بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارائه‌ی یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغالسنگ

دانشجو

امیر صفاری

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطائی

استاد مشاور

مهندس کرامت قنبری

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲

شماره: ۲۶۹۲/۱۲۶۰ ـ ص
تاریخ: ۹۲/۱۱/۳۰
ویرایش:

باسمه تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد ~~خانم~~/ آقای **امیر صفاری** رشته **مهندسی معدن** گرایش **استخراج** تحت عنوان **ارائه‌ی یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغالسنگ** که در تاریخ **۱۳۹۲/۱۱/۲۷** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹/۸) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹) ۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)

۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ۱۶) ۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنما	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۲ـ استادراهنما	دکتر محمد عطائی	استاد	
۳ـ استاد مشاور	مهندس کرامت قنبری	---	
۴ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد کارآموزیان	استادیار	
۵ـ استاد ممتحن	دکتر سید رحمان ترابی	استاد	
۶ ـ استاد ممتحن	دکتر حمید آقاجانی	استادیار	

رئیس دانشکده : سید رضا قوامی ریابی امضاء

دانشکده معدن و ژئوفیزیک
دانشگاه صنعتی شاهرود

تقدیم به

روح پاک **پدرم**، که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم؛ امّا...؛

و به **مادرم**، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر؛

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

تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند؛ و سلام و درود بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم

آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

اینک که به یاری خدا پایان نامه کارشناسی ارشد خویش را به پایان رسانده‌ام بر خویش وظیفه می‌دانم تا از کلیه عزیزانی که بنده را در این راه یاری نمودند و نظراتشان چراغ راه من بود کمال سپاس و قدردانی را به جا آورم.

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

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

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

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

از زحمات اساتید مهربان و عزیزم آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطائی که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند صمیمانه سپاسگزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیّت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

همچنین از زحمات استاد مشاور خود جناب مهندس قنبری (مدیریت محترم واحد HSE شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی) به خاطر همکاری بی‌دریغشان در این عرصه صمیمانه سپاس‌گزارم و برای ایشان نیز سلامتی، طول عمر و موفقیّت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

بر خود وظیفه می‌دانم از کلیه‌ی اعضای هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود کمال تشکّر و قدردانی را نمایم و از خداوند منان موفقیّت در تمام مراحل زندگی را برایشان آرزومندم.

به درستی که اگر انصاف رعایت شود، باید از کلیه‌ی کارکنان دانشکده به ویژه جناب آقای شاه حسینی تشکر و سپاسگزاری نمایم و از خداوند منان برای آن‌ها آرزوی سلامتی و موفقیّت هرچه

تمام‌تر را دارم.

در پایان از مادر عزیزم، این معلّم بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده‌اند و همواره با دعای خیر و تشویقشان در زندگی یاری‌ام نمودند کمال تشکر و امتنان را دارم.

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

تعهد نامه

اینجانب **امیر صفاری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارائه‌ی یک سیستم**

طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغالسنگ تحت راهنمایی آقایان **دکتر فرهنگ سرشکی** و **دکتر محمد عطائی** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ **امضای دانشجو**

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

خودسوزی ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ در معادن زغالسنگ یکی از مهم‌ترین مشکلات عمده در تمامی کشورهای تولیدکننده زغالسنگ و نیز ترس و وحشتی بزرگ برای صنایع و محقّقین دست‌اندرکار در این زمینه است. اکثر آتش‌سوزی‌های زغالی در یک ناحیه کوچک بر اثر

گرمایش خودبه‌خودی شروع می‌شوند و به تدریج ناحیه وسیعی را در بر می‌گیرند که نتایج آن باعث از دست رفتن میلیون‌ها تن زغالسنگ، مرگ پرسنل، خسارت و نابودی تجهیزات در داخل معدن، آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازها و خروج دود فراوان از داخل معدن، افزایش دمای داخل معدن، ایجاد مشکل در تهویه معدن و غیره می‌شود.

لذا برای بررسی این پدیده، در این تحقیق ابتدا سابقه علمی موضوع مورد بررسی قرار گرفته و مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در خودسوزی زغالسنگ شناسایی شده‌اند. در ادامه از کارشناسان مربوطه داخل و خارج از کشور در مورد ضریب اهمیّت هر یک از پارامترهای دخیل در قابلیت خودسوزی زغالسنگ نظرسنجی به عمل آمده است. سپس جهت ارائه‌ی یک سیستم طبقه‌بندی کمّی، بر اساس پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ، نظرات کیفی متخصصان مذکور توسط روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) تجزیه و تحلیل شده‌اند و وزن هر پارامتر بدست آمده است. همچنین با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) وزن هر یک از پارامترهای مؤثر تعیین شد که نتایج حاصل از این دو روش تطابق خوبی با هم دارند.

با دستیابی به وزن هر پارامتر، سیستم طبقه‌بندی جدیدی به صورت کمّی پیشنهاد شده است. این سیستم که اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ نامیده شده است (CSCPi[1]) در مجموع به زغال‌ها امتیازی از ۰ تا ۱۰۰ اختصاص می‌دهد. سپس قابلیت خودسوزی زغالسنگ در ۳ کلاس پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی می‌شوند.

پس از پیشنهاد سیستم طبقه‌بندی، برای ارزیابی توانایی و کارآیی روش، اطلاعات لایه‌های ۳ منطقه معدنی از مجموعه معادن شرکت زغالسنگ البرز شرقی شامل پشکلات، کلاریز و رزمجا جمع‌آوری شدند. بعد از مطالعه نمونه‌ها، لایه‌ها از نظر پارامترهای موجود در سیستم طبقه‌بندی امتیازدهی شده و کلاس هر کدام از لایه‌ها در سیستم پیشنهادی CSCPi تعیین شد.

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش ارائه شده از حوادث رویداده در معادن منطقه

[1] - Coal Spontaneous Combustion Potential index

استفاده شد که مقای‌سه‌ها تطابق خوبی را نشان دادند.

کلمات کلیــدی: معـادن زغالســنگ- ارزیـابی خطـرات- انـدیس پتانسـیل خودسـوزی زغالســنگ (CSCPi)- طبقـه بنـدی مهندسـی- روش تحلیـل سلسـله مراتبـی دلفـی فـازی (FDAHP)- روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)- معادن زغالسنگ البرز شرقی.

مقالات مستخرج از پایان‌نامه

مقالات کنفرانسی چاپ شده

- **صفاری ا**، سرشکی ف، عطائی م و قنبری ک، (۱۳۹۲) **"کاربرد سنجش از راه دور (Remote Sensing) در شناسایی آتش‌سوزی‌های زغالی"**، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، صفحات ۱۸۹۴ تا ۱۹۰۱، دانشگاه فردوسی مشهد.

- **صفاری ا**، سرشکی ف، عطائی م و قنبری ک، (۱۳۹۲) **"تاثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ و راهکارهای جلوگیری از آن در دپوهای کارخانه زغالشویی"**، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران.

مقالات علمی- پژوهشی (ISC) پذیرفته شده

- **Saffari A.**, Sereshki F., Ataei M. and K. Ghanbari, "The use of Rock Engineering Systems (RES) approach to evaluation and classification of the coal spontaneous combustion potential in Eastern Alborz Coal Mines" **Int. Journal of Mining & Geo-Engineering.**

مقالات بین المللی (ISI) تحت داوری

- **Saffari A.**, Sereshki F., Ataei M. and K. Ghanbari, "Presentation of an engineering classification system for evaluating of coal spontaneous combustion potential index (CSCPi) using Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process (FDAHP)" **Underreview**.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل	صفحه

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول	صفحه

فصل ۱: کلیّات تحقیق

۱-۱- مقدمه

زغالسنگ در بسیاری از کشورهای جهان تولید و در تعدادی از این کشورها نقش مهمّی در اقتصاد آن‌ها ایفا می‌کند. در طول سالیان متمادی، بشر از زغالسنگ برای تأمین گرمای فضا، تأمین انرژی صنایعی همچون سیمان و فولادسازی، تولید الکتریسیته، تبدیل آن به کک و استفاده از کک در صنایع چدن و فولاد سازی، در تبدیل به نفت[1] و گاز[2] برای صنایع حمل و نقل و شیمیایی و غیره استفاده کرده است (اصانلو، ۱۳۷۸).

خطرات ناشی از معدنکاری زغال یکی از عوامل محدودکننده طراحی در معادن زیرزمینی محسوب می‌شود (اصانلو، ۱۳۷۸). از مهم‌ترین خطرات ناشی از معدنکاری زغال در معادن زیرزمینی می‌توان به نشست سطح زمین[3]، انفجار خودبه‌خودی سنگ[4]، خودسوزی زغال[5]، گازدهی، آلودگی محیط زیست و غیره اشاره کرد (عطائی، ۱۳۹۰).

لذا ضرورت دارد این خطرات به طور دقیق شناسایی و راه‌های پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل آن‌ها ارزیابی شوند. به همین دلیل در این پایان‌نامه به بررسی خطر خودسوزی زغال در معادن زیرزمینی و به طور ویژه معدنکاری جبهه کار طولانی[6] پرداخته شده است.

در این فصل کلیاتی از مسأله مورد بررسی، هدف از انجام مطالعه‌ی حاضر و ضرورت انجام تحقیق بیان شده است؛ در انتها نیز به فرآیندهای انجام گرفته شده در فصل‌های مختلف این تحقیق پرداخته خواهد شد.

---

[1] - Liquefaction
[2] - Gassification
[3] - Subsidence
[4] - Rock Burst
[5] - Coal Spontaneous Combustion
[6] - Longwall Mining

۱-۲- بیان مسأله

فرآیند خودسوزی زغالسنگ یک فعل و انفعال شیمیایی خود گرمایشی بر اثر اکسیداسیون و ترکیب شدن با اکسیژن هوا است. اثرات خودسوزی زغالسنگ از افزایش مختصر مونوکسید کربن موجود در هوا تا آتش‌سوزی بزرگی که ممکن است همه معدن را در برگیرد، تغییر می‌کند. البته باید ذکر کرد که خود سوز بودن زغال و درجه‌ی خودسوزی آن به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. تمامی پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی زغالسنگ را می‌توان در سه گروه اصلی و به شرح زیر ارزیابی و طبقه بندی کرد:

الف) مشخصات ذاتی زغال

ب) مشخصات زمین شناسی

ج) مشخصات معدنکاری

از میان ۳ گروه فوق، گروه اول و دوم عموماً به نام پارامترهای «غیر قابل کنترل» و یا «پارامترهای مستقل» و گروه سوم پارامترهای «قابل کنترل» و یا «پارامترهای وابسته» نامیده می‌شوند. در مجموع می‌توان با شناخت، ارزیابی و کنترل پارامترهای مذکور، قابلیت اکسیداسیون و خودسوزی زغال را پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل کرد.

زغال در مجاورت هوا حتی در دمای عادی محیطی به آرامی اکسید می‌شود و جذب سطحی اکسیژن در آن رخ می‌دهد که این فرآیند گرمازا بوده و حرارت تولید می‌کند. در نقاطی که زغالسنگ در معرض تهویه‌ی عادی قرار دارد حرارت تولید شده با جریان هوای تهویه دور شده و زغالسنگ سرد باقی می‌ماند. در صورت فقدان کامل جریان هوا، اکسیژن کاملاً مصرف شده و اکسیداسیون متوقف می‌شود و زغال سرد باقی خواهد ماند. در حالتی مابین این دو حالت، شرایط اکسیدکننده‌ای وجود دارد که حرارت اکسیداسیون با سرعت کافی پراکنده نمی‌شود تا زغال سرد باقی بماند در نتیجه دمای زغال بالا می‌رود و از آنجایی که سرعت اکسیداسیون به همراه حرارت افزایش می‌یابد، این فرآیند نیز سرعت می‌گیرد. خودسوزی پس از آغاز شدن قادر است در شرایط وجود کم اکسیژن نیز به فعالیت

خود ادامه بدهد. افزایش سرعت واکنش ممکن است باعث شود که زغال شروع به سوختن کند که نرخ گسترش خودسوزی به صورت یک تابع نمایی افزایش می‌یابد. شرایط بروز چنین اتفاقی وجود اکسیژن کافی و نبودن سیستم تهویه صحیح برای انتقال گرمای ایجاد شده می‌باشد.

هر زغالی دارای یک درجه حرارت بحرانی است که به «حداقل دمای خود گرمایشی» یا "SHT[1]" مشهور است، این دما پایین‌ترین درجه حرارتی است که نوعی واکنش پایدار گرمازا یا افزایش غیرقابل کنترل دمایی را باعث می‌شود. محدوده‌ی این دما وابسته به نوع زغال بین ۵۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین آن حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد است. در این مرحله زغال شروع به آزاد کردن مقادیر قابل توجهی هیدروژن و مونوکسید کربن می‌کند، اگر اجازه داده شود که زغال به دمای SHT برسد و تعادل گرمایی برقرار نگردد (تعادل گرمایی یعنی دور شدن حرارت تولیدی با جریان هوا و عدم افزایش بیشتر حرارت) فرآیند اکسیداسیون و افزایش درجه حرارت سرعت گرفته تا اینکه مواد ملتهب و گداخته می‌شوند. در این مرحله دود و محصولات ناشی از احتراق متصاعد خواهند شد که در این حالت یک «آتش پنهان» ایجاد شده است؛ و نیز در ادامه خطر تصاعد میزان بالای مونوکسید کربن به هوای آزاد و تبدیل احتراق به آتش وجود دارد. در معادن زیرزمینی زغال، بدترین حالت زمانی اتفاق می‌افتد که خودسوزی زغال در حضور اتمسفر قابل انفجار شکل بگیرد که ممکن است خطر خودسوزی تبدیل به انفجار شود و تمام معدن تحت‌الشعاع قرار گیرد.

۱-۳- ضرورت تحقیق

معادن زغالسنگ به عنوان منبع اصلی انرژی در انقلاب صنعتی بوده و با پیشرفت فناوری در این خصوص با وجود آلایندگی زیستی آن، که البته با فناوری‌های نوین تقلیل یافته، هنوز هم یکی از اقلام مهم در سبد انرژی جهانی محسوب می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که زغالسنگ از گذشته تا به امروز همچنان جایگاه خود را در تأمین نیاز انرژی جهان حفظ کرده و سهم آن حتی افزایش اندکی نیز داشته است.

[1] - Self Heating Temperature

در ایران نیز مزایای متعدد استفاده از زغالسنگ نظیر کک سازی و کاربرد آن در صنعت فولاد و کاربرد نوع حرارتی، آن را به عنوان یک حامل انرژی با پتانسیل بالقوه بالا در کشور مطرح نموده است.

با توجه به عدم انجام اکتشافات تفصیلی و منظم در کشور، به ویژه در سال‌های اخیر و عدم استفاده از تکنولوژی روز دنیا جهت استحصال محصولات جدید و از همه مهم‌تر وجود ذخایر غنی نفت و گاز، سبب شده که به این ماده معدنی تا حد زیادی بی‌توجهی شود. به همین دلیل آمارهای متعدّدی از میزان ذخایر زغالسنگ گزارش شده است. در هر حال آنچه که از این آمارها دریافت می‌شود، وجود منابع عظیمی از این حامل انرژی در کشور است، که نشان دهنده‌ی پتانسیل بالای بهره برداری از زغالسنگ است. پنج حوزه‌ی زغالسنگی ایران شامل طبس، کرمان، البرز شرقی، البرز مرکزی و البرز غربی می‌باشد.

طبق آمار وزارت نیرو در سال ۱۳۸۷ ذخایر قطعی زغالسنگ در ایران ۱/۱ میلیارد تن است که ۷۲/۳٪ از آن به ذخایر زغال سنگ کک شو و ۲۷/۷٪ به ذخایر زغال سنگ حرارتی اختصاص دارد. ذخایر احتمالی زغالسنگ ایران حدود ۱/۷ میلیارد تن می‌باشد. پیش بینی می‌شود که ذخایر زمین شناسی زغالسنگ ایران بیش از ۱۴ میلیارد تن باشد (وزارت نیرو، ۱۳۸۷). لازم به توضیح است که داده‌های فوق از دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، معاونت امر برق و انرژی وزارت نیرو اخذ شده است و با توجه به اینکه محاسبات این آمار بر اساس سال مبنای ۲۰۰۸ میلادی (۱۳۸۷ شمسی) انجام شده است، لذا اطلاعات جدیدتری در این زمینه در اختیار نمی‌باشد و تنها داده‌های ملّی در این زمینه در همین سال می‌باشند. بنابراین به‌کارگیری روش‌های مناسب اکتشاف، استخراج، فرآوری و تکنولوژی روز دنیا سبب می‌شود تا با شناخت بیشتر این ذخایر، برنامه‌های دراز مدّت و میان مدتی در خصوص استفاده و استحصال فرآورده‌های این ماده معدنی تدوین و اجرایی شود.

لذا شناسایی دقیق منابع و ذخایر زغالسنگ با مطالعات پتانسیل سنجی، **ارزیابی خطرات پیش روی آن**، بهینه‌سازی و ارتقای تکنولوژیک صنایع مبتنی بر زغالسنگ، از مرحله‌ی استخراج تا

فرآوری و صادرات فرآورده‌های آن امری اجتناب ناپذیر است.

معادن زغالسنگ موجود در ایران از نوع معادن زیرزمینی است و مخاطرات معادن زیرزمینی در قیاس با سایر فعالیت‌های معدنی و صنعتی دارای تفاوت‌های زیادی است و به سادگی می‌توان دریافت که فعالیت در معادن زغالسنگ با گستره‌ی وسیعی از مخاطرات همراه است؛ اما با توجه به پتانسیل بالای ذخایر معدنی و اهمیت بارز آن‌ها در تأمین نیازهای بخش صنعت، ضرورت بهره برداری بهینه و مطمئن از منابع محرز است. در آینده نیز با گسترش و توسعه معادن و عمیق‌تر شدن آن‌ها، مسلماً مسائل و مشکلات افزایش می‌یابد.

گرچه تاکنون این امکان به وجود نیامده است که بتوان معدنکاری را به طور کامل ایمن ساخت ولی در عین حال باید نهایت تلاش به عمل آید تا با استفاده از دانش فنی و تکنولوژی نوین و سایر امکانات موجود مخاطرات را به حداقل ممکن رسانید.

یکی از مخاطراتی که میزان آن در معادن زغال سنگ جهان به میزان قابل توجهی رخ می‌دهد، «خطر خودسوزی زغالسنگ» است. خطر خودسوزی زغال در معادن زیرزمینی و روباز، در محل‌های ذخیره‌سازی زغال، نیروگاه‌ها، در طی انتقال‌های زغال از جایی به جای دیگر و غیره رخ می‌دهد. در معادن زیرزمینی زغال، بدترین حالت زمانی رخ می‌دهد که خودسوزی زغال در حضور اتمسفر قابل انفجار صورت بگیرد که ممکن است خطر خودسوزی تبدیل به انفجار شود و تمام معدن را درگیر کند. خودسوزی در معادن زغال سنگ ضمن وارد آوردن خسارات سنگین مادی، قربانیان زیادی را نیز در برداشته است.

تمامی معادن زغالی در یک درجه از خودسوزی قرار ندارند، بنابراین ارزیابی خطر خودسوزی یک نیاز اصلی و اولیّه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت خودسوزی برای معادن زغالی است؛ لذا بهره‌گیری از روش‌های مؤثری که موجبات پیش‌بینی و پیش‌گیری از خطر خودسوزی در معادن زغالسنگ را فراهم آورد امری اجتناب ناپذیر و ضروری تلقی می‌شود.

در بحث پیرامون تأثیر پارامترهای مختلف بر قابلیت خودسوزی زغال، متخصصان بسیاری با

استفاده از پارامترهای مختلف رفتار زغال‌ها را تشریح کرده‌اند. در سری تحقیقات انجام یافته گذشته، آزمایش‌ها و روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال ارائه شده که تحقیقات و مطالعات در معادن نشان می‌دهند که هیچ‌کدام از این روش‌ها تمامی پارامترهای بحرانی و کلیدی را مورد توجه قرار نداده‌اند و جامعیّت لازم را نیز از نظر درجه اهمیت پارامترها ندارند. همچنین با دقت در مطالعات انجام شده قبلی به وضوح آشکار می‌شود که نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه واحد و یک رهیافت اساسی برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال نمی‌انجامد و یافته‌های این مطالعات عموماً واگرا بوده و توانایی و ابزار خاصی برای کاربران صنعتی و علمی این تحقیقات ارائه نمی‌نمایند.

مشکل عمده تحقیقات پیشین، مطالعه جداگانه پارامترهای مؤثر بر قابلیت گرمایش خودبه‌خودی یا خودسوزی زغال است. این در حالی است که قابلیت خودسوزی زغال به پارامترهای بسیار زیادی وابسته است که این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ با هم می‌باشند؛ لذا دست‌یابی به یک روش جامع که بتوان با استفاده از آن قابلیت خودسوزی زغال را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد یکی از اهداف کلیدی محقّقان علم زغال به شمار می‌آید.

در مهندسی زغالسنگ به منظور ارزیابی رفتار خودسوزی زغال، سیستم‌های طبقه‌بندی به عنوان ابزاری کارآمد مطرح می‌باشند؛ لذا با توجه به طبیعت پیچیده و پارامترهای مؤثر متعدّد در فرآیند خودسوزی، به نظر می‌رسد استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی جامع می‌تواند راه‌گشای مناسبی برای برطرف کردن دشواری‌های موجود در زمینه ارزیابی قابلیت خودسوزی زغالسنگ باشد؛ لذا با توجه به تمامی مطالب مذکور، ضرورت ارائه یک روش جدید برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغالسنگ به خوبی مشخص می‌شود.

۱-۴- اهداف تحقیق

در طی این تحقیق سعی شده است تا با بررسی منابع علمی معتبر و تحقیقات انجام شده‌ی پیشین به بررسی مسأله مورد تحقیق پرداخته شود، طبقه‌بندی‌ها و روش‌های ارائه شده‌ی پیشین به

دقّت مشخص شوند، کلیه‌ی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال تعیین و بـه بررسـی آن‌هـا پرداختـه شود و میزان اهمیت آن‌ها از طریق روش‌های تصمیم گیری چند معیاره و سیستم‌های مهندسی سنگ مورد ارزیابی قرار گیرند و در نهایت یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیـابی خطـر خودسـوزی معادن زغالسنگ ارائه شود و به منظور اعتباربخشی روش ارائه شده از داده‌های معادن زغالسنگ البـرز شرقی استفاده خواهد شد.

۱-۵- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر مشتمل بر ۶ فصل می‌باشد، که در شرح زیر توضیح داده می‌شود:

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

در فصل دوم این تحقیق مکانیزم خودسوزی زغال و تـأثیرات آن بـر مسـائل زیسـت محیطـی، اقتصادی و اجتماعی آورده شده است.

فصل سوم بـا عنـوان بررسـی سـابقه‌ی علمـی موضـوع مطـرح شـده اسـت، کـه پـس از بیـان تاریخچه‌ای مختصر از کارهای صورت گرفته در این زمینه، برخی از مهم‌تـرین روش‌هـای پـیش‌بینـی پتانسیل خودسوزی در معادن زغالسنگ آورده شده است.

در فصل چهارم تأثیر پارامترهای مختلف بر خودسوزی مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایـن منظور با استفاده از منابع علمی معتبر بین‌المللی و با مرور کارهای تحقیقاتی گذشته، کلیه این عوامل به طور مناسبی شناسایی، طبقه‌بندی و تشریح شده‌اند.

در فصل پنجم، کلیّات روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی و سیستم‌های مهندسی سنگ به طور اجمالی مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی و نظرسنجی‌های انجام گرفتـه شـده از متخصصـان در زمینـه صـنعت زغالسـنگ و روش سیسـتم‌هـای مهندسی سنگ، سیستم طبقه‌بندی جدیدی برای پیش‌بینی قابلیت خودسوزی زغالسـنگ ارائـه شـده است. برای این منظور، نتایج نظرات متخصصان مختلف در مورد اهمیّت هر یک از پارامترهای مؤثر بر

قابلیت خودسوزی زغالسنگ منعکس شده و کلیّه محاسبات ریاضی مربوطه بر روی نتایج نظرسنجی، صورت گرفته است. در پایان این فصل وزن هر یک از پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی آورده شده و ساختار کلی طبقه‌بندی و کلاس‌بندی زغال‌ها بر اساس روش پیشنهادی ارائه شده است؛ و در پایان به منظور اعتبارسنجی روش ارائه شده، تعدادی مطالعه موردی بر روی لای‌ه‌های ۳ منطقه معدنی از معادن شرکت زغالسنگ البرز شرقی شامل مناطق معدنی پشکلات، کلاری‌ز و رزمجا انجام شده است. برای این منظور کلیه‌ی لایه‌های زغالی مورد مطالعه با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید، امتیازدهی و طبقه‌بندی شده‌اند و با واقعیت مقایسه شده‌اند.

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

فصل ۲: مکانیزم خودسوزی زغالسنگ

۲-۱- مقدمه

مواد معدنی ستون فقرات رشد اقتصادی هر کشوری را تشکیل می‌دهند و زغالسنگ یکی از مواد معدنی است که به راحتی و در مقدار زیاد در دسترس می‌باشد و به عنوان منبع اصلی انرژی در بسیاری از نقاط جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. کل ذخایر قابل استحصال زغالسنگ در سراسر جهان در حدود ۱۰۸۳ میلیارد تن تخمین زده شده است، که با سطح مصرف فعلی تا ۲۱۰ سال دیگر به پایان می‌رسد (Gangopadhyay, 2008).

اگر چه ذخایر زغالسنگ به طور گسترده‌ای در سراسر جهان توزیع شده است، اما ۶۰٪ از ذخایر قابل استخراج در ۳ کشور قرار گرفته است: ایالات متحده آمریکا (۲۵٪)، اتحاد جماهیر شوروی سابق (۲۳٪) و چین (۱۲٪). استرالیا، هند، آلمان و آفریقای جنوبی در مجموع ۲۹٪ از ذخایر قابل استخراج زغالسنگ را در خود جای داده‌اند (Gangopadhyay, 2008).

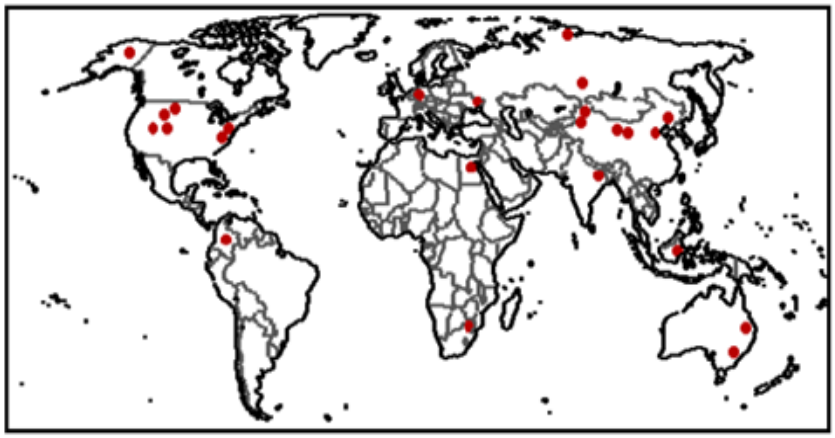
معدنکاری در جهان به ۲ روش سطحی و زیرزمینی صورت می‌گیرد. از جمله ویژگی‌های معادن زیرزمینی، علاوه بر وجود پیچیدگی در طراحی و بالا بودن هزینه‌ها، حادثه‌خیزی این معادن است. معادن زیرزمینی زغالسنگ بیشترین سهم را در بدنام کردن این روش معدنکاری از منظر ایمنی دارند، به گونه‌ای که تونل‌های این معادن را می‌توان به تونل‌های وحشت برای افراد حاضر در آن تشبیه کرد.

آتش‌سوزی، از جمله حوادث عمده در تمام معادن زغالسنگ اعم از روباز و زیرزمینی است، که یکی از مسائل جدی در کشورهای تولیدکننده زغالسنگ محسوب می‌شود. سوختن زغال می‌تواند در

لایه‌های زغال (در معادن زیرزمینی و روباز)، در حین صادرات و نقل و انتقالات آن، در محل انباشت‌گاه‌های زغال یا در محل انباشت‌گاه‌های باطله آن در سطح زمین اتفاق بیفتد. آتش‌سوزی در لایه‌های زغال می‌تواند به طور خودبه‌خود تحت شرایط معینی رخ دهد. در پاره‌ای دیگر از آتش‌سوزی‌ها، جرقه و سهل انگاری پرسنل باعث ایجاد آتش‌سوزی می‌شود (Sinha, 1986).

اما آتش‌سوزی‌های معادن زیرزمینی، به مراتب جدی‌تر و خطرناک‌تر از آتش سوزی‌های سطحی هستند زیرا گرما و محصولات ناشی از احتراق، در محل محصوری جمع می‌شوند و بنابراین به مخاطره افتادن جان افرادی که در چنین محیط‌های محدودی کار می‌کنند، افزایش می‌یابد و از سوی دیگر، خطر انفجار نیز وجود دارد (مدنی، ۱۳۷۳).

همان‌طور که در شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود آتش‌سوزی‌های زغالی در بسیاری از کشورهای تولیدکننده زغال، مانند چین، هند، اندونزی، ایالات متحده آمریکا، استرالیا، آفریقای جنوبی و روسیه رایج است.



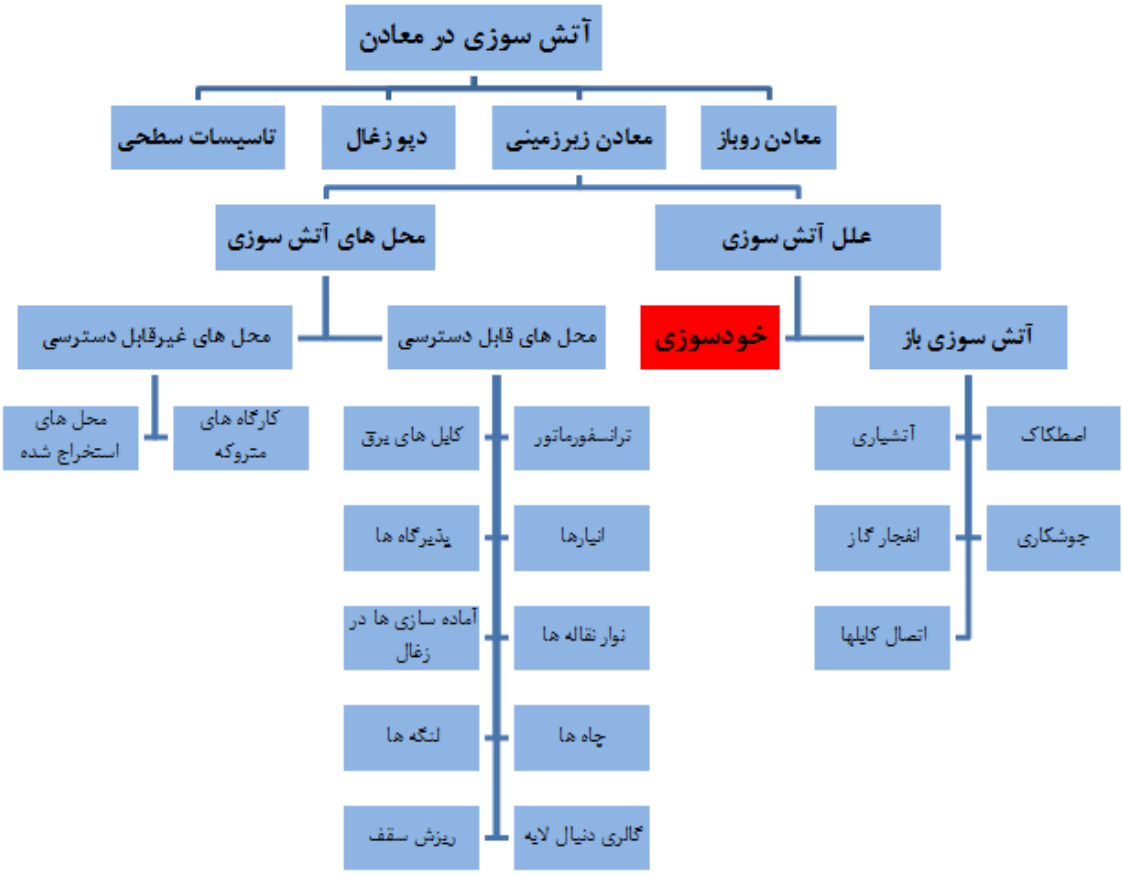
شکل ۲-۱: آتش‌سوزی‌های زغالی در کشورهای تولیدکننده زغالسنگ (Gervet, 2007)

۲-۲- انواع آتش‌سوزی در معادن

به طور کلی حریق‌های ایجاد شده در معادن زیرزمینی بر حسب منشأ به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند که در شکل ۲-۲ نمای کلی از انواع آتش‌سوزی آورده شده است:

الف- آتش سوزی باز یا آتش سوزی با منابع خارجی

ب- آتش سوزی داخلی یا خودسوزی (اکسیداسیون- گرمایش خودبه‌خودی)



شکل ۲-۲: انواع آتش‌سوزی در معادن

۲-۲-۱- آتش‌سوزی باز

آتش‌سوزی باز عبارت است از سوختن اشیا و لوازم مختلف موجود در معدن از طریق منابع خارجی، این نوع حریق در معادن عمدتاً ممکن است بر اثر یکی از عوامل زیر رخ دهد:

۱- ایجاد جرقه‌های الکتریکی در اثر وضعیت نادرست تجهیزات برقی و عایق‌کاری نادرست

۲- اتصال کوتاه در داخل کابل‌های حامل برق و یا ریزش سنگ روی کابل

۳- رسیدن شعله چراغ‌های معدنی به مواد سوزا

۴- استفاده از مواد منفجره غیر مجاز

۵- جوشکاری و تخلیه الکتریسیته ساکن

۶- انفجار گرد زغال و یا گاز متان

۷- مالش، اصطکاک و داغ شدن سطوح متحرک مانند نوار نقاله و سیم بکسل با قرقره‌ها

۲-۲-۲- آتش سوزی داخلی یا خودسوزی

خودسوزی مواد معدنی، یکی از دلایل عمده آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغالسنگ است. در بعضی شرایط، تقریباً هر نوع زغالسنگی در اثر خودسوزی، آتش می‌گیرد. اثرات خودسوزی ماده معدنی از افزایش مختصر مونوکسید کربن موجود در هوا، تا حریق بزرگ که ممکن است کل معدن را در برگیرد تغییر می‌کند. به منظور متمایز شدن خودسوزی از آتش‌سوزی، وقوع آن را با عنوان «گرمایش» یا «احتراق خودبه‌خودی» بیان می‌کنند (مدنی، ۱۳۷۳).

خودسوزی زغال که اصطلاحاً به آن "Self-heating" یا "Spontaneous Combustion" می‌گویند به معنای گرمایش زغال و شروع یک واکنش شیمیایی گرمازا و به دنبال آن افزایش دما و در نتیجه ایجاد یک آتش‌سوزی خودبه‌خودی بدون استفاده از منابع گرمایی خارجی اضافی است که در رابطه با مکانیزم خودسوزی در بخش ۲-۳ توضیح جامع و کاملی آورده شده است.

۲-۳- مکانیزم احتراق خودبه‌خودی یا خودسوزی زغالسنگ

Coal Self-heating، Coal Self-ignition یا Coal Spontaneous Combustion مهم‌ترین علّت آتش‌سوزی و یکی از خطرات اجتناب ناپذیر در معادن زغالی و در صنایع وابسته به زغالسنگ در سراسر جهان است. خودسوزی زغالسنگ در معادن زیرزمینی، معادن روباز، معادن قدیمی و متروکه، محل انباشت و ذخیره سازی زغال (در معادن، نیروگاه‌ها و بنادر ساحلی)، در هنگام حمل و نقل‌ها مخصوصاً حمل و نقل‌های دریایی و در مکان‌های دفع باطله‌های حاصل از معدنکاری و صنایع مرتبط می‌تواند به وجود آید (Gangopadhyay, 2008; Mohalik et al., 2009- b).

نتایج حاصل از خودسوزی زغالسنگ بسیار جدی و دارای تأثیرات منفی از قبیل: اثرات ناخواسته اقتصادی، پیامدهای نامطلوب زیست محیطی و مشکلات ناخواسته در زمینه سلامتی است.

اگر یک لایه زغالی دچار آتش‌سوزی شود و اقدامات پیشگیرانه در مراحل اولیه با شکست مواجه شوند، سوختن لایه بسته به حجم ذخیره و میزان اکسیژن موجود ممکن است که ده‌ها یا حتی صدها سال به طول انجامد. که برای پیشگیری از این نتایج باید درک درستی از مجموعه مراحل منجر به گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی زغالسنگ و مجموعه عوامل شتاب دهنده در این زمینه داشته باشیم تا مخاطرات این اتفاق توسط کنترل مجموعه فرآیندها و عوامل تأثیرگذار در خودسوزی زغال کاهش و به حداقل مقدار ممکن برسد (Nelson & Chen, 2007; Mohalik et al., 2009- b)؛ لذا در ادامه به تشریح مکانیزم خودسوزی خواهیم پرداخت.

هر آتش سوزی نیاز به ۳ عنصر اصلی دارد تا به وقوع بپیوندد که اصطلاحاً به «مثلث آتش[1]» معروف است. ۳ عنصر تشکیل‌دهنده مثلث آتش عبارتند از: اکسیژن، گرما (جرقه) و سوخت (ماده سوختنی) که مثلث آتش در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

شکل ۲-۳: مثلث آتش (Huw et al., 2003)

در پدیده خودسوزی زغال نیز به همین ۳ عنصر نیاز است، که **اکسیژن** از هوای تهویه تأمین می‌شود، **گرما** از طریق جذب اکسیژن به زغال و افزایش دمای زغال تأمین می‌شود و **سوخت** مورد نظر زغالسنگ است.

فرآیند اکسیداسیون زغال یک فرآیند پیچیده است که مجموعه مراحل تشکیل آن هنوز به طور

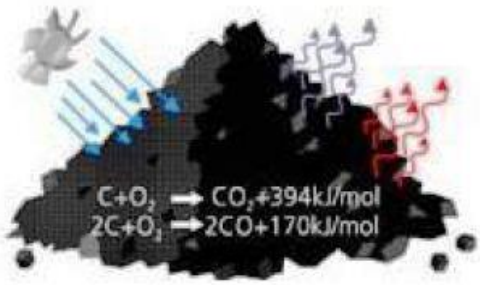
[1] - Fire Triangle

کامل شناسایی نشده است. اما تحقیقات بسیاری برای درک مکانیزم پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ انجام شده است که از بهترین این توصیفات می‌توان به ارائه مکانیزم خودسوزی توسط Grewer در سال ۱۹۹۴ میلادی اشاره کرد که در ادامه آورده شده است.

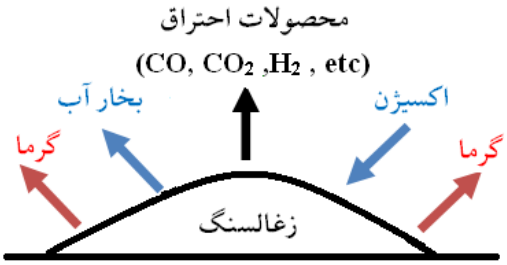
احتراق یا گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ یک فرآیند خود گرمایشی، گرمازا است که بر اثر اکسیداسیون زغالسنگ بدون هیچ‌گونه منبع حرارتی خارجی اتفاق می‌افتد و باعث افزایش دمای مواد زغالی می‌شود. این فرآیند در نهایت باعث ایجاد شعله و سوختن زغالسنگ می‌شود (Grewer, 1994).

معمولاً خودسوزی زغالسنگ زمانی اتفاق می‌افتد که تعادل گرمایی بین ۲ اثر متقابل از بین برود. منظور از تعادل گرمایی، آزادسازی گرمای ناشی از واکنش‌های اکسایشی و دور شدن و از بین رفتن گرما و حرارت تولیدی با استفاده از جریان تهویه، جابجایی‌های همرفتی و یا انتقال‌های گرمایی به محیط پیرامون است. زمانی تعادل گرمایی از بین می‌رود که نرخ تولید گرما بیشتر از هدر رفت آن باشد، در این حالت دما افزایش یافته و واکنش اکسایشی شتاب بیشتری به خود می‌گیرد (Grewer, 1994).

تقریباً تمام انواع زغالسنگ‌ها در تماس با اکسیژن موجود در هوا اکسید شده و نشانه‌هایی از هوازدگی را از خود نشان می‌دهند که نتیجه آن کاهش ارزش حرارتی زغالسنگ و آزادسازی میزان قابل توجهی گاز و گرما است که در شکل ۲-۴ و شکل ۲-۵ و معادلات شیمیایی (۲-۱) تا (۲-۳) مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۴: چگونگی شکل‌گیری پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ (Grewer, 1994)



شکل ۲-۵: چگونگی شکل‌گیری پدیده گرمایش خود به خودی زغالسنگ (Grewer, 1994)

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 394\,Kj/mol \quad (۱-۲)$$

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO + 170\,Kj/mol \quad (۲-۲)$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 241\,Kj/mol \quad (۳-۲)$$

یا به طور کلی این مجموع مراحل را می‌توان به صورت معادله (۲-۴) نشان داد.

$$C_{100}H_{74}O_{11} + 113O_2 \rightarrow 100CO_2 + 37H_2O + 4.2 * 10^8\,{}^{J}/_{Kmol}\,O_2 \quad (۴-۲)$$

از معادلات شیمیایی فوق نتیجه می‌شود که فرآیند اکسیداسیون زغالسنگ نیز مانند سایر اکسیداسیون‌ها یک فرآیند گرمازا است (Grewer, 1994).

معمولاً ۳ نوع فرآیند در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال اتفاق می‌افتد که عبارتند از (Grewer, 1994; Mohalik et al, 2009- b; Yuan and Smith, 2012):

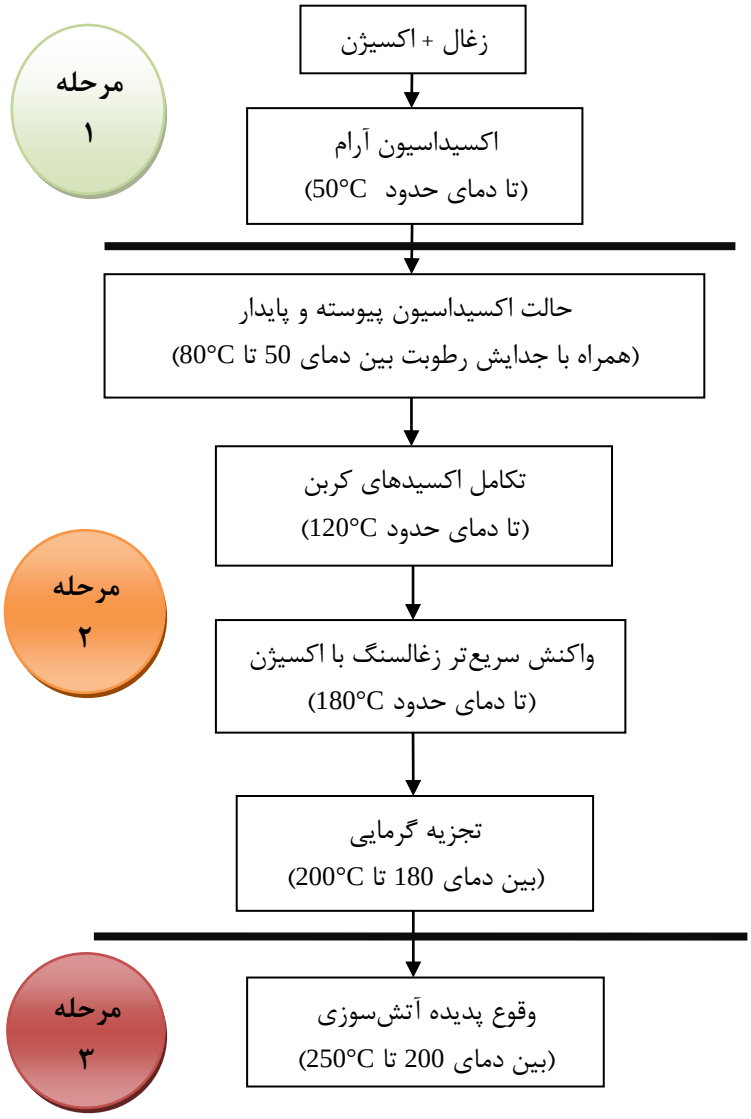
۱) جذب سطحی یا فیزیکی یا برآشامی[1] اکسیژن.

۲) جذب شیمیایی یا درآشامی[2] اکسیژن که باعث تشکیل ترکیب‌های زغال و اکسیژن می‌شود.

۳) واکنش شیمیایی[3] و اکسیداسیون زغال که باعث تجزیه ترکیب‌های زغال و اکسیژن تشکیل یافته از مرحله قبل می‌شود و نتیجه آن آزادسازی و تولید گازهایی از قبیل مونوکسید کربن (CO)، دی اکسید کربن (CO_2)، بخار آب (H_2O) و غیره می‌شود.

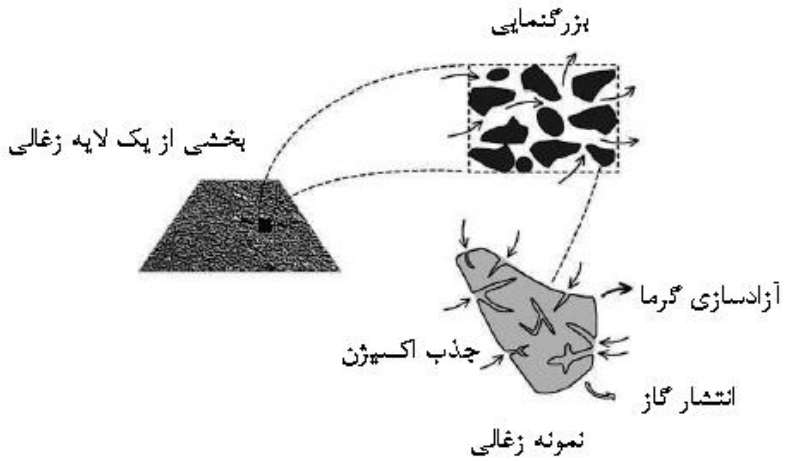
می‌توان مراحل مختلف اکسیداسیون و گرمایش زغالسنگ را به صورت خلاصه شده شکل ۲-۶، مشاهده کرد (Grewer, 1994).

[1] - Adsorption
[2] - Absorption
[3] - Chemical Reaction



شکل ۲-۶: مراحل مختلف اکسیداسیون و گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ (Grewer, 1994)

در شکل ۲-۷ نمایی از فرآیندهای اکسیداسیون زغالسنگ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: فرآیند اکسیداسیون زغال (Wang et al., 2003)

مجموعه ۳ مرحله بالا در معادله (۲-۵) که توسط Xuyao و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی بیان شده است، آورده شده است.

$$\mathrm{Coal} + \mathrm{O_2} \rightleftarrows \mathrm{O_2}_{\text{جذب فیزیکی}} \rightarrow \mathrm{O_2}_{\text{جذب شیمیایی}} \rightarrow \mathrm{CO_2} + \mathrm{CO} + \mathrm{H_2O} + \cdots \qquad (۲-۵)$$

در اولین فرآیند، طبیعت واکنش بین زغال و اکسیژن در دماهای بسیار کم، فیزیکی است به این صورت که اکسیژن به صورت سطحی یا برآشامی (Adsorption) جذب زغال می‌شود. مقدار جذب اکسیژن به صورت فیزیکی با افزایش دمای آهسته، کم است و می‌توان گفت تقریباً تا دمای 50°C ناچیز است (Grewer, 1994).

در دومین فرآیند که جذب شیمیایی صورت می‌گیرد، پس از اینکه زغال در معرض هوا قرار گرفت و اکسیژن در سطح آن جای گرفت به علّت وجود شکستگی و ترک‌های موجود در سطح زغال، اکسیژن جذب درونی زغال می‌شود که اصطلاحاً به آن درآشامی (Absorption) می‌گویند و باعث می‌شود تا نرخ اکسیداسیون شتاب بیشتری به خود بگیرد (Grewer, 1994).

در دمای زیر 80°C ترکیبات پایداری از زغال و اکسیژن شکل می‌گیرند که نتیجه آن هوازدگی زغال توسط اکسیژن است که با معادله (۲-۶) نشان داده می‌شود (Grewer, 1994).

$$\mathrm{Coal} + \mathrm{Oxygen} \rightarrow \mathrm{Coal, Oxygen\ Complex} + \mathrm{Heat} \qquad (۲-۶)$$

از دمای پایین‌تر از دمای شکل‌گیری ترکیبات زغال و اکسیژن، پدیده گرمایش خودبه‌خودی شکل گرفته است و دمای زغال با یک نرخ افزایشی زیاد می‌شود، این گرما وابسته به میزان اکسیژن موجود و همچنین حفظ و نگهداری و عدم پراکندگی گرمای به وجود آمده از واکنش است (Grewer, 1994).

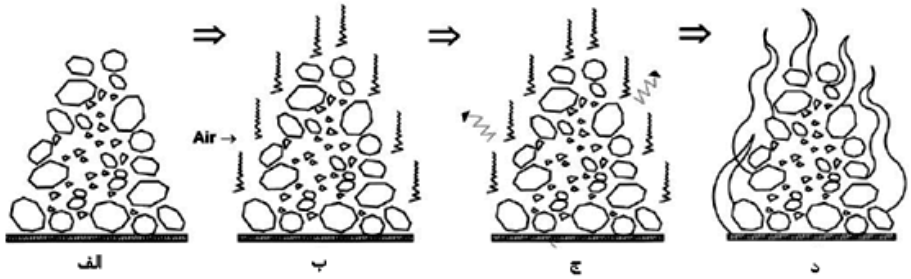
در دمای بالاتر از 80°C و در طی افزایش دمای ناشی از فرآیند شیمیایی زغال، ترکیبات زغال و اکسیژن باعث تولید مقادیر زیادی گرما و گازهایی از قبیل CO، CO_2، H_2 و بخار آب مطابق با معادله (۲-۷) می‌شوند که به این دما، «دمای آستانه» یا "Threshold Temperature " گفته می‌شود. محدوده این دما بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است (Grewer, 1994; Gangopadhyay, 2008).

$$\text{Coal, Oxygen Complex} \rightarrow CO + CO_2 + H_2O + \text{Heat} \quad (۷-۲)$$

نکته قابل توجه در این است که در طی پیشرفت این مراحل و مطابق با معادله شیمیایی (۲-۳) و (۲-۷)، واکنش درگیر اکسیداسیون هیدروژن زغال برای تشکیل آب است که یک فرآیند گرمازا است. این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل برای زغال‌های با درجه پایین زغال‌شدگی است زیرا این نوع از زغال‌ها دارای محتویات هیدروژنی ذاتی زیادی هستند (Grewer, 1994; Gangopadhyay, 2008).

اگر گرما ایجاد شده پراکنده شود، دمای زغال افزایش نمی‌یابد اما در غیر این صورت دمای زغال افزایش یافته و باعث می‌شود تا اکسایش سریع‌تر رخ دهد. در شروع دمای ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رطوبت زغال از زغال جدا می‌شود که این فرآیند با افزایش دما ادامه پیدا می‌کند تا اینکه ترکیب اکسیژن و زغال به یک حالت پایدار با دمای بحرانی یا دمای خود گرمایشی SHT یا Self-Heating Temperature می‌رسد که این دما پایین‌ترین درجه حرارتی است که نوعی واکنش پایدار گرمازا و افزایش غیر قابل کنترل دمایی را باعث می‌شود. محدوده این دما بین ۵۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و وابسته به نوع زغال است که شروع فرآیند مرحله سوم و به عبارتی شروع آتش‌سوزی زغال است (Grewer, 1994) به عبارت دیگر زغال به حالت اشتعال با شعله (Ignition) یا نقطه درخشش (Flash Point) رسیده است و آتش سوزی اصلی در این مرحله شروع می‌شود (Gangopadhyay, 2008). دمای آتش‌سوزی زغال‌های بیتومینه در حدود 200°C و زغال‌های آنتراسیت در حدود 398°C است (Grewer, 1994).

در شکل ۲-۸ مراحل تکاملی از یک خودسوزی زغالی مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۸: مراحل تکاملی یک آتش خودبه‌خودی زغال - الف) نمونه زغال ب) ترکیب زغال با اکسیژن موجود در هوا ج) از دست دادن گرما و انتقال آن به محیط اطراف د) تجمع گرما و شروع خودسوزی زغال (Sipila et al., 2012)

مجموعه فرآیند خودسوزی زغال را می‌توان به طور خلاصه بر اساس ۷ مرحله زیر بیان کرد (Grewer, 1994):

۱- جذب اکسیژن توسط زغال و تشکیل ترکیب اکسیژن بعلاوه زغال و ایجاد فرآیند اکسیداسیون بدون تشکیل کربن مونوکسید، که این مرحله از فرآیند برگشت پذیر[1] است.

۲- شروع فرآیند اکسیداسیون و تولید گرما.

۳- همچنان که دما تا حدود ۴۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد گازهای مونواکسید کربن[2] و دی اکسید کربن[3] تولید می‌شوند.

۴- با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون افزایش یافته و مقدار تولید گازهای مونواکسید کربن، دی اکسید کربن و سایر گازها افزایش می‌یابد.

۵- اگر گرمای تولید شده از فرآیند اکسایش زغالسنگ توسط سنگ‌های اطراف جذب شود و یا توسط هوای تهویه پراکنده شود، دمای زغال افزایش نمی‌یابد و اکسایش با دمای کم صورت می‌گیرد که به این پدیده اصطلاحاً «اکسیداسیون با دمای پایین» گفته می‌شود. در چنین شرایطی حتی اگر زغال به نقطه اشتعال هم نرسد اما تحت تأثیر هوازدگی قرار گرفته است و زغال‌های هوازده دارای میزان انرژی حرارتی ضعیفی هستند.

۶- اگر گرمای تولید شده توسط اکسیداسیون پراکنده نشود و از محیط اکسیداسیون خارج نشود، این گرما توسط ظرفیت گرمایی زغال جذب شده و دمای زغال افزایش می‌یابد و باعث می‌شود تا اکسایش سریع‌تر اتفاق بیفتد و با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون به صورت نمایی افزایش می‌یابد به طوری که به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما، سرعت اکسیداسیون تقریباً ۲ برابر می‌شود.

۷- سرانجام پس از واکنش اکسیژن با زغال، دمای زغالسنگ افزایش می‌یابد و بعد از گذشت مدّت زمان معین و در یک دمای بحرانی، زغال به مرحله اشتعال می‌رسد و خودسوزی زغال صورت

[1] - Reversible
[2] - CO_2
[3] - CO

می‌گیرد.

این ساز و کار تعریف شده مکانیزمی ساده و اولیه برای خودسوزی زغالسنگ است؛ اما پارامترهای متعدّدی نیز در پدیده خودسوزی زغالسنگ دارای تأثیرات مثبت و منفی هستند که در فصل چهارم به بررسی تأثیر این پارامترها خواهیم پرداخت.

۲-۴- تأثیرات خودسوزی زغال بر مسایل زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی

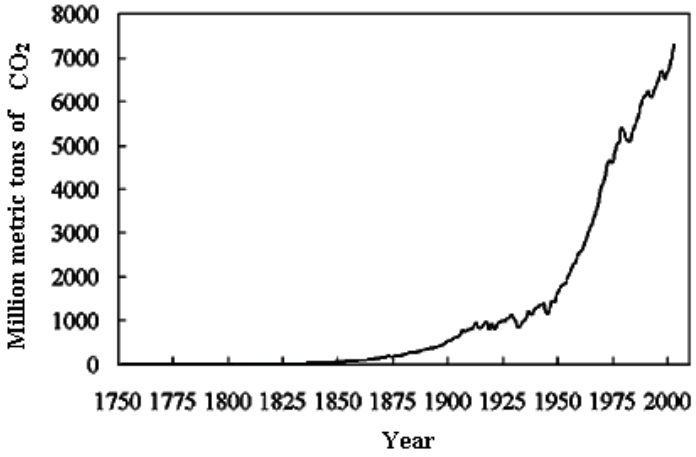
احتراق خودبه‌خودی زغال به طور مستقیم و غیرمستقیم بر مسایل زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی تأثیرگذار است که به بعضی از این موارد در زیر اشاره شده است (Ham, 2005):

- مرگ پرسنل که یکی از اصلی‌ترین فجایع ناشی از خودسوزی زغالسنگ است و اختلالات روانی در بازماندگان فاجعه.
- آلودگی فوری محیط زیست توسط انتشار گازهای سمّی، قابل اشتعال و قابل انفجار؛ مانند دی اکسید کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای سولفور (SO_x)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، هیدروژن سولفید (H_2S)، متان (CH_4)، هیدروژن (H_2) و سایر گازها که مقادیر آن‌ها کم، ولی از طریق احتراق خودبه‌خودی زغالسنگ ایجاد می‌شوند که عبارتند از: اتان (C_2H_6)، اتیلن (C_2H_4)، استیلن (C_2H_2) و سایر هیدروکربن‌های دیگر که مقادیر آن‌ها بسیار کم است. در بین این گازهای سمّی CO_2 و CH_4 در گرم شدن کره زمین شرکت می‌کنند.

