





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

ارائه مدل کمی و کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ

نگارنده: امیر صفاری

اساتید راهنما:
دکتر فرهنگ سرشکی
دکتر محمد عطائی

تیر ۱۳۹۸

شماره: ۲۶۹۸۱/۲۱۰۷
تاریخ: ۲۵/۰۴/۹۸
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم امیر صفاری دانشجوی دکتری رشته استخراج معدن به شماره دانشجویی ۹۲۰۰۸۸۵ ورودی مهرماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳۹۸/۴/۱۶ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: ارائه مدل کمی و کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه های زغال سنگ دفاع و با اخذ نمره ۱۹ به درجه عالی نائل گردید.

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد.
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد.	

ردیف	هئیت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر فرهنگ سرشکی	اساتید راهنما	استاد	
۲	دکتر محمد عطائی		استاد	
-	دکتر -	مشاور/مشاورین	-	
۳	مهندس حسن مدنی	استاد مدعو خارجی	استادیار	
۴	دکتر رضا کاکائی	استاد مدعو خارجی	استاد	
۵	دکتر حمید آقاجانی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۶	دکتر محمد کارآموزیان	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای امیر صفاری بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطائی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به

روح پاک پدرم، که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی،

ایستادگی را تجربه نمایم؛ اما...؛

و به مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود

وجودش برایم همه مهر؛

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

است.

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید و این دفتر را مدیون عشق و

تشویق ایشان هستم.

و تقدیم به

کارگران سخت‌کوش معادن زغال‌سنگ ایران

تقدیر و تشکر

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

اینک که به یاری خداوند متعال رساله‌ی دکتری خویش را به پایان رسانده‌ام بر خویش وظیفه می‌دانم تا از آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ... موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم ... و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند ... پدرانمان، مادرانمان، استادانمان؛ کمال سپاس و قدردانی را به جا آورم.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم، اما از آنجایی که تجلیل از معلم، 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 الله 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 فرهیخته، مهربان و فرزانه‌ام، معلمان اخلاق و علم، جناب آقای پروفیسور فرهنگ سرشکی و جناب آقای پروفیسور محمد عطائی که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی و عاشقانه راهنما، مشوق و مایه دلگرمی بنده در این رساله بودند و بسیار مدیون محبت‌های بی‌دریغ و حمایت‌های همه جانبه ایشان هستم، صمیمانه سپاسگزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

همچنین از کلیه کارگران سخت کوش و مسئولین محترم شرکت زغال سنگ‌های پروده طبس، البرز شرقی، البرز مرکزی، کرمان و شرکت ثمین سبز گلشن شمال که با محبت و بزرگواری خویش بنده را یاری نمودند و مهمان‌دوستی و پاکی مردم کویر و به ویژه شهر زیبای طبس را در خاطرم جاودانه کردند، کمال تشکر را دارم. امیدوارم با به پایان رساندن این تحقیق، اندکی از دین خویش را به وطن عزیزم و مردمان مهربانش ادا کرده باشم.

از زحمات جناب آقای مهندس مصطفی نادری دوست و همراه عزیزم در دانشگاه صنعتی شاهرود، جناب آقای مهندس کرامت قنبری تیلیمی (معاونت محترم معدنی شرکت معادن زغال سنگ البرز شرقی) و سرکار خانم نسرین جلالی (مدیر دفتر حوزه معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی شاهرود) به خاطر همکاری بی‌دریغشان در این عرصه صمیمانه سپاس‌گزارم و برای ایشان نیز سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

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

در پایان بر خود وظیفه می‌دانم از مجموعه دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود برای ۱۲ سال همراهی کمال تشکر و قدردانی را نمایم. به درستی که اگر انصاف رعایت شود، باید از جناب آقای حسین شاه‌حسینی مدیر دفتر دانشکده نیز تشکر و سپاس‌گزاری نمایم و از خداوند منان برای ایشان آرزوی سلامتی و موفقیت هرچه تمام‌تر را دارم.

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

تعهدنامه

اینجانب امیر صفاری دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله ارائه مدل کمی و کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ تحت راهنمایی آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطائی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله 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 رساله 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 رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها 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 پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

خطرات ناشی از استخراج زغال سنگ یکی از عوامل محدودکننده طراحی در معادن محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین خطرات ناشی از استخراج زغال سنگ خطر وقوع خودسوزی زغال سنگ است. فرآیند خودسوزی به دلیل تأثیر مستقیم بر حفظ ایمنی محیط استخراجی و نیز آلودگی محیط زیست، باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد؛ لذا موضوع تحقیق رساله دکتری با عنوان «ارائه مدل کمی و کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ» انتخاب شد تا با ساخت دستگاه ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ شاهد اولین پیشرفت‌ها در این زمینه باشیم. در این رساله سعی شد تا در اولین گام با بررسی منابع مختلف و تحقیقات گذشته و سپس با استفاده از جمع‌آوری نمونه‌های زغال سنگ از معادن کشور و انجام آزمایش‌های دقیق به بررسی و شناخت کافی از فرآیند خودسوزی زغال سنگ و پارامترهای مؤثر در آن دست پیدا شود. در مرحله بعد سعی شد تا یک مدل کیفی و کمی جدید دربرگیرنده تمامی مشخصات ذاتی زغال سنگ برای تعیین اندیس قابلیت خودسوزی زغال سنگ ارائه شود. با استفاده از این شاخص‌های جدید می‌توان ارتباط میان مشخصات لایه زغال سنگ و نتایج خودسوزی را مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور، مدل کیفی با استفاده از ترکیبی از روش فازی دلفی سیستم‌های مهندسی سنگ (FDRES) و روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری (DEMATEL) توسعه یافته است. این مدل به صورت سیستم طبقه‌بندی با رویکردهای دقت و سهولت استفاده، شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ (CSCSi) را ارائه می‌دهد که سطح قابلیت خودسوزی را به صورت کیفی در سه کلاس ایمن، احتیاط و نا ایمن توصیف می‌کند. برای توسعه مدل کمی با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مهم‌ترین مؤلفه‌ها و پارامترها شناسایی شدند و بر اساس آن مدل کمی ارائه شد. برای اعتبارسنجی دو مدل نیز از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به ۱۳ لایه از حوضه زغال سنگی البرز مرکزی استفاده شد. نتایج این رساله نشان داد که مدل‌های ارائه شده ابزاری ساده و قابل اطمینان در ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ است.

کلمات کلیدی: زغال سنگ، قابلیت خودسوزی زغال سنگ، مشخصات ذاتی زغال سنگ، روش CPT، روش R₇₀، مدل کیفی، مدل کمی.

لیست مقالات مستخرج از رساله

– مقالات چاپ یا پذیرفته شده در مجلات بین‌المللی

- **Amir Saffari**, Mohammad Ataei and Farhang Sereshki "Studying relationship between coal intrinsic characteristics in spontaneous combustion of coal potential using crossing point temperature test method A case study: Tabas Parvadeh coal mines, Iran", Journal of Mining and Environment (JME), Published online: 17 November 2018, DOI: 10.22044/jme.2018.7524.1605.
- **Amir Saffari**, Farhang Sereshki and Mohammad Ataei "A comprehensive study on effect of moisture content on coal spontaneous combustion tendency" Iranian Journal of Earth Sciences, Accepted. 9 December 2018.
- **Amir Saffari**, Farhang Sereshki and Mohammad Ataei "Evaluation effect of macerals petrographic and pyrite contents on spontaneous coal combustion in Tabas Parvadeh and Eastern Alborz coal mines in Iran" International Journal of Coal Preparation and Utilization, Accepted. 22 Jan 2019. Published online: 08 Feb 2019. DOI: 10.1080/19392699.2019.1574261. (Impact Factor 2017=1.527, Q2).
- **Amir Saffari**, Farhang Sereshki and Mohammad Ataei "The simultaneous effect of moisture and pyrite on coal spontaneous combustion using CPT and R70 test methods" Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), Accepted. 13 February 2019. DOI: 10.17794/rgn.2019.3.1
- **Amir Saffari**, Farhang Sereshki and Mohammad Ataei "A comprehensive study on effect of macerals content on coal spontaneous combustion tendency" Journal of The Institution of Engineers (India) Series D., 2019, 100 (1): 1-13. Accepted 21 February 2019. DOI: 10.1007/s40033-019-00179-0
- **Amir Saffari**, Mohammad Ataei and Farhang Sereshki "Evaluation of spontaneous combustion of coal (SCC) by using the R70 test method based on the correlation among intrinsic coal properties (Case study: Tabas Parvadeh coal mines, Iran)" Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), Accepted. 24 May 2019. DOI: 10.17794/rgn.2019.3.6
- **Amir Saffari**, Mohammad Ataei and Farhang Sereshki "Examination of the role of moisture content on spontaneous combustion of coal (SCC)" Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), Accepted. 23 May 2019. DOI: 10.17794/rgn.2019.3.7

– مقالات تحت داوری

- **Amir Saffari**, Mohammad Ataei and Farhang Sereshki "A study on relation in coal intrinsic characteristics and spontaneous combustion of coal potential using CPT test method" Under review.
- **Amir Saffari**, Mohammad Ataei and Farhang Sereshki "Ranking of the importance of parameters affecting coal spontaneous combustion potential using the fuzzy interaction matrix (FIM) technique" Under review.
- **Amir Saffari**, Mohammad Ataei and Farhang Sereshki "A new applied equation for prediction of coal self-heating based on maceral content" Under review.

– مقاله ارائه شده در کنفرانس

- امیر صفاری، محمد عطائی و فرهنگ سرشکی، (۱۳۹۷) "روش‌های سیستمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ"، چهارمین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، شرکت زغال‌سنگ پروده طبس، ۲۷-۲۹ فروردین‌ماه ۱۳۹۷، طبس.
- امیر صفاری، فرهنگ سرشکی و محمد عطائی، (۱۳۹۷) "روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ"، چهارمین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، شرکت زغال‌سنگ پروده طبس، ۲۷-۲۹ فروردین‌ماه ۱۳۹۷، طبس.

– دستورالعمل

همکار مجری در تدوین طرح "دستورالعمل ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ"، ۱۳۹۸، زیر نظر معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور؛ وزارت صنعت، معدن و تجارت؛ سازمان نظام مهندسی معدن.

فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه و کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- سؤال‌های اصلی تحقیق
۵	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق
۶	۴-۱- اهداف تحقیق
۷	۵-۱- فرض‌های تحقیق
۷	۶-۱- ساختار رساله
۹	فصل دوم: مکانیسم خودسوزی زغال سنگ
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- انواع آتش‌سوزی در معادن
۱۲	۱-۲-۲- آتش‌سوزی باز
۱۳	۲-۲-۲- آتش‌سوزی داخلی (بسته) یا خودسوزی
۱۶	۳-۲- مکانیسم خودسوزی زغال سنگ
۲۸	۴-۲- تأثیرات خودسوزی زغال سنگ بر مسائل زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی
۳۳	۵-۲- جمع‌بندی
۳۵	فصل سوم: بررسی سابقه علمی موضوع
۳۶	۱-۳- مقدمه
۳۶	۲-۳- مروری بر سابقه علمی موضوع
۵۲	۳-۳- روش‌های ارزیابی خودسوزی زغال سنگ
۵۳	۱-۳-۳- روش‌های سیستمی
۵۳	الف- نسبت $\frac{CO_2}{CO}$
۵۴	ب- نسبت گراهام
۵۵	ج- سیستم ارزیابی لهستانی
۵۷	د- نسبت جونز- تریکت
۵۸	ه- نسبت نیتروژن به اکسیدهای کربن
۵۸	و- روش هندی
۶۰	ز- سیستم ارزیابی SES
۶۲	ح- سیستم ارائه شده توسط Singh و همکاران
۶۴	ط- سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین
۶۸	ی- سیستم ارزیابی شاخص پتانسیل خودسوزی زغال سنگ CSCPI
۷۱	۳-۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی
۷۵	الف- روش دمای نقطه تقاطع (CPT)
۷۷	ب- کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC)
۷۸	ج- آنالیز گرماسنجی ثقلی (TGA)
۸۰	د- روش کمیته معدنی ایالات متحده (USBM)
۸۲	ه- روش نرخ گرمایش خود به خودی R ₇₀
۸۶	و- روش آزمایش UQ two-metre column
۸۸	۳-۳-۳- روش سنجش از راه دور
۹۲	۴-۳-۳- سایر روش‌ها
۹۲	الف- گمانه‌های اندازه‌گیری
۹۳	ب- گرماسنج مادون قرمز بدون تماس فیزیکی

