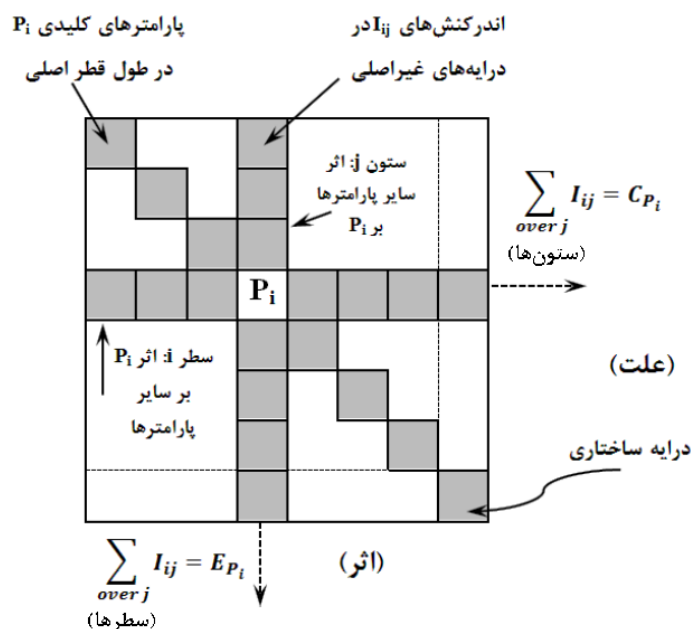
با توجه به نحوه ساخته شدن ماتریس واضح است که هر سطر عبوری از یک درایه نشان‌دهنده تأثیر آن بر تمام پارامترهای موجود در سیستم است. برعکس، هر ستون عبوری از آن درایه نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای دیگر سیستم بر روی آن می‌باشد (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

<sup>1</sup> - Partial Differential Equation

<sup>2</sup> - Explicit

<sup>3</sup> - Numerical

بعد از کدگذاری ماتریس می‌توان مجموع هر ردیف و ستون را بدست آورد. مجموع مقادیر هر سطر به عنوان «علت»<sup>۱</sup> یا اثر  $P_i$  روی سیستم و مجموع مقادیر ستون بعنوان «تأثیر»<sup>۲</sup> یا اثر سیستم روی پارامتر است. که در نهایت طبق شکل ۵-۲۴ منجر به وجود آمدن محورهای C و E می‌شوند (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).



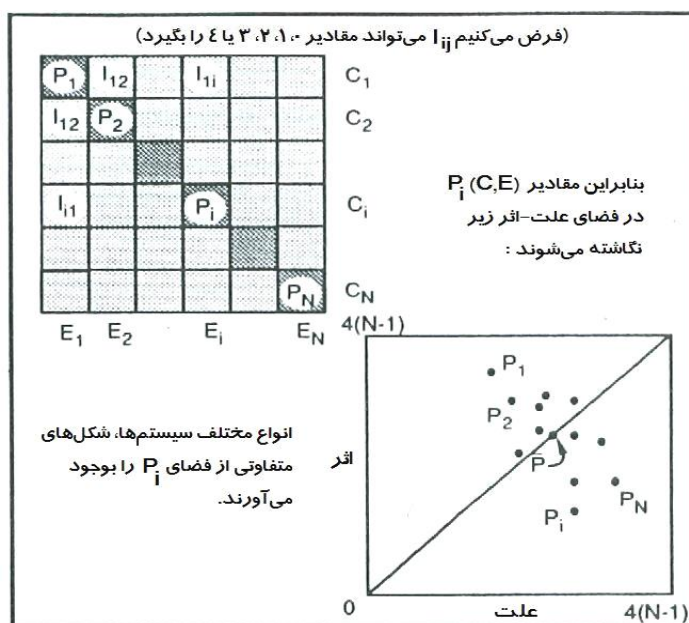
شکل ۵-۲۴: شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندركنش (زارع نقدهی، ۱۳۹۰)

پس از کدگذاری ماتریس، مقادیر علت و اثر تمام پارامترها محاسبه و بر روی نمودار علت-اثر رسم می‌شوند. موقعیت هر نقطه در فضای (C/E) وضعیت اندركنش آن پارامتر را مشخص می‌کند. بدیهی است هر چه مقدار عددی حاصل جمع (C+E) پارامتر مورد نظر بیشتر باشد، شدت اندركنش آن با کل سیستم بیشتر بوده و هرچه مقدار عددی تفاضلی (C-E) (با در نظر گرفتن علامت آن) پارامتر مورد نظر بیشتر باشد میزان غلبه پارامتر مذکور روی سیستم بیشتر است. مقدار منفی برای (C-E) نشان‌دهنده غلبه سیستم بر پارامتر مورد نظر است (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

<sup>1</sup> - Cause

<sup>2</sup> - Effect

مقادیر محورها برای هر پارامتر می‌تواند بر روی نمودار علت-اثر انتقال یابد. در شکل ۵-۲۵ نمودار (C/E) تعمیم داده شده به N پارامتر قابل مشاهده است. در این مورد پارامترها به صورت ابر مانند در فضای C و E درآمده و از سیستمی پیچیده حکایت دارند. توجه به موقعیت این نقاط که در واقع نماینده پارامترهای اصلی سیستم هستند، در توسعه و سودمندی نظریه سیستمی ارائه شده از اهمیت بسیاری برخوردار است (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).



شکل ۵-۲۵: نمودار علت-اثر تعمیم داده شده به N پارامتر (زارع نقدهی، ۱۳۹۰)

شدت اندرکنش هر عامل در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، مجموع علت و اثر (C+E) آن عامل است. شدت اندرکنش هر عامل، بیانگر اهمیت عامل مذکور در سیستم مورد بررسی است. در نتیجه طبق رابطه ۵-۱۱ مقدار درصد شدت اندرکنش عوامل به عنوان ضریب وزنی آن‌ها در مسأله در نظر گرفته می‌شود (زارع نقدهی، ۱۳۹۰).

$$a_i = \frac{C_i + E_i}{\sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^n E_i} \quad (۱۱-۵)$$

که در این رابطه:

i: تعداد پارامترهای اصلی

$a_i$ : وزن پارامتر  $i$ ام

$C_i$ : اثرگذاری پارامتر  $i$ ام

$E_i$ : تأثیرپذیری پارامتر  $i$ ام

در نهایت نتیجه تشکیل ماتریس اندرکنش تشکیل جدولی می‌شود که حاوی مقادیر  $C$ ،  $E$ ،  $C+E$ ،  $C-E$  و  $a_i$  برای هر پارامتر می‌باشد که شمای کلی آن در جدول ۵-۳۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۳۵: شمای کلی از یک جدول حاصله از یک ماتریس اندرکنش

| پارامتر | C     | E     | C+E         | C-E         | $a_i$ |
|---------|-------|-------|-------------|-------------|-------|
| $P_1$   | $C_1$ | $E_1$ | $C_1 + E_1$ | $C_1 - E_1$ | $a_1$ |
| $P_2$   | $C_2$ | $E_2$ | $C_2 + E_2$ | $C_2 - E_2$ | $a_2$ |
| .       | .     | .     | .           | .           | .     |
| $P_n$   | $C_n$ | $E_n$ | $C_n + E_n$ | $C_n - E_n$ | $a_n$ |

## ۵-۵-۵- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر بر حریق با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ (RES)

به منظور درک چگونگی اثرات متقابل پارامترهای مؤثر بر حریق، نیاز به یک مطالعه سیستمی است تا بتوان میزان اثر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح نمود. بنابراین ۸ پارامتر مهم انتخاب شده در آتش‌سوزی باز و ۲۵ پارامتر مهم در خودسوزی زغال‌سنگ در بخش ۵-۲، در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اندرکنش قرار می‌گیرند. ماتریس اندرکنش پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز برای ارزیابی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ، به روش نیمه عددی خبره کدگذاری شد که نتیجه آن در جدول ۵-۳۶ آورده شده است.

روش کدگذاری نیمه عددی خبره (ESQ) معروف‌ترین روش کدگذاری است که دارای پنج کلاس از ۰ تا ۴ است. در این کلاس‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش، ۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته می‌شود (صفاری، ۱۳۹۲).

پس از کدگذاری ماتریس، علّت C به صورت مجموع تمام کدهای سطر و اثر E به صورت مجموع تمام کدهای ستون برای هر پارامتر قابل محاسبه است.

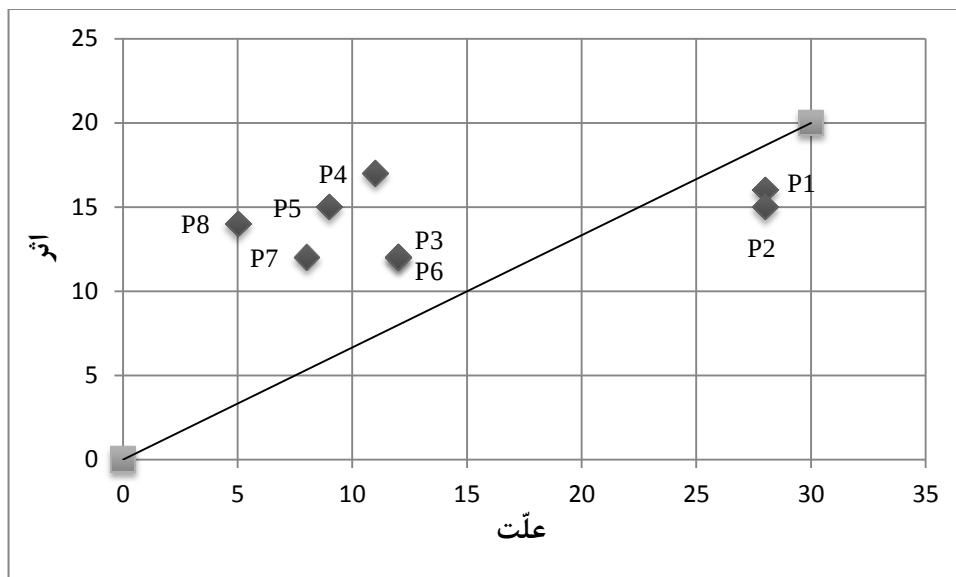
جدول ۵-۳۶: ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز

|                |                |                |                |                |                |                |                |    |      |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|------|
| P <sub>1</sub> | ۴              | ۴              | ۴              | ۴              | ۴              | ۴              | ۴              | ۲۸ | علّت |
| ۴              | P <sub>2</sub> | ۴              | ۴              | ۴              | ۴              | ۴              | ۴              | ۲۸ |      |
| ۲              | ۲              | P <sub>3</sub> | ۲              | ۲              | ۱              | ۱              | ۲              | ۱۲ |      |
| ۳              | ۳              | ۱              | P <sub>4</sub> | ۱              | ۱              | ۱              | ۱              | ۱۱ |      |
| ۲              | ۲              | ۱              | ۱              | P <sub>5</sub> | ۱              | ۱              | ۱              | ۹  |      |
| ۲              | ۲              | ۱              | ۳              | ۲              | P <sub>6</sub> | ۱              | ۱              | ۱۲ |      |
| ۲              | ۱              | ۱              | ۱              | ۱              | ۱              | P <sub>7</sub> | ۱              | ۸  |      |
| ۱              | ۱              | ۰              | ۲              | ۱              | ۰              | ۰              | P <sub>8</sub> | ۵  |      |
| ۱۶             | ۱۵             | ۱۲             | ۱۷             | ۱۵             | ۱۲             | ۱۲             | ۱۴             |    |      |
| اثر            |                |                |                |                |                |                |                |    |      |

مقادیر علّت و اثر هر پارامتر به روی محورهای X و Y منتقل شده و بنابراین نمودار علّت-اثر را به وجود آورده‌اند (شکل ۵-۲۶). قطر این نمودار نشان دهنده مکان هندسی ( $C=E$ ) است و در طول این قطر، مجموع  $C+E$  افزایش می‌یابد.

نمودار علّت-اثر شکل ۵-۲۶، تفاوت میان اثرات متقابل زیاد و کم را نشان می‌دهد. نقاطی که در قسمت پایین سمت راست نمودار قرار می‌گیرند، پارامترهایی هستند که بر روی سیستم تسلّط دارند و به عبارت دیگر بر روی سیستم غالب هستند، چرا که از مقادیر C-E بزرگ‌تری نسبت به نقاطی که در اطراف قطر قرار دارند، برخوردارند. پارامترهایی که تحت اثر سیستم قرار گرفته‌اند در قسمت بالا و سمت چپ نمودار قرار می‌گیرند و مقادیر C-E کوچک‌تری را دارا هستند و به عبارت دیگر مغلوب سیستم شده‌اند. نمودار علّت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه دارای اهمیّت بوده و می‌تواند اثرات متقابل مفید و غیرمفید از نظر مهندسی را مشخص کند.

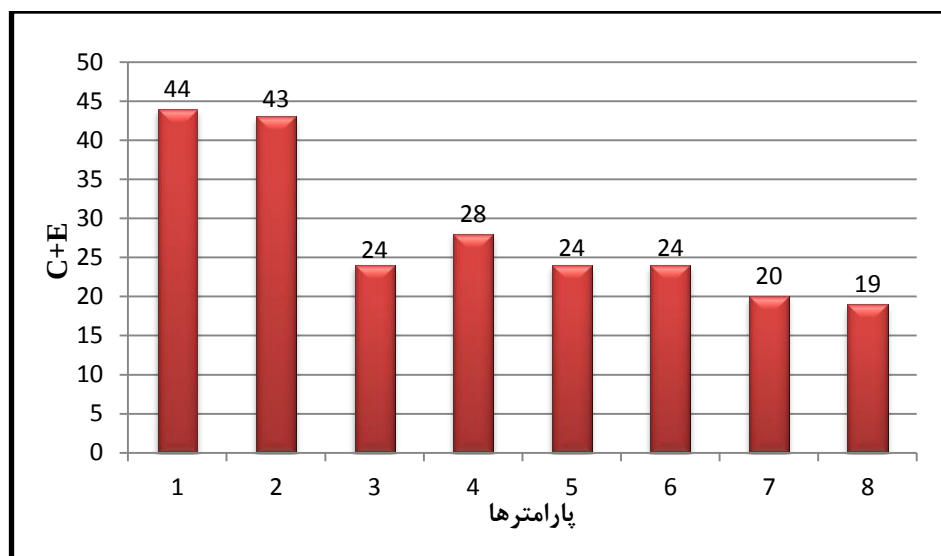
محاسبه میزان اندرکنش به صورت مقدار  $C+E$  می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی شود که لازم است تحت کنترل قرار بگیرند، زیرا تغییر در این پارامترها احتمالاً باعث القای تغییرات مهمی در سیستم شود.



شکل ۵-۲۶: نمودار علت-اثر برای پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز

از نمودار علت-اثر رسم شده در شکل ۵-۲۶ مشخص می‌شود که پارامتر  $P_1$  و  $P_2$  که انفجار گرد زغال و انفجار گاز متان می‌باشد بیش‌ترین تسلط را بر روی سیستم دارند و پارامتر  $P_4$  و  $P_5$  یعنی جرقه الکتریکی و چاشنی‌ها کاملاً تحت اثر سیستم هستند.

با به دست آوردن مجموع علت و اثرها ( $C+E$ ) برای هر پارامتری توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم کرد که این نمودار در شکل ۵-۲۷ آورده شده است. انتخاب  $C+E$  به عنوان فاکتور تمایز بین پارامترها به دلیل تمرکز بر نقش اندرکنش سیستم بوده است. به طور کلی هر چه اندرکنش یک سیستم بیش‌تر باشد، آن سیستم به صورت بالقوه ناپایدار است، زیرا شانس بیش‌تری وجود دارد که تغییر کوچک در یک پارامتر تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر بگذارد.