محقّقین بسیاری افزایش غلظت گاز CO_2 در اتمسفر را از زمان انقلاب صنعتی به بعد تأیید کرده‌اند به نحوی که غلظت این گاز در اتمسفر جهانی در مرحله هشدار قرار دارد. شکل ۲-۹ نشان‌دهنده میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ میلادی به بعد است (Gangopadhyay, 2008).

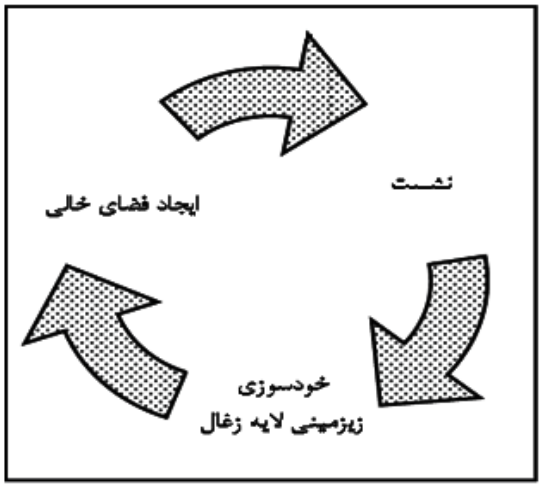
سایر محقّقان نیز تأیید کرده‌اند که غلظت گاز CO_2 تا میزان 375ppm افزایش داشته است. از

سال ۱۷۵۰ میلادی تا سال ۲۰۰۰ میلادی غلظت گاز متان (CH_4)، در اتمسفر تا حدود ۱۵۰٪ (1060ppb) و غلظت گاز NO_2 تا حدود ۱۶٪ (46ppb) افزایش یافته است (Gangopadhyay, 2008).



شکل ۲-۹: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ میلادی تا سال ۲۰۰۰ (Gangopadhyay, 2008)

- نشست سطح زمین و ایجاد گودال‌های بزرگ، یکی دیگر از رخدادهای رایج در نواحی‌ای است که تحت تأثیر آتش‌سوزی زیرسطحی زغال قرار گرفته‌اند و باعث تخریب ساختمان‌ها و زیرساخت‌های سطحی مانند شبکه‌های ارتباطی، خانه‌ها، خطوط راه آهن، جاده‌ها و تأسیسات سطحی موجود در معدن می‌شود. در شکل ۲-۱۰ رابطه بین خودسوزی زیرزمینی زغال و نشست سطح زمین نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰: چرخه خودسوزی زیرزمینی لایه زغال بر نشست (Gangopadhyay, 2008)

- انتشار گرما از طریق آتش‌سوزی‌های زغالی باعث افزایش دمای محلی می‌شود.
- آتش‌سوزی‌های زغالی باعث افزایش هزینه‌های تولید به دلیل ایجاد مشکل در بهره‌برداری و استخراج معدن، بسته شدن معدن، از دست دادن تجهیزات و حتی از دست دادن تولید می‌شود.
- آتش‌سوزی زغالی باعث هدر رفتن میلیون‌ها تن از ذخایر زغالسنگ که جزء منابع انـرژی بـا ارزش است می‌شود.
- آلودگی خاک و انقراض پوشش گیاهی و جانوری
- باران اسیدی
- کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در شکل ۲-۱۱ و شکل ۲-۱۲ نمونه‌هایی از تأثیرات زیست محیطی خودسوزی زغالسنگ نشان داده شده است.

(الف)

(ب)

(ج)

(د)

شکل ۲-۱۱: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست محیطی خودسوزی زغالسنگ در جهان: الف- نشست سطح زمین بر اثر خودسوزی زغال در زیر سطح زمین در آمریکا (Gervet, 2007). ب- نشست سطح زمین در اثر خودسوزی زغال در منطقه معدنی Wuda در چین (Dijk et al., 2011). ج- نمونه ای از خودسوزی زغال در کوه‌های ایالت کلرادو از ایالت‌های جنوب غربی آمریکا (Gervet, 2007). د- انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر خودسوزی زغال در منطقه معدنی Wuda در چین (Dijk et al., 2011).

(الف)

(ب)

(ج)

(د)

شکل ۲-۱۲: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست محیطی خودسوزی زغالسنگ در جهان: الف و ب- خودسوزی زغال در معادن زیرزمینی منطقه Wuda در کشور چین. ج- خودسوزی زغال در یک دپو در ناحیه معدنی Witbank در آفریقای جنوبی. د- نشست جاده Centralia در ایالت Pennsylvania در آمریکا در اثر خودسوزی زغال در زیر سطح زمین (Kuenzer and Stracher, 2012)

۲-۵- نتیجه گیری

همان‌طور که از مجموعه مطالب این فصل می‌توان نتیجه گرفت، خودسوزی زغالسنگ یکی از دلایل ایجاد آتش‌سوزی در معادن زغالی محسوب می‌شود که دارای تأثیرات زیان آور اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی است.

از طرف دیگر پدیده خودسوزی زغالسنگ یک فرآیند پیچیده است که پارامترهای مختلفی نیز در آن تأثیرگذار است لذا در این فصل به بررسی پدیده خودسوزی زغالسنگ پرداخته شد و در فصل چهارم با بررسی منابع مختلف علمی موجود به بررسی نقش و تأثیر پارامترهای مؤثر در این پدیده پرداخته خواهد شد تا دید جامعی از این پدیده بدست آید.

فصل ۳: بررسی سابقه علمی موضوع

۳-۱- مقدمه

سیر تحوّل علم در تاریخ نشان می‌دهد که پژوهش‌های اجتماعی بر خرد جمعی، استوار هستند. هر پژوهش ضمن آن که مبتنی بر پژوهش‌های قبلی است، مقدمه و پایه‌ای نیز برای پژوهش‌های بعدی است. هرچه تعداد ارتباط‌ها و پیوندهای ممکن یک پژوهش با پژوهش‌های پیشین و نظریه‌های موجود بیشتر باشد، اهمیت و سهم آن پژوهش در گسترش دانش آدمی بیشتر خواهد بود. معمولاً در پژوهش‌های علمی می‌توان موضوع پژوهش را در سطحی تعریف کرد که نتیجه‌های آن تعمیم‌پذیر باشد، برای این کار باید از همان زمان انتخاب موضوع و مسأله پژوهش، توجه پژوهشگر در اندیشه تعمیم‌پذیری آن باشد. برای این منظور باید تلاش‌هایی را که قبلاً درباره موضوع پژوهش انجام گرفته است بررسی کرد و پژوهش جدید را با پژوهش‌های پیشین ارتباط داد. این امر را می‌توان با شیوه بررسی نظریه‌ها و پیشینه‌های عملی مربوط به موضوع امکان‌پذیر کرد، این نکته از آن رو مهم است که از پیشرفت‌های تازه نظری (نظریه‌های جدید) و پژوهش‌هایی که در این زمینه به عمل آمده آگاه شویم، زیرا بررسی‌های علمی- عملی بخش مهم و لازم فرآیند پژوهشی علمی را تشکیل می‌دهد (خاکی، ۱۳۹۰).

۳-۲- بررسی سابقه‌ی علمی موضوع

بررسی و توجه به اهمیّت خودسوزی زغالسنگ از لحاظ چگونگی پیدایش، پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل آن در معدنکاری زیرزمینی و روباز به علّت مسائل ایمنی و اقتصادی ناشی از آن

در دهه‌های اخیر توجه ویژه محقّقان مختلف از کشورهای استرالیا، هند، چین، آفریقای جنوبی، ترکیه، نیجریه، اندونزی و غیره را به خود اختصاص داده است.

سابقه‌ی علمی موضوع مورد تحقیق در معادن زغالسنگ به سال ۱۹۱۰ میلادی برمی‌گردد و از آن زمان تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است که با توجه به اقتضای تحقیق حاضر و دسترسی کم منابع معتبر علمی برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده پیشین به دقت 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 (سال انتشار)	توضیح مختصر
Bhattacharya (1971)	ارزیابی نرخ گرمای خروجی از زغال‌های مختلف با استفاده از دستگاه گرماسنج[1] در طی جذب بخار آب در شرایط ایزوترمال[2] (هم دما). که نتیجه آن نشان داد نرخ آزادسازی گرمای ناشی از جذب بخار آب وابسته به نوع زغال، اندازه‌ی ذرات و هوازدگی نمونه‌ها است.
Banerjee et al. (1972)	تعیین دماهای نقطه تقاطعی (CPT[3]) نمونه‌های زغال. در این بررسی مشاهده شد زغال‌های با دماهای نقطه تقاطعی بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد جز زغال‌هایی با استعداد بالای خودسوزی به حساب می‌آیند و در دمای بالاتر از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تمایل به خودسوزی بسیار ضعیف‌تر است. در بین دماهای ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز استعداد خودسوزی حالت بینابینی دارد.
Nandy et al. (1972)	بررسی تغییرات دمای نقطه تقاطعی با رطوبت محتوی[4]، درصد مواد فرار[5] و درصد اکسیژن موجود در زغال. مشخص شد با افزایش هر یک از این اجزا، استعداد خودسوزی بیشتر است.
Kuchta et al. (1980)	بررسی تأثیر نوع زغال در تمایل به خطر خودسوزی زغال.
Banerjee (1982)	ارائه یک سیستم کیفی برای تعیین خطر خودسوزی زغال در هندوستان با استفاده از ۲۲ پارامتر وابسته به شرایط معدنکاری.

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

Banerjee (1985)	به بررسی تأثیر میزان رطوبت، اندازه ذرات زغال، عمق قرارگیری لایه، ضخامت، وجود دایک، نوع روش استخراج، سرعت پیشروی، نوع سیستم تهویه و غیره در خودسوزی پرداخته شد. در این مطالعه به بررسی شاخص‌های رایج مورد استفاده در زمینه آتش‌سوزی از قبیل نسبت‌های $\frac{CO}{O_2}$ (%)، $\frac{CO}{CO_2}$ (%) و نسبت $\frac{C}{H}$ تولیدی از احتراق و نیز شرایط قابل اجرا و کاربردی

[1] - Calorimeter
[2] - Isothermal
[3] - Crossing Point Temperature
[4] - Moisture Content
[5] - Volatile Matter

	آن‌ها برای تعیین اندازه و شدت آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی پرداخته شد. نتیجه کار این بود که شروع یک آتش‌سوزی فعال با مقادیر نسبتی فوق که به قرار زیر است شروع می‌شود: نسبت $\frac{C}{H}$ بزرگ‌تر از ۳ یا ۴ نسبت $\frac{CO}{O_2}$ بزرگ‌تر از ۰/۵ نسبت $\frac{CO}{CO_2}$ بزرگ‌تر از ۲
Ghosh (1986)	در این تحقیق نشان داده شد چنانچه پیریت[1] در زغال وجود داشته باشد تمایل زغال برای خودسوزی افزایش می‌یابد؛ و نیز بر تأثیر تزریق نیتروژن برای جلوگیری از خودسوزی زغال تأکید شد.
Riley et al. (1987)	با جمع‌آوری اطلاعات نمونه‌های زغالی مشخص شد که خواص ذاتی زغال مانند نوع زغال، رطوبت، تخلخل، سطح تأثیر، خاکستر محتوی، پیریت محتوی، سختی، متان محتوی و ضریب هدایت گرمایی زغال همگی در خودسوزی زغال مؤثرند.
De faveri et al. (1989)	با انجام مطالعات نظری و آزمایشگاهی در خصوص انتشار گرمای داخل توده‌های زغالی به بررسی مکانیزم اکسایش خودبه‌خودی زغال در دماهای پایین پرداخته شد.
Chandra et al. (1990)	ارتباط بین زغال‌شدگی[2] و خودسوزی زغال بررسی شد و نتیجه گیری شد که با افزایش درجه زغال‌شدگی، استعداد خودسوزی زغال به تدریج کاهش می‌یابد. از طریق مطالعات بازتابی انجام شده نتیجه شد که مقدار ویترینیت[3] و اگزینیت[4] محتوی لایه‌های زغال در استعداد زغال به خودسوزی مؤثرند.
Mitchell (1990)	بررسی تأثیر استخراج چند لایه‌ای زغال در خطر خودسوزی.
Carras & Young (1994)	به بررسی وضعیت خود گرمایشی انباشت‌گاه‌های[5] زغال پرداخته شد و نتیجه‌گیری شد که پدیده‌ی خود گرمایشی زغال ناشی از چندین فرآیند پیچیده‌ی فیزیکی و شیمیایی است.
Grewer (1994)	ارائه‌ای کامل و جامع از مکانیزم خودسوزی زغال.
Walters (1996)	بررسی تأثیر ترکیبات سنگ‌شناسی (پتروگرافی) در خودسوزی زغال.
Duncan (1998)	بررسی میزان بازیابی و افت زغالسنگ در گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ.

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

Sensogut (1999)	استفاده از نسبت‌های گازی مورد استفاده در تشخیص سریع خودسوزی زغال از قبیل نسبت گراهام، نسبت تریکت و غیره که توسط سایر محقّقین ارائه شد بود.
Ren et al. (1999)	بررسی تأثیر کاهش اندازه ذرات در افزایش خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال.
Sujanti & Zhang (1999)	بررسی تأثیر نوع زغال و اندازه ذرات در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال.

[1] - Pyrite
[2] - Coalification
[3] - Vitrinite
[4] - Exinite
[5] - Dumps

Sujanti et al. (1999)	بررسی تأثیر گاز خیزی، نوع زغال و اندازه ذرات در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال.
Beamish et al. (2000)	ارائه روش آزمایش شاخص R_{70} به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌ها در زمینه‌ی خودسوزی زغال.
Jones (2001)	بررسی تأثیر میزان رطوبت در افزایش دمای ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغال.
Uludag (2001)	ارزیابی خودسوزی زغال در معادن زغالسنگ آفریقای جنوبی با استفاده از سامانه GIS.
Kaymakci & Didari (2002)	با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی[1] و چندگانه به تعیین ارتباط بین پارامترهای خودسوزی (بدست آمده از منحنی‌های دما - زمان) و پارامترهای زغال پرداخته شد.
Michaylov (2002)	به گردآوری و ارائه سیستم‌های ارزیابی کمیته ملی زغالسنگ، سیستم ارزیابی لهستانی، سیستم ارزیابی آلمانی پرداخته شد و در نهایت سیستم ارزیابی SES را که بر اساس تجارب معدنکاری زغال در کشور بلغارستان ابداع شده بود ارائه کرد.
Singh et al. (2002)	ارائه یک سیستم ارزیابی پیش‌بینی خطر خودسوزی زغال با استفاده از امتیازدهی به مشخصات مربوط به افزایش دمای زغال تحت شرایط آدیاباتیک و امتیازدهی به فاکتورهای ذاتی و معدنکاری زغال با استفاده از تجارب معدنکاری.
Kucuk et al. (2003)	به ارزیابی خودسوزی ناحیه زغالی Askale ترکیه با استفاده از روش نقطه‌ی تقاطعی پرداخته شد. مشاهده شد استعداد خودسوزی زغال با کاهش اندازه ذرات و افزایش رطوبت محتوی زغال افزایش می‌یابد.
Mitchel (2003)	بررسی تأثیر سیستم‌های تهویه نوع U و Y در نشت هوا به فضای استخراج شده.
Panigrahi & Sahu (2004)	با استفاده از تئوری شبکه عصبی مصنوعی (ANN[2]) به طبقه‌بندی لایه‌های زغال با رویکرد تمایل به خودسوزی پرداخته شد.
Panigrahi & Bhattacherjee (2004)	در این تحقیق با استفاده از یک تفنگ گرمایی IR[3] (مادون قرمز) و یک دوربین گرماسنج به بررسی وضعیت گرمایی در پایه‌های زغالی پرداخته شد.
Sahu et al. (2004)	تشخیص قابلیت خودسوزی ۳۰ نمونه زغالی از ۷ ناحیه زغالی هند با استفاده از روش‌های کاوش گرماسنجی تفاضل (DSC[4]) و دمای نقطه تقاطعی (CPT). آن‌ها از این بررسی‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی روش کاوش گرماسنجی تفاضلی در مورد خودسوزی زغال دقیق‌تر از روش دمای نقطه تقاطعی است.
Beamish (2005)	بررسی تأثیر نوع زغال در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال.

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

Beamish & Blazak (2005)	بررسی تأثیر ارتباط بین درصد خاکستر محتوی و شاخص خودسوزی R_{70} و برازش یک معادله درجه ۲ بین میزان خاکستر محتوی و شاخص R_{70}.
Beamish & Jabouri (2005)	بررسی تأثیر افزایش دمای ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغال بر روی میزان خروج انواع گازها در دماهای مختلف با استفاده از دستگاه UQ two-metre column و نیز تأثیر گاز خیزی زغال

[1] - Linear Regression
[2] - Artificial Neural Networks
[3] - Infra red
[4] - Differential Scanning Calorimetry

	در خودسوزی.
Beamish et al. (2005)	بررسی تأثیر ارتباط بین درصد خاکستر محتوی و نوع زغال در شاخص خودسوزی R_{70}.
Ren & Balusu (2005)	بررسی تأثیر روش استخراج پسرو در کاهش خطر خودسوزی زغال در پهنه جبهه کار طولانی و بررسی تأثیر سیستم‌های تهویه نوع U و Y در نشت هوا به فضای استخراج شده با استفاده از نرم افزار مدل‌سازی CFD[1].
Ren et al. (2005)	بررسی تأثیر روش استخراج پسرو در کاهش خطر خودسوزی زغال در پهنه جبهه کار طولانی.
Sahu et al. (2005)	تعیین قابلیت خودسوزی نمونه‌های زغال با استفاده از ۳ روش مختلف آزمایشگاهی دمای نقطه تقاطعی (CPT)، آنالیز حرارتی تفاضلی[2] (DTA)، و کاوش گرماسنجی تفاضلی (DSC) . که نتیجه آن این بود روش DSC نتایج بهتری از روش CPT ارائه می‌کند.
Cao et al. (2007)	بررسی تأثیر عمق قرارگیری لایه زغال در خطر خودسوزی.
Nelson & Chen (2007)	بررسی تأثیر نوع زغال و میزان پیریت محتوی در خودسوزی زغال.
Ramlu (2007)	بررسی تأثیر میزان گاز خیزی زغال در کاهش خطر خودسوزی زغال.
Singh et al. (2007)	در این کار تحقیقاتی که در معادن زغالی روباز انجام گرفت مشاهده شد، زغال فوراً اکسیده شده و آتش می‌گیرد که ناشی از خواص ذاتی زغال مانند درجه زغال‌شدگی پایین، درصد رطوبت بالا و حضور پیریت است.
Beamish & Arisoy (2008)	به بررسی ارتباط بین خواص ذاتی زغال (درجه زغال‌شدگی و خاکستر محتوی) و نرخ خود گرمایشی زغال (SHT) تحت شرایط آدیاباتیک[3] (بی‌دررو) پرداختند. همچنین نتیجه‌گیری شد زغال‌های کک شو دارای نرخ خودسوزی کمتری از زغال‌های با درصد مواد فرار بالا هستند.
Beamish & Sainsbury (2008)	بررسی تأثیر ارتباط بین خاکستر محتوی و افزایش دمای ناشی از آزمایش R_{70}.
Gangopadhyay (2008)	ارزیابی خودسوزی زغال با استفاده از روش سنجش از راه دور[4].
Bo-tao et al. (2009)	بررسی تأثیر سرعت پیشروی بر روی سرعت افزایش دمای ناشی از اکسایش زغال.

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

De-ming et al. (2009)	با استفاده از روش آزمایش سینتیک[5] اکسایش به ارزیابی تمایل زغال به خودسوزی پرداخته شد. آن‌ها بیان داشتند که روش‌های آزمایشگاهی موجود تنها خصوصیات یک مرحله از کل فرآیند خودسوزی را در بردارند اما خودسوزی زغال یک فرآیند سینتیکی و غیرخطی است که

[1] - Computational Fluid Dynamics
[2] - Differential Tthermal Analyzer
[3] - Adiabatic
[4] - Remote Sensing
[5] - Kinetics

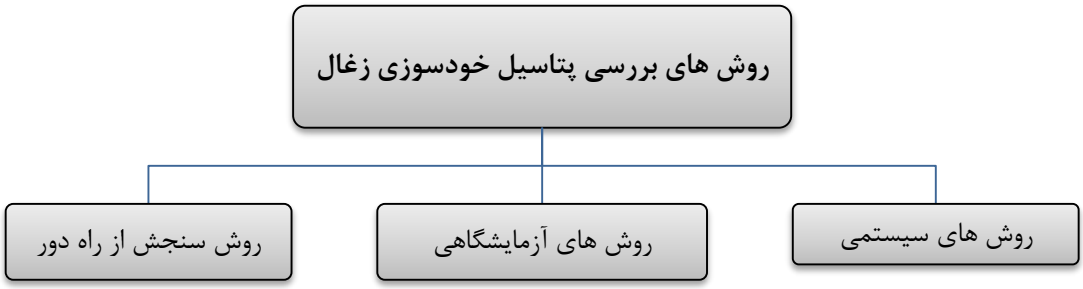
	می‌تواند به چندین مرحله تقسیم شود و سینتیک واکنشی زغال در هر مرحله با سایر مراحل متفاوت است.
Mohalik et al. (2009- a)	به ارائه‌ی مروری از کاربردهای ۳ روش گرمایی شامل آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA)، گرماسنجی ثقلی[1] (TG) و کاوش گرماسنجی تفاضلی (DSC) پرداخته شد.
Sahu et al. (2009)	با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی K-means به دسته‌بندی لایه‌های زغالی با رویکرد تمایل به خودسوزی پرداخته شد.
Beamish & Beamish (2010)	بررسی تأثیر رطوبت بر قابلیت خودسوزی زغال با استفاده از روش آزمایش R_{70}.
Lang & Fu-bao (2010)	در این تحقیق داده‌های مرتبط از آخرین مطالعات در زمینه‌ی خودسوزی جمع‌آوری شد و تعدادی از این پارامترها را که برای ارزیابی زغال‌های کشور چین قابلیت اجرا داشتند، انتخاب کردند. آن‌ها با به‌کار بردن روش امتیازدهی کل نگری و تحلیل سلسله مراتبی[2] (AHP)، تمامی فاکتورها را برای یک مدل کمی یکپارچه کردند و طبقه بندی به ۵ مرحله تقسیم شد. همچنین یک نرم‌افزار تجاری برای ارزیابی خطر خودسوزی توسعه داده شد.
Beamish & Beamish (2011)	بررسی تأثیر رطوبت بر قابلیت خودسوزی زغال با استفاده از روش آزمایش R_{70}.
Beamish et al. (2012)	بررسی نقش و تأثیر پیریت در خودسوزی زغال.
Ren et al. (2012)	بررسی تأثیر سیستم تهویه نوع Y در افزایش نشت هوا به فضای استخراج شده نسبت به سیستم تهویه نوع U.
Yuan & Smith (2012)	بررسی تأثیر میزان حجم هوای تهویه در گرمایش خودبه‌خودی زغال با استفاده از یک آون هم دما قابل برنامه‌ریزی.
Beamish et al. (2013)	بررسی تأثیر نوع زغال در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال.

از مطالب جدول ۳-۱ که شامل مروری بر منابع مختلف موجود در زمینه خودسوزی زغالسنگ است، برمی‌آید تاکنون مطالعات وسیعی در خصوص چگونگی پیدایش، پیش‌بینی، پیش‌گیری، کنترل و تأثیر پارامترهای مختلف در خودسوزی زغالسنگ انجام گرفته است. اما برخی از مهم‌ترین روش‌ها که به بررسی پیش‌بینی پتانسیل خودسوزی در معادن زغالسنگ پرداخته است نیاز به تشریح و تفصیل بیشتری دارند که با توجه به اقتضای این تحقیق و نیز محدودیت دسترسی به منابع، در ادامه از میان روش‌های ذکر شده، پرکاربردترین روش‌های ارزیابی رفتار و تعیین قابلیت خودسوزی در معادن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

[1] - Thermogravimetry
[2] - Analytic Hierarchy Process

۳-۳- روش‌های ارزیابی خطر خودسوزی زغالسنگ

مجموعه روش‌های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال را می‌توان به ۳ گروه کلی طبقه‌بندی نمود که این طبقه‌بندی در شکل ۳-۱ آورده شده است.



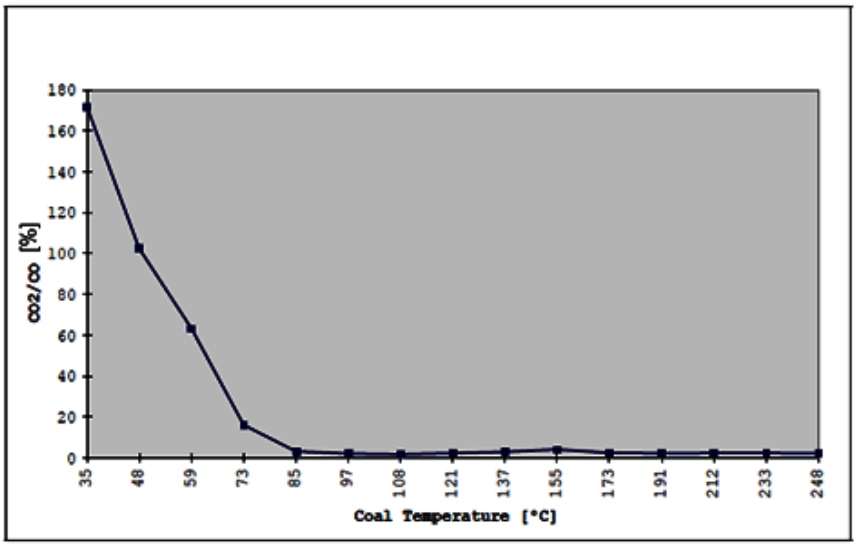
شکل ۳-۱: طبقه‌بندی روش‌های بررسی پتانسیل خودسوزی زغالسنگ

۳-۳-۱- روش‌های سیستمی

۳-۳-۱-۱- نسبت $\frac{CO_2}{CO}$ ؛ (1910)

این نسبت اولین بار توسط Rhead و Wheeler در سال ۱۹۱۰ میلادی پیشنهاد شد و توسط سایر متخصصان برای ارزیابی خطر پیشرفت پدیده گرمایش خودبه‌خودی استفاده شده است (Sensogut, 1999).

در شکل ۳-۲ تأثیر افزایش دمای ناشی از اکسیداسیون و گرمایش خودبه‌خودی زغال در تغییرات نسبت CO_2/CO نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: تأثیر افزایش دما در تغییرات نسبت CO_2/CO (Sensogut, 1999)

همان‌طور که در شکل ۳-۲ مشاهده می‌شود، نسبت CO_2/CO با افزایش دما با شیب تندی کاهش می‌یابد و در حدود دمای ۱۰۸ درجه سانتی‌گراد این نسبت با مقدار میانگین ۲/۵۳۹ ثابت باقی می‌ماند. از این نمودار نتیجه می‌شود که از این نسبت تنها می‌توان در شروع گرمایش که دما در حال افزایش است استفاده کرد (Sensogut, 1999).

اشکالات عمده این روش عبارتند از (Sensogut, 1999):

۱- بعد از مقدار معینی افزایش دما این نسبت ثابت باقی می‌ماند و در دماهای بالاتر نمی‌توان از این نسبت استفاده کرد.

۲- قابلیت ایجاد کربن مونوکسید از منابع مختلف گرمایی وجود دارد و تنها مختص به گرمایش خودبه‌خودی زغال نیست.

۳- کربن مونوکسید می‌تواند در آب حل شود و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده کمتر از مقدار تولید شده باشد.

۳-۳-۱-۲- نسبت گراهام[1]؛ (1920)

نسبت کسری کربن مونوکسید / اکسیژن در سال ۱۹۲۰ میلادی به عنوان مقیاسی برای تأیید وجود گرمایش استفاده شد. این نسبت همچنین به عنوان شاخص گراهام[2] یا شاخص کربن مونوکسید[3] نیز شناخته می‌شود. نسبت پیشنهاد شده توسط گراهام، میزان مونوکسید کربن تولید شده را با میزان مصرف اکسیژن توسط مواد اکسید شده مقایسه می‌کند (Sensogut, 1999).

نسبت ارائه شده توسط گراهام بر اساس معادلات (۳-۱) و (۳-۲) بیان می‌شود.

$$GR = \frac{100 * CO}{\frac{20.93 * N_2}{79.04} - O_2} \quad (۳-۱)$$

$$GR = \frac{100 * CO}{0.265 * N_2 - O_2} \quad (۳-۲)$$

که CO، N_2 و O_2 درصد گازهای مونوکسید کربن، نیتروژن و اکسیژن موجود در نمونه هوای ناحیه‌ی مورد گرمایش معدن در زمان نمونه‌برداری است.

جدول ۳-۲ طبقه‌بندی خطر در پدیده گرمایش خودبه‌خودی را با استفاده از نسبت گراهام نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲: طبقه‌بندی نواحی خطر ابتلا به خودسوزی با استفاده از نسبت گراهام (Sensogut, 1999)

نسبت گراهام	توضیحات
۰/۴ یا کمتر	مقدار عادی
۰/۵	نیاز به یک بررسی سراسری
۱	پدیده گرمایش تقریباً قطعی است.
۲	پدیده گرمایش خطرناک شروع شده است.
۳	شروع آتش سوزی

[1] - Graham's Ratio
[2] - Graham Index
[3] - Carbon Monoxide Index

۳-۳-۱-۳- سیستم ارزیابی لهستانی[1]؛ (1952)

Olpinski و همکاران در سال ۱۹۵۲ میلادی، ارتباط بین مشخصات طبیعی زغال و عوامل فنی و معدنکاری مؤثر در خطر خودسوزی در کشور لهستان را به ۷ فاکتور اساسی مختلف طبقه بندی و این پارامترها را از S_1 تا S_7 نام‌گذاری کردند، سپس شاخص خطر ابتلا به خودسوزی را به صورت رابطه (۳-۳) بیان کردند (Banerjee, 1985).

$$P_S = S_Z(b) + (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7) \quad (۳-۳)$$

که:

P_S: احتمال خطر خودسوزی

S_1: مقادیر عددی مربوط به روش معدنکاری (استخراج)

S_2: مقادیر عددی مربوط به نرخ بازیابی لایه زغال

S_3: مقادیر عددی مربوط به جهت استخراج لایه زغال

S_4: مقادیر عددی مربوط به روش جداسازی ناحیه استخراجی (تخریبی)

S_5: مقادیر عددی مربوط به میزان رطوبت لایه زغال

S_6: مقادیر عددی مربوط به عمق قرارگیری و در نتیجه تنش و شکستگی‌های موجود در لایه

S_7: مقادیر عددی مربوط به روش و شدت تهویه در جبهه کارهای لایه زغال

$S_Z(b)$: شاخص Olpinski است که طبق معادله (۳-۴) تعریف می‌شود.

$$S_Z(b) = S_Z(a) - \frac{100}{100 - A_a} \quad (۳-۴)$$

که:

$S_Z(b)$: شاخص Olpinski، به عنوان مشخصه قابلیت زغال برای خودسوزی است که از سرعت افزایش دمای زغال برای ۱ دقیقه تحت شرایط آزمایشگاهی بدست می‌آید.

[1] - Polish System

$S_Z(a)$: شاخص خودسوزی زغال بدون خاکستر است.

A_a: خاکستر محتوی زغال بر حسب درصد.

پتانسیل زغال برای خودسوزی با افزایش $S_Z(b)$، افزایش می‌یابد. درجه خطر خودسوزی در سیستم لهستانی برای موقعیت‌های مختلف از S_1 تا S_7 با مقادیر عددی مختلف از ۱۵- تا ۱۵+ با توجه به تجربه معدنکاری تعیین می‌شود که بستگی به درجه خطر دارد (Banerjee, 1985).

بر اساس تمایل به خودسوزی در سیستم ارزیابی لهستانی مناطق زغالی به ۳ دسته‌ی بدون خطر، نیمه خطرناک و خطرناک طبقه‌بندی می‌شوند (Banerjee, 1985).

مقادیر P_S بزرگ‌تر از ۱۲۰ در روش معدنکاری لهستانی، تحت شرایط ناایمن مطرح می‌شوند که لازم است اقدامات پیشگیرانه و سازمان‌دهی مجدّد در شرایط معدنکاری انجام گیرد. در این سیستم ارزیابی، علاوه بر خصوصیات طبیعی لایه زغال، خصوصیات فنی و معدنکاری نیز برای پیش‌بینی خطر خودسوزی زغال لحاظ شده است (Banerjee, 1985).

۳-۳-۱-۴- نسبت تریکت[1]؛ (1954)

این نسبت در سال ۱۹۵۴ میلادی توسط Trickett و Jones ابداع شد که توسط معادله (۳-۵) بیان می‌شود (Sensogut, 1999).

$$TR = \frac{\%CO_2 + 0.75\%CO - 0.25\%H_2}{0.265\%N_2 - \%O_2} \qquad (۳-۵)$$

با استفاده از نسبت تریکت و جدول ۳-۳ می‌توان محدوده‌های خطر را تعریف کرد.

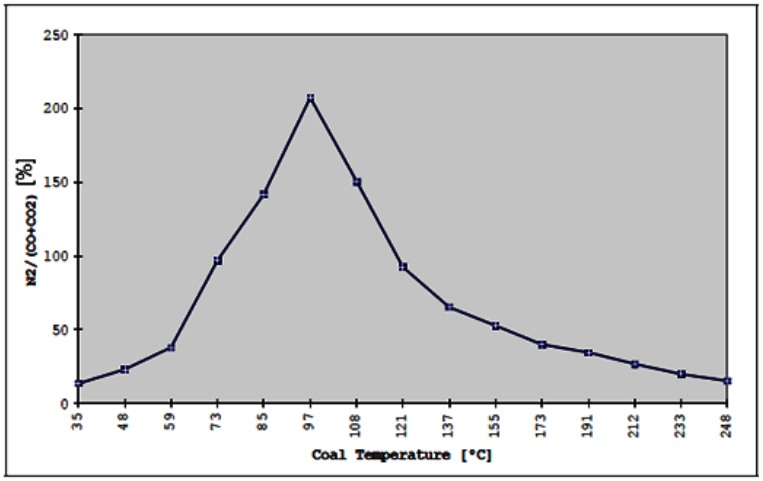
جدول ۳-۳: طبقه‌بندی نواحی خطر با استفاده از نسبت تریکت(Sensogut, 1999)

نسبت تریکت	توضیحات
کمتر از ۰/۴	آتش‌سوزی رخ نداده و تنها گازهای باقی‌مانده از فعالیت‌های معدنی وجود دارند.
۱	زغال، مواد نفتی و یا نوار نقاله شروع به آتش‌سوزی کرده‌اند.
۰/۸-۱/۶	آتش‌سوزی چوب
بزرگ‌تر از ۱/۶	اشتباه در نمونه‌گیری یا آنالیز

[1] - Trickett's Ratio

۳-۳-۱-۵- نسبت $\frac{N_2}{(CO+CO_2)}$ ؛ (1919,1970)

این نسبت توسط Partington در سال ۱۹۱۹ میلادی برای پیش‌بینی افـزایش دمـای ناشـی از پدیده گرمایش زغال بیان شد. وی بیان کرد که نسبت $\frac{N2}{\text{اکسیدهای کربن}}$ با افزایش دما، افزایش می‌یابد. اما نتایج کارهای Chamberlain در سال ۱۹۷۰ میلادی تا حدودی با نتایج کارهای Partington تنـاقض داشت و قسمتی از کار وی را رد کرد. همان‌طور کـه در شـکل ۳-۳ کـه از نتـایج کـار Chamberlain است، مشاهده می‌شود نسبت $\frac{N2}{\text{اکسیدهای کربن}}$ با افزایش دما تا حدود دمـای ۹۷ درجـه سـانتی‌گـراد بـه سرعت افزایش می‌یابد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد لذا این نسبت، نسبت درسـتی بـرای تعیـین پدیده خودسوزی زغال نمی‌باشد (Sensogut, 1999).



شکل ۳-۳: تغییرات در نسبت $N_2 / (CO+CO_2)$ با افزایش دما (Sensogut, 1999)

۳-۳-۱-۶- روش هندی؛ (1982)

Banerjee در سال ۱۹۸۲ میلادی در کشور هندوستان یک سیستم کیفی برای تعیـین خطـر خودسوزی زغال ارائه کرد که در آن از ۲۲ مجموعه اجزای مختلف استفاده می‌شود، این سیستم طبقه بندی در جدول ۳-۴ آورده شده است.

در این سیستم، امتیازدهی کیفی به پارامترها بدین صورت انجام می‌شود که هـر پـارامتر بـه ۲ جزء تقسیم می‌شود، هر جزئی که در خطر ابتلا به خودسوزی زغال کمک می‌کند احتمـال «زیـاد» و

هر جزئی که خطر ابتلا به خودسوزی زغال را کاهش می‌دهد احتمال «کم» را کسب می‌کند (Banerjee, 1982). اما از معایب این سیستم جنبه‌ی کیفی آن است که نیاز به تجزیه و تحلیل‌های آماری برای تعیین یک سیستم کمّی دارد تا از مقادیر عددی به جای واژه‌های «زیاد» و «کم» استفاده شود.

جدول ۳-۴: مجموعه اجزای مؤثر در خطر خودسوزی در روش هندی (Banerjee, 1982)

ردیف	پارامترها/ شرایط معدنکاری	مجموعه اجزاء	احتمال خطر خودسوزی	
			زیاد	کم
۱	نوع زغال (طبیعت شیمیایی)	دارای استعداد بالایی برای خودسوزی است.	زیاد	---
		دارای استعداد پایینی برای خودسوزی است.	---	کم
۲	تردی (شکنندگی) زغال	تردی زیاد	زیاد	---
		تردی کم	---	کم
۳	روش استخراج	اتاق و پایه	زیاد	---
		جبهه کار طولانی	---	کم
۴	وضعیت پر کردن محل استخراج شده	استخراج همراه با تخریب	زیاد	---
		استخراج همراه با پر کردن کامل	---	کم
۵	ضخامت لایه	زیاد (بیشتر از ۵ متر)	زیاد	---
		کم (کمتر از ۴ متر)	---	کم
۶	وضعیت استخراج	تنها استخراج جزئی (بخشی) امکان پذیر است.	زیاد	---
		استخراج تقریباً کامل	---	کم
۷	نوع استخراج	استخراج با بیش از یک برش/ برداشت	زیاد	---
		استخراج در یک برش/ برداشت	---	کم
۸	اختلالات زمین شناسی	وجود دارد.	زیاد	---
		وجود ندارد.	---	کم
۹	ترکیدگی سنگ	وجود دارد.	زیاد	---
		وجود ندارد.	---	کم
۱۰	دایک	وجود دارد.	زیاد	---
		وجود ندارد.	---	کم
۱۱	روباره	بیشتر از ۳۰۰ متر	زیاد	---
		کمتر از ۳۰۰ متر	---	کم
۱۲	جداکننده‌ها	شیل (سنگ‌های رسی) / ساختارهای شکسته	زیاد	---
		ساختارهای یکپارچه و سنگی	---	کم
۱۳	وضعیت تحکیم پایه‌ها و راهروها	شکسته و خرد شده	زیاد	---
		تحکیم خوب	---	کم

ادامه‌ی جدول ۳-۴: مجموعه اجزای مؤثر در خطر خودسوزی در روش هندی (Banerjee, 1982)

۱۴	وضعیت تجمع خاکه زغال	انباشت و تجمع خاکه زغال	زیاد	---
		جمع آوری خاکه زغال	---	کم
۱۵	روش تهویه	نوع پیشرو	زیاد	---
		نوع پسرو	---	کم
۱۶	کیفیت تهویه	اختلاف شدت فشار زیاد است.	زیاد	---
		اختلاف شدت فشار کم است.	---	کم
۱۷	رطوبت	معادن مرطوب	زیاد	---
		معادن خشک	---	کم
۱۸	منابع زمین گرمایی	وجود دارد.	زیاد	---
		وجود ندارد.	---	کم
۱۹	میزان انتشار گاز	کم	زیاد	---
		زیاد	---	کم
۲۰	اندازه پهنه استخراجی/ طول جبهه کار	بزرگ	زیاد	---
		کوچک	---	کم
۲۱	سرعت پیشروی جبهه کار	کند	زیاد	---
		سریع	---	کم
۲۲	احتمال انسداد و توقف جبهه کار	وجود دارد.	زیاد	---
		وجود ندارد.	---	کم

۳-۳-۱-۷- سیستم ارزیابی SES؛ (2002)

Michaylov در سال ۲۰۰۲ میلادی با انتخاب فاکتورها و تعریف درجه اهمیت آن‌ها بر اساس تجارب معدنکاری زغال در بلغارستان، سیستم ارزیابی خطر خودسوزی زغال را ابداع کرد که سیستم ارزیابی SES نام‌گذاری شد و بر برخی از معایب روش‌های شناخته شده مشابه قبلی غلبه پیدا کرد.

سیستم ارزیابی SES برای برنامه‌ریزی و مدیریت تخمین خطر خودسوزی در کانسارها و ذخایر زغالی جدید و نواحی زغال‌خیزی که داده‌های آماری برای ارزیابی خطر خودسوزی در آن‌ها ناکافی است، قابل استفاده می‌باشد. این سیستم در معادن تازه کار امکان ارزیابی کارآیی تغییرات تکنولوژیکی و به‌کارگیری روش‌های جدید پیشگیرانه و آشکارساز خطر را فراهم می‌کند (Michaylov, 2002).

در این سیستم از فاکتورهای طبیعی و تکنولوژیکی، برای ارزیابی خطر استفاده شده است که در جدول ۳-۵ آورده شده‌اند؛ جدول ۳-۶ و جدول ۳-۷ جزء اقدامات پیشگیرانه از خودسوزی است.

جدول ۳-۵: امتیازدهی مربوط به سیستم ارزیابی SES (Michaylov, 2002)

قابلیت گرمایش انواع زغال (S^1)	فاکتور S وابسته به دگرسانی (دگرگونی) زغال، تعیین شده از طریق فاصله دمایی				امتیاز S^1
	آنتراسیت (۱۵۰-۲۰۰)°C	زغال سیاه (۱۵۰-۲۰۰)°C	زغال قهوه‌ای (۱۲۵-۱۷۵)°C	لیگنیت (۱۰۰-۱۵۰)°C	
کمترین قابلیت	< ۸	< ۹	< ۱۰	< ۴	۱-۲
قابلیت متوسط	۸-۱۲	۹-۱۵	۱۰-۱۶	۴-۸	۲-۶
بالاترین قابلیت	> ۱۲	> ۱۵	> ۱۶	> ۸	۶-۱۰

ضخامت لایه (متر)	< ۱/۲	۱/۲۰-۲/۴۰	۲/۴۰-۳/۲۰	> ۳/۲۰
امتیاز S^2	۱	۲-۳	۳-۵	۶-۱۰
شیب (درجه)	۰-۱۵	۱۵-۳۰	۳۰-۴۵	۴۵-۹۰
امتیاز S^3	۱	۲	۳	۴-۵

q , m^3/Mg	۰	کمتر از ۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵	> ۱۵
امتیاز S^4	۰	۱	۲-۳	۳-۵	۶-۸

وضعیت گسل‌ها	ناموجود	فراوانی کم	فراوانی زیاد
فراوانی در طول امتداد لایه	۰	کمتر از ۲ عدد/ ۵۰۰ متر	بیشتر از ۲ عدد/ ۵۰۰ متر
امتیاز S^5	۰	۱-۳	۴-۶

نقشه(طرح[1]) تهویه	امتیاز S^6 برای سرعت هوا، m/s		
	≤۰/۵	>۰/۵≤۱	>۱
UR,WR	۱	۱/۵	۲
YR,ZR,ZA	۳	۳/۵	۴
HA,HR,YA,UA	۶	۶/۵	۸
WA	۸/۵	۹	۱۰

در نوع طرح تهویه، کدهای R و A به ترتیب بیانگر ترتیب حفاری معکوس و ترتیب حفاری مستقیم است.

هدر رفت زغال	نداریم	محدود	زیاد
امتیاز S^7	۰	۱-۴	۵-۱۰

دمای طبیعی زغال	۱۵-۲۰	۲۰-۲۵	۲۵-۳۰	۳۰-۳۵	> ۳۵
امتیاز S^8	۱	۲-۳	۳-۵	۵-۸	۸-۱۰

دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)	امتیاز S^9 برای رطوبت نسبی هوا (بر حسب ٪)		
	< ۶۵	۶۵-۸۰	>۸۰
۱۵-۱۹	-۳	-۲	-۱
۲۰-۲۵	۰	۱	۲
۲۶-۳۰	۲-۳	۳-۴	۳-۵
> ۳۰	۵-۶	۶-۷	۶-۱۰

[1] - Scheme

جدول ۳-۶: امتیازدهی مربوط به اقدامات پیشگیرانه[1] برای نواحی استخراج شده، (S^{10}) (Michaylov, 2002)

استفاده از روش‌های پر کردن هیدرولیکی	-۱۰
استفاده از واسطه‌های خنثی	-۸
استفاده از روش‌های پر کردن پنوماتیکی	-۷
استفاده از تزریق ساختارهای کف	-۷
استفاده از بلوک‌بندی با دوغاب	-۵
استفاده از پودر پاشی و تزریق مواد غیرقابل اشتعال	-۳
لازم و ضروری اما غیرکاربردی (غیرعملی)	۰

جدول ۳-۷: امتیازدهی مربوط به اقدامات پیشگیرانه برای طراحی پایه‌ها و واحدهای تهویه برای نواحی استخراج شده، (Michaylov, 2002) (S^{11})

استفاده از ساختارهای مصنوعی برای حریم چاه‌ها	-۱۰
استفاده از روش‌های پر کردن هیدرولیکی با مواد سفت شونده در پشت لوازم نگهداری	-۸
استفاده از روش‌های پر کردن با مواد کف مانند در پشت لوازم نگهداری	-۷
استفاده از ساختارهای مصنوعی عایق پایه‌ها در راهروها	-۶
استفاده از روش‌های تزریق مواد غیرقابل اشتعال در چاه‌ها	-۴
لازم و ضروری اما غیرکاربردی (غیرعملی)	۰

با استفاده از امتیاز شاخص‌های S^1 تا S^{11} و مقدار بدست آمده از معادله (۳-۶)، نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی به ۴ دسته طبقه‌بندی می‌شوند که در جدول ۳-۸ آورده شده است.

$$D_S = \sum_{i=1}^{11} S^i \qquad (۳-۶)$$

جدول ۳-۸: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی (Michaylov, 2002)

محدوده خطر	امتیاز بدست آمده از محاسبه D_S
کم خطر	$D_S < 22$
مورد تهدید	$22 < D_S < 39$
خطرناک	$40 < D_S < 60$
بسیار خطرناک	$D_S > 60$

اگر در مجاورت ناحیه برنامه ریزی شده برای معدنکاری، در یک لایه مشخص، قبلاً پدیده خودسوزی زغال اتفاق افتاده باشد هر محدوده خطری که از جدول فوق بدست آمد به یک مرحله بالاتر انتقال می‌یابد. بدین معنا که مثلاً اگر پس از محاسبات، جبهه کاری در محدوده خطر «مورد

[1] - Prophylactic Works

تهدید» قرار گرفت و پس از مطالعات مشخص شد که قبلاً در این لایه خودسوزی رخ داده است، محدوده خطر این لایه از حالت «مورد تهدید» به حالت «خطرناک» انتقال می‌یابد (Michaylov, 2002).

۳-۳-۱-۸- سیستم ارایه شده توسط Singh و همکاران

این سیستم ارزیابی توسط Singh و همکاران در سال ۲۰۰۲ میلادی ارائه شده است. در این سیستم ارزیابی، پیش‌بینی خطر خودسوزی زغال با استفاده از اطلاعات امتیازدهی توسط ۲ جدول که جدول ۳-۹ مربوط به افزایش دما و گرماسنجی زغال تحت شرایط آدیاباتیک است و جدول ۳-۱۰ مربوط به فاکتورهای ذاتی و معدنکاری زغال است، بدست می‌آید.

جدول ۳-۹: امتیازدهی مربوط به افزایش دما و گرماسنجی زغال تحت شرایط آدیاباتیک (Singh et al., 2002)

نتایج آزمایش آدیاباتیک[1] (بی دررو)			
نرخ (سرعت) گرمایش اولیه[2] (IRH)، (°C/min)($^{\circ C}/_{min}$)	**افزایش دمای کل[3] (TTR)، (°C)**	**امتیازبندی ریسک (خطر) حاصل از نتایج آزمایش آدیاباتیک**	**درجه‌بندی**
<۰/۶	<۲/۵	۱	کم
۰/۶ تا ۱/۲	۲/۵ تا ۴/۵	۲	متوسط
۱/۲ تا ۲	۴/۵ تا ۷	۴	زیاد
>۲	>۷	۸	خیلی زیاد

[1] - Adiabatic
[2] - Initial Rate Heating
[3] - Total Temperature Rise

جدول ۳-۱۰: جدول امتیازدهی مربوط به فاکتورهای ذاتی و معدنکاری زغال (Singh et al., 2002)

ردیف	طبقه بندی پارامترها	امتیازدهی
درجه‌بندی زغال	عالی (کیفیت بسیار بالا)	۰
	زغال کم چرب و رها شده در سقف	+۲
	زغال پرچرب و رها شده در سقف	+۵
بازیابی لایه	استخراج کل لایه	۰
	باقی گذاشتن زغال در سقف بین ۰/۳ تا ۰/۵ متر	+۵
	باقی گذاشتن زغال در سقف بیشتر از ۰/۵ متر	+۸
میزان خاکستر محتوی (٪)	<۲۰٪	۰
	۲۱-۳۰٪	-۱
	>۳۰٪	-۲
تهویه	تهویه سنتی (متعارف)	۰
	برگشت راهروی تهویه و کانال برای کنترل متان	+۴
روش نگهداری در باطله	فرو ریختن فضای استخراج شده	۰
	معلق ماندن فضای استخراج شده	+۴
میزان پیشروی روزانه	۱ متر >	+۵
	۱/۴ تا ۲/۵ متر	+۲
	۲/۵ متر<	۰
روش معدنکاری	معدنکاری Longwall پیشرو با روش پر کردن سنتی	+۸
	معدنکاری Longwall پیشرو با روش پر کردن با پمپ	+۴
	معدنکاری Longwall پسرو	+۱
	معدنکاری Longwall پسرو با راه شریانی خروج گاز	-۸
ضخامت لایه	۱/۵ متر<	-۱
	۱/۵ تا ۳ متر	+۲
	۳ متر<	+۳
	لایه ضخیم با روش چند برش	+۸
وضعیت نظارتی	بدون نظارت	+۵
	نظارت عادی (معمولی)	-۲
	نظارت پیوسته	-۵
	سیستم‌های مدیریتی	-۸

ارزیابی رفتار پدیده خودسوزی زغال در یک عملیات معدنی از جمع نمودن امتیازات حاصل از جدول ۳-۹ و جدول ۳-۱۰ بدست می‌آید. نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی در این روش به ۴ دسته، طبقه‌بندی می‌شوند که طبقه بندی مربوطه در جدول ۳-۱۱ آورده شده است (Singh et al., 2002).

جدول ۳-۱۱: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی (Singh et al., 2002)

طبقه‌بندی محدوده خطر	مجموع امتیاز بدست آمده	مدت زمان دوره نهفتگی (ماه)
کم خطر	۱ تا ۱۰	>۱۸
خطر متوسط	۱۰ تا ۲۰	۹-۱۸
خطر زیاد	۲۱ تا ۴۰	۳-۹
بسیار خطرناک	>۴۰	۰-۳

۳-۳-۱-۹- سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین؛ (2010)

سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین در سال ۲۰۱۰ میلادی توسط Lang و Fu-bao، بر اساس شرایط خاص معادن زغال این کشور ابداع و معرفی شد که از آخرین پیشرفت‌ها در زمینه ارزیابی و مدیریت خودسوزی در معادن زغال کشور چین به حساب می‌آید.

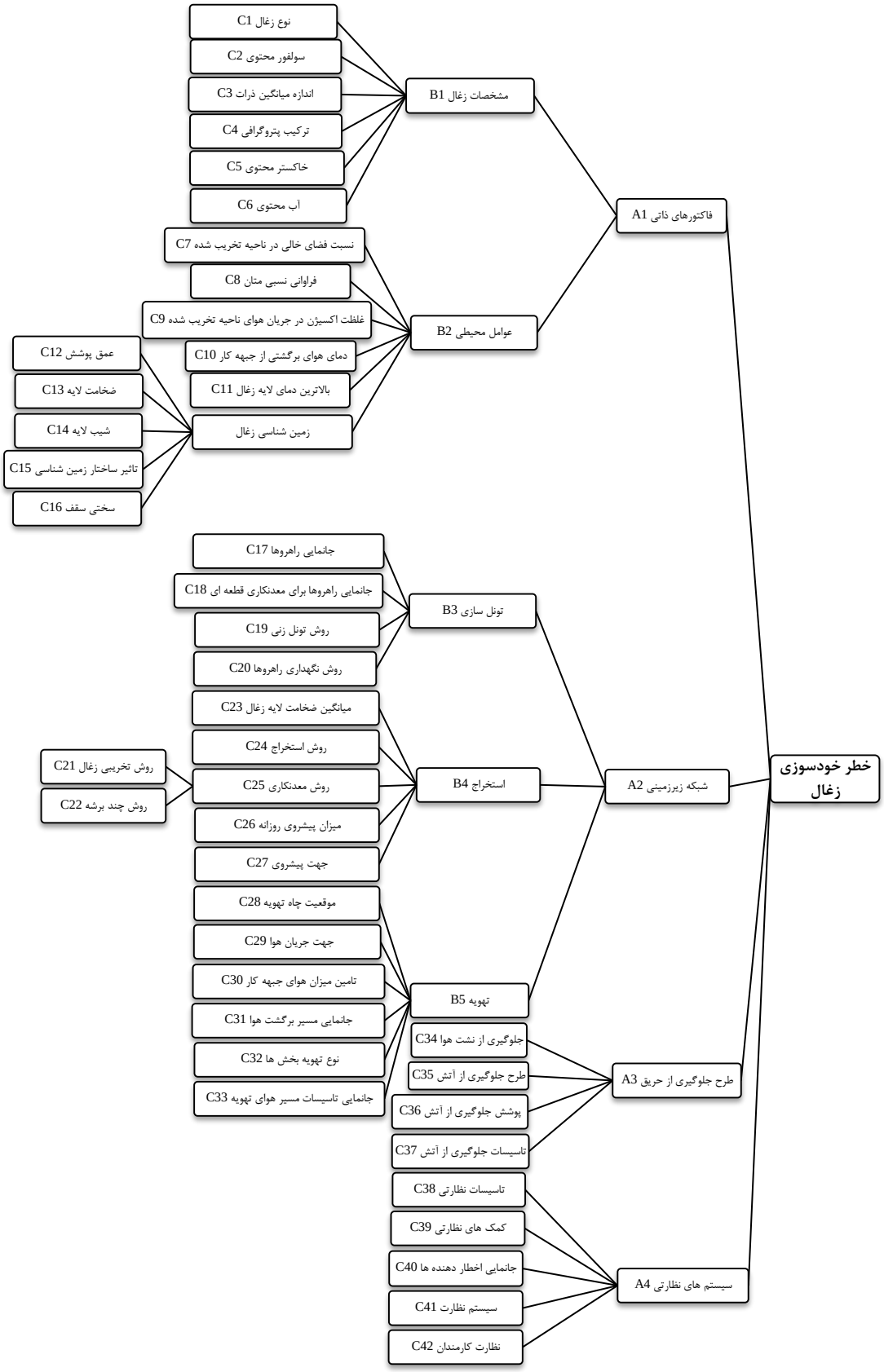
در گذشته شناسایی خطر خودسوزی زغال در کشور چین تنها بر اساس خواص ذاتی زغال انجام می‌گرفت که یک‌جانبه و نادرست بود. محقّقین بسیاری در توسعه سیستم‌های مختلف ارزیابی خطر خودسوزی زغال تلاش کرده‌اند که منجر به ارائه سیستم‌های مختلفی شده است اما این روش‌ها جوابگوی معادن زغالی چین با شرایط خاص آن‌ها نبوده است (Lang & Fu-bao, 2010).

طی سال‌های اخیر به منظور شناسایی، جلوگیری و یافتن راه حل‌های مقابله با خودسوزی زغال، مکانیزم خودسوزی از جنبه‌های مختلفی مانند مواد فرار، رطوبت محتوی، خاکستر، اندازه ذرات، ترکیبات سنگ شناسی و غیره به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است که روش‌های مختلفی برای بررسی قابلیت خودسوزی زغال توسعه پیدا کرده است. اما طی آنالیزهای صورت گرفته مشخص شد که خطر خودسوزی تنها متأثر از خواص ذاتی زغال نیست بلکه از فاکتورهای مختلفی نظیر شرایط معدنکاری، سیستم‌های پایش و جلوگیری از آتش نیز تأثیر می‌پذیرد (Lang & Fu-bao, 2010).