شماره صفحه

۹۴

۹۸

۱۰۱

۱۰۲

۱۰۲

۱۰۴

۱۰۴

۱۰۵

۱۰۶

۱۰۷

۱۰۷

۱۰۹

۱۲۱

۱۲۱

۱۲۳

۱۲۴

۱۲۵

۱۲۵

۱۲۵

۱۲۹

۱۳۹

۱۴۳

۱۴۹

۱۵۲

۱۵۶

۱۶۰

۱۶۰

۱۶۲

۱۶۳

۱۷۴

۱۸۴

۱۹۰

۱۹۲

۱۹۳

۱۹۶

۲۰۲

۲۰۴

۲۰۹

۲۱۳

۲۱۴

۲۱۵

۲۱۸

۲۲۱

عنوان

۳-۴- نقد و بررسی مطالعات گذشته

۳-۵- جمع‌بندی

فصل چهارم: مواد و روش تحقیق

۴-۱- مقدمه

۴-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

۴-۳- تعیین مشخصات ذاتی نمونه‌های زغال‌سنگ

۴-۳-۱- روش تعیین رطوبت

۴-۳-۲- روش تعیین خاکستر

۴-۳-۳- روش تعیین مواد فرار

۴-۳-۴- روش تعیین کربن ثابت

۴-۴- تعیین ترکیبات پتروگرافی نمونه‌های زغال‌سنگ

۴-۵- طراحی و ساخت دستگاه خودسوزی زغال‌سنگ

۴-۶- پایگاه داده

۴-۷- جمع‌بندی

فصل پنجم: ارائه مدل کمی و کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۱- مقدمه

۵-۲- بررسی عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ

۵-۲-۱- عوامل ذاتی مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ

الف- درجه زغال‌شدگی

ب- پیریت محتوی

ج- رطوبت محتوی

د- ترکیب پتروگرافی

ه- خاکستر محتوی

و- مواد فرار

ح- اندازه ذرات

۵-۳- ارزیابی ارتباط بین دو روش آزمایشگاهی R_{70} و CPT

۵-۴- انتخاب پارامترها در مدل‌های ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۵- توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۵-۱- استفاده از روش DEMATEL برای تعیین وزن پارامترها

۵-۵-۲- استفاده از روش FRES برای تعیین وزن پارامترها

۵-۵-۳- ارائه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۵-۴- اعتبارسنجی مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۶- توسعه مدل کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۶-۱- اصول روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی

۵-۶-۲- پیاده‌سازی روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی در تعیین مهم‌ترین پارامترهای ذاتی مؤثر در ارزیابی قابلیت ...

۵-۶-۳- ارائه مدل کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۶-۴- تعیین بهترین مدل تخمین و اعتبارسنجی مدل کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

۵-۷- نتیجه‌گیری

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- مقدمه

۶-۲- نتیجه‌گیری

۶-۳- پیشنهادها

منابع و مراجع

فهرست جدول‌ها

شماره صفحه	عنوان
۱۶	جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از برخی از مهم‌ترین وقایع خودسوزی ثبت شده طی سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۰۶ میلادی
۱۸	جدول ۲-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با مکانیسم اکسیداسیون و خودسوزی زغال‌سنگ
۳۷	جدول ۱-۳: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه
۵۰	جدول ۲-۳: برخی از مشخصات ذاتی، معدنکاری و زمین‌شناسی زغال‌سنگ مطالعه شده توسط محققین
۵۵	جدول ۳-۳: طبقه‌بندی نواحی خطر ابتلا به خودسوزی با استفاده از نسبت گراهام
۵۶	جدول ۴-۳: طبقه‌بندی شاخص Olpinski
۵۷	جدول ۵-۳: طبقه‌بندی نواحی خطر با استفاده از نسبت جونز- تریکت
۵۹	جدول ۶-۳: مجموعه اجزای مؤثر در خطر خودسوزی در روش هندی
۶۱	جدول ۷-۳: امتیازدهی مربوط به سیستم ارزیابی SES
۶۲	جدول ۸-۳: امتیازدهی مربوط به اقدامات پیشگیرانه برای نواحی استخراج شده، (S^{10})
۶۲	جدول ۹-۳: امتیازدهی مربوط به اقدامات پیشگیرانه برای طراحی پایه‌ها و واحدهای تهویه برای نواحی استخراج ...
۶۲	جدول ۱۰-۳: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی
۶۳	جدول ۱۱-۳: امتیازدهی مربوط به افزایش دما و گرماسنجی زغال‌سنگ تحت شرایط آدیاباتیک
۶۳	جدول ۱۲-۳: امتیازدهی مربوط به فاکتورهای ذاتی و معدنکاری زغال‌سنگ
۶۴	جدول ۱۳-۳: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی
۶۶	جدول ۱۴-۳: وزن نهایی پارامترها در سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین
۶۸	جدول ۱۵-۳: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر خودسوزی در سیستم جامع ارزیابی خطر چین
۶۹	جدول ۱۶-۳: وزن نهایی پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ در روش CSCPi
۷۰	جدول ۱۷-۳: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها
۷۱	جدول ۱۸-۳: بازه بندی اندیس پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ
۷۷	جدول ۱۹-۳: طبقه‌بندی مقادیر CPT و درجه تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی
۷۷	جدول ۲۰-۳: وضعیت خودسوزی بر اساس شاخص $I_{(FCC)}$
۸۱	جدول ۲۱-۳: بررسی وضعیت پتانسیل خودسوزی بر اساس روش CSHt
۸۴	جدول ۲۲-۳: مقادیر R_{70} و درجه تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی
۸۶	جدول ۲۳-۳: مقادیر R_{70} و درجه تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی در تحقیقات Qi و همکاران در سال ۲۰۱۳ بر اساس اولین طبقه‌بندی صورت گرفته توسط Humphreys و همکاران در سال ۱۹۸۱
۹۷	جدول ۲۴-۳: نظرات مختلف در مورد تأثیر میزان رطوبت محتوی در تمایل به خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ
۱۰۴	جدول ۱-۴: مشخصات گلوله‌های به کار رفته در عملیات آسیا کنی
۱۵۰	جدول ۱-۵: تأثیر مواد ذاتی و غیر آلی در خودسوزی زغال‌سنگ
۱۵۸	جدول ۲-۵: تأثیر میانگین اندازه ذرات مختلف در قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ
۱۶۳	جدول ۳-۵: مقادیر عددی شدت اثرگذاری
۱۶۴	جدول ۴-۵: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۱ در روش DEMATEL
۱۶۴	جدول ۵-۵: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۲ در روش DEMATEL
۱۶۴	جدول ۶-۵: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۳ در روش DEMATEL
۱۶۴	جدول ۷-۵: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۴ در روش DEMATEL
۱۶۵	جدول ۸-۵: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۵ در روش DEMATEL
۱۶۵	جدول ۹-۵: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۶ در روش DEMATEL
۱۶۶	جدول ۱۰-۵: نتایج محاسبه ماتریس میانگین (ماتریس A)
۱۶۷	جدول ۱۱-۵: نرمال کردن ماتریس میانگین (ماتریس D)
۱۶۹	جدول ۱۲-۵: ماتریس روابط کلی (ماتریس T)
۱۶۹	جدول ۱۳-۵: مقادیر r ، $r+c$ ، c ، $r+c$ و وزن پارامترها در ماتریس روابط کلی (ماتریس T)
۱۷۰	جدول ۱۴-۵: وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از روش DEMATEL
۱۷۳	جدول ۱۵-۵: ماتریس روابط کلی حد آستانه از طریق روش میانگین حسابی درایه‌های ماتریس T

عنوان

شماره صفحه

۱۷۵	جدول ۵-۱۶: کدهای انتخابی در روش کدگذاری نیمه کمی خبره
۱۷۵	جدول ۵-۱۷: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۱ در روش FRES
۱۷۵	جدول ۵-۱۸: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۲ در روش FRES
۱۷۶	جدول ۵-۱۹: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۳ در روش FRES
۱۷۶	جدول ۵-۲۰: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۴ در روش FRES
۱۷۶	جدول ۵-۲۱: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۵ در روش FRES
۱۷۷	جدول ۵-۲۲: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۶ در روش FRES
۱۷۹	جدول ۵-۲۳: حاصل نتایج تشکیل ماتریس فازی بر اساس جدول‌های ۵-۱۷ تا ۵-۲۲
۱۸۱	جدول ۵-۲۴: مقادیر علت فازی، اثر فازی، مجموع علت و اثر فازی، وزن فازی و وزن غیر فازی هر پارامتر
۱۸۱	جدول ۵-۲۵: مقادیر علت، اثر، مجموع علت و اثر و تفاضل علت و اثر هر پارامتر در حالت کلاسیک برای هر پارامتر
۱۸۴	جدول ۵-۲۶: وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از روش FRES
۱۸۶	جدول ۵-۲۷: وزن جدید پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ
۱۸۶	جدول ۵-۲۸: وزن نهایی پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ
۱۸۷	جدول ۵-۲۹: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها
۱۸۹	جدول ۵-۳۰: بازبندی شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس CS CSI
۱۹۱	جدول ۵-۳۱: محاسبه شاخص قابلیت خودسوزی پایگاه داده ارائه شده در فصل چهارم و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده CPT و R ₇₀
۱۹۶	جدول ۵-۳۲: آماره‌های توصیفی برای تک‌تک پارامترها
۱۹۷	جدول ۵-۳۳: ماتریس ضرایب همبستگی متغیرهای انتخابی
۱۹۸	جدول ۵-۳۴: محاسبه اشتراک اولیه و اشتراک استخراجی پارامترها
۱۹۸	جدول ۵-۳۵: مجموع واریانس توضیح داده شده
۲۰۰	جدول ۵-۳۶: ماتریس اجزا
۲۰۰	جدول ۵-۳۷: ماتریس اجزا همبستگی‌های بازتولید شده ناشی از چرخش
۲۰۱	جدول ۵-۳۸: ماتریس چرخیده شده اجزا
۲۰۲	جدول ۵-۳۹: ماتریس تبدیل اجزا
۲۰۲	جدول ۵-۴۰: ماتریس کوواریانس مؤلفه‌های اصلی
۲۰۳	جدول ۵-۴۱: روابط حاصل از انجام برازش خطی چند متغیره بر اساس پارامتر وابسته CPT
۲۰۴	جدول ۵-۴۲: روابط حاصل از انجام برازش خطی چند متغیره بر اساس پارامتر وابسته R ₇₀
۲۰۵	جدول ۵-۴۳: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ برای روش CPT
۲۰۵	جدول ۵-۴۴: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ برای روش R ₇₀
۲۰۹	جدول ۵-۴۵: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای رابطه‌های ارائه شده با توجه به جدول‌های ۵-۴۳ و ۵-۴۴