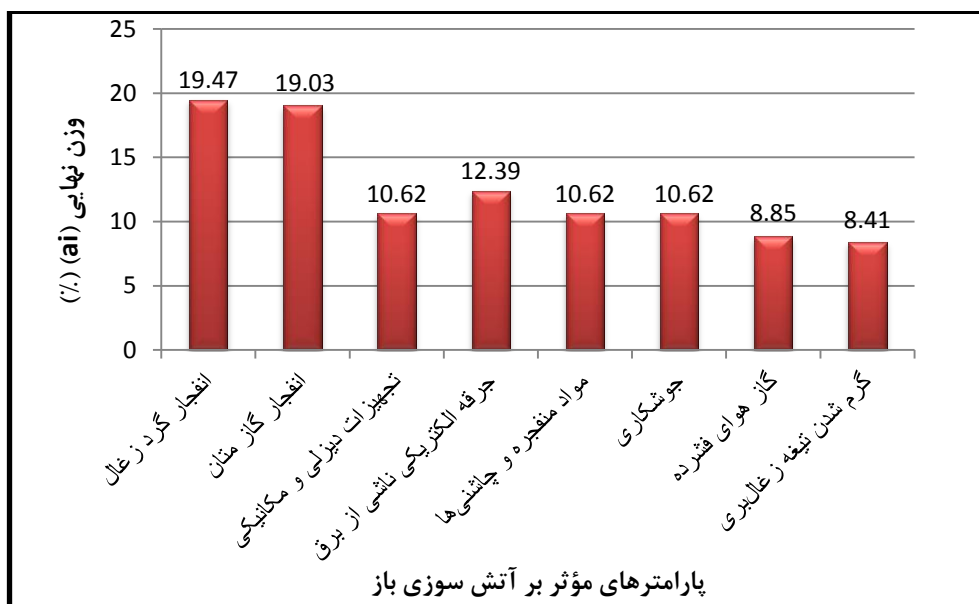
شکل ۵-۲۷: هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز

نمودار شدت اندرکنش پارامترها نشان می‌دهد که پارامترهای انفجار گرد زغال ( $P_1$ )، انفجار گاز متان ( $P_2$ ) و جرقه الکتریکی بیش‌ترین شدت اندرکنش را در سیستم داشته و بنابراین تغییر کوچکی در این پارامترها تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر خواهد داشت.

جدول ۵-۳۷ و شکل ۵-۲۸ وزن هر پارامتر ( $a_i$ ) را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۳۷: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر آتش‌سوزی باز با روش سیستم‌های مهندسی سنگ

|                          | پارامتر                   | C                        | E                        | C+E                              | C-E | $a_i$ (%) |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----|-----------|
| $P_1$                    | انفجار گرد زغال           | ۲۸                       | ۱۶                       | ۴۴                               | ۱۲  | ۱۹/۴۷     |
| $P_2$                    | انفجار گاز متان           | ۲۸                       | ۱۵                       | ۴۳                               | ۱۳  | ۱۹/۰۳     |
| $P_3$                    | تجهیزات دیزلی و مکانیکی   | ۱۲                       | ۱۲                       | ۲۴                               | ۰   | ۱۰/۶۲     |
| $P_4$                    | جرقه الکتریکی ناشی از برق | ۱۱                       | ۱۷                       | ۲۸                               | -۶  | ۱۲/۳۹     |
| $P_5$                    | مواد منفجره و چاشنی‌ها    | ۹                        | ۱۵                       | ۲۴                               | -۶  | ۱۰/۶۲     |
| $P_6$                    | جوشکاری                   | ۱۲                       | ۱۲                       | ۲۴                               | ۰   | ۱۰/۶۲     |
| $P_7$                    | گاز هوای فشرده            | ۸                        | ۱۲                       | ۲۰                               | -۴  | ۸/۸۵      |
| $P_8$                    | گرم شدن تیغه زغال‌بری     | ۵                        | ۱۴                       | ۱۹                               | -۹  | ۸/۴۱      |
| $\sum_{i=1}^8 a_i = 100$ |                           | $\sum_{i=1}^8 C_i = 113$ | $\sum_{i=1}^8 E_i = 113$ | $\sum_{i=1}^8 (C_i + E_i) = 226$ |     |           |



شکل ۵-۲۸: وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر آتش سوزی باز با روش سیستم مهندسی سنگ

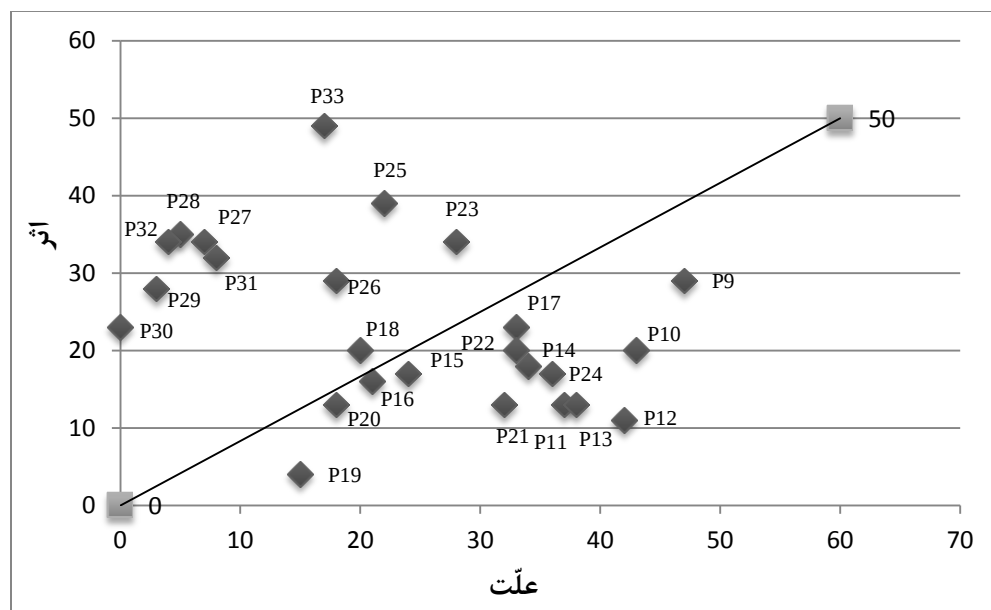
ماتریس اندرکنش پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ برای ارزیابی خطر حریق در معادن زغال سنگ،

به روش نیمه عددی خبره کدگذاری شد که نتیجه آن در جدول ۵-۳۸ آورده شده است.

جدول ۵-۳۸: ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

|                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |    |    |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|----|
| P <sub>9</sub> | ۳               | ۳               | ۳               | ۲               | ۳               | ۲               | ۲               | ۳               | ۱               | ۱               | ۲               | ۱               | ۲               | ۳               | ۲               | ۲               | ۱               | ۱               | ۲               | ۱               | ۳               | ۱               | ۱               | ۲               | ۴۷ |    |
| ۳              | P <sub>10</sub> | ۳               | ۲               | ۲               | ۳               | ۲               | ۲               | ۳               | ۱               | ۱               | ۲               | ۱               | ۲               | ۲               | ۱               | ۲               | ۱               | ۱               | ۲               | ۱               | ۲               | ۱               | ۱               | ۲               | ۴۳ |    |
| ۳              | ۳               | P <sub>11</sub> | ۲               | ۲               | ۳               | ۲               | ۲               | ۳               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۲               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۰               | ۱               | ۱               | ۱               | ۲               | ۳۷ |    |
| ۲              | ۲               | ۱               | P <sub>12</sub> | ۲               | ۳               | ۲               | ۲               | ۲               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۲               | ۳               | ۱               | ۱               | ۱               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۴۲ |    |
| ۲              | ۱               | ۱               | ۱               | P <sub>13</sub> | ۱               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۰               | ۱               | ۲               | ۳               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۲               | ۲               | ۱               | ۱               | ۲               | ۳               | ۳               | ۳۸ |    |
| ۴              | ۲               | ۲               | ۲               | ۱               | P <sub>14</sub> | ۱               | ۲               | ۳               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۲               | ۲               | ۱               | ۲               | ۱               | ۱               | ۱               | ۰               | ۱               | ۱               | ۱               | ۳               | ۳۴ |    |
| ۲              | ۲               | ۱               | ۱               | ۱               | ۰               | P <sub>15</sub> | ۰               | ۰               | ۲               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۰               | ۰               | ۲               | ۱               | ۲               | ۲۴ |    |
| ۳              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>16</sub> | ۱               | ۲               | ۰               | ۰               | ۱               | ۲               | ۲               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۱               | ۰               | ۰               | ۱               | ۱               | ۲               | ۲۱ |    |
| ۳              | ۱               | ۱               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>17</sub> | ۱               | ۰               | ۰               | ۱               | ۲               | ۳               | ۱               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۳               | ۲               | ۲               | ۳  | ۳۳ |
| ۲              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>18</sub> | ۰               | ۰               | ۱               | ۱               | ۱               | ۲               | ۲               | ۱               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۱               | ۰               | ۱               | ۲  | ۲۰ |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>19</sub> | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۰               | ۲               | ۱               | ۲  | ۱۵ |
| ۲              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۰               | ۰               | ۱               | ۱               | ۰               | P <sub>20</sub> | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۳               | ۱               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۰               | ۰               | ۱               | ۲  | ۱۸ |
| ۰              | ۲               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۱               | ۱               | ۲               | ۲               | ۰               | ۲               | P <sub>21</sub> | ۰               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۱               | ۲               | ۲               | ۲  | ۳۲ |
| ۲              | ۱               | ۱               | ۰               | ۲               | ۱               | ۲               | ۰               | ۲               | ۲               | ۰               | ۲               | ۱               | P <sub>22</sub> | ۳               | ۱               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۱               | ۰               | ۲               | ۱               | ۱  | ۳۳ |
| ۰              | ۱               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۱               | ۱               | ۰               | ۲               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>23</sub> | ۱               | ۳               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۱               | ۳               | ۳               | ۲               | ۳  | ۲۸ |
| ۱              | ۲               | ۰               | ۰               | ۱               | ۱               | ۲               | ۲               | ۱               | ۲               | ۰               | ۱               | ۲               | ۲               | ۲               | P <sub>24</sub> | ۳               | ۲               | ۲               | ۲               | ۲               | ۱               | ۰               | ۳               | ۲               | ۲  | ۳۶ |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>25</sub> | ۲               | ۲               | ۳               | ۳               | ۳               | ۳               | ۳               | ۳               | ۳  | ۲۲ |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۲               | ۰               | ۳               | P <sub>26</sub> | ۳               | ۱               | ۳               | ۰               | ۲               | ۱               | ۳               | ۱۸ |    |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۲               | ۰               | ۰               | ۱               | P <sub>27</sub> | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۳               | ۷  |    |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۰               | ۰               | P <sub>28</sub> | ۱               | ۰               | ۱               | ۱               | ۱               | ۵  |    |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>29</sub> | ۰               | ۰               | ۱               | ۱               | ۳  |    |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>30</sub> | ۰               | ۰               | ۰               | ۰  |    |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۰               | ۱               | ۰               | ۰               | ۲               | ۲               | ۰               | P <sub>31</sub> | ۱               | ۱               | ۸  |    |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۲               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | P <sub>32</sub> | ۲               | ۴  |    |
| ۰              | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۱               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۰               | ۲               | ۰               | ۲               | ۳               | ۲               | ۰               | ۱               | ۲               | ۱               | ۳               | P <sub>33</sub> | ۱۷ |    |
| ۲۹             | ۲۰              | ۱۳              | ۱۱              | ۱۳              | ۱۸              | ۱۷              | ۱۶              | ۲۳              | ۲۰              | ۴               | ۱۳              | ۱۳              | ۲۰              | ۳۴              | ۱۷              | ۳۹              | ۲۹              | ۳۴              | ۳۵              | ۲۸              | ۲۳              | ۳۲              | ۳۴              | ۴۹              |    |    |
| اثر            |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |    |    |

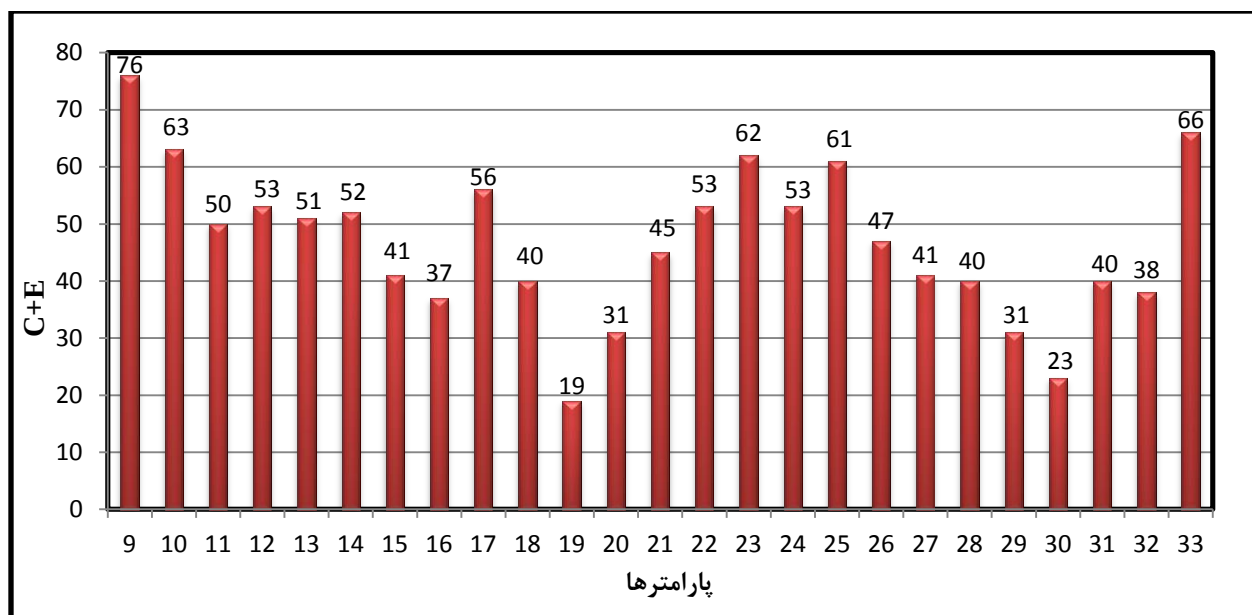
پس از کدگذاری ماتریس، مقادیر علت و اثر هر پارامتر به روی محورهای X و Y منتقل شده و بنابراین نمودار علت-اثر را به وجود آورده‌اند (شکل ۵-۲۹).



شکل ۵-۲۹: نمودار علت-اثر برای پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

از نمودار علت-اثر رسم شده در شکل ۵-۲۹ مشخص می‌شود که پارامترهایی از قبیل  $P_{12}$ ،  $P_{13}$  که رطوبت محتوی و درصد تخلخل می‌باشد بیش‌ترین تسلط را بر روی سیستم دارند و پارامتر  $P_{25}$  و  $P_{33}$  یعنی سرعت هوای سیستم تهویه و روش استخراج کاملاً تحت اثر سیستم هستند.

با به دست آوردن مجموع علت و اثرها (C+E) برای هر پارامتری توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم کرد که این نمودار در شکل ۵-۳۰ آورده شده است.