در سیستم ارائه شده توسط Lang و Fu-bao، به ارزیابی کامل و جامعی از خطر خودسوزی پرداخته شد به این نحو که با بررسی و مطالعه متون پیشین، فاکتورهای راهبردی و تأثیرگذار در خودسوزی زغال شناسایی شدند؛ از مجموع ۵۰ شاخص تأثیرگذار شناخته شده تعداد ۴۲ شاخص به عنوان شاخص‌های اصلی انتخاب شدند و ۸ شاخص دیگر به دلیل تأثیر نامعلوم و یا غیر مرتبط بودن حذف شدند. ۴۲ شاخص اصلی به صورت منظم و به صورت سلسله مراتبی و در ۴ گروه اصلی شامل فاکتورهای ذاتی A_1، شبکه زیرزمینی A_2، طرح جلوگیری از حریق A_3 و سیستم‌های نظارتی A_4 مطابق شکل ۳-۴ طبقه‌بندی شدند (Lang & Fu-bao, 2010) امّا یکی از مشکلات این سیستم در نظر گرفتن پارامترهای فراوان است که استفاده از آن را مشکل می‌کند.

در این سیستم جامع ارزیابی با استفاده از روش امتیازدهی کل نگری و تحلیل سلسله مراتبی[1] با استفاده از تصمیم گیری گروهی و نظرات ۵ متخصص صاحب‌نظر در این زمینه از دانشگاه Mining and Technology چین، با روش «قضاوت به اتفاق آرا» با استفاده از مقیاس ۹ نقطه‌ای، ماتریس مقایسه زوجی این پارامترها با توجه به نظرات کارشناسان مربوطه تشکیل شد که در شکل ۳-۵ آورده شده است.

[1] - Analytic Hierarchy Process (AHP)



شکل ۳-۴: ارزیابی پارامترهای موثر در خودسوزی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (Lang & Fu-bao, 2010)

A	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	1	1	2	4
A_2	1	1	2	4
A_3	1/2	1/2	1	3
A_4	1/4	1/4	1/3	1

A_1	B_1	B_2	A_2	B_3	B_4	B_5
B_1	1	1/3	B_3	1	1	1
B_2	3	1	B_4	1	1	1
			B_5	1	1	1

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	B_2	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	D
C_1	1	4	3	5	4	6	C_7	1	7	2	1/2	1/4	1/2
C_2	1/4	1	1/2	2	3	4	C_8	1/7	1	1/2	1/4	1/5	1/5
C_3	1/3	2	1	3	3	5	C_9	1/2	2	1	1	1/3	1/2
C_4	1/5	1/2	1/3	1	1	3	C_{10}	2	4	1	1	1/2	1/2
C_5	1/6	1/3	1/3	1	1	1	C_{11}	4	5	3	2	1	1
C_6	6	1/4	1/3	1/3	1	1	D	2	5	2	2	1	1

D	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	B_3	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}
C_{12}	1	1	1	1/2	4	C_{14}	1	5	3	2
C_{13}	1	1	1	1/3	2	C_{18}	1/5	1	1/3	1/3
C_{14}	1	1	1	1/3	2	C_{19}	1/3	3	1	3
C_{15}	2	3	3	1	4	C_{20}	1/2	3	1/3	1
C_{16}	4	2	2	4	1					

B_4	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}	C_{27}	B_5	C_{28}	C_{29}	C_{30}	C_{31}	C_{32}	C_{33}
C_{21}	1	3	7	7	5	2	7	C_{28}	1	1	1/4	1/3	1/3	1/2
C_{22}	1/3	1	4	4	2	1/2	3	C_{29}	1	1	1/3	1/2	1/3	1/2
C_{23}	1/7	1/4	1	1	1/3	1/5	1/3	C_{30}	4	3	1	2	3	3
C_{24}	1/7	1/4	1	1	1/3	1/5	1/3	C_{31}	3	2	1/2	1	2	3
C_{25}	1/5	1/2	3	3	1	1/2	3	C_{32}	3	3	1/3	1/2	1	2
C_{26}	1/2	2	5	5	2	1	4	C_{33}	1/2	2	1/3	1/3	1/2	1
C_{27}	1/7	1/3	3	5	1/3	1/4	1							

A_3	C_{34}	C_{35}	C_{36}	C_{37}	A_4	C_{38}	C_{39}	C_{40}	C_{41}	C_{42}
C_{34}	1	1/3	1/2	2	C_{38}	1	1	1/3	1/3	2
C_{35}	3	1	2	4	C_{39}	1	1	1/3	1/3	2
C_{36}	2	1/2	1	2	C_{40}	3	3	1	1	4
C_{37}	1/2	1/4	1/2	1	C_{41}	3	3	1	1	4
					C_{42}	1/2	1/2	1/4	1/4	1

شکل ۳-۵: تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی بین معیارهای مختلف با توجه به نظر کارشناسان (Lang & Fu-bao, 2010)

در نهایت با استفاده از مراحل محاسباتی روش AHP و پس از ساختن نمودار سلسله مراتبی و تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی به محاسبه وزن پارامترها بدون در نظر گرفتن وزن پارامترهای بالادستی در روش تحلیل سلسله مراتبی پرداخته شد که در شکل ۳-۶ آورده شده است.

The risk	$W_{A,i}$
A_1	0.359
A_2	0.359
A_3	0.200
A_4	0.082
$\lambda_{max}=4.02$	CR = 0.008

Intrinsic factor	$W_{B,i}$	Underground process	$W_{B,i}$	Fire prevention project	$W_{C,i}$	Monitoring system	$W_{C,i}$
B_1	0.25	B_3	0.333	C_{34}	0.165	C_{38}	0.203
B_2	0.75	B_4	0.333	C_{35}	0.471	C_{39}	0.158
$\lambda_{max}=2$	CR = 0	B_5	0.333	C_{36}	0.255	C_{40}	0.158
		$\lambda_{max}=3$	CR = 0	C_{37}	0.108	C_{41}	0.405
				$\lambda_{max}=4.05$	CR = 0.017	C_{42}	0.076
						$\lambda_{max}=5.09$	CR = 0.019

Coal characteristics		Environmental parameter		Coal geology		Tunneling characteristics		Mining characteristics		Ventilation	
C_1	0.420	C_7	0.149	C_{12}	0.203	C_{17}	0.467	C_{21}	0.372	C_{28}	0.069
C_2	0.154	C_8	0.044	C_{13}	0.158	C_{18}	0.076	C_{22}	0.170	C_{29}	0.082
C_3	0.218	C_9	0.113	C_{14}	0.158	C_{19}	0.275	C_{23}	0.038	C_{30}	0.306
C_4	0.087	C_{10}	0.200	C_{15}	0.405	C_{20}	0.181	C_{24}	0.038	C_{31}	0.257
C_5	0.071	C_{11}	0.302	C_{16}	0.076	$\lambda_{max}=4.25$	CR = 0.093	C_{25}	0.102	C_{32}	0.174
C_6	0.050	D	0.250	$\lambda_{max}=5.09$	CR = 0.019			C_{26}	0.212	C_{33}	0.112
$\lambda_{max}=6.24$	CR = 0.043	$\lambda_{max}=6.38$	CR = 0.062					C_{27}	0.082	$\lambda_{max}=6.21$	CR = 0.037
								$\lambda_{max}=7.45$	CR = 0.056		

شکل ۳-۶: یافتن وزن پارامترهـا در روش تحلیـل سلسـله مراتبـی بـدون در نظـر گـرفتن وزن پارامترهـای بالادسـتی (Lang & Fu-bao, 2010)

در نهایت پس از ضرب نمودن وزن هر پارامتر در وزن پارامترهای بالادستی مربوط به خـودش، وزن نهایی پارامترهای تأثیرگذار در خطر خودسوزی بدست آمد که در جدول ۳-۱۲ آورده شده است.

جدول ۳-۱۲: وزن نهایی پارامترها در سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی (Lang & Fu-bao, 2010)

پارامتر	وزن پارامتر * 10^{-2}	پارامتر	وزن پارامتر * 10^{-2}	پارامتر	وزن پارامتر * 10^{-2}	پارامتر	وزن پارامتر * 10^{-2}
C_1	۴	C_{17}	۵/۵	C_{34}	۳/۵	C_{38}	۱/۵
C_2	۱/۵	C_{18}	۱	C_{35}	۹/۵	C_{39}	۱
C_3	۲	C_{19}	۳	C_{36}	۵	C_{40}	۱
C_4	۱	C_{20}	۲	C_{37}	۲	C_{41}	۳
C_5	۰/۵	C_{21}	۴/۵			C_{42}	۰/۵
C_6	۰/۵	C_{22}	۲				
C_7	۴	C_{23}	۰/۵				
C_8	۱	C_{24}	۰/۵				
C_9	۳	C_{25}	۱				
C_{10}	۵	C_{26}	۲/۵				
C_{11}	۸	C_{27}	۲				
C_{12}	۱/۵	C_{28}	۱				
C_{13}	۱	C_{29}	۱				
C_{14}	۱	C_{30}	۳/۵				
C_{15}	۳	C_{31}	۳				
C_{16}	۰/۵	C_{32}	۲				
		C_{33}	۱/۵				

تاکنون فرمول‌های تجربی زیادی برای کمک به محقّقین بـه منظـور تعیـین فاکتورهـای ذاتـی مختلف زغال ارائه شده است. اما تنها تعدادی پارامتر از قبیـل میـزان سـولفور محتـوی، انـدازه ذرات، میزان آب محتوی و غیره قابل اندازه‌گیری هستند. سایر پارامترهای تأثیرگذار در خودسـوزی از قبیـل ترکیبات سنگ‌شناسی زغال، روش معدنکاری و تأسیسات نظارتی قابلیت کمّی سازی ندارد و تنهـا بـه عنوان پارامترهای کیفی تلقی می‌شوند و حتی بعضی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری از قبیـل عمـق و ضخامت لایه نیز تنها از طریق تخمین‌های آماری قابلیت اندازه‌گیری دارند و یک عدد دقیق و مشخص را نمی‌توان بـرای آن‌هـا بیـان کـرد و عـددی بـه صـورت میـانگین بـه آن‌هـا نسـبت داده مـی‌شـود (Lang & Fu-bao, 2010).

در سیستم جامع ارزیابی خطر ارائه شده در این بخش، برای رفع این مشکل و کاهش خطا، هر یک از پارامترهای کیفی به چندین فاصله تقسیم‌بندی شده‌اند و به هر فاصله امتیاز جداگانه‌ای نسـبت داده شده است تا کاربر بر اساس شرایط خاص مورد بررسی و تجربه کاری یک فاصله مربوط را انتخاب کند (Lang & Fu-bao, 2010).

پس از مقایسه و اولویت‌بندی پارامترها، امتیازبندی پارامترهای کیفی خطر بـا $S_{i,k}$ و بـا دامنـه تغییرات امتیازی بین ۴- تا ۴+ بر اساس شدت تأثیرات مختلف آن‌ها در خطر آتش سوزی امتیازبندی شدند. اگر یک پارامتر باعث افزایش خودسوزی شود امتیاز مثبت و اگر باعث کاهش خودسـوزی شـود امتیاز منفی کسب می‌کند. به عنوان مثال پارامتر C_1 که مربوط بـه نـوع زغـال اسـت اگـر نـوع زغـال لیگنیت[1] باشد امتیاز $S_{1,1}$ مربوط به آن ۴ خواهد بود و اگر نوع زغال آنتراسیت[2] باشد امتیاز مربوط بـه آن صفر خواهد بود؛ و یا پارامتر C_{26} که مربوط به میزان پیشروی روزانه می‌باشد، اگر میزان پیشـروی روزانه کمتر از ۱ متر باشد (<1m) امتیاز ۲ و اگر میزان پیشروی روزانه بیشتر از ۴ متر باشـد (> 4m) امتیاز ۲- را کسب خواهد کرد (Lang & Fu-bao, 2010).

با ترکیب نتایج جدول ۳-۱۲ و امتیازبندی مربوط به پارامترهای کیفـی، معادلـه (۳-۷) بدسـت

[1] - Lignite
[2] - Anthracite

می‌آید که داریم:

$$u_{i,k} = 10^2 W_i S_{i,k} \quad (۷-۳)$$

که:

$u_{i,k}$: امتیاز نهایی پارامترها

W_i: وزن هر پارامتر که از جدول ۳-۱۲ بدست می‌آید.

$S_{i,k}$: وزن مربوط به هر فاصله در پارامترهای کیفی

به عنوان مثال در مورد پارامتر C_1 که مربوط به نوع زغال است و اگر نوع زغال لیگنیت باشد امتیاز نهایی این پارامتر برابر است با: $u_{i,k}=10^2*4*0.04=16$. اما به دلیل ساختن نرم‌افزاری تجاری در این رابطه اطلاعات دقیق‌تر در رابطه با سایر بازه بندی‌ها موجود نیست.

بر طبق روش ارائه شده در بالا هر پارامتر وزن‌دهی شد و سیستم ارزیابی کمّی ساخته شد. دامنه تغییرات امتیازها از ۱۷ تا ۱۰۱ متغیر بود. بر طبق شرایط عملی خطر، سطوح خطر به ۵ طبقه تقسیم‌بندی شد و دوره نهفتگی خطر نیز متعاقباً پیش‌بینی شده است که در جدول ۳-۱۳ آورده شده است (Lang & Fu-bao, 2010).

جدول ۳-۱۳: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر خودسوزی در سیستم جامع ارزیابی خطر (Lang & Fu-bao, 2010)

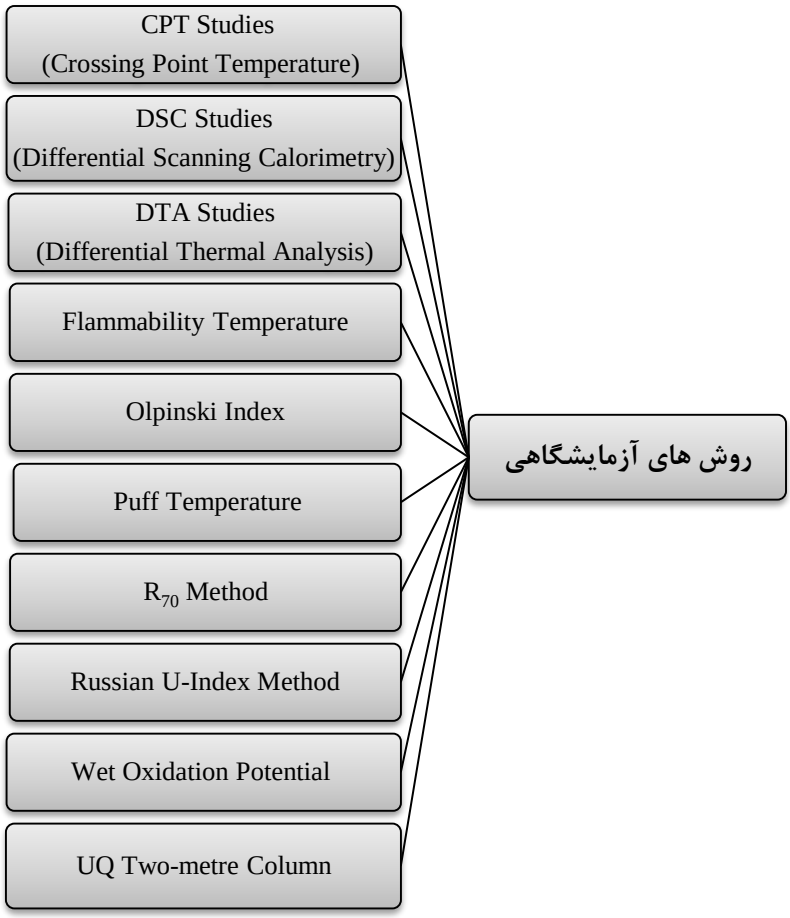
طبقه‌بندی محدوده خطر	خطر بسیار کم	خطر کم	خطر متوسط	خطر زیاد	خطر بسیار زیاد
مجموع امتیاز بدست آمده	<۲۰	۲۰-۳۵	۳۵-۵۵	۵۵-۸۰	>۸۰
مدت زمان دوره نهفتگی (ماه)	>۱۲	۱۲-۴	۱/۵-۴	۰/۵-۱/۵	<۰/۵

منظور از «دوره نهفتگی[1]»، فاصله زمانی بین واکنش اکسیژن با زغال و ایجاد شرایط مساعد برای احتراق خودبه‌خودی تا زمان رسیدن به اشتعال است (Banerjee, 1985).

[1] - Incubation Period

۳-۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی

مجموعه روش‌های آزمایشگاهی بررسی قابلیت خودسوزی زغال در شکل ۳-۷ آورده شده است و در ادامه برخی از مهم‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها با توجه به دسترسی محدود به منابع توضیح داده شده است.



شکل ۳-۷: روش‌های آزمایشگاهی بررسی قابلیت خودسوزی زغال

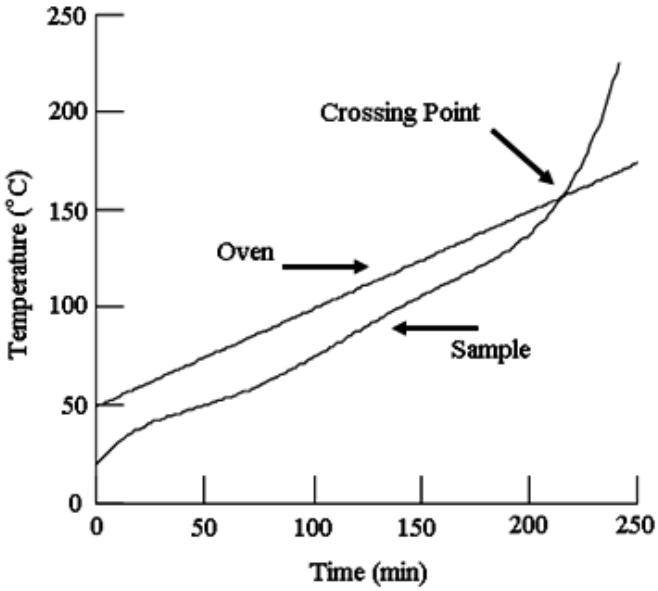
۳-۳-۲-۱- روش دمای نقطه تقاطعی (CPT[1])

این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای تعیین استعداد زغال برای گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی است. در این روش، به نمونه زغالی موجود در لوله واکنش در آون، با نرخ افزایش دمای ثابت و میزان اکسیژن ثابت حرارت و اکسیژن داده می‌شود که این نرخ افزایش دما از پیش تعیین

[1] -Crossing Point Temperature

شده است و میانگین افزایش دما ۱ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه ($1\frac{°C}{min}$) است و جریان هوا به مقـدار ۸۰ میلی‌لیتر بر دقیقه (80 ml/min) از نمونه گذر می‌کند (Kaymakci & Didari, 2002).

دمای نمونه و دمای آون هر ۵ دقیقه یک‌بار اندازه‌گیری و ثبت می‌شود که در نهایت منجر بـه تشکیل منحنی دما- زمان می‌شود که نمونه‌ای از این منحنی در شکل ۳-۸ آورده شده است. نقطه‌ای که محل تقاطع دمای اندازه‌گیری شده نمونه و دمای آون است تحت عنوان «دمـای عبـوری زغـال از دمای آون» نامیده می‌شود که به ایـن نقطـه تقـاطعی "Crossing Point Temperature" یـا "CPT" گفته می‌شود. هرچه محل تقاطع این نقطـه بـه مبـدأ نزدیـک‌تر باشـد تمایـل زغـال بـرای گرمـایش خودبه‌خودی و خودسوزی بیشتر است (Kaymakci & Didari, 2002).



شکل ۳-۸: منحنی دما- زمان در روش CPT (Kaymakci & Didari, 2002)

۳-۳-۲-۲- روش نرخ گرمایش خودبه‌خودی R_{70}

روش آزمایش R_{70} در سال ۲۰۰۰ میلادی توسط Beamish و همکاران ابداع شد. اصول روش آزمایش R_{70} بدین صورت است که در ابتدا یک نمونه ۱۵۰ گرمی از زغال خرد شده به اندازه کمتـر از ۲۱۲ میکرومتر (212 µm) در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد توسـط نیتـروژن بـرای مـدت تقریبـاً ۱۶ ساعت در یک آون آدیاباتیک (بی‌دررو) خشـک مـی‌شـود. سـپس زغـال تـا دمـای حـدود ۴۰ درجـه

سانتی‌گراد خنک می‌شود. پس از آنکه دمای زغال در حدود دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت جریان نیتروژن در یک آون آدیاباتیک به تعادل رسید اکسیژن به مقدار ۵۰ میلی لیتر بر دقیقه (50 ml/min) از نمونه گذر می‌کند. یک ثبات داده نگار افزایش دمای ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغال را ثبت می‌کند. زمان سپری شده برای رسیدن دمای زغال به ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای محاسبه میانگین نرخ گرمایش خودبه‌خودی برای افزایش دما ناشی از اکسیداسیون آدیاباتیک محاسبه می‌شود. این شاخص تحت عنوان شاخص R_{70} نامیده می‌شود و واحد آن °C/h (درجه سانتی‌گراد/ ساعت) است.

جدول ۳-۱۴ مقادیر R_{70} و درجه تمایل زغال به خودسوزی را نشان می‌دهد (Beamish & Arisoy, 2008).

جدول ۳-۱۴: مقادیر R_{70} و درجه تمایل زغال به خودسوزی (Beamish & Arisoy, 2008)

طبقه	مقادیر R_{70} (بر حسب °C/h)	Propensity	درجه تمایل زغال به خودسوزی
I	$R_{70}<0.5$	low (L)	ضعیف
II	$0.5\leq R_{70}<1$	medium (M)	متوسط
III	$1\leq R_{70}<2$	high (H)	زیاد
IV	$2\leq R_{70}<4$	very high (VH)	بسیار زیاد
V	$4\leq R_{70}<8$	ultra high (UH)	ما فوق زیاد
VI	$8\leq R_{70}<16$	Extremely high (EH)	به شدت زیاد
VII	$R_{70}\geq16$	exceptionallyhigh (XH)	به طور استثنایی زیاد

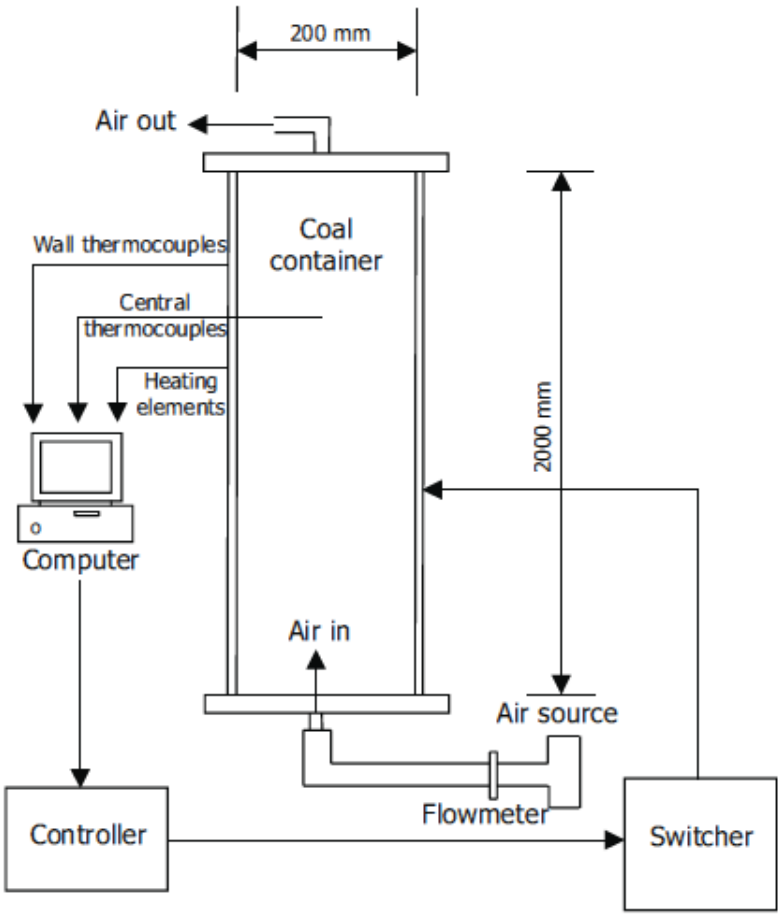
۳-۳-۲-۳- روش آزمایش UQ[1] two-metre column

Beamish و Jabouri از دانشگاه Queensland استرالیا در سال ۲۰۰۵ میلادی به بررسی تأثیر افزایش دمای ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغال بر روی میزان خروج انواع گازها در دماهای مختلف با استفاده از دستگاه UQ two-metre column پرداختند که تجهیزات مورد استفاده در این دستگاه در شکل ۳-۹ آورده شده است.

دستگاه UQ two-metre column دارای ظرفیت ۶۲ لیتری که بسته به وزن مخصوص زغال،

[1] - University of Queensland

معادل ۴۰ تا ۷۰ کیلوگرم است. زغال موجود در استوانه که دچار گرمایش خودبه‌خودی می‌شود با استفاده از ۸ ترموکوپل که در طول استوانه تعبیه شده‌اند مورد بررسی و دماسنجی قرار می‌گیرد. تعداد ۸ گرم‌کن[1] به طور مستقل با این ترموکوپل‌ها در ارتباط هستند. دمای شروع آزمایش از دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و تا دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد و هوا با نرخ ۰/۲۵ لیتر بر دقیقه (0.25 lit/min) به محفظه وارد می‌شود. یک کامپیوتر هر ۱۰ دقیقه یک‌بار میزان افزایش دما و درصد ترکیبات خروج گازها را ثبت می‌کند (Beamish & Jabouri, 2005).

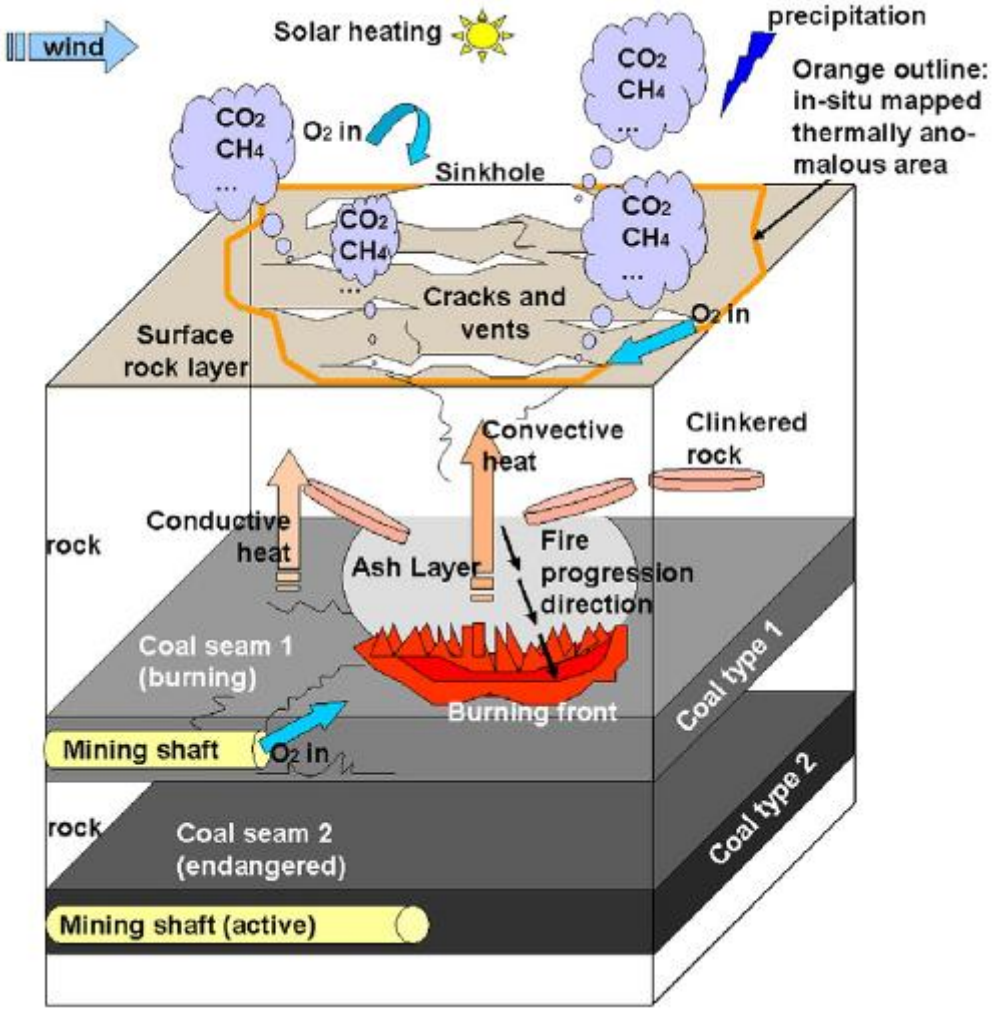


شکل ۳-۹: طرح تجهیزات مورد استفاده در دستگاه گرمایش خودبه‌خودی UQ two-metre column (Beamish & Jabouri, 2005)

[1] -Heater

۳-۳-۳- روش سنجش از راه دور[1]

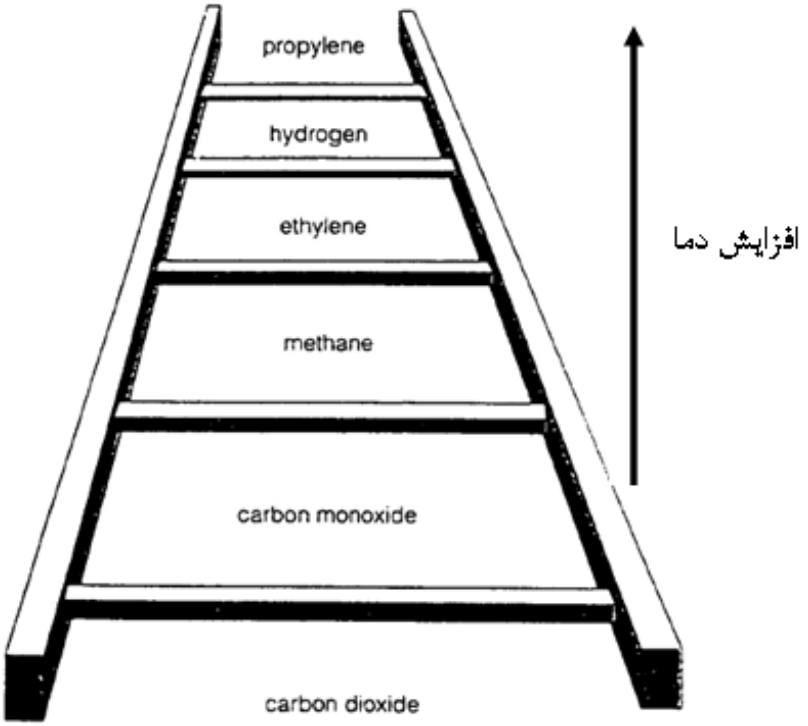
آتش‌سوزی‌های زغالی باعث تولید مقادیر زیادی از گازهـای گلخانـه‌ای ماننـد CO، CO_2، CH_4، SO_x و NO_x می‌شوند (شکل ۳-۱۰) که این گازها تأثیر مسـتقیم بـر روی ترکیـب اتمسـفر محلـی و جهانی دارند. از دوران قبل از انقلاب صنعتی تاکنون، غلظت گاز CO_2 که یکی از اصـلی‌ترین گازهـای گلخانـه‌ای در گرمـایش زمـین محسـوب می‌شـود از 280ppm بـه 375ppm افـزایش یافتـه اسـت (Gangopadhyay, 2008).



شکل ۳-۱۰: سوختن زغال در زیر سطح زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای (Dijk et al., 2011)

[1] - Remote Sensing

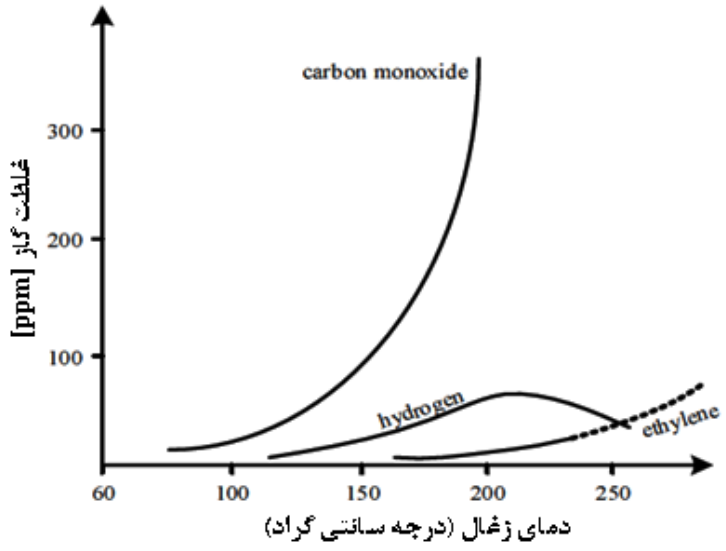
تولید گازهای گلخانه‌ای با تکامل مراحل اکسیداسیون زغال، که در فصل دوم به آن اشاره شد، از مراحل اولیه گرمایش خودبه‌خودی تا خودسوزی و اشتعال کامل زغال با الگوهای مختلفی تعریف می‌شود که یکی از مشهورترین این الگوها، الگوی «نردبان آتش[1]» است که نشان‌دهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای در طی مراحل پیشرفت احتراق خودبه‌خودی زغال است که در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است (Grewer, 1994).



شکل ۳-۱۱: «نردبان آتش»، نشان‌دهنده انتشار محصولات گازی مختلف ناشی از افزایش دما در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال (Grewer, 1994)

شکل ۳-۱۲ نیز بر حسب میزان تولید گازهای گلخانه‌ای مختلف ناشی از افزایش دما برای تعیین مراحل پیشرفت پدیده گرمایش خودبه‌خودی بکار می‌رود.

[1] - Fire Ladder



شکل ۳-۱۲: غلظت انتشار محصولات گازی مختلف ناشی از افزایش دما در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال (Grewer, 1994)

با استفاده از آنالیز گازهای مختلف در هوای معدن و استفاده از شکل ۳-۱۱ و شکل ۳-۱۲ می‌توان به پیش‌بینی گرمایش خودبه‌خودی و تعیین مراحل پیشرفت واکنش اکسایش پی برد (Grewer, 1994).

عکس‌برداری هوایی بر پایه سنجش از راه دور در اواخر قرن نوزدهم میلادی معرفی شد و بیشتر برای مقاصد شناسایی و اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گرفت. ماهواره‌های بر پایه سنجش از راه دور در سال ۱۹۶۰ میلادی شروع به کار کردند اما تا سال ۱۹۷۲ بجزء برای مقاصد نظامی استفاده نمی‌شدند اما با گذشت زمان استفاده از آن‌ها چشمگیر شد (Gangopadhyay, 2008).

زمانی که یک احتراق شعله دار زغالی در سطح زمین یا زیر سطح زمین به وجود می‌آید، انرژی گرمایی قابل توجهی را از خود ساطع می‌کند (شکل ۳-۱۳) که به آسانی توسط پردازشگر گرمایی سنجش از راه دور شناسایی می‌شود. برای تفکیک حرارت ناشی از آتش‌سوزی زغالی از انرژی گرمایی خورشید، لازم است تا داده های سنجش از راه دور در شب ثبت شوند تا اشتباهی در شناسایی رخ ندهد.

سنجش از دور شامل اجزای زیر است (Gangopadhyay, 2008):

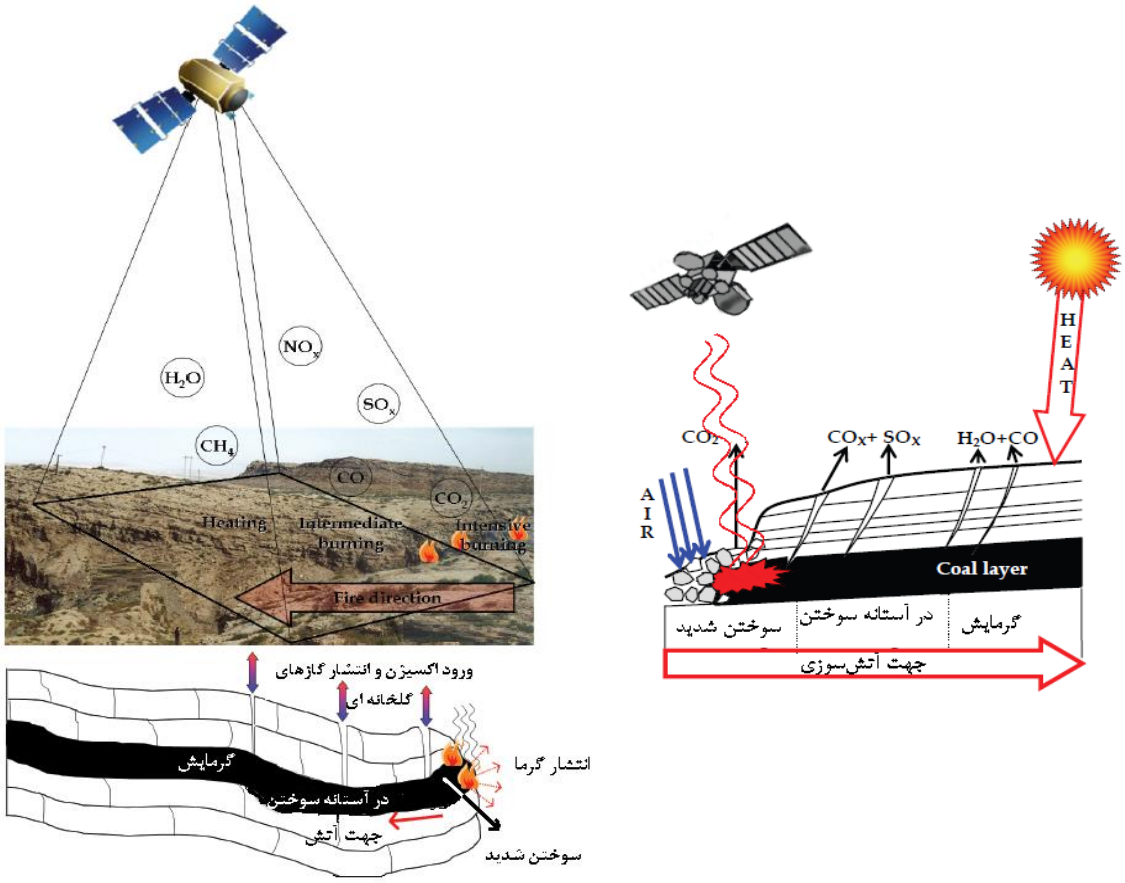
- منبع انرژی- برای پرتو افکندن یا ارسال انرژی الکترومغناطیسی به هدف مورد نظر
- پرتو افکنی- انتقال انرژی از منبع به هدف مورد نظر
- فعل و انفعال با هدف- وابسته به خصوصیات هدف و پرتوافکن
- فعل و انفعال با اتمسفر جوّ- انعکاس و تابش انرژی از هدف از طریق اتمسفر جوّ انجام می‌شود.
- ثبت انرژی در گیرنده‌ها- یک گیرنده، تشعشعات الکترومغناطیسی منعکس شده را ثبت می‌کند.
- پردازش- داده‌های ثبت شده توسط گیرنده‌ها در ایستگاه‌های زمینی دریافت و پس از پردازش تبدیل به عکس می‌شوند.
- تجزیه و تحلیل- عکس‌های پردازش شده به صورت دیداری و یا دیجیتالی مورد تفسیر قرار می‌گیرند.

۳ مرحله پیش نیاز، برای استفاده از سنجش از راه دور برای شناسایی آتش‌سوزی‌های زغالی وجود دارد که در زیر به آن‌ها اشاره شده است (Gangopadhyay, 2008).

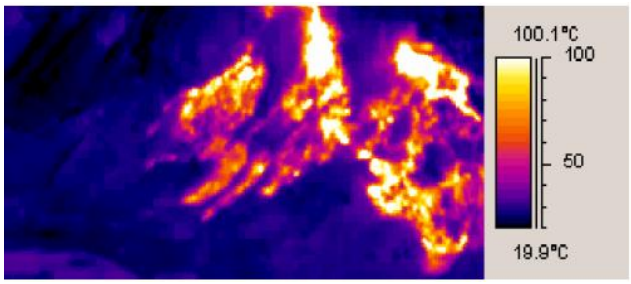
۱- گرفتن عکس‌های حرارتی (ترجیحاً در شب) از ناحیه تحت بررسی با استفاده از سنجش از راه دور و پردازش دیجیتالی برای ایجاد نقشه دمای سطح به منظور آشکارسازی آنومالی‌های دمایی (شکل ۳-۱۴).

۲- بدست آوردن اطلاعات زمین‌شناسی منطقه.

۳- استفاده از دانش زمین‌شناسی برای حذف آنومالی‌هایی بجزء آنومالی‌های ناشی از آتش‌سوزی زغال برای تهیه نقشه گرمایی درجه‌بندی شده با استفاده از دماهای بدست آمده از ناحیه مورد نظر.



شکل ۳-۱۳: پدیده خودسوزی زغال و تصاویری شماتیک از آشکارسازی آتش‌سوزی‌های زغالی با استفاده از روش سنجش از راه دور (Gangopadhyay, 2008)



شکل ۳-۱۴: نمونه‌ای از یک تصویر مادون قرمز حرارتی از یک توده زغال در حال خودسوزی (Huw et al., 2003)

اتمسفر بین آتش‌سوزی زغال و دریافت‌کننده‌های سنجش از راه دور نقش مهمّی را در دقّت برآورد دمای سطحی، مخصوصاً در مطالعات کمّی ایفا می‌کنند. دمای سطح بالای یک آتش‌سوزی زغالی به چندین عامل مانند خواص ذاتی (قابلیت تابندگی و دمای آتش) و شرایط نواحی اطراف (نوع خاک، توپوگرافی، دمای محلی، شکاف‌ها و شکستگی‌های سطحی و عمق آتش) بستگی دارد. رطوبت خاک و باد همچنین بر روی دمای سطح تأثیرگذارند. مشخصات گرمایی سنگ نیز فاکتور مهمّی در

سنجش از راه دورهای گرمایی است. برای مثال، برخی از سنگ‌ها با ظرفیت بالای گرمایی می‌توانند در عکس‌های شبانه نیز به عنوان آتش‌سوزی‌های زغالی ظاهر شوند چون این قبیل سنگ‌ها، گرمای زیادی را در مقایسه با سایر سنگ‌ها در خود ذخیره می‌کنند. به هر حال عکس‌های گرفته شده پیش از طلوع آفتاب همراه با اطلاعات خوب در زمینه شرایط زمین‌شناسی منطقه مانع از ایجاد آنومالی‌های نادرست می‌شوند و به شناسایی مناطق زغالی در حال گرمایش کمک قابل توجه‌ای می‌کنند (Gangopadhyay, 2008).

۳-۳-۴- سایر روش‌ها

۳-۳-۴-۱- گمانه‌های اندازه‌گیری

بدیهی است که آتش سوزی‌های زغالی سطحی به آسانی شناسایی و پایش می‌شوند؛ درحالی‌که یک آتش سوزی زیرزمینی می‌تواند برای مدّت زمان زیادی به فعالیّت خود ادامه بدهد بدون اینکه هیچ‌گونه نشانه‌ی ظاهری از خود در سطح زمین داشته باشد.

قبل از ابداع روش «سنجش از راه دور» یکی از روش‌های شناسایی آتش سوزی‌های زغالی در زیر سطح زمین استفاده از «گمانه‌های پایش» یا «گمانه های اندازه‌گیری» بود که از روش‌های مشهور در این زمینه محسوب می‌شد که نمونه‌ای از یک گمانه اندازه‌گیری در شکل ۳-۱۵ آورده شده است (Gangopadhyay, 2008).

شکل ۳-۱۵: نمونه‌ای از گمانه پایش و اندازه‌گیری گرمایش خودبه‌خودی لایه زغال (Gangopadhyay, 2008)

این روش برای اندازه‌گیری دمای لایه های زغالی مشکوک به گرمایش می‌تواند استفاده شود امّا استفاده از آن در یک ناحیه بزرگ معدنکاری همراه با چند لایه فعال استخراجی عملی نیست.

۳-۴- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در فصل اوّل بیان شد یکی از مخاطراتی که در معادن زغالسنگ جهان نه تنها کاهش محسوسی نیافته، بلکه افزایش نیز داشته است خطر خودسوزی زغالسنگ است.

لذا ارزیابی و تخمین خطر خودسوزی در معادن زغال یک نیاز اصلی و اولیّه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت خودسوزی به حساب می‌آید که باید در تمامی عمر یک معدن صورت پذیرد. به همین خاطر در این فصل با توجه به اقتضای تحقیق حاضر و دسترسی به منابع معتبر علمی، روش‌های مختلف ارزیابی پتانسیل خطر خودسوزی زغال که توسط دانشمندان مختلف از کشورهای مختلف ارائه شده بود جمع‌آوری و ارائه شد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود در سری تحقیقات انجام یافته گذشته، هیچ‌کدام از این روش‌ها تمامی پارامترهای بحرانی و کلیدی را مورد توجه قرار نمی‌دهند و جامعیّت لازم را ندارند. همچنین با دقّت در مطالعات انجام شده قبلی به وضوح آشکار می‌شود که نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه واحد و یک رهیافت اساسی برای ارزیابی قابلیت خطر خودسوزی زغال نمی‌انجامد.

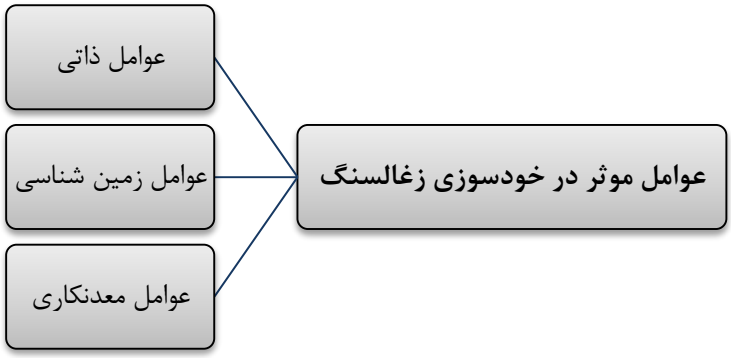
مشکل عمده تحقیقات پیشین، مطالعه جداگانه پارامترهای مؤثر بر قابلیت گرمایش خودبه‌خودی یا بررسی آن‌ها به صورت کیفی است. این در حالی است که قابلیت خودسوزی زغال به پارامترهای بسیار زیادی وابسته است که این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ با هم می‌باشند؛ لذا دست‌یابی به یک روش جامع که بتوان با استفاده از آن قابلیت خودسوزی زغال را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد، یکی از اهداف کلیدی محقّقان علم زغال به شمار می‌رود که لازمه آن شناخت و بررسی پارامترهای تأثیرگذار در این پدیده است که در فصل چهارم به بررسی این موارد پرداخته خواهد شد.

فصل ۴: بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر خودسوزی زغالسنگ

۴-۱- مقدمه

به جرأت می‌توان گفت مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغالسنگ مشخصات مربوط به عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری است (شکل ۴-۱). پارامترهای ذاتی به عنوان اصلی‌ترین پارامترها نقش بسیار اساسی در گرمایش خودبه‌خودی زغال دارند. بنابراین شناخت نحوه تشکیل زغالسنگ می‌تواند کمک مهمّی در این زمینه کرده باشد. در این تحقیق، از آنجایی که هدف بررسی قابلیت خودسوزی زغالسنگ و ارائه سیستم طبقه‌بندی مهندسی در این زمینه است لذا به بررسی همه جانبه پارامترهای مختلف بر اساس منابع معتبر موجود پرداخته شده است.

تاکنون متخصّصان متعدّدی از کشورهای مختلف به بررسی نقش و تأثیر پارامترهای مختلف بر خودسوزی زغالسنگ پرداخته‌اند. مطالعات انجام شده پیشین و منابع معتبر در دسترس (جدول ۳-۱) به طور مناسبی تأثیر پارامترهای مختلف را بر خودسوزی زغالسنگ مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند. نتایج اکثر این تحقیقات به صورت یک گراف ارائه شده است. از مهم‌ترین ایرادات مطالعات مذکور می‌توان به این نکته اشاره کرد که تمامی این مطالعات ترکیب تأثیرات پارامترهای مختلف در خودسوزی زغالسنگ را مطالعه نکرده و هیچ‌گونه بحثی بر روی درجه اهمیت هر یک از پارامترها انجام نداده‌اند.



شکل ۴-۱: عوامل موثر بر خودسوزی زغالسنگ

در ادامه این فصل نحوه تشکیل زغالسنگ و مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی

آن به طور تفصیلی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۴-۲- نحوه شکل‌گیری زغالسنگ

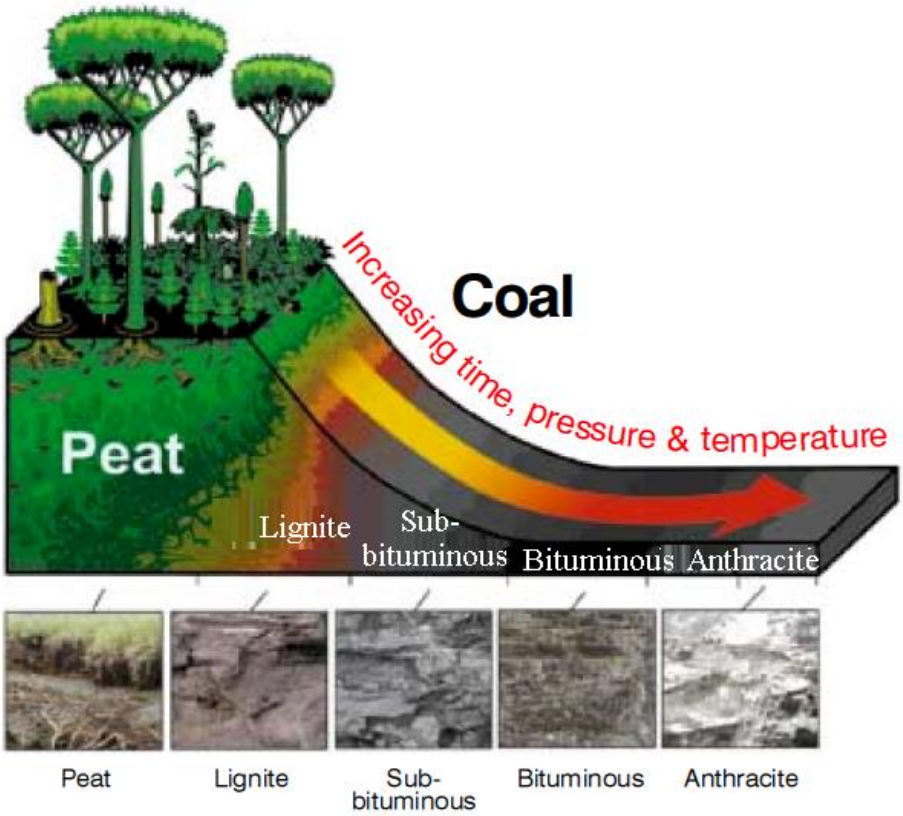
زغالسنگ ماده‌ای غیر متجانس است که از تجزیه گیاهان تحت شرایط مختلف از نظر رطوبت، حرارت و فشار به وجود می‌آید و به عنوان یکی از پراستفاده‌ترین سوخت‌های فسیلی که به سهولت می‌سوزد و بیش از ۵۰٪ از وزنش را مواد کربن‌دار تشکیل داده است بر اثر دگرگونی بقایای گیاهی، تحت فشار، حرارت و با گذشت زمان در طی میلیون‌ها سال به وجود آمده است. در ابتدا بقایای گیاهی در حوزه های باتلاقی رسوب کرده و تشکیل اسید هیومیک[1]، و پس از آن تشکیل زغالسنگ نارس یا تورب[2] را می‌دهند.

زمان، گرما و فشار ۳ عامل تعیین کننده در درجه زغال‌شدگی هستند. بسته به نوع گیاه، میزان تجزیه و شرایط محیط، محصولی که تولید می‌شود یکسان نبوده بلکه از طیف گسترده‌ای برخوردار می‌باشد که با افزایش میزان کربن، زغال‌ها به انواع لیگنیت[3] (زغال قهوه‌ای- نارس)، ساب بیتومینه[4] (زغال نیمه قیری)، بیتومینه[5] (زغال قیری)، آنتراسیت[6] (زغال سخت) و نهایتاً گرافیت[7] تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۷۸) که در شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ مجموعه فرآیند زغال‌شدگی آورده شده است.

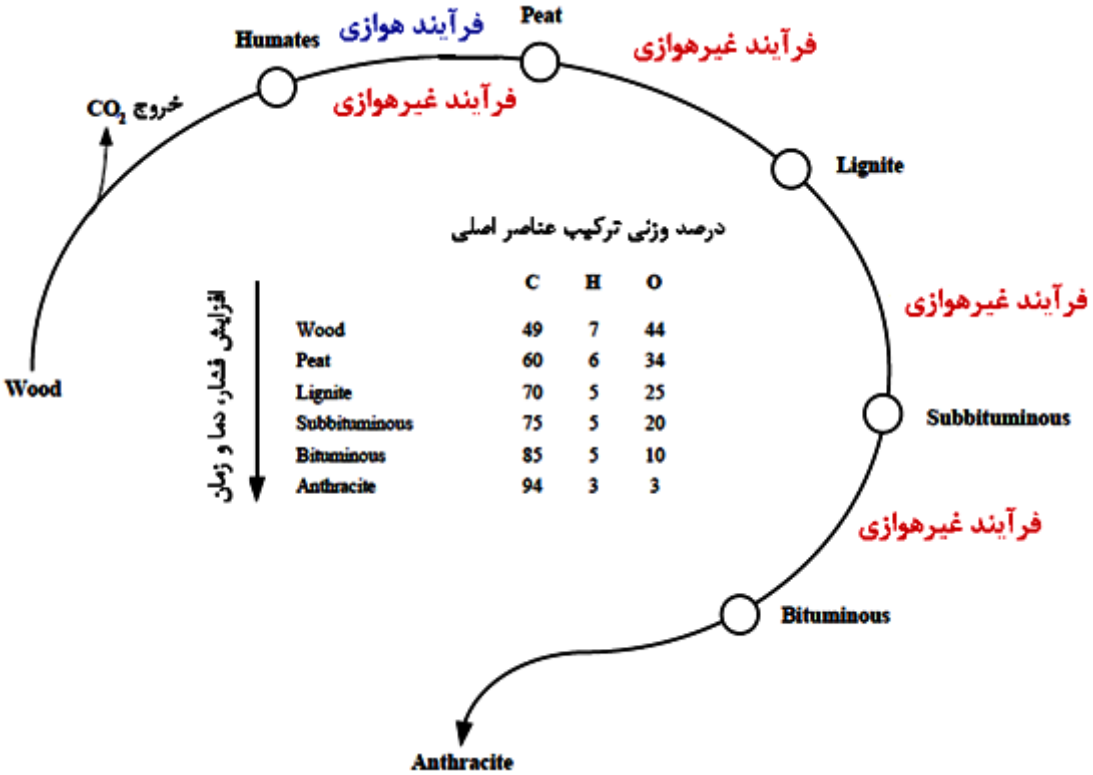
خواص فیزیکی زغال مانند رنگ، وزن مخصوص، سختی و غیره به طور قابل ملاحظه‌ای در انواع مختلف زغال‌ها متفاوت است. این اختلاف‌ها به ترکیب، نوع مواد گیاهی، میزان فشار و حرارتی که در شکل‌گیری زغال نقش داشته‌اند بستگی دارد. مقدار ناخالصی‌ها در زغال به خاک و سیلت (لای سنگ) که با مواد اصلی ترکیب شده‌اند و مقدار زمان، گرما و فشاری که در شکل‌گیری زغال نقش داشته‌اند

[1] - Acid Humic
[2] - Peat
[3] - Lignite
[4] - Sub-Bituminous
[5] - Bituminous
[6] - Anthracite
[7] - Graphite

بستگی دارد (اصانلو، ۱۳۷۸؛ یزدی، ۱۳۸۲).



شکل ۴-۲: مراحل تشکیل زغال (Greb et al., 2006)



شکل ۴-۳: نمای کلی از مجموعه مراحل زغال‌شدگی (Todes, 1936)

به اعتقاد متخصصین ترتیب تشکیل زغالسنگ نیز به نحوی است که در فوق بدان اشاره شده است (پیت تا آنتراسیت) علّت آن است که تاکنون هرگز پیت در زیر لیگنیت یا لیگنیت در زیر بیتومینه پیدا نشده است. این نظریه به واسطه ۲ قانون که به نام قانون‌های هیلث[1] و شورمن[2] که در ادامه آمده است به تأیید رسیده است (اصانلو، ۱۳۷۸).

الف- قانون هیلث: مقدار کربن در زغال با افزایش عمق، افزایش پیدا می‌کند اما مقدار مواد فرار[3] کاهش می‌یابد.

ب- قانون شورمن: مقدار آب و رطوبت زغال با افزایش عمق کاهش می‌یابد.

۴-۳- بررسی عوامل مؤثر بر احتراق خودبه‌خودی زغالسنگ

تمامی لایه‌های زغالی، کم و بیش تمایل به احتراق خودبه‌خودی و خودسوزی دارند و بررسی این که این لایه‌ها در چه وضعیتی قرار دارند مهم است و اهمیت این مسأله بستگی به شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر این پدیده دارد (Uludag, 2001).