فهرست شکل‌ها

شماره صفحه	عنوان
۱۱	شکل ۱-۲: پنج ضلعی انفجار گرد زغال ناشی از خودسوزی زغال سنگ
۱۲	شکل ۲-۲: خودسوزی زغال سنگ در مناطق مختلف جهان
۱۷	شکل ۳-۲: مثلث آتش
۱۹	شکل ۴-۲: چگونگی شکل‌گیری پدیده گرمایش خود به خودی زغال سنگ
۲۰	شکل ۵-۲: مجموعه مراحل مختلف اکسیداسیون زغال سنگ
۲۰	شکل ۶-۲: مجموعه مراحل مختلف جذب فیزیکی و شیمیایی اکسیژن در اکسیداسیون زغال سنگ
۲۱	شکل ۷-۲: مراحل مختلف اکسیداسیون و گرمایش خود به خودی زغال سنگ
۲۱	شکل ۸-۲: فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ
۲۲	شکل ۹-۲: تصویر میکروسکوپی از ذرات زغال سنگ صیقل داده شده غوطه‌ور در روغن بعد از یک ساعت اکسیداسیون ...
۲۴	شکل ۱۰-۲: مراحل تکاملی یک آتش خود به خودی زغال سنگ
۲۵	شکل ۱۱-۲: مراحل تکاملی خودسوزی زغال سنگ
۲۶	شکل ۱۲-۲: نمای شماتیک نشان‌دهنده فرآیند خودسوزی در یک دپوی زغال سنگ
۲۶	شکل ۱۳-۲: نمای شماتیک نشان‌دهنده فرآیند و مشخصات اصلی خودسوزی در یک دپوی زغال سنگ
۲۹	شکل ۱۴-۲: آلودگی فوری محیط‌زیست توسط انتشار گازهای مختلف ناشی از خودسوزی زغال سنگ
۲۹	شکل ۱۵-۲: چرخه خودسوزی زیرزمینی لایه زغال سنگ بر نشست
۳۱	شکل ۱۶-۲: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال سنگ در جهان
۳۲	شکل ۱۷-۲: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال سنگ در جهان
۵۲	شکل ۱-۳: فراوانی مطالعات انجام شده بر روی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر پدیده خودسوزی زغال سنگ
۵۳	شکل ۲-۳: طبقه‌بندی روش‌های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ
۵۳	شکل ۳-۳: تأثیر افزایش دما در تغییرات نسبت $\frac{CO_2}{CO}$
۵۵	شکل ۴-۳: نمونه‌ای از نمودار نسبت گراهام در برابر افزایش دما
۵۸	شکل ۵-۳: تغییرات در نسبت $(CO+CO_2)/N_2$ با افزایش دما
۶۵	شکل ۶-۳: ارزیابی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی
۷۵	شکل ۷-۳: روش‌های آزمایشگاهی بررسی قابلیت خودسوزی زغال سنگ
۷۶	شکل ۸-۳: منحنی دما-زمان در روش CPT
۷۶	شکل ۹-۳: منحنی دما-زمان در روش CPT
۷۹	شکل ۱۰-۳: نمونه منحنی TGA
۸۰	شکل ۱۱-۳: نمونه منحنی TGA برای زغال سنگ ساب‌بیتومینه
۸۰	شکل ۱۲-۳: نمونه منحنی TGA برای زغال سنگ آنتراسیت
۸۴	شکل ۱۳-۳: تعیین شاخص نرخ گرمایش خود به خودی R ₇₀
۸۵	شکل ۱۴-۳: نتایج نرخ گرمایش خود به خودی R ₇₀ برای نمونه زغال سنگ بیتومینه با مواد فرار بالا (نمونه زغال سنگ A) و برای نمونه زغال سنگ ساب‌بیتومینه (نمونه زغال سنگ B)
۸۶	شکل ۱۵-۳: فلاکس واکنش در تحقیقات Qi و همکاران در سال ۲۰۱۳
۸۷	شکل ۱۶-۳: طرح تجهیزات مورد استفاده در دستگاه گرمایش خود به خودی UQ two-metre column
۸۸	شکل ۱۷-۳: سوختن زغال سنگ در زیر سطح زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای
۸۹	شکل ۱۸-۳: «ردبان آتش»، نشان‌دهنده انتشار محصولات گازی مختلف ناشی از افزایش دما در پدیده گرمایش ...
۸۹	شکل ۱۹-۳: غلظت انتشار محصولات گازی مختلف ناشی از افزایش دما در پدیده گرمایش خود به خودی زغال سنگ
۹۱	شکل ۲۰-۳: پدیده خودسوزی زغال سنگ و تصاویری شماتیک از آشکارسازی خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش ...
۹۱	شکل ۲۱-۳: نمونه‌ای از یک تصویر مادون قرمز حرارتی از یک توده زغال سنگ در حال خودسوزی
۹۲	شکل ۲۲-۳: نمونه‌ای از استفاده از سیستم‌های پروازگر (پهپاد) بدون سرنشین سبک وزن مورد استفاده در شناسایی گرمایش ناشی از خودسوزی زغال سنگ در معادن روباز زغال سنگ
۹۳	شکل ۲۳-۳: نمونه‌ای از گمانه پایش و اندازه‌گیری گرمایش خود به خودی لایه زغال سنگ

عنوان

شماره صفحه

- شکل ۳-۲۴: نمونه‌ای از دستگاه گرماسنج مادون قرمز بدون تماس فیزیکی
- شکل ۴-۱: نگهداری نمونه‌های زغال سنگ از معدن تا آزمایشگاه در بسته‌های پلاستیکی آب‌بند هوا ناپذیر
- شکل ۴-۲: تزریق گاز نیتروژن به بسته‌های حاوی نمونه زغال سنگ
- شکل ۴-۳: روش تهیه مقطع صیقلی از نمونه زغال سنگ
- شکل ۴-۴: نمای شماتیک از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ
- شکل ۴-۵: نمای شماتیک از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ
- شکل ۴-۶: نمای شماتیک از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ
- شکل ۴-۷: نمای کلی از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ
- شکل ۴-۸: کپسول‌های نیتروژن و اکسیژن ۵۰ لیتری به همراه رگلاتور، سر کپسولی دومرحله‌ای و فلومتر روتامتر هوا ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به همراه پایه نگهدارنده آلومینیومی طراحی شده
- شکل ۴-۹: نمای داخلی آون به همراه لوله مسی ماریچ
- شکل ۴-۱۰: کنترلر دمایی قابل برنامه‌ریزی و ثابت داده نگار مدل JUMO Dicon touch آلمان
- شکل ۴-۱۱: کنترلر دمایی قابل برنامه‌ریزی و ثابت داده نگار مدل JUMO Dicon touch آلمان به همراه پایه نگهدارنده ...
- شکل ۴-۱۲: سنسور PT100 با مغزی JUMO آلمان
- شکل ۴-۱۳: نمای شماتیک رآکتور آدیباتیک واکنش
- شکل ۴-۱۴: نمای کلی از رآکتور آدیباتیک واکنش به همراه لوله‌های ورود و خروج گاز و سنسور دمایی
- شکل ۴-۱۵: نمای شماتیک محفظه داخلی آون و رآکتور آدیباتیک واکنش
- شکل ۴-۱۶: نمای کلی از آون
- شکل ۴-۱۷: کانال‌های یک اینچ برای ورود و خروج لوله‌های مورد نیاز
- شکل ۴-۱۸: واحد مراقبت و شیرهای برقی ورودی هوای فشرده برای کنترل کولینگ
- شکل ۵-۱: ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و نرخ خودسوزی R₇₀
- شکل ۵-۲: ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و نرخ خودسوزی R₇₀
- شکل ۵-۳: ارتباط بین میزان کربن ثابت و نرخ خودسوزی R₇₀
- شکل ۵-۴: ارتباط بین میزان کربن ثابت و روش CPT
- شکل ۵-۵: تأثیر تبخیر رطوبت در افزایش خلل و فرج زغال سنگ
- شکل ۵-۶: نقش پیریت موجود در زغال سنگ در تأثیر آن بر پدیده خطر خودسوزی زغال سنگ
- شکل ۵-۷: اکسیداسیون زغال سنگ حاوی نمونه پیریت
- شکل ۵-۸: نمونه‌ای از کریستال‌های سولفات هیدرات حاصل از واکنش پیریت در سطح زغال سنگ
- شکل ۵-۹: عکس میکروسکوپ الکترونی از کریستال‌های پیریت در زغال سنگ
- شکل ۵-۱۰: ارتباط بین میزان پیریت محتوی و نرخ خودسوزی R₇₀
- شکل ۵-۱۱: ارتباط بین میزان پیریت محتوی و روش CPT
- شکل ۵-۱۲: بررسی تأثیر دوگانه رطوبت و پیریت در خودسوزی زغال سنگ
- شکل ۵-۱۳: نمایش سه‌بعدی تغییرات R₇₀ نسبت به رطوبت محتوی و پیریت محتوی
- شکل ۵-۱۴: نمایش سه‌بعدی تغییرات CPT نسبت به رطوبت محتوی و پیریت محتوی
- شکل ۵-۱۵: منحنی تغییرات CO در طی اکسیداسیون زغال سنگ تحت شرایط دمایی قابل برنامه‌ریزی مختلف
- شکل ۵-۱۶: منحنی تغییرات CO در درصد‌های مختلف پیریت در دماهای مختلف
- شکل ۵-۱۷: منحنی تغییرات CO₂ در طی اکسیداسیون زغال سنگ تحت شرایط دمایی قابل برنامه‌ریزی مختلف
- شکل ۵-۱۸: منحنی تغییرات جذب سطحی اکسیژن در دماهای مختلف با درصد پیریت محتوی‌های مختلف
- شکل ۵-۱۹: مراحل مختلفی که یک زغال سنگ مرطوب تحت جریان هوا قرار می‌گیرد تا دچار خودسوزی شود
- شکل ۵-۲۰: منحنی‌های خودسوزی زغال سنگ در یک آون آدیباتیک با درصد‌های مختلف از رطوبت محتوی نمونه زغال سنگ
- شکل ۵-۲۱: منحنی‌های خودسوزی زغال سنگ در یک آون آدیباتیک با درصد‌های مختلف از رطوبت محتوی نمونه زغال سنگ
- شکل ۵-۲۲: تأثیر رطوبت محتوی در نرخ خودسوزی زغال سنگ
- شکل ۵-۲۳: ارتباط بین میزان رطوبت محتوی و نرخ خودسوزی R₇₀
- شکل ۵-۲۴: ارتباط بین میزان رطوبت محتوی و روش CPT
- شکل ۵-۲۵: گروه‌های تقریبی برای سه گروه اصلی از ماسرال‌ها

عنوان

شماره صفحه

- شکل ۲۶-۵: ارتباط بین میزان ویتربینیت محتوی و نرخ خودسوزی R70
- شکل ۲۷-۵: ارتباط بین میزان ویتربینیت محتوی و روش CPT
- شکل ۲۸-۵: ارتباط بین میزان لیپتینیت محتوی و نرخ خودسوزی R70
- شکل ۲۹-۵: ارتباط بین میزان لیپتینیت محتوی و روش CPT
- شکل ۳۰-۵: ارتباط بین میزان اینرتینیت محتوی و نرخ خودسوزی R70
- شکل ۳۱-۵: ارتباط بین میزان اینرتینیت محتوی و روش CPT
- شکل ۳۲-۵: نمودار سه بعدی ارتباط بین R70 در مقابل ویتربینیت و لیپتینیت
- شکل ۳۳-۵: نمودار سه بعدی ارتباط بین R70 در مقابل ویتربینیت و اینرتینیت
- شکل ۳۴-۵: نمودار سه بعدی ارتباط بین R70 در مقابل لیپتینیت و اینرتینیت
- شکل ۳۵-۵: نمودار سه بعدی ارتباط بین CPT در مقابل ویتربینیت و لیپتینیت
- شکل ۳۶-۵: نمودار سه بعدی ارتباط بین CPT در مقابل ویتربینیت و اینرتینیت
- شکل ۳۷-۵: نمودار سه بعدی ارتباط بین CPT در مقابل لیپتینیت و اینرتینیت
- شکل ۳۸-۵: ارتباط بین خاکستر محتوی نمونه های زغال سنگ و شاخص R70
- شکل ۳۹-۵: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و نرخ خودسوزی R70
- شکل ۴۰-۵: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و روش CPT
- شکل ۴۱-۵: طرز قرارگیری گاز در لایه های زغال سنگ
- شکل ۴۲-۵: تأثیر مواد فرار در خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطع
- شکل ۴۳-۵: ارتباط بین میزان مواد فرار و نرخ خودسوزی R70
- شکل ۴۴-۵: ارتباط بین میزان مواد فرار و روش CPT
- شکل ۴۵-۵: ارتباط بین میزان مواد فرار و جذب اکسیژن
- شکل ۴۶-۵: ارتباط بین سطح مخصوص زغال سنگ و دمای ناشی از خودسوزی
- شکل ۴۷-۵: ارتباط بین میانگین اندازه ذرات و نرخ خودسوزی R70
- شکل ۴۸-۵: ارتباط بین میانگین اندازه ذرات و روش CPT
- شکل ۴۹-۵: ارتباط بین درزه و شکستگی های موجود در نمونه زغال سنگ و تأثیر آن بر جذب اکسیژن و خودسوزی
- شکل ۵۰-۵: ارتباط بین اندازه ذرات زغال سنگ و تأثیر آن بر جذب اکسیژن و خودسوزی
- شکل ۵۱-۵: ارزیابی ارتباط بین دو روش آزمایشگاهی R70 و CPT
- شکل ۵۲-۵: پارامترهای اولیه انتخاب شده برای توسعه مدل های ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه های زغال سنگ
- شکل ۵۳-۵: مقادیر C ، $T+C$ ، $I-C$ پارامترها در ماتریس روابط کلی (ماتریس T)
- شکل ۵۴-۵: نمونه ای از نمودار علی
- شکل ۵۵-۵: نمودار علی پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه های زغال سنگ با استفاده از روش DEMATEL
- شکل ۵۶-۵: ساختار شبکه ای پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی لایه های زغال سنگ
- شکل ۵۷-۵: تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی
- شکل ۵۸-۵: نمودار علت-اثر پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی لایه های زغال سنگ
- شکل ۵۹-۵: نمودار $C-E/C+E$ هر پارامتر
- شکل ۶۰-۵: تفاوت وزن پارامترها در روش های DEMATEL و FRES
- شکل ۶۱-۵: پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه های زغال سنگ
- شکل ۶۲-۵: بازبندی شاخص قابلیت خودسوزی لایه های زغال سنگ بر اساس CSCSi
- شکل ۶۳-۵: برازش منحنی خطی بر روی مراکز طبقه بندی ارائه شده بر اساس CSCSi
- شکل ۶۴-۵: تغییرات CPT نسبت به CSCSi
- شکل ۶۵-۵: تغییرات R70 نسبت به CSCSi
- شکل ۶۶-۵: پراکندگی داده ها و تعیین جهات مؤلفه های اصلی
- شکل ۶۷-۵: نمودار Scree پارامترها برای تعیین تعداد بهینه مؤلفه ها
- شکل ۶۸-۵: طرح اجزا در فضای چرخشی
- شکل ۶۹-۵: مقایسه مقادیر پیش بینی شده از مدل های کمی با مقادیر اندازه گیری شده خودسوزی لایه های زغال سنگ ...
- شکل ۷۰-۵: مقایسه مقادیر پیش بینی شده از مدل های کمی با مقادیر اندازه گیری شده خودسوزی لایه های زغال سنگ ...