شکل ۵-۳: هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

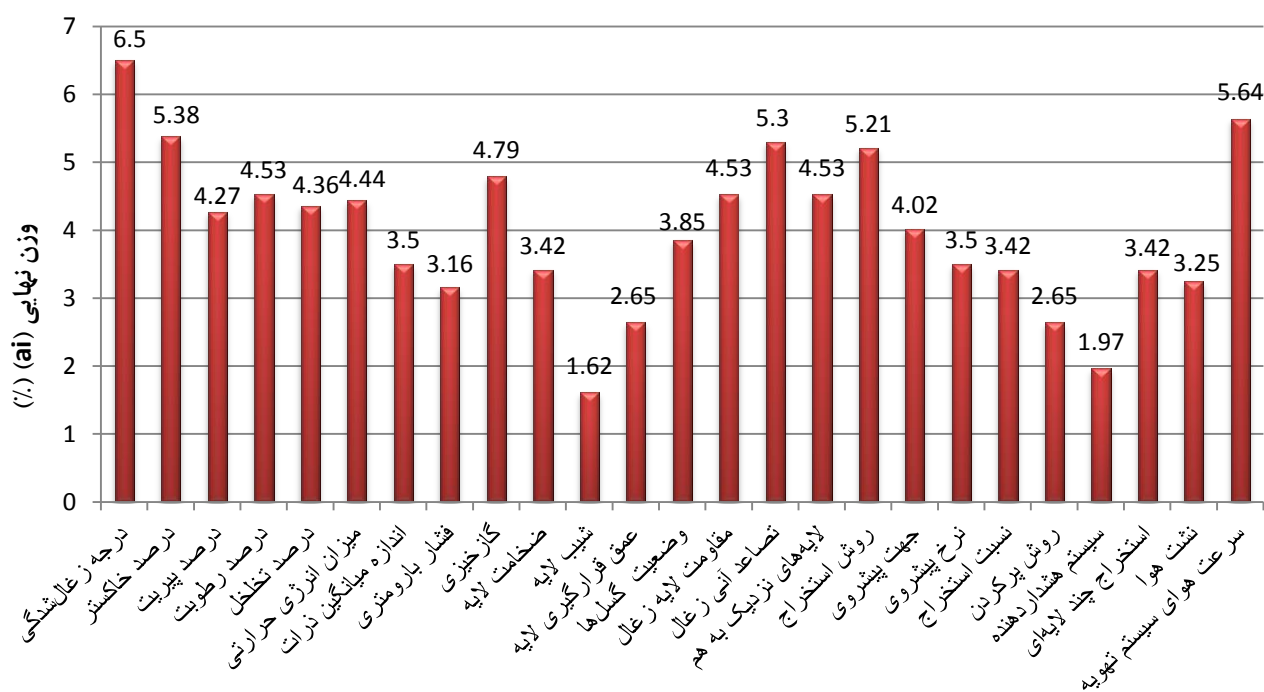
جدول ۵-۳۹ و شکل ۵-۳۱ وزن هر پارامتر ( $a_i$ ) را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۳۹: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ با روش سیستم‌های مهندسی سنگ

| $a_i$ (%) | C-E | C+E | E  | C  | پارامتر              |                 |
|-----------|-----|-----|----|----|----------------------|-----------------|
| ۶/۵       | ۱۸  | ۷۶  | ۲۹ | ۴۷ | درجه زغال‌شدگی       | P <sub>9</sub>  |
| ۵/۳۸      | ۲۳  | ۶۳  | ۲۰ | ۴۳ | درصد خاکستر          | P <sub>10</sub> |
| ۴/۲۷      | ۲۴  | ۵۰  | ۱۳ | ۳۷ | درصد پیریت           | P <sub>11</sub> |
| ۴/۵۳      | ۳۱  | ۵۳  | ۱۱ | ۴۲ | درصد رطوبت           | P <sub>12</sub> |
| ۴/۳۶      | ۲۵  | ۵۱  | ۱۳ | ۳۸ | درصد تخلخل           | P <sub>13</sub> |
| ۴/۴۴      | ۱۶  | ۵۲  | ۱۸ | ۳۴ | میزان انرژی حرارتی   | P <sub>14</sub> |
| ۳/۵       | ۷   | ۴۱  | ۱۷ | ۲۴ | اندازه میانگین ذرات  | P <sub>15</sub> |
| ۳/۱۶      | ۵   | ۳۷  | ۱۶ | ۲۱ | فشار بارومتری        | P <sub>16</sub> |
| ۴/۷۹      | ۱۰  | ۵۶  | ۲۳ | ۳۳ | گازخیزی              | P <sub>17</sub> |
| ۳/۴۲      | ۰   | ۴۰  | ۲۰ | ۲۰ | ضخامت لایه           | P <sub>18</sub> |
| ۱/۶۲      | ۱۱  | ۱۹  | ۴  | ۱۵ | شیب لایه             | P <sub>19</sub> |
| ۲/۶۵      | ۵   | ۳۱  | ۱۳ | ۱۸ | عمق قرارگیری لایه    | P <sub>20</sub> |
| ۳/۸۵      | ۱۹  | ۴۵  | ۱۳ | ۳۲ | وضعیت گسل‌ها         | P <sub>21</sub> |
| ۴/۵۳      | ۱۳  | ۵۳  | ۲۰ | ۳۳ | مقاومت لایه زغال     | P <sub>22</sub> |
| ۵/۳       | -۶  | ۶۲  | ۳۴ | ۲۸ | تصادف آبی زغال       | P <sub>23</sub> |
| ۴/۵۳      | ۱۹  | ۵۳  | ۱۷ | ۳۶ | لایه‌های نزدیک به هم | P <sub>24</sub> |

ادامه جدول ۵-۳۹: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ با روش سیستم‌های مهندسی سنگ

|                 | پارامتر               | C                        | E                        | C+E                               | C-E | $a_i$ (%)                |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----|--------------------------|
| P <sub>25</sub> | روش استخراج           | ۲۲                       | ۳۹                       | ۶۱                                | -۱۷ | ۵/۲۱                     |
| P <sub>26</sub> | جهت پیشروی            | ۱۸                       | ۲۹                       | ۴۷                                | -۱۱ | ۴/۰۲                     |
| P <sub>27</sub> | نرخ پیشروی            | ۷                        | ۳۴                       | ۴۱                                | -۲۷ | ۳/۵                      |
| P <sub>28</sub> | نسبت استخراج          | ۵                        | ۳۵                       | ۴۰                                | -۳۰ | ۳/۴۲                     |
| P <sub>29</sub> | روش پر کردن           | ۳                        | ۲۸                       | ۳۱                                | -۲۵ | ۲/۶۵                     |
| P <sub>30</sub> | سیستم هشداردهنده      | ۰                        | ۲۳                       | ۲۳                                | -۲۳ | ۱/۹۷                     |
| P <sub>31</sub> | استخراج چند لایه‌ای   | ۸                        | ۳۲                       | ۴۰                                | -۲۴ | ۳/۴۲                     |
| P <sub>32</sub> | نشت هوا               | ۴                        | ۳۴                       | ۳۸                                | -۳۰ | ۳/۲۵                     |
| P <sub>33</sub> | سرعت هوای سیستم تهویه | ۱۷                       | ۴۹                       | ۶۶                                | -۳۲ | ۵/۶۴                     |
|                 |                       | $\sum_{i=1}^8 C_i = 585$ | $\sum_{i=1}^8 E_i = 585$ | $\sum_{i=1}^8 (C_i + E_i) = 1170$ |     | $\sum_{i=1}^8 a_i = 100$ |



عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

شکل ۵-۳۱: وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ با روش سیستم مهندسی سنگ

## ۵-۶- تشکیل فهرست‌های رده‌بندی سیستم طبقه‌بندی

تا این مرحله از کار، وزن و اهمیت پارامترها از طریق دو روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و سیستم مهندسی سنگ به دست آمده است. برخی از این پارامترها دارای اهمیت زیاد و برخی دیگر دارای اهمیت کمی هستند. برای ارائه سیستم طبقه‌بندی وارد کردن پارامترهای کم اهمیت الزامی نیست، لذا برای تعیین پارامترهای کلیدی و مهم در ارزیابی خطر حریق، با توجه به نوع آتش‌سوزی (باز یا بسته)، در روش FDAHP وزن هر پارامتر را در وزن نوع آتش‌سوزی آن ضرب نموده، سپس از کل وزن‌های به دست آمده میانگین گرفته شده است. نتیجه محاسبات در جدول ۵-۴۰ آورده شده است.

جدول ۵-۴۰: وزن نهایی پارامترهای مؤثر بر حریق با استفاده از روش FDAHP

| عوامل مؤثر بر حریق |                           | وزن نهایی |
|--------------------|---------------------------|-----------|
| آتش‌سوزی باز       | انفجار گرد زغال           | ۷/۲۹      |
|                    | انفجار گاز متان           | ۷/۱۲      |
|                    | تجهیزات دیزلی و مکانیکی   | ۵/۵۸      |
|                    | جرقه الکتریکی ناشی از برق | ۷/۸۱      |
|                    | مواد منفجره و چاشنی‌ها    | ۷/۲۵      |
|                    | جوشکاری                   | ۴/۳۸      |
|                    | گاز هوای فشرده            | ۴/۸۶      |
|                    | گرم شدن تیغه‌های زغال‌بری | ۲/۴۶      |
| عوامل ذاتی         | درجه زغال‌شدگی            | ۳/۴۹      |
|                    | خاکستر محتوی              | ۲/۶۶      |
|                    | پیریت محتوی               | ۰/۷۸      |
|                    | رطوبت محتوی               | ۳/۰۷      |
|                    | تخلخل                     | ۲/۲۳      |
|                    | انرژی حرارتی              | ۱/۷       |
|                    | اندازه ذرات               | ۲/۹۵      |
|                    | فشار بارمتری              | ۲/۰۷      |
| گازخیزی زغال       | ۳/۳۰                      |           |
| عوامل زمین‌شناسی   | ضخامت لایه                | ۱/۴۳      |
|                    | شیب لایه                  | ۱/۳۰      |
|                    | عمق قرارگیری لایه         | ۱/۴۲      |
|                    | وضعیت گسل                 | ۱/۲۶      |
|                    | مقاومت لایه زغالی         | ۱/۴۵      |
|                    | تصادف آبی زغال            | ۱/۴۰      |
|                    | لایه‌های نزدیک به هم      | ۱/۲۲      |
| عوامل معدنکاری     | روش استخراج               | ۲/۳۱      |
|                    | جهت پیشروی                | ۱/۳۴      |
|                    | نرخ پیشروی                | ۲/۵۹      |
|                    | نسبت استخراج              | ۲/۴۱      |
|                    | روش پرکردن                | ۱/۹۹      |
|                    | سیستم هشداردهنده          | ۲/۹۴      |
|                    | استخراج چند لایه‌ای       | ۲/۲۰      |
|                    | نشت هوا                   | ۲/۴۰      |
|                    | سرعت هوای سیستم تهویه     | ۳/۳۷      |
| میانگین وزن‌ها     |                           | ۳/۰۳۱۲    |

با توجه به میانگین وزن‌های به دست آمده، از ۳۳ پارامتر مطرح شده، پارامترهایی که میانگین وزن آن‌ها از ۳ پایین‌تر است حذف شده و پارامترهایی که میانگین آن‌ها از ۳ بالاتر است به عنوان پارامترهای کلیدی در سیستم طبقه‌بندی معرفی شدند. وزن نرمال شده پارامترهای کلیدی قابل استفاده در سیستم طبقه‌بندی در جدول ۴۱-۵ آورده شده است.

جدول ۴۱-۵: وزن نرمال شده پارامترهای کلیدی قابل استفاده در سیستم طبقه‌بندی

| وزن نرمال<br>RES شده | وزن نرمال شده<br>FDAHP | پارامترهای کلیدی قابل استفاده در<br>سیستم طبقه‌بندی |
|----------------------|------------------------|-----------------------------------------------------|
| ۱۰                   | ۱۴                     | جرقه الکتریکی ناشی از برق                           |
| ۱۶/۵                 | ۱۳                     | انفجار گرد زغال                                     |
| ۱۶/۵                 | ۱۳                     | انفجار گاز متان                                     |
| ۱۰                   | ۱۳                     | مواد منفجره و چاشنی‌ها                              |
| ۱۰                   | ۱۱                     | تجهیزات دیزلی و مکانیکی                             |
| ۸                    | ۹                      | گاز و هوای فشرده                                    |
| ۱۰                   | ۷                      | جوشکاری                                             |
| ۶                    | ۵                      | درجه زغال‌شدگی                                      |
| ۵                    | ۵                      | سرعت هوای سیستم تهویه                               |
| ۴                    | ۵                      | رطوبت محتوی                                         |
| ۴                    | ۵                      | گاز خیزی زغال                                       |

برخی از این پارامترها کیفی و برخی دیگر کمی توضیح داده شده‌اند. به همین دلیل، امکان وارد کردن مقادیر واقعی پارامتر به صورت مستقیم در محاسبه اندیس قابلیت حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ ممکن نبوده است و به همین دلیل یک رده‌بندی برای طبقه‌بندی‌های مختلف کیفیت‌ها و مقادیر پارامترها تعیین شده است.

به ترکیب مقادیر پارامترها و کلاس‌های اختصاص یافته شده برای پارامترها اصطلاحاً فهرست‌های رده‌بندی گفته می‌شود که در عمل، مقادیر پارامترها از این فهرست‌های رده‌بندی انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، حداکثر پنج کلاس برای مقادیر هر پارامتر در نظر گرفته شده است که صفر برای «سهم بسیار کم» و بیش‌ترین

مقدار رده‌بندی برای «سهام بسیار زیاد» پارامترها تعیین شده است. بنابراین مقادیر بالاتر به کلاس‌هایی از مقدار پارامترها اختصاص می‌یابند که در

ارزیابی حریق سهم بیش‌تری دارند (جدول ۵-۴۲)

جدول ۵-۴۲: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

| پارامتر<br>(واحد)            | رده‌بندی اختصاص داده شده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                              | ۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ۱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ۲                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | ۳                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| جرقه الکتریکی<br>ناشی از برق | <ul style="list-style-type: none"><li>- وجود کلید (فیوز) در هر مدار جریان برق کابل‌های مرتبط به هر دستگاه</li><li>- وجود رله ایمنی در کابل‌های برق (ولتاژ اضافه).</li><li>- کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش مناسب (عایق).</li><li>- عدم نزدیک کردن اشیایی به کابل‌ها که ممکن است اتصالی و یا جرقه تولید کنند.</li><li>- تهویه مناسب و کنترل گاز در مورد کابل‌های زره دار و کابل‌های ساده روپوش دار که در لوله‌های فلزی با عایق داخلی قرار دارند.</li><li>- وجود تجهیزات اطفاء حریق مناسب با رعایت فاصله.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- عدم وجود کلید (فیوز) در هر مدار جریان برق کابل‌های مرتبط به هر دستگاه</li><li>- عدم وجود رله ایمنی در کابل‌های برق (ولتاژ اضافه).</li><li>- عدم کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش مناسب (عایق).</li><li>- قرار دادن و یا نزدیک کردن اشیایی به کابل‌ها که ممکن است اتصالی و یا جرقه تولید کنند.</li><li>- عدم تهویه و کنترل گاز در مورد کابل‌های زره‌دار و کابل‌های ساده روپوش‌دار که در لوله‌های فلزی با عایق داخلی قرار دارند</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- وجود رله ایمنی در کابل‌های برق (ولتاژ اضافه).</li><li>- کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش مناسب (عایق).</li><li>- عدم کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش مناسب (عایق).</li><li>- قرار دادن و یا نزدیک نمودن اشیایی به کابل‌ها که ممکن است اتصالی و یا جرقه تولید کنند.</li><li>- عدم تهویه مناسب و کنترل گاز در مورد کابل‌های زره دار و کابل‌های ساده روپوش دار که در لوله‌های فلزی با عایق داخلی قرار دارند.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- وجود رله ایمنی در کابل‌های برق (ولتاژ اضافه).</li><li>- کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش مناسب (عایق).</li><li>- عدم کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش مناسب (عایق).</li><li>- قرار دادن و یا نزدیک نمودن اشیایی به کابل‌ها که ممکن است اتصالی و یا جرقه تولید کنند.</li><li>- عدم تهویه مناسب و کنترل گاز در مورد کابل‌های زره دار و کابل‌های ساده روپوش دار که در لوله‌های فلزی با عایق داخلی قرار دارند.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- عدم وجود کلید (فیوز) در هر مدار جریان برق کابل‌های مرتبط به هر دستگاه</li><li>- عدم وجود رله ایمنی در کابل‌های برق (ولتاژ اضافه).</li><li>- عدم کنترل کابل‌های برق از لحاظ نحوه نصب و پوشش مناسب (عایق).</li><li>- عدم تهویه مناسب و کنترل گاز در مورد کابل‌های زره دار و کابل‌های ساده روپوش دار که در لوله‌های فلزی با عایق داخلی قرار دارند.</li></ul> |

ادامه جدول ۵-۴۲: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

| پارامتر<br>(واحد)                       | رده‌بندی اختصاص داده شده                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                              |                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | ۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۱                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ۲                                            | ۳                            | ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| انفجار گرد زغال<br>(gr/m <sup>3</sup> ) | <۱۰<br>>۱۷۰۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | ۱۰-۴۰                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ۴۰                                           | ۱۷۰۰-۴۰                      | ۱۷۰۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| انفجار گاز متان<br>(%)                  | عیار متان تا ۲۰٪<br>در هوای عادی                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | عیار متان تا ۱۴٪<br>اکسیژن زیر ۲۱٪                                                                                                                                                                                                                                                       | عیار متان بیش از ۱۴-۱۶٪<br>اکسیژن تا ۱۶٪     | متان زیر ۴/۵٪<br>اکسیژن ۲۱٪  | ۱۴-۴/۵٪                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| مواد منفجره و<br>چاشنی‌ها               | - عاری بودن از گاز یا کنترل گاز محل آتشباری.<br>- آب پاشی و مجهز بودن محل آتشباری به آب (در محلی که مواد منفجره غیر امولسیونی می باشد).<br>- تهویه مناسب در محل آتشباری.<br>- عدم وجود مواد و تجهیزات قابل اشتعال در محل عملیات آتشباری.<br>- جریان آزاد هوای فشرده در زمان آتشباری.<br>- عدم وجود تجهیزات اطفاء حریق در محل آتشباری. | - عاری بودن از گاز یا کنترل گاز محل آتشباری.<br>- آب پاشی و مجهز بودن محل آتشباری به آب (در محلی که مواد منفجره غیر امولسیونی می باشد).<br>- تهویه مناسب در محل آتشباری.<br>- عدم وجود مواد و تجهیزات قابل اشتعال در محل عملیات آتشباری.<br>- عدم جریان آزاد هوای فشرده در زمان آتشباری. | - عاری بودن از گاز یا کنترل گاز محل آتشباری. | - عدم کنترل گاز محل آتشباری. | - وجود گاز و عدم کنترل گاز محل آتشباری.<br>- عدم آب پاشی و مجهز نبودن محل آتشباری به آب (در محلی که مواد منفجره غیر امولسیونی می باشد).<br>- عدم تهویه مناسب در محل آتشباری.<br>- وجود مواد و تجهیزات قابل اشتعال در محل عملیات آتشباری.<br>- جریان آزاد هوای فشرده در زمان آتشباری.<br>- عدم وجود تجهیزات اطفاء حریق در محل آتشباری. |