دلیل اصلی در درک مشکل مکانیزم احتراق خودبه‌خودی، بجزء تمایل طبیعی زغالسنگ به گرمایش، حضور تعدادی پارامتر مهم داخلی و خارجی تأثیرگذار بر شروع و گسترش این پدیده است که بر گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ تأثیرگذار می‌باشند. این عوامل عمدتاً در ۳ گروه اصلی تقسیم بندی می‌شوند که در این بخش ارائه شده است.

[1] - Hilts Rule
[2] - Schurman Rule
[3] - Volatile Material

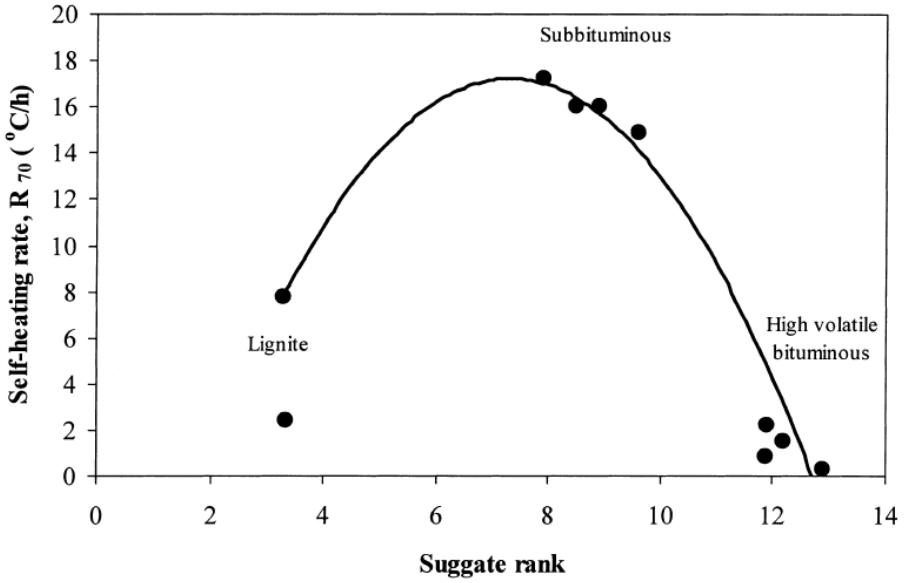
۴-۳-۱- عوامل مؤثر بر احتراق خودبه‌خودی زغالسنگ

۴-۳-۱-۱-عوامل ذاتی

الف- درجه زغال‌شدگی[1] (نوع زغال)

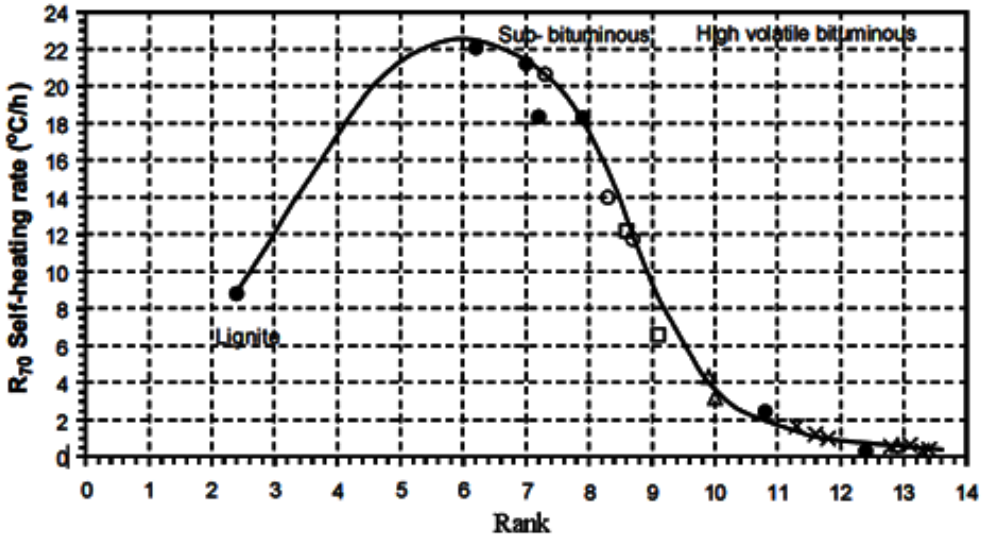
گرمایش خودبه‌خودی زغال یک پدیده وابسته به نوع زغال است به طوری که زغالسنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی نسبت به زغالسنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی، مستعدتر برای احتراق خودبه‌خودی هستند و استخراج، انباشت و حمل و نقل این نوع از زغال‌ها مدیریت و برنامه‌ریزی خاصی را طلب می‌کند (Kaymakci & Didari, 2002; Beamish, 2005; Beamish et al., 2013)

همان طور که در شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ نشان داده شده است درجه زغال‌شدگی تأثیر مهمی بر روی گرمایش خودبه‌خودی زغال دارد به طوری که هرچه درجه زغال‌شدگی پایین‌تر باشد تمایل زغال برای گرمایش خودبه‌خودی بیشتر از زغال‌های با درجه بالای زغال‌شدگی است (Beamish et al., 2001; Beamish, 2005).



شکل ۴-۴: ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و نرخ گرمایش خودبه‌خودی R_{70} (Beamish et al., 2001)

[1] - Rank of Coal



شکل ۴-۵: ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و نرخ گرمایش خودبه‌خودی R_{70} (Beamish, 2005)

همان‌طور که در شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود با افزایش درجه زغال‌شدگی، نرخ گرمایش خودبه‌خودی R_{70} (شاخص R_{70} همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در زمینه شاخص خودسوزی زغال می‌باشد) کاهش می‌یابد به طوری که در زغال‌های آنتراسیت این مقدار به کمترین میزان خود می‌رسد و در زغال‌های Sub-bituminous این مقدار به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

با کاهش درجه زغال‌شدگی، رطوبت محتوی، اکسیژن محتوی، مواد فرار، هیدروژن محتوی و سطح تأثیر داخلی زغال همگی افزایش می‌یابند. افزایش هر یک از این عوامل باعث افزایش سرعت اکسیداسیون می‌شود که تمایل به خودسوزی زغال را افزایش می‌دهند. درحالی‌که زغال‌های با درجه بالای زغال‌شدگی حاوی درصد بالایی از کربن و درصد کمی از اکسیژن و هیدروژن هستند (Nelson & Chen, 2007). بنابراین زغال‌های از نوع لیگنیت و ساب بیتومینه نسبت به زغال‌های بیتومینه و آنتراسیت تمایل بیشتری به خودسوزی دارند و دارای فرآیند اکسایش بسیار سریع‌تری هستند، درحالی‌که زغال‌های با درجه بالای زغال‌شدگی مانند آنتراسیت فرآیند اکسیداسیون آهسته‌ای دارند (Kuchta et al, 1980; Nelson & Chen, 2007).

علاوه بر این، زغال‌های با درجه پایین زغال‌شدگی اغلب دارای تخلخل بیشتری نسبت به

زغال‌های با درجه بالای زغال‌شدگی هستند و بنابراین سطح بیشتری در معرض اکسیژن و فرآیند اکسیداسیون قرار دارد. همچنین زغال‌های با درجه پایین زغال‌شدگی دارای زنجیره‌های هیدروکربنی طولانی‌تری هستند که آن‌ها را در مقایسه با زغال‌هایی مثل آنتراسیت که دارای ترکیب‌های هیدروکربنی کوتاه‌تری هستند کم مقاومت‌تر می‌سازد (Sujanti et al., 1999).

با این حال نرخ اکسیداسیون برای زغال‌های در یک درجه یکسان، ممکن است دارای اختلاف زیادی باشد که این امر بستگی به سایر عوامل مؤثر در گرمایش خودبه‌خودی زغال دارد (Sujanti & Zhang, 1999; Kaymakci & Didari, 2002).

در یک کار تحقیقاتی که در دانشگاه Queensland استرالیا در سال ۲۰۰۸ میلادی توسط Beamish و Arisoy انجام شد تعداد ۱۰ نمونه زغالی که مشخصات نمونه‌های زغالی در جدول ۴-۱ آورده شده است بر اساس روش R_{70} مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج حاصل در شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ آورده شده است.

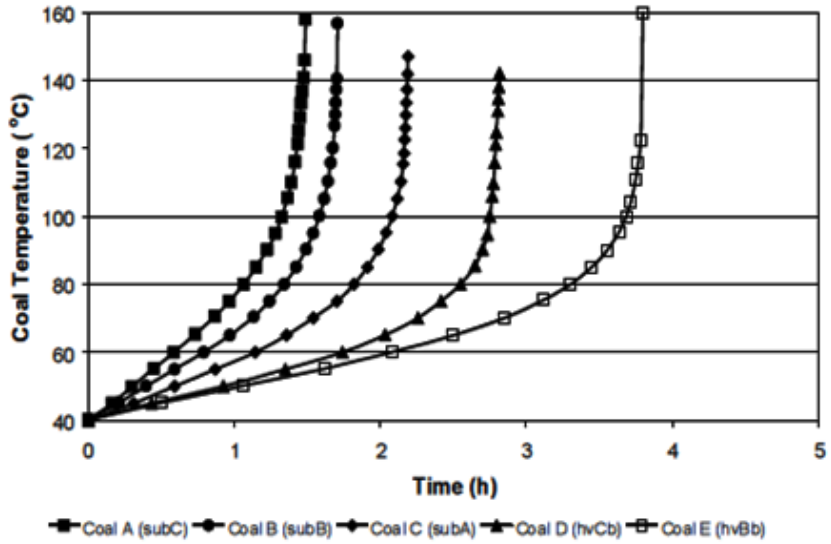
جدول ۴-۱: نمونه‌های زغالی مورد آزمایش در دانشگاه Queensland استرالیا (Beamish & Arisoy, 2008)

ASTM Rank	انرژی حرارتی (Btu/lb)	مواد فرار (٪) Volatile Matter (%)	خاکستر (٪) Ash (%)	نمونه
subC[1]	9311	48.9	2	Coal A
subB	10235	50.5	2.1	Coal B
subA	11188	45.1	1.8	Coal C
hvCb	11635	46.7	1.3	Coal D
hvBb[2]	13084	42.8	3.1	Coal E
hvBb	13999	40.8	5.4	Coal F
hvAb	14488	35	4.5	Coal G
hvAb	14827	31.4	15.7	Coal H

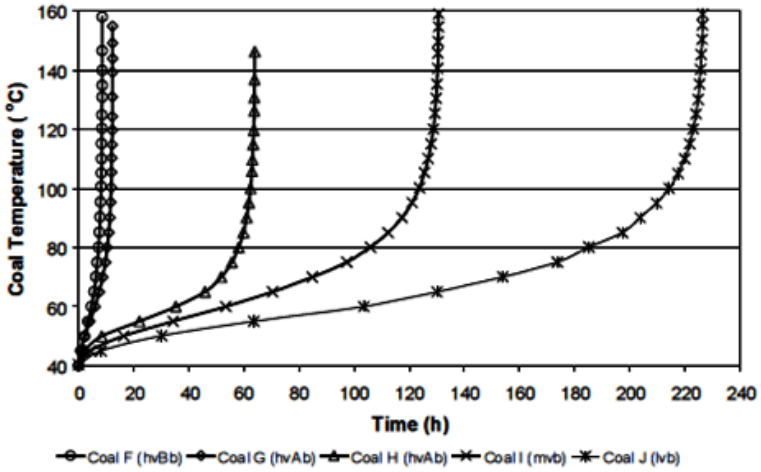
[1] - sub-bituminous C
[2] - high volatile B bituminous

mvb[1]	15404	20.6	10.1	Coal I
lvb[2]	15500	14.8	6.8	Coal J

نمونه‌های زغالی که دارای درجه زغال‌شدگی بالاتری هستند بعضاً تا ۲۴۰ ساعت (۱۰ روز) برای رسیدن به دمای مورد نظر آزمایش R_{70} مورد آزمایش قرار گرفته‌اند یعنی هرچه درجه زغال‌شدگی افزایش می‌یابد تمایل زغال به گرمایش خودبه‌خودی و در نتیجه خودسوزی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۴-۶: ارتباط درجه زغال‌شدگی نمونه‌های زغالی A تا E جدول ۴-۱ با افزایش دما (Beamish & Arisoy, 2008)

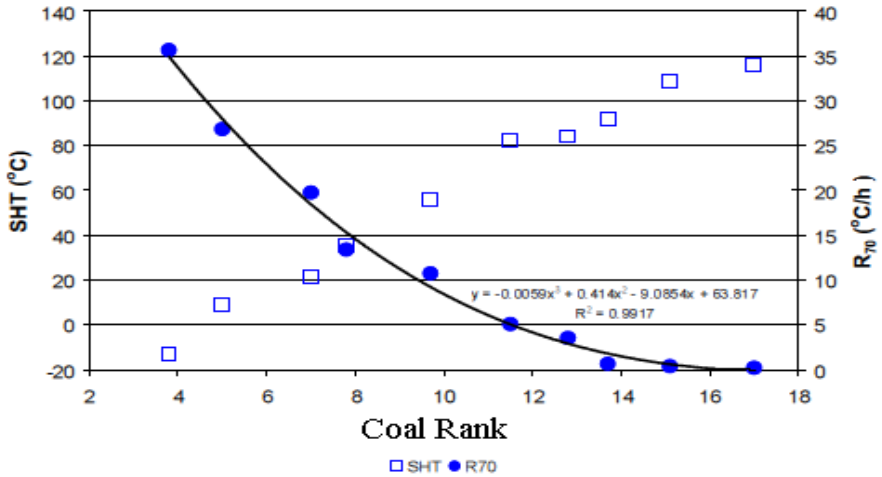


شکل ۴-۷: ارتباط درجه زغال‌شدگی نمونه‌های زغالی F تا J جدول ۴-۱ با افزایش دما (Beamish & Arisoy, 2008)

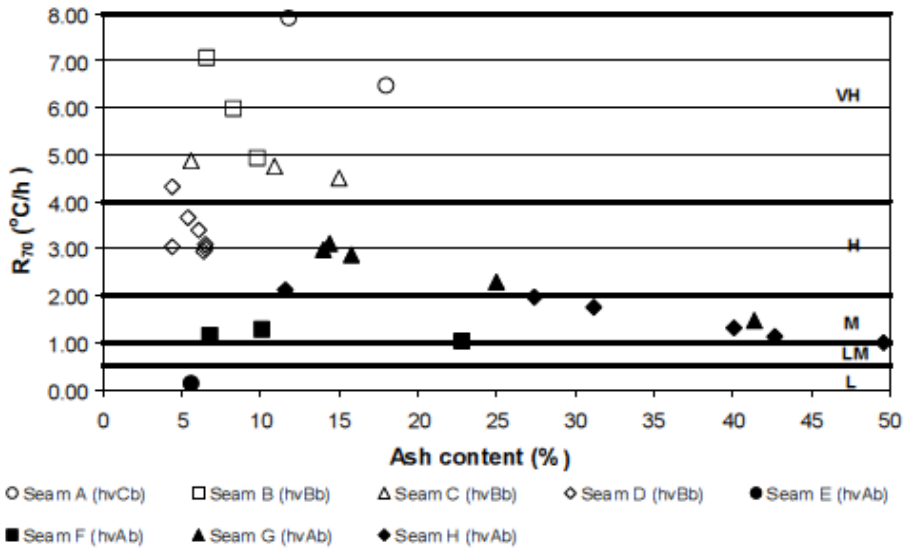
[1] - medium volatile bituminous
[2] - low volatile bituminous

همچنین در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود که با افزایش درجه زغال‌شدگی، میزان R_{70} کاهش می‌یابد و حداقل دمای گرمایش خودبه‌خودی افزایش می‌یابد یعنی هرچه درجه زغال‌شدگی افزایش می‌یابد تمایل زغال به گرمایش خودبه‌خودی و در نتیجه خودسوزی کاهش می‌یابد و برعکس.

ارتباط بین میزان خاکستر محتوی، نوع زغال و شاخص R_{70} در شکل ۴-۹ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه میزان خاکستر محتوی افزایش می‌یابد میزان R_{70} کاهش می‌یابد یا به عبارت دیگر هرچه میزان خاکستر محتوی نمونه‌های زغالی بیشتر باشد مدّت زمان بیشتری برای رسیدن به شاخص R_{70} لازم است و میزان خاکستر محتوی با گرمایش خودبه‌خودی زغال رابطه عکس دارد (Beamish & Arisoy, 2008).



شکل ۴-۸: ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و شاخص‌های خودسوزی زغال SHT و R_{70} (Beamish & Arisoy, 2008)



شکل ۴-۹: ارتباط بین خاکستر محتوی نمونه‌های زغالی جدول ۴-۱ و شاخص R_{70} (Beamish & Arisoy, 2008)

ب- پیریت محتوی[1]

نقش پیریت (FeS_2) موجود در زغال در تأثیر آن بر پدیده خطر خودسوزی زغال به عنوان یک عامل اصلی و شتاب دهنده سال‌ها است که مطرح می‌باشد و توسط محقّقین مختلفی بر این موضوع تأکید شده است (Kaymakci & Didari, 2002).

پیریت از ۲ جهت به افزایش خودسوزی زغال کمک می‌کند (Nelson & Chen, 2007):

۱- به عنوان یک کاتالیزور و شتاب دهنده در واکنش اکسایش شرکت می‌کند.

۲- پیریت در رطوبت موجود در هوا اکسید شده و به عنوان عاملی برای فراهم کردن منبع گرمایی دوم عمل می‌کند و باعث تسریع در فرآیند گرمایش زغال می‌شود.

پیریت، ممکن است در لایه‌های زغال به صورت رگه‌هایی کریستاله و بلورین یا به صورت مواد دانه ریز حضور داشته باشد. زمانی که پیریت به صورت یک رگه در لایه زغال قرار دارد سطح کمی از زغال در معرض واکنش با اکسیژن قرار می‌گیرد و در نتیجه گرمایش خودبه‌خودی زغال کم است. اما زمانی که پیریت به صورت مواد دانه ریز در زغال وجود دارد سطح بزرگ‌تری از زغال در معرض واکنش با اکسیژن قرار می‌گیرد که باعث تولید گرمای زیادی می‌شود (MDG 1006, 2011).

[1] - Pyrite Content

پیریت باعث تولید گرما از طریق اکسایش هوازی می‌شود و گرمای تولید شده از اکسیداسیون پیریت باعث افزایش دمای زغال می‌شود و همچنین سرعت اکسیداسیون را زیاد می‌کند و همچنین باعث افزایش حجم شکستگی‌ها در زغال و در نتیجه افزایش سطحی که در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد، می‌شود. معمولاً باید پیریت در تمرکزهای بیشتر از ۲ درصد در زغال وجود داشته باشد تا در پدیده گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی زغال نقش به سزایی ایفا کند (MDG 1006, 2011).

Beamish و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی به بررسی تأثیر پیریت در خودسوزی زغال با استفاده از روش آزمایش R_{70} پرداختند. نتیجه‌گیری کار آن‌ها این بود که با افزایش میزان پیریت محتوی نمونه‌های زغالی سرعت واکنش گرمایش خودبه‌خودی زغال افزایش می‌یابد.

واکنش پیریت در پدیده گرمایش خودبه‌خودی به صورت معادله (۴-۱) است.

$$FeS_2+8H_2O+7O_2 \rightarrow FeSO_4 .7H_2O+SO_4^{2-} +2H^+ \quad (۴-۱)$$

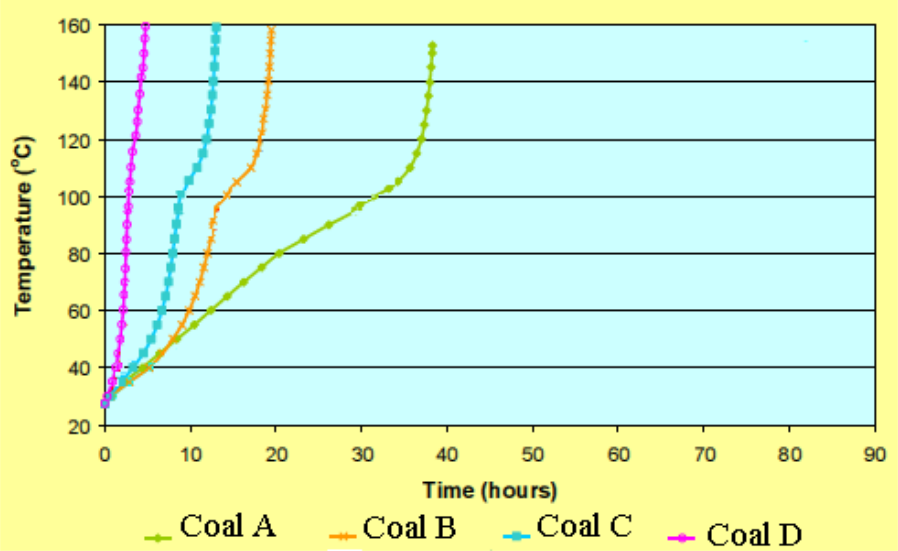
این واکنش به شدت گرمازا است و نتیجه آن تولید سولفات هیدرات می‌باشد که می‌توان نمونه‌ای از کریستال‌های آن را در سطح زغال در شکل ۴-۱۰ مشاهده کرد (Beamish et al., 2012).

شکل ۴-۱۰: نمونه‌ای از کریستال‌های سولفات هیدرات حاصل از واکنش پیریت که در سطح زغال مشاهده می‌شود (Beamish et al., 2012)

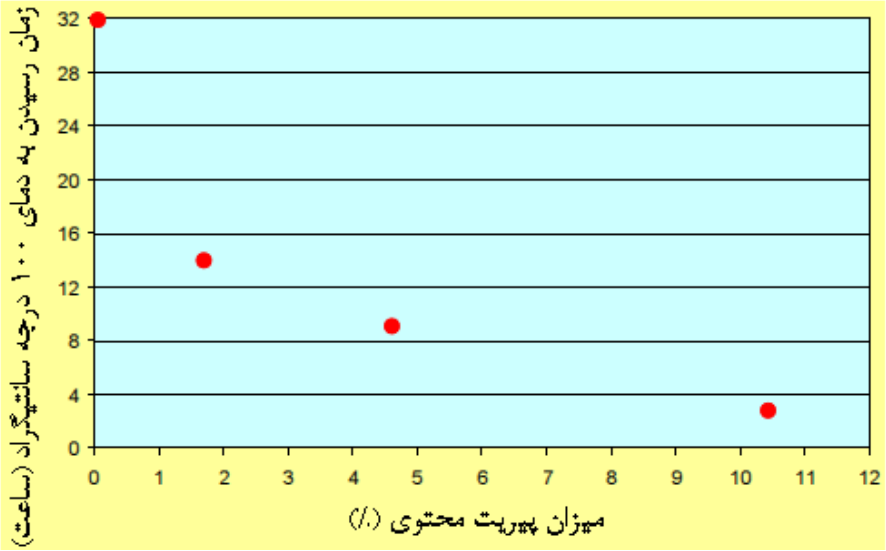
در جدول ۴-۲، شکل ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۲ نتایج حاصل از کارهای انجام شده توسط Beamish و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد پیریت محتوی، سرعت واکنش گرمایش خودبه‌خودی دارای سرعت بیشتری است.

جدول ۴-۲: پیریت محتوی نمونه‌های زغالی نواحی معدنی Bowen Basin در Queensland استرالیا (Beamish et al., 2012)

نمونه زغال	پیریت محتوی (٪)
نمونه زغالی A	0.06
نمونه زغالی B	1.7
نمونه زغالی C	4.61
نمونه زغالی D	10.43



شکل ۴-۱۱: ارتباط بین زمان و دمای نمونه‌های زغالی با درصدهای مختلف میزان پیریت محتوی (Beamish et al., 2012)



شکل ۴-۱۲: ارتباط بین میزان پیریت محتوی و زمان رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (Beamish et al., 2012)

ج- رطوبت محتوی[1]

واژه رطوبت به آب‌های آزاد سطح[2]، بخارهای جذب شده در سطح و یا حتی درون اجزای زغالسنگ، داخل درزه، ترک، شکاف یا منافذ داخلی و آب مولکولی زغال اطلاق می‌شود. تمام زغالسنگ‌ها دارای رطوبت ذاتی هستند به طوری که مقدار آن بستگی به نوع زغال و درجه تکامل آن دارد. میزان رطوبت محتوی در لیگنیت تا ۲۰ درصد و در بیتومینه تا ۱۹ درصد وزنی و در آنتراسیت بین ۱-۲ درصد را رطوبت تشکیل می‌دهد (اصانلو، ۱۳۷۸؛ یزدی، ۱۳۸۲). رطوبت محتوی لایه زغال همچنین بستگی به نفوذپذیری و درجه اشباع شدگی لایه زغال دارد. اگر رطوبت از لایه زغال تخلیه شود، فضای خالی شده با گاز پر می‌شود (MDG 1006, 2011).

تغییرات در میزان رطوبت محتوی زغال یعنی خشک یا خیس بودن زغالسنگ، تأثیر آشکاری در استعداد زغال برای گرمایش خودبه‌خودی دارد. به طور کلی، وجود رطوبت در زغال باعث افزایش تمایل به گرمایش خودبه‌خودی می‌شود (Banerjee, 1985; Kaymakci & Didari, 2002).

تأثیر رطوبت در احتراق خودبه‌خودی زغال به ۲ طریق است:

۱- تبخیر رطوبت باعث مصرف انرژی می‌شود که این عمل مانع از ایجاد فرآیند گرمایش خودبه‌خودی می‌شود (Banerjee, 1985).

۲- استعداد گرمایش خودبه‌خودی زغال با مرطوب سازی زغال افزایش می‌یابد (Jones, 2001) همان‌طور که در معادله (۴-۲) مشاهده می‌شود واکنش رطوبت با زغال باعث تولید گرما و حرارت می‌شود.

$$\text{Dry coal} + \text{moisture} \rightarrow \text{wet coal} + \text{heat} \qquad (۴-۲)$$

رطوبت هم می‌تواند باعث کاهش حرارت و هم افزایش حرارت شود که بستگی به شرایط معدن دارد. تبخیر آب از سطح نیاز به گرما دارد که تحت عنوان «گرمای نهفته تبخیر» نامیده می‌شود. این گرما از سطح جامد گرفته می‌شود، که نتیجه آن خنک‌سازی و کاهش دمای سطح زغال می‌شود. از

[1] - Moisture Content
[2] - Loosely Water

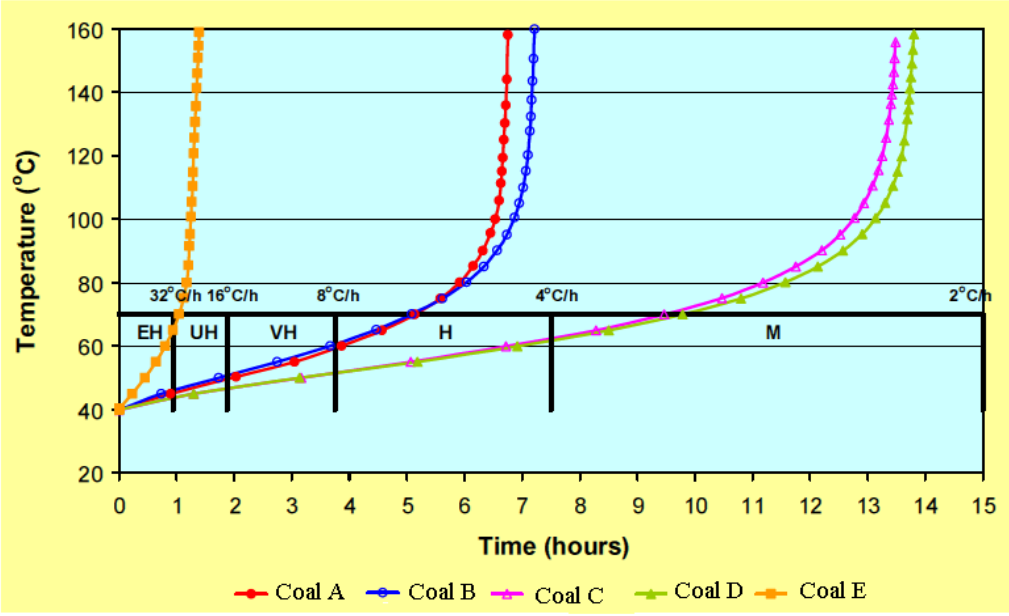
طرف دیگر، اگر بخار آب بر روی سطح زغال تغلیظ شده و تبدیل به مایع شود، گرمای میعان (مخالف تبخیر) باعث افزایش دمای سطح زغال می‌شود همچنین خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال ممکن است توسط گرمای آزاد شده از طریق جذب آب به داخل زغال افزایش یابد (MDG 1006, 2011).

Beamish و Beamish در سال ۲۰۱۰ میلادی در یک کار تحقیقاتی که در دانشگاه Queensland استرالیا انجام دادند تعداد ۵ نمونه زغالی از معادن نیوزلند، سیدنی استرالیا و اندونزی را برای بررسی تأثیر رطوبت بر قابلیت خودسوزی زغال جمع‌آوری کردند و با استفاده از روش R_{70} مورد آزمایش قرار دادند که مشخصات نمونه‌های زغالی در جدول ۴-۳ آورده شده است. تأثیر میزان رطوبت محتوی بر افزایش دما و قابلیت خودسوزی نیز در شکل ۴-۱۳ آورده شده است.

نتیجه کار آن‌ها نشان داد که زغال‌های با درصد رطوبت محتوی کمتر از ۷ درصد دارای قابلیت خودسوزی متوسط، زغال‌های با درصد رطوبت ۷ تا ۱۲ درصد دارای قابلیت خودسوزی بالا و زغال‌های با درصد رطوبت بیشتر از ۱۲ درصد دارای قابلیت خودسوزی خیلی بالا هستند (Beamish & Beamish, 2010).

جدول ۴-۳: نمونه‌های زغالی مورد آزمایش در دانشگاه Queensland استرالیا (Beamish & Beamish, 2010)

نمونه	رطوبت محتوی (٪)	R_{70} (°C/h)
Coal A	11.7	5.87
Coal B	7.3	5.95
Coal C	3.0	3.18
Coal D	5.0	3.08
Coal E	24.0	28.57



افزایش رطوبت محتوی

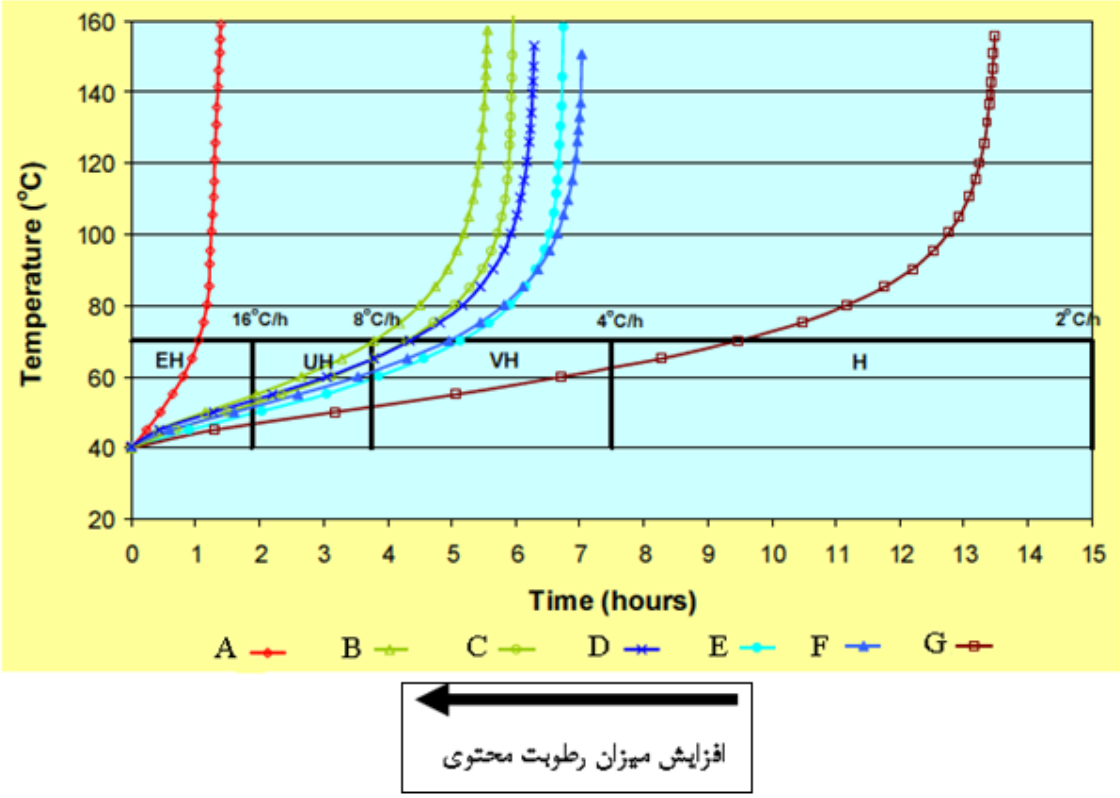
شرایط R_{70} (M = Medium, H = High, VH = Very High, UH = Ultra High, EH = Extremely High)

شکل ۴-۱۳: منحنی‌های گرمایش خودبه‌خودی نمونه‌های زغالی جدول ۴-۳ با درصد رطوبت متفاوت تحت شرایط آدیاباتیک (بی‌دررو) با استفاده از روش آزمایش R_{70} (Beamish & Beamish, 2010)

Beamish و Beamish در سال ۲۰۱۱ میلادی نیز به بررسی ۷ نمونه زغالی با میزان درصد رطوبت متفاوت پرداختند که مشخصات نمونه‌های زغالی و نتایج حاصل از آزمایش R_{70} به ترتیب در جدول ۴-۴ و شکل ۴-۱۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان رطوبت محتوی، دمای زغال نیز با سرعت بیشتری افزایش یافته و دارای تمایل بیشتری برای گرمایش خودبه‌خودی هست.

جدول ۴-۴: نمونه‌های زغالی مورد آزمایش برای بررسی تأثیر رطوبت در خودسوزی زغال (Beamish & Beamish, 2011)

نمونه	میزان رطوبت محتوی (٪)	R_{70} (°C/h)
A	24	28.57
B	12	7.98
C	10.9	7
D	6.9	6.83
E	11.7	5.87
F	9.8	6.02
G	3	3.18



شکل ۴-۱۴: تأثیر رطوبت محتوی نمونه های زغالی در پدیده گرمایش خود به خودی زغال (Beamish & Beamish, 2011)

د- ترکیب سنگ شناسی[1] (پتروگرافی)

ترکیب سنگ‌شناسی زغال توسط طبیعت مواد گیاهی اصلی تشکیل دهنده زغال و محیطی که زغال در آن شکل گرفته است تعیین می‌شود. ترکیبات سنگ‌شناسی زغال، ترکیباتی همگن و میکروسکوپی هستند که اصطلاحاً «ماسرال[2]» نامیده می‌شوند (یزدی، ۱۳۸۲).

در حالت کلی، ماسرال‌های زغال با توجه به منشأ اولیه گیاهی‌شان به ۳ گروه اصلی ویترینیت[3]، اکسینیت[4] و اینرتینیت[5] تقسیم می‌شوند که هر کدام از این گروه‌ها به زیر گروه‌های دیگری نیز تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۷۸؛ یزدی، ۱۳۸۲).

روند کلی نشان می‌دهد که تمایل به گرمایش خودبه‌خودی در زغال، با افزایش مقادیر

[1] - Petrographic Composition
[2] - Maceral
[3] - Vitrinite
[4] - Exinite
[5] - Inertinite

«ویترینیت» و «لیپتینیت[1]» افزایش می‌یابد و با افزایش محتوای اینرتینیت در زغال، تمایل زغال به گرمایش خودبه‌خودی کاهش می‌یابد (Chandra et al., 1990; Walters, 1996).

Liptinite > Vitrinite >> Inertinite

اما به نظر می‌رسد که نوع زغال نسبت به ترکیبات سنگ‌شناسی نقش مهم‌تر و مؤثرتری را در پدیده گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی زغال ایفا می‌کند (Walters, 1996).

هـ- خاکستر محتوی[2]

زغالسنگ‌ها حاوی مواد غیر آلی و زائدی مثل رس‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها، کربنات‌ها و غیره هستند که پس از سوختن کامل زغالسنگ، به جا می‌مانند که به خاکستر زغالسنگ معروف هستند (یزدی، ۱۳۸۲).

خاکستر زغال عمدتاً شامل دی اکسید سیلیس (SiO_2)، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسید کلسیم (CaO)، اکسید منیزیم (MgO)، اکسید پتاسیم (K_2O)، اکسید سدیم (Na_2O) و سولفات کلسیم ($CaSO_4$) می‌باشد. علاوه بر کانی‌های فوق‌الذکر رس و سیلت نیز از کمر بالا و کمر پایین زغال یا از قسمت‌های قطع شده زغال در خاکستر مشاهده می‌شوند. تجزیه خاکستر نمونه‌های زیادی از زغالسنگ‌ها نشان می‌دهد که سیلیس درصد قابل توجه‌ای از خاکستر را تشکیل می‌دهد. مقدار خاکستر زغال‌سنگ‌ها بسیار متفاوت و به عوامل متعدّدی بستگی و متوسط محدوده آن بین ۲ تا ۲۵ درصد متغیر است (اصانلو، ۱۳۷۸).

برخی ترکیبات خاکستر مانند آهک، کربنات سدیم (سودا[3]) و ترکیبات آهن دارای یک تأثیر شتاب دهنده در خودسوزی زغال هستند اما میزان آن‌ها در زغال بسیار کم است و تأثیر چندانی ندارند، در صورتی که برخی ترکیبات دیگر مانند اکسید آلومینیوم[4]، سیلیس (سیلیکا[5]) و

[1] - Liptinite (زیر گروه اکسینیت است)
[2] - Ash Content
[3] - Soda
[4] - Alumina
[5] - Silica

کلسیم کلراید[1] که درصد قابل توجه‌ای از خاکستر را تشکیل می‌دهند باعث یک اثر تأخیری و کندکننده در فرآیند اکسایش و خودسوزی زغال دارند (Kaymakci & Didari, 2002).

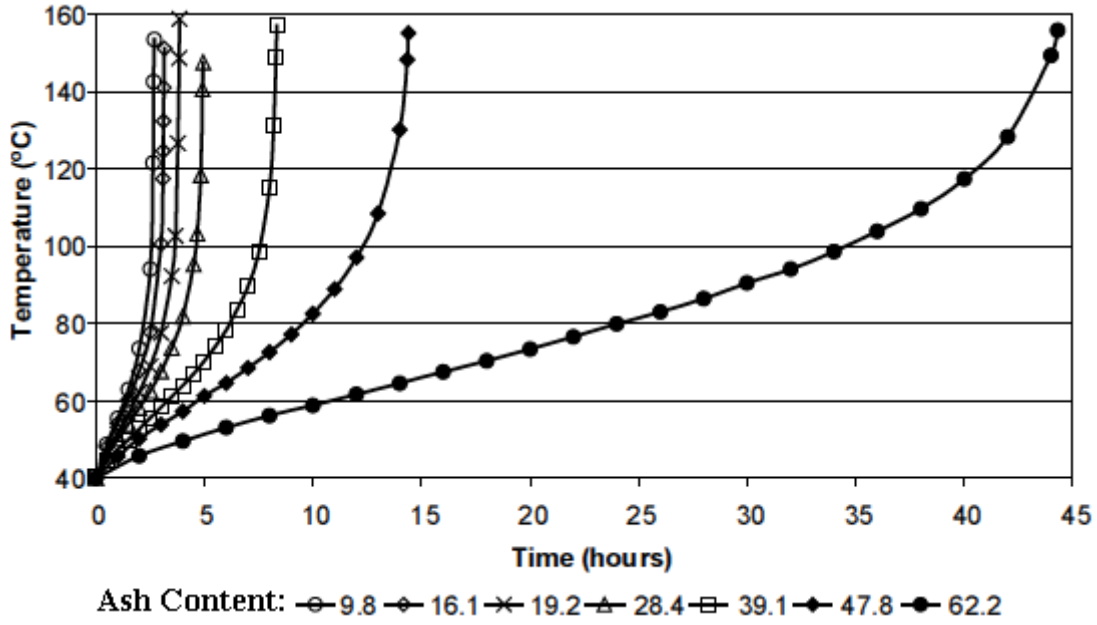
به طور کلی، افزایش درصد خاکستر محتوی در زغال باعث کاهش تمایل زغال به گرمایش خودبه‌خودی می‌شود و مقدار R_{70} کمتری دارند و در نتیجه تمایل به خودسوزی آن‌ها کمتر است (Beamish & Blazak, 2005; Beamish et al., 2005; Beamish & Sainsbury, 2008).

Beamish و Blazak در سال ۲۰۰۵ میلادی، Beamish و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی و Beamish و Sainsbury در سال ۲۰۰۸ میلادی برای بررسی ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و افزایش دمای ناشی از آزمایش R_{70}، نمونه‌های زغالی با درصد ترکیبات خاکستر مختلف را مورد آزمایش قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که هر چه میزان خاکستر محتوی زغال کمتر باشد زغال سریع‌تر به دمای مورد نظر در آزمایش R_{70} می‌رسد و یا به عبارت دیگر میزان خاکستر محتوی با استعداد خودسوزی زغال رابطه عکس دارد یعنی هرچه میزان خاکستر محتوی کمتر باشد استعداد زغال به خودسوزی افزایش می‌یابد و هرچه میزان خاکستر محتوی بیشتر باشد استعداد زغال به خودسوزی کاهش می‌یابد که علّت این امر ناشی از این موضوع است که هرچه میزان خاکستر محتوی نمونه‌های زغالی بیشتر باشد، خاکستر موجود گرمای بیشتری را به خود جذب می‌کند و اجازه نمی‌دهد که دمای زغال افزایش یابد که نتایج کار آن‌ها در جدول ۴-۵ و شکل ۴-۱۵ تا شکل ۴-۱۹ آورده شده است.

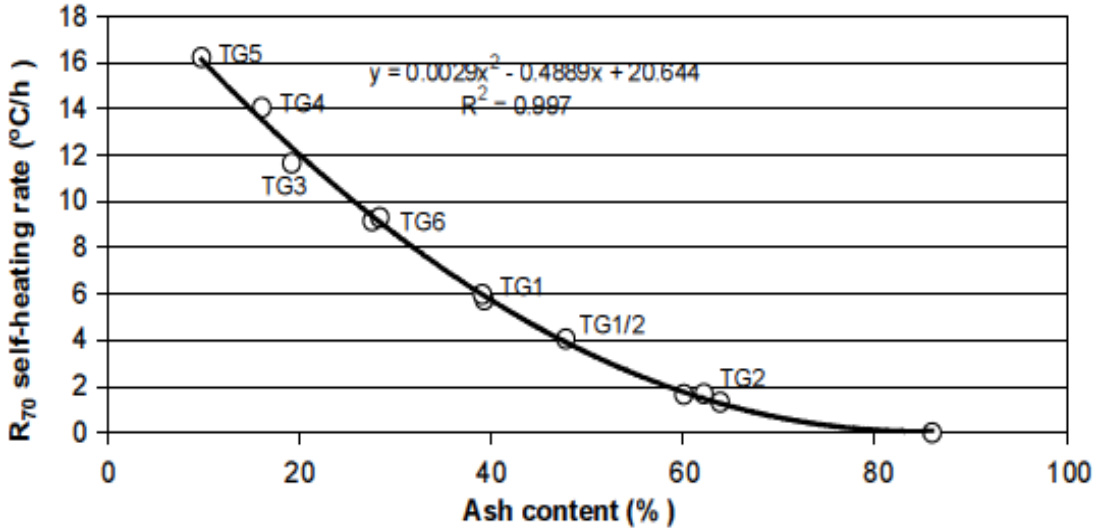
جدول ۴-۵: مشخصات نمونه‌های زغالی ناحیه زغالی Callide (Beamish & Blazak, 2005)

نمونه زغالی	خاکستر محتوی (٪)	مواد فرار (٪)	R_{70} (°C/h)
TG1	39.1	27.8	5.98
TG2	62.2	28	1.69
TG1/2	47.8	27.9	4.06
TG3	19.2	27	11.66
TG4	16.1	27.9	14.05
TG5	9.8	27.2	16.22
TG6	28.4	27.7	9.31

[1] - Calcium Chloride



شکل ۴-۱۵: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و زمان رسیدن به دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد (Beamish & Blazak, 2005)



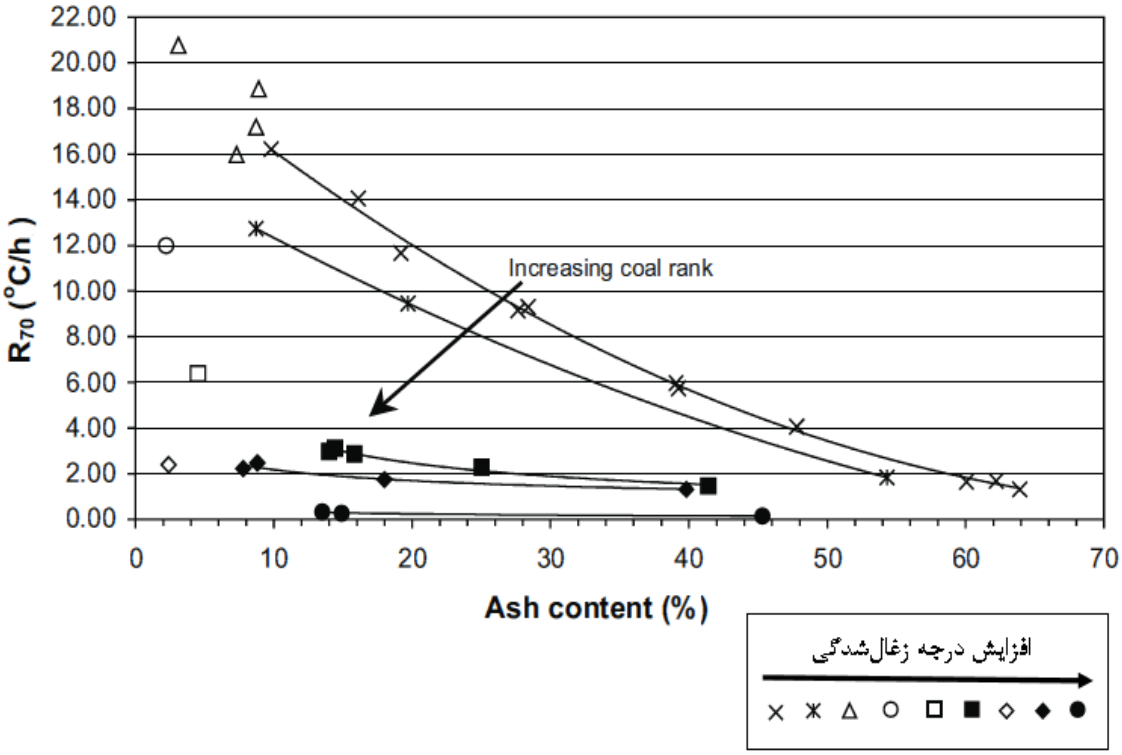
شکل ۴-۱۶: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و نرخ گرمایش خودبه‌خودی R_{70} (Beamish & Blazak, 2005)

از شکل ۴-۱۶ چنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان خاکستر محتوی نمونه‌های زغالی نرخ گرمایش خودبه‌خودی کاهش می‌یابد.

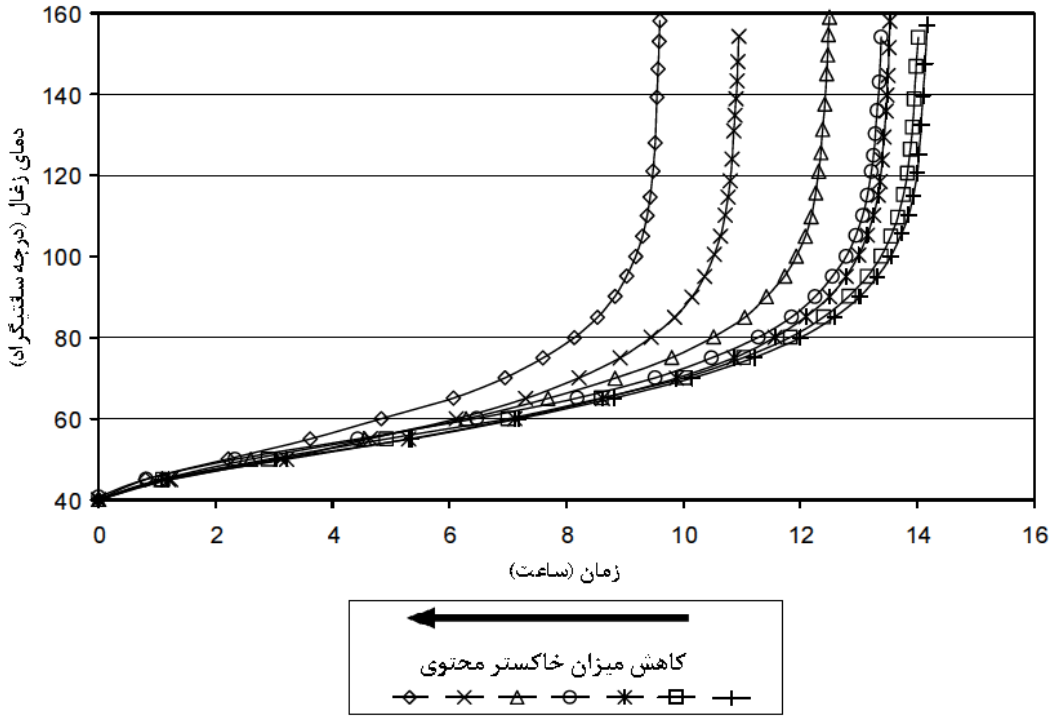
Beamish و Blazak در سال ۲۰۰۵ میلادی برای ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و نرخ گرمایش خودبه‌خودی R_{70} یک معادله درجه ۲ را برازش کردند که این رابطه با معادله (۴-۳) بیان می‌شود.

$$R_{70} = 0.0029 \times Ash^2 - 0.4889 \times Ash + 20.644$$
$$R^2 = 0.997 \qquad (۳-۴)$$

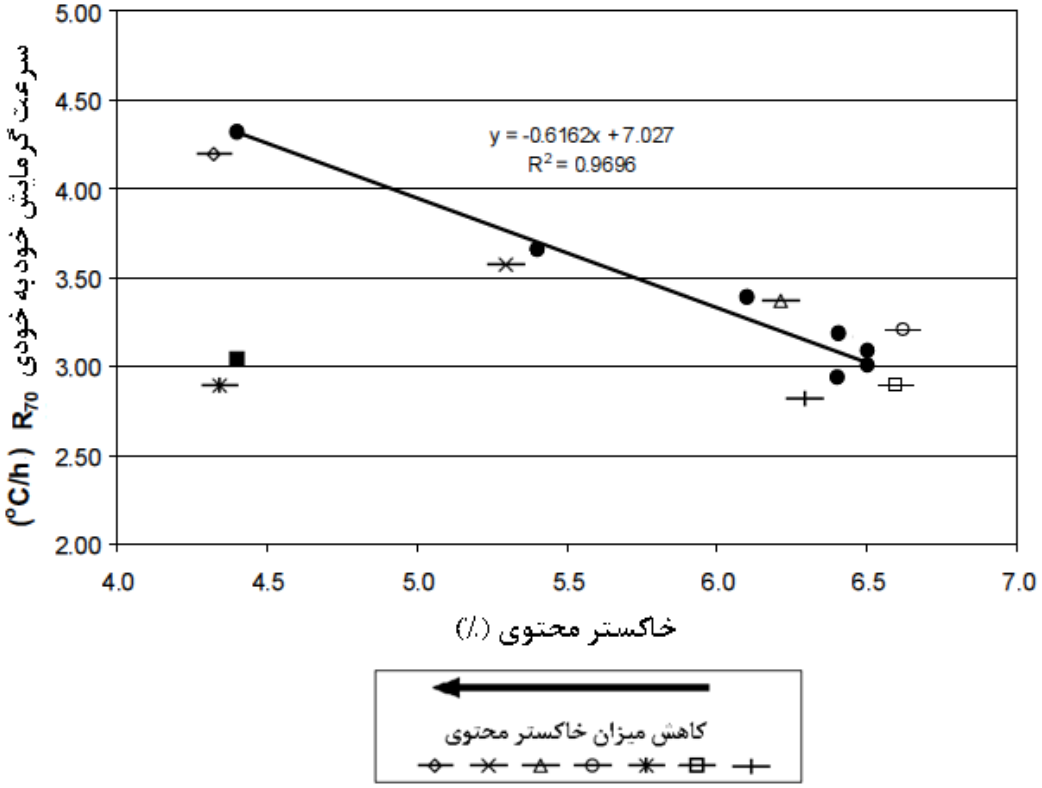
Beamish و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی همچنین به این نتیجه رسیدند که هرچه درجه زغال‌شدگی بیشتر باشد شیب منحنی آزمایش R_{70} بسیار ملایم‌تر است و نمونه‌های زغالی با درجه بالای زغال‌شدگی استعداد و پتانسیل ضعیف‌تری برای خودسوزی زغال دارند و هرچه درجه زغال‌شدگی کمتر باشد استعداد و پتانسیل زغال برای خودسوزی افزایش می‌یابد که نتیجه کار آن‌ها در شکل ۴-۱۷ آورده شده است.



شکل ۴-۱۷: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی، نوع زغال و سرعت گرمایش خودبه‌خودی آزمایش R_{70} (Beamish et al., 2005)



شکل ۴-۱۸: منحنی‌های آزمایش R_{70} گرمایش خود به خودی آدیاباتیک (بی‌دررو) برای زغال‌ها با درصد خاکستر متفاوت (Beamish & Sainsbury, 2008)



شکل ۴-۱۹: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و سرعت گرمایش خود به خودی آزمایش R_{70} (Beamish & Sainsbury, 2008)

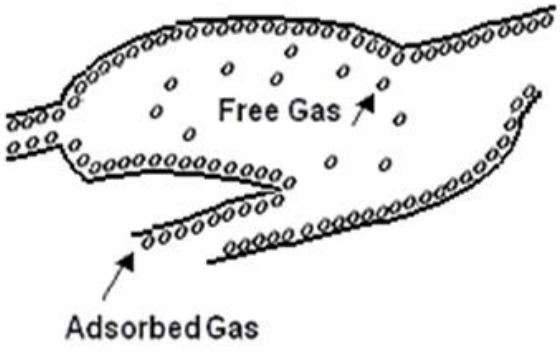
و- گاز خیزی

ساختار زغال از ۲ نوع حفره‌های میکروسکوپیک (کمتر از ۲ نانومتر) و ماکروسکوپیک (بیشتر از ۵۰ نانومتر) تشکیل شده است. ذخیره شدن گاز در درون زغال به ۲ صورت می‌باشد (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵):

۱- به صورت جذب سطحی در روی حفره‌ها و سطوح میکروسکوپی

۲- به صورت گاز آزاد

معمولاً بیش از ۹۵ درصد از گاز زغال به صورت جذب سطحی به شکل لایه‌های تک مولکولی بر روی سطح زغال و کمتر از ۵ درصد به صورت گاز آزاد است (شکل ۴-۲۰). تحقیقات نشان می‌دهد ۱ کیلوگرم زغال بین ۲۰,۰۰۰ تا ۲۰۰,۰۰۰ متر مربع سطح دارد که این سطح می‌تواند تا ۲۵ متر مکعب بر تن ($\frac{m^3}{\text{ton}}$) گاز جذب کند. مکانیزم نگهداری گاز در درون زغال به صورت جذب سطحی است که بستگی زیادی به خلل و فرج میکروسکوپیک دارد زیرا حدود ۸۵ درصد از خلل و فرج به این صورت می‌باشند (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵).



شکل ۴-۲۰: طرز قرارگیری گاز در لایه‌های زغال (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵)

به هنگام تشکیل زغالسنگ بخش قابل توجه‌ای از مواد فرار در اثر حرارت و فشار از مواد تشکیل دهنده زغال خارج می‌شوند. اما با افزایش درجه متامرفیسم و افزایش عمق و فشار در زغال‌های با درجه بالای زغال‌شدگی، این زغال‌ها حاوی گاز بیشتری هستند و عمده ترکیب این گازها را متان تشکیل می‌دهد. حضور گاز و مخصوصاً گاز متان در خلل و فرج و منافذ ریز و درشت لایه

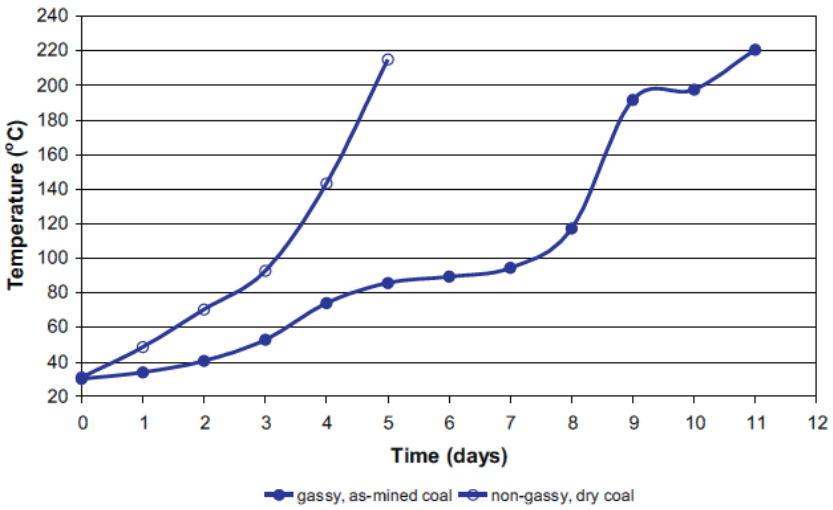
زغال مانعی برای ترکیب اکسیژن با زغال است و فرآیند اکسیداسیون خصوصاً در لایه‌های پر گاز کند می‌شود و به تعویق می‌افتد. بنابراین گاز موجود در لایه یک عامل مهار کننده در پدیده گرمایش و خودسوزی زغالسنگ محسوب می‌شود زیرا گاز موجود در حفرات زغال، اجازه جذب اکسیژن توسط زغال را نمی‌دهد (Beamish & Jabouri, 2005; Ramlu, 2007).