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

در جهان امروز اقتصاد را می‌توان یکی از مهم‌ترین عوامل استقلال و پیشرفت کشورها قلمداد کرد. اگرچه از دیرباز توسعه اقتصادی و بهبود وضع زندگی از اهداف مهم بشر بوده‌اند، اما اینک به اهداف پایه‌ای تبدیل شده‌اند. بدین معنا که اقتصاد قوی‌تر در یک کشور هم باعث ارتقای سطح زندگی افراد آن کشور می‌شود و هم رسیدن به بسیاری از هدف‌های دیگر را برای آنان آسان‌تر می‌کند.

رشد و رقابت روزافزون کشورها در ابعاد اقتصادی و صنعتی، دنیای امروز را به تکاپوی جدی برای دستیابی به تولید انرژی بیشتر و متعاقباً مصرف آن سوق داده است. از این‌رو تمرکز کشورهای توسعه یافته و همچنین کشورهای در حال توسعه بر روی پیشرفت در تولید انواع انرژی اعم از هسته‌ای، انرژی‌های نو و همچنین تجدیدپذیر و متعاقب آن پیشرفت در صنعت و افزایش ظرفیت واحدهای مختلف صنعتی برای مصرف آن است. با وجود این تلاش‌ها، سوخت‌های فسیلی هنوز هم یکی از مهم‌ترین ارکان سبد انرژی جهانی به حساب می‌آیند.

زغال‌سنگ قدیمی‌ترین، فراوان‌ترین و یکی از مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی در جهان محسوب می‌شود و با توجه به ذخایر فراوان، گستردگی بسیار در سطح دنیا و هزینه نسبتاً اندک هنوز هم کانون توجه در تولید انرژی جهان است.

با توجه به اهمیت ذکر شده برای این ماده معدنی، در معدنکاری زغال‌سنگ تمرکز عمده بر روی سه هدف عمده تولید بالا، هزینه تمام شده کمتر و استخراج ایمن است که این امر جز از طریق شناخت دقیق روش‌ها و فرآیندهای تولید و پیشرفت فناوری در این حوزه میسر نمی‌شود.

صنعت زغال‌سنگ شامل مراحل اکتشاف، استخراج، تولید محصولات قابل مصرف و مرحله بهره‌گیری از آن‌ها (چه برای مصرف داخلی و چه برای صادرات) است. در این بین سهم عمده‌ای از افزایش تولید و هزینه‌ها و در نتیجه قیمت محصول، به مرحله استخراج وابسته است. با اینکه استخراج زغال‌سنگ هم از روش‌های سطحی و هم زیرزمینی میسر است اما درصد بالایی از استخراج زغال‌سنگ در جهان از معادن زیرزمینی انجام می‌شود.

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 بد نام 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.

خطرات ناشی از استخراج زغال‌سنگ یکی از عوامل محدودکننده طراحی در معادن زیرزمینی محسوب می‌شود (اصلولو، ۱۳۷۸). از مهم‌ترین خطرات ناشی از استخراج زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی می‌توان به نشست سطح زمین^۱، انفجار خود به خودی سنگ^۲، خودسوزی زغال‌سنگ^۳، ناپایداری سقف^۴، گازخیزی، تصاعد آبی^۵، هجوم آب‌های زیرزمینی^۶، آلودگی محیط‌زیست و غیره اشاره کرد (عطائی، ۱۳۹۰)؛ لذا ضرورت دارد این خطرات به طور دقیق شناسایی و راه‌های پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل آن‌ها ارزیابی شوند تا به ارزیابی جامعی از وضعیت معادن زغال‌سنگ دست یافته شود. به همین دلیل در این رساله به بررسی خطر خودسوزی زغال‌سنگ در لایه‌های زغال‌سنگ معادن زیرزمینی پرداخته شده است.

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 خودسوز بودن زغال‌سنگ 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 طبقه‌بندی کرد:

الف) مشخصات ذاتی زغال‌سنگ

¹- Subsidence

²- Rock Burst

³- Coal Spontaneous Combustion

⁴- Roof Instability

⁵- Outburst

⁶- Groundwater Inrush

ب) مشخصات زمین‌شناسی

ج) مشخصات معدنکاری

از میان سه 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 زغال‌سنگ را پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل کرد.

۱-۲- سؤال‌های اصلی تحقیق

به طور کلی مهم‌ترین سؤال‌های این تحقیق را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

- بهترین روش یا روش‌های آزمایشگاهی که در حقیقت نمایش کمی قابلیت خودسوزی لایه‌های

زغال‌سنگ است، چیست؟ و آیا می‌توان نتایج روش‌های مختلف را با هم مقایسه کرد؟

- آیا می‌توان بین نتایج حاصل از روش یا روش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش رابطه

ریاضی برقرار کرد؟

- از میان پارامترهای مؤثر موجود بر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ کدام یک از پارامترها دارای

بیشترین تأثیر و اهمیت در فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ هستند؟

- نقش و تأثیر هر یک از پارامترهای شناسایی شده روی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ چگونه و چقدر

است و تغییرات آن‌ها چگونه بر قابلیت خودسوزی لایه‌ها اثر می‌گذارد؟ همچنین اندرکنش بین هر یک از

آن‌ها با یکدیگر چگونه است؟ و آیا عدم هم‌پوشانی میان پارامترها رعایت شده است؟

- مناسب‌ترین روش برای ارائه یک سیستم طبقه‌بندی قابلیت خودسوزی لایه زغال‌سنگ با توجه به

نواقص و شرایط موجود چه ویژگی‌هایی باید داشته باشد؟

- آیا می‌توان تمامی پارامترهای مؤثر را به صورت یک اندیس برای ارزیابی کیفی پیش‌بینی قابلیت

خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ ارائه کرد؟

- چگونه می‌توان یک اندیس کمی برای ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ ارائه کرد که

در آن همه شرایط ممکن لحاظ شده باشد؟

- آیا نتایج هریک از مدل‌های ارائه شده قابل اطمینان هستند؟

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

زغال‌سنگ به عنوان منبع اصلی انرژی در انقلاب صنعتی بوده و با پیشرفت فناوری در این خصوص با وجود آلاینده‌گی 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؛ لذا شناسایی دقیق منابع و ذخایر زغال‌سنگ با مطالعات پتانسیل سنجی، ارزیابی خطرات پیش روی آن، بهینه‌سازی و ارتقای فناوری صنایع مبتنی بر زغال‌سنگ، از مرحله‌ی استخراج تا فرآوری و صادرات فرآورده‌های آن امری اجتناب‌ناپذیر است. 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 فناوری‌های نوین و سایر امکانات موجود مخاطرات را به حداقل ممکن رسانید.

یکی از مخاطراتی که میزان آن در معادن زغال‌سنگ جهان به میزان قابل توجهی رخ می‌دهد، «خطر خودسوزی زغال‌سنگ» است. تمامی معادن زغال‌سنگ در یک درجه از خودسوزی قرار ندارند، بنابراین ارزیابی خطر خودسوزی یک نیاز اصلی و اولیه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت خودسوزی برای معادن زغال‌سنگ است؛ لذا بهره‌گیری از روش‌های مؤثری که موجبات پیش‌بینی و پیش‌گیری از خطر خودسوزی در معادن زغال‌سنگ را فراهم آورد امری اجتناب‌ناپذیر و ضروری تلقی می‌شود.

فرآیند خودسوزی به دلیل تأثیر مستقیم بر حفظ ایمنی محیط استخراجی و نیز وابستگی مسائل متعددی به کیفیت آن، باید در مرحله طراحی با دقت مورد بررسی قرار گیرد؛ بنابراین پیش‌بینی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ مرحله‌ای اساسی و بنیادی در طراحی و پس از آن در استخراج است. با وجود

مطالعات گسترده در این حوزه، مدل جامعی برای پیش‌بینی قابلیت خودسوزی لایه‌ها هم به صورت کمی و هم به صورت کیفی که دربرگیرنده پارامترهای مؤثر باشد، وجود ندارد؛ لذا با توجه به تمامی مطالب مذکور، ضرورت ارائه یک اندیس جدید برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ به خوبی مشخص می‌شود.

بنابراین هم از منظر اهمیت برای کشور و هم از لحاظ دیدی به وسعت فراگیری این روش در سراسر جهان، مطالعه در زمینه قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ، امری ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به این مطالب به طور خلاصه ضرورت انجام این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- اهمیت زغال‌سنگ در حوزه انرژی و صنعت و لزوم جلوگیری در از بین رفتن آن بر اثر خودسوزی.
- وجود ذخایر قابل توجه زغال‌سنگ در کشور و نیاز به افزایش ظرفیت‌ها و بومی‌سازی دانش و فناوری در حوزه خودسوزی زغال‌سنگ.

- نقش اساسی و بنیادین فرآیند خودسوزی و پیش‌بینی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ در مراحل طراحی و استخراج تا انباشت و مصرف آن.

- با وجود گستردگی و پراکندگی مطالعات، عدم وجود یک مدل ارزیابی کمی و کیفی که شامل تمامی پارامترهای مؤثر در زمینه قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ باشد.

با توجه به جایگاه ایران در زمینه ذخایر زغال‌سنگ، هنوز مطالعات دقیق و گسترده‌ای برای ارتقاء سطح علمی و فناوری‌های مرتبط با موضوع خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ در کشور انجام نگرفته است و تنها به بومی کردن و استفاده از فناوری کشورهای دیگر بسنده شده است؛ لذا با توجه به توضیحات و موارد ذکر شده، انجام مطالعات خودسوزی برای اولین بار در کشور لازم و ضروری است.

۱-۴- اهداف تحقیق

هدف نهایی و کلی این تحقیق ارائه مدل‌های ارزیابی کمی و کیفی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس مشخصات ذاتی زغال‌سنگ است. برای این منظور، در این پژوهش موارد زیر دنبال می‌شود:

- ساخت یک دستگاه آزمایشگاهی برای تعیین قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس مشخصات ذاتی زغال‌سنگ.

- شناسایی دسته عوامل مؤثر بر قابلیت خودسوزی لایه‌ها و بررسی اندرکنش آن‌ها با یکدیگر و چگونگی تغییرات و تأثیرات آن‌ها بر قابلیت خودسوزی.

- ارائه یک سیستم طبقه‌بندی بر اساس روش‌های علمی برای ارزیابی کیفی قابلیت خودسوزی لایه‌ها با استفاده از تعداد بهینه پارامترهای مؤثر.