ادامه جدول ۵-۴۲: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

| رده‌بندی اختصاص داده شده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                 |                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | پارامتر<br>(واحد)          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ۳                                                                                                                                                               | ۲                                                                                                          | ۱                                                                                                                                                                                                                    | ۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | تجهیزات دیزلی و<br>مکانیکی |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- همراه داشتن تجهیزات دیزلی از مواد سوختنی.</li> <li>- نبود کپسول اطفاء حریق همراه با تجهیزات دیزلی.</li> <li>- ایجاد نشت مواد سوختنی در تجهیزات دیزلی.</li> <li>- عدم کنترل میزان گرمای تولیدی در تجهیزات دیزلی (عدم نصب رله حرارتی، نبود سنسور حساس به گرما به میزان کمتر از اشتعال)</li> <li>- نبود برنامه تعمیرات و نگهداری و اجرای آن در تجهیزات دیزلی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- کنترل میزان گرمای تولیدی در تجهیزات دیزلی (نصب رله حرارتی، سنسور حساس به گرما به میزان کمتر از نقطه اشتعال)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- تهیه و اجرای برنامه تعمیرات و نگهداری در تجهیزات دیزلی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- عاری بودن تجهیزات دیزلی از مواد سوختنی.</li> <li>- نصب و به همراه داشتن کپسول اطفاء حریق در تجهیزات دیزلی.</li> <li>- عدم ایجاد نشت مواد سوختنی در تجهیزات دیزلی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>به همراه نداشتن تجهیزات دیزلی از مواد سوختنی.</li> <li>نصب و به همراه داشتن کپسول اطفاء حریق در تجهیزات دیزلی.</li> <li>عدم ایجاد نشت مواد سوختنی در تجهیزات دیزلی.</li> <li>کنترل میزان گرمای تولیدی در تجهیزات دیزلی (نصب رله حرارتی، سنسور حساس به گرما به میزان کمتر از نقطه اشتعال)</li> <li>تهیه و اجرای برنامه تعمیرات و نگهداری در تجهیزات دیزلی</li> </ul> |                            |

ادامه جدول ۵-۴۲: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

| رده‌بندی اختصاص داده شده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | پارامتر (واحد)   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ۳                                                                                                        | ۲                                                                                                                                                                                                                                       | ۱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | گاز و هوای فشرده |
| <p>- عدم کنترل گازهای موجود در هوای فشرده که احتمال ایجاد یا کمک کننده به اشتعال می باشند. (نظیر هیدروژن، اکسیژن و متان و ...)</p> <p>- عدم کنترل مواد سوختنی تسهیل کننده در هوای فشرده نظیر روغن از طریق نصب صافی های ویژه‌ای در خطوط لوله.</p> <p>- عدم استفاده از روغن‌های با دمای تجزیه و اشتعال بالا با توجه به ظرفیت هوای فشرده تولیدی توسط کمپرسور.</p> <p>- عدم کنترل مستمر دمای هوای فشرده و استفاده از خنک کننده های مجاز.</p> <p>- عدم ایجاد جریان تهویه مستمر جهت رقیق نمودن گازهای قابل اشتعال تولیدی.</p> | <p>- کنترل مواد سوختنی تسهیل کننده در هوای فشرده نظیر روغن از طریق نصب صافی های ویژه‌ای در خطوط لوله</p> | <p>- کنترل گازهای موجود در هوای فشرده که احتمال ایجاد یا کمک کننده به اشتعال می باشند. (نظیر هیدروژن، اکسیژن و متان و ...)</p> <p>- کنترل مواد سوختنی تسهیل کننده در هوای فشرده نظیر روغن از طریق نصب صافی های ویژه‌ای در خطوط لوله</p> | <p>- کنترل گازهای موجود در هوای فشرده که احتمال ایجاد یا کمک کننده به اشتعال می باشند (نظیر هیدروژن، اکسیژن و متان و ...)</p> <p>- کنترل مواد سوختنی تسهیل کننده در هوای فشرده نظیر روغن از طریق نصب صافی های ویژه‌ای در خطوط لوله.</p> <p>- کنترل مستمر دمای هوای فشرده و استفاده از خنک کننده های مجاز.</p> <p>- ایجاد جریان تهویه مستمر جهت رقیق نمودن گازهای قابل اشتعال تولیدی</p> | <p>- کنترل گازهای موجود در هوای فشرده که احتمال ایجاد یا کمک کننده به اشتعال می باشند (نظیر هیدروژن، اکسیژن و متان و ...)</p> <p>- کنترل مواد سوختنی تسهیل کننده در هوای فشرده نظیر روغن از طریق نصب صافی های ویژه‌ای در خطوط لوله.</p> <p>- استفاده از روغن‌های با دمای تجزیه و اشتعال بالا با توجه به ظرفیت هوای فشرده تولیدی توسط کمپرسور.</p> <p>- کنترل مستمر دمای هوای فشرده و استفاده از خنک کننده های مجاز.</p> <p>- ایجاد جریان تهویه مستمر جهت رقیق نمودن گازهای قابل اشتعال تولیدی.</p> |                  |

ادامه جدول ۵-۴۲: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

| رده‌بندی اختصاص داده شده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | پارامتر (واحد)                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | ۳                                                                                                                                                                  | ۲                                                                                                                                                               | ۱                                                                                                                                                                               | ۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | جوشکاری                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- وجود گاز و گرد زغال در محل جوشکاری.</li> <li>- مرطوب نبودن مواد سوختنی جامد موجود در محل جوشکاری.</li> <li>- عدم وجود تجهیزات مناسب اطفاء حریق در محل عملیات جوشکاری.</li> <li>- عدم برقراری مستمر جریان هوای تهویه در محل جوشکاری.</li> <li>- عدم نظارت مستمر قبل و بعد از عملیات جوشکاری.</li> <li>- عدم حذف مواد قابل اشتعال</li> <li>- عدم قطع اتصالات طرفین محل جوشکاری از نقطه جوشکاری</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- وجود تجهیزات مناسب اطفاء حریق در محل عملیات جوشکاری.</li> <li>- برقراری مستمر جریان هوای تهویه در محل جوشکاری.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- مرطوب نمودن مواد سوختنی جامد موجود در محل جوشکاری.</li> <li>- قطع اتصالات طرفین محل جوشکاری از نقطه جوشکاری</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- عدم وجود گاز و گرد زغال در محل جوشکاری.</li> <li>- حذف مواد قابل اشتعال</li> <li>- نظارت مستمر قبل و بعد از عملیات جوشکاری.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- عدم وجود گاز و گرد زغال در محل جوشکاری.</li> <li>- مرطوب نمودن مواد سوختنی جامد موجود در محل جوشکاری.</li> <li>- وجود تجهیزات مناسب اطفاء حریق در محل عملیات جوشکاری.</li> <li>- برقراری مستمر جریان هوای تهویه در محل جوشکاری.</li> <li>- نظارت مستمر قبل و بعد از عملیات جوشکاری.</li> <li>- حذف مواد قابل اشتعال</li> <li>- قطع اتصالات طرفین محل جوشکاری از نقطه جوشکاری</li> </ul> |                                     |
| .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | ساب بیتومیته                                                                                                                                                       | لیگنیت                                                                                                                                                          | بیتومیته                                                                                                                                                                        | آنتراسیت                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | درجه زغال‌شدگی                      |
| .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $< 0.25$<br>$> 10$                                                                                                                                                 | ۸-۱۰                                                                                                                                                            | ۴-۸                                                                                                                                                                             | ۰/۲۵-۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | سرعت هوای سیستم تهویه (m/s)         |
| $> 12$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ۷-۱۲                                                                                                                                                               | ۵-۷                                                                                                                                                             | ۳-۵                                                                                                                                                                             | $< 3$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | رطوبت محتوی (%)                     |
| .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $< 5$                                                                                                                                                              | ۵-۱۰                                                                                                                                                            | ۱۰-۱۵                                                                                                                                                                           | $> 15$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | گاز خیزی لایه (m <sup>3</sup> /ton) |

## ۵-۷- برآورد اندیس پتانسیل حریق معادن (MFPI<sup>۱</sup>)

اندیس آسیب پذیری به عنوان یک ترکیب خطی از وزن پارامترها  $a_i$  و مقدار این پارامترها  $P_i$  بیان می‌شود.

رابطه اندیس آسیب پذیری به صورت معادله ۵-۱۲ بیان می‌شود (Mazzoccola & Hudson, 1996).

$$VI = \sum_{i=1} a_i \frac{P_i}{P_{Max}} \quad (۵-۱۲)$$

که در این رابطه:

$i$ : شماره‌ده تعداد پارامترهای اصلی

$a_i$ : وزن پارامتر  $i$  ام در سیستم

$P_i$ : مقدار پارامتر  $i$  ام

$P_{Max}$ : حداکثر مقداری که یک پارامتر می‌تواند داشته باشد

بدین ترتیب می‌توان اندیس پتانسیل حریق معادن (MFPI) را از معادله ۵-۱۳ محاسبه کرد.

$$MFPI = \sum_{i=1}^{11} a_i \frac{P_{ij}}{P_{Max_i}} \quad (۵-۱۳)$$

که در این رابطه:

$i$ : شماره مربوط به پارامترها (از ۱ تا ۱۱ پارامتر)

$j$ : مربوط به محل مورد بررسی

$a_i$ : ضریب وزنی پارامتر  $i$  ام (جدول ۵-۴۱)

$P_{ij}$ : امتیاز پارامتر  $i$  ام در هر کلاس از منوی رده‌بندی

$P_{Max_i}$ : حداکثر امتیاز هر پارامتر در منوی رده‌بندی شده (جدول ۵-۴۲)

<sup>1</sup> - Mine Fire Potential Index

حداقل مقدار MFPI عدد صفر و حداکثر مقدار MFPI عدد ۱۰۰ می‌باشد.

پس از تعیین شاخص MFPI، براساس مقدار به دست آمده برای هر مکان می‌توان خطر حریق را پیش‌بینی کرد که برای این منظور می‌توان از جدول ۵-۴۳ استفاده کرد.

جدول ۵-۴۳: بازه‌بندی اندیس پتانسیل حریق در معدن

| اندیس حریق بالا |      | اندیس حریق متوسط |      | اندیس حریق پایین |      |
|-----------------|------|------------------|------|------------------|------|
| بسیار ضعیف      | ضعیف | متوسط            | خوب  | خیلی خوب         | عالی |
| ۱۰۰             | MFPI | ۶۶               | MFPI | ۳۳               | MFPI |
| ۰               |      |                  |      |                  |      |

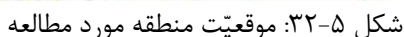
## ۵-۸- مطالعه موردی

### ۵-۸-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه طزره با وسعت ۳۴ کیلومتر مربع بخشی از دامنه جنوبی رشته کوه البرز را تشکیل می‌دهد که در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال غرب شاهرود واقع شده است. مجموعه معادن این منطقه شامل معادن موسوم به معدن بزرگ طزره، معدن کلاریز و معدن رزمجا است. به طور کلی لایه‌های قابل استخراج شامل لایه‌های  $K_5$  و  $K_{10}$  و  $K_{19}$  و  $K_{21}$  و  $K_{23}$  و  $P_{10}$  است. شیب لایه‌ها ۳۰ تا ۵۵ درجه و ضخامت آن‌ها ۰/۴ تا ۱/۸ متر و جنس کمربالا ماسه‌سنگ و جنس کمرپایین آن‌ها سیلت استون است.

استخراج زغال‌سنگ عمدتاً به روش جبهه کار طولانی و پلکانی معکوس می‌باشد و طول متوسط کارگاه‌های استخراج حدود ۱۰۰ متر است. پس از استخراج، مواد معدنی به وسیله نوار و لکوموتیو به بیرون برده می‌شود. در حال حاضر بهره‌برداری از ذخایر معدن توسط بخش خصوصی انجام می‌گیرد.

به منظور ارزیابی خطر حریق با استفاده از اندیس پتانسیل حریق معادن (MFPI)، معادن زغالی طزره انتخاب شدند. منطقه زغالی طزره در ۴۵ کیلومتری غرب شاهرود و در حد فاصل جاده اصلی تهران- مشهد قرار گرفته است (۵-۳۲).



با استفاده از جدول ۵-۴۱ و جدول ۵-۴۲ و معادله ۵-۱۳ مناطق مجموعه زغال سنگ البرز شرقی از لحاظ پتانسیل حریق مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که جزئیات مربوط به محاسبه پتانسیل حریق در جدول ۵-۴۴ آورده شده است. مقادیر اختصاص داده شده به هر پارامتر در هر محل (از ۰ تا ۴) با توجه به رده‌بندی‌های تعریف شده در جدول ۵-۴۲ آورده شده است.

جدول ۵-۴۴: محاسبه اندیس پتانسیل حریق معادن برای مناطق مجموعه البرز شرقی

| امتیاز بندی پارامترها               |                                   |                   |                           |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|
| وزن نرمال شده<br>پارامترها<br>FDAHP | وزن نرمال شده<br>پارامترها<br>RES | P <sub>Maxi</sub> | محل                       |
| ۱۴                                  | ۱۰                                | ۴                 | جرقه الکتریکی ناشی از برق |
| ۱۳                                  | ۱۶/۵                              | ۴                 | انفجار گرد زغال           |
| ۱۳                                  | ۱۶/۵                              | ۴                 | انفجار گاز متان           |
| ۱۳                                  | ۱۰                                | ۴                 | مواد منفجره و چاشنی‌ها    |
| ۱۱                                  | ۱۰                                | ۴                 | تجهیزات دیرلی و مکانیکی   |
| ۹                                   | ۸                                 | ۴                 | گاز هوای فشرده            |
| ۷                                   | ۱۰                                | ۴                 | جوشکاری                   |
| ۵                                   | ۶                                 | ۳                 | درجه زغال‌شدگی            |
| ۵                                   | ۵                                 | ۲                 | سرعت هوای سیستم تهویه     |
| ۵                                   | ۴                                 | ۴                 | رطوبت محتوی               |
| ۵                                   | ۴                                 | ۲                 | گازخیزی لایه              |
| $\sum_{i=1}^{11} a_i = 100$         | $\sum_{i=1}^{11} a_i = 100$       | .....             | MEPI (FDAHP)              |
|                                     |                                   |                   | MEPI (RES)                |
|                                     |                                   |                   | ۳۹/۲                      |
|                                     |                                   |                   | ۳۷/۸                      |
|                                     |                                   |                   | ۲۳                        |
|                                     |                                   |                   | ۱۴/۱                      |
|                                     |                                   |                   | ۵                         |
|                                     |                                   |                   | ۲۱/۳                      |
|                                     |                                   |                   | ۲۴/۲                      |
|                                     |                                   |                   | ۴۳/۳                      |
|                                     |                                   |                   | ۲۳/۳                      |
| ۴۶/۴                                |                                   |                   |                           |
| ۴۹/۲                                |                                   |                   |                           |
| ۲۹/۸                                |                                   |                   |                           |
| ۷۳/۵                                |                                   |                   |                           |
| ۱۰/۸                                |                                   |                   |                           |

با توجه به کلاس‌بندی ارائه شده (جدول ۵-۴۲)، مناطق مجموعه البرز شرقی مورد مطالعه از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۴، رده‌بندی شده‌اند که نتایج آن در جدول ۵-۴۵ آورده شده است. قابل ذکر است که در ارائه‌ی این طبقه‌بندی و به منظور تعیین محدوده اندیس در هر طبقه از شواهد و اتفاقات‌های رخ داده در گذشته نیز استفاده شده است که مقایسه‌ها تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

جدول ۵-۴۵: رده‌بندی نهایی به دست آمده برای مناطق مجموعه البرز شرقی

| محل تعریف شده                            | کلاس  | وضعیت حریق                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| تونل‌های عمود بر لایه (سنگی)             | متوسط | در تاریخ ۸۴/۴/۲۹ حریق مشاهده شده است                                                                                                                        |
| تونل‌های دنبال لایه (زغالی)              | متوسط | در تاریخ ۸۴/۱۰/۱۰ در مشترک شماره ۱ تونل مادر حریق مشاهده شده است                                                                                            |
| حفریات عمودی و شیب‌دار (اکلون و دوپل)    | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| تونل‌های متروکه                          | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| جان پناه‌ها                              | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| بونکرهای زغال‌ریز                        | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| پایه‌های زغالی به جا مانده               | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| کارگاه استخراج                           | متوسط | در تاریخ ۸۴/۱۰/۶ در لایه K <sub>5</sub> حریق مشاهده شده است                                                                                                 |
| پذیرگاه‌ها                               | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| محل فن‌ها و لوله‌های برزنتی تهویه        | متوسط | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| محل شارژ باتری‌های لکوموتیو              | متوسط | در تاریخ ۸۵/۷/۹ در تونل مادر و در تاریخ ۹۱/۴/۱۸ در معدن برناکی حریق مشاهده شده است                                                                          |
| نوار نقاله‌ها                            | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |
| ترانسفورماتورهای فشار قوی و کابل‌های برق | بالا  | در تاریخ ۹۰/۷/۲۰ در معدن برناکی، در تاریخ ۹۱/۱۲/۲ در معدن برناکی در اکلون شماره ۲، در تاریخ ۹۴/۴/۲۳ در تونل رزمجای غربی در کابل‌های برق حریق مشاهده شده است |
| وینچ‌های معدنی                           | پایین | حریق مشاهده نشده است                                                                                                                                        |

با توجه به جدول ۵-۴۵ نتایج زیر را خواهیم داشت:

۱- با توجه به گذشت ۴۰ سال از عمر معدنکاری، احتمال این که دستگاه‌های ترانسفورماتورهای برقی زیرزمین از حالت ضد گریزو خارج شده باشند زیاد است بنابراین انجام آزمایش‌های تعیین دقت اطمینان ضد گریزو بودن دستگاه‌ها ضروری است، خصوصاً هنگامی که کابل‌های زرهی برق فشار قوی بر اثر برخورد

سیستم‌های نگهداری یا سیستم‌های حمل و نقل باعث دچار زدگی می‌شوند و اتصال مجدد بایستی با دقت کافی انجام شود؛ لذا سیستم‌های کابل برق داخل تونل می‌بایستی به طور مداوم کنترل شوند.