اگر در یک لایه عملیات گاز کشی و گاز زدایی انجام شود، چون حفرات زغال از گاز خالی می‌شوند، ترکیب‌های اکسیژن و زغال شکل می‌گیرند و با گذشت زمان سطح بیشتری از زغال در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد که نتیجه آن گرمایش زغالسنگ و شروع پدیده خودسوزی است (Beamish & Jabouri, 2005; Ramlu, 2007).

زغال‌های حاوی کمتر از ۵ متر مکعب متان در هر تن زغال، نشان‌دهنده سرعت بالای جذب و در آشامی[1] اکسیژن هستند و بیشتر مستعد گرمایش خودبه‌خودی هستند (Ramlu, 2007) درحالی‌که زغال‌های با مقدار گاز متان بالای ۸ متر مکعب متان در هر تن زغال، دچار اکسایش نمی‌شوند (Sujanti et al., 1999).

شکل ۴-۲۱ تأثیر گاز موجود در زغال را بر روی مدّت زمان افزایش دما نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه زغالی گازدار در مقایسه با نمونه زغالی بدون گاز، مدّت زمان بیشتری را برای رسیدن به دمای یکسان نیاز دارد که این موضوع بیانگر این مطلب است که حضور گاز در لایه زغال مانعی برای پدیده گرمایش و خودسوزی زغالسنگ محسوب می‌شود (Beamish & Jabouri, 2005).

[1] - Absorption



شکل ۴-۲۱: تأثیر گاز بر مدت زمان میزان افزایش دما (Beamish & Jabouri, 2005)

ز- تردی[1] (شکنندگی) زغال

در طی عملیات استخراج و معدنکاری، زغالسنگ به قطعات شکسته شده و خرد شده تبدیل می‌شود. پس از خرد شدن زغال، سطح زغال افزایش یافته و سطح بیشتری از زغال در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد و بنابراین خطر خودسوزی زغال نیز افزایش می‌یابد (MDG 1006, 2011).

مناطقی که ممکن است زغال شکسته در آن‌ها یافت شود عبارتند از (MDG 1006, 2011):

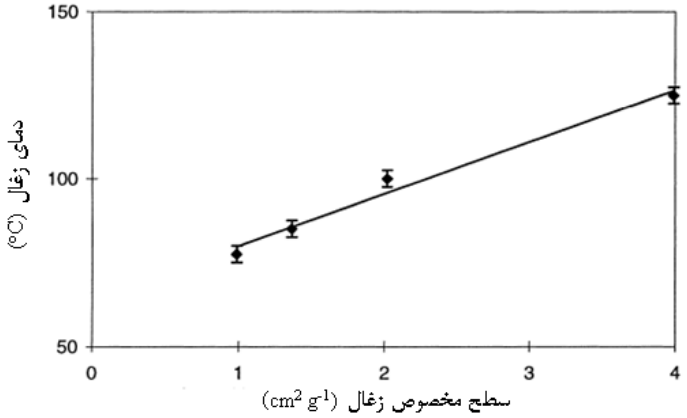
- اطراف پایه‌های شکسته شده
- اطراف درپوش[2] کارگاه‌ها
- مناطق تخریب شده[3]
- اطراف نوار نقاله
- اطراف گسل‌ها و توده‌های نفوذی

تحقیقات نشان می‌دهد که با کاهش اندازه ذرّات و افزایش نرمی و ریزی ذرّات و در نتیجه افزایش سطح تأثیر زغال، جذب بیشتر اکسیژن توسط زغال اتفاق می‌افتد و تمایل زغالسنگ برای احتراق خودبه‌خودی افزایش می‌یابد (Ren et al., 1999; Kaymakci & Didari, 2002).

[1] - Brittleness
[2] - Stopping
[3] - Goaf/Gob

هرچه تردی و شکنندگی زغال بیشتر باشد، زغال دارای شکاف و شکستگی بیشتری می‌شود و در این حالت سطح بیشتری از زغال در معرض جریان هوا و اکسیداسیون قرار می‌گیرد. به طور کلی با افزایش سطح تأثیر، میزان نفوذ هوا به داخل زغال افزایش یافته و تمایل زغال نیز به سمت گرمایش خودبه‌خودی افزایش می‌یابد (Banerjee, 1985).

سرعت اکسیداسیون زغال با سطح تأثیر آن دارای یک رابطه خطی است که در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌شود. بنابراین، زغال‌هایی که دارای تردی و شکنندگی بیشتری هستند سطح تأثیر بزرگ‌تری از آن‌ها در معرض اکسیداسیون قرار دارد، در نتیجه گرمای بیشتری در واحد حجم یکسان از زغال‌های دارای تردی بیشتر انتشار می‌یابد (Sujanti et al., 1999).



شکل ۴-۲۲: ارتباط بین سطح مخصوص زغال و دمای ناشی از گرمایش خودبه‌خودی (Sujanti & Zhang, 1999)

۴-۳-۱-۲- عوامل زمین شناسی

الف- عمق قرارگیری لایه (ضخامت روباره)

ضخامت روباره لزوماً بر روی خطر گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ تأثیر مستقیم ندارد امّا به طور کلی، با افزایش ضخامت روباره، دمای طبیعی لایه زغال افزایش یافته و استعداد و پتانسیل گرمایش خودبه‌خودی لایه زغال زیاد می‌شود. به طور کلی، با افزایش هر ۴۰ متر ضخامت روباره، دمای لایه زغال ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (Banerjee, 1985).

ضخامت بیش از حد روباره، و به طور کلی ضخامت بیش از ۳۰۰ متر، باعث تولید

شکستگی‌های بیشتری در لایه زغال و افزایش خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال می‌شود (Banerjee, 1982; Banerjee, 1985).

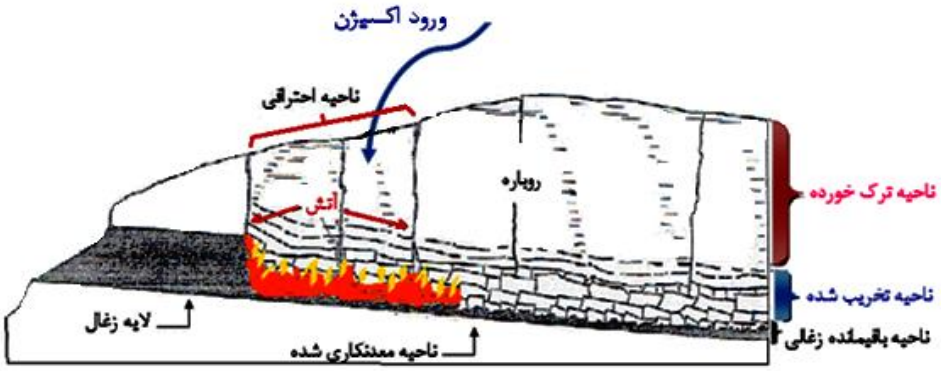
از طرف دیگر ضخامت بسیار کم روباره، و به طور کلی ضخامت کمتر از ۵۰ متر، به ورود هوا از سطح زمین به لایه زغال کمک می‌کند و باعث افزایش خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال می‌شود (Banerjee, 1985).

پس تأثیر عمق قرارگیری لایه را باید از دو دیدگاه بررسی کرد (MDG 1006, 2011):

۱) افزایش عمق باعث افزایش بارگذاری و افزایش بار وارده به پایه‌های زغالی می‌شود که نتیجه آن شکسته شدن و خرد شدن زغال می‌شود که خود یکی از دلایل افزایش خودسوزی زغال است.

۲) کاهش عمق قرارگیری لایه نیز باعث می‌شود که بین درزه و شکستگی‌های سطح و درزه و شکستگی و حفرات بالای لایه ارتباط به وجود آید و باعث شود که جریان هوا از سطح زمین به نواحی استخراج شده نفوذ کند که باعث افزایش خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال می‌شود.

در شکل ۴-۲۳ تأثیر عمق قرارگیری کم لایه و ایجاد درزه و شکستگی در بالای لایه و نفوذ اکسیژن به مناطق استخراج شده و پس از آن خودسوزی زغال‌های باقیمانده در نواحی استخراج شده نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳: نمایی از مناطق مستعد خودسوزی در نواحی معدنکاری شده به دلیل عمق قرارگیری کم لایه (Cao et al., 2007)

ب- ضخامت لایه

هرچه ضخامت لایه زغال بیشتر باشد، سطح بیشتری از زغال در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد و لایه مستعدتر برای خودسوزی است. در لایه‌هایی که ضخامت زغال زیاد است ممکن است تنها قسمتی از ضخامت لایه زغال استخراج شود و بقیه ضخامت لایه در بالا یا پایین در قسمت استخراج شده باقی گذاشته شود که این ضخامت باقی مانده مستعد اکسیداسیون و گرمایش است (Banerjee, 1982; Michaylov, 2002; Singh et al., 2002; MDG 1006, 2011).

از طرف دیگر اگر ضخامت لایه زغال زیاد باشد و باقی گذاشتن آن در قسمت استخراج شده دارای صرفه اقتصادی نباشد باید لایه زغال را در چند برداشت استخراج کرد که در چنین حالتی نرخ پیشروی آهسته است و لایه زغال مدّت زمان زیادی در معرض جریان تهویه هوا قرار دارد که در چنین حالتی نیز، زغال مستعد خودسوزی است (Banerjee, 1982; MDG 1006, 2011).

از طرف دیگر حجم زغال‌های شکسته و خرد شده و ریخته شده بر روی زمین، با افزایش ضخامت لایه زغال افزایش می‌یابد که همان‌طور در بخش تردی زغال نیز گفته شد یکی از عوامل افزایش پتانسیل خودسوزی زغال است (MDG 1006, 2011).

ضخامت لایه، یکنواختی و در نتیجه جا ماندن زغال در سقف یا کف یکی از عوامل بسیار مهم در پدیده احتراق خودبه‌خودی زغال است.

در معادنی که ضخامت لایه زغال زیاد است و کل ضخامت لایه را نمی‌توان در یک بخش یا یک جابجایی استخراج کرد و به طور کلی لایه‌های زغالی با ضخامت بیشتر از ۵ متر (> 5 m) دارای خطر بیشتری از لحاظ احتراق و گرمایش خودبه‌خودی هستند (Banerjee, 1985).

در شکل ۴-۲۴ نمونه‌ای از ضخامت زیاد زغال که در سقف و کف کارگاه باقی گذاشته می‌شود و زغال مدّت زمان زیادی در معرض جریان هوای تهویه قرار می‌گیرد نشان داده شده است.

شکل ۴-۲۴: باقی گذاشتن زغال در سقف و کف کارگاه جبهه کار طولانی مکانیزه (عطائی، ۱۳۹۰)

ج- شیب لایه

روش‌های «اتاق و پایه» و «جبهه کار طولانی» روش‌هایی هستند که در لایه‌های زغال با شیب کم اجرا می‌شوند. لایه‌های با شیب کم، کمتر مستعد گرمایش خودبه‌خودی هستند و هرچه شیب لایه افزایش می‌یابد به دلیل اینکه میزان ضریب استخراج لایه کمتر می‌شود و درصد بیشتری از زغال در سقف و کف کارگاه رها می‌شود خطر خودسوزی زغال افزایش می‌یابد (Michaylov, 2002).

د- وجود گسل در لایه

گسل‌های کوچک و بزرگ ممکن است در سقف و کف کارگاه وجود داشته باشند. هر چه تعداد این گسل‌ها بیشتر باشد، شرایط کار مشکل‌تر شده و راندمان کار کاهش می‌یابد. می‌توان با گرفتن قسمتی از سقف یا کف از گسل‌های کوچک عبور کرد اما گسل‌های بزرگ غیر قابل برش و استخراج هستند و کارهای آماده‌سازی جدیدی را طلب می‌کنند (عطائی، ۱۳۹۰) که کارهای آماده سازی جدید باعث اتلاف زمان و در معرض هوا واقع شدن لایه زغال می‌شود.

گسل‌های بسیار زیاد مشکلات زیادی ایجاد می‌کنند. این گسل‌ها پیشروی را کند می‌کنند. بهترین پهنه‌ها، پهنه‌های وسیع، بی گسل و یا با گسل کم هستند (عطائی، ۱۳۹۰).

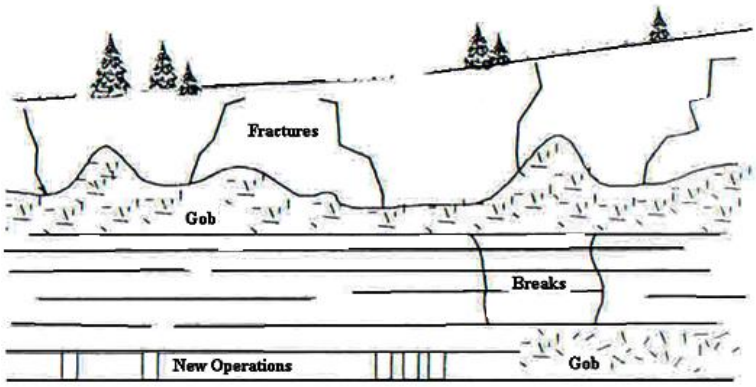
حضور گسل، درزه، زون‌های شکسته در اطراف لایه‌های زغال و مناطق ضعیف اطراف گسل‌ها ممکن است باعث اختلاف فشار تهویه، نشت هوا، ورود اکسیژن به داخل توده زغالی و افزایش تنش در منطقه شوند. از طرف دیگر وجود چنین ساختارهایی مانند گسل‌ها، دایک‌ها، توده‌های نفوذی و درزه و شکستگی‌ها از جمله مناطق ضعیفی محسوب می‌شوند که باعث کاهش نرخ استخراج و سرعت پیشروی می‌شوند. هرچه سرعت استخراج کمتر باشد، نواحی بیشتری از لایه زغال در معرض

جریان هوا قرار می‌گیرد که باعث افزایش پتانسیل خودسوزی زغال می‌شوند (Kaymakci & Didari, 2002; Michaylov, 2002).

هـ- استخراج چند لایه‌ای[1]

خودسوزی زغال یکی از مشکلات غالب در معادن چند لایه‌ای است. استخراج در لایه‌ای که در بالا یا پایین لایه‌هایی دیگر قرار دارد که آن لایه‌ها قابلیت استخراج را دارند یا به خاطر شرایط فیزیکی قابلیت استخراج را ندارند به خاطر شرایط سقف ضعیف، نشت هوا و غیره خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال افزایش می‌یابد. در هر جا که یک موقعیّت چند لایه‌ای وجود دارد، هم در استخراج لایه اوّل و هم در استخراج لایه‌های بالا و پایین خطر گرمایش خودبه‌خودی وجود دارد (Mitchell, 1990).

تنها در صورتی خطر گرمایش خودبه‌خودی رفع می‌شود که فاصله بین لایه‌ها حدود ۳۰ برابر ضخامت لایه باشد. در شکل ۴-۲۵ فضای استخراج شده در لایه بالایی در نزدیکی سطح زمین قرار دارد و از طریق شکستگی‌های موجود با جریان هوا در تماس است. زمانی که در لایه زیرین عملیات استخراجی جدید صورت می‌گیرد لایه زیرین از طریق شکستگی‌های ایجاد شده با فضای استخراج شده لایه بالایی ارتباط پیدا می‌کند که این شکستگی‌ها مسیری را برای وارد شدن اکسیژن از سطح به نواحی استخراج شده فراهم می‌کند که در نتیجه خطر خودسوزی زغال افزایش می‌یابد (Mitchell, 1990).



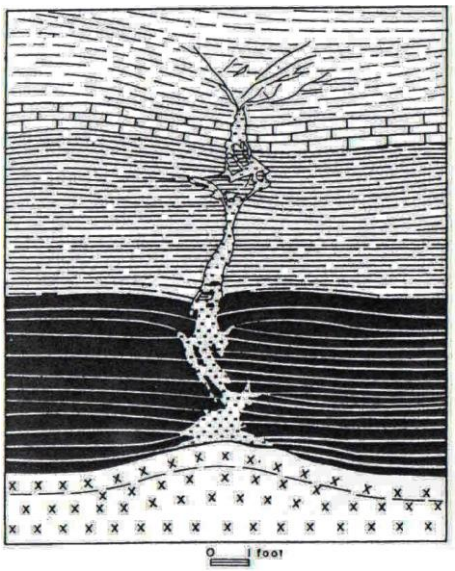
شکل ۴-۲۵: تأثیر استخراج چند لایه‌ای در گرمایش خودبه‌خودی زغال (Mitchell, 1990)

[1] - Multi-seam workings

یک لایه دو بخشی یا چند لایه که در بالا و پایین هم با فواصل کم از همدیگر قرار دارند ممکن است بخشی از لایه‌ها استخراج شوند و لایه‌هایی که دارای کیفیت پایین هستند و یا ضخامت آن‌ها از لحاظ اقتصادی صرفه استخراج را ندارند، استخراج نشوند و لایه زغال استخراج نشده در اثر استخراج لایه یا لایه‌های مجاور دچار شکست شده و خطر ارتباط جریان هوا بین لایه/ های قابل استخراج و لایه/ های غیر قابل استخراج وجود دارد که در این صورت زغال لایه/ های غیر قابل استخراج در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرند. جابجایی هوا بین لایه همچنین به نفوذپذیری و فشار هوا بستگی دارد (MDG 1006, 2011).

و- وجود دایک‌های تخریبی[1]، رگه‌های رسی و ماگمای مذاب

توده‌هایی از مواد تخریبی از جنس رس، سیلت یا ماسه که به صورت شیب دار یا قایم لایه‌های زغالسنگ را قطع می‌کنند دایک تخریبی نامیده می‌شوند (شکل ۴-۲۶) (اصانلو، ۱۳۷۸).

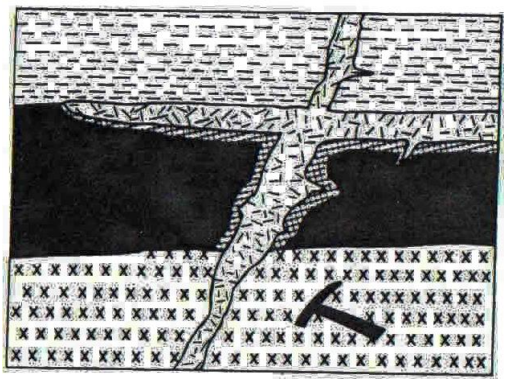


شکل ۴-۲۶: قطع شدگی زغالسنگ توسط دایک تخریبی (اصانلو، ۱۳۷۸)

وجود دایک یا توده‌های نفوذی آذرین در مجاورت لایه زغال (شکل ۴-۲۷) باعث ایجاد شکستگی‌های بیشتر در لایه‌های زغالی می‌شوند و از طرف دیگر موجب از دست دادن حجم زیادی از زغال در حین معدنکاری می‌شود که مجموع این شرایط باعث می‌شود تا سطح بیشتری از زغال در

[1] - Clastic Dykes

معرض جریان هوا و در نتیجه اکسیداسیون و گرمایش خودبه‌خودی قرار گیرد (Banerjee, 1985).



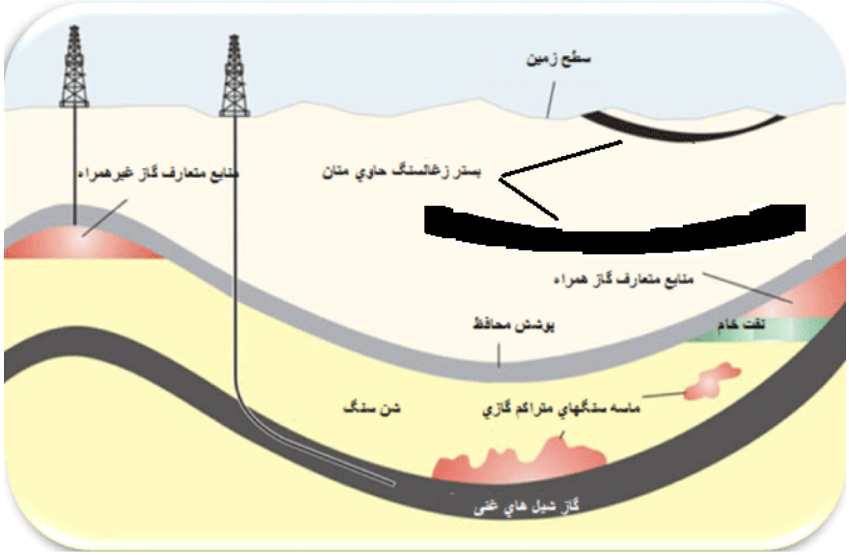
شکل ۴-۲۷: دایک آذرین که موجب قطع شدن لایه زغال و سنگ‌های دربرگیرنده آن شده است (اصانلو، ۱۳۷۸)

ز- وجود شیل‌های نفتی در مجاورت لایه

شیل‌های نفتی گروه متنوعی از سنگ‌ها هستند که منشأ نفت هستند و دارای مواد آلی و غیر آلی می‌باشند که مواد آلی موجود در آن‌ها به علّت اینکه در عمق کافی مدفون نشده هنوز به مرز پختگی نرسیده‌اند و نابالغند و نفتی تولید نمی‌کنند (http://www.iranpetrotech.com).

شکل ۴-۲۸ وجود یک شیل نفتی در مجاورت لایه زغال را نشان می‌دهد.

به اثبات رسیده است که وجود باندهای شیل نفتی در مجاورت لایه زغال، نقش مهمّی در افزایش گرمایش و خودسوزی لایه‌های زغال دارند (Kaymakci & Didari, 2002).



شکل ۴-۲۸: وجود شیل نفتی در مجاورت لایه زغال http://www.iranpetrotech.com ()

ح- وجود منابع زمین گرمایی در مجاورت لایه

ژئوترمال از کلمه‌ی یونانی «ژئو» به معنی زمین، و «ترمال» به معنی گرما و گرمایی گرفته شده است. بنابراین، انرژی ژئوترمال به معنای «انرژی زمین گرمایی» یا «انرژی با منشأ درونی زمین» است. این انرژی، به شکل گرمایی محسوس، از بخش درونی زمین منشأ می‌گیرد و در سنگ‌ها و آب‌های موجود در شکاف‌ها و منافذ داخل سنگ در پوسته‌ی زمین وجود دارد. مشاهدات به عمل آمده از معادن عمیق و چاه‌های حفاری شده نشان می‌دهد که درجه‌ی حرارت سنگ‌ها به طور پیوسته با افزایش عمق زمین افزایش می‌یابد (http://www.tabasenc.ir).

به اثبات رسیده است که وجود منابع زمین گرمایی در مجاورت لایه زغال، نقش مهمّی در افزایش گرمایش و خودسوزی لایه‌های زغال دارند (Banerjee, 1982; Kaymakci & Didari, 2002).

۴-۳-۱-۳- عوامل معدنکاری

الف- روش استخراج[1]

در طول بیش از ۲۰۰ سال گذشته روش‌های استخراج زیرزمینی متعدّدی برای استخراج لایه‌های زغال مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما امروزه زغالسنگ به روش‌های زیرزمینی به واسطه یکی از سیستم‌های زیر استخراج می‌شود (Banerjee, 1985):

الف- سیستم معدنکاری پایه‌ای[2]: این سیستم شامل روش‌های اتاق و پایه[3]، روش بلوکی[4] (بلوک و پایه) و روش حاشیه‌ای و پایه[5] می‌باشد.

ب- سیستم معدنکاری جبهه‌ای[6]: که شامل جبهه کار طولانی[7] و جبهه کار کوتاه[8] می‌باشد.

هرچه روش استخراج کامل‌تر باشد و زغال کمتری به صورت برجا (در سقف لایه، کف لایه و چه به صورت پایه‌های نگهداری) از دست رود و یا به صورت انباشت شده برای انتقال به بیرون بر اثر

[1] - Extraction Method
[2] - Pillar Mining System
[3] - Room and Pillar
[4] - Block Method
[5] - Board and Pillar or Pillar and Breasts
[6] - Wall Mining Systems
[7] - Longwall Mining Method
[8] - Shortwall Mining Method

استخراج باقی بماند آن روش استخراج ایمن‌تر و خطر خودسوزی زغال در آن کمتر است. بنابراین روش استخراج اتاق و پایه خطر بیشتری نسبت به روش استخراج جبهه کار طولانی دارد (Banerjee, 1985)؛ و روش استخراج جبهه کار طولانی مکانیزه نسبت به روش استخراج جبهه کار کوتاه و استخراج اتاق و پایه و استخراج جبهه کار طولانی دستی (سنتی) از خطر کمتری برای خودسوزی زغال برخوردار است. در ضمن باید خاطر نشان کرد که در روش‌های استخراجی مانند اتاق و پایه و جبهه کار کوتاه که از ماشین استخراج پیوسته[1] استفاده می‌شود سرعت استخراج کمتر از سیستم استخراج جبهه کار طولانی که با شیرر لودر[2] کار می‌شود است؛ و سرعت استخراج در روش استخراج جبهه کار طولانی دستی (سنتی) از همه روش‌ها کمتر و خطر خودسوزی در آن بیشتر است زیرا زغال مدّت زمان بیشتری در معرض جریان هوا و اکسیداسیون قرار می‌گیرد (MDG 1006, 2011).

استخراج بخشی از لایه‌ی زغال و جا ماندن و استخراج نشدن قسمتی از زغال در سقف و کف لایه و یا به صورت پایه به دلیل رعایت اصول ایمنی و محدودیت‌های معدنکاری و عدم بازیابی قسمت‌های استخراج نشده و رها کردن زغال در نواحی تخریب شده و یا عدم استخراج طولانی مدّت یک لایه که بازگشایی شده است و در معرض جریان هوای تهویه قرار دارد، همگی از جمله عواملی هستند که باعث افزایش تمایل زغال به پدیده گرمایش خودبه‌خودی می‌شوند (Kaymakci & Didari, 2002).

ب- جهت پیشروی[3]

در روش استخراج جبهه کار طولانی، استخراج عمدتاً به دو طریقه پیشرو[4] و یا پسرو[5] صورت می‌گیرد. جهت استخراج بر روی اکسیداسیون زغال و خودسوزی آن تأثیر مهمّی دارد به این نحو که در سیستم‌های استخراج پیشرو در مقایسه با سیستم‌های استخراج پسرو میزان هوای بیشتری به

[1] - Continuous Miner Machine
[2] - Shearer Loader
[3] - Advance Direction
[4] - Advance Long Wall
[5] - Retreating Long Wall

فضای استخراج شده[1] نشت[2] می‌کند (MDG 1006, 2011) که این نشت ناشی از اختلاف فشار هوای تهویه است که باعث اکسیداسیون و در نتیجه خودسوزی زغال می‌شود (Ren & Balusu, 2005).

در روش پیشرو، ناحیه استخراج شده بین راهروی اصلی و جبهه کار قرار می‌گیرد، به دلیل اختلاف فشار تهویه و امکان نشت هوا به قسمت استخراج شده در روش پیشرو، مشکل آتش‌سوزی بیشتر از روش پسرو می‌باشد. اما در روش پسرو در صورتی که زغال دارای خاصیت خودسوزی باشد، امکان جدا کردن پهنه‌های استخراجی راحت‌تر و ساده‌تر است. به همین دلیل در شرایط با خطر بالای خودسوزی زغال روش پسرو بر روش پیشرو ترجیح داده می‌شود (عطائی، ۱۳۹۰).

ج- نرخ (سرعت) پیشروی[3]

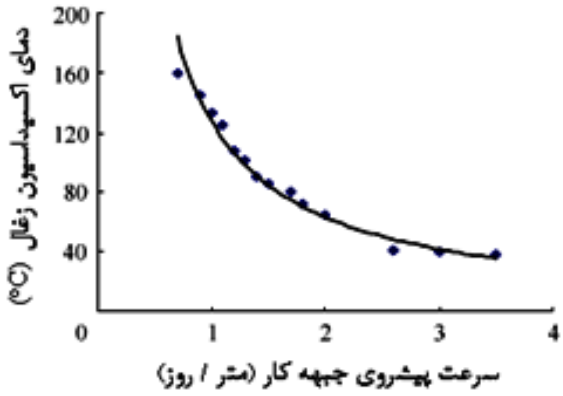
سرعت پیشروی یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در پدیده احتراق خودبه‌خودی زغال است. در عمل، این فاکتور یک عامل وابسته به زمان، عرض پهنه[4] (طول جبهه کار) کارگاه استخراج و تجهیزات استخراجی است. به این صورت که هرچه طول جبهه کار افزایش یابد، سرعت پیشروی کمتر می‌شود و زغال زمان زیادتری در معرض جریان هوای تهویه قرار می‌گیرد که پتانسیل احتراق خودبه‌خودی افزایش می‌یابد. اما اگر طول جبهه کار کاهش یابد، سرعت پیشروی بیشتر و زغال زمان کمتری در معرض جریان هوای تهویه قرار می‌گیرد در نتیجه خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال کاهش می‌یابد (Banerjee, 1982; Banerjee, 1985; Singh et al., 2002).

به طور کلی، در زمانی که ابعاد کارگاه در حالت بهینه باشد اما بسته به دلایل کاری و تجهیزاتی، سرعت پیشروی کم باشد و مدّت زمان شروع استخراج پهنه تا اتمام استخراج زمان زیادی را به خود اختصاص دهد یا بر اثر عواملی، استخراج برای مدّتی متوقّف شود خطر خودسوزی افزایش می‌یابد و برعکس زمانی که سرعت پیشروی زیاد باشد خطر خودسوزی کاهش می‌یابد (Banerjee, 1985).

---

[1] - Gob/Goaf
[2] - Leakage
[3] - Rate of Advance
[4] - Panel

Bo-tao و همکاران در سال ۲۰۰۹ میلادی بیان کردند که سرعت پیشروی در یک جبهه کار بر روی سرعت افزایش دمای زغال ناشی از اکسایش در فضای استخراج شده تأثیرگذار است. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی به ارتباط بین سرعت پیشروی جبهه کار و افزایش دمای زغال در فضای استخراج شده پی بردند که نتیجه کار آن‌ها در شکل ۴-۲۹ آورده شده است.



شکل ۴-۲۹: ارتباط بین دمای زغال و سرعت پیشروی جبهه کار (Bo-tao et al., 2009)

از شکل ۴-۲۹ نتیجه می‌شود که هرچه سرعت پیشروی در یک جبهه کار آهسته‌تر باشد، سرعت افزایش دمای زغال بیشتر است و برعکس.

د- سیستم تهویه و حجم جریان هوا

سیستم تهویه و سرعت جریان هوا یک عامل پیچیده در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ است زیرا از یک طرف جریان هوا تأمین کننده اکسیژن است و اکسیژن یکی از ۳ عامل اساسی در پدیده گرمایش خودبه‌خودی 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 تجمّع گرما می‌شود (Kaymakci & Didari, 2002).

روش تهویه و میزان حجم جریان تهویه دارای تأثیر بزرگی در وقوع پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ است. به نحوی که اگر حجم جریان تهویه کم باشد نمی‌تواند مانع از وقوع اکسیداسیون زغال شود و اگر حجم جریان تهویه زیاد باشد اجازه تجمّع گرمای ناشی از اکسیداسیون را نمی‌دهد (Banerjee, 1985) اما غلظت‌های بالای اکسیژن موجود در هوا باعث می‌شود که سرعت

واکنشی اکسایش شتاب بیشتری به خود بگیرد (Ramlu, 2007).

سطح (تراز) بهینه تهویه برای جلوگیری از پدیده گرمایش خودبه‌خودی بستگی به شرایط انتقال و همرفتی گرما، میزان نشت هوا (مقاومت شبکه تهویه، راه‌های فرار هوا و غیره)، میزان گاز خیزی معدن، تعداد پرسنل و ماشین‌آلات و عوامل متعدّد دیگری دارد (Banerjee, 1985).

ادعای مؤلفین روسی بر این است که سرعت جریان تهویه ۰/۱ تا ۰/۹ متر بر دقیقه (m/min) با درصد غلظت اکسیژن بیشتر از ۱۷ درصد (O_2>17%) در بخش خطرناک قرار دارد. در محدوده پایین‌تر، میزان اکسیژن محتوی کاهش می‌یابد، درحالی‌که در محدوده بالاتر کمک به جریان‌های همرفتی و انتقال گرما و پراکنده کردن گرمای تجمّع یافته می‌کند (Banerjee, 1985).

تهویه روش پسرو به دلیل نشت کمتر هوا در مناطق استخراج شده از روش پیشرو ایمن‌تر است (Banerjee, 1985).

همان‌طور که گفته شد تهویه نقش مهم و پیچیده‌ای را در گرمایش خودبه‌خودی و در نتیجه خودسوزی زغالسنگ در معادن زیرزمینی ایفا می‌کند. اما تحقیقات بسیار کم و ناچیزی در این زمینه انجام شده است که دلیل آن نیز پیچیدگی تأثیر تهویه و تأثیر پارامترهای فراوان بر این پدیده است.

Yuan و Smith در سال ۲۰۱۲ میلادی با استفاده از یک آون هم دما[1] قابل برنامه‌ریزی که دمای آون می‌تواند از ۴۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با دقت ±0.5°C ثابت نگه داشته شود به بررسی تأثیر میزان حجم هوای تهویه در گرمایش خودبه‌خودی زغال پرداختند. آزمایشات بر روی ۳ نمونه زغالی از کشور آمریکا که مشخصات نمونه‌های زغالی در جدول ۴-۶ آورده شده است با حجم‌های مختلف هوای تهویه با دامنه تغییراتی از $100\text{-}500\ \frac{cm^3}{min}$ انجام شد.

جدول ۴-۶: مشخصات نمونه‌های زغالی مورد آزمایش در تعیین تأثیر میزان حجم هوای تهویه بر پدیده گرمایش

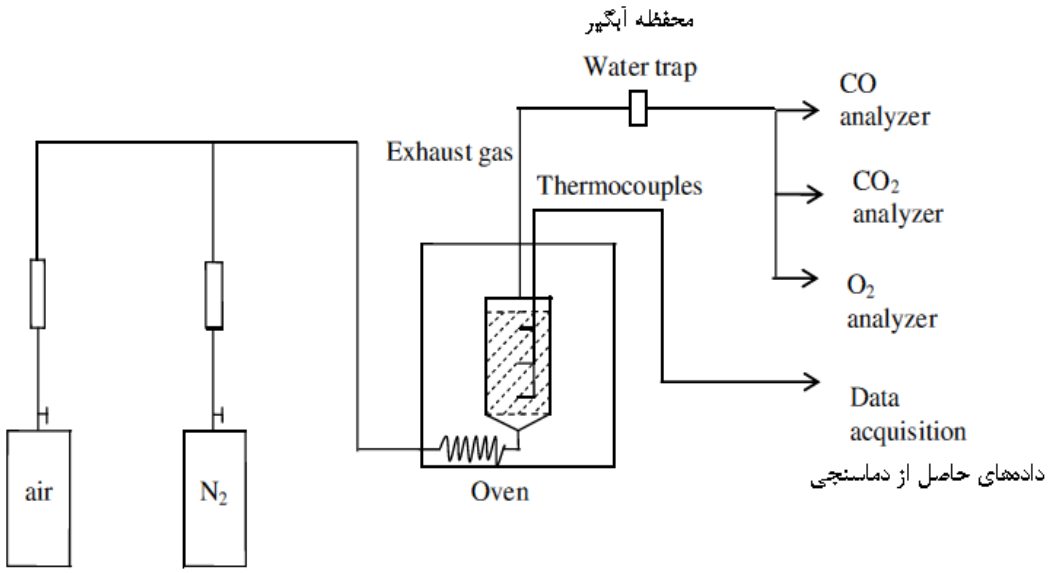
[1] - Isothermal Oven

خودبه‌خودی (Yuan & Smith, 2012)

نمونه	مواد فرار (٪)	کربن (٪)	خاکستر (٪)	هیدروژن (٪)	نیتروژن (٪)	سولفور (٪)	اکسیژن (٪)
A	36.88	55.52	7.60	5.52	1.49	0.81	10.30
B	38.40	54.46	7.14	5.83	1.57	0.49	9.39
C	44.03	47.44	8.53	5.47	1.48	2.61	12.65

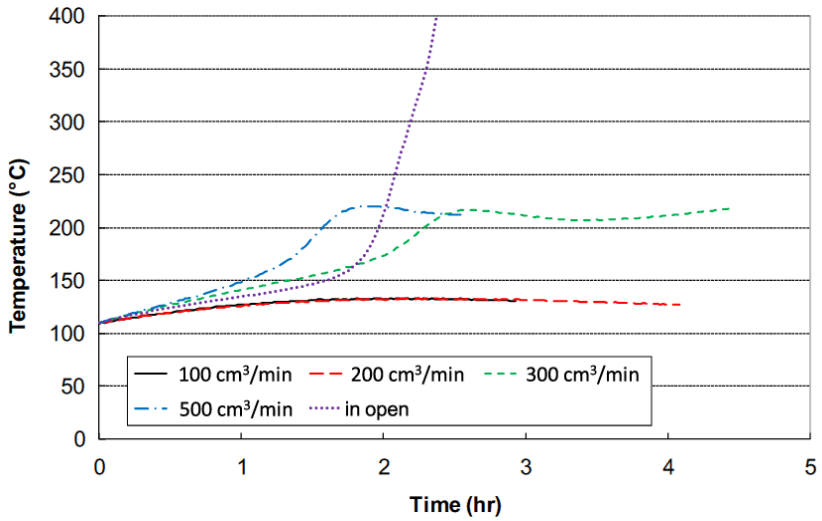
در انجام آزمایش، پس از روشن شدن آون، دمای آون در یک دمای معین تنظیم می‌شود و پس از حدود ۳۰ دقیقه از روشن شدن دستگاه شرایط ایزوترمال یا هم دما در آون برقرار می‌شود. سپس، یک محفظه از فولاد ضد زنگ که محتوی نمونه زغالی است در مرکز آون جانمایی می‌شود. ابعاد نمونه زغالی به صورت استوانه‌ای و برابر ۶ سانتیمتر قطر و ۱۰ سانتیمتر ارتفاع است. ۳ ترموکوپل[1] (وسیله اندازه‌گیری اختلاف درجه حرارت) با قطر ۰/۵ میلی‌متر در مرکز، ۳ سانتی‌متر بالاتر و ۳ سانتی‌متر پایین‌تر از مرکز نمونه زغالی جانمایی می‌شوند که به ترتیب دمای زغال را اندازه‌گیری می‌کنند. گاز هوای تهویه، شامل هوای معمولی و گاز نیتروژن است که از طریق یک سری دریچه[2] که در بالا و پایین محفظه محتوی نمونه زغالی تعبیه شده است به داخل محفظه جریان می‌یابد. گاز ورودی از طریق عبور از یک سیم پیچ در داخل آون گرم می‌شود. گازهای خروجی از محفظه آزمایش پس از عبور از یک محفظه آبگیر[3]، توسط یک دستگاه تحلیل کننده گاز مادون قرمز[4] به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌شوند. آزمایش زمانی به پایان می‌رسد که دمای نمونه زغالی کاهش پیدا کند و یا اینکه دما به ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد. یک شکل شماتیک از دستگاه آزمایش در شکل ۴-۳۰ آورده شده است (Yuan & Smith, 2012).

[1] -Thermocouple
[2] - Ports
[3] - Water Trap
[4] - Infrared Gas Analyzer

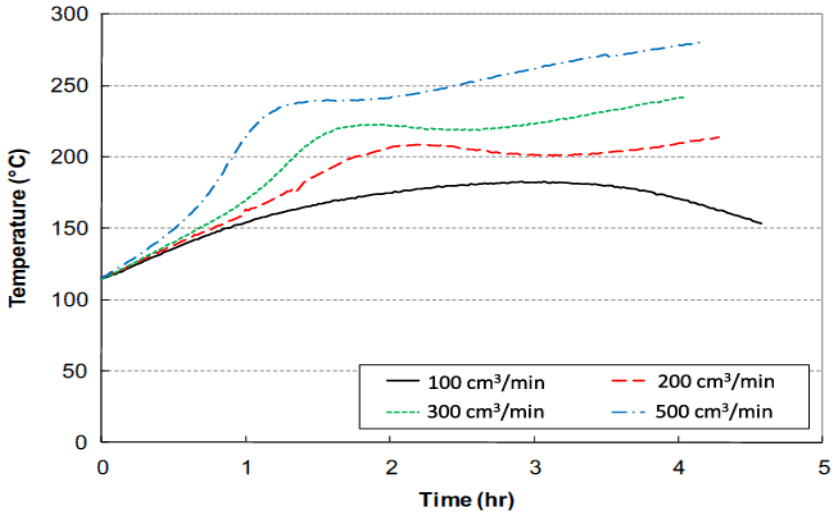


شکل ۴-۳۰: نمایی شماتیک از دستگاه آزمایش آون هم دما (Yuan & Smith, 2012)

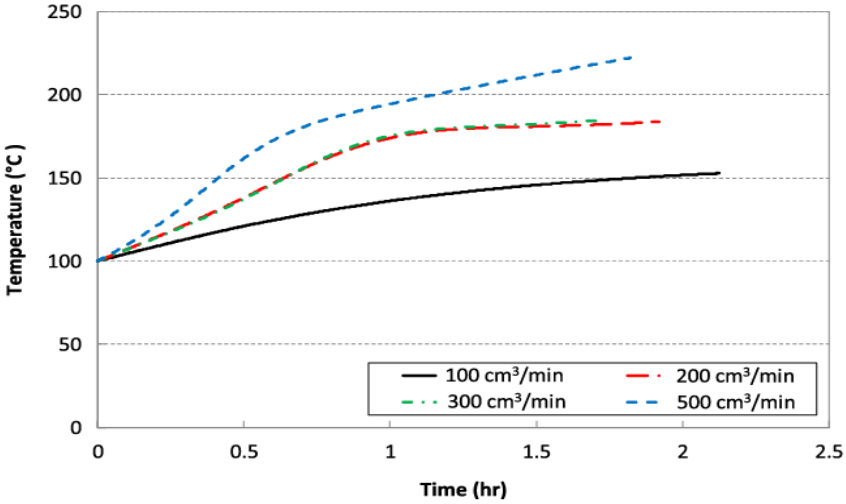
در شکل ۴-۳۱ تا شکل ۴-۳۳ نتایج حاصل از آزمایش مشاهده می‌شود؛ همان‌طور که دیده می‌شود به طور کلی با حجم هوای جریان تهویه $100\ \frac{cm^3}{min}$ و $200\ \frac{cm^3}{min}$ هیچ‌گونه اتفاق دمایی خاصی اتفاق نمی‌افتد اما در حجم هوای جریان تهویه $500\ \frac{cm^3}{min}$ و پس از گذشت زمان کمتری نسبت به سایر حجم‌های جریان تهویه، پدیده گرمایش خودبه‌خودی ناشی از حجم و سرعت زیاد تهویه اتفاق می‌افتد (Yuan & Smith, 2012).



شکل ۴-۳۱: دمای مرکز نمونه زغالی A تحت حجم‌های مختلف هوای تهویه با دمای شروع ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در آون هم دما (Yuan & Smith, 2012)

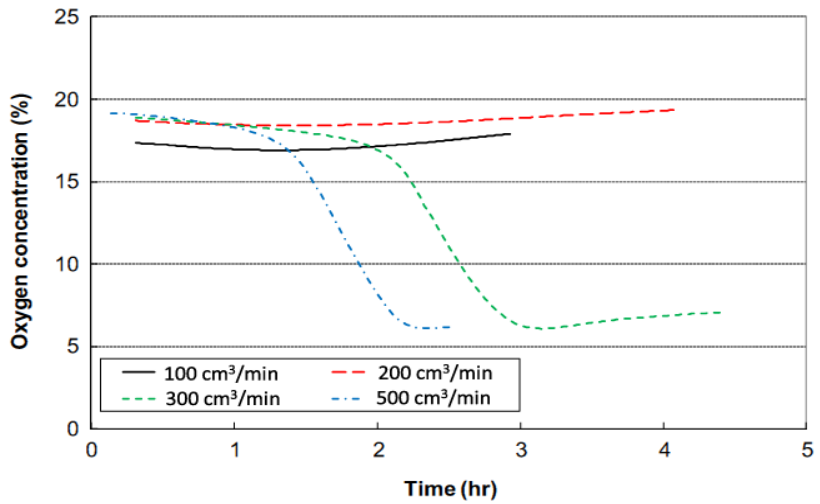


شکل ۴-۳۲: دمای مرکز نمونه زغالی B تحت حجم‌های مختلف هوای تهویه با دمای شروع ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد در آون هم دما (Yuan & Smith, 2012)

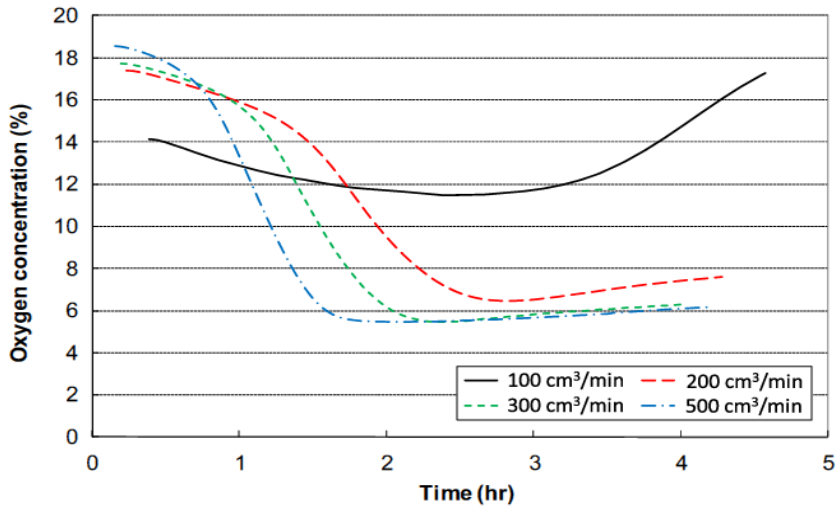


شکل ۴-۳۳: دمای مرکز نمونه زغالی C تحت حجم‌های مختلف هوای تهویه با دمای شروع ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آون هم دما (Yuan & Smith, 2012)

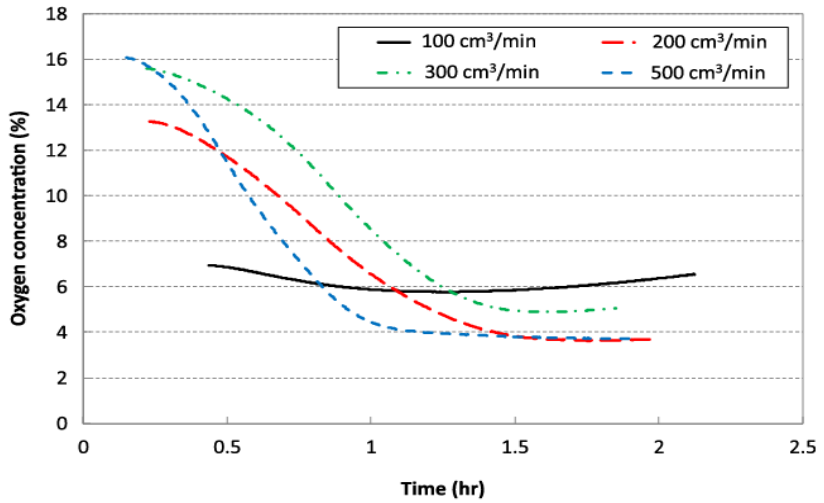
در شکل ۴-۳۴ تا شکل ۴-۳۶ تأثیر افزایش حجم هوای تهویه و کاهش غلظت اکسیژن در محفظه حاوی نمونه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش حجم هوای تهویه، میزان غلظت اکسیژن در زمان کوتاه‌تری کم می‌شود که نشان‌دهنده جذب اکسیژن توسط زغال و ایجاد پدیده گرمایش خودبه‌خودی در نمونه زغالی به دلیل حجم و سرعت زیاد هوای تهویه است (Yuan & Smith, 2012).



شکل ۴-۳۴: تأثیر حجم‌های مختلف هوای تهویه بر کاهش میزان غلظت اکسیژن در نمونه زغالی A (Yuan & Smith, 2012)



شکل ۴-۳۵: تأثیر حجم‌های مختلف هوای تهویه بر کاهش میزان غلظت اکسیژن در نمونه زغالی B (Yuan & Smith, 2012)



شکل ۴-۳۶: تأثیر حجم‌های مختلف هوای تهویه بر کاهش میزان غلظت اکسیژن در نمونه زغالی C (Yuan & Smith, 2012)

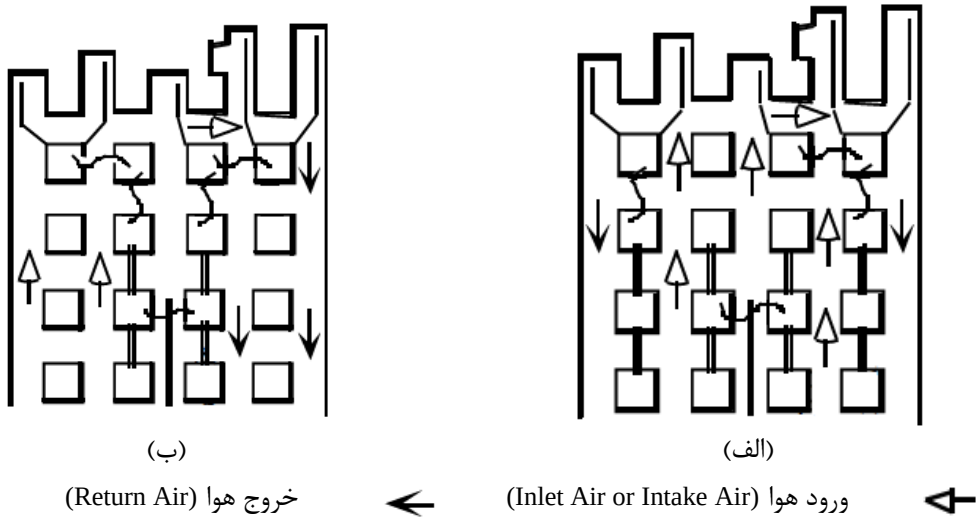
هـ- نشت هوا به فضای تخریب شده

در حین معدنکاری و استخراج زغال، نشت هوا به نواحی استخراج شده و پشت سیستم‌های نگهداری باعث می‌شود تا جابجایی آرام هوا به مناطق استخراج شده صورت گیرد و اکسیژن به زغال‌های رها شده در نواحی تخریبی برسد که با توجه به میزان زغال رها شده و حجم هوای نشت پیدا کرده پدیده اکسیداسیون زغال و تولید گرما اتفاق می‌افتد.

به طور کلی، رها کردن مقدار زیادی از زغال در نواحی استخراج شده خطر گرمایش خودبه‌خودی و در نتیجه خودسوزی زغال را افزایش می‌دهد، زیرا زغال که یکی از ارکان مثلث آتش می‌باشد در معرض جریان هوا که یکی دیگر از ارکان مثلث آتش است قرار می‌گیرد.

مقدار نشت جریان هوا به نواحی استخراج شده بستگی به مشخصات قسمت استخراج شده و نوع سیستم تهویه دارد. در مورد مشخصات قسمت استخراج شده یعنی اینکه در محل استخراج شده، تخریب صورت گرفته است و یا اینکه از روش‌های پر کردن استفاده شده است که میزان نشت هوا در روش‌های مختلف پر کردن نیز متفاوت می‌باشد به طوری که در روش پر کردن هیدرولیکی مقدار نشت به کمترین مقدار خود می‌رسد درحالی‌که در روش‌های تخریبی میزان نشت به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین میزان نشت هوا در سیستم‌های مختلف تهویه نیز متفاوت است.

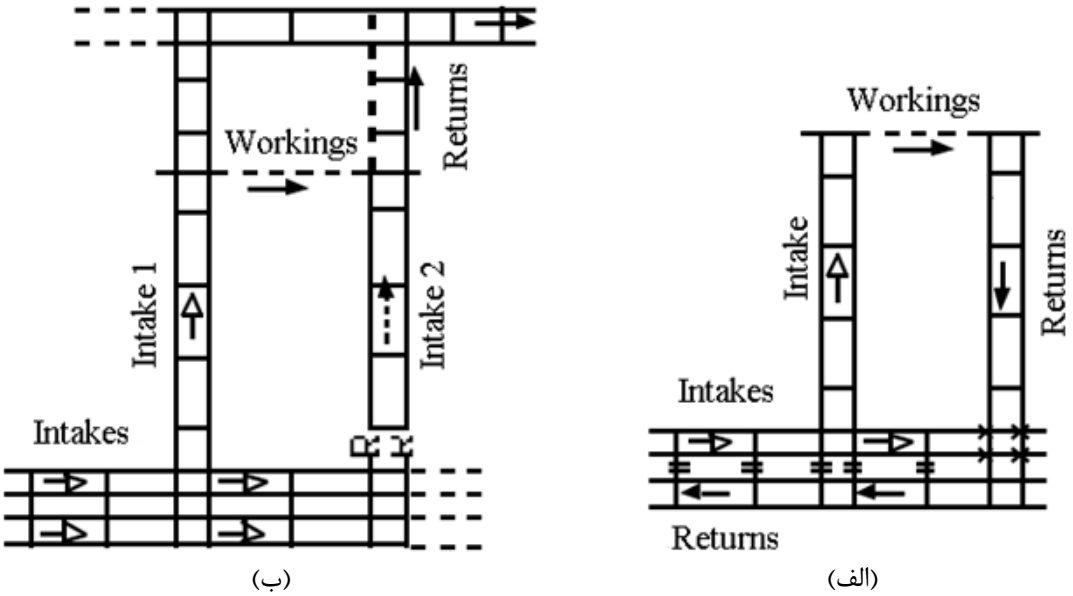
در شکل ۴-۳۷ تا شکل ۴-۳۹ انواع سیستم‌های تهویه در معادن اتاق و پایه و جبهه کار طولانی زغال مشاهده می‌شود.



الف- سیستم دو جهته (bi-directional system)

ب- سیستم تک جهته (uni-directional system)

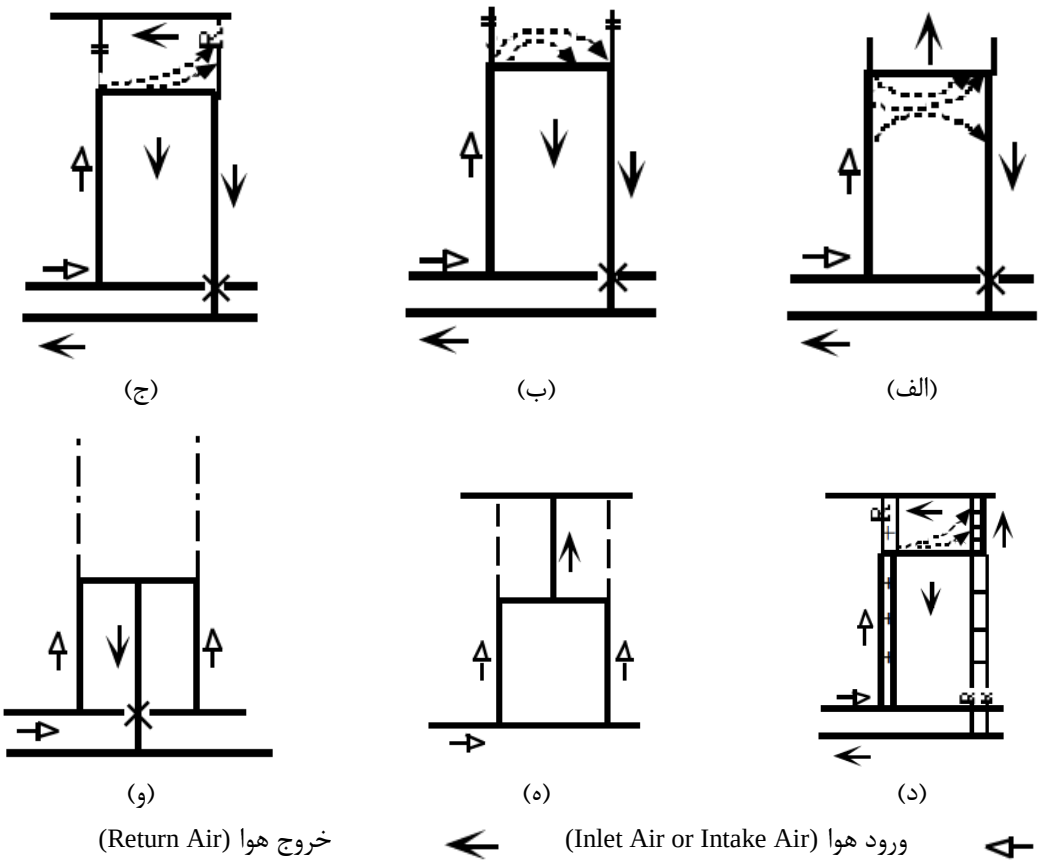
شکل ۴-۳۷: سیستم‌های تهویه در معادن اتاق و پایه زغال (McPherson, 1993)



الف- سیستم تهویه نوع U

ب- سیستم تهویه نوع Y

شکل ۴-۳۸: اصلی‌ترین سیستم‌های تهویه در معادن جبهه کار طولانی زغال (McPherson, 1993)



الف- پیشرو تک راهرو (single-entry advancing)

ب- پسرو تک راهرو (single-entry retreating)

ج- پسرو تک راهرو با راه شریانی برگشتی (single-entry retreating with back bleeder)

د- پسرو دو راهرو با راه شریانی برگشتی (double-entry retreating with back bleeder)

ه- سیستم Z (Z system)

و- سیستم W (W system)

شکل ۴-۳۹: سایر سیستم‌های تهویه در معادن جبهه کار طولانی زغال (McPherson, 1993)

از اصلی‌ترین و پرکاربردترین سیستم‌های تهویه در معادن جبهه کار طولانی سیستم‌های تهویه نوع U و Y می‌باشد؛ به همین دلیل Ren و Balusu در سال ۲۰۰۵ میلادی و Ren و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی نیز تنها بر روی تأثیر این دو نوع سیستم تهویه بر روی خودسوزی زغال کار کرده‌اند.