- توسعه یک اندیس کمی با توجه به نقش پارامترهای مختلف و تأثیر تغییراتشان.

۱-۵- فرض‌های تحقیق

با توجه به روند آزمایشگاهی بودن تحقیق، فرض‌های وارد به این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- اندازه‌گیری و ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس مشخصات ذاتی و ماسرال

شناسی لایه زغال‌سنگ بر اساس دو روش آزمایشگاهی نرخ گرمایش خود به خودی R_{70}^y و روش دمایی نقطه تقاطع (CPT^8) که این دو روش در یک دستگاه جدید آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است.

- معادن مورد مطالعه در این تحقیق شامل مجموعه معادن شرکت زغال‌سنگ طبس، البرز شرقی،

کرمان و البرز مرکزی خواهد بود.

- تعداد نمونه مورد آزمایش در این تحقیق ۶۴ عدد است که از این تعداد ۵۱ عدد برای آموزش و ۱۳

عدد برای اعتبارسنجی استفاده شد.

۱-۶- ساختار رساله

به طور کلی مطالب مندرج در این تحقیق در شش فصل به شرح ذیل سازماندهی و تدوین شد.

⁷- Rate 70

⁸- Crossing Point Temperature

در **فصل اول** که فصل جاری است به کلیات رساله پرداخته شده است. در این فصل پس از بیان مسئله رساله، سؤال‌های تحقیق، ضرورت و اهداف آن تشریح و سپس فرض‌های تحقیق بیان شد.

در **فصل دوم** سعی شد تا به بررسی و شناخت مکانیسم خودسوزی زغال‌سنگ به صورت کامل پرداخته شود.

در **فصل سوم** سابقه علمی موضوع رساله به صورت کامل مرور شده و خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته، روابط و طبقه‌بندی‌های ارائه شده در این فصل آورده شده است و در قسمت انتهایی این فصل مطالعات قبلی مورد بررسی و نقد قرار گرفته‌اند.

در **فصل چهارم** مواد، روش تحقیق، مراحل ساخت دستگاه آزمایش خودسوزی زغال‌سنگ و در نهایت پایگاه داده فراهم شده برای این رساله تشریح شده است.

در **فصل پنجم** به عنوان فصل کلیدی رساله، پارامترهای مختلف مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ به صورت کلی بیان و پارامترهای ذاتی به تفصیل بیان شده است. پس از شناسایی و تعیین مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترهای ذاتی، مراحل ارائه مدل‌های کیفی و کمی همراه با ارزیابی آن‌ها به تفصیل و به صورت گام به گام ارائه و تشریح شده است و شاخص‌های جدیدی با استفاده از مطالعات آماری برای پیش‌بینی و ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ ارائه شده است.

در **فصل ششم** به بررسی نتایج حاصل شده از تحقیق و پیشنهادهایی نیز در راستای ارتقاء تحقیقات آینده ارائه شده است.

فصل دوم

مکانیسم خودسوزی زغال سنگ

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 است و به عنوان منبع اصلی انرژی در بسیاری از نقاط جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. زغال‌سنگ فراوان‌ترین سوخت فسیلی در جهان است که در حدود ۴۰ درصد از الکتریسیته جهان از آن تأمین می‌شود (IEA Clean Coal Centre, 2010).

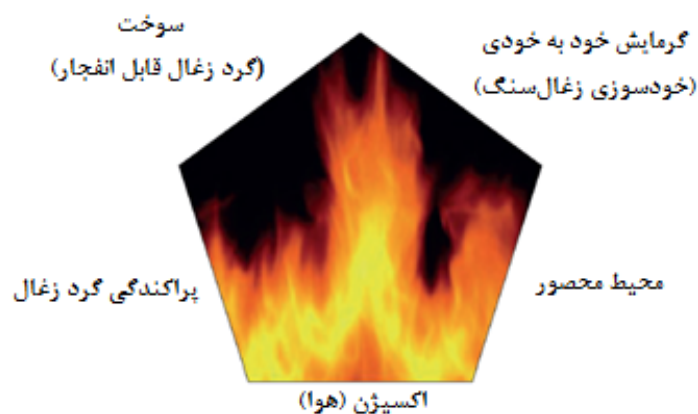
اگرچه ذخایر زغال‌سنگ به طور گسترده‌ای در سراسر جهان توزیع شده است، اما ۶۰ درصد از ذخایر قابل استخراج در سه کشور ایالات متحده آمریکا (۲۵ درصد)، اتحاد جماهیر شوروی سابق (۲۳ درصد) و چین (۱۲ درصد) قرار گرفته است. استرالیا، هند، آلمان و آفریقای جنوبی در مجموع ۲۹ درصد از ذخایر قابل استخراج زغال‌سنگ را در خود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

استخراج زغال‌سنگ در جهان به دو 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 بد نام 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 (صفاری، ۱۳۹۲).

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 زغال‌سنگ می‌تواند در لایه‌های زغال‌سنگ (در معادن زیرزمینی و روباز)، در حین صادرات و نقل و انتقالات آن، در محل انباشتگاه‌های زغال‌سنگ یا در محل انباشتگاه‌های باطله آن در سطح زمین اتفاق بیفتد. آتش‌سوزی زغال‌سنگ ممکن است به طور خود به خود تحت شرایط معینی رخ دهد. در پاره‌ای دیگر از آتش‌سوزی‌ها، جرقه و سهل‌انگاری کارکنان باعث ایجاد آتش‌سوزی می‌شود (Sinha, 1986; Ashton Coal Project, 2014). خودسوزی زغال‌سنگ اصلی‌ترین دلیل آتش‌سوزی در معادن و صنایع

وابسته به زغال‌سنگ در جهان است (Mahadevan and Ramlu, 1985).

آتش‌سوزی‌های معادن زیرزمینی، به مراتب جدی‌تر و خطرناک‌تر از آتش‌سوزی‌های سطحی هستند زیرا گرما و محصولات ناشی از احتراق، در محیط محصور جمع می‌شوند؛ بنابراین به مخاطره افتادن جان افرادی که در چنین محیط‌های محصور کار می‌کنند، افزایش می‌یابد و از سوی دیگر، خطر انفجار در هوای معدن نیز وجود دارد (مدنی، ۱۳۷۳). در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ، بدترین حالت زمانی رخ می‌دهد که خودسوزی زغال‌سنگ در حضور اتمسفر قابل انفجار صورت بگیرد که ممکن است خطر خودسوزی تبدیل به انفجار شود و تمام معدن را درگیر کند (شکل ۱-۲). همان‌طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود حذف هر یک از این اضلاع باعث جلوگیری از انفجار گرد زغال می‌شود اما الزاماً مانع خودسوزی زغال‌سنگ نمی‌شود.



شکل ۱-۲: پنج ضلعی انفجار گرد زغال ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ (Industrial Fire Prevention, 2015).

همان‌طور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود خودسوزی زغال‌سنگ در بسیاری از کشورهای تولیدکننده زغال‌سنگ از قبیل استرالیا، اندونزی، انگلستان، اوکراین، ایالات متحده آمریکا، آفریقای جنوبی، آلمان، تایلند، ترکیه، جمهوری چک، چین، روسیه، کانادا، لهستان، هند و غیره رایج است.

^۱ - Pentagon



شکل ۲-۲: خودسوزی زغال سنگ در مناطق مختلف جهان (Avila, 2012).

۲-۲- انواع آتش سوزی در معادن

آتش یک فعل و انفعال شیمیایی است که در آن کلیه مواد سوختنی با اکسیژن هوا ترکیب شده و تولید گرما می‌کند. به طور کلی آتش سوزی‌های ایجاد شده در معادن بر حسب منشأ به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از:

الف- آتش سوزی باز یا آتش سوزی با منابع خارجی

ب- آتش سوزی داخلی (بسته) یا خودسوزی (اکسیداسیون- گرمایش خود به خودی)

۲-۲-۱- آتش سوزی باز

آتش سوزی باز عبارت است از سوختن اشیاء و لوازم مختلف موجود در معدن یا هر جای دیگر که از طریق منابع گرمایی خارجی اتفاق می‌افتد. این نوع آتش سوزی در معادن عمدتاً ممکن است بر اثر یکی از عوامل زیر رخ دهد:

- ایجاد جرقه‌های الکتریکی در اثر وضعیت نادرست تجهیزات برقی و عایق کاری آنها

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

- استفاده از مواد منفجره غیرمجاز

- جوشکاری و تخلیه الکتریسیته ساکن

- انفجار گرد زغال و یا گاز متان
- مالش، اصطکاک و داغ شدن سطوح متحرک مانند نوار نقاله و سیم بکسل با قرقره‌ها
- انواع مکان‌های آتش‌سوزی‌های باز در معدن عبارت‌اند از:
 - آتش‌سوزی در سیستم نوار نقاله
 - آتش‌سوزی در ایستگاه توزیع برق
 - آتش‌سوزی وسایل حمل و نقل در دهانه‌ی ورودی گالری و گالری تهویه
 - آتش‌سوزی وسایل و تجهیزات کارگاه
 - آتش‌سوزی در گالری‌هایی که تهویه کمکی انجام می‌گیرد
 - آتش‌سوزی در اماکن بالای چاه‌های قائم^۱ و تونل مورب
 - آتش‌سوزی در پذیرش‌گاه‌ها و سلول‌های کناری آن‌ها
 - آتش‌سوزی در دنبال لایه‌ها^۲، عمود بر لایه‌ها و سایر حفریات افقی
 - آتش‌سوزی در دوپل‌ها^۳ و دیگر حفریات شیب‌دار

۲-۲-۲- آتش‌سوزی داخلی (بسته) یا خودسوزی

خودسوزی زغال‌سنگ، 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 آتش‌سوزی بزرگ که ممکن است کل معدن را در برگیرد متغیر است. به منظور متمایز شدن خودسوزی از آتش‌سوزی باز، وقوع آن را با عنوان «گرمایش» یا «احتراق خود به خودی» بیان می‌کنند (مدنی، ۱۳۷۳).

^۱ - Shaft
^۲ - Drift
^۳ - Raise

خودسوزی زغال سنگ که اصطلاحاً به آن "Coal Self-heating"، "Coal Self-ignition" یا "Coal Spontaneous Combustion" می‌گویند به معنای گرمایش زغال سنگ و شروع یک فرآیند اکسیداسیون خود گرمایشی^۱ گرمازا و به دنبال آن افزایش دما و در نتیجه ایجاد یک آتش‌سوزی خود به خودی بدون استفاده از منابع گرمایی خارجی اضافی است (Deng et al., 2015).

خودسوزی زغال سنگ زمانی اتفاق می‌افتد که زغال سنگ در معرض هوا در دماهای پایین قرار می‌گیرد. واکنش بین زغال سنگ و هوا یک فرآیند جامد-گاز است. در این فرآیند اکسیژن با سطح زغال سنگ واکنش می‌دهد (Nelson and Chen, 2007). دمای زغال سنگ به علت فرآیند اکسایش افزایش پیدا می‌کند تا اینکه به یک دمای پایدار موقت می‌رسد؛ در این دما، گرمای تولید شده ناشی از اکسایش صرف تبخیر رطوبت موجود در زغال سنگ می‌شود. پس از آنکه تمام رطوبت موجود در زغال سنگ تبخیر شد، دمای زغال سنگ به سرعت و به صورت نمائی افزایش پیدا می‌کند (IEA Clean Coal Centre, 2010).

این پدیده یکی از مهم‌ترین مشکلات در معادن زیرزمینی، معادن روباز، معادن قدیمی و متروکه، در قبل، حین و بعد از استخراج، در نواحی تخریب شده^۲، انباشت و ذخیره‌سازی زغال سنگ (در معادن، نیروگاه‌ها و بندرهای ساحلی)، حمل و نقل زغال سنگ مخصوصاً حمل و نقل‌های دریایی و در مکان‌های دفع باطله‌های حاصل از استخراج و صنایع مرتبط است و در هیچ کدام از این حالات خودسوزی زغال سنگ به آسانی قابل تشخیص نیست (Nelson and Chen, 2007; Mohalik et al., 2009 a; Wang and Luo, 2011; Ashton Coal Project, 2014).

این فرآیند تأثیرات فراوان و پیامدهای شدیدی در هدر رفت ذخایر زغال سنگ، ایمنی کارکنان، توقف عمده در تولید، کاهش انرژی ویژه زغال سنگ، خسارت به زیرساخت‌ها، از بین رفتن پوشش گیاهی، کاهش کیفیت هوا، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرهای دراز مدت در بازسازی معادن دارد (Nelson and Chen, 2007; Wang and Luo, 2011; Ashton Coal Project, 2014).