۲- در محل شارژ باتری‌های لکوموتیو و دستگاه‌های شارژ کننده اکثراً از سیم‌پیچی‌های دستی استفاده شده است، این سیم‌پیچی‌ها در هنگام شارژ جرقه ایجاد می‌کنند، لذا می‌بایستی تمهیداتی در این زمینه صورت گیرد بنابراین هنگام شارژ دستگاه همواره یک نفر باید کنار دستگاه حضور داشته باشد تا در هنگام بروز خطر زود اقدام کند

## ۵-۱۰- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا اصول کلی روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و رویکرد سیستم مهندسی سنگ مورد بررسی قرار گرفت. سپس وزن عوامل مؤثر بر خطر حریق با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و رویکرد سیستم مهندسی سنگ تعیین شد و در نهایت شاخصی برای ارزیابی پتانسیل حریق در یک معدن زیرزمینی زغال‌سنگ ارائه شد.

در این بخش مشخص شد پارامترهایی از قبیل جرقه الکتریکی، انفجار گرد زغال، انفجار گاز متان، مواد منفجره و چاشنی‌ها، تجهیزات دیزلی و مکانیکی، گاز و هوای فشرده، جوشکاری، درجه زغال‌شدگی، سرعت هوای سیستم تهویه، رطوبت محتوی و گازخیزی لایه بیش‌ترین تأثیر را در خطر حریق دارند.

با مقایسه نتایج حاصل از سیستم طبقه‌بندی ارائه شده با رویدادهای اتفاق افتاده در زمینه حریق در منطقه مورد مطالعه، تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج نشان داده شد که یک اعتبارسنجی اولیه برای سیستم طبقه‌بندی ارائه شده می‌باشد.

در فصل بعدی به جمع‌بندی نهایی و نتیجه‌گیری پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.



# فصل ۷: نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۶-۱- نتیجه‌گیری

در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مانند سایر محیط‌های کاری عوامل خطرزای متفاوتی وجود دارد که هر یک از این عوامل باعث بروز مشکلات خاص خود می‌شوند. شناسایی این عوامل خطرزا در محیط کاری معادن زیرزمینی زغال‌سنگ و شیوه‌های مقابله با آن‌ها یکی از ضرورت‌های مهم به شمار می‌آید. یکی از این عوامل خطرزا حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ است که یک مشکل جدی در سراسر جهان محسوب می‌شود. حریق یکی از قدیمی‌ترین بلایایی است که می‌تواند در زمانی کوتاه دارایی و سلامتی افراد را به خطر بیندازد. به همین خاطر در این پایان نامه، خطر حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این تحقیق ابتدا کلیاتی در مورد تئوری‌های حریق و بررسی‌هایی در مورد انواع حریق در معادن زیرزمینی انجام شد. سپس تحقیقاتی که در زمینه حریق، طی سال‌های اخیر ارائه شدند مورد بررسی قرار گرفتند و انواع روش‌های پیش‌گیری، پیش‌بینی و کنترل حریق بیان شد.

در مرحله‌ی بعد تمام پارامترهای مهم و مؤثر در انواع حریق در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در مرحله بعد فرم‌های نظرسنجی آماده شد، در این فرم‌ها از متخصصان خواسته شده بود که براساس نظر خود اهمیت نسبی پارامترهای موجود را تعیین کنند، با بررسی نتایج به دست آمده از نظرسنجی‌های انجام شده مشخص شد که در یک معدن زیرزمینی زغال‌سنگ هم آتش‌سوزی باز و هم آتش‌سوزی بسته (خودسوزی) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مطالعات صورت گرفته در زمینه ارزیابی حریق، پارامترهای مؤثر بر انواع حریق را به طور جداگانه مورد بررسی قرار دادند. ضریب تأثیر اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر بر خطر حریق را لحاظ نکردند؛ لذا در این تحقیق سعی شد سیستم طبقه‌بندی ارائه شود که با توجه به ضریب اهمیت پارامترهای مؤثر شامل تمامی پارامترهای مؤثر بر انواع حریق باشد.

برای تعیین اهمیت نسبی پارامترهای مؤثر بر حریق، نظرات کیفی ۱۵ نفر از متخصصان جمع‌آوری شد، سپس برای بررسی اعتبارسنجی پرسش‌نامه‌ها پایایی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی پایایی پرسش‌نامه‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS 20 ضریب آلفای کرونباخ محاسبه شد. این ضریب محاسبه شده نشان داد که پرسش‌نامه‌ها از پایایی قابل قبولی برخوردارند.

با استفاده از نتایج به دست آمده از نظرسنجی‌ها و روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) و رویکرد سیستم مهندسی سنگ (RES)، ضریب اهمیت و وزن پارامترها مشخص شد، میزان اهمیت وزن تقریباً پارامترها مشابه هم بودند.

بعد از تعیین وزن هر پارامتر، سیستم طبقه‌بندی کمی جدیدی بر مبنای ۱۱ پارامتر مؤثر بر حریق پیشنهاد شد. این سیستم که اندیس پتانسیل حریق معادن (MFPI) نامیده شده است در مجموع به محل‌های مستعد حریق امتیازی از ۰ تا ۱۰۰ را اختصاص می‌دهد و قابلیت حریق در معادن در سه کلاس پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی می‌شود.

در نهایت به منظور ارزیابی قابلیت سیستم طبقه‌بندی پیشنهاد شده، محل‌های مستعد حریق در مجموعه معادن زغال‌سنگ البرز شرقی برای انجام مطالعات موردی انتخاب شدند. با توجه به مطالعات انجام شده با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید، مشخص شد که ترانسفورماتورهای فشار قوی و کابل‌های برق به شدت مستعد حریق هستند که با واقعیت نیز مطابقت می‌کند.

## ۶-۱- پیشنهادها

در این پایان نامه تلاش شد که طرح تحقیق پیشنهادی به بهترین نحو در زمان مورد نظر اجرا شود. با این وجود همواره مسیر برای تحقیقات آتی باز بوده و در صورت صرف زمان بیش‌تر در آینده می‌توان در جهت بهبود بیش‌تر روش‌ها و همچنین توسعه ایده‌های جدیدتر حرکت نمود، در زیر برخی از مهم‌ترین پیشنهادات بدین منظور ارائه می‌شود:

- پیشنهاد می‌شود مجموعه معادن زغالی کرمان که سابقه حریق داشتند برای ارزیابی خطر حریق سیستم طبقه‌بندی جدیدی ارائه دهند تا بتوان ارزیابی جامعی از این سیستم داشته باشیم.

- پیشنهاد می‌شود در معادن زغالی البرز شرقی با ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید خطرات دیگری از جمله نشست سطح زمین، انفجار خودبه‌خودی سنگ، گازدهی، آلودگی محیط زیست و غیره مورد ارزیابی قرار گیرند.

- پیشنهاد می‌شود در مورد تأثیر سیستم تهویه از قبیل نوع سیستم تهویه و حجم هوای تهویه بر روی خطر حریق در معادن زغال‌سنگ تحقیقات جامع و کاملی انجام شود و در صورت امکان در سیستم طبقه‌بندی از این پارامتر استفاده شود.

- این پروژه با فرض ثابت بودن یک ضلع مثلث حریق (اکسیژن) انجام شده است. پیشنهاد می‌شود تغییر این عامل در ارائه سیستم طبقه‌بندی مورد بحث و تحلیل قرار گیرد. زیرا تغییر میزان اکسیژن در گسترش حریق عامل مؤثری می‌باشد.

## منابع فارسی

- ابراهیمی ح و شریف‌زاده ه، (۱۳۷۹)، "گزارش‌نویسی علل حریق"، انتشارات سازمان شهرداری‌های کشور
- جعفری ن و منتظر غ، (۱۳۸۷)، "استفاده از روش دلفی فازی برای تعیین سیاست‌های مالیاتی کشور"، فصل‌نامه پژوهش‌های اقتصادی، چاپ اول، صفحه ۹۱ تا ۱۴۴
- جهانگیری م، (۱۳۹۱)، "اصول ایمنی حریق"، نشر فن آوران
- حسینی س، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "روشی جدید برای ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ‌ها"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- خالوکاکی ر و زارع نقدهی م، (۱۳۸۸)، "تحلیل و رده‌بندی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش ییلاق با استفاده از رویکرد سیستمی"، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد دوم، صفحه ۱۹ تا ۲۳
- زارع نقدهی م، (۱۳۹۰)، رساله دکتری، "بهبود رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)، به منظور ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- صفاری آ، (۱۳۹۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "ارائه‌ی یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال‌سنگ"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- عطایی م، (۱۳۸۹)، "تصمیم‌گیری چند معیاره فازی"، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود
- گل محمدی ر، (۱۳۹۱)، "مهندسی حریق"، نشر فن آوران
- مدنی ح، (۱۳۷۳)، "بازرسی در معادن"، گروه مترجمان، انتشارات بصیر
- مدنی ح، (۱۳۸۹)، "تهویه در معادن"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- منتصر کوهساری ب، (۱۳۸۲)، "دستورالعمل و طرح جامع ایمنی و نجات و بهداشت در معادن زغال‌سنگ"، شرکت پیشگامان صنعت فولاد
- مؤمنی م و قیومی ف، (۱۳۹۱)، "تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS"، چاپ هفتم، انتشارات گنج شایگان
- نصیریانی خ، احمدی ف و اباذری پ، (۱۳۸۷)، "تکنیک دلفی: ابزاری در تحقیق"، مجله ایرانی آموزش در علوم پزشکی، بهار و تابستان ۱۳۸۸، چاپ اول، صفحه ۱۷۵ تا ۱۸۸.

- ABCB., (2005), “International Fire Engineering Guidelines Edition 2005”, Australian Bulding Codes Board, Canberra, ACT.
- Abhishek J. and Sahu H.B., (2010), “Assesment of Spontaneous Heating Susceptibility of Coal Using Differential Thermal Analysis”, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Degree of Bachelor of Technology in Mining Engineering.
- Bagchi A. and Sahu H.B., (2010), “Assesment of Spontaneous Heating Susceptibility of Some Indian Coal Using Experimental Techniques”, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Degree of Bachelor of Technology in Mining Engineering.
- Bhowmick B.C., Verma S.M., Sahay N. and Ahmad I., (1992), “Dynamic Balancing of Pressure for Control of Fire in Underground Coal Mine”, Journal of Mining Research, pp. 91-102
- Burnham A.K. and Sweeney J.J., (1989), “A Chemical Kinitic Model of Vitrinit Maturation and Reflectance”, Vol. 53, pp. 2649-2657
- Chaiken R.F. and Bayles L.G., (1988), “Burn Out Control at the Albright Coal Wast Banks”. pp. 137-148
- Chaiken R.F., Brennan R., Heisey B., Kim A.G., Malenka W., Schimmel J., (1983), “Problems in the control of anthracite mine fires: a case study of the Centralia mine fire”, US Bureau of Mines, p. 93
- Cheng J. and Luo Y., (2011), “Modeling Atmosphere Composition and Determining Explosibillity in a Sealed Coal Mine Volume”, SME Annual Meeting, West Virginia University.
- CMRS Project, (1981), “Report on Application of CO<sub>2</sub> for Combating Mine Fire”, Vol. 37.
- Colaizzi G.J., (2004), “Prevention, control and/or extinguishment of coal seam fires using cellular grout, Coal fires burning around the world”, Coal Geol. 59 pp. 75–81
- Conti R.S., Chasko L and Lazzara C.P., (2000), “An Underground Coal Mine Fire Preparedness and Response Checklists: The Instrument”, U.S Department of Health and Human Services.
- Cronbach L.J., (1951), “Coefficient alpha and the internal structure of tests”, Psychometrika, Vol. 16, No. 3, pp. 297-334.
- Cuping L., Jiajie L., Lei H., Dingyong H., (2015), “Visualization and Simulation Model of Underground Mine Firedisaster Based on Cellular Automata”, Applied Mathematical Modelling.
- Denton S., Allsop A. and Davies M., (2012), “The Prevention and Control of Fire and Explosion in Mines”, Health and Safety Executive.

- Edwards J., (2002), "Multiple Fire Sensors for Mine Fire Detection and Nui Sance Discrimination", Pittsburgh.
- Eisner H.S and Smith P.B., (1956), "Fire Fighting in Underground Roadways, Experiment with Foam Plug", SMRE, P. 130
- Frough, O. and Torabi, S.R., (2013), "An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes", Engineering Geology, Vol. 157, pp.112-123
- Gervet B., (2007), "Coal Fire Emission Contributes to Global Warning", LULEA University of Technology, pp. 2-14
- Ghosh A.K., Banerjee S.C., Nady D.K., Singh R.G., Banerjee D.D., Tarafder D.P., Sen S.k. and Sural G., (1980), "Science Technology and Economics of Combating Coal Fires by Inert Gases- Experience in India and Abroad", Silver Jubilee Seminar on Combating Coal Fires at CMRS, Dhanbad.
- Gillies S. and Wu H.W., (2004), "Case Studies from Simulating Mine Fire in Coal Mines and Their Effects on Mine Ventilation", Coal Operators Conference, University of Wollongong, pp. 1-16.
- Grayson R.L., Kinilakodi H. and Kecojevic H., (2009), "Pilot Sample Risk Analysis for Underground Coal Mine Fires and Explosion Using MSHA Citation Data", Safety Science 47, pp. 1371-1378
- Grekov S.p., (1971), "The Optimum Parameters for injection of Carbon Dioxide in to an Isolated Fire District", Research Institite of Mining, pp. 92-97
- Grewer T., (1994), "Thermal hazards of chemical reaction", Vol. 4, Industrial Safety Series, Elsevier Press, Amsterdam, pp. 444.
- Habibi A., Sarafrazi A. and Izadyar S., (2014), "Delphi Technique Theoretical Framework in Qualitative Research 1", International Journal of Engineering and Science, Vol. 3, pp. 8-13.
- Hadden R. and Rein G., (2010), "Burning and Suppression of Smoldering Coal Fire", Coal and Fire, Global Perspective, Vol. 1, Chapter 18, pp. 319-327
- Hansen R., (2015), "Analysis of Methodologies for Calculating the Heat Release Rates of Mining Vehicle Fires in Underground Mines", Fire Safety Journal 7, pp. 194-216.
- Hessley R.K., Reasoner J.W. and Riley J.T., (1986), "Coal Science. John Wiley and Sons", New York.
- Hinsley F.B., (1966), "A Re- Apprasial of the Problems Concerned with the Reversal of the Ventilating Flow in an Emergency", Mid Cos Inst 16<sup>th</sup> Nov.
- Hou Y.B., Pan R.F., Wu J.Y. and Wang B.P., (2009), "Coal Mine Sarfety Evaluation Based on Reliability of Expert Decision", Procedia Earth and Planetary Science, pp. 1661-1667.
- Hui L. and Chao W., (2010), "A New Approach to Detect Fire Source Underground Mine Fire for Preventing Spontaneous Combustion of Sulfide Ores", Procedia Engineering 7, pp. 318-326