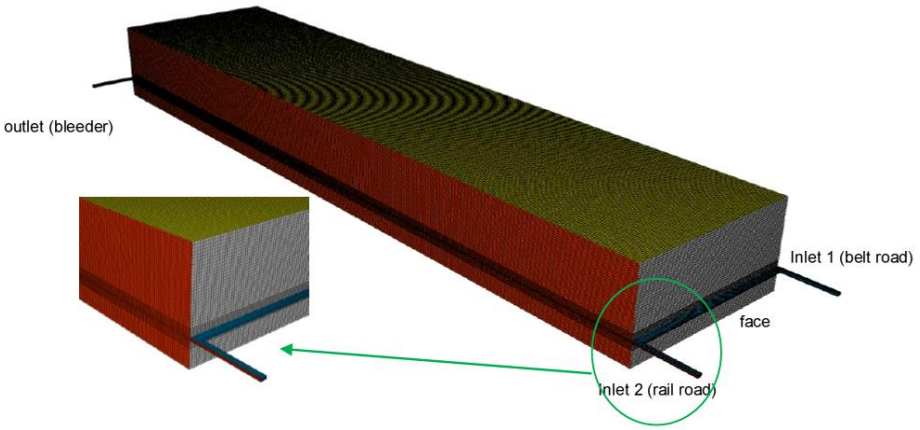
سیستم تهویه نوع Y نسبت به سیستم تهویه نوع U سطح بالاتری از اکسیژن را به فضای تخریب شده منتقل می‌کند و لذا خطر خودسوزی زغال در سیستم تهویه نوع Y بیشتر است (Ren et al., 2012).

برای اثبات این موضوع Ren و Balusu در سال ۲۰۰۵ میلادی، Ren و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی، از نرم افزار مدل‌سازی CFD[1] که یکی از معتبرترین نرم‌افزارها در زمینه شناخت «دینامیک انتقال سیالات» است برای مطالعه میزان ورود و نشت اکسیژن به داخل نواحی استخراج شده با طرح‌های مختلف تهویه استفاده کردند.

از نرم افزار مدل‌سازی CFD در صنایع معدنی برای کنترل گاز متان، کنترل گرمایش خودبه‌خودی زغال، کنترل گرد و غبار، بررسی انفجار، جانمایی سیستم‌های تهویه کمکی و در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی استفاده می‌شود (Ren & Balusu, 2005; Ren et al., 2012).

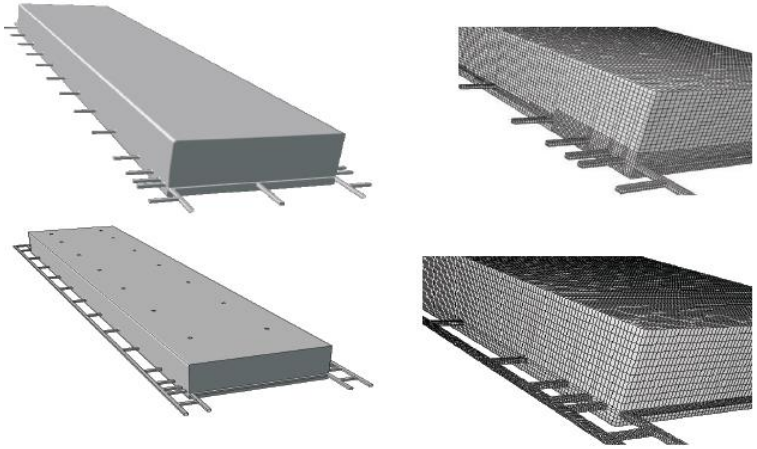
در محاسبات انجام شده برای استفاده از این نرم افزار در مطالعه ورود اکسیژن به داخل نواحی استخراج شده با طرح‌های مختلف تهویه از کد FLUENT که یک کد تجاری است استفاده شده است. کد FLUENT یک برنامه حجم محدود در محاسبات مربوط به دینامیک سیالات است، که معادلات سیالات تراکم پذیر[2] و تراکم ناپذیر[3] را حل می‌کند (Ren & Balusu, 2005).

در شکل ۴-۴۰ و شکل ۴-۴۱ نمایی از هندسه و شبکه‌بندی مورد استفاده در نواحی استخراج شده در نرم افزار مدل‌سازی CFD مشاهده می‌شود.



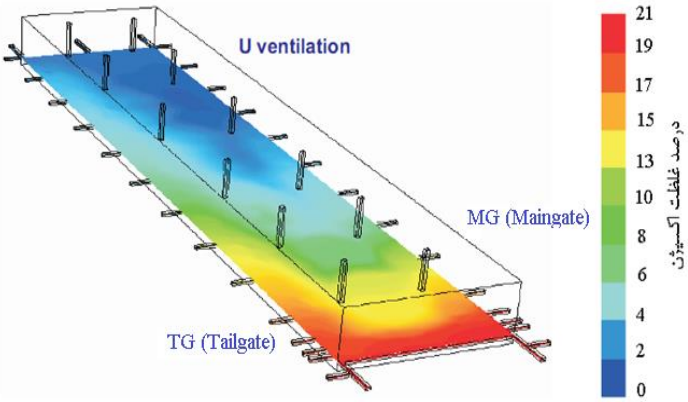
شکل ۴-۴۰: نمونه‌ای از هندسه و شبکه‌بندی مورد استفاده در نواحی استخراج شده در نرم افزار مدل‌سازی CFD (Ren et al., 2012)

[1] - Computational Fluid Dynamics
[2] - Compressible Flows
[3] - Incompressible Flows

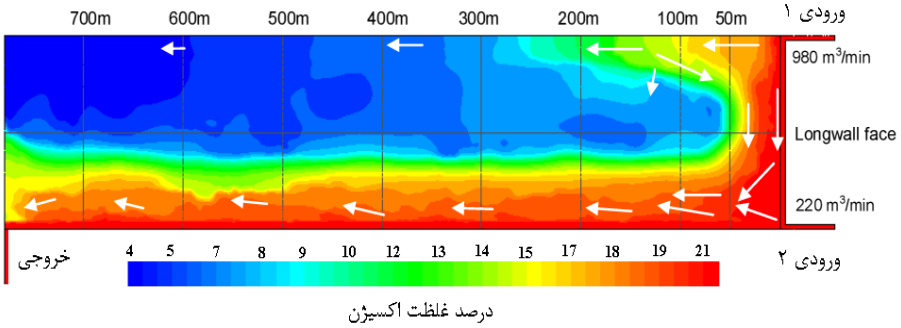


شکل ۴-۴۱: نمونه‌ای از هندسه و شبکه‌بندی مورد استفاده در نـواحی اسـتخراج شـده در نـرم افـزار مدل‌سـازی CFD (Ren & Balusu, 2005)

در شکل ۴-۴۲ تا شکل ۴-۴۴ به ترتیب میزان نفوذ[1] (نشت[2]) اکسیژن به فضای استخراج شـده در سیستم‌های تهویه نوع U و Y مشاهده می‌شود.



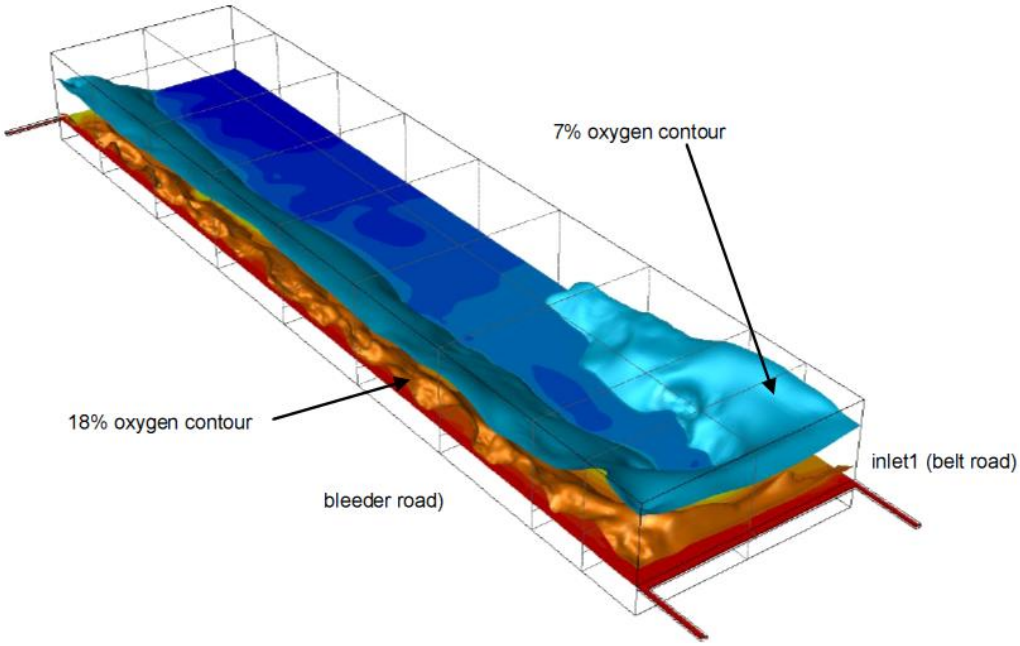
شکل ۴-۴۲: میزان نفوذ (نشت) اکسیژن به فضای استخراج شـده در سیسـتم تهویـه نـوع U بـا اسـتفاده از نـرم افـزار مدل‌سازی CFD (Ren & Balusu, 2005)



شکل ۴-۴۳: میزان نفوذ (نشت) اکسیژن به فضای استخراج شـده در سیسـتم تهویـه نـوع Y بـا اسـتفاده از نـرم افـزار مدل‌سازی CFD (Ren et al., 2012)

[1] - Penetration
[2] - Leakage

همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان نفوذ اکسیژن به فضای استخراج شده در سیستم تهویه نوع Y بسیار بیشتر از سیستم تهویه نوع U است؛ لذا خطر خودسوزی زغال در فضای استخراج شده که در آن پهنه استخراجی از سیستم تهویه نوع Y استفاده می‌شود بیشتر است (Mitchel, 2003; Ren and Balusu, 2005; Ren et al., 2012).



شکل ۴-۴۴: توزیع فضایی میزان نفوذ (نشت) اکسیژن به فضای استخراج شده در سیستم تهویه نوع Y با استفاده از نرم افزار مدل‌سازی CFD (Ren et al., 2012)

مؤثرترین راه پیش‌گیری از خطر خودسوزی در سیستم‌های تهویه‌ای که پتانسیل خودسوزی زغال در آن‌ها بالا است استفاده از سیستم‌های استخراجی پسرو است، زیرا در این سیستم استخراجی، نشت اکسیژن به فضای استخراج شده بسیار پایین است و لذا خطر خودسوزی در نواحی استخراج شده کاهش می‌یابد (Ren et al., 2012).

بنابراین نشت هوا دلیل شروع یک گرمایش تازه یا باد دادن[1] و دمیدن به اکسایش‌های قدیمی است. به همین دلیل تغییرات در فشار هوا که عامل نشت هوا تلقی می‌شود تأثیر مهمی بر روی گرمایش و احتراق خودبه‌خودی زغالسنگ دارد.

[1] - winnowing up

و- ضریب استخراج زغالسنگ

ضریب استخراج زغالسنگ، نسبت حجم زغال استخراج شده از لایه به کل زغال موجود در لایه است که هرچه این نسبت به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد قابلیت خودسوزی زغالسنگ کاهش می‌یابد.

ضریب استخراج متأثر از میزان زغال باقیمانده و ترک شده در نواحی استخراج شده است که معمولاً در این نواحی استخراجی خطر خودسوزی و گرمایش خودبه‌خودی زغال وجود دارد. مقدار زغال باقیمانده و استخراج نشده از لایه زغال نیز متأثر از ضخامت لایه، شیب لایه، باریک شدگی بیش از حد لایه، کیفیت زغال، وضعیت پایه‌های نگهداری مانند پایه‌های زنجیری و حایل، وجود گسل در لایه و غیره است (Singh et al., 2002).

هیچ سیستم استخراجی پیشرفته‌ای نمی‌تواند بازیابی کل لایه را تضمین کند بلکه همیشه مقداری از زغال در داخل نواحی استخراج شده باقی می‌ماند و مقدار قابل توجهی از زغالسنگ از دست خواهد رفت که یکی از عوامل جدّی در خطر گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ در مناطق استخراج شده است. با از دست دادن بیشتر زغال و تجمّع گرد و پودر زغال ناشی از روش استخراج و یا مشخصات لایه زغال، خطر خودسوزی زغال افزایش می‌یابد. خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال در نواحی استخراج شده می‌تواند با استخراج کامل لایه زغال، کاهش یابد اما این کار عملی نیست (Duncan, 1998; Michaylov, 2002; MDG 1006, 2011).

در مواردی زغالسنگ در سقف یا کف لایه رها می‌شود که دلایل آن عبارتند از:

۱- سقف یا کف به طور طبیعی ضعیف است.

۲- لایه زغال ضخیم است.

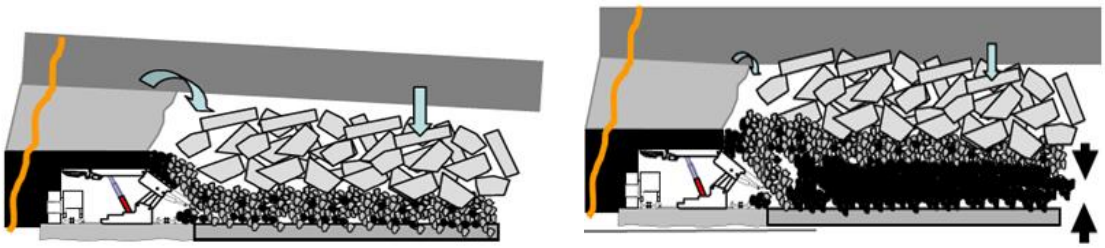
۳- زغال نامرغوب در پایین و یا بالای لایه زغال قرار دارد.

۴- شیب لایه زیاد است.

۵- لایه دچار پیچیدگی‌های زمین شناسی است.

در شکل ۴-۴۵، دو نوع ضریب استخراج خیلی بد و خیلی خوب از لایه زغال نشان داده شده

است. همچنین در جدول ۴-۷ طبقه‌بندی ضریب استخراج لایه زغال آورده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۴-۴۵: تأثیر ضریب استخراج - (الف) خیلی بد (ب) خیلی خوب (Moodie & Anderson, 2011)

جدول ۴-۷: میزان ضریب استخراج‌های متفاوت (Humphries & Poulsen, 2008)

طبقه‌بندی	۱	۲	۳	۴	۵
شرایط معدنکاری	خیلی خوب	خوب	متوسط	بد	خیلی بد
ضریب استخراج لایه زغال (٪)	>۸۰	۶۵-۸۰	۵۰-۶۵	۳۰-۵۰	<۳۰

۴-۴- نتیجه‌گیری

از مطالب این فصل که شامل مروری بر منابع مختلف موجود در زمینه تأثیر پارامترهای مختلف بر خودسوزی زغالسنگ است، چنین نتیجه می‌شود که تاکنون مطالعات بسیار زیادی بر روی تأثیر پارامترهای مختلف بر پدیده خودسوزی زغالسنگ انجام شده است. با این حال به وضوح مشخص است که کلیه نتایج حاصل از این تحقیقات هر یک به طور جداگانه قابلیت خودسوزی زغالسنگ را مورد ارزیابی قرار داده‌اند و به اندرکنش بین پارامترهای مختلف و نیز تعیین وزن هر پارامتر که در ارزیابی پدیده نهایی تأثیرگذار است توجه ای نشده است؛ لذا ایجاد یک روش مبتنی بر کلیه پارامترهای مذکور که قابلیت اندازه‌گیری داشته باشند به منظور ایجاد همگرایی بیشتر این تحقیقات لازم به نظر می‌رسد.

در فصل پنجم با جمع آوری کلیه این پارامترها در یک سیستم طبقه بندی جامع و نیز تعیین وزن هر پارامتر که دغدغه اصلی در ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی است، تلاش کلیه محقّقین پیشین به صورت یک روش هوشمند برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال ارائه می‌شود.

فصل ۵: ارائه‌ی سیستم طبقه‌بندی مهندسی قابلیت خودسوزی زغالسنگ

۵-۱- مقدمه

ارزیابی و تخمین خطر خودسوزی زغالسنگ در معادن زغالی یک نیاز اصلی (اولیّه) برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت خودسوزی زغال است که باید در طی کل عمر یک معدن از مراحل اولیّه طراحی، بهره‌برداری، استخراج و حتّی پس از اتمام معدنکاری به دلیل باقی ماندن بقایای زغالی مدّ نظر قرار بگیرد، زیرا این موضوع از لحاظ ایمنی، اقتصادی و زیست‌محیطی دارای اهمیت فراوان است (Michaylov, 2002).

در اولین مراحل طراحی یک معدن زغالسنگ، نه تنها پیش‌بینی خطر خودسوزی بلکه تحلیل مقدّماتی این خطر باید بر اساس اصول ایمنی انجام شود تا در صورت رخداد چنین پدیده‌ای دانش، آگاهی، آموزش، وسایل و تمهیدات شناسایی، پیش‌گیری، مبارزه و کنترل آن مهیّا باشند.

در مراحل مفهومی طراحی یک معدن، بهینه‌سازی سیستم‌های مختلف با مقایسه نسبت $\frac{\text{سود}}{\text{خطر}}$ و انتخاب سیستمی با حداکثر این نسبت مورد نیاز است تا منافع (سود[1]) به حداکثر مقدار ممکن برسد و خطر[2] نیز به حداقل مقدار ممکن رسیده باشد (Michaylov, 2002).

تاکنون مطالعات بسیار زیادی در مورد پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی زغالسنگ انجام شده است. به طور کلی در کلیّه مطالعات پیشین، چنان چه در فصل سوم و چهارم مورد بحث قرار گرفت، اندرکنش بین پارامترهای مختلف بر فرآیند خودسوزی و نتیجه مطالعات تأثیرگذار است که تاکنون به این مسأله توجه‌ای نشده است و روش کامل و جامعی که شامل کلیّه پارامترهای مؤثر در

[1]- Benefit
[2]- Risk

قابلیت خودسوزی زغالسنگ باشد ارائه نشده است.

در این تحقیق با توجه به مرور کلیّه منابع معتبر و شناخته شده جهانی و نیز شناسایی و جمع‌آوری پارامترهای مهم مؤثر، تلاش شده است تا این پارامترها در یک سیستم طبقه‌بندی جامع به صورت یک روش هوشمند برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال پیشنهاد شود.

مهم‌ترین مرحله در ارائه سیستم طبقه‌بندی و ارزیابی جامع یک پدیده با تعداد مشخصی پارامتر، تعیین وزن هر پارامتر بر پدیده اصلی است. از آنجایی که کلیّه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی، همواره بر اساس تعدادی پارامتر مرکّب و در ارتباط با هم ارائه می‌شوند، تأثیر توأم هر یک از پارامترها، ارزیابی پدیده نهایی را دشوار می‌سازد؛ لذا تعیین وزن هر پارامتر، همواره دغدغه اصلی در ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی بوده است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی پارامترهای مختلف مؤثر در پدیده‌های گوناگون ارائه شده است. از جمله مشهورترین آن‌ها می‌توان به روش تجربی- مقایسه‌ای، روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES[1])، و روش‌های تصمیم گیری چند معیاره (MCDM[2]) اشاره نمود.

در روش تجربی- مقایسه‌ای، ارائه دهندگان سیستم طبقه‌بندی، با توجه به تجربیات و مشاهدات صحرایی، وزن هر پارامتر را به صورت اولیّه تعیین می‌کنند. سپس وضعیت اصلی و برجای پدیده با وضعیت پیش‌بینی شده توسط سیستم طبقه‌بندی مقایسه می‌شود. در صورت اختلاف بین واقعیّت و پیش‌بینی، وزن پارامترها کم و زیاد می‌شود تا جایی که واقعیّت با پیش‌بینی مطابقت کند. در این صورت امتیازدهی نهایی بدست می‌آید (تقی پور و رخشنده،۱۳۸۲).

در روش سیستم‌های مهندسی سنگ کلیّه پارامترهای مؤثر در یک پدیده، در یک ماتریس اندرکنش به صورت کلّی آورده می‌شوند. سپس هر یک از سلول‌های ماتریس فوق با توجه به تجربیات افراد محقّق به ازای اهمیّت نسبی یک پارامتر نسبت به کل پدیده با یک امتیاز مخصوص پر می‌شوند.

[1]- Rock Engineering Systems

[2] - Multi Criteria Decision Making

با انجام محاسبات ریاضی مربوطه، یک نمودار اثر- تأثیر بین پارامترها رسم می‌شود. با استفاده از این نمودار، مؤثرترین، کم تأثیرترین، غالب‌ترین، و مغلوب‌ترین پارامتر یک پدیده مشخص می‌شود. پس از این مرحله و پس از تعیین اهمیّت نسبی پارامترها وزن پیشنهادی به هر پارامتر اختصاص می‌یابد (تقی پور و رخشنده، ۱۳۸۲).

از جمله جدیدترین روش‌های موجود برای وزن‌دهی به پارامترهای مؤثر در یک پدیده می‌توان به روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از جمله روش وزن‌دهی ساده، روش شباهت به گزینه ایده‌آل، روش تسلّط تقریبی و روش تحلیل سلسله مراتبی اشاره نمود.

روش‌های تجربی- مقایسه‌ای و سیستم مهندسی سنگ، تا حدّ بسیار زیادی به تجربه و مشاهدات افراد بسیار معدودی وابسته بوده و لذا دایره تجربیات استفاده شده در ورای این روش‌ها محدودتر می‌باشد. در این صورت، امکان اشتباه و عدم کارآیی سیستم‌های طبقه‌بندی پیشنهاد شده با این روش‌ها زیاد است. در روش تحلیل سلسله مراتبی، از نظرات و تجربیات تعداد کثیری از متخصّصان یک رشته استفاده می‌شود و لذا دایره تجربیات پشتوانه روش، بسیار بیشتر از سایر روش‌ها بوده و این سیستم‌ها از کارآیی بالایی برخوردارند (حسینی، ۱۳۸۷).

در این تحقیق با توجه به قابلیت و شهرت بیشتر، روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP[۱]) و نیز روش سیستم‌های مهندسی سنگ برای وزن‌دهی پارامترهای موجود در سیستم طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است.

۵-۲- تعیین پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی زغالسنگ

در علوم مهندسی، همواره برای ارائه سیستم طبقه‌بندی، انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار هم یکی از مهم‌ترین مراحل به شمار می‌رود. در سیستم‌های طبقه‌بندی همواره سعی می‌شود با کمترین تعداد پارامترها بهترین قضاوت صورت گیرد؛ لذا در این تلاش برای ارائه‌ی

[۱] - Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

سیستم طبقه‌بندی جدید پیش‌بینی انـدیس پتانسـیل خودسـوزی زغالسـنگ (CSCPi[1])، اسـتفاده از تمامی ۲۱ پارامتر اشاره شده در فصل چهارم از لحـاظ مهندسـی امـر پسـندیده‌ای نیسـت. از طرفـی همگی پارامترهای مورد اشاره در فصل چهارم دارای شاخص کمّی و آزمایشـگاهی نیسـتند. همچنـین تعدادی از پارامترهای مورد اشاره با همدیگر هم‌پوشانی داشـته و طبیعـت بعضـی از پارامترهـا تعـداد دیگری از پارامترها را در بر می‌گیرند.

با در نظر گرفتن کلیّه موارد فوق، در توسعه سیستم طبقه‌بندی جدید ۳ اصل اساسی زیر مورد توجه قرار گرفته است:

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

۲- از به‌کارگیری پارامترهای هم‌ارزش، هم ارز و دارای هم‌پوشانی پرهیز شود.

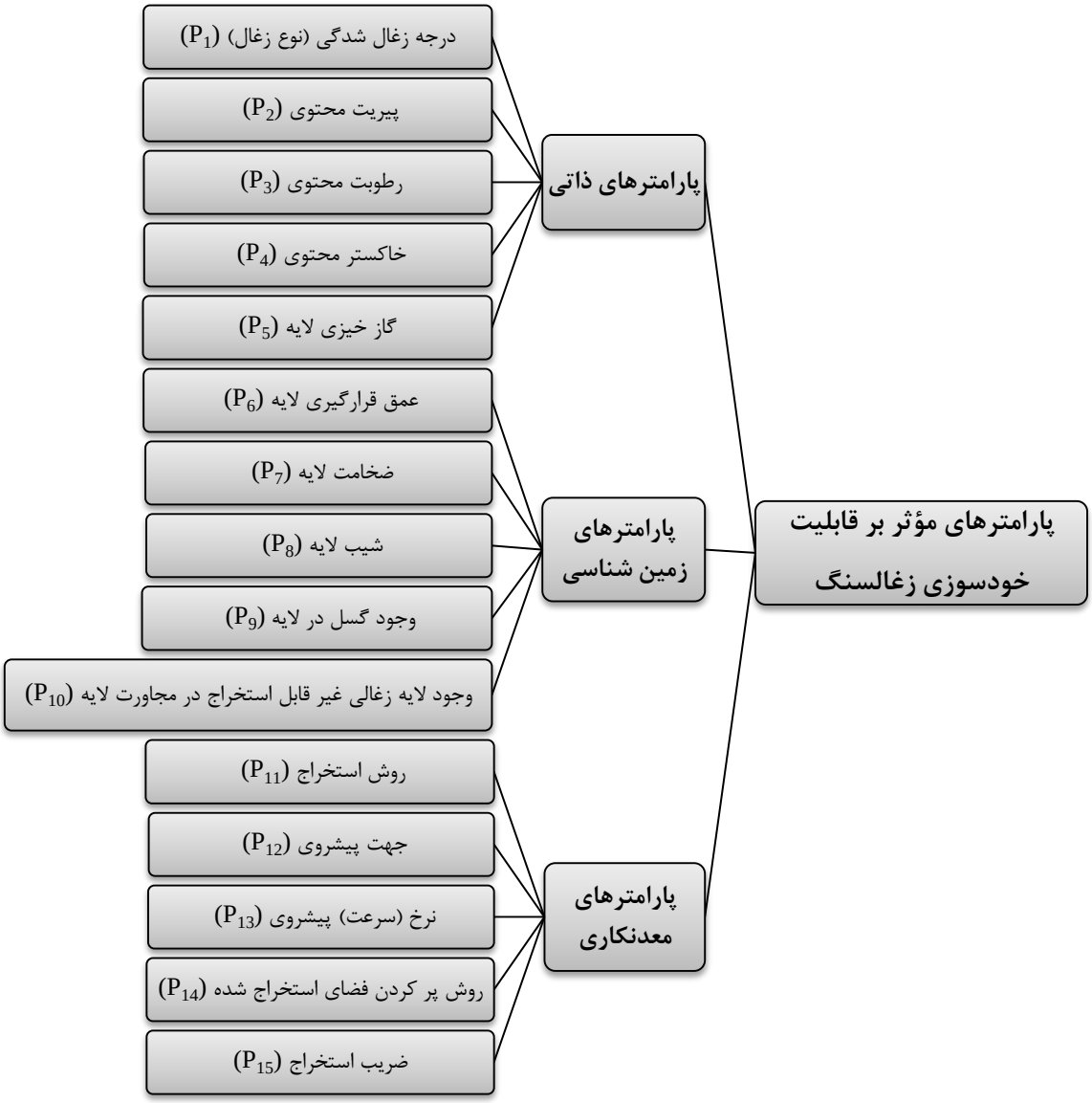
۳- از به‌کارگیری پارامترهایی که قابلیت اندازه‌گیری ندارند پرهیز شود.

با در نظر گرفتن ۳ اصل فوق و نیز مطالب فوق‌الذکر تعداد ۱۵ پارامتر از ۲۱ پارامتر اولیّه بـرای استفاده در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در شکل ۵-۱ آورده شده‌اند.

چنانکه در شکل ۵-۱ مشاهده می‌شود این پارامترهـا، تقریبـاً تمـامی مشخصـات ذاتـی، زمـین شناسی و معدنکاری زغال را به خوبی پوشش می‌دهند و لذا می‌توان با اسـتفاده از ایـن پارامترهـا، بـه دیدی روشن از قابلیت خودسوزی زغالسنگ 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.

[1] - Coal Spontaneous Combustion Potential index



شکل ۵-۱:پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی زغالسنگ

۵-۳- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی

تصمیم‌گیری یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های انسانی است زیرا هر فرد در طول شبانه روز تصمیم‌های فراوانی را اتخاذ می‌کند. برخی از این تصمیم‌ها اهمیّت چندانی نداشته و برخی دیگر از اهمیّت بالایی برخوردار هستند. هرچه مسئولیت و اختیارات انسان بیشتر باشد تصمیم‌گیری اهمیّت بیشتری خواهد داشت. از آنجا که اتخاذ تصمیم صحیح و به موقع می‌تواند تأثیر بسزایی در زندگی شخصی و اجتماعی انسان‌ها داشته باشد، ضرورت وجود یک تکنیک قوی که بتواند انسان را در این

زمینه یاری کند، کاملاً محسوس می‌باشد (حسینی، ۱۳۸۷).

بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری حاوی اطلاعات ناقص و نادقیق هستند که مشکلات بسیاری به دنبال دارند. همچنین تصمیم‌های اتخاذ شده توسط خبرگان، بر اساس صلاحیت فردی آن‌ها بوده و به شدّت ذهنی است. در این‌گونه مواقع استفاده از اعداد قطعی منجر به نتایجی دور از واقعیّت خواهد شد. ضمناً در بسیاری از موارد استفاده از متغیرهای زبانی توسط خبرگان متداول‌تر و راحت‌تر است. بنابراین بهتر است به جای اعداد معیّن و قطعی از اعداد فازی برای توصیف اطلاعات استفاده شود (حسینی، ۱۳۸۷).

یکی از کارآمدترین این تکنیک‌ها، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی است. در روش دلفی، پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌شوند، در حالی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلند مدّت، آن را از دنیای واقعی دور می‌سازد. از طرفی افراد خبره از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند و این نشان می‌دهد که عدم قاطعیت حاکم بر این شرایط از نوع امکانی است نه احتمالی. امکانی بودن عدم قاطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر آن است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (با به‌کارگیری اعداد فازی) به پیش بینی بلند مدّت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی بپردازیم. بدین ترتیب اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ نموده و مورد تحلیل قرار می‌دهیم. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می‌شود (حسینی، ۱۳۸۷).

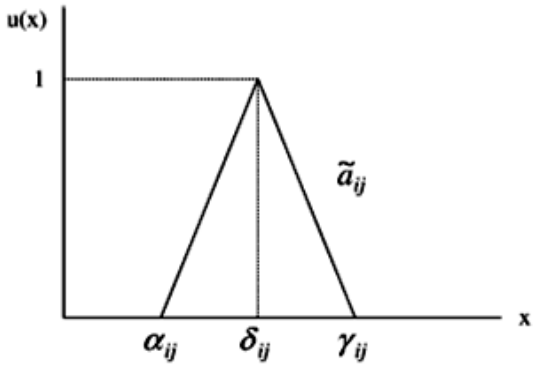
گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرات خبرگان مورد استفاده قرار داد، اما در این تحقیق برای سهولت انجام محاسبات از اعداد فازی مثلثی استفاده خواهد شد. مراحل اجرای روش دلفی در ادامه آمده است.

۵-۳-۱- نظر سنجی از متخصّصان

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

۵-۳-۲- محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی ($\tilde{a}_{ij}$) نظرهای حاصل از نظرسنجی از متخصّصان به طور مستقیم مدّ 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 ۵-۲ 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 ۵-۲: تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی (Liu & Chen, 2007)

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

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

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^{n} \beta_{ijk}\right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (۵-۳)$$

$$\gamma_{ij} = Max(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (۵-۴)$$

در روابط فوق β_{ijk} نشان دهنده اهمیّت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام است و γ_{ij} و α_{ij} به ترتیب حدّ بالا و پایین نظرهای پرسش شوندگان و δ_{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 می‌کنند (عطائی، 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).

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}], \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ij} \approx 1, \forall\, i,j = 1,2,\dots,n \qquad (۵-۵)$$

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):

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n} \qquad (۶-۵)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \qquad (۷-۵)$$

که در آن $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ بوده و $\otimes$ 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).

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

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از آن جایی که تکنیک فازی دلفی بر مبنای تجربیات و نظرات تعدادی از متخصّصان یک علم استوار است، لذا به نظر می‌رسد نتایج به دست آمده از این روش می‌تواند رهیافت مناسبی برای ارزیابی اهمیّت 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 قابلیت خودسوزی زغالسنگ استفاده شده است.

۵-۴- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی زغالسنگ با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی

۵-۴-۱- نظرسنجی از متخصّصان زغالسنگ

پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی زغالسنگ، به منظور استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی جهت تعیین وزن پارامترهای مختلف، فرم‌های نظر سنجی شامل کلیّه پارامترهای شکل ۵-۱ تهیه شده و جهت تکمیل شدن برای ۴۰ تن از متخصّصان برجسته علم زغالسنگ در داخل و خارج از کشور ارسال شد. از میان فرم‌های ارسال شده ۱۵ فرم نظرسنجی تکمیل شده دریافت شد (۱۵ فرم از متخصّصان داخلی) که برای ورودی روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۵-۲ تا جدول ۵-۹ نمونه‌هایی از فرم‌های نظرسنجی ارسال شده را نشان می‌دهند. در این فرم از متخصّصان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیّت هر یک از پارامترها با استفاده از طیف پنج گزینه‌ای لیکرت[1] امتیاز بسیار با اهمیّت (۹)، با اهمیّت (۷)، اهمیّت متوسط (۵)، کم اهمیّت (۳) و یا بدون اهمیّت (۱) را به آن‌ها اختصاص دهند که این طیف در جدول ۵-۱ آورده شده است.

[1] - Likert

جدول ۵-۱: 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	۲، ۴، ۶ و ۸

جدول ۵-۲: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان داخلی

معیارهای ارزیابی	اهمیت هر یک از پارامترها				
	بدون اهمیت	**کم اهمیت**	**اهمیت متوسط**	**با اهمیت**	**بسیار با اهمیت**
عوامل ذاتی					
عوامل زمین‌شناسی					
عوامل معدنکاری					

جدول ۵-۳: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان داخلی

	پارامترها	اهمیت هر یک از پارامترها				
		بدون اهمیت	**کم اهمیت**	**اهمیت متوسط**	**با اهمیت**	**بسیار با اهمیت**
عوامل ذاتی	درجه زغال‌شدگی					
	پیریت محتوی					
	رطوبت محتوی					
	خاکستر محتوی					
	گاز خیزی لایه					

جدول ۵-۴: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان داخلی

	پارامترها	اهمیت هر یک از پارامترها				
		بدون اهمیت	**کم اهمیت**	**اهمیت متوسط**	**با اهمیت**	**بسیار با اهمیت**
عوامل زمین‌شناسی	عمق قرارگیری لایه					
	ضخامت لایه					
	شیب لایه					
	وجود گسل در لایه					
	لایه‌ی زغالی غیر قابل استخراج در مجاورت لایه‌ی استخراجی					

جدول ۵-۵ : نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان داخلی

	پارامترها	اهمیت هر یک از پارامترها				
		بدون اهمیت	**کم اهمیت**	**اهمیت متوسط**	**با اهمیت**	**بسیار با اهمیت**
عوامل معدنکاری	روش استخراج					
	جهت پیشروی					
	نرخ (سرعت) پیشروی					
	روش پر کردن فضای استخراج شده					
	ضریب استخراج					

جدول ۵-۶: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان خارجی

	No.		**Importance of each parameter**				
			VW (1)	**W (3)**	**M (5)**	**S (7)**	**VS (9)**
Main Characteristics	1	Intrinsic Characteristics					
	2	Geological Characteristics					
	3	Mining Characteristics					
	VW: Very Weak importance, W: Weak importance, M: Moderate importance, S: Strength importance, VS: Very Strength importance						

جدول ۵-۷: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان خارجی

	No.		**Importance of each parameter**				
			VW (1)	**W (3)**	**M (5)**	**S (7)**	**VS (9)**
Intrinsic Characteristics	1	Rank of Coal					
	2	Pyrite Content (%)					
	3	Moisture Content (%)					
	4	Ash Content (%)					
	5	Gas Emission in Seam (ton/m^3)					
VW: Very Weak importance, W: Weak importance, M: Moderate importance, S: Strength importance, VS: Very Strength importance							

جدول ۵-۸: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان خارجی

	No.		**Importance of each parameter**				
			VW (1)	**W (3)**	**M (5)**	**S (7)**	**VS (9)**
Geological Characteristics	1	Depth of Cover					
	2	Thickness of Coal Seam					
	3	Slope of Coal Seam					
	4	Exist of Tectonic Faults in Seam					
	5	Unworkable Coal Seam in Vicinity of Extracting Coal Seam					
VW: Very Weak importance, W: Weak importance, M: Moderate importance, S: Strength importance, VS: Very Strength importance							

جدول ۵-۹: نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان خارجی

	No.		Importance of each parameter				
			VW (1)	W (3)	M (5)	S (7)	VS (9)
Mining Characteristics	1	Extraction Method					
	2	Advancing Direction					
	3	Rate of Advance					
	4	Filling of Extracted Area Method					
	5	Exploitation Factor					
VW: Very Weak importance, W: Weak importance, M: Moderate importance, S: Strength importance, VS: Very Strength importance							

با توجه به فرم‌های 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 ۱ آورده شده است. همچنین نتایج کلی نظر سنجی‌ها در جدول ۵-۱۰ تا جدول ۵-۱۳ آورده شده است.

جدول ۵-۱۰: نتایج کلی نظر سنجی‌ها از عوامل اصلی

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	۹	۷	۹	۹	۵	۹	۹	۹	۷	۹	۹
عوامل زمین‌شناسی	۵	۷	۷	۹	۵	۷	۵	۵	۷	۹	۷	۵	۵	۵	۳
عوامل معدنکاری	۷	۵	۵	۷	۹	۷	۷	۷	۷	۷	۹	۷	۷	۷	۷

جدول ۵-۱۱: نتایج کلی نظر سنجی‌ها 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														
عوامل ذاتی	درجه زغال‌شدگی	۹	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۵	۷	۹	۷	۷	۷	۷	۹
	پیریت محتوی	۵	۵	۷	۷	۵	۹	۹	۳	۵	۱	۷	۷	۵	۹	۷
	رطوبت محتوی	۷	۷	۷	۹	۹	۵	۳	۷	۳	۵	۳	۷	۵	۹	۷
	خاکستر محتوی	۷	۷	۷	۹	۷	۱	۵	۵	۷	۵	۵	۷	۵	۹	۵
	گاز خیزی لایه	۹	۷	۷	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۷	۷	۷	۵	۹	۳

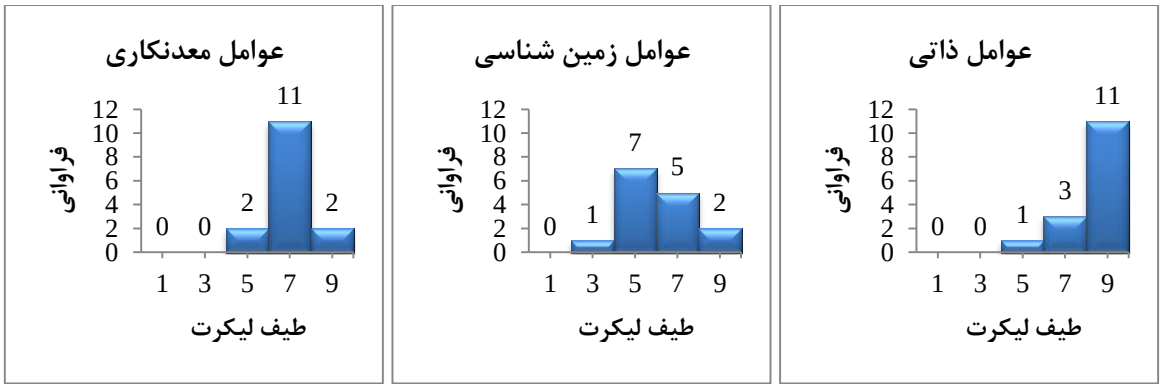
جدول ۵-۱۲: نتایج کلی نظر سنجی‌ها از عوامل زمین شناسی

	متخصصان →	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
		امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان														
عوامل زمین‌شناسی	عمق قرارگیری لایه	۵	۷	۵	۹	۷	۷	۵	۹	۹	۵	۷	۷	۵	۵	۷
	ضخامت لایه	۳	۷	۵	۹	۷	۳	۷	۷	۷	۱	۵	۷	۳	۷	۷
	شیب لایه	۳	۵	۵	۹	۷	۱	۵	۱	۵	۱	۷	۳	۳	۵	۱
	وجود گسل در لایه	۷	۳	۵	۹	۵	۵	۳	۷	۹	۱	۷	۵	۵	۷	۹
	لایه‌ی زغالی غیر قابل استخراج در مجاورت لایه استخراجی	۳	۳	۵	۹	۹	۷	۷	۳	۷	۳	۷	۷	۱	۹	۵

جدول ۵-۱۳: نتایج کلی نظر سنجی‌ها از عوامل معدنکاری

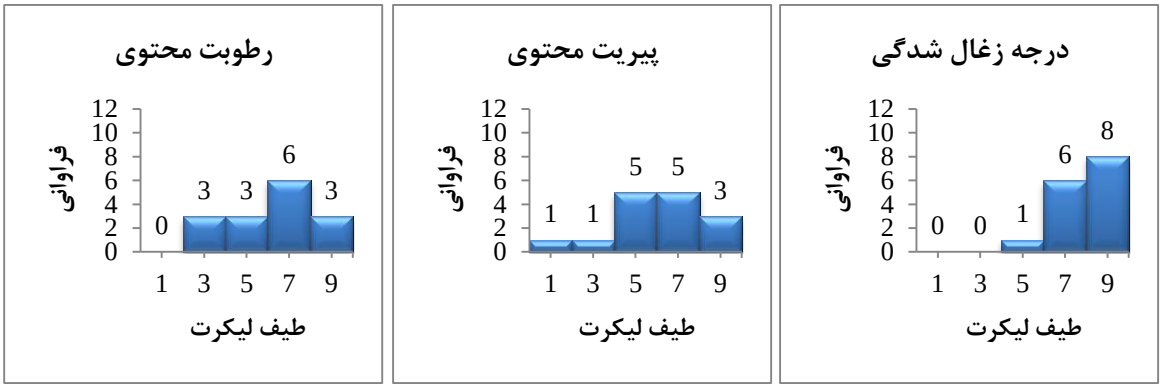
	متخصصان →	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
		امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان														
عوامل معدنکاری	روش استخراج	۵	۷	۷	۹	۹	۷	۹	۳	۷	۵	۷	۵	۷	۵	۵
	جهت پیشروی	۷	۷	۵	۹	۷	۳	۷	۳	۷	۵	۷	۷	۵	۵	۷
	نرخ (سرعت) پیشروی	۷	۷	۵	۹	۷	۹	۹	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
	روش پر کردن فضای استخراج شده	۷	۷	۵	۹	۹	۷	۷	۷	۷	۷	۹	۷	۷	۷	۷
	ضریب استخراج	۷	۷	۷	۹	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۵	۷	۷	۷

به منظور بررسی فراوانی امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای مؤثر توسط متخصصان، هیستوگرام مربوط به هر پارامتر طبق شکل ۵-۳ تا شکل ۵-۶ رسم شده است.

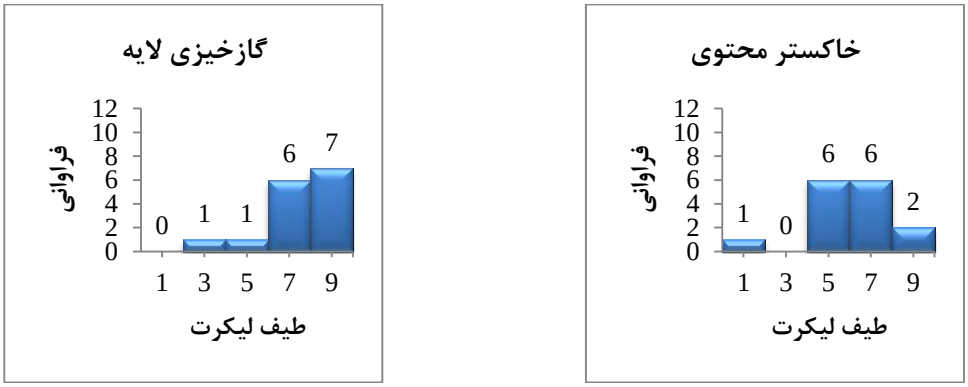


الف ب ج

شکل ۵-۳: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری با توجه به نظرات متخصصان



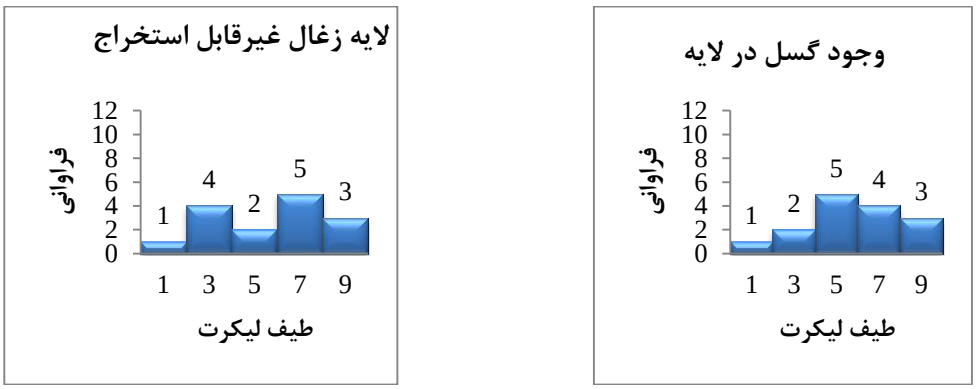
الف ب ج



د ه

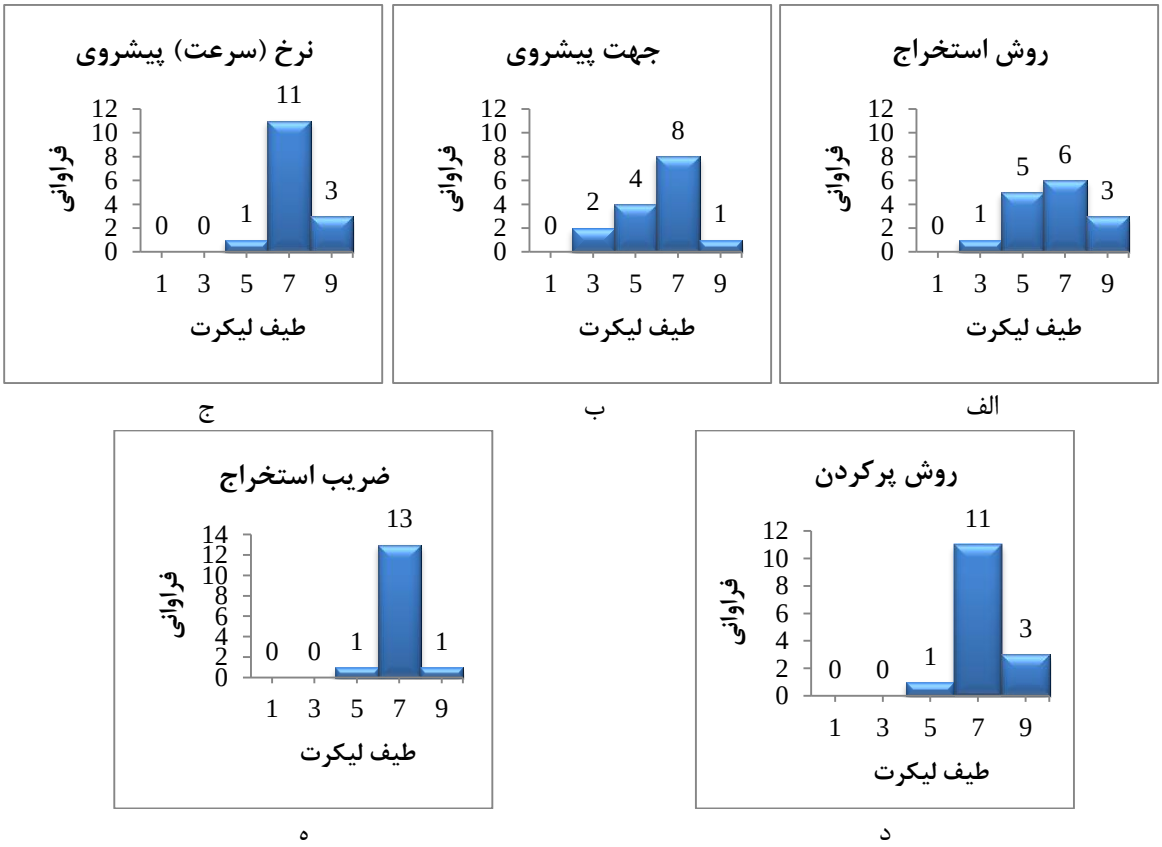
شکل ۵-۴: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل ذاتی با توجه به نظرات متخصصان

الف ب ج



د ه

شکل ۵-۵: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل زمین‌شناسی با توجه به نظرات متخصصان



شکل ۵-۶: هیستوگرام فراوانی امتیاز مربوط به عوامل معدنکاری با توجه به نظرات متخصصان

۵-۴-۲- اعتبارسنجی پرسشنامه‌ها

یک آزمون خوب باید از تعدادی ویژگی مطلوب مانند عینیت، سهولت اجرا، عملی بودن، سهولت تعبیر و تفسیر، روایی و پایایی برخوردار باشد. مهم‌ترین مورد ذکر شده در این ویژگی‌ها، پایایی (اعتبارسنجی) است (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 پایایی و روش‌های تعیین آن

پایایی یک معیار اندازه‌گیری است که عمدتاً به دقّت نتایج حاصل از آن اشاره می‌کند. پایایی به دقّت، اعتمادپذیری، ثبات یا تکرارپذیری نتایج آزمون اشاره می‌کند. روش‌های تعیین پایایی متنوّع هستند و به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

۱- روش پایایی مصححان[۱]

۲- روش باز آزمایی[۲]

۳- روش فرم‌های هم ارز[۳]

۴- روش‌های همسانی درونی[۴] (روش دو نیمه کردن[۵]، روش کودر- ریچاردسون[۶]، روش ضریب آلفا[۷] (کرونباخ[۸]))

که در اینجا تنها به روش ضریب آلفا (کرونباخ) که یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ارزیابی پایایی است، اشاره می‌شود.

۵-۴-۲-۲- روش‌های همسانی درونی

در روش‌های همسانی درونی، بر همسانی یا یکنواختی ماده‌ها یا اجزای تشکیل دهنده یک آزمون تاکید می‌شود. بدین منظور، آزمون مورد نظر را یک‌بار با گروه واحدی از آزمون شوندگان اجرا می‌کنند و به اصطلاح پیش آزمون تهیه می‌شود (تعداد آزمون شوندگان در پیش آزمون وابسته به نظر محقّق است که با توجه به اهمیّت آزمون و موارد مشابه دیگر تعیین می‌شود). سپس متناسب با نوع آزمون با یکی از روش‌های دو نیمه کردن، روش کودر- ریچاردسون، روش ضریب آلفای کرونباخ به تعیین ضریب پایایی آن می‌پردازند (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

۵-۴-۲-۳- روش ضریب آلفای کرونباخ

ضریب آلفای کرونباخ توسط کرونباخ در سال ۱۹۵۱ میلادی ابداع شد و یکی از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری اعتمادپذیری و یا پایایی پرسش‌نامه‌ها است. به این روش، ضریب آلفا یا حتی

---

۱ - Examiners (Scorers) Reliability
۲ - Test- Retest
۳ - Equivalent Forms
۴ - Internal Consistency
۵ - Split- Halves
۶ - Kuder- Richardson
۷ - Coefficient alpha
۸ - Cronbach

آلفا نیز گفته می‌شود. ضریب آلفای کرونباخ، برای سنجش میزان تک بعدی بودن نگرش‌ها، عقاید و غیره بکار می‌رود. در واقع می‌خواهیم ببینیم تا چه حدّ برداشت پاسخگویان از سؤالات یکسان بوده است. اساس این ضریب بر پایه مقیاس‌ها است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

مقیاس‌ها عبارتند از دسته‌ای از اعداد که بر روی یک پیوستار به افراد، اشیا یا رفتارها در جهت به کمیّت کشاندن کیفیّت‌ها اختصاص داده می‌شود. روش آلفای کرونباخ در شرایطی که نمرات سؤالات نه تنها برای گزینه‌های دو ارزشی صفر و یک، بلکه برای گزینه‌های چند ارزشی (مانند طیف پنج گزینه‌ای لیکرت) که در تحقیقات اجتماعی استفاده می‌شود نیز به کار می‌رود (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

در مقیاس لیکرت اساس کار بر فرض هم وزن بودن گویه‌ها استوار است. بدین ترتیب به هر گویه نمراتی (مثلاً از ۱ تا ۹ برای مقیاس لیکرت ۵ گویه‌ای) داده می‌شود که مجموع نمراتی که هر فرد از گویه‌ها می‌گیرد نمایانگر گرایش او خواهد بود (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

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

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

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

که در این روابط (Cronbach, 1951):

k: تعداد سؤالات (بخش‌های) آزمون؛

σ_j^2: واریانس نمرات سؤال (بخش) j ام؛

σ^2: واریانس نمرات کل سؤالات (آزمون)؛

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

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

بدیهی است هرچقدر شاخص آلفای کرونباخ به ۱ نزدیک‌تر باشد، همبستگی درونی بین سؤالات

بیشتر و در نتیجه پرسش‌ها همگن‌تر خواهند بود. کرونباخ ضریب پایایی ٪۴۵ را کم، ٪۷۵ را متوسط و قابل قبول، و ضریب ٪۹۵ را زیاد پیشنهاد کرده است (Cronbach, 1951). بدیهی است در صورت پایین بودن مقدار آلفا، بایستی بررسی شود که با حذف کدام پرسش‌ها مقدار آن را می‌توان افزایش داد. امّا به طور کلی اگر ضریب آلفا بیشتر از ۰/۷ باشد، آزمون از پایایی قابل قبولی برخوردار است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱).

۵-۴-۲-۴- محاسبه ضریب آلفای کرونباخ تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار SPSS 20

متغیّرها و داده‌های جدول ۵-۱۰ تا جدول ۵-۱۳ وارد نرم افزار شده و خروجی‌های مورد نظر از نرم‌افزار دریافت می‌شود که در جدول ۵-۱۴ تا جدول ۵-۱۷ آورده شده است.