^۱- Self-Heating

^۲- Goaf

پدیده خودسوزی زغال سنگ باعث ۱۵ اتفاق از تعداد ۸۷ آتش سوزی معدنی گزارش شده در معادن زیرزمینی زغال سنگ کشور آمریکا در طی سال های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ بود (DeRosa, 2004; Yuan and Smith, 2010).

در استرالیا در ایالت New South Wales تعداد ۱۲۵ حادثه خودسوزی زغال سنگ در طی سال های ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۹ در معادن زغال سنگ آن به وقوع پیوست (Wang et al., 2003 a). در معادن زغال سنگ Ostrava-Karvina (OKD) در جمهوری چک ۱۰۵ حادثه خودسوزی زغال سنگ در طی سال های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲ اتفاق افتاد (Taraba et al., 2006; Taraba and Michalec, 2011).

از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ تعداد ۳۲ مورد آتش سوزی و انفجار گاز ناشی از خودسوزی زغال سنگ در معادن زیرزمینی زغال سنگ کشور چین رخ داده است که منجر به کشته شدن ۶۱۴ معدنچی شده است. بدترین میزان تلفات در سال ۲۰۱۳، حادثه انفجار گاز در معدن زغال سنگ Babao در استان Jilin در کشور چین اتفاق افتاد که منجر به کشته شدن ۵۳ نفر شد که دلیل اصلی آن خودسوزی زغال سنگ که منجر به انفجار گاز متان شد، است (Liu & Qin, 2017).

در سال ۲۰۱۴ حادثه خودسوزی زغال سنگ در معدن روباز Meandu در ایالت کوئینزلند کشور استرالیا رخ داد (Beamish et al., 2018).

برخی از مهم ترین وقایع خودسوزی ثبت شده طی سال های ۱۹۷۲ تا ۲۰۰۶ میلادی در جدول ۱-۲ آورده شده است.

چنانچه گفته شد، خودسوزی زغال سنگ دارای نتایج جدی و منفی در اقتصاد، پیامدهای زیان آور زیست محیطی و هزینه های ناخواسته در مشکلات سلامتی و حتی در بعضی موارد مرگ کارکنان را دارد (IEA Clean Coal Centre, 2010). برای جلوگیری از این قبیل رخدادهای ناخواسته و زیان آور باید مکانیسم خودسوزی زغال سنگ شناسایی شود که توضیح جامع و کاملی از مکانیسم

خودسوزی زغال سنگ در بخش ۲-۳ آورده شده است. درک بهتر در مورد پدیده خودسوزی زغال سنگ می تواند کمک بزرگی در خصوص برنامه ریزی و مدیریت در معدنکاری زغال سنگ ایفا کند.

جدول ۱-۲: خلاصه ای از برخی از مهم ترین وقایع خودسوزی ثبت شده طی سال های ۱۹۷۲ تا ۲۰۰۶ میلادی (Grubb, 2008; Marts, 2015).

سال	کشور	معدن	پیامد
۱۹۷۲	استرالیا	Box Flats	۱۸ کشته
۱۹۷۵	استرالیا	Kianga	۱۳ کشته
۱۹۹۱	استرالیا	Ulan	از بین رفتن ۶۰ میلیون دلار
۱۹۹۴	استرالیا	Moura No. 2	۱۱ کشته
۱۹۹۷	آمریکا	Galatia	از بین رفتن ۳۸ میلیون دلار
۱۹۹۷-۱۹۹۸	استرالیا	North Goonyella	از بین رفتن پهنه جبهه کار طولانی
۱۹۹۹	آمریکا	Sanborn Creek	بسته شدن معدن به مدت ۹ ماه
۲۰۰۰	آمریکا	West Elk	از بین رفتن ۵۰ میلیون دلار
۲۰۰۳	استرالیا	Southland	بسته شدن معدن
۲۰۰۶	استرالیا	Dartbrook	بسته شدن معدن

۲-۳- مکانیسم خودسوزی زغال سنگ

خودسوزی زغال سنگ مهم ترین علت آتش سوزی و یکی از خطرات اجتناب ناپذیر در معادن زغال سنگ و در صنایع وابسته به زغال سنگ در سراسر جهان است. خودسوزی زغال سنگ تقریباً در هر مرحله ای از زنجیره زغال سنگ می تواند رخ دهد (Sasaki et al., 2014).

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

اگر یک لایه زغال سنگ دچار خودسوزی شود و اقدامات پیشگیرانه در مراحل اولیه با شکست مواجه شوند، سوختن لایه بسته به حجم ذخیره و میزان اکسیژن موجود ممکن است که ده ها یا حتی صدها سال به طول انجامد؛ که برای پیشگیری از این نتایج باید درک درستی از مجموعه مراحل منجر به خودسوزی زغال سنگ و مجموعه عوامل شتاب دهنده در این زمینه وجود داشته باشد تا مخاطرات این اتفاق توسط کنترل مجموعه فرآیندها و عوامل تأثیرگذار در خودسوزی زغال سنگ کاهش و به

حداقل مقدار ممکن برسد (Nelson and Chen, 2007; Mohalik et al., 2009 a)؛ لذا در ادامه به تشریح مکانیسم خودسوزی پرداخته شده است.

هر آتش‌سوزی نیاز به سه عنصر اصلی دارد تا به وقوع بپیوندد که اصطلاحاً به «مثلث آتش»^۱ معروف است. این سه عنصر تشکیل‌دهنده مثلث آتش اکسیژن، گرما (جرقه) و سوخت هستند (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳: مثلث آتش (Huw et al., 2003).

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

فرآیند اکسیداسیون زغال‌سنگ یک فرآیند پیچیده است که مجموعه مراحل تشکیل آن هنوز به طور کامل شناسایی نشده است. ماهیت خودسوزی زغال‌سنگ یک فرآیند گرمای فعال غیرخطی است که اکسیداسیون دما پائین زغال‌سنگ منبع اولیه گرمایش و به اصلاح مرحله شروع کننده خودسوزی است (Qi et al., 2013). در این خصوص چندین محقق به بررسی این پدیده پرداخته‌اند که خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در خصوص مکانیسم اکسیداسیون و خودسوزی زغال‌سنگ در جدول ۲-۲ آورده شده است.

^۱ - Fire Triangle

جدول ۲-۲: خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با مکانیسم اکسیداسیون و خودسوزی زغال سنگ.

محقق (سال انتشار)	توضیح مختصر
Marinov (1977 a, b, c)	بررسی مکانیسم واکنش بین زغال سنگ با اکسیژن.
Gethner (1985)	بررسی فرآیند شیمیایی و گرمایی اکسیداسیون زغال سنگ در دماهای پایین.
Kaji et al. (1985)	بررسی اکسیداسیون دما پایین زغال سنگ بر اساس نرخ مصرف اکسیژن در زغال سنگ‌های ساب‌بیتومینه تا آنتراسیت.
Gethner (1987 a)	بررسی مکانیسم اکسیداسیون زغال سنگ در دماهای پایین توسط اکسیژن.
Gethner (1987 b)	مطالعه سینتیک اکسیداسیون زغال سنگ در دماهای پایین.
Clemens et al. (1991)	بررسی اکسیداسیون دما پایین در زغال سنگ‌های نیوزیلند.
Grewer (1994)	بررسی واکنش‌های شیمیایی اکسیداسیون زغال سنگ.
Kudynska & Buckmaster (1996)	بررسی سینتیک اکسیداسیون دما پایین در زغال سنگ‌های بیتومینه با مواد فرار زیاد ^۱ .
Lopez et al. (1998)	بررسی تأثیر اکسیداسیون دما پایین زغال سنگ در توانایی انتقال هیدروژن.
Wang et al. (2003 a)	بررسی و مدل‌سازی مکانیسم اکسیداسیون زغال سنگ در دماهای پایین بر اساس مصرف اکسیژن.
Wang et al. (2008)	بررسی تئوری زنجیره‌های شیمیایی ایجاد شده در اکسیداسیون زغال سنگ.
Sasaki & Sugai (2011)	ارائه فرآیند شماتیک خودسوزی زغال سنگ و نیز بررسی زمان در معرض اکسیداسیون معادل (EOE ^۲) برای خودسوزی زغال سنگ در دماهای پائین.

از بهترین این تعاریف می‌توان به ارائه مکانیسم خودسوزی توسط Grewer در سال ۱۹۹۴

اشاره کرد که در ادامه آورده شده است.

خودسوزی زغال سنگ یک فرآیند خود گرمایشی، گرمازا است که بر اثر اکسیداسیون زغال سنگ بدون هیچ‌گونه منبع حرارتی خارجی اتفاق می‌افتد و باعث افزایش دمای زغال سنگ و از هم‌پاشیدگی و تنزل مشخصات شیمیایی و فیزیکی زغال سنگ می‌شود و بخش یا کل زغال سنگ غیر قابل مصرف می‌شود و شرایط لازم برای استفاده را ندارد. در صورت ادامه روند افزایش دمای زغال سنگ، آتش‌سوزی زغال سنگ در سطح وسیع رخ می‌دهد (Grewer, 1994).

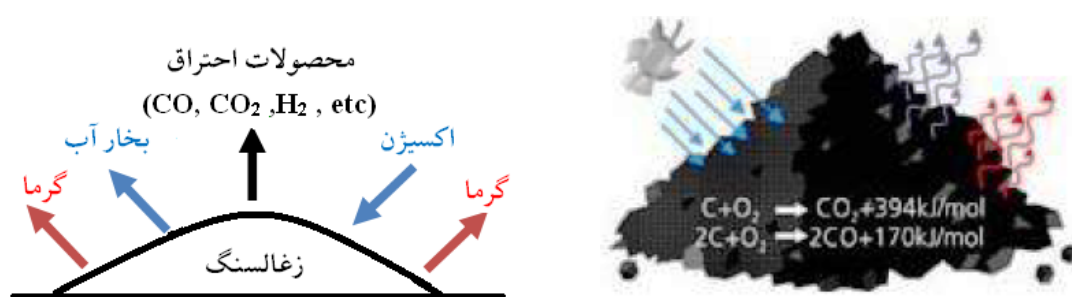
معمولاً خودسوزی زغال سنگ زمانی اتفاق می‌افتد که تعادل گرمایی بین دو اثر متقابل از بین برود. منظور از تعادل گرمایی، آزادسازی گرمای ناشی از واکنش‌های اکسایشی و دور شدن و از بین

^۱ - High Volatile Bituminous

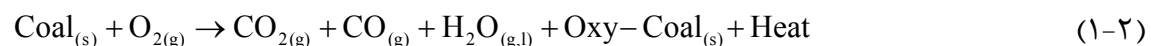
^۲ - Equivalent Oxidation Exposure- Time

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).

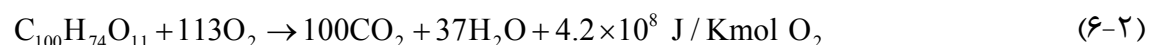
تقریباً تمام انواع زغال‌سنگ‌ها در تماس با اکسیژن موجود در هوا اکسید شده و نشانه‌هایی از هوازگی را از خود نشان می‌دهند که نتیجه آن کاهش ارزش حرارتی زغال‌سنگ و آزادسازی میزان قابل توجهی گاز و گرما است که در شکل ۲-۴ و معادلات شیمیایی ۱-۲ تا ۵-۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۴: چگونگی شکل‌گیری پدیده گرمایش خود به خودی زغال‌سنگ (Grewer, 1994).



یا به طور کلی این مجموع مراحل را می‌توان به صورت معادله ۲-۶ نشان داد.