- Hwang C.C. and Litton C.D., (1984), "A Study of Critical Conditions in Mine Fire", The Combustion Institute, pp. 1673-1679.
- Jian J.W. and Xiao C.L., (2011), "Risk Assessment of Underground Coal Fire Development at Regional Scale", International Journal of Coal Geology 86, pp. 87-94
- Jones J.C. and Vais M., (1991), "Factors Influencing the Spontaneous Heating of Low rank Coals", Journal of Hazardous Materials, School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry, University of New South Wales, Australia, pp. 203- 212.
- Kaymakci E. Didari V., (2002), "Relations Between Coal Properties and Spontaneous Combustion Parameters, Turkish Journal Engineering & Environmental Sciences, 26, pp. 59-62.
- Khalokakaei R. and Naghadehi M., (2012), "The Assessment of Rock Slope Instability along the Khosh-Yeylagh Main Road (Iran) using a system approach", Environ Earth Sci, pp. 665-682.
- Kim A.G., (2004), "Locating Fire in Abandoned Underground Coal Mines", International Journal of Coal Geology 59, pp. 49-62
- Kuchta J.M., (1978), "Fire Protection for Mine Conveyor Belt Systems".
- Kuder G.F. and Richardson M.W., (1937), "The Theory of the Estimation of Test Reliability", Psychometrika 2, pp. 151-160.
- Kuenzer C., Zhang J., Tetzlaff A., Van Dijk P., Voigt S., Mehl H., Wagner W., (2007), "Uncontrolled Coal Fires and Their Environmental Impact Investigating Two Arid Mining Regions in North- Central China", Applied Geography, pp. 42-62
- 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 82, pp. 27-36
- Lavtserich V.P., (1973), "Stochastic models of the Liability of Mine Systems to Methan Fire", pp. 97-103
- Liang Y.T., Jia B.S. and Chen J., (2008), "Bifurcation Characteristics of Coal Spontaneous Combustion and Analysis of Critical State of Gaseous Reaction in a Packed Bed", Journal of Coal Science & Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 244-247.
- Liming Y. and Smith A.C., (2015), "Numerical modeling of water spray suppression of conveyor belt fires in a large-scale tunnel", Process Safety and Environmental Protection 95, pp. 93-101.
- Linacre E.T., (1969), "The Formation and Movement of Foam Plug for Mine Fire Fighting", SMRE.
- Litton C.D., Hertzberg M. and Furno A.L., (1981), "The Growth, Structure and Detectability of Fire in Mines and Tunnels", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 633-700
- Litton C.D. and Peresa I.E., (2012), "Evaluation of Criteria for the Detection of Fires in Underground Conveyor Belt Haulage Ways", Fire Safety Journal, pp. 110-119.

- Liu H., Wu C. and Shi Y., (2011), “Locating Method of Fire Source for Spontaneous Combustion of Sulfide Ores”, Journal Central South University Technology 18, p. 1034-1040
- Liu Y.C. and Chen C.S., (2007), “A New Approach for Application of Rock Mass Classification on Rock Slope Stability Assessment”, Engineering Geology, Vol. 89, Issues 1-2, pp.129–143.
- Lu W., (2009), “A New Theory of Chemical Method to Prevent Spontaneous Combustion of Coal”, Journal of Coal Science & Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 220-224.
- Mahdipour E. and Dadkhah C., (2012), “Automatic Fire Detection Based on Soft Computing Techniques: Review from 2000 to 2010”, Springer Science, pp. 1-40
- Mawhinney J.R. and Richardson J.K., (1996), “A Review of Water Mist Fire Suppression Research and Development”, Fire Technology, Vol. 33(1), pp.54-90.
- Mazzoccola D.F. and Hudson J.A., (1996), “A Comprehensive Method of Rock Mass Characterization for Indicating Natural Slope Instability”, Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, Vol. 29, No 1, pp. 37-56
- Mendham F., Cliff D. and Horberry T., (2012), “A Quantitative Approach to Engineering Fire Life Safety in Modern Underground Coal Mines”, Coal Operators Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 326-334.
- Mendham F., Cliff D. and Horberry T., (2013), “Early Fire Detection in Underground Coal Mines”, Coal Operators Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 259-265.
- Mendham F., Cliff D. and Horberry T., (2014), “Is Carbon Monoxide Sensing an Effective Early Fire Detection Option for Underground Coal Mines?”, Coal Operators Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 360-369
- MDG 1006, (2011), “Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline”, Produced by Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW, pp. 9-14.
- Michalski S.R. and Gary R.E., (2001), “Ash Disposal- Mine Fires- Environmental: An Indian Dilemma”, pp. 23-30
- Miller E.J., et al, (1979), “Equivalency Tests of Fire Detection System for Underground Coal Mines Using Low Level Carbon Monoxide Monitors, MSHA, p 27.
- Mohalik N., Singh R., Singh V. and Tripathi D., (2009), “Critical Approach to Assess the Extent of Fire in Old Abandoned Coal Mines Area-Indian Context”, Coal Operators Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 271-280.
- Morris R., (1987), “A Review of Experience on the Use of Inert Gases in Mine Fires”, Mining Science and Technology, pp. 37-69.
- Morris R. and Athkinson T., (1987), “Combating Underground Fires in Coal Mines by Direct Attack Methods”, Mining Science and Technology, pp. 291-305.

- Nagpur N., (1994), “Coal Mines Regulation”, pp. 298-310
- Ohlemiller T.J., (2002), “Smoldering Combustion Propagation”, Prog. Energy Combust. Sci. 11. pp. 277-310.
- Palm A., Kumm M. and Ingason H., (2015), “Full Scale Firefighting Tests in the Tistbrottet Mine”, Fire Technology.
- Pandey J., Mohalik N.K., Mishra R.k., Khalkho A., Singh V.K., (2012), “Investigation of the Role of Fire Retardants in Preventing Spontaneous Heating of Coal and Controlling Coal Mine Fire”, Fire Technology, pp. 1-19.
- Perera I.E and Litton C.D., (2012), “Impact of Air Velocity on the Detection of Fire in Conveyor Belt Haulageways”, Fire Technology 48, pp. 405-418
- Prasad S.D. and Rakesh K., (1992), “Legislation in Indian Mines-A Critical Appraisal”, Tara Book Agency, Vol. 11, pp. 945-947.
- Purser D.A., (2002), “Toxicity Assessment of Combustion Products”, In: Beyler C.L., Custer R.L.P., Walton W.D., Watts J.M. and Dinunno P.J. (Eds), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third ed, National Fire Protection Association Quincy, MA, pp. 217-283.
- Ramlu M.A., (2007), “Mine Disasters and Mine Rescue”, 2nd edition, chapter-1, “mine fires”, Hyderabad: Universities Press, pp. 2-15, ISBN: 9788173715730.
- Ray S.K. and Singh R.P., (2007), “Recent Developments and Practice to Control Fire in Underground Coal Mines”, Fire Technology, pp. 285-300.
- Rein G., (2009), “Smoldering Combustion Phenomena in Science and Technology”, Int. Rev. Chem. Eng. 1(1), pp. 3-18.
- Rein G., Cohen S. and Simeoni A., (2009), “Carbon Emissions from Smoldering Peat in Shallow and Strong Fronts”, Proc. Combust. Inst. 32, pp. 2489-2496.
- Rein G., Lautenberger C., Ferrandez-Pello A.C., Torero J.L. and Uran D.L., (2006), “Application of Genetic Algorithms and Thermogravimetry to Determine the Kinetics of Polyurethane Foam in Smoldering Combustion, pp. 95-108.
- Rockett J.A., (1980), “Report on Fire Tests Associated with the Dynamic Analysis of the Sunhine Mine Fire”, U.S. Bu. Mines Contract National Bureau of Standards, p. 99.
- Saaty T. and Alexander J., (1981), “Thinking with models: Mathematical models in the physical, biological, and social sciences”, Volume 2, 1st edition, Pergamon Press (Oxford and New York), pp. 181, ISBN: 0080264751.
- Saffari A., Sereshki F., Ataei M., Ghanbari K., (2013), “Applying Rock Engineering Systems (RES) Approach to Evaluate and Classify the Coal Spontaneous Combustion Potential in Eastern Alborz Coal Mines”, International Journal Mining & Geology Engineering, vol 45, pp. 115- 127
- Santosh K.M. and Sahu H.B., (2011-2012), “Investigation Role of Intrinsic Factors in the Spontaneous Heating Coal”, Department of Mining Engineering Technology.

- Selivanova T., Grebenyuk I. and Belov A., (2012), "Control of Combustion Area Using Electrical Resistivity Method for Underground Coal Gasification", International Journal of Mining Science and Technology 22, pp. 351-355
- Singh A.k., Singh R.V.K., Singh M.P., Chandra H., Shukla N.K., (2007), "Mine Fire Gas Indices and Their Application to Indian Underground Coal Mine Fire", International Journal of Coal Geology 69, pp. 192-204
- 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.
- Singh R.P. and Ray S.K., (2004), "Study on Control of Disastrous Open Fire in Underground Coal Mines", Journal of Scientific & Industrial Research, pp. 1010-1018
- Singh R.V.K., (2013), "Spontaneous Heating and Fire in Coal Mines", Elsevier Paper, pp. 78-90.
- Smith A.C. and Thimons E.D., (2006), "A Summary of U.S. Mine Fire Research", pp. 1-15
- Stolar p. and Abrahams J., (1999), "Fire from First Principles", London.
- Stracher G.B. and Taylor T.P., (2004), "Coal Fire Burning Out of Control Around the World: Thermodynamic Recipe for Environmental Catastrophe", Coal Geology, pp. 7-17
- Takashi K., Takehero I., Shigeo M. and Jo T., (1983), "Experimental Study on Water Spray Zone for Suppression of Mine Fire Spreading", Presented at the 20<sup>th</sup> International Conference for Safety in Mines Research Institute.
- Taku S. and Nigel C., (2011), "Magnetometer Measurement to Characterize a Subsurface Coal Fire", International Journal of Coal Geology 87, pp. 190-196
- Tao Y., Ping L., Qingsong W., Jinhua S., (2013), "Optimization of Ventilating Energy Distribution for Controlling Coal Spontaneous Combustion of Sealed Panel in Underground Coal Mines", Procedia Engineering 62, pp. 972-979.
- Van Der Wat N.T., (1981), "A Fire Detection System for Mines", Germany.
- Wachowicz J., (2008), "Analysis of Underground Fire in Polish Hard Coal Mines", Journal China University Mining & Technology 18, pp. 332-336
- Walters A.D., (1996), "Joseph Conrad and the spontaneous combustion of coal- part 1", coal preparation, Amsterdam B.V., Published in The Netherlands under license by Gordon and Breach Science Publishers, Vol. 17, Issue 3-4, pp. 147-166.
- Wang- Xing R., Zeng- Hui K. and De- Ming W., (2011), "Causes of Spontaneous Combustion of Coal and Its Prevention Technology in the Tunnel Fall of Ground of Extra- Thick Coal Seam", First International Symposium on Safety Science and Engineering, pp. 717-724
- Xiaofei L., Guang C. and Xiaoyan D., (2012), "Establishment of Accident Risk early-Warning Macroscopic Model on Ventilation, Gas, Dust and Fire in Coal Mine", Procedia Engineering 45, pp. 53-58

- 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 Systems”, International Journal of Coal Geology 85, pp. 123-127
- Xue S. and Cui H., (2004), “Innovative Techniques for Detection and Control of Underground Spontaneous Combustion of Coal”, Coal Operators Conference, University of Wollongong.
- Yanming W., Wang D., Shi G., Zhong X.X., (2011), “GPR Simulation for the Fire Detection in Ground Coal Mine Using FDTD Method”, China University of Mining and Technology, pp. 310-314
- Zhang J., Kuenzer C., Tetzlaff A., Oertel D., Zhukov B., Wagner W., (2007), “Thermal Characteristics of Coal Fires2: Results of Measurements on Simulated Coal Fire”, Journal of Applied Geophysics 63, pp. 137-147
- Zhang X.M., Cassells C.J.S. and Van Genderen J.L., (1999), “Multi- Sensor Data Fusion for the Detection of Underground Coal Fires”, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), PP. 117-127
- Zhang Y-H., Zhang L., Huang Z-A., Gao Y-K., Yang J-S., (2011), “Research on a New Fast Airtight Device for Mine Fire”, Procedia Engineering 26, pp.744-750
- Zhenlu S., Deming W. and Yanming W., (2015), “Controlling Coal Fires Using the Three-Phase Foam and Water Mist Techniques in the Anjialing Open Pit”, pp. 1833-1855.
- Zhou F-B. and Ma L-J., (2013), “A New Approach to Control a Serious Mine Fire with Using Liquid Nitrogen as Extinguishing Media”, Fire Technology, pp. 325-334.
- Zhou L-H. and Lou Y., (2011), “Improvement and Upgrade of Mine Fire Simulation Program MFIRE”, Journal of Coal Science & Engineering, Vol. 17, pp. 275-280.

## www Addresses

- [http:// WWW. Cargolaw. Com](http://WWW.Cargolaw.Com)
- [http:// WWW.Uky.edu/ KGS/ Coal](http://WWW.Uky.edu/ KGS/ Coal)

## پوست ۱: جداول مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصصان

جدول پ-۱: ماتریس‌های مقایسه زوجی انواع آتش‌سوزی در معادن با توجه به نظرات متخصصان

|                                                 |       |       |                                                |       |       |
|-------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------------|-------|-------|
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم   |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول  |       |       |
|                                                 | OF    | CF    |                                                | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF <sup>۱</sup> )                 | 1.000 | 0.778 | آتش‌سوزی باز (OF)                              | 1.000 | 1.000 |
| آتش‌سوزی بسته (CF <sup>۲</sup> )                | 1.286 | 1.000 | آتش‌سوزی بسته (CF)                             | 1.000 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم  |       |       |
|                                                 | OF    | CF    |                                                | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF)                               | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی باز (OF)                              | 1.000 | 1.000 |
| آتش‌سوزی بسته (CF)                              | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی بسته (CF)                             | 1.000 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم   |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم |       |       |
|                                                 | OF    | CF    |                                                | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF)                               | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی باز (OF)                              | 1.000 | 1.000 |
| آتش‌سوزی بسته (CF)                              | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی بسته (CF)                             | 1.000 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم  |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم |       |       |
|                                                 | OF    | CF    |                                                | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF)                               | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی باز (OF)                              | 1.000 | 1.000 |
| آتش‌سوزی بسته (CF)                              | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی بسته (CF)                             | 1.000 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم   |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم  |       |       |
|                                                 | OF    | CF    |                                                | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF)                               | 1.000 | 0.778 | آتش‌سوزی باز (OF)                              | 1.000 | 1.000 |
| آتش‌سوزی بسته (CF)                              | 1.286 | 1.000 | آتش‌سوزی بسته (CF)                             | 1.000 | 1.000 |

<sup>۱</sup> - Open Fire<sup>۲</sup> - Close Fire

ادامه جدول پ-۱: ماتریس‌های مقایسه زوجی انواع آتش‌سوزی در معادن با توجه به نظرات متخصصان

|                                                   |       |       |                                                  |       |       |
|---------------------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------------------|-------|-------|
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم |       |       |
|                                                   | OF    | CF    |                                                  | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF)                                 | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی باز (OF)                                | 1.000 | 1.286 |
| آتش‌سوزی بسته (CF)                                | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی بسته (CF)                               | 0.778 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم |       |       |
|                                                   | OF    | CF    |                                                  | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF)                                 | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی باز (OF)                                | 1.000 | 1.000 |
| آتش‌سوزی بسته (CF)                                | 1.000 | 1.000 | آتش‌سوزی بسته (CF)                               | 1.000 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم |       |       |                                                  |       |       |
|                                                   | OF    | CF    |                                                  | OF    | CF    |
| آتش‌سوزی باز (OF)                                 | 1.000 | 1.000 |                                                  |       |       |
| آتش‌سوزی بسته (CF)                                | 1.000 | 1.000 |                                                  |       |       |

جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظرات متخصصان

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE <sup>۱</sup> )                           | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 3.000 |
| (ME <sup>۲</sup> )                            | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 3.000 |
| (DE&ME <sup>۳</sup> )                         | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 1.667 |
| (ES <sup>۴</sup> )                            | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 2.333 |
| (E&D <sup>۵</sup> )                           | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 3.000 |
| (W <sup>۶</sup> )                             | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 2.333 |
| (CAG <sup>۷</sup> )                           | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 2.333 |
| (CCH <sup>۸</sup> )                           | 0.333 | 0.333 | 0.600 | 0.429 | 0.333 | 0.429 | 0.429 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.800 |
| (ME)                                          | 1.000 | 1.00  | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.800 |
| (DE&ME)                                       | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.400 |
| (ES)                                          | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.400 |
| (E&D)                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.800 |
| (W)                                           | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.400 |
| (CAG)                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.800 |
| (CCH)                                         | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 1.000 |

<sup>1</sup>- Coal Dust Explosion

<sup>2</sup>- Methane Explosion

<sup>3</sup>- Diesel Equipment and Mechanical Equipment

<sup>4</sup>- Electric Sparks

<sup>5</sup>- Explosives and Detonators

<sup>6</sup>- Welding

<sup>7</sup>- Compressed Air Gas

<sup>8</sup>- Cutting Coal Heated blades

ادامه جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظرات متخصصان

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 |
| (ME)                                          | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 |
| (DE&ME)                                       | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 | 1.400 |
| (ES)                                          | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 |
| (E&D)                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 |
| (W)                                           | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 1.000 |
| (CAG)                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 |
| (CCH)                                         | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                 | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                           | 1.000 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 |
| (ME)                                            | 1.000 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 |
| (DE&ME)                                         | 1.800 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (ES)                                            | 1.800 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (E&D)                                           | 1.800 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (W)                                             | 1.800 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (CAG)                                           | 1.000 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 |
| (CCH)                                           | 1.000 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                          | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 7.000 |
| (ME)                                           | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 9.000 |
| (DE&ME)                                        | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 7.000 |
| (ES)                                           | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 9.000 |
| (E&D)                                          | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 7.000 |
| (W)                                            | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 9.000 |
| (CAG)                                          | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 7.000 |
| (CCH)                                          | 0.143 | 0.111 | 0.143 | 0.111 | 0.143 | 0.111 | 0.143 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظرات متخصصان

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                         | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 2.333 |
| (ME)                                          | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 3.000 |
| (DE&ME)                                       | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 2.333 |
| (ES)                                          | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 3.000 |
| (E&D)                                         | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 3.000 |
| (W)                                           | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 3.000 |
| (CAG)                                         | 0.714 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.667 |
| (CCH)                                         | 0.429 | 0.333 | 0.429 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.600 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                          | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 9.000 |
| (ME)                                           | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 9.000 |
| (DE&ME)                                        | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 3.000 |
| (ES)                                           | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 9.000 |
| (E&D)                                          | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 9.000 |
| (W)                                            | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 9.000 |
| (CAG)                                          | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 3.000 |
| (CCH)                                          | 0.111 | 0.111 | 0.333 | 0.111 | 0.111 | 0.111 | 0.333 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                          | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 9.000 | 1.800 | 3.000 |
| (ME)                                           | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 7.000 | 1.400 | 2.333 |
| (DE&ME)                                        | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 5.000 | 1.000 | 1.667 |
| (ES)                                           | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 7.000 | 1.400 | 2.333 |
| (E&D)                                          | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 7.000 | 1.400 | 2.333 |
| (W)                                            | 0.111 | 0.143 | 0.200 | 0.143 | 0.143 | 1.000 | 0.200 | 0.333 |
| (CAG)                                          | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 5.000 | 1.000 | 1.667 |
| (CCH)                                          | 0.333 | 0.429 | 0.600 | 0.429 | 0.429 | 3.000 | 0.600 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظرات متخصصان

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | W     | E&D   | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                         | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (ME)                                          | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 | 1.400 | 1.400 |
| (DE&ME)                                       | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (ES)                                          | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (E&D)                                         | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 1.000 | 1.000 |
| (W)                                           | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.800 | 1.800 |
| (CAG)                                         | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 1.000 | 1.000 |
| (CCH)                                         | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 1.000 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                         | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 |
| (ME)                                          | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 |
| (DE&ME)                                       | 3.000 | 3.000 | 1.000 | 0.429 | 3.000 | 3.000 | 0.600 | 0.429 |
| (ES)                                          | 0.778 | 0.778 | 2.333 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 |
| (E&D)                                         | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 |
| (W)                                           | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 |
| (CAG)                                         | 0.556 | 0.556 | 1.667 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.714 |
| (CCH)                                         | 0.778 | 0.778 | 2.333 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                  | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                            | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (ME)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (DE&ME)                                          | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.714 |
| (ES)                                             | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 |
| (E&D)                                            | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (W)                                              | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (CAG)                                            | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (CCH)                                            | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظرات متخصصان

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                   | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.400 | 2.333 |
| (ME)                                              | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.400 | 2.333 |
| (DE&ME)                                           | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.400 | 2.333 |
| (ES)                                              | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.400 | 2.333 |
| (E&D)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.400 | 2.333 |
| (W)                                               | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.800 | 3.000 |
| (CAG)                                             | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.556 | 1.000 | 1.667 |
| (CCH)                                             | 0.429 | 0.429 | 0.429 | 0.429 | 0.429 | 0.333 | 0.600 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                  | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                            | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.800 |
| (ME)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.800 |
| (DE&ME)                                          | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 |
| (ES)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.800 |
| (E&D)                                            | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 |
| (W)                                              | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 |
| (CAG)                                            | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 |
| (CCH)                                            | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 |

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                   | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (ME)                                              | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (DE&ME)                                           | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (ES)                                              | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (E&D)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (W)                                               | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (CAG)                                             | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (CCH)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی عوامل مؤثر بر آتش‌سوزی باز با توجه به نظرات متخصصان

| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                   | CDE   | ME    | DE&ME | ES    | E&D   | W     | CAG   | CCH   |
| (CDE)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (ME)                                              | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (DE&ME)                                           | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (ES)                                              | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (E&D)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (W)                                               | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (CAG)                                             | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (CCH)                                             | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |

جدول پ-۳: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۳ پارامتر اصلی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|                                                 |       |       |       |                                                |       |       |       |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم   |       |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول  |       |       |       |
|                                                 | IC    | GC    | MC    |                                                | IC    | GC    | MC    |
| ذاتی (IC)                                       | 1.000 | 2.333 | 1.000 | ذاتی (IC <sup>۱</sup> )                        | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| زمین‌شناسی (GC)                                 | 0.429 | 1.000 | 0.429 | زمین‌شناسی (GC <sup>۲</sup> )                  | 0.556 | 1.000 | 0.556 |
| معدنکاری (MC)                                   | 1.000 | 2.333 | 1.000 | معدنکاری (MC <sup>۳</sup> )                    | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم |       |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم  |       |       |       |
|                                                 | IC    | GC    | MC    |                                                | IC    | GC    | MC    |
| ذاتی (IC)                                       | 1.000 | 1.286 | 1.286 | ذاتی (IC)                                      | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| زمین‌شناسی (GC)                                 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | زمین‌شناسی (GC)                                | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| معدنکاری (MC)                                   | 0.778 | 1.000 | 1.000 | معدنکاری (MC)                                  | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم   |       |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم |       |       |       |
|                                                 | IC    | GC    | MC    |                                                | IC    | GC    | MC    |
| ذاتی (IC)                                       | 1.000 | 1.286 | 1.286 | ذاتی (IC)                                      | 1.000 | 7.000 | 1.000 |
| زمین‌شناسی (GC)                                 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | زمین‌شناسی (GC)                                | 0.143 | 1.000 | 0.143 |
| معدنکاری (MC)                                   | 0.778 | 1.000 | 1.000 | معدنکاری (MC)                                  | 1.000 | 7.000 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم  |       |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم |       |       |       |
|                                                 | IC    | GC    | MC    |                                                | IC    | GC    | MC    |
| ذاتی (IC)                                       | 1.000 | 2.333 | 1.000 | ذاتی (IC)                                      | 1.000 | 2.333 | 1.000 |
| زمین‌شناسی (GC)                                 | 0.429 | 1.000 | 0.429 | زمین‌شناسی (GC)                                | 0.429 | 1.000 | 0.429 |
| معدنکاری (MC)                                   | 1.000 | 2.333 | 1.000 | معدنکاری (MC)                                  | 1.000 | 2.333 | 1.000 |

<sup>1</sup> - Intrinsic Characteristics<sup>2</sup> - Geological Characteristics<sup>3</sup> - Mining Characteristics

ادامه جدول پ-۳: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۳ پارامتر اصلی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|                                                   |       |       |       |                                                  |       |       |       |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم     |       |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم    |       |       |       |
|                                                   | IC    | GC    | MC    |                                                  | IC    | GC    | MC    |
| ذاتی (IC)                                         | 1.000 | 1.400 | 1.000 | ذاتی (IC)                                        | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| زمین‌شناسی (GC)                                   | 0.714 | 1.000 | 0.714 | زمین‌شناسی (GC)                                  | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| معدنکاری (MC)                                     | 1.000 | 1.400 | 1.000 | معدنکاری (MC)                                    | 1.286 | 1.286 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم |       |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم |       |       |       |
|                                                   | IC    | GC    | MC    |                                                  | IC    | GC    | MC    |
| ذاتی (IC)                                         | 1.000 | 1.400 | 1.000 | ذاتی (IC)                                        | 1.000 | 1.286 | 1.286 |
| زمین‌شناسی (GC)                                   | 0.714 | 1.000 | 0.714 | زمین‌شناسی (GC)                                  | 0.778 | 1.000 | 1.000 |
| معدنکاری (MC)                                     | 1.000 | 1.400 | 1.000 | معدنکاری (MC)                                    | 0.778 | 1.000 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم |       |       |       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم |       |       |       |
|                                                   | IC    | GC    | MC    |                                                  | IC    | GC    | MC    |
| ذاتی (IC)                                         | 1.000 | 1.800 | 1.000 | ذاتی (IC)                                        | 1.000 | 1.800 | 1.286 |
| زمین‌شناسی (GC)                                   | 0.556 | 1.000 | 0.556 | زمین‌شناسی (GC)                                  | 0.556 | 1.000 | 0.714 |
| معدنکاری (MC)                                     | 1.000 | 1.800 | 1.000 | معدنکاری (MC)                                    | 0.778 | 1.400 | 1.000 |
| ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم |       |       |       |                                                  |       |       |       |
|                                                   | IC    | GC    | MC    |                                                  |       |       |       |
| ذاتی (IC)                                         | 1.000 | 1.800 | 1.000 |                                                  |       |       |       |
| زمین‌شناسی (GC)                                   | 0.556 | 1.000 | 0.556 |                                                  |       |       |       |
| معدنکاری (MC)                                     | 1.000 | 1.800 | 1.000 |                                                  |       |       |       |

جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|                     | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | RC                                            | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC <sup>۱</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 9.000 | 1.286 | 3.000 | 3.000 |
| (AC <sup>۲</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 9.000 | 1.286 | 3.000 | 3.000 |
| (PC <sup>۳</sup> )  | 0.778                                         | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 7.000 | 1.000 | 2.333 | 2.333 |
| (MC <sup>۴</sup> )  | 0.778                                         | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 7.000 | 1.000 | 2.333 | 2.333 |
| (PP <sup>۵</sup> )  | 0.556                                         | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 5.000 | 0.714 | 1.667 | 1.667 |
| (TE <sup>۶</sup> )  | 0.111                                         | 0.111 | 0.143 | 0.143 | 0.200 | 1.000 | 0.143 | 0.333 | 0.333 |
| (APS <sup>۷</sup> ) | 0.778                                         | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 7.000 | 1.000 | 2.333 | 2.333 |
| (BP <sup>۸</sup> )  | 0.333                                         | 0.333 | 0.429 | 0.429 | 0.600 | 3.000 | 0.429 | 1.000 | 1.000 |
| (GS <sup>۹</sup> )  | 0.333                                         | 0.333 | 0.429 | 0.429 | 0.600 | 3.000 | 0.429 | 1.000 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                            | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                         | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (AC)  | 1.000                                         | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (PC)  | 0.429                                         | 0.429 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.600 | 0.600 | 0.429 |
| (MC)  | 0.714                                         | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (PP)  | 0.714                                         | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (TE)  | 1.000                                         | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (APS) | 0.714                                         | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (BP)  | 0.714                                         | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (GS)  | 1.000                                         | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |

<sup>1</sup> - Rank of Coal

<sup>2</sup> - Ash Content

<sup>3</sup> - Pyrite Content

<sup>4</sup> - Moisture Content

<sup>5</sup> - Porosity Percentage

<sup>6</sup> - Thermal Energy Coal

<sup>7</sup> - Average Particle Size

<sup>8</sup> - Barometric Pressure Coal

<sup>9</sup> - Gas Emission in Seam

ادامه جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                            | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                         | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (AC)  | 0.778                                         | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 |
| (PC)  | 0.778                                         | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 |
| (MC)  | 1.000                                         | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (PP)  | 1.000                                         | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (TE)  | 1.000                                         | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (APS) | 1.000                                         | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (BP)  | 1.000                                         | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (GS)  | 1.000                                         | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                              | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                           | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (AC)  | 0.778                                           | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 |
| (PC)  | 0.778                                           | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 |
| (MC)  | 1.000                                           | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (PP)  | 1.000                                           | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (TE)  | 1.000                                           | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (APS) | 1.000                                           | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (BP)  | 0.556                                           | 0.714 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 |
| (GS)  | 1.000                                           | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                             | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                          | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (AC)  | 1.000                                          | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (PC)  | 0.429                                          | 0.429 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 0.429 | 0.429 | 0.600 | 0.429 |
| (MC)  | 0.714                                          | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 |
| (PP)  | 0.429                                          | 0.429 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 0.429 | 0.429 | 0.600 | 0.429 |
| (TE)  | 1.000                                          | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (APS) | 1.000                                          | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (BP)  | 0.714                                          | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 |
| (GS)  | 1.000                                          | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                            | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.286 |
| (AC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.286 |
| (PC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.286 |
| (MC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.286 |
| (PP)  | 0.778                                         | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (TE)  | 0.778                                         | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (APS) | 0.778                                         | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (BP)  | 0.556                                         | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 |
| (GS)  | 0.778                                         | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                             | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                          | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 |
| (AC)  | 1.000                                          | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 |
| (PC)  | 0.556                                          | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.667 | 0.714 |
| (MC)  | 0.778                                          | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 2.333 | 1.000 |
| (PP)  | 0.778                                          | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 2.333 | 1.000 |
| (TE)  | 1.000                                          | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 |
| (APS) | 1.000                                          | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 |
| (BP)  | 0.333                                          | 0.333 | 0.600 | 0.429 | 0.429 | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 0.429 |
| (GS)  | 0.778                                          | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 2.333 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                             | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                          | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (AC)  | 0.778                                          | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 |
| (PC)  | 0.778                                          | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 |
| (MC)  | 0.778                                          | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 0.778 |
| (PP)  | 1.000                                          | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (TE)  | 1.000                                          | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (APS) | 1.000                                          | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| (BP)  | 0.556                                          | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.556 |
| (GS)  | 1.000                                          | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                            | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (AC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (PC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (MC)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (PP)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (TE)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (APS) | 0.714                                         | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (BP)  | 0.714                                         | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (GS)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                            | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                         | 2.333 | 7.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (AC)  | 0.429                                         | 1.000 | 3.000 | 0.429 | 0.429 | 0.429 | 0.333 | 0.429 | 0.333 |
| (PC)  | 0.143                                         | 0.333 | 1.000 | 0.143 | 0.143 | 0.143 | 0.111 | 0.143 | 0.111 |
| (MC)  | 1.000                                         | 2.333 | 7.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (PP)  | 1.000                                         | 2.333 | 7.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (TE)  | 1.000                                         | 2.333 | 7.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (APS) | 1.286                                         | 3.000 | 9.000 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |
| (BP)  | 1.000                                         | 2.333 | 7.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 |
| (GS)  | 1.286                                         | 3.000 | 9.000 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                               | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                            | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (AC)  | 1.286                                            | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 |
| (PC)  | 1.000                                            | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (MC)  | 1.286                                            | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 |
| (PP)  | 1.000                                            | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (TE)  | 1.286                                            | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 |
| (APS) | 1.000                                            | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (BP)  | 1.000                                            | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (GS)  | 1.286                                            | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                                | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |
| (AC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |
| (PC)  | 0.600                                             | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.600 |
| (MC)  | 0.600                                             | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.600 |
| (PP)  | 0.600                                             | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.600 |
| (TE)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |
| (APS) | 1.000                                             | 1.000 | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |
| (BP)  | 0.600                                             | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.600 |
| (GS)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                               | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                            | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 2.333 | 0.778 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (AC)  | 0.714                                            | 1.000 | 1.667 | 0.714 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (PC)  | 0.429                                            | 0.600 | 1.000 | 0.429 | 1.000 | 0.333 | 0.600 | 0.600 | 0.429 |
| (MC)  | 1.000                                            | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 2.333 | 0.778 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (PP)  | 0.429                                            | 0.600 | 1.000 | 0.429 | 1.000 | 0.333 | 0.600 | 0.600 | 0.429 |
| (TE)  | 1.286                                            | 1.800 | 3.000 | 1.286 | 3.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.286 |
| (APS) | 0.714                                            | 1.000 | 1.667 | 0.714 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (BP)  | 0.714                                            | 1.000 | 1.667 | 0.714 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (GS)  | 1.000                                            | 1.400 | 2.333 | 1.000 | 2.333 | 0.778 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                                | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (AC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (PC)  | 0.778                                             | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 |
| (MC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (PP)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (TE)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (APS) | 0.556                                             | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 |
| (BP)  | 0.778                                             | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 |
| (GS)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر ذاتی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | RC                                                | AC    | PC    | MC    | PP    | TE    | APS   | BP    | GS    |
| (RC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (AC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (PC)  | 0.778                                             | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 |
| (MC)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (PP)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (TE)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (APS) | 0.556                                             | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 |
| (BP)  | 0.778                                             | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 |
| (GS)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |

جدول پ- ۵: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۷ پارامتر زمین‌شناسی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|                    | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | T                                             | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T <sup>۱</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.800 | 3.000 | 1.800 |
| (S <sup>۲</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.800 | 3.000 | 1.800 |
| (D <sup>۳</sup> )  | 0.778                                         | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 2.333 | 1.400 |
| (F <sup>۴</sup> )  | 0.556                                         | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |
| (R <sup>۵</sup> )  | 0.556                                         | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |
| (CO <sup>۶</sup> ) | 0.333                                         | 0.333 | 0.429 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.600 |
| (LC <sup>۷</sup> ) | 0.556                                         | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم |       |       |       |       |       |       |
|------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                             | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (S)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (D)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (F)  | 0.600                                         | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 |
| (R)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (CO) | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (LC) | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |

<sup>1</sup> - Thickness of Coal Seam

<sup>2</sup> - Slope of Coal Seam

<sup>3</sup> - Depth of Cover

<sup>4</sup> - Fault Condition

<sup>5</sup> - Resistance Layer of Coal

<sup>6</sup> - Coal Outburst

<sup>7</sup> - Layers Close Together

ادامه جدول پ- ۵: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۷ پارامتر زمین‌شناسی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم |       |       |       |       |       |       |
|------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                             | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                         | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.333 | 1.000 |
| (S)  | 1.000                                         | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.333 | 1.000 |
| (D)  | 1.667                                         | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 1.667 |
| (F)  | 1.667                                         | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 1.667 |
| (R)  | 2.333                                         | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 2.333 |
| (CO) | 3.000                                         | 3.000 | 1.800 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 3.000 |
| (LC) | 1.000                                         | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.333 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم |       |       |       |       |       |       |
|------|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                               | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                           | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.286 |
| (S)  | 0.778                                           | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (D)  | 0.778                                           | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (F)  | 0.778                                           | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (R)  | 0.778                                           | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (CO) | 0.556                                           | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 |
| (LC) | 0.778                                           | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم |       |       |       |       |       |       |
|------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                              | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                          | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (S)  | 1.000                                          | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (D)  | 1.000                                          | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (F)  | 0.600                                          | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.600 |
| (R)  | 1.000                                          | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (CO) | 1.000                                          | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (LC) | 1.000                                          | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

ادامه جدول پ- ۵: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۷ پارامتر زمین‌شناسی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم |       |       |       |       |       |       |
|------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                             | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                         | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (S)  | 0.714                                         | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 0.714 | 0.714 | 0.714 |
| (D)  | 1.000                                         | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (F)  | 1.286                                         | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.286 | 1.286 | 1.286 |
| (R)  | 1.000                                         | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (CO) | 1.000                                         | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| (LC) | 1.000                                         | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم |       |       |       |       |       |       |
|------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                              | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (S)  | 0.556                                          | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 |
| (D)  | 1.000                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (F)  | 1.000                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (R)  | 0.778                                          | 1.400 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 |
| (CO) | 1.000                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (LC) | 1.000                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم |       |       |       |       |       |       |
|------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                              | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                          | 1.400 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 |
| (S)  | 0.714                                          | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.714 |
| (D)  | 1.286                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 |
| (F)  | 1.286                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 |
| (R)  | 1.000                                          | 1.400 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 |
| (CO) | 1.286                                          | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.286 |
| (LC) | 1.000                                          | 1.400 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 1.000 |

ادامه جدول پ- ۵: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۷ پارامتر زمین‌شناسی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم |       |       |       |       |       |       |
|------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                             | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 |
| (S)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 |
| (D)  | 0.600                                         | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 0.600 |
| (F)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 |
| (R)  | 0.600                                         | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 0.600 | 0.600 |
| (CO) | 1.000                                         | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 |
| (LC) | 1.000                                         | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.000 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم |       |       |       |       |       |       |
|------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                             | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                         | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.333 | 0.600 |
| (S)  | 1.000                                         | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.333 | 0.600 |
| (D)  | 1.667                                         | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 1.000 |
| (F)  | 1.667                                         | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 1.000 |
| (R)  | 2.333                                         | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 0.778 | 1.400 |
| (CO) | 3.000                                         | 3.000 | 1.800 | 1.800 | 1.286 | 1.000 | 1.800 |
| (LC) | 1.667                                         | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.556 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم |       |       |       |       |       |       |
|------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                                | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (S)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (D)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (F)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (R)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (CO) | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (LC) | 1.286                                            | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.286 | 1.000 |

ادامه جدول پ- ۵: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۷ پارامتر زمین‌شناسی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم |       |       |       |       |       |       |
|------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                                 | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 |
| (S)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 |
| (D)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 |
| (F)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 |
| (R)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 1.667 |
| (CO) | 0.600                                             | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 |
| (LC) | 0.600                                             | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم |       |       |       |       |       |       |
|------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                                | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 2.333 |
| (S)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 2.333 |
| (D)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 2.333 |
| (F)  | 0.714                                            | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 |
| (R)  | 0.714                                            | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 |
| (CO) | 0.714                                            | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 |
| (LC) | 0.429                                            | 0.429 | 0.429 | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 |

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم |       |       |       |       |       |       |
|------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                                 | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (S)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (D)  | 0.778                                             | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 0.778 | 0.778 | 1.400 |
| (F)  | 0.556                                             | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 1.000 |
| (R)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (CO) | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (LC) | 0.556                                             | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 1.000 |

ادامه جدول پ- ۵: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۷ پارامتر زمین‌شناسی مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|      | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم |       |       |       |       |       |       |
|------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | T                                                 | S     | D     | F     | R     | CO    | LC    |
| (T)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (S)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (D)  | 0.778                                             | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 0.778 | 0.778 | 1.400 |
| (F)  | 0.556                                             | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 1.000 |
| (R)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (CO) | 1.000                                             | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 | 1.000 | 1.800 |
| (LC) | 0.556                                             | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.556 | 0.556 | 1.000 |

جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|                     | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | EM                                            | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM <sup>۱</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (AD <sup>۲</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (RA <sup>۳</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (EF <sup>۴</sup> )  | 0.778                                         | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 |
| (FM <sup>۵</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (WS <sup>۶</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (MLE <sup>۷</sup> ) | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (LA <sup>۸</sup> )  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.286 |
| (VS <sup>۹</sup> )  | 0.778                                         | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 0.778 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                            | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (AD)  | 0.714                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (RA)  | 0.714                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (EF)  | 0.714                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (FM)  | 1.000                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (WS)  | 1.000                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (MLE) | 0.714                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (LA)  | 0.714                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (VS)  | 1.000                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |

<sup>1</sup>- Extraction Method

<sup>2</sup>- Advancing Direction

<sup>3</sup>- Rate of Advance

<sup>4</sup>- Exploitation Factor

<sup>5</sup>- Filling Method

<sup>6</sup>- Warning Systems

<sup>7</sup>- Multi-Layer Extraction

<sup>8</sup>- Leakage Aire

<sup>9</sup>- Ventilation System

ادامه جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                            | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 |
| (AD)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 |
| (RA)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 |
| (EF)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 |
| (FM)  | 0.600                                         | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 1.000 | 0.333 | 0.600 | 0.429 | 0.333 |
| (WS)  | 1.800                                         | 1.800 | 1.800 | 1.800 | 3.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |
| (MLE) | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.667 | 0.556 | 1.000 | 0.714 | 0.556 |
| (LA)  | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 2.333 | 0.778 | 1.400 | 1.000 | 0.778 |
| (VS)  | 1.800                                         | 1.800 | 1.800 | 1.800 | 3.000 | 1.000 | 1.800 | 1.286 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                              | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                           | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 |
| (AD)  | 0.556                                           | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.556 |
| (RA)  | 1.000                                           | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 |
| (EF)  | 0.778                                           | 1.400 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 0.778 |
| (FM)  | 1.000                                           | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 |
| (WS)  | 1.000                                           | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 |
| (MLE) | 0.778                                           | 1.400 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.000 | 1.400 | 0.778 |
| (LA)  | 0.556                                           | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 0.714 | 1.000 | 0.556 |
| (VS)  | 1.000                                           | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.286 | 1.800 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                             | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                          | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (AD)  | 0.714                                          | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (RA)  | 1.000                                          | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (EF)  | 0.714                                          | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (FM)  | 1.000                                          | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (WS)  | 1.000                                          | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |
| (MLE) | 0.714                                          | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (LA)  | 0.714                                          | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 |
| (VS)  | 1.000                                          | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                            | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.556 |
| (AD)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.556 |
| (RA)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.556 |
| (EF)  | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (FM)  | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (WS)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.556 |
| (MLE) | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (LA)  | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 0.778 |
| (VS)  | 1.800                                         | 1.800 | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                             | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                          | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.667 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 |
| (AD)  | 1.000                                          | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.667 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 |
| (RA)  | 1.400                                          | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 |
| (EF)  | 1.400                                          | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 |
| (FM)  | 0.600                                          | 0.600 | 0.429 | 0.429 | 1.000 | 0.333 | 0.429 | 0.333 | 0.333 |
| (WS)  | 1.800                                          | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 3.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (MLE) | 1.400                                          | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 |
| (LA)  | 1.800                                          | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 3.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (VS)  | 1.800                                          | 1.800 | 1.286 | 1.286 | 3.000 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                             | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                          | 3.000 | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 0.429 | 0.429 | 0.333 | 0.333 |
| (AD)  | 0.333                                          | 1.000 | 0.111 | 0.111 | 0.333 | 0.143 | 0.143 | 0.111 | 0.111 |
| (RA)  | 3.000                                          | 9.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (EF)  | 3.000                                          | 9.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (FM)  | 1.000                                          | 3.000 | 0.333 | 0.333 | 1.000 | 0.429 | 0.429 | 0.333 | 0.333 |
| (WS)  | 2.333                                          | 7.000 | 0.778 | 0.778 | 2.333 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 |
| (MLE) | 2.333                                          | 7.000 | 0.778 | 0.778 | 2.333 | 1.000 | 1.000 | 0.778 | 0.778 |
| (LA)  | 3.000                                          | 9.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |
| (VS)  | 3.000                                          | 9.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 1.286 | 1.286 | 1.000 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                            | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                         | 2.333 | 2.333 | 2.333 | 2.333 | 1.400 | 2.333 | 2.333 | 0.778 |
| (AD)  | 0.429                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 0.333 |
| (RA)  | 0.429                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 0.333 |
| (EF)  | 0.429                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 0.333 |
| (FM)  | 0.429                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 0.333 |
| (WS)  | 0.714                                         | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 1.000 | 1.667 | 1.667 | 0.556 |
| (MLE) | 0.429                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 0.333 |
| (LA)  | 0.429                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.600 | 1.000 | 1.000 | 0.333 |
| (VS)  | 1.286                                         | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 1.800 | 3.000 | 3.000 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                            | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 0.714 |
| (AD)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 0.714 |
| (RA)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 0.714 |
| (EF)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 0.714 |
| (FM)  | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 1.000 |
| (WS)  | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 1.000 |
| (MLE) | 0.600                                         | 0.600 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.429 | 1.000 | 0.600 | 0.429 |
| (LA)  | 1.000                                         | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 1.667 | 1.000 | 0.714 |
| (VS)  | 1.400                                         | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 2.333 | 1.400 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                               | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                            | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (AD)  | 0.429                                            | 1.000 | 0.600 | 0.600 | 0.429 | 0.429 | 0.429 | 0.600 | 0.429 |
| (RA)  | 0.714                                            | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 |
| (EF)  | 0.714                                            | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 |
| (FM)  | 1.000                                            | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (WS)  | 1.000                                            | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (MLE) | 1.000                                            | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |
| (LA)  | 0.714                                            | 1.667 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 |
| (VS)  | 1.000                                            | 2.333 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                                | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 |
| (AD)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 |
| (RA)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 |
| (EF)  | 0.714                                             | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 |
| (FM)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 |
| (WS)  | 0.714                                             | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 |
| (MLE) | 0.714                                             | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 0.714 |
| (LA)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 |
| (VS)  | 1.000                                             | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                               | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 0.778 |
| (AD)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 0.778 |
| (RA)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 0.778 |
| (EF)  | 0.714                                            | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (FM)  | 0.714                                            | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (WS)  | 1.000                                            | 1.000 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 1.000 | 1.400 | 1.400 | 0.778 |
| (MLE) | 0.714                                            | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (LA)  | 0.714                                            | 0.714 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.714 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (VS)  | 1.286                                            | 1.286 | 1.286 | 1.800 | 1.800 | 1.286 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                                | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (AD)  | 0.556                                             | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (RA)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (EF)  | 0.778                                             | 1.400 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.400 | 0.778 |
| (FM)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (WS)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (MLE) | 0.556                                             | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (LA)  | 0.556                                             | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (VS)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |

ادامه جدول پ-۶: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ پارامتر معدنکاری مؤثر بر خودسوزی با توجه به نظرات متخصصان

|       | ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | EM                                                | AD    | RA    | EF    | FM    | WS    | MLE   | LA    | VS    |
| (EM)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (AD)  | 0.556                                             | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (RA)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (EF)  | 0.778                                             | 1.400 | 0.778 | 1.000 | 0.778 | 0.778 | 1.400 | 1.400 | 0.778 |
| (FM)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (WS)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |
| (MLE) | 0.556                                             | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (LA)  | 0.556                                             | 1.000 | 0.556 | 0.714 | 0.556 | 0.556 | 1.000 | 1.000 | 0.556 |
| (VS)  | 1.000                                             | 1.800 | 1.000 | 1.286 | 1.000 | 1.000 | 1.800 | 1.800 | 1.000 |

## **Abstract**

Fire is one of the dangerous events in the coal mines. The fire caused extensive damage and loss of life. In this research, according to a review of all the latest, known and credible studies about mine fire from around the world and identification of many important and effective parameters, and selected 11 parameters which were applicable to the evaluation. After identification the effective parameters on mine fire, for using the FDAHP method and determination weight of each parameter, a technical questionnaires prepared and sent to experts. Then, for providing a quantitative classification system, based on the effective parameters of mine fire capability, the qualitative experts' response by FDAHP method were analyzed and the weight of each parameter was obtained. In the other method using RES approach, the weight of each parameter was calculated; that comparison of 2 methods illustrated relatively good concordance. With access to the weight of each parameter, a new quantitative classification system was proposed which “Mine Fire Potential Index (MFPI) ” has been named. In the MFPI system, a number from 0 to 100 can be assigned, with higher values corresponding to greater ease of mine fire capability. Based on the MFPI classification, fire-prone areas are classified into three modes from the view point of mine fire capability: low, medium, high. So, a comprehensive and perfect evaluation of the fire-prone areas in the study area were presented. Finally, by using the event of mine fire occurred in the region, an initial validation for the application systematic approach in the study area was conducted. That were comparison demonstrated relatively good concordance.

## **Keywords**

Fire, coal mines, quantitative classification system, Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process (FDAHP), rock engineering system method (RES), Mine Fire Potential Index (MFPI)



**University of Shahrood**

**Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics**

**Presentation of an Engineering Classification System for Evaluating the  
Risk of Fire in Underground Coal Mines (Case Study: Eastern Alborz Coal Mine)**

**Hadis Moradi**

Supervisors:

**Dr. Mohammad Ataei**

**Dr. Farhang Sereshki**

Advisor:

**Keramat Ghanbari**

**Amir Saffari**

**September 2015**