جدول ۵-۱۴: قابلیت اعتماد عوامل اصلی مؤثر در پدیده خودسوزی زغالسنگ با توجه به نظر متخصصان

[Reliability of Main Characteristics With Model: ALPHA]			
Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	3	100.0
	Excluded[a]	0	.0
	Total	3	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha	N of Items		
0.900	15		

جدول ۵-۱۵: قابلیت اعتماد عوامل ذاتی مؤثر در پدیده خودسوزی زغالسنگ با توجه به نظر متخصصان

[Reliability of Intrinsic Characteristics With Model: ALPHA]			
Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	5	100.0
	Excluded[a]	0	.0
	Total	5	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha	N of Items		
0.743	15		

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

[Reliability of Geological Characteristics With Model: ALPHA]			
Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	5	100.0
	Excluded[a]	0	.0
	Total	5	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			

Reliability Statistics	
Cronbach's Alpha	N of Items
0.766	15

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

[Reliability of Mining Characteristics With Model: ALPHA]			
Case Processing Summary			
		N	%
Cases	Valid	5	100.0
	Excluded[a]	0	.0
	Total	5	100.0
a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.			
Reliability Statistics			
Cronbach's Alpha	N of Items		
0.732	15		

از آن جایی که مقدار آلفای کرونباخ در تمام موارد بزرگ‌تر از ۰/۷ است، پرسشنامه‌ها از پایـایی 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 تشـکیل مـاتریس مقایسه زوجی اصلی پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند. در تشکیل ماتریس مذکور با توجه به سـابقه کاربرد روش FDAHP در طبقه‌بندی‌های مهندسی (Liu & Chen, 2007)، از تابع عضـویت مثلثـی و در نتیجه اعداد فازی مثلثی طبق شـکل ۵-۲ و روابـط (۵-۱) تـا (۵-۴) اسـتفاده شـده اسـت. توابـع عضویت مثلثی با وجود سادگی، مفهوم فازی بودن کمیّت‌ها را به صورت مطلوبی مدل می‌کند.

۵-۴-۳-۱- 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 ۵-۱۸ آورده شده است.

جدول ۵-۱۸: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۳ پارامتر اصلی نظرسنجی شده

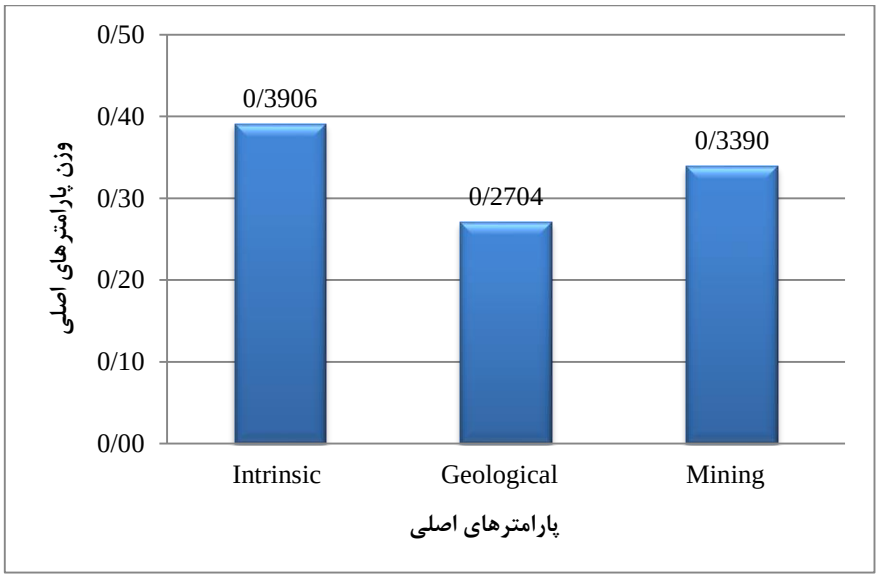
	Intrinsic Characteristics (IC)	Geological Characteristics (GC)	Mining Characteristics (MC)
IC	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.714, 1.408, 3.000)	(0.714, 1.189, 1.800)
GC	(0.333, 0.710, 1.400)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.429, 0.845, 1.400)
MC	(0.556, 0.841, 1.400)	(0.714, 1.184, 2.333)	(1.000, 1.000, 1.000)

با استفاده از روابط (۵-۶) تا (۵-۸) عدد فازی $\tilde{Z}_i$، وزن فـازی $\tilde{W}_i$ و وزن غیـر فـازی ۳ پـارامتر اصلی ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری محاسبه شده است که نتایج محاسـبات در جـدول ۵-۱۹ آورده شده است.

جدول ۵-۱۹: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی پارامترهای اصلی

		$\tilde{Z}_i$ (α,δ,γ)	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی پارامترها)	وزن غیر فازی پارامترها
پارامترها	Intrinsic	(0.79906, 1.18732, 1.75441)	(0.1780, 0.3919, 0.8530)	**0.3906**
	Geological	(0.52276, 0.84352, 1.25146)	(0.1164, 0.2785, 0.6085)	**0.2704**
	Mining	(0.73485, 0.99848, 1.48378)	(0.1637, 0.3296, 0.7214)	**0.3390**
$(\tilde{Z}_i \oplus \cdots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$		(0.22273, 0.33011, 0.48622)		Σ=1.000

نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی ۳ پارامتر اصلی ذاتی، زمین‌شناسی و معـدنکاری مـؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود پارامترهـای ذاتی و زمین‌شناسی به ترتیب بیشترین و کمترین امتیاز را کسب کرده‌اند.



شکل ۵-۷: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای اصلی مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال

۵-۴-۳-۲- یافتن وزن پارامترهای ذاتی

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۵ پارامتر ذاتی با توجه به جداول پیوست ۱ در جدول ۵-۲۰ آورده شده است.

جدول ۵-۲۰: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۵ پارامتر ذاتی نظرسنجی شده

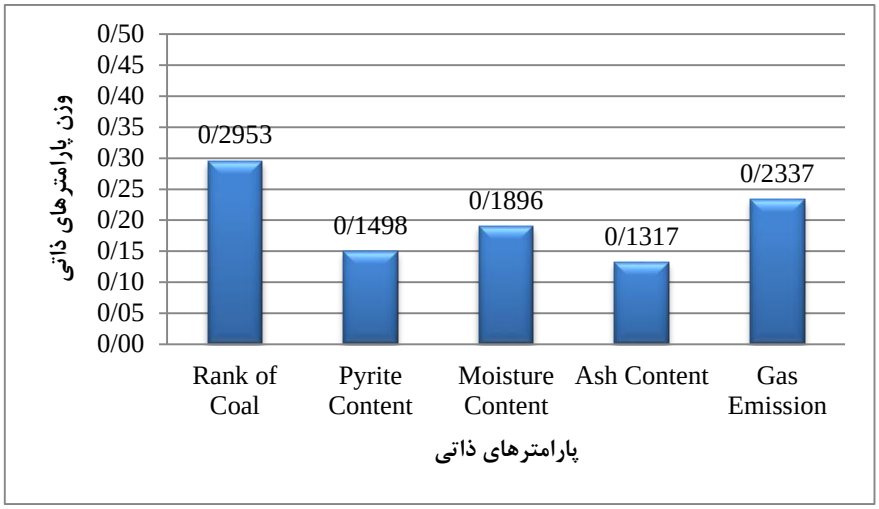
	Rank of Coal (RC)	Pyrite Content (PC)	Moisture Content (MC)	Ash Content (AC)	Gas Emission (GE)
RC	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.778, 1.433, 9.000)	(0.714, 1.347, 3.000)	(0.778, 1.408, 9.000)	(0.714, 1.076, 3.000)
PC	(0.111, 0.698, 1.286)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.200, 0.940, 3.000)	(0.200, 0.983, 9.000)	(0.143, 0.751, 2.333)
MC	(0.333, 0.742, 1.400)	(0.333, 1.064, 5.000)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.429, 1.045, 5.000)	(0.333, 0.799, 2.333)
AC	(0.111, 0.710, 1.286)	(0.111, 1.017, 5.000)	(0.200, 0.957, 2.333)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.111, 0.764, 1.667)
GE	(0.333, 0.929, 1.400)	(0.429, 1.332, 7.000)	(0.429, 1.252, 3.000)	(0.600, 1.309, 9.000)	(1.000, 1.000, 1.000)

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

جدول ۵-۲۱: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی پارامترهای ذاتی

		$\tilde{Z}_i$ (α,δ,γ)	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی پارامترها)	وزن غیر فازی پارامترها
پارامترها	Rank of Coal	(0.79048, 1.23948, 3.73719)	(0.0585, 0.2451, 1.7247)	**0.2953**
	Pyrite Content	(0.22937, 0.86501, 2.40822)	(0.0170, 0.1711, 1.1114)	**0.1498**
	Moisture Content	(0.43665, 0.91998, 2.41218)	(0.0323, 0.1819, 1.1132)	**0.1896**
	Ash Content	(0.19394, 0.88010, 1.90365)	(0.0144, 0.1741, 0.8785)	**0.1317**
	Gas Emission	(0.51643, 1.15194, 3.05153)	(0.0382, 0.2278, 1.4083)	**0.2337**
$(\tilde{Z}_i \oplus \cdots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$		(0.07400, 0.19776, 0.46149)		Σ=1.000

نمودار ستونی وزن فازی دلفی ۵ پارامتر ذاتی مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود پارامترهای درجه زغال‌شدگی و گازخیزی به ترتیب بیشترین امتیازها و خاکستر محتوی کمترین امتیاز را کسب کرده‌اند.



شکل ۵-۸: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای ذاتی مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال

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

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۵ پارامتر زمین‌شناسی با توجه به جداول پیوست ۱ در جدول ۵-۲۲ آورده شده است.

جدول ۵-۲۲: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۵ پارامتر زمین‌شناسی نظرسنجی شده

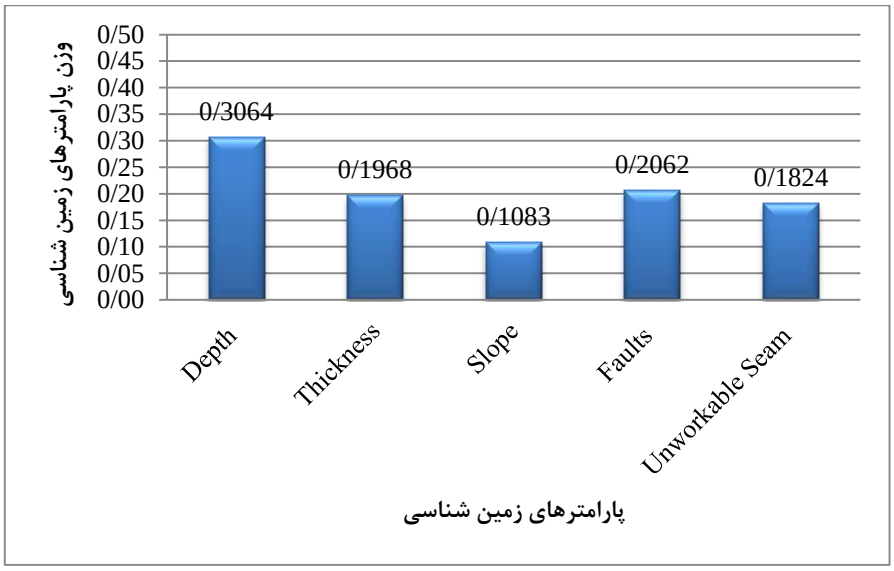
	Depth (D)	Thickness (T)	Slope (S)	Faults (F)	Unworkable Seam (US)
D	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.714, 1.275, 5.000)	(1.000, 2.013, 9.000)	(0.714, 1.246, 5.000)	(0.556, 1.305, 5.000)
T	(0.200, 0.784, 1.400)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.714, 1.579, 7.000)	(0.429, 0.978, 2.333)	(0.333, 1.023, 3.000)
S	(0.111, 0.497, 1.000)	(0.143, 0.634, 1.400)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.111, 0.619, 1.667)	(0.143, 0.648, 3.000)
F	(0.200, 0.802, 1.400)	(0.429, 1.023, 2.333)	(0.600, 1.615, 9.000)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.333, 1.047, 5.000)
UC	(0.200, 0.766, 1.800)	(0.333, 0.977, 3.000)	(0.333, 1.543, 7.000)	(0.200, 0.955, 3.000)	(1.000, 1.000, 1.000)

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

جدول ۵-۲۳: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی پارامترهای زمین‌شناسی

		$\tilde{Z}_i$ (α,δ,γ)	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی پارامترها)	وزن غیر فازی پارامترها
پارامترها	Depth	(0.77713, 1.33073, 4.07597)	(0.0590, 0.2597, 1.8453)	**0.3064**
	Thickness	(0.45916, 1.04368, 2.32951)	(0.0349, 0.2037, 1.0546)	**0.1968**
	Slope	(0.19066, 0.66119, 1.47577)	(0.0145, 0.1291, 0.6681)	**0.1083**
	Faults	(0.44342, 1.06765, 2.71309)	(0.0337, 0.2084, 1.2283)	**0.2062**
	Unworkable Seam	(0.33850, 1.01998, 2.57586)	(0.0257, 0.1991, 1.1661)	**0.1824**
$(\tilde{Z}_i \oplus \cdots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$		(0.07593, 0.19519, 0.45272)		Σ=1.0000

نمودار ستونی وزن فازی دلفی ۵ پارامتر زمین‌شناسی مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ در شکل ۵-۹ نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود پارامتر عمق قرارگیری لایه بیشترین امتیاز و شیب لایه کمترین امتیاز را کسب کرده‌اند.



شکل ۵-۹: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال

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

ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۵ پارامتر معدنکاری با توجه به جداول پیوست ۱ در جدول ۵-۲۴ آورده شده است.

جدول ۵-۲۴: ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۵ پارامتر معدنکاری نظرسنجی شده

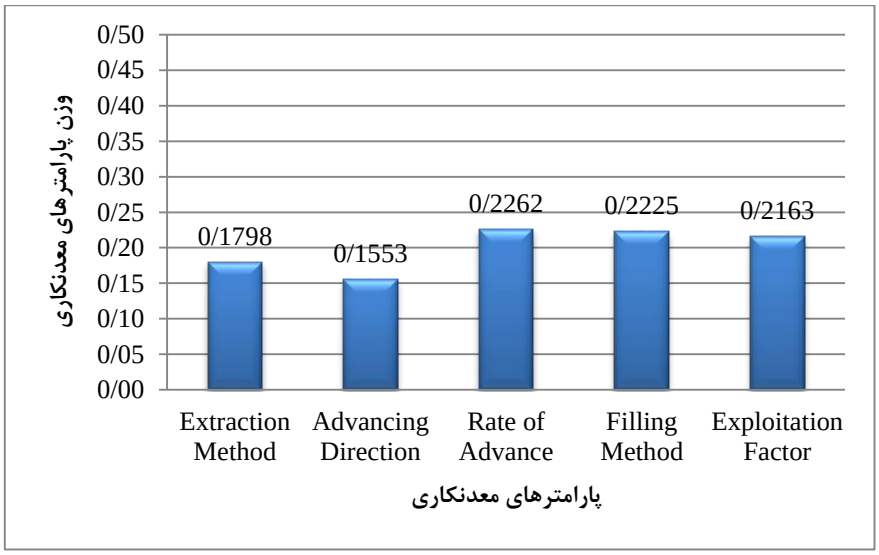
	Extraction Method (EM)	Advancing Direction (AD)	Rate of Advance (RA)	Filling Method (FM)	Exploitation Factor (EF)
EM	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.714, 1.070, 2.333)	(0.429, 0.864, 1.400)	(0.429, 0.864, 1.400)	(0.429, 0.893, 1.286)
AD	(0.429, 0.935, 1.400)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.333, 0.808, 1.000)	(0.429, 0.808, 1.000)	(0.429, 0.835, 1.400)
RA	(0.714, 1.157, 2.333)	(1.000, 1.238, 3.000)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.778, 1.000, 1.286)	(0.714, 1.034, 1.400)
FM	(0.714, 1.157, 2.333)	(1.000, 1.238, 2.333)	(0.778, 1.000, 1.286)	(1.000, 1.000, 1.000)	(0.714, 1.034, 1.400)
EF	(0.778, 1.119, 2.333)	(0.714, 1.198, 2.333)	(0.714, 0.967, 1.400)	(0.714, 0.967, 1.400)	(1.000, 1.000, 1.000)

با استفاده از روابط (۵-۶) تا (۵-۸) عدد فازی $\tilde{Z}_i$، وزن فازی $\widetilde{W}_i$ و وزن غیر فازی ۵ پارامتر معدنکاری محاسبه شده است که نتایج محاسبات در جدول ۵-۲۵ آورده شده است.

جدول ۵-۲۵: وزن نهایی فازی نسبی و غیر فازی پارامترهای معدنکاری

		$\tilde{Z}_i$ (α,δ,γ)	$\tilde{W}_i$ (وزن فازی پارامترها)	وزن غیر فازی پارامترها
پارامترها	Extraction Method	(0.56233, 0.93472, 1.42520)	(0.0759, 0.1863, 0.4090)	**0.1798**
	Advancing Direction	(0.48282, 0.87365, 1.14407)	(0.0651, 0.1741, 0.3283)	**0.1553**
	Rate of Advance	(0.83123, 1.08188, 1.65987)	(0.1121, 0.2156, 0.4763)	**0.2262**
	Filling Method	(0.83123, 1.08188, 1.57850)	(0.1121, 0.2156, 0.4530)	**0.2225**
	Exploitation Factor	(0.77713, 1.04623, 1.60562)	(0.1048, 0.2085, 0.4608)	**0.2163**
$(\tilde{Z}_i \oplus \cdots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1}$		(0.13489, 0.19927, 0.28697)		Σ=1.0000

نمودار ستونی وزن فازی دلفی ۵ پارامتر معدنکاری مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود نرخ پیشروی، روش پر کردن فضای استخراج شده و ضریب استخراج زغال به ترتیب بیشترین امتیاز و جهت پیشروی و روش استخراج به ترتیب کمترین امتیاز را کسب کرده‌اند.



شکل ۵-۱۰: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای معدنکاری مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال

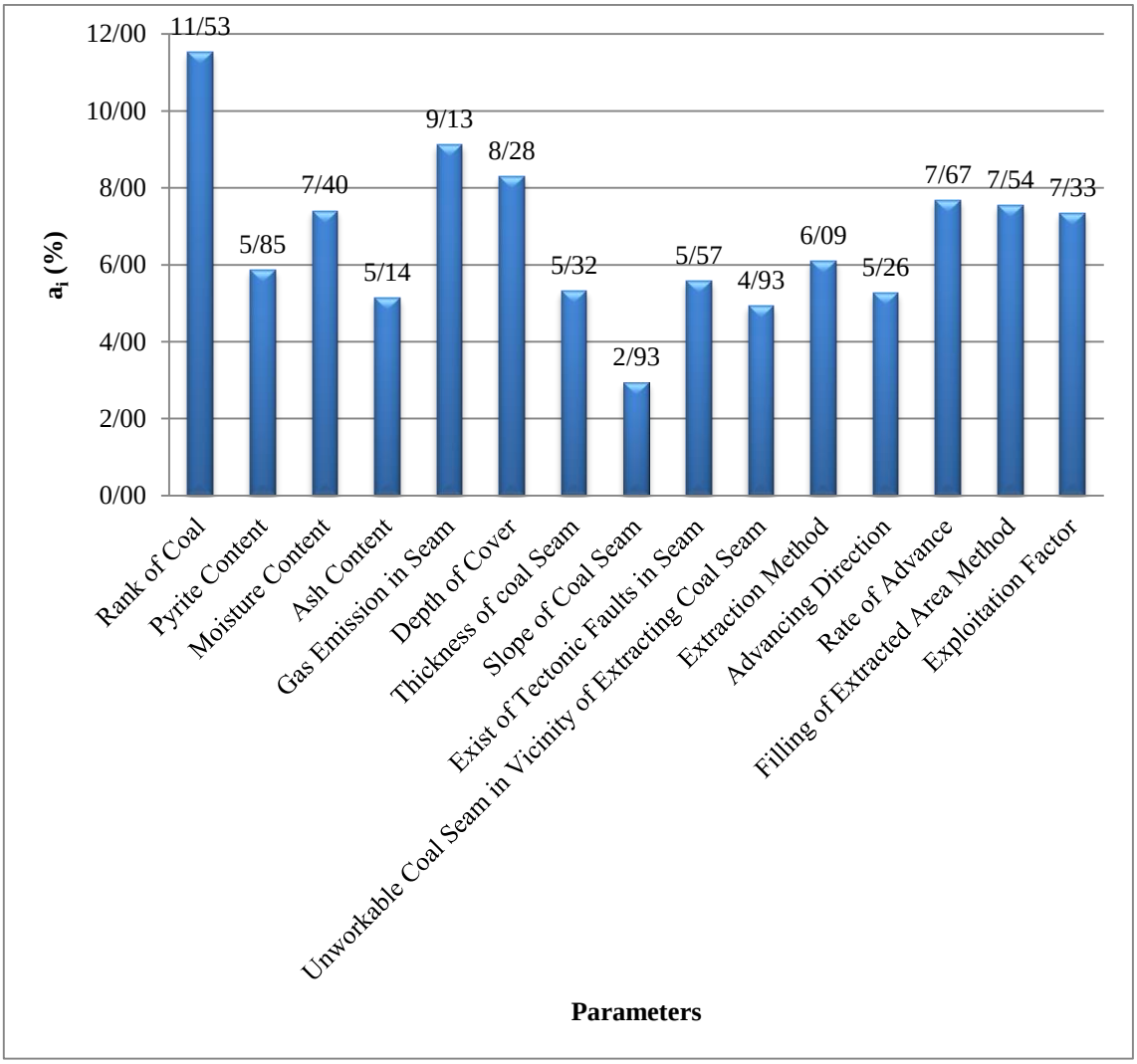
۵-۴-۴- یافتن وزن نهایی پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال با روش FDAHP

در نهایت پس از ضرب نمودن وزن هر پارامتر در وزن پارامترهای بالادستی (اصلی) مربوط به خودش، وزن نهایی پارامترهای تأثیرگذار در خطر خودسوزی زغالسنگ بر حسب درصد (٪) بدست آمده است که نتایج آن در جدول ۵-۲۶ و شکل ۵-۱۱ آورده شده است.

جدول ۵-۲۶: وزن نهایی غیر فازی پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال

Parameters	**Total weight**	**Total weight a_i(%)**
Rank of Coal	0.1153	**11.53**
Pyrite Content	0.0585	**5.85**
Moisture Content	0.0740	**7.40**
Ash Content	0.0514	**5.14**
Gas Emission in Seam	0.0913	**9.13**
Depth of Cover	0.0828	**8.28**
Thickness of Coal Seam	0.0532	**5.32**
Slope of Coal Seam	0.0293	**2.93**
Exist of Tectonic Faults in Seam	0.0557	**5.57**
Unworkable Coal Seam in Vicinity of Extracting Coal Seam	0.0493	**4.93**
Extraction Method	0.0609	**6.09**
Advancing Direction	0.0526	**5.26**
Rate of Advance	0.0767	**7.67**
Filling of Extracted Area Method	0.0754	**7.54**
Exploitation Factor	0.0733	**7.33**

نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی کلیّه پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود نوع زغال، گازخیزی لایه و عمق قرارگیری لایه به ترتیب بیشترین امتیازها و شیب لایه، وجود لایه‌ی زغالی غیر قابل استخراج در مجاورت لایه‌ی استخراجی و خاکستر محتوی لایه زغال به ترتیب کمترین امتیازها را کسب کرده‌اند.



شکل ۵-۱۱: نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال

۵-۵- روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

با پیچیده‌تر شدن مسائل مهندسی و کاربردهای گوناگون، با نگاهی واقع‌بینانه به موضوع در می‌یابیم که روش‌های مرسوم عددی، تجربی و تحلیلی قادر به در نظر گرفتن کلیّه عوامل تأثیرگذار 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 (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 ابزاری پایه‌ای به وسیله رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hudson, 1992; Hudson & Harrison, 1992).

هادسون (Hudson) در سال ۱۹۹۲ میلادی، رویکرد جدیدی با نام سیستم‌های مهندسی سنگ RES (Rock Engineering Systems) ارائه نمود. این روش، یک سیستم کامل مهندسی است که تمامی 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 تفکّر سیستمی، امروزه به عنوان راه حلی جدید برای مسائل پیچیده مهندسی به شمار می‌رود (خالوکاکائی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸). رویکرد مذکور تاکنون در بسیاری از علوم مهندسی نظیر محیط زیست و شناخت گستره آلودگی‌ها، مهندسی عمران، مهندسی معدن، آتشباری و ناپایداری شیب‌های سنگی و غیره به کار رفته است (Frough & Torabi, 2013).

۵-۵-۱- مفهوم سیستم و تفکّر سیستمی

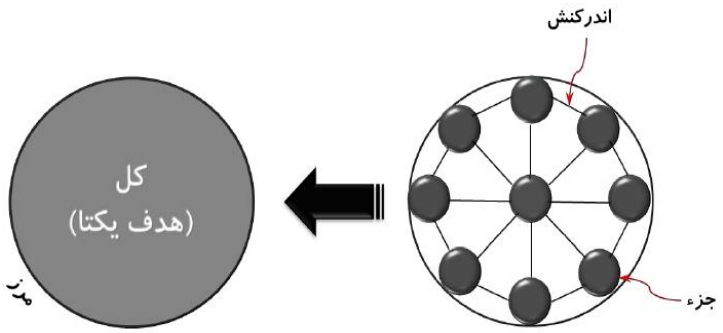
درباره سیستم تعاریف گوناگونی وجود دارد، از نظر Bertalanffy سیستم‌ها عبارتند از تعدادی عنصر که با یکدیگر ارتباط دارند. برخی سیستم را مجموعه‌ای از اجزا به هم پیوسته می‌دانند که بین آن‌ها ارتباطی منظّم وجود دارد، از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند، بر هم اثر می‌گذارند، به صورت کل عمل می‌کنند و هدف‌دار هستند. کلیّت که از ویژگی‌های هر سیستم است از سلسله مراتب تبعیت می‌کند، به طوری که هر سیستم در درون سیستم دیگر عمل می‌کند و به یکدیگر بستگی دارند. در واقع سیستم در سیستم کار می‌کند و تمام سیستم‌ها در درون یکدیگر و به صورت کل وجود دارند و سیستم به مرتبه پایین‌تر از خود عمل می‌کند (Bertalanffy, 1968).

Allenby سیستم را به صورت، گروهی از بخش‌ها و اعضای مستقل و دارای اندرکنش بر روی

همدیگر تعریف می‌کند که این اثرات باعث تغییر در انرژی، ماده و یا اطلاعات می‌شوند. طبق نظر وی، همیشه کل یک سیستم از جمع تک تک اعضای آن بزرگ‌تر است (Allenby, 1999).

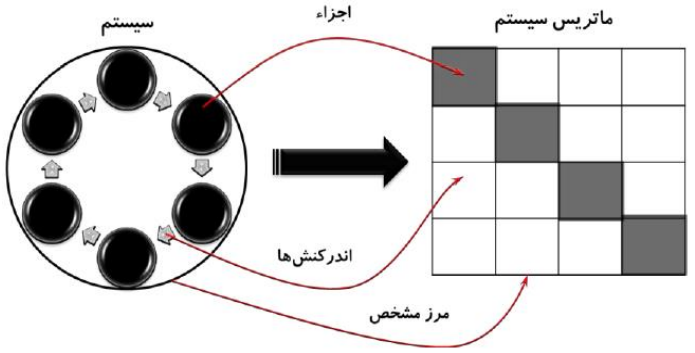
طبق نظر Jiao و Hudson استفاده از رویکرد سیستمی زمانی بسیار ضروری است که با مسائلی روبرو هستیم که از پیچیدگی زیادی برخوردارند، آن چنان که روش‌های مرسوم به تنهایی و به سادگی قادر به حل آن‌ها نمی‌باشند (Jiao & Hudson, 1995).

بدین ترتیب سیستم را می‌توان متشکل از اجزای مؤثر بر هم با یک مرز مشخص فرض کرد (شکل ۵-۱۲).



شکل ۵-۱۲: مفهوم تفکّر سیستمی (Bertalanffy, 1968; Rapoport, 1986)

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 (Hill & Warfield, 1972) این مفهوم در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است.

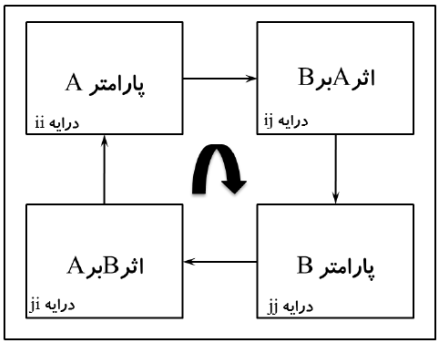


شکل ۵-۱۳: مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (Hill & Warfield, 1972)

۵-۵-۲- ماتریس‌های اندر کنش

در سیستم‌های مهندسی سنگ، شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تأثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی مناسب، با استفاده از ماتریس اندرکنش صورت می‌گیرد. ماتریس اندرکنش یک ماتریس مربعی است که بر روی قطر اصلی آن پارامترهای اصلی مرتبط با مسأله مورد نظر لیست شده و عناصر غیر قطری آن اندرکنش‌ها و اثرات متقابل هر جفت از پارامترها را نشان می‌دهند (شکل ۵-۱۴).

همان‌طور که در شکل ۵-۱۴ 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 (Hill & Warfield, 1972; Hudson, 1992).



شکل ۵-۱۴: مفهوم ماتریس اندر کنش در RES برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B (Hudson, 1992)

۵-۵-۳- کدگذاری ماتریس‌های اندر کنش

در بخش قبل، ماتریس‌های اندرکنش به عنوان ابزاری قوی به منظور استفاده در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و نشان دادن مکانیزم‌های تأثیر عوامل اصلی بر یکدیگر معرفی شدند. این مکانیزم‌ها می‌توانند به صورت تحلیلی یا گرافیکی به خوبی نمایش داده شوند. با این حال، بایستی چگونگی کمّی سازی اهمیّت پارامترها در نظر گرفته شود. برای این منظور نیاز به روشی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش است که از این طریق چگونگی تأثیر پارامترها بر روی یکدیگر به سبب

فرآیندهای موجود به صورت عددی بیان شود.

طبق نظر هادسون که ارائه دهنده رویکرد RES در سال ۱۹۹۲ میلادی بود، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از:

۱- روش دوتایی[۱]

۲- نیمه عددی خبره (ESQ[۲])

۳- شیب نمودار پارامترها

۴- تطبیقی از رویکرد سیستمی مستقیم

۵- روش صریح[۳]

۵-۵-۳-۱- روش نیمه عددی خبره

از میان این روش‌ها، روش کدگذاری نیمه عددی خبره تا حدّ زیادی موفق بوده و تاکنون از بیشترین کاربرد برخوردار بوده است و به صورت اولیّه در بسیاری از موارد پیشنهاد شده است و به همین دلیل نیز در این تحقیق از این روش استفاده شده است.

کدگذاری در این روش با توجه به اندرکنش بین هر جفت پارامتر انجام می‌شود و یکی از اعداد ۰، ۱، ۲، ۳ و یا ۴ انتخاب می‌شود. هر یک از این اعداد با در نظر گرفتن رابطه بین هر جفت پارامتر، بیانگر مفهوم و معنی ویژه‌ای است که در جدول ۵-۲۷ آورده شده است (Hudson, 1992).

جدول ۵-۲۷: کدهای انتخابی در روش کدگذاری نیمه کمی خبره (Hudson, 1992)

کد	توضیح
۰	عدم وجود اندرکنش
۱	اندرکنش ضعیف
۲	اندرکنش متوسط
۳	اندرکنش قوی

[۱] - Binary

[۲] - Expert Semi-Quantitative

[۳] - Explicit

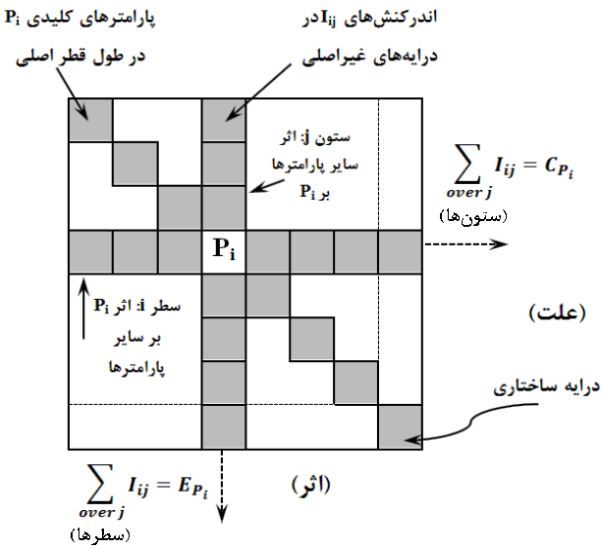
۴	اندرکنش اثر بحرانی و شدید

۵-۵-۴- نمودار علّت- اثر

نمودار علّت- اثر پارامترها که از تأثیر ماتریس اندرکنش به دست می‌آید امکان شناسایی پارامترهای غالب طراحی و شدّت 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 (Hudson, 1992).

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. بر عکس، هر ستون عبوری از آن درایه نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای دیگر سیستم بر روی آن می‌باشد (Hudson, 1992).

بعد از کدگذاری ماتریس، می‌توان مجموع هر سطر و هر ستون را محاسبه کرد. مجموع مقادیر عددی هر سطر به نام «علّت[1]» یا اثر P_i روی سیستم و مجموع مقادیر هر ستون به عنوان «تأثیر[2]» یا اثر سیستم روی پارامتر است. که در نهایت منجر به وجود آمدن محورهای C و E می‌شوند (شکل ۵-۱۵). بنابراین C نشان‌دهنده نحوه تأثیرات P_i بر روی سیستم است و E نشان دهنده تأثیری است که سیستم بر روی پارامتر P_i می‌گذارد (Hudson, 1992).

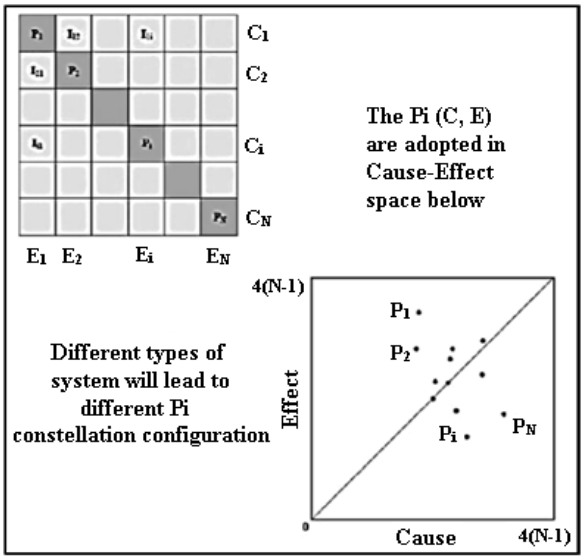


[1] - Cause
[2] - Effect

شکل ۵-۱۵: کدگذاری ماتریس اندرکنش و شکل‌گیری محورهای علّت و اثر در ماتریس اندرکنش (Hudson, 1992)

پس از کدگذاری ماتریس، مقادیر علّت و اثر تمام پارامترها محاسبه و بر روی نمودار علّت- اثر رسم می‌شوند. موقعیّت هر نقطه در فضای (C/E) وضعیت اندرکنش آن پارامتر را مشخص می‌کند. بدیهی است هرچه مقدار عددی حاصل جمع (C+E) پارامتر مورد نظر بیشتر باشد، شدّت اندرکنش 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 (Hudson, 1992).

مقادیر محورها برای هر پارامتر می‌تواند بر روی نمودار علّت- اثر انتقال یابد. در شکل ۵-۱۶ 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 موقعیّت این نقاط که در واقع نماینده پارامترهای اصلی سیستم هستند، در توسعه و سودمندی نظریه سیستمی ارائه شده از اهمیت بسیاری برخوردار است (Hudson, 1992).



شکل ۵-۱۶: نمودار علّت- اثر تعمیم داده شده به N پارامتر (Hudson, 1992)

در نهایت جهت بدست آوردن وزن هر پارامتر در سیستم از معادله (۵-۱۱) استفاده می‌شود (Mazzoccola & Hudson, 1996):

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

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 ۵-۲۸ نشان داده شده است.

جدول ۵-۲۸: 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

۵-۶- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی زغالسنگ با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

به منظور درک چگونگی اثرات متقابل پارامترهای مؤثر در خودسوزی زغالسنگ، نیاز به یک مطالعه سیستمی است تا بتوان میزان اثر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح نمود. بنابراین، ۱۵ پارامتر مهم انتخاب شده در بخش ۵-۲، در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اندرکنش قرار می‌گیرند. ماتریس اندرکنش برای مسأله پتانسیل خودسوزی لایه‌های زغالی، به روشی که در بخش ۵-۵-۳-۱ توضیح داده شد، کدگذاری شد که نتیجه آن در جدول ۵-۲۹ آورده شده است.

روش کدگذاری نیمه عددی خبره (ESQ) معروف‌ترین روش کدگذاری است که دارای پنج کلاس از ۰ تا ۴ می‌باشد. 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.

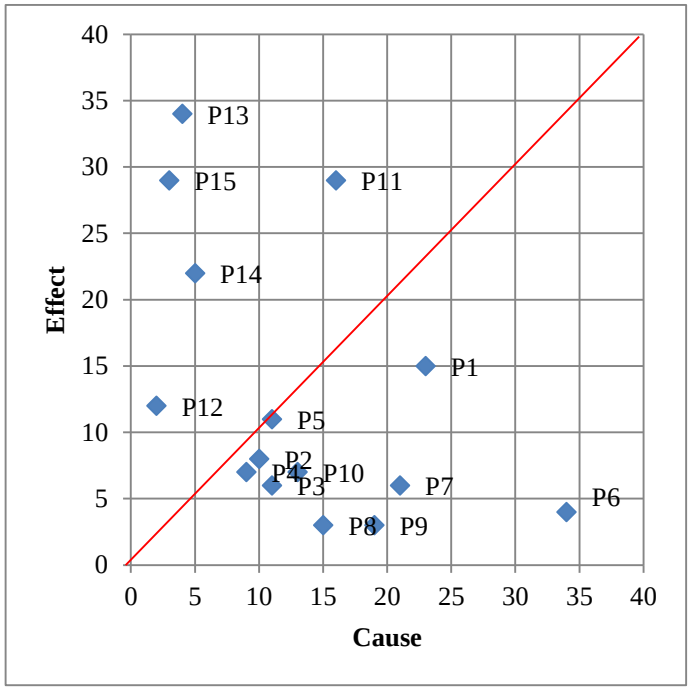
جدول ۵-۲۹:ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای مسأله پتانسیل خودسوزی لایه‌های زغالی

P_1	۳	۳	۳	۳	۰	۲	۰	۰	۰	۳	۲	۳	۰	۱	**۲۳**	Cause
۲	P_2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۲	۲	۰	**۱۰**	
۳	۳	P_3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۲	۰	۰	**۱۱**	
۳	۰	۰	P_4	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۳	**۹**	
۱	۰	۰	۰	P_5	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۲	۲	۱	**۱۱**	
۴	۲	۳	۳	۳	P_6	۳	۰	۳	۲	۳	۰	۲	۳	۳	**۳۴**	
۰	۰	۰	۰	۳	۰	P_7	۰	۰	۳	۴	۰	۴	۳	۴	**۲۱**	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P_8	۰	۰	۴	۰	۴	۳	۴	**۱۵**	
۲	۰	۰	۱	۰	۲	۰	۳	P_9	۰	۳	۲	۳	۰	۳	**۱۹**	
۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۰	۰	P_{10}	۲	۰	۳	۲	۳	**۱۳**	
۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۲	P_{11}	۳	۴	۲	۴	**۱۶**	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P_{12}	۰	۲	۰	**۲**	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P_{13}	۳	۱	**۴**	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	P_{14}	۲	**۵**	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۰	P_{15}	**۳**	
۱۵	**۸**	**۶**	**۷**	**۱۱**	**۴**	**۶**	**۳**	**۳**	**۷**	**۲۹**	**۱۲**	**۳۴**	**۲۲**	**۲۹**		
Effect																

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. مقادیر علّت و اثر هر پارامتر به روی محورهای x و y منتقل شده و بنابراین نمودار علّت- اثر را به وجود آورده‌اند (شکل ۵-۱۷). قطر این نمودار نشان‌دهنده مکان هندسی (C=E) است و در طول این قطر، مجموع C+E افزایش می‌یابد.

نمودار علّت- اثر شکل ۵-۱۷، 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

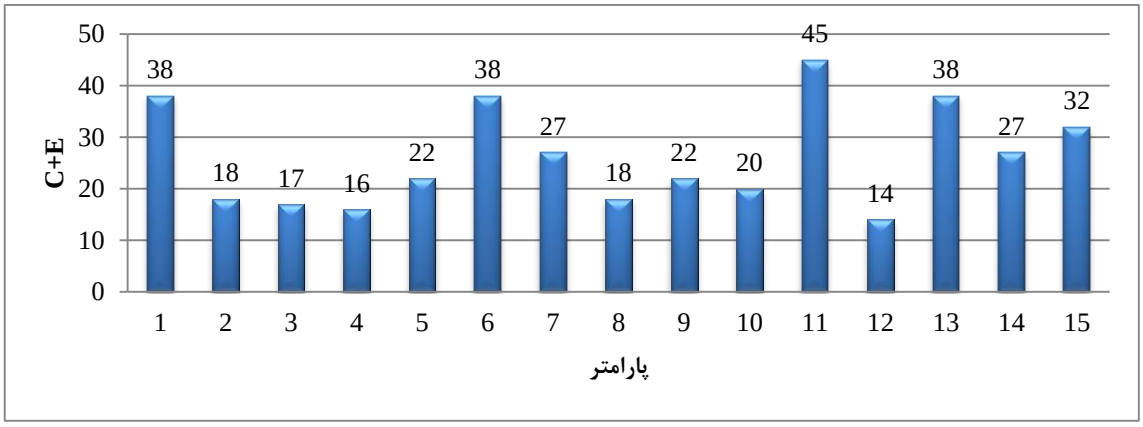
دیگر مغلوب سیستم شده‌اند. نمودار علّت- اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه دارای اهمیت بـوده و می‌تواند اثرات متقابل مفید و غیرمفید از نظر مهندسی را مشخص کند. محاسبه میزان انـدرکنش بـه صورت مقدار C+E می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی شود که لازم است تحت کنترل قرار بگیرند، چرا که تغییر در این پارامترها احتمالاً می‌تواند باعث القای تغییرات مهمّی در سیستم شود.



شکل ۵-۱۷: نمودار علّت- اثر برای مسأله پتانسیل خودسوزی لایه‌های زغالی معادن البرز شرقی

از نمودار علّت- اثر رسم شده در شکل ۵-۱۷ مشخص می‌شود که پارامتر P_{13} و P_{15} یعنی نـرخ پیشروی و ضریب استخراج کاملاً تحت اثر سیستم بوده و در عوض پارامتر P_6 یعنی عمـق قرارگیـری لایه بیشترین تسلّط را بر روی سیستم دارد.

با به دست آوردن مجموع علّت و اثرها (C+E) برای هـر پـارامتر مـی‌تـوان هیسـتوگرام شـدّت اندرکنش را رسم کرد که این نمودار در شکل ۵-۱۸ آورده شده است. انتخاب C+E به عنـوان فـاکتور 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.



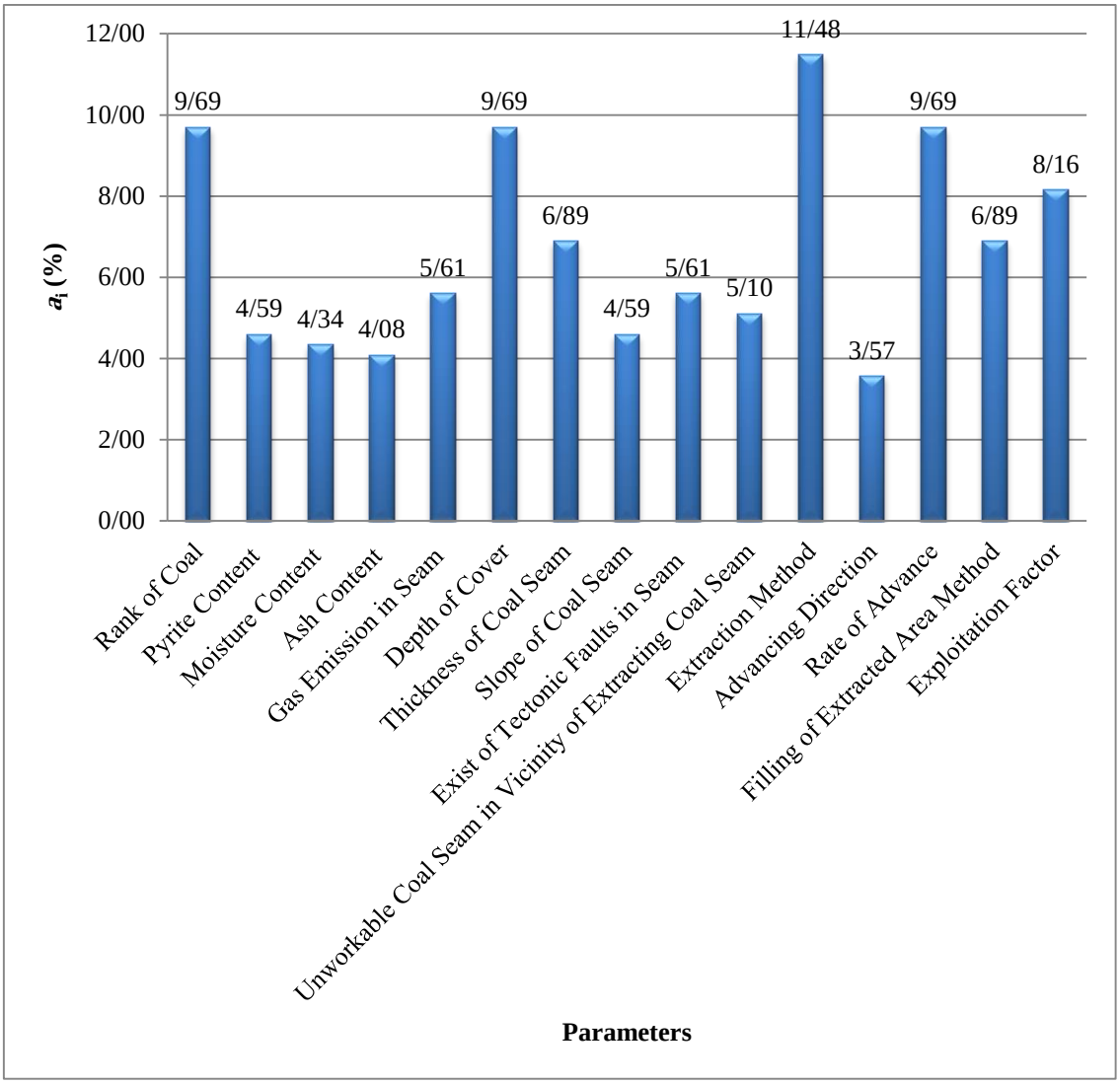
شکل ۵-۱۸: هیستوگرام شدّت اندرکنش پارامترها

نمودار شدّت اندرکنش پارامترها نشان می‌دهد که پارامترهای روش استخراج (P_{11})، نوع زغال (P_1)، عمق قرارگیری لایه (P_6)، نرخ (سرعت) پیشروی (P_{13})، ضریب استخراج (P_{15}) بیشترین شدّت اندرکنش را در سیستم داشته و بنابراین تغییر کوچکی در این پارامترها تا حدّ قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر خواهد گذاشت.

با توجه به نمودار شدّت اندرکنش (شکل ۵-۱۸) می‌توان دریافت که هیچ یک از پارامترها را نمی‌توان حذف کرد و تمامی ۱۵ پارامتر تأثیرگذار بایستی در محاسبه میزان پتانسیل خودسوزی در نظر گرفته شوند. جدول ۵-۳۰ و شکل ۵-۱۹ وزن هر پارامتر (a_i) را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۳۰: محاسبه وزن پارامترهای مؤثر بر خودسوزی لایه‌های زغالسنگ با روش سیستم‌های مهندسی سنگ

پارامتر	C	E	C+E	C-E	a_i (%)
P_1	23	15	38	8	**9.69**
P_2	10	8	18	2	**4.59**
P_3	11	6	17	5	**4.34**
P_4	9	7	16	2	**4.08**
P_5	11	11	22	0	**5.61**
P_6	34	4	38	30	**9.69**
P_7	21	6	27	15	**6.89**
P_8	15	3	18	12	**4.59**
P_9	19	3	22	16	**5.61**
P_{10}	13	7	20	6	**5.10**
P_{11}	16	29	45	-13	**11.48**
P_{12}	2	12	14	-10	**3.57**
P_{13}	4	34	38	-30	**9.69**
P_{14}	5	22	27	-17	**6.89**
P_{15}	3	29	32	-26	**8.16**
$\sum_{i=1}^{15} C_i = 196$		$\sum_{i=1}^{15} E_i = 196$	$\sum_{i=1}^{15} (C_i + E_i) = 392$		$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100$



شکل ۵-۱۹: وزن نهایی پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ با روش سیستم‌های مهندسی سنگ

۵-۷- تشکیل فهرست‌های رده‌بندی سیستم طبقه‌بندی

با توجه به اینکه تا این مرحله از کار، وزن نهایی اهمیّت پارامترها از طریق ۲ روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و سیستم‌های مهندسی سنگ بدست آمده است، لازم است که مقادیر واقعی پارامترها نیز وارد شده و داده‌های ورودی با جزئیات کامل از لایه‌ها به دست آیند.

برخی از پارامترها کیفی و برخی دیگر کمّی توضیح داده شده‌اند. به همین دلیل، امکان وارد کردن مقادیر واقعی پارامتر به صورت مستقیم در محاسبه اندیس قابلیت خودسوزی زغالسنگ ممکن نبوده است و به همین دلیل یک رده‌بندی برای طبقه‌های مختلف کیفیت‌ها و مقادیر پارامترها تعیین

شده است. برای نحوه امتیازدهی به تک‌تک پارامترها از کلیه نمودارها و جداول فصل سوم و چهارم استفاده شده است، جدول نهایی امتیازدهی و بدنه کلّی سیستم طبقه‌بندی شاخص قابلیت خودسوزی زغالسنگ به شرح جدول ۵-۳۱ قابل ارائه است.

به ترکیب مقادیر پارامترها و کلاس‌های اختصاص یافته شده برای پارامترها اصطلاحاً فهرست‌های (منوهای) رده‌بندی گفته می‌شود که در عمل، مقادیر پارامترها از این منوهای رده‌بندی انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، حداکثر شش کلاس برای مقادیر هر پارامتر در نظر گرفته شده است که صفر برای «سهم بسیار کم» و بیشترین مقدار رده‌بندی برای «سهم بسیار زیاد» پارامترها تعیین شده است. بنابراین مقادیر بالاتر به کلاس‌هایی از مقدار پارامترها اختصاص می‌یابند که در خصوص پتانسیل خودسوزی زغال سهم بیشتری دارند (جدول ۵-۳۱).

جدول ۵-۳۱: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

پارامتر (واحد)	رده‌بندی اختصاص داده شده					
	۰	۱	۲	۳	۴	۵
درجه زغال شدگی	آنتراسیت[1]	بیتومینه[2]	لیگنیت[3]	ساب بیتومینه[4]	---	---
پیریت (٪)	< ۱	۱-۲	۲-۵	۵-۸	۸-۱۰	> ۱۰
رطوبت (٪)	< ۳	۳-۵	۵-۷	۷-۱۲	۱۲-۲۴	>۲۴
خاکستر (٪)	> ۶۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۱۰-۲۰	< ۱۰	---
گاز خیزی (m^3/ ton)	>۱۵	۱۰-۱۵	۵-۱۰	< ۵	---	---
عمق قرارگیری لایه (متر)	۵۰-۲۰۰	۲۰۰-۴۰۰	۴۰۰-۶۰۰	۶۰۰-۸۰۰	< ۵۰ > ۸۰۰	---
ضخامت لایه (متر)	< ۱/۲	۱/۲-۲/۴	۲/۴-۳/۲	۳/۲-۵	لایه ضخیم با روش چند برش	---
شیب لایه (درجه)	۰-۱۵	۱۵-۳۰	۳۰-۴۵	۴۵-۶۰	۶۰-۹۰	---
وجود گسل در لایه	ناموجود	کمتر از ۲ عدد گسل کوچک/ ۵۰۰ متر	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	گسل بزرگ با ریزش‌های بزرگ	---	---
وجود لایه زغال غیر قابل استخراج	ناموجود	فاصله بین ۲ لایه بیشتر از ۳۰ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه بین ۲۰-۳۰ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه بین ۱۰-۲۰ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه بین ۵-۱۰ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه کمتر از ۵ برابر ضخامت لایه
روش استخراج	جبهه کار طولانی مکانیزه با شیرر لودر[5]	جبهه کار کوتاه	جبهه کار طولانی نیمه مکانیزه با رنده[6]	استخراج اتاق و پایه	جبهه کار طولانی دستی	---
جهت پیشروی	پسرو	پیشرو	---	---	---	---
نرخ پیشروی (متر/ روز)	>۵	۴-۵	۳-۴	۲-۳	۱-۲	<۱
روش پر کردن	هیدرولیکی	پنوماتیکی	مکانیکی	ثقلی	دستی	تخریبی
ضریب استخراج	>۸۰	۶۵-۸۰	۵۰-۶۵	۳۰-۵۰	<۳۰	---

[1] - Anthracite
[2] - Bituminous
[3] - Lignite
[4] - Sub-bituminous
[5] - Shearer Loader
[6] - Plow

۵-۸- تعریف اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ (CSCPi[1])

آسیب پذیری[2] به عنوان حدّ و توانایی عناصر ایجاد کننده یک سیستم از قبیل افراد و تجهیزات در پاسخ به یک خطر و پیامدهای آن است که تحت شرایط کاری خاص مربوط به خود در ریسک قرار می‌گیرند. 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):

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

که در این رابطه:

i: شمارنده تعداد پارامترهای اصلی

a_i: وزن پارامتر i ام در سیستم

P_i: مقدار پارامتر i ام

P_{Max}: حداکثر مقداری است که یک پارامتر می‌تواند داشته باشد (فاکتور یکّه کردن).

بدین ترتیب می‌توان اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ (CSCPi) را از معادله (۵-۱۳) محاسبه کرد.

$$CSCPi_j = \sum_{i=1}^{15} a_i \frac{P_{ij}}{P_{Max_i}} \qquad (۵-۱۳)$$

که در این رابطه:

i: مربوط به پارامترها (از ۱ تا ۱۵ پارامتر)

j: مربوط به شماره لایه

a_i: ضریب وزنی پارامتر i ام که از جدول ۵-۲۶ و جدول ۵-۳۰ بدست می‌آید.

P_{ij}: امتیاز پارامتر i ام در هر کلاس از منوی رده‌بندی (جدول ۵-۳۱) با توجه به شرایط لایه j

[1] - Coal Spontaneous Combustion Potential Index

[2]- Vulnerability

P_{Max_i}: حداکثر امتیاز هر پارامتر در منوی رده‌بندی شده (جدول ۵-۳۱)

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

پس از تعیین شاخص CSCPi، بر اساس مقدار به دست آمده برای هر لایه می‌توان قابلیت خودسوزی زغالسنگ را پیش‌بینی کرد که برای این منظور می‌توان از جدول ۵-۳۲ استفاده کرد.

جدول ۵-۳۲: بازه بندی اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ

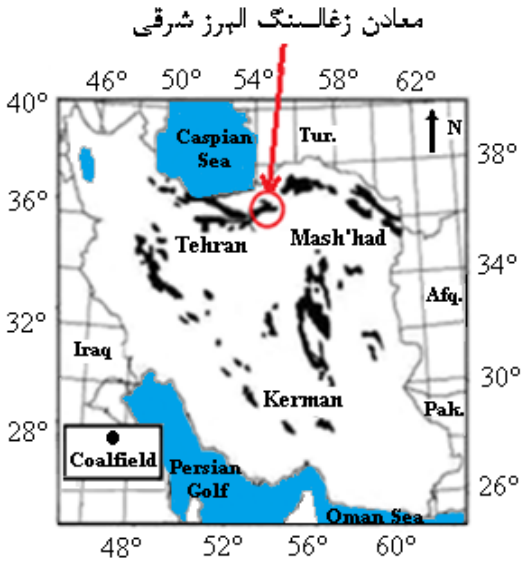
اندیس خودسوزی بالا			اندیس خودسوزی متوسط			اندیس خودسوزی پایین		
بسیار ضعیف	ضعیف		متوسط	خوب		خیلی خوب	عالی	
۱۰۰	CSCPi	۶۶	CSCPi		۳۳	CSCPi		۰

۵-۹- مطالعه موردی

۵-۹-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه زغالی البرز شرقی در رشته کوه‌های البرز واقع شده است. ارتفاع این منطقه از سطح دریا حدود ۲۰۰۰ تا ۲۸۰۰ متر متغیر است. آب و هوای منطقه کوهستانی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های ملایم و معتدل است. این حوزه شامل دو منطقه عمده‌ی زغالی طزره (که دربرگیرنده معادن پشکلات، کلاریز، رزمجا و ممدویه است) و منطقه قشلاق، اولنگ و تخت (که دربرگیرنده معادن متعدّدی از جمله رضی، ملچ آرام، جوزچال، کشکک و غیره است).

به منظور رده‌بندی پتانسیل خودسوزی حوزه زغالی البرز شرقی با استفاده از اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ (CSCPi)، مناطق زغالی پشکلات، کلاریز و رزمجا از منطقه زغالی طزره انتخاب شدند. منطقه زغالی طزره در ۴۵ کیلومتری غرب شاهرود و در حد فاصل جاده اصلی تهران- مشهد قرار گرفته است (شکل ۵-۲۰).