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 خود به خودی زغال‌سنگ اتفاق می‌افتد که عبارت‌اند از

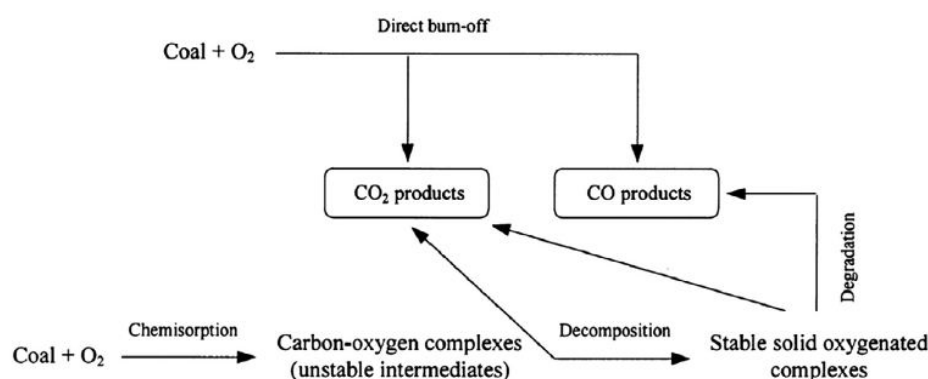
(شکل ۲-۵) (Grewer, 1994; Mohalik et al, 2009 a; Yuan and Smith, 2012).

- جذب سطحی یا فیزیکی یا برآشامی^۱ اکسیژن (شکل ۲-۶-الف).

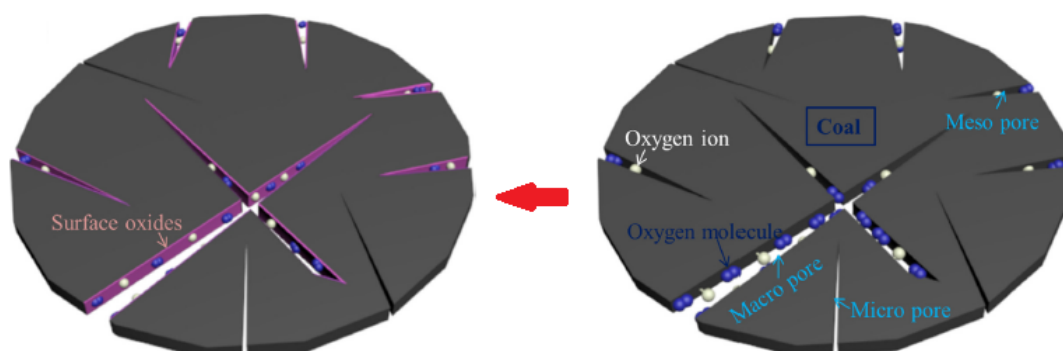
- جذب شیمیایی یا درآشامی^۲ اکسیژن که باعث تشکیل ترکیب‌های زغال‌سنگ و اکسیژن می‌شود (شکل ۲-۶-ب).

- واکنش شیمیایی^۳ و اکسیداسیون زغال‌سنگ که باعث تجزیه ترکیب‌های زغال‌سنگ و اکسیژن تشکیل یافته از مرحله قبل می‌شود و نتیجه آن آزادسازی و تولید گازهایی از قبیل مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن (CO₂)، بخار آب (H₂O) و غیره می‌شود.

در شکل ۲-۷ مراحل مختلف اکسیداسیون و خودسوزی زغال‌سنگ به صورت خلاصه نشان داده شده است. در شکل ۲-۸ نیز نمایی از فرآیندهای اکسیداسیون زغال‌سنگ نشان داده شده است. در شکل ۲-۹ نیز تصویر میکروسکوپی از حفرات موجود در ذرات زغال‌سنگ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: مجموعه مراحل مختلف اکسیداسیون زغال‌سنگ (Wang et al., 2003 b).



(ب) جذب شیمیایی اکسیژن در زغال‌سنگ

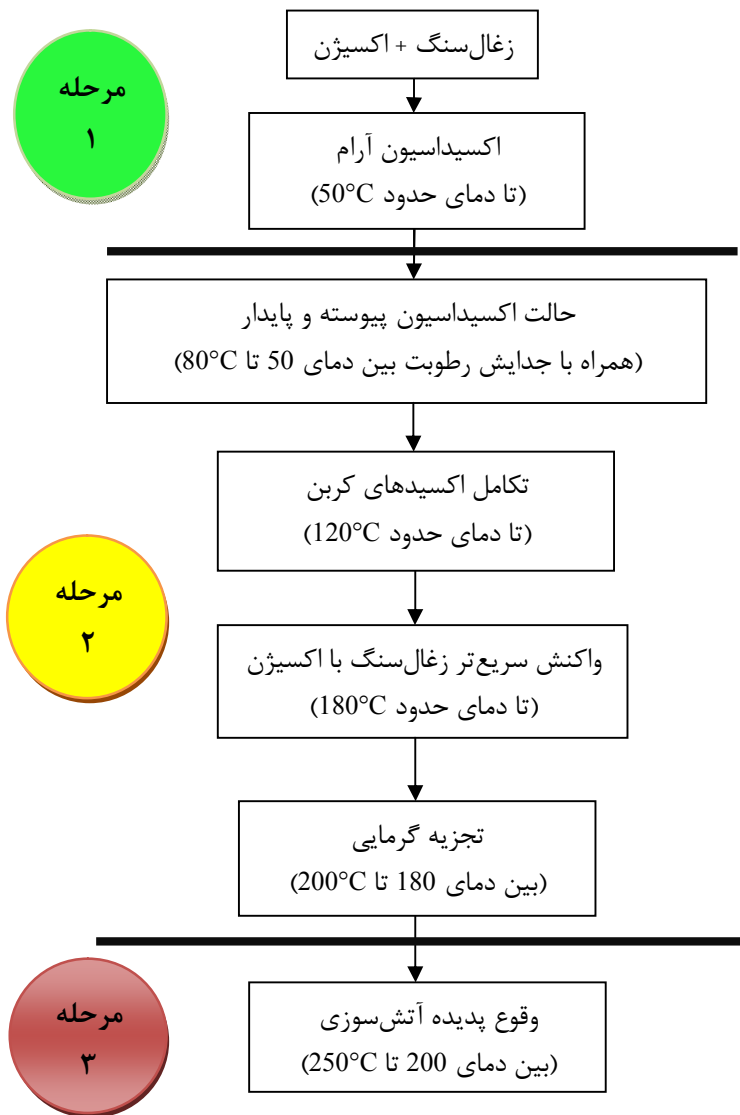
(الف) جذب فیزیکی اکسیژن بر روی سطح زغال‌سنگ

شکل ۲-۶: مجموعه مراحل مختلف جذب فیزیکی و شیمیایی اکسیژن در اکسیداسیون زغال‌سنگ (Xi et al., 2018).

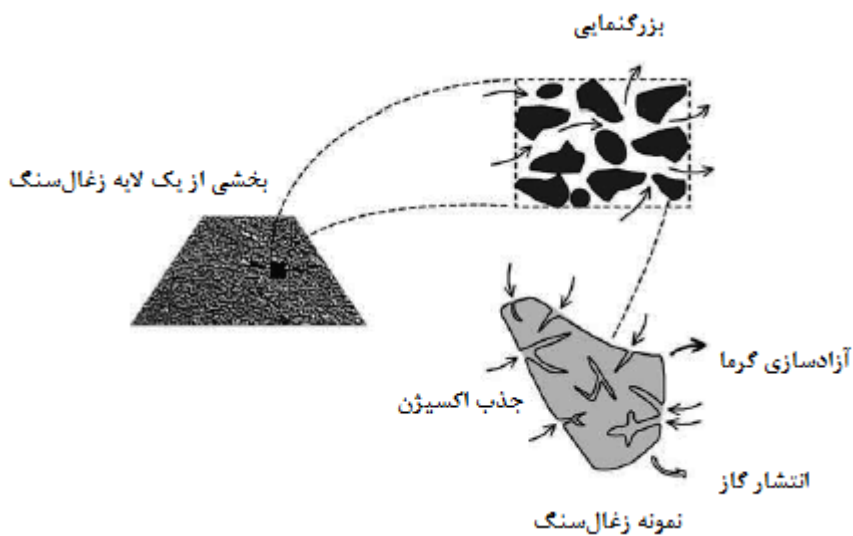
¹- Adsorption

²- Absorption

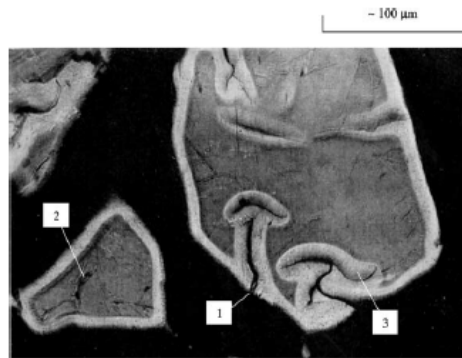
³- Chemical Reaction



شکل ۲-۷: مراحل مختلف اکسیداسیون و گرمایش خود به خودی زغال سنگ (Grewer, 1994).



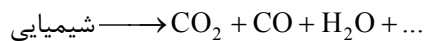
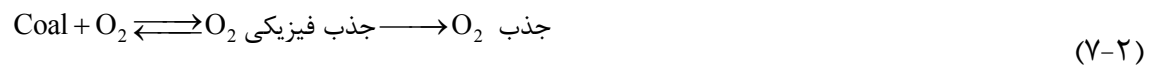
شکل ۲-۸: فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ (Wang et al., 2003 a).



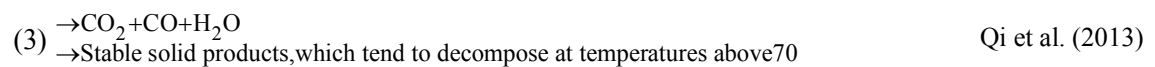
۱- خلل و فرج باز ۲- خلل و فرج مخفی (کور) ۳- خلل و فرج اکسید شده

شکل ۲-۹: تصویر میکروسکوپی از ذرات زغال سنگ صیقل داده شده غوطه‌ور در روغن بعد از یک ساعت اکسیداسیون در دمای ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد (Wang et al., 2003 a).

مجموعه ۳ مرحله بالا در معادله‌های ۲-۷ و ۲-۸ آورده شده است.



(2) Unstable solid intermediate carbon-oxygen complexes



در اولین فرآیند، طبیعت واکنش بین زغال سنگ و اکسیژن در دماهای بسیار کم، فیزیکی است

به این صورت که اکسیژن به صورت جذب سطحی یا برآشامی جذب زغال سنگ می‌شود. مقدار جذب

اکسیژن به صورت فیزیکی با افزایش دمای آهسته، کم است و می‌توان گفت تقریباً تا دمای ۵۰ درجه

سانتی‌گراد ناچیز است (Grewer, 1994).

در دومین فرآیند که جذب شیمیایی صورت می‌گیرد، پس از اینکه زغال سنگ در معرض هوا

قرار گرفت و اکسیژن در سطح آن جای گرفت به علت وجود شکستگی و ترک‌های موجود در سطح

زغال سنگ (شکل ۲-۹)، اکسیژن جذب درونی زغال سنگ می‌شود که اصطلاحاً به آن درآشامی

می‌گویند و باعث می‌شود تا نرخ اکسیداسیون شتاب بیشتری به خود بگیرد (Grewer, 1994).

در دمای زیر ۸۰ درجه سانتی‌گراد، ترکیبات پایداری از زغال‌سنگ و اکسیژن شامل گروه‌های هیدروکسیل^۱ (فنولیک^۲ -OH)، کربونیل^۳ (-CO) و کربوکسیل^۴ (-COOH) شکل می‌گیرند که نتیجه آن هوازگی زغال‌سنگ توسط اکسیژن است که با معادله ۲-۹ نشان داده می‌شود (Grewer, 1994; Qi et al., 2013).

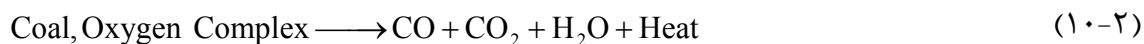


از دمای پایین‌تر از دمای شکل‌گیری ترکیبات زغال‌سنگ و اکسیژن، پدیده گرمایش خود به خودی شکل گرفته است و دمای زغال‌سنگ با یک نرخ افزایشی زیاد می‌شود، این گرما وابسته به میزان اکسیژن موجود و همچنین حفظ و نگهداری و عدم پراکندگی گرمای به وجود آمده از واکنش است (Grewer, 1994).

اگر گرمای ایجاد شده پراکنده شود، دمای زغال‌سنگ افزایش نمی‌یابد، اما در غیر این صورت دمای زغال‌سنگ افزایش یافته و گرمای تولید شده توسط ظرفیت گرمایی زغال‌سنگ جذب شده و دمای زغال‌سنگ افزایش می‌یابد. در صورتی که اکسیژن کافی نیز تأمین شود، فرآیند تسریع یافته و دمای زغال‌سنگ همچنان افزایش می‌یابد و باعث تقویت سرعت اکسیداسیون و تولید گرما می‌شود که این گرما دیگر از بین نمی‌رود و باعث می‌شود تا اکسایش تسریع‌تر رخ دهد (Bowes, 1984; Banerjee, 1985).