(الف)

(ب)

شکل ۵-۲۰: موقعیت منطقه مورد مطالعه- (الف) معادن زغالسنگ البرز شرقی (ب) منطقه طزره و راه‌های دسترسی

۵-۹-۲- رده بندی لایه‌های زغالی منطقه از نظر پتانسیل خودسوزی

با استفاده از جدول ۵-۲۶، جدول ۵-۳۰، جدول ۵-۳۱ و معادله (۵-۱۳) لایه‌های زغالی مورد مطالعه از لحاظ پتانسیل خودسوزی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که جزئیات مربوط به محاسبه پتانسیل خودسوزی لایه‌های زغالی در جدول ۵-۳۳ تا جدول ۵-۳۵ آورده شده است. مقادیر اختصاص داده شده به هر پارامتر از هر لایه (از ۰ تا ۵) با توجه به رده‌بندی‌های تعریف شده در جدول ۵-۳۱ آورده شده است.

جدول ۵-۳۳: محاسبه اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ برای لایه‌های زغالی منطقه پشکلات

	امتیاز بندی پارامترها															
وزن پارامتر با FDAHP	11.53	5.85	7.70	5.14	9.13	8.28	5.32	2.93	5.57	4.93	6.09	5.26	7.67	7.54	7.33	$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100$
وزن پارامتر با RES	9.69	4.59	4.34	4.08	5.61	9.69	6.89	4.59	5.61	5.10	11.48	3.57	9.69	6.89	8.16	$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100$
P_{Maxi}	3	5	5	4	3	4	4	4	3	5	4	1	5	5	4	---
پارامتر / لایه	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	**CSCPi (FDAHP)**	**CSCPi (RES)**
P18	1	0	0	2	3	0	0	1	0	0	4	1	5	5	1	**44.7**	**45.7**
P15	1	2	0	2	3	0	0	2	0	0	4	1	5	5	1	**47.7**	**48.7**
P10	1	1	0	2	3	1	0	1	1	0	4	1	5	5	1	**49.8**	**50.9**
P3	0	0	0	2	3	1	0	2	0	3	4	1	5	5	1	**46.6**	**49.1**
K25	0	0	0	2	3	3	0	1	1	0	4	1	5	5	1	**48.9**	**51.6**
K23	0	0	0	2	3	3	0	2	1	0	4	1	5	5	1	**49.6**	**52.8**
K21	0	0	0	2	3	3	0	1	1	0	4	1	5	5	1	**48.9**	**51.6**
K19U	0	2	0	1	3	3	0	2	1	0	4	1	5	5	1	**50.7**	**53.6**
K25L	0	2	1	2	3	3	0	1	1	0	4	1	5	5	1	**52.7**	**54.3**
K14	0	0	0	2	3	3	0	2	1	0	4	1	5	5	1	**49.6**	**52.8**
K13	0	2	0	2	2	3	0	2	1	0	4	1	5	5	1	**48.9**	**52.7**
K12	0	2	0	1	3	3	0	1	1	0	4	1	5	5	1	**50.0**	**52.4**
K10	0	2	0	4	3	3	2	3	3	0	4	1	5	5	1	**61.7**	**65.0**
K9	0	0	0	2	2	3	0	2	0	0	4	1	5	5	1	**44.7**	**49.0**
K8	0	2	0	2	3	3	0	2	1	0	4	1	5	5	1	**52.0**	**54.6**
K6	0	2	0	2	3	4	0	2	1	0	4	1	5	5	1	**54.0**	**57.0**
K5	0	3	0	4	3	4	4	3	3	0	4	1	5	5	1	**67.6**	**71.8**

جدول ۵-۳۴: محاسبه اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ برای لایه‌های زغالی منطقه رزمجا

		امتیاز بندی پارامترها																	
	وزن پارامتر با FDAHP	11.53	5.85	7.70	5.14	9.13	8.28	5.32	2.93	5.57	4.93	6.09	5.26	7.67	7.54	7.33	$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100$		
	وزن پارامتر با RES	9.69	4.59	4.34	4.08	5.61	9.69	6.89	4.59	5.61	5.10	11.48	3.57	9.69	6.89	8.16	$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100$		
	P_{Maxi}	3	5	5	4	3	4	4	4	3	5	4	1	5	5	4	---		
لایه / پارامتر		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	**CSCPi (FDAHP)**	**CSCPi (RES)**
K21		0	1	0	2	2	0	0	2	0	0	4	1	5	5	1	**39.7**	**42.7**
K20		0	2	1	2	2	0	0	2	2	0	4	1	5	5	1	**46.1**	**48.2**
K19		0	0	1	2	2	0	1	2	0	3	4	1	5	5	1	**44.3**	**47.4**
K17		0	2	0	2	1	0	2	2	0	4	4	1	5	5	1	**44.4**	**49.2**
K10		0	4	1	2	1	1	3	2	0	0	4	1	5	5	1	**47.7**	**52.0**
K8		0	2	2	2	1	1	2	2	2	0	4	1	5	5	1	**49.2**	**53.1**
K5		0	2	3	2	2	1	3	2	2	0	4	1	5	5	1	**55.1**	**57.5**

جدول ۵-۳۵: محاسبه اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ برای لایه‌های زغالی منطقه کلاریز

		امتیاز بندی پارامترها																	
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}			وزن پارامتر با FDAHP
		11.53	5.85	7.70	5.14	9.13	8.28	5.32	2.93	5.57	4.93	6.09	5.26	7.67	7.54	7.33			$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100$
		9.69	4.59	4.34	4.08	5.61	9.69	6.89	4.59	5.61	5.10	11.48	3.57	9.69	6.89	8.16			وزن پارامتر با RES
		3	5	5	4	3	4	4	4	3	5	4	1	5	5	4			P_{Maxi}
CSCPi (RES)	**CSCPi (FDAHP)**																		پارامتر / لایه
47.3	**45.0**	1	1	0	2	3	0	0	4	0	0	4	1	5	3	1			**P18**
50.7	**48.3**	1	2	0	2	3	1	0	4	0	0	4	1	5	3	1			**P15**
48.2	**44.6**	0	1	0	2	3	1	1	4	0	0	4	1	5	3	1			**P10**
50.4	**46.2**	0	0	0	2	3	3	0	4	0	0	4	1	5	3	1			**K28**
52.2	**47.6**	0	0	0	2	3	3	1	4	0	0	4	1	5	3	1			**K25**
53.1	**48.7**	0	1	0	2	3	3	1	4	0	0	4	1	5	3	1			**K23**
54.0	**49.9**	0	2	0	2	3	3	1	4	0	0	4	1	5	3	1			**K19**
54.9	**51.1**	0	3	0	2	3	3	1	4	0	0	4	1	5	3	1			**K10**
50.4	**45.5**	0	2	0	2	2	3	0	4	0	0	4	1	5	3	1			**K8**
54.7	**50.6**	0	2	0	2	3	4	0	4	0	0	4	1	5	3	1			**K6**
57.4	**53.3**	0	2	0	3	3	4	1	4	0	0	4	1	5	3	1			**K5**
54.7	**50.6**	0	2	0	2	3	4	0	4	0	0	4	1	5	3	1			**K4**

با توجه به کلاس‌بندی ارائه شده (جدول ۵-۳۲)، لایه‌های زغالی منطقه مورد مطالعه، رده‌بندی شده‌اند که نتایج آن در جدول ۵-۳۶ تا جدول ۵-۳۸ آورده شده است. قابل ذکر است که در ارائه‌ی این طبقه‌بندی و به منظور تعیین محدوده اندیس در هر طبقه از شواهد و اتفاق‌های رخ داده شده در گذشته نیز استفاده شده است که مقایسه‌ها تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

جدول ۵-۳۶: رده‌بندی نهایی به دست آمده برای لایه‌های زغالی منطقه پشکلات

لایه	کلاس	وضعیت خودسوزی
P18	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
P15	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
P10	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
P3	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K25	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K23	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K21	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K19U	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K25L	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K14	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K13	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K12	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K10	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K9	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K8	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K6	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K5	بالا	در سال ۱۳۸۵، لایه K5 تونل مادر (پشکلات) منطقه طزره دچار خودسوزی شده است.

جدول ۵-۳۷: رده‌بندی نهایی به دست آمده برای لایه‌های زغالی منطقه رزمجا

لایه	کلاس	وضعیت خودسوزی
K21	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K20	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K19	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K17	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K10	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K8	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K5	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.

جدول ۵-۳۸: رده‌بندی نهایی به دست آمده برای لایه‌های زغالی منطقه کلاریز

لایه	کلاس	وضعیت خودسوزی
P18	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
P15	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
P10	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K28	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K25	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K23	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K19	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K10	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K8	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K6	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K5	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.
K4	متوسط	تاکنون خودسوزی مشاهده نشده است.

۵-۱۰- پیشنهاداتی برای جلوگیری از خودسوزی

با توجه به اینکه نمی‌توان در پارامترهای ذاتی و زمین‌شناسی لایه‌ها تغییراتی را ایجاد کرد اما در صورت استفاده از پیشنهادات زیر ، خطر خودسوزی زغال تا حدّ قابل قبولی کاهش می‌یابد.

۱- با توجه به ضخامت کم و شیب زیاد اکثر لایه‌های موجود در منطقه نمی‌توان از سیستم‌های تمام مکانیزه شیرر لودر[1] استفاده کرد، اما می‌توان از سیستم نیمه مکانیزه رنده[2] و ناو زنجیری[3] استفاده کرد که در این صورت علاوه بر افزایش تولید و کاهش زمان در معرض هوا قرار گرفتن زغال، سرعت پیشروی نیز افزایش می‌یابد که کلیّه این عوامل باعث کاهش خطر خودسوزی می‌شود.

۲- با توجه به اینکه جهت پیشروی در اکثر کارگاه‌های استخراج در منطقه پیشرو است پیشنهاد می‌شود از جهت پیشروی، پسرو استفاده شود که باعث کاهش خطر خودسوزی زغال می‌شود.

۳- پیشنهاد می‌شود در صورت امکان از روش‌های پر کردن هیدرولیکی، پنوماتیکی یا مکانیکی استفاده شود که در این صورت باعث کاهش نشت هوا به فضای استخراج شده می‌شود که در این صورت نیز خطر خودسوزی زغال کاهش می‌یابد.

[1] - Shearer Loader
[2] - Plow
[3] - Armored Face Conveyor (AFC)

۴- می‌توان با افزایش ضریب استخراج زغال، باعث کاهش خطر خودسوزی زغال شد.

۵- می‌توان با استفاده از سیستم‌های نظارتی مانند وسایل آشکار کننده دود[۱] خطر خودسوزی زغالسنگ را در مراحل اولیّه پیدایش آن شناسایی و تمهیدات لازم را به کار بست.

۶- شبکه تهویه باید به گونه‌ای طراحی شود که اختلاف فشار بین راهروهای مجاور در طول مناطق تخریب شده، به حداقل برسد.

۷- باید پاک‌سازی خرده‌های زغال از جبهه کار معادنی که سابقه خودسوزی دارند انجام شود.

۸- استفاده از پوشش‌های سطحی مانند پاشیدن آهک و پودر سنگ بر روی پایه‌ها، برای جلوگیری از نفوذ هوا به داخل پایه‌ها کمک می‌کند و در نتیجه خطر خودسوزی پایه‌های زغالی کاهش می‌یابد.

۹- خطرناک‌ترین زمان‌ها تعطیلات آخر هفته و هر زمانی است که کار متوقّف می‌شود، لذا باید تمهیدات لازم را برای این مواقع، مانند نصب هوا بند در راهروها، تزریق دوغاب به درون مواد پرکننده کنار راهروها و کم کردن اختلاف فشار در امتداد منطقه استخراج شده انجام داد.

۱۰- در معادنی که سابقه خودسوزی دارند، ضروری است که تمام کارهای معدنی رها شده و متروک از بقیه نقاط معدن جدا شوند. این کار به خصوص هنگامی اهمیّت پیدا می‌کند که نواحی یاد شده در مجاورت کارهای معدنی فعّال واقع شده باشند یا مهم‌تر وقتی که لایه‌های روی هم قرار گرفته وجود داشته باشند. زیرا خودسوزی زغال در این مواقع در نتیجه نشت هوا بین مناطق استخراج شده فعلی و فضاهایی که طی چندین سال قبل در لایه‌های بالاتر کار می‌شده‌اند به وجود می‌آید.

۱۱- پس از تکمیل استخراج بخشی از یک معدن مستعد خودسوزی و بازیابی تجهیزات آن قسمت، تمام ورودی‌های منتهی به آن باید مسدود شوند و فشارهای جوّی در طرفین سدهای هوا بند باید تا آنجا که امکان دارد متعادل شود.

[۱] - Smoke Detector Devices

۱۲- برای تمام جبهه کارهای خودسوز، باید ایستگاه‌های تزریق بنتونیت[۱] احداث شوند.

۱۳- در بسیاری از کشورها، برای کنترل خودسوزی، از نیتروژن مایع استفاده می‌شود. بدین منظور، مخزن‌های حاوی نیتروژن مایع به داخل معدن انتقال داده می‌شوند و آن را در تبخیر کننده‌ها حرارت می‌دهند تا به گاز تبدیل شود. سپس گاز حاصله را به وسیله لوله به قسمت‌های در حال خودسوزی تزریق می‌کنند. نیتروژن جای هوا را می‌گیرد و بدین ترتیب، به علّت کاهش غلظت اکسیژن، خودسوزی کنترل می‌شود. این یک روش بسیار موفّق است، امّا تنها هنگامی امکان‌پذیر است که ذخیره عظیمی از نیتروژن مایع در دسترس باشد (مدنی، ۱۳۷۳).

۵-۱۱- نتیجه‌گیری

با ترکیب مفاهیم روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و روش سیستم‌های مهندسی سنگ و اندیس آسیب پذیری در زمینه های مختلف علوم مهندسی می‌توان تحت عنوان روشی متفاوت و انعطاف‌پذیر پارامترهای مهم در طراحی را تحلیل و ریسک ناشی از آن‌ها را ارزیابی نمود.

رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ و روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی به عنوان دو روش سیستمی در تحلیل‌ها و رده‌بندی‌های پروژه‌های پیچیده مهندسی مطرح می‌باشند. در این رویکردها، تأثیر متقابل پارامترهای مؤثر بر یکدیگر در مقیاسی برابر سنجیده شده و بدین ترتیب اثر هر پارامتر در میزان تولید ناپایداری مورد توجه قرار می‌گیرد. به همین دلیل، رده‌بندی‌های حاصل از این روش‌ها بسیار قابل اطمینان بوده و نمایی جامع از وضعیت مورد مطالعه را ارائه می‌دهند.

با استفاده از این دو روش در تحقیق حاضر مشخص شد پارامترهایی از قبیل روش استخراج، نوع زغال، عمق قرارگیری لایه، نرخ پیشروی، ضریب استخراج، گازخیزی و روش پر کردن فضای استخراج شده بیشترین اندرکنش را در سیستم داشتند به نحوی که کوچک‌ترین تغییر در این پارامترها باعث ایجاد تغییر در کل سیستم طبقه‌بندی می‌شود.

[۱] - Bentonite

در نهایت پس از انجام طبقه‌بندی لایه‌های مورد مطالعه با سیستم جدید و مقایسه نتایج حاصل از سیستم طبقه‌بندی ارائه شده با رویدادهای اتفاق افتاده در زمینه خودسوزی در منطقه مورد مطالعه، تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج نشان داده شد که یک اعتبار سنجی اولیّه برای سیستم طبقه بندی ارائه شده می‌باشد. البته قابل ذکر است که سیستم طبقه‌بندی ارائه شده در این روش یک تلاش اولیّه و یک پیشنهاد جدید می‌باشد که بایستی با استفاده از مطالعات صحرایی گسترده مورد استفاده و ارزیابی بیشتر قرار گیرد.

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه‌گیری

معدنکاری زغالسنگ دارای جنبه‌های مدیریتی و عملیاتی متعدّدی است که به طور مستقیم تولید معدن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. خطرات ناشی از معدنکاری زغالسنگ از قبیل نشست سطح زمین، انفجار خودبه‌خودی سنگ، خودسوزی زغال، گازدهی و غیره یکی از عوامل محدودکننده طراحی در معادن زیرزمینی محسوب می‌شود. دستیابی به ایمنی بالا و حفظ ایمنی، یک هدف آرمانی در معدنکاری زغالسنگ به شمار می‌آید.

در این پایان‌نامه، قابلیت خودسوزی زغالسنگ به عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات معدنکاری زغال در معادن زیرزمینی و به طور ویژه معدنکاری جبهه کار طولانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

در مرحله‌ی اوّل، تحقیقات مهم و تأثیرگذار در حوزه قابلیت خودسوزی زغالسنگ که در طی سال‌های اخیر ارائه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. با آگاهی از نقاط ضعف و قوت مطالعات پیشین، چارچوب اصلی تحقیق تعیین شد و همچنین مکانیزم و مجموعه مراحل خودسوزی زغالسنگ بیان شد.

در مرحله‌ی بعد کلیّه‌ی پارامترهای مهم و مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. با مرور مطالعات و کارهای انجام شده گذشته مشخص شد که کلیّه‌ی محقّقان بر تأثیر بیشتر پارامترهای ذاتی زغالسنگ بر پدیده خودسوزی زغالسنگ نسبت به پارامترهای زمین‌شناسی و معدنکاری توافق جمعی دارند. در صورتی که هر سه این عوامل بر پدیده خودسوزی

زغالسنگ تأثیرگذار هستند.

در ادامه با انجام نظرسنجی‌های انجام شده از متخصّصان در این زمینه نشان داده شد که هر سه پارامتر اصلی ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ هستند و بایستی هر سه این عوامل در پیش‌بینی قابلیت خودسوزی زغالسنگ در نظر گرفته شوند.

به رغم تأکید متخصّصان مختلف و مطالعات گسترده گذشتگان، تاکنون یک روش جامع و کامل جهت پیش‌بینی قابلیت خودسوزی زغالسنگ که ضریب تأثیر اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر را نیز لحاظ کرده باشد ارائه نشده بود و در این تحقیق سعی شد تا یک رهیافت جدید برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغالسنگ ارائه و تشریح شود.

جهت ارائه سیستم طبقه‌بندی کمّی جدید، بر اساس پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغالسنگ، نظرات کیفی ۱۵ نفر از متخصصان توسط روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) تجزیه و تحلیل شدند. در مرحله‌ای دیگر نیز پارامترها از طریق روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در نهایت از دو طریق مختلف، وزن پارامترها مشخص شد. با مقایسه درجه اهمیت هر پارامتر مشخص شد که وزن‌ها مشابه هم بودند که نشان از درستی و دقّت بالای محاسبات و جامعیّت هر دو روش دارد.

در مرحله‌ای دیگر از کار برای بررسی پایایی پرسشنامه‌های مورد استفاده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) با استفاده از نرم افزار SPSS 20 ضریب آلفای کرونباخ محاسبه شد که این ضریب یکی از مهم‌ترین ضرایب در تعیین پایایی و اعتبارسنجی پرسشنامه‌ها است. ضریب محاسبه شده نشان داد که پرسشنامه‌ها از پایایی و قابلیت اعتبار قابل قبولی برخوردارند.

با دستیابی به وزن هر پارامتر، سیستم طبقه‌بندی جدیدی به صورت کمّی و بر مبنای ۱۵ پارامتر تأثیرگذار پیشنهاد شد. این سیستم که اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ (CSCPi) نامیده شده است در مجموع به لایه‌های زغالسنگ امتیازی از ۰ تا ۱۰۰ را اختصاص می‌دهد. سپس قابلیت

خودسوزی زغالسنگ در سه کلاس پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی می‌شود.

پس از انجام مطالعات، به منظور ارزیابی قابلیت و توانایی سیستم طبقه‌بندی پیشنهاد شده، مشخصات لایه‌های ۳ منطقه زغالی پشکلات، رزمجا و کلاریز از مجموعه معادن زغالسنگ البرز شرقی برای انجام مطالعات موردی انتخاب شدند. با توجه به مطالعات انجام شده و طبقه‌بندی لایه‌های مذکور با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید، مشخص شد که لایه K5 از منطقه زغالی پشکلات خودسوز است که با واقعیّت نیز مطابقت می‌کند. لایه مذکور در سال ۱۳۸۵ دچار خودسوزی شده است و هم اکنون نیز در بعضی از کارگاه‌های استخراجی، در این لایه علائمی از گرمایش خودبه‌خودی زغالسنگ مشاهده می‌شود که باید تدابیر اساسی برای کار در این لایه اتخاذ شود.

البته قابل ذکر است که سیستم طبقه‌بندی ارائه شده در این روش، یک تلاش اولیّه و یک پیشنهاد جدید می‌باشد که بایستی با استفاده از مطالعات صحرایی گسترده مورد استفاده و ارزیابی بیشتر قرار گیرد.

۶-۲- پیشنهادها

مطالعه قابلیت خودسوزی زغالسنگ، یکی از اساسی‌ترین مراحل در مطالعه ایمنی یک معدن زغال می‌باشد. خروجی‌های تحلیل قابلیت خودسوزی زغالسنگ، به عنوان ورودی بسیاری از تحلیل‌های مهم دیگر مطرح بوده و مورد نیاز می‌باشد. لذا، تحلیل قابلیت خودسوزی زغالسنگ، بستر بسیار مناسب و پایه علمی برای شناخت عوامل مهم ذاتی، زمین‌شناسی و معدن‌کاری زغال را فراهم می‌سازد. بنابراین، نتایج حاصل از این پایان‌نامه می‌توانند سرآغاز بسیار خوبی برای تحقیقات عمیق‌تر در مورد قابلیت خودسوزی زغالسنگ باشند. به طور خلاصه، موارد ذیل برای تحقیقات آینده بر روی قابلیت خودسوزی زغالسنگ پیشنهاد می‌شود.

۱- پیشنهاد می‌شود که سایر مناطق زغالی البرز شرقی از جمله منطقه قشلاق، اولنگ و تخت نیز با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید از لحاظ قابلیت خودسوزی زغالسنگ مورد ارزیابی قرار

بگیرند.

۲- با استفاده از سیستم طبقه‌بندی ارائه شده جدید و انجام مطالعات صحرایی گسترده در معادن هجدک، باب نیزو، پابدانا، بایشکون، هشونی، سراپرده و اشکلی از مجموعه معادن زغالی کرمان که سابقه خودسوزی داشته‌اند می‌توان به ارزیابی جامع‌تری از این سیستم دست یافت تا به نحو احسن و با اطمینان بیشتری بتوان از آن بهره جست.

۳- با توجه به اینکه بعضی از پارامترهای مورد استفاده در اندیس پتانسیل خودسوزی زغالسنگ (CSCPi) کمابیش در خودسوزی زغالسنگ در دپوهای کارخانه زغال شویی نیز تأثیرگذارند؛ لذا می‌توان با ارائه شاخصی دیگر برای ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت خودسوزی زغالسنگ در دپوهای زغال نیز بهره گرفت.

۴- پیشنهاد می‌شود در مورد تأثیر تهویه بر روی خطر خودسوزی زغال تحقیقات جامع و کاملی انجام شود و در صورت امکان در سیستم طبقه‌بندی از این پارامتر استفاده شود.

۵- می‌توان با استفاده از روش‌های هوشمند نیز به تحلیل قابلیت خودسوزی زغالسنگ پرداخت.

شایان ذکر است هر یک از عناوین مذکور، نیاز به یک پژوهش مستقل و جامع داشته و در چهارچوب یک طرح پژوهشی و یا پایان‌نامه جداگانه می‌توانند مطرح شوند.

منابع فارسی

- اصانلو م، (۱۳۷۸)، **"مهندسی زغالسنگ"**، انتشارات ناقوس.
- تقی پور س و رخشنده م، (۱۳۸۲)، **"طبقه بندی مهندسی توده سنگ‌ها"**، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- توکلی م و سرشکی ف، (۱۳۸۵)، **"گاز زغال و روش‌های کاهش آن (گاز زدایی) در معدن پروده طبس"**، پنجمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، ص ۶۵۳ تا ۶۶۴، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- حسینی س ه، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد، **"روشی جدید برای ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ‌ها "**، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- خاکی غ، (۱۳۹۰)، **"روش تحقیق با رویکرد به پایان نامه نویسی"**، (چاپ نهم)، انتشارات بازتاب.
- خالوکاکائی 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 زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ۲، شماره ۱ و ۲، صفحات ۱۹ تا ۳۳.
- سایت اینترنتی تکنولوژی صنعت نفت ایران، تاریخ مشاهده: ۱۳۹۲/۵/۲۷، قابل دسترسی از آدرس <http://www.iranpetrotech.com>
- سایت اینترنتی دانشنامه طبس گلشن، تاریخ مشاهده: ۱۳۹۲/۵/۲۷، قابل دسترسی از آدرس <http://www.tabasenc.ir>
- عطائی م، (۱۳۸۹)، **"تصمیم‌گیری چند معیاره فازی"**، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عطائی م، (۱۳۹۰)، **"معدن کاری زیرزمینی"**، (چاپ سوم)، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، جلد دوم.
- مدنی ح، (۱۳۷۳)، **"بازرسی در معادن"**، گروه مترجمان، انتشارات بصیر.
- مؤمنی م و قیومی ف، (۱۳۹۱)، **"تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS"**، (چاپ هفتم)، انتشارات گنج شایگان.
- وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی، آمار و نمودارهای ایران و جهان ۲۰۰۸، ۱۳۸۷، صفحه ۱۱۱.
- یزدی م، (۱۳۸۲)، **"زغال‌سنگ (از منشأ تا اثرات زیست محیطی)"**، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

منابع لاتین

A

- Allenby B.R., (1999), "Industrial Ecology: Policy Framework and Implementation. In Complex System and Risks, Costs and Benefits", chapters 9 and 10 , pp. 132-162.

B

- Banerjee S.C., (1982), "A Theoretical Design to the Determination of Risk Index of Spontaneous Fires in Coal Mines", **Journals of Mines, Metals & Fuels**, Vol. 30, No. 8 pp. 399-406.
- Banerjee S.C., (1985), "Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fire", Dhanbad-India: Central Mining Research Station. , Oxford & IBH Publishing Co, pp. 168.
- Banerjee S.C., Nandy D.K., Banerjee D.D. and Chakravorty R.N., (1972), "Classification of coal with respect to their Susceptibility to Spontaneous Combustion", **Trans. Min. Geol. & Met. Inst. of India**, Vol. 59, Issue 2, pp. 15-31.
- Beamish B.B., (2005), "Comparison of the R_{70} self-heating rate of New Zealand and Australian coals to Suggate rank parameter", **International Journal of Coal Geology**, Vol. 64, Issues 1-2, pp. 139-144.
- Beamish B.B. and Arisoy A., (2008), "Effect of intrinsic coal properties on self-heating rates", **12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium**, (The Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Littleton, USA), Wallace, pp. 149-153, ISBN 978-0-615-20009-5.
- Beamish B.B., Barakat M.A. and George J.D. St., (2000), "Adiabatic testing procedures for determining the selfheating propensity of coal and sample ageing effects", **Thermochimica Acta**, Vol. 362, Issues 1-2, pp. 79-87.
- Beamish B.B., Barakat M.A. and George J.D. St., (2001), "Spontaneous combustion propensity of New Zealand coals under adiabatic conditions", **International Journal of Coal Geolog**, Vol. 45, Issues 2–3, pp. 217-224.
- Beamish B. and Beamish R., (2010), "Benchmarking moist coal adiabatic oven testing", **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 264-268.
- Beamish B.B. and Beamish R., (2011), "Experience with Using a Moist Coal Adiabatic Oven Testing Method for Spontaneous Combustion Assessment", **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 380-384.
- Beamish B.B. and Blazak D.G., (2005), "Relationship between ash content and R_{70} self-heating rate of Callide Coal", **International Journal of Coal Geology**, Vol. 64, Issues 1-2, pp. 126-132.
- Beamish B.B., Blazak D.G., Hogarth L.C. and Jabouri I., (2005), "R70 Relationships and Their Interpretation at a Mine Site", **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 183-185.

- Beamish B.B. and Jabouri I., (2005), “Factors Affecting Hot Spot Development in Bulk Coal and Associated Gas Evolution”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 187-193.

- Beamish B.B., Lin Z. and Beamish R., (2012), “Investigating the influence of reactive pyrite on coal self-heating”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 294-299.

- Beamish B.B., McLellan P., Endara H., Turunc U., Raab M. and Beamish R., (2013), “Delaying spontaneous combustion of reactive coals through inhibition”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 221-226.

- Beamish B.B. and Sainsbury W., (2008), “Development of a Site Specific Self-Heating Rate Prediction Equation for a High Volatile Bituminous Coal”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 161-165.

- Bertalanffy L.V., (1968), “General System Theory: Foundations, Development, Applications”, George Braziller Publisher.

- Bhattacharya K.K., (1971), “The role of absorption of water vapour in the spontaneous heating of coal”, **Journal of Fuel**, Volume 50, Issue 4, pp. 367-380.

- Bo-tao Q., Qing-guo S., De-ming W., Lei-lin Z. and Qin X., (2009), “Analysis and key control technologies to prevent spontaneous coal combustion occurring at a fully mechanized caving face with large obliquity in deep mines”, **Journal of Mining Science and Technology (China)**, Vol. 19, Issue 4, pp. 446-451.

C

- Cao D., Fan X., Guan H., Wu C., Shi X. and Jia Y., (2007), “Geological models of spontaneous combustion in the Wuda coalfield, Inner Mongolia, China”, **The Geological Society of America**, Vol. 18, pp. 23-30, doi: 10.1130/2007.4118(03).

- Carras J.N. and Young B.C., (1994), “Self-heating of coal and related materials: models, application and test methods”, **Progress in Energy and Combustion Science**, Vol. 20, Issue 1, pp. 1-15.

- Chandra D., Bhattacharya S.K., Ghosh R. and Dasgupta N., (1990), “On evaluation and classification of coal with respect to proneness to spontaneous combustion”, **Q. J. Geol. Min. Metall. Soc. India**, Vol. 55, Issue 3, pp. 130–136.

- Cronbach L.J., (1951), “Coefficient alpha and the internal structure of tests”, **Psychometrika**, Vol. 16, No. 3, pp. 297-334.

D

- De faveri D.M., Zonato C., Vidili A. and Ferraiolo G., (1989), “theoretical and experimental study on the propagation of heat inside deposits of coal”, **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 21, Issue 2, pp. 135-142.

- De-ming W., Xu-yao Q., Xiao-xing Z. and Jun-jie G., (2009), “Test method for the propensity of coal to spontaneous combustion”, **Procedia Earth and Planetary Science**, Vol. 1, Issue 1, pp. 20–26.

- Dijk P.V., Zhang J.Z., Jun W., Kuenzer C. and Wolf K-H., (2011), “Assessment of the contribution of in-situ combustion of coal to greenhouse gas emission; based on a comparison of Chinese mining information to previous remote sensing estimates”,

International Journal of Coal Geology, Vol. 86, Issue 1, pp. 108-119.

- Duncan G.J., (1998), "Hydraulic coal mining developments in NewZealand", **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 333-342.

F

- Frough, O. and Torabi, S.R., (2013), "An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes", **Engineering Geology**, Vol. 157, pp.112-123.

G

- Gangopadhyay P.K., (2008), Ph.D. thesis, "Coalfire related CO_2 emissions and remote sensing", The Netherlands, University of Utrecht, pp. 176, ISBN 978-90-6164-267-1.

- Gervet B., (2007). "Coal fire emission contributes to global warming", **Department of Civil and Environmental Engineering Lulea University of Technology**, Sweden, pp. 1-14.

- Ghosh R., (1986), "Spontaneous combustion of certain Indian coals- some physico-chemical considerations", **Fuel**, Vol. 65, Issue 8, pp. 1042-1046.

- Greb S.F., Eble C.F., Peters D.C. and Papp A.R., (2006), "COAL and the Envirronment", American Geological Institute In cooperation with Illinois Basin Consortium U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory Office of Surface Mining, ISBN: 0-922152-77-2.

- Grewer T., (1994), "Thermal hazards of chemical reaction", Vol. 4, Industrial Safety Series, **Elsevier Press**, Amsterdam, pp. 444.

H

- Ham B., (2005), "A Review of Spontaneous Combustion Incidents", **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 237-242.

- Hill J.D. and Warfield J.N., (1972), "Unified program planning. In:Sage A.P. (ed) Systems Engineering: Methodology and Applications", New York: IEEE Press.
- Hudson J.A., (1992), "Rock Engineering Systems, Theory and Practice", Ellis Horwood Ltd, Chichester, 185 p.
- Hudson J.A. and Harrison J.P. (1992), "A new approach to studying complete rock engineering problems", **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology** Vol. 25, pp. 93-105, doi:10.1144/GSL.QJEG.1992.025.02.03
- Humphries P. and Poulsen B., (2008), "Geological and Geotechnical Influences on the Caveability and Drawability of Top Coal in Longwalls", **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 56-66.

- Huw P., Sezer U. and Kelello C., (2003), "Prevention and control of spontaneous combustion", Best Practice Guidelines for Surface Coal Mines in South Africa, **COAL TECH Research Association**, pp. 134.

J

- Jiao Y. and Hudson J.A., (1995), “The fully-coupled model for rock engineering systems”, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Vol. 32, Issue 5, pp. 491-512.
- Jones JC, (2001), “On the extrapolation of results from oven heating tests for propensity to self-heating”, **Combustion and Flame**, Vol. 124, No. 1-2, pp. 334-336, ISSN 0010-2180.

K

- Kaymakci E. and Didari V., (2002), “Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters”, **Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences**, Vol. 26, pp. 59-64.
- Kuchta J.M., Rowe V.R. and Burgess D.S., (1980), “Spontaneous Combustion Susceptibility of US Coals”, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines Report of Investigation 8474, pp. 37.
- Kucuk A., Kadioglu Y. and Gulaboglu M.S., (2003), “A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air”, **Combustion and Flame**, Vol. 133, Issue 3, pp. 255-261.
- Kuenzer C. and Stracher G.B., (2012), “Geomorphology of coal seam fires”, **Journal of Geomorphology**, Vol. 138, Issue 1, pp. 209-222.

L

- Lang L. and Fu-bao Z., (2010), “A comprehensive hazard evaluation system for spontaneous combustion of coal in underground mining”, **International Journal of Coal Geology**, Vol. 82, Issues 1–2, pp. 27-36.
- 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.

M

- 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, doi: 10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.03
- McPherson M.J., (1993), “Chap. 9: Ventilation Planning”, **Subsurface Ventilation and Environmental Engineering**, Chapman & Hall, New York, pp. 282-321.
- MDG 1006, (2011), “Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline”, Produced by Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW.
- Michaylov M., (2002), “Expert system for assessment of risk from spontaneous combustion”, **Mining and Mineral Processing**, Vol. 44-45, Part 2, pp. 27-35.
- Mitchell D.W., (1990), “MINE FIRES Prevention, Detection, Fighting”, United States of America: Maclean Hunter Publishing Company, pp. 167, ISBN 0-92531-10-8.
- Mitchel P., (2003), “Controlling and Reducing Heat on Longwall Faces”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 234-245.

- Mohalik N.K., Panigrahi D.C. and Singh V.K., (2009- a), “Application of thermal analysis techniques to assess proneness of coal to spontaneous heating”, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Vol. 98, Issue 2, pp. 507-519, doi: 10.1007/s10973-009-0305-z.
- Mohalik N., Singh R., Singh V. and Tripathi D., (2009- b), “Critical Appraisal to Assess the Extent of Fire in Old Abandoned Coal Mine Areas– Indian Context”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 271-280.
- Moodie A. and Anderson J., (2011), “Geotechnical Considerations for Longwall Top Coal Caving at Austar Coal Mine”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 29-39.

N

- Nandy D.K., Banerjee D.D. and Chakravorty R.N., (1972), “Application of crossing point temperature for determining the spontaneous heating characteristics of coal”, **Journal of Mines, Metals and Fuels**, Vol. 20 , Issue 2, pp. 41–48.
- Nelson M.I. and Chen X.D., (2007), “Survey of experimental work on the self-heating and spontaneous combustion of coal”, **The Geological Society of America Reviews in Engineering Geology**, Vol. 18, pp. 31-83, doi: 1130/2007.4118(04).

P

- Panigrahi D.C. and Bhattacherjee R.M., (2004), “Development of modified gas indices for early detection of spontaneous heating in coal pillars”, **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, Vol. 104, Issue 7, pp. 367-380, ISSN: 0038-223X.
- Panigrahi D.C. and Sahu H.B., (2004), “Classification of coal seams with respect to their spontaneous heating susceptibility- a neural network approach”, **Geotechnical and Geological Engineering**, Vol. 22, pp. 457–476.

R

- Ramlu M.A., (2007), “Mine Disasters and Mine Rescue”, 2nd edition, chapter-1, “mine fires”, Hyderabad: Universities Press, pp. 2-15, ISBN: 9788173715730.
- Ren T.X. and Balusu R., (2005), “CFD Modelling of Goaf Gas Migration to Improve the Control of Spontaneous Combustion in Longwalls”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 259-264.
- Ren T.X., Balusu R. and Humphries P., (2005), “Development of Innovative Goaf Inertisation Practices to Improve Coal Mine Safety”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp.315-322.
- Ren T.X., Edwards J.S. and Clarke D., (1999), “Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous combustion”, **Fuel**, Vol 78, Issue 14, pp. 1611-1620.
- Ren T., Wang Z., Nemcik J., Aziz N., and Wu J., (2012), “Investigation of Spontaneous Heating Zones and Proactive Inertisation of Longwall Goaf in Fenghuangshan Mine”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 212-220.

- Riley J.T., Reasoner J.W., Fatemi S.M. and Yates G.S., (1987), "self-heating of coal in barges", **Journal Article Department of Chemistry and Canter for Coal Science**, Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky, pp 162-170.
- Rapoport A., (1986), "General Systems Theory: Essential Concepts and Applications", Tunbridge Wells, Kent, England: Abacus Press., Cambridge, 270 p.

S

- 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.
- Sahu H.B., Panigrahi D.C. and Mishra N.M., (2004), "Assessment of spontaneous heating susceptibility of coal seams by differential scanning calorimetry", **journal of mines, metal and fuels**, Vol. 52, Issues 7-8, pp. 117-121.
- Sahu H.B., Panigrahi D.C. and Mishra N.M., (2005), "Assessment of spontaneous heating susceptibility of coal seams by experimental techniques- a comparative study", **International Symposium on Advances in Mining Technology and Management**, pp. 459-465.
- Sahu H.B., Panigrahi D.C. and Mohapatra S.S., (2009), "classification of coal seams with respect to their spontaneous heating susceptibility using k-means is clustering", **9th International Mine Ventilation Congress**, New Delhi, India, pp. 273-287.
- Sensogut C., (1999), "Spontaneous combustion related fire ratios", **Jounal of Engineering Sciences**, Vol. 5, Issue 1, pp. 1009-1014.
- Singh A.K., Singh R.V.K., Singh M.P., Chandra H. and Shukla N.K., (2007), "Mine fire gas indices and their application to Indian underground coal mine fires", **International Journal of Coal Geology**, Vol. 69, Issue 3, 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, doi: 10.1142/S0950609802000938.
- Sinha P.R., (1986), "Mine fires in indian coalfields", **Energy**, Vol. 11, Issues 11-12, pp. 1147-1154.
- Sipila J., Auerkari P., Heikkila A.M., Tuominen R., Vela I., Itkonen J., Rinne M. and Aaltonen K., (2012), "Risk and mitigation of self-heating and spontaneous combustion in underground coal storage", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Vol. 25, Issue 3, pp 617-622.
- Sujanti W. and Zhang D-K., (1999), "A laboratory study of spontaneous combustion of coal: the influence of inorganic matter and reactor size", **Fuel**, Vol. 78, Issue 5, pp 549-556.
- Sujanti W., Zhang D-K. and Chen X.D., (1999), "Low-temperature oxidation of coal studied using wire-mesh reactors with both steady-state and transient methods", **Combustion and Flame**, Vol. 117, Issue 3, pp. 646-651.

T

- Todes D., (1936), "Acta physicochim", **URSS**, Vol. 5, pp. 785.

U

- Uludag S., (2001), M.Sc Dissertation, “Assessing Spontaneous Combustion Risk in South African Coal Mines Using a GIS Tool”, University of Witwatersrand, South Africa, pp. 154.

W

- Walters A.D., (1996), “Joseph Conrad and the spontaneous combustion fo 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 H., Dlugogorski B.Z. and Kennedy E.M., (2003), “Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling”, **Journal of Progress in Energy and Combustion Science**, Vol. 29, Issue 6, pp. 487-513.

X

- Xuyao Q., Deming W., James A.M. and Xiaoxing Z., (2012), “Self-reaction of initial active groups in coal”, **International Journal of Mining Science and Technology**, Vol. 22, Issue 2, pp. 169-175.

Y

- Yuan L. and Smith A.C., (2012), “The effect of ventilation on spontaneous heating of coal”, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Vol. 25, pp. 131-137.

پیوست۱: جداول مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصصان مختلف

جدول پ-۱: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۳ پارامتر اصلی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.800	1.286
زمین شناسی (GC)	0.556	1.000	0.714
معدنکاری (MC)	0.778	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.000	1.400
زمین شناسی (GC)	1.000	1.000	1.400
معدنکاری (MC)	0.714	0.714	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.286	1.800
زمین شناسی (GC)	0.778	1.000	1.400
معدنکاری (MC)	0.556	0.714	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.000	1.286
زمین شناسی (GC)	1.000	1.000	1.286
معدنکاری (MC)	0.778	0.778	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.800	1.000
زمین شناسی (GC)	0.556	1.000	0.556
معدنکاری (MC)	1.000	1.800	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.000	1.000
زمین شناسی (GC)	1.000	1.000	1.000
معدنکاری (MC)	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.800	1.286
زمین شناسی (GC)	0.556	1.000	0.714
معدنکاری (MC)	0.778	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.800	1.286
زمین شناسی (GC)	0.556	1.000	0.714
معدنکاری (MC)	0.778	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	0.714	0.714
زمین شناسی (GC)	1.400	1.000	1.000
معدنکاری (MC)	1.400	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.000	1.286
زمین شناسی (GC)	1.000	1.000	1.286
معدنکاری (MC)	0.778	0.778	1.000

ادامه جدول پ-۱: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۳ پارامتر اصلی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.286	1.000
زمین شناسی (GC)	0.778	1.000	0.778
معدنکاری (MC)	1.000	1.286	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.800	1.286
زمین شناسی (GC)	0.556	1.000	0.714
معدنکاری (MC)	0.778	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.400	1.000
زمین شناسی (GC)	0.714	1.000	0.714
معدنکاری (MC)	1.000	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	1.800	1.286
زمین شناسی (GC)	0.556	1.000	0.714
معدنکاری (MC)	0.778	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم			
	(IC)	(GC)	(MC)
ذاتی (IC)	1.000	3.000	1.286
زمین شناسی (GC)	0.333	1.000	0.429
معدنکاری (MC)	0.778	2.333	1.000

جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر ذاتی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.800	1.286	1.286	1.000
Pyrite Content (PC)	0.556	1.000	0.714	0.714	0.556
Moisture Content (MC)	0.778	1.400	1.000	1.000	0.778
Ash Content (AC)	0.778	1.400	1.000	1.000	0.778
Gas Emission (GE)	1.000	1.800	1.286	1.286	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Pyrite Content (PC)	0.714	1.000	0.714	0.714	0.714
Moisture Content (MC)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Ash Content (AC)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Gas Emission (GE)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.286	1.286	1.286	1.286
Pyrite Content (PC)	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000
Moisture Content (MC)	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000
Ash Content (AC)	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000
Gas Emission (GE)	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.286	1.000	1.000	1.000
Pyrite Content (PC)	0.778	1.000	0.778	0.778	0.778
Moisture Content (MC)	1.000	1.286	1.000	1.000	1.000
Ash Content (AC)	1.000	1.286	1.000	1.000	1.000
Gas Emission (GE)	1.000	1.286	1.000	1.000	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر ذاتی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.800	1.000	1.286	1.000
Pyrite Content (PC)	0.556	1.000	0.556	0.714	0.556
Moisture Content (MC)	1.000	1.800	1.000	1.286	1.000
Ash Content (AC)	0.778	1.400	0.778	1.000	0.778
Gas Emission (GE)	1.000	1.800	1.000	1.286	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.000	1.800	9.000	1.000
Pyrite Content (PC)	1.000	1.000	1.800	9.000	1.000
Moisture Content (MC)	0.556	0.556	1.000	5.000	0.556
Ash Content (AC)	0.111	0.111	0.200	1.000	0.111
Gas Emission (GE)	1.000	1.000	1.800	9.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.000	3.000	1.800	1.000
Pyrite Content (PC)	1.000	1.000	3.000	1.800	1.000
Moisture Content (MC)	0.333	0.333	1.000	0.600	0.333
Ash Content (AC)	0.556	0.556	1.667	1.000	0.556
Gas Emission (GE)	1.000	1.000	3.000	1.800	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.667	0.714	1.000	0.714
Pyrite Content (PC)	0.600	1.000	0.429	0.600	0.429
Moisture Content (MC)	1.400	2.333	1.000	1.400	1.000
Ash Content (AC)	1.000	1.667	0.714	1.000	0.714
Gas Emission (GE)	1.400	2.333	1.000	1.400	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر ذاتی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.400	2.333	1.000	0.778
Pyrite Content (PC)	0.714	1.000	1.667	0.714	0.556
Moisture Content (MC)	0.429	0.600	1.000	0.429	0.333
Ash Content (AC)	1.000	1.400	2.333	1.000	0.778
Gas Emission (GE)	1.286	1.800	3.000	1.286	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	9.000	1.800	1.800	1.286
Pyrite Content (PC)	0.111	1.000	0.200	0.200	0.143
Moisture Content (MC)	0.556	5.000	1.000	1.000	0.714
Ash Content (AC)	0.556	5.000	1.000	1.000	0.714
Gas Emission (GE)	0.778	7.000	1.400	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.000	2.333	1.400	1.000
Pyrite Content (PC)	1.000	1.000	2.333	1.400	1.000
Moisture Content (MC)	0.429	0.429	1.000	0.600	0.429
Ash Content (AC)	0.714	0.714	1.667	1.000	0.714
Gas Emission (GE)	1.000	1.000	2.333	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Pyrite Content (PC)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Moisture Content (MC)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ash Content (AC)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Gas Emission (GE)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۲: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر ذاتی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.400	1.400	1.400	1.400
Pyrite Content (PC)	0.714	1.000	1.000	1.000	1.000
Moisture Content (MC)	0.714	1.000	1.000	1.000	1.000
Ash Content (AC)	0.714	1.000	1.000	1.000	1.000
Gas Emission (GE)	0.714	1.000	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	0.778	0.778	0.778	0.778
Pyrite Content (PC)	1.286	1.000	1.000	1.000	1.000
Moisture Content (MC)	1.286	1.000	1.000	1.000	1.000
Ash Content (AC)	1.286	1.000	1.000	1.000	1.000
Gas Emission (GE)	1.286	1.000	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم					
	RC	PC	MC	AC	GE
Rank of Coal (TC)	1.000	1.286	1.286	1.800	3.000
Pyrite Content (PC)	0.778	1.000	1.000	1.400	2.333
Moisture Content (MC)	0.778	1.000	1.000	1.400	2.333
Ash Content (AC)	0.556	0.714	0.714	1.000	1.667
Gas Emission (GE)	0.333	0.429	0.429	0.600	1.000

جدول پ-۳: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر زمین‌شناسی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.667	1.667	0.714	1.667
Thickness (T)	0.600	1.000	1.000	0.429	1.000
Slope (S)	0.600	1.000	1.000	0.429	1.000
Faults (F)	1.400	2.333	2.333	1.000	2.333
Unworkable Seam (US)	0.600	1.000	1.000	0.429	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.000	1.400	2.333	2.333
Thickness (T)	1.000	1.000	1.400	2.333	2.333
Slope (S)	0.714	0.714	1.000	1.667	1.667
Faults (F)	0.429	0.429	0.600	1.000	1.000
Unworkable Seam (US)	0.429	0.429	0.600	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Thickness (T)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Slope (S)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Faults (F)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Unworkable Seam (US)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Thickness (T)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Slope (S)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Faults (F)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Unworkable Seam (US)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۳: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر زمین‌شناسی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.000	1.000	1.400	0.778
Thickness (T)	1.000	1.000	1.000	1.400	0.778
Slope (S)	1.000	1.000	1.000	1.400	0.778
Faults (F)	0.714	0.714	0.714	1.000	0.556
Unworkable Seam (US)	1.286	1.286	1.286	1.800	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	2.333	7.000	1.400	1.000
Thickness (T)	0.429	1.000	3.000	0.600	0.429
Slope (S)	0.143	0.333	1.000	0.200	0.143
Faults (F)	0.714	1.667	5.000	1.000	0.714
Unworkable Seam (US)	1.000	2.333	7.000	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	0.714	1.000	1.667	0.714
Thickness (T)	1.400	1.000	1.400	2.333	1.000
Slope (S)	1.000	0.714	1.000	1.667	0.714
Faults (F)	0.600	0.429	0.600	1.000	0.429
Unworkable Seam (US)	1.400	1.000	1.400	2.333	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.286	9.000	1.286	3.000
Thickness (T)	0.778	1.000	7.000	1.000	2.333
Slope (S)	0.111	0.143	1.000	0.143	0.333
Faults (F)	0.778	1.000	7.000	1.000	2.333
Unworkable Seam (US)	0.333	0.429	3.000	0.429	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۳: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر زمین‌شناسی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.286	1.800	1.000	1.286
Thickness (T)	0.778	1.000	1.400	0.778	1.000
Slope (S)	0.556	0.714	1.000	0.556	0.714
Faults (F)	1.000	1.286	1.800	1.000	1.286
Unworkable Seam (US)	0.778	1.000	1.400	0.778	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	5.000	5.000	5.000	1.667
Thickness (T)	0.200	1.000	1.000	1.000	0.333
Slope (S)	0.200	1.000	1.000	1.000	0.333
Faults (F)	0.200	1.000	1.000	1.000	0.333
Unworkable Seam (US)	0.600	3.000	3.000	3.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Thickness (T)	0.714	1.000	0.714	0.714	0.714
Slope (S)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Faults (F)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Unworkable Seam (US)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.000	2.333	1.400	1.000
Thickness (T)	1.000	1.000	2.333	1.400	1.000
Slope (S)	0.429	0.429	1.000	0.600	0.429
Faults (F)	0.714	0.714	1.667	1.000	0.714
Unworkable Seam (US)	1.000	1.000	2.333	1.400	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۳: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر زمین‌شناسی با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.667	1.667	1.000	5.000
Thickness (T)	0.600	1.000	1.000	0.600	3.000
Slope (S)	0.600	1.000	1.000	0.600	3.000
Faults (F)	1.000	1.667	1.667	1.000	5.000
Unworkable Seam (US)	0.200	0.333	0.333	0.200	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	0.714	1.000	0.714	0.556
Thickness (T)	1.400	1.000	1.400	1.000	0.778
Slope (S)	1.000	0.714	1.000	0.714	0.556
Faults (F)	1.400	1.000	1.400	1.000	0.778
Unworkable Seam (US)	1.800	1.286	1.800	1.286	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم					
	D	T	S	F	US
Depth (D)	1.000	1.000	7.000	0.778	1.400
Thickness (T)	1.000	1.000	7.000	0.778	1.400
Slope (S)	0.143	0.143	1.000	0.111	0.200
Faults (F)	1.286	1.286	9.000	1.000	1.800
Unworkable Seam (US)	0.714	0.714	5.000	0.556	1.000

جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر معدنکاری با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	0.714	0.714	0.714	0.714
Advancing Direction (AD)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000
Rate of Advance (RA)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Advancing Direction (AD)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Rate of Advance (RA)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.400	1.400	1.400	1.000
Advancing Direction (AD)	0.714	1.000	1.000	1.000	0.714
Rate of Advance (RA)	0.714	1.000	1.000	1.000	0.714
Filling Method (FM)	0.714	1.000	1.000	1.000	0.714
Exploitation Factor (EF)	1.000	1.400	1.400	1.400	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Advancing Direction (AD)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Rate of Advance (RA)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر معدنکاری با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.286	1.286	1.000	1.286
Advancing Direction (AD)	0.778	1.000	1.000	0.778	1.000
Rate of Advance (RA)	0.778	1.000	1.000	0.778	1.000
Filling Method (FM)	1.000	1.286	1.286	1.000	1.286
Exploitation Factor (EF)	0.778	1.000	1.000	0.778	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	2.333	0.778	1.000	1.000
Advancing Direction (AD)	0.429	1.000	0.333	0.429	0.429
Rate of Advance (RA)	1.286	3.000	1.000	1.286	1.286
Filling Method (FM)	1.000	2.333	0.778	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.000	2.333	0.778	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.286	1.000	1.286	1.286
Advancing Direction (AD)	0.778	1.000	0.778	1.000	1.000
Rate of Advance (RA)	1.000	1.286	1.000	1.286	1.286
Filling Method (FM)	0.778	1.000	0.778	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	0.778	1.000	0.778	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.000	0.429	0.429	0.429
Advancing Direction (AD)	1.000	1.000	0.429	0.429	0.429
Rate of Advance (RA)	2.333	2.333	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	2.333	2.333	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	2.333	2.333	1.000	1.000	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر معدنکاری با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Advancing Direction (AD)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Rate of Advance (RA)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.000	0.714	0.714	0.714
Advancing Direction (AD)	1.000	1.000	0.714	0.714	0.714
Rate of Advance (RA)	1.400	1.400	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.400	1.400	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.400	1.400	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.000	1.000	0.778	1.000
Advancing Direction (AD)	1.000	1.000	1.000	0.778	1.000
Rate of Advance (RA)	1.000	1.000	1.000	0.778	1.000
Filling Method (FM)	1.286	1.286	1.286	1.000	1.286
Exploitation Factor (EF)	1.000	1.000	1.000	0.778	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	0.714	0.714	0.714	1.000
Advancing Direction (AD)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.400
Rate of Advance (RA)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.400
Filling Method (FM)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.400
Exploitation Factor (EF)	1.000	0.714	0.714	0.714	1.000

ادامه‌ی جدول پ-۴: ماتریس‌های مقایسه زوجی ۵ پارامتر معدنکاری با توجه به نظرات متخصصان

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Advancing Direction (AD)	0.714	1.000	0.714	0.714	0.714
Rate of Advance (RA)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.000	1.400	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	1.000	0.714	0.714	0.714
Advancing Direction (AD)	1.000	1.000	0.714	0.714	0.714
Rate of Advance (RA)	1.400	1.400	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.400	1.400	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.400	1.400	1.000	1.000	1.000

ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم					
	EM	AD	RA	FM	EF
Extraction Method (EM)	1.000	0.714	0.714	0.714	0.714
Advancing Direction (AD)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000
Rate of Advance (RA)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000
Filling Method (FM)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000
Exploitation Factor (EF)	1.400	1.000	1.000	1.000	1.000

Abstract

The coal spontaneous combustion in coal mines is one of the most important problems in all coal production countries and is a big fear for industries and researchers involved in this field study.

Most of the coal fires due to spontaneous combustion will be started in a small area and gradually influence to a wide area, that have greatly threatened the mining industry and have been considered as one of the major catastrophes in many country. The results of coal spontaneous combustion is enormous economic losses and personal casualties, increase the temperature inside the mine, creating problem in mine ventilation; the damage resulting from coal spontaneous combustions have also led to massive environmental pollution. Thus, coal spontaneous combustions are an immediate problem to solve.

In this research, according to a review of all the latest, known and credible studies about coal spontaneous combustion from around the world and identification of many important and effective parameters, and selected 15 parameters which were applicable to the evaluation. After identification the effective parameters on coal spontaneous combustion, 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 coal spontaneous combustion 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 illustrared relatively good concordance.

With access to the weight of each parameter, a new quantitative classification system was proposed which ‘‘Coal Spontaneous Combustion Potential index (CSCPi) ’’ has been named. In the CSCPi system, a number from 0 to 100 can be assigned to each coal layers, with higher values corresponding to greater ease of coal spontaneous combustion capability. Based on the CSCPi classification, coal layers are classified into three modes from the view point of coal spontaneous combustion capability: low, medium, high.

Then with obtain data related to the intrinsic, geological and mining charactristics, special index calculated for each layer in Pashkalat, Kelariz and Razmja coal region of layers of Eastern Alborz mines company. So, a comprehensive and perfect evalution of the layers in the study area were presented. Finally, by using the event of spontaneous combustion 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

Coal Mines, Risk Assessment, Coal Spontaneous Combustion Potential index (CSCPi), Engineering Classification, Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process (FDAHP), Rock Engineering Systems (RES), Eastern Alborz Coal Mines.

Shahrood University

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

Presentation of an Engineering Classification System for Risk Assessment of Spontaneous Combustion Coal in Coal Mines

Amir Saffari

Supervisors:
Dr. Farhang Sereshki
Dr. Mohammad Ataei

Advisor:
Keramat Ghanbari

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
In
Exploitation Mining Engineering

February 2014