در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد و در طی افزایش دمای ناشی از فرآیند شیمیایی زغال‌سنگ، ترکیبات زغال‌سنگ و اکسیژن باعث تولید مقادیر زیادی گرما و گازهایی از قبیل CO، H₂، CO₂ و بخار آب مطابق با معادله ۲-۱۰ می‌شوند که به این دما، «دمای آستانه^۵» گفته می‌شود. محدوده این دما بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است (Grewer, 1994).

¹ - Hydroxyl
² - Phenolic
³ - Carbonyl
⁴ - Carboxyl
⁵ - Threshold Temperature



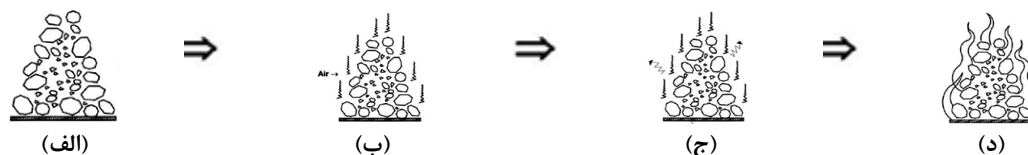
نکته قابل توجه در این است که در طی پیشرفت این مراحل و مطابق با معادله‌های شیمیایی

۱-۲،

۲-۲، ۵-۲، ۶-۲، ۷-۲، ۸-۲ و ۱۰-۲، واکنش در حال اکسیداسیون هیدروژن زغال‌سنگ 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; Sipila et al., 2012).

در شروع دمای ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رطوبت زغال‌سنگ از زغال‌سنگ جدا می‌شود که این فرآیند با افزایش دما ادامه پیدا می‌کند تا اینکه ترکیب اکسیژن و زغال‌سنگ به یک حالت پایدار با دمای بحرانی یا دمای خود گرمایشی^۱ SHT 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 زغال‌سنگ است که شروع فرآیند مرحله سوم و به عبارتی شروع آتش‌سوزی زغال‌سنگ است (Grewer, 1994). به عبارت دیگر زغال‌سنگ به حالت اشتعال با شعله^۲ یا نقطه درخشش^۳ رسیده است و آتش‌سوزی اصلی در این مرحله شروع می‌شود (Gangopadhyay, 2008). دمای آتش‌سوزی زغال‌سنگ‌های بیتومینه در حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و زغال‌سنگ‌های آنتراسیت در حدود ۳۹۸ درجه سانتی‌گراد است (Grewer, 1994).

در شکل‌های ۱۰-۲ و ۱۱-۲ مراحل تکاملی از یک خودسوزی زغال‌سنگ نشان داده شده است.

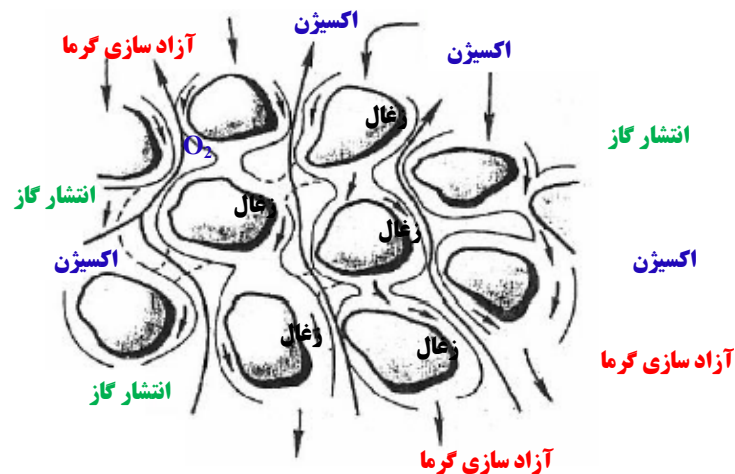


شکل ۱۰-۲: مراحل تکاملی یک آتش خود به خودی زغال‌سنگ. (الف) نمونه زغال‌سنگ (ب) ترکیب زغال‌سنگ با اکسیژن موجود در هوا (ج) از دست دادن گرما و انتقال آن به محیط اطراف (د) تجمع گرما و شروع خودسوزی.

¹- Self-Heating Temperature

²- Ignition

³- Flash Point

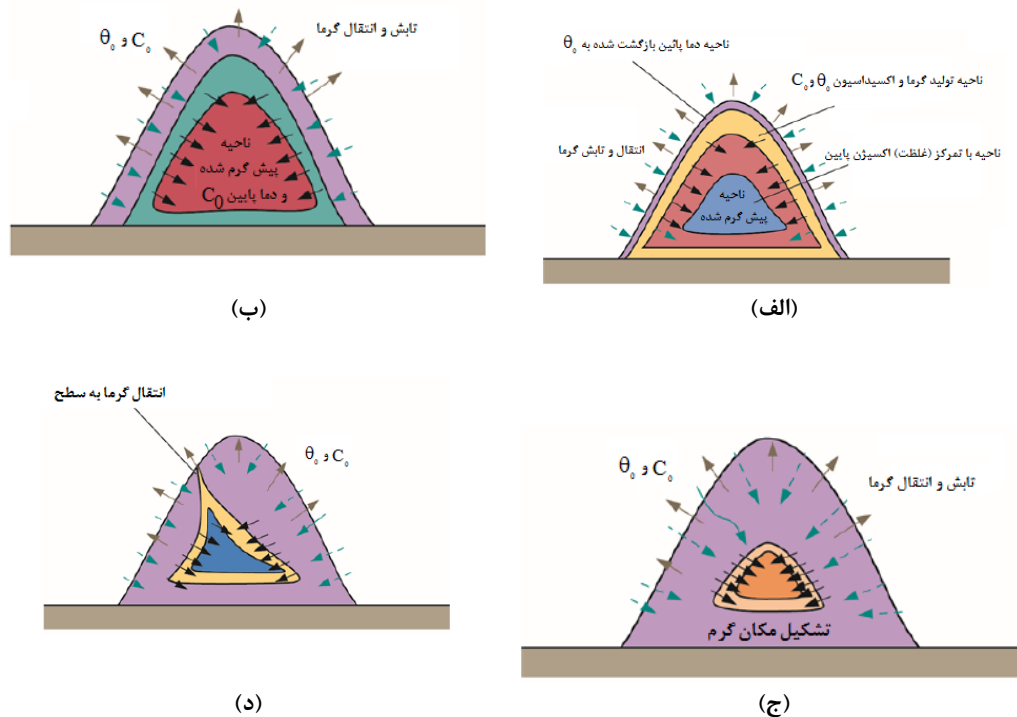


شکل ۲-۱۱: مراحل تکاملی خودسوزی زغال سنگ.

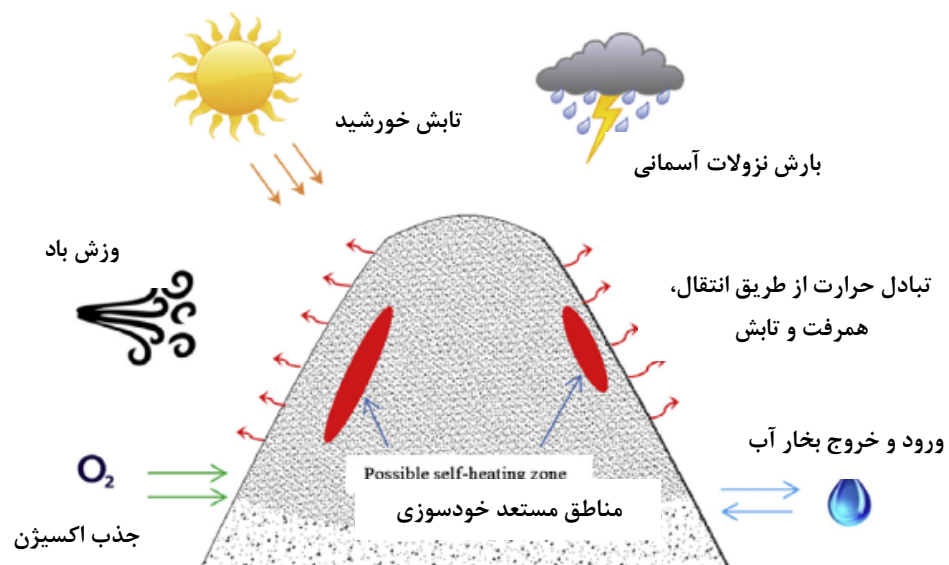
شکل ۲-۱۲ فرآیند شمتایک گرمایش خود به خودی زغال سنگ در یک دپوی زغال سنگ را که در نهایت تبدیل به خودسوزی می شود را نشان می دهد. گرمای اکسایش تولید شده در زغال سنگ به علت اینکه اکسیژن مورد احتیاج از هوای محیط تأمین می شود از سطح خارجی انباشته زغال سنگ موجود شروع می شود. مقداری از گرمای تولید شده (θ_0) در هوای محیط (C_0) از بین می رود، اما مقداری از این گرما به سمت مرکز توده زغال سنگ نفوذ پیدا می کند. بعد از مدت زمان کافی، دمای قسمت بیرونی انباشته زغال سنگ به دمای محیط (C_0) برمی گردد. به هر حال، غلظت اکسیژن در توده زغال سنگ، به علت اینکه اکسیژن به مناطق داخلی تر از طریق منطقه اکسایش نفوذ پیدا می کند، در یک غلظت نسبتاً پایین نگهداری می شود. به تدریج، در حالی که دما افزایش می یابد، منطقه گرمایش و اکسایش تولید شده از سطح توده به طرف مرکز توده منتقل می شود و زغال سنگ در مرکز توده بدون حضور اکسیژن به آرامی گرم می شود و یک نقطه یا منطقه با دمای بالا در مرکز این توده شکل می گیرد که منجر به خودسوزی توده زغال سنگ خواهد شد (Sasaki and Sugai, 2011; Sasaki et al., 2014).

شکل ۲-۱۳ نشان دهنده فرآیند و مشخصات اصلی خودسوزی به همراه مناطق مستعد خودسوزی در یک دپوی زغال سنگ است.

در کپه‌های زغالی مقدار زغال سنگ ذخیره شده، ارتفاع دپو، درجه فشردگی، سرعت و جهت باد، مدت زمان ذخیره‌سازی و زوایای جانبی کپه نقش مهمی در خودسوزی ایفا می‌کنند (Iglesias et al., 1998; Avila et al., 2014; Zhang et al., 2016 a).



شکل ۲-۱۲: نمای شماتیک نشان‌دهنده فرآیند خودسوزی در یک دپوی زغال‌سنگ (Sasaki and Sugai, 2011; Sasaki et al., 2014).



شکل ۲-۱۳: نمای شماتیک نشان‌دهنده فرآیند و مشخصات اصلی خودسوزی در یک دپوی زغال‌سنگ (Zhang et al., 2016 a).

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

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

- شروع فرآیند اکسیداسیون و تولید گرما.

- همچنان که دما تا حدود ۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد گازهای مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن تولید می‌شوند.

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

- اگر گرمای تولید شده از فرآیند اکسایش زغال سنگ توسط سنگ‌های اطراف جذب شود و یا توسط هوای تهویه پراکنده شود، دمای زغال سنگ 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 سنگ به نقطه اشتعال هم نرسد اما تحت تأثیر هوازدهی قرار گرفته است و زغال سنگ‌های هوازده دارای میزان انرژی حرارتی ضعیفی هستند.

- اگر گرمای تولید شده توسط اکسیداسیون پراکنده نشود و از محیط اکسیداسیون خارج نشود، این گرما توسط ظرفیت گرمایی زغال سنگ جذب شده و دمای زغال سنگ 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 ده درجه سانتی‌گراد افزایش دما، سرعت اکسیداسیون تقریباً دو برابر می‌شود.

^۱ - Reversible

- سرانجام پس از واکنش اکسیژن با زغال سنگ، دمای زغال سنگ افزایش می یابد و بعد از گذشت مدت زمان معین و در یک دمای بحرانی، زغال سنگ به مرحله اشتعال می رسد و خودسوزی زغال سنگ صورت می گیرد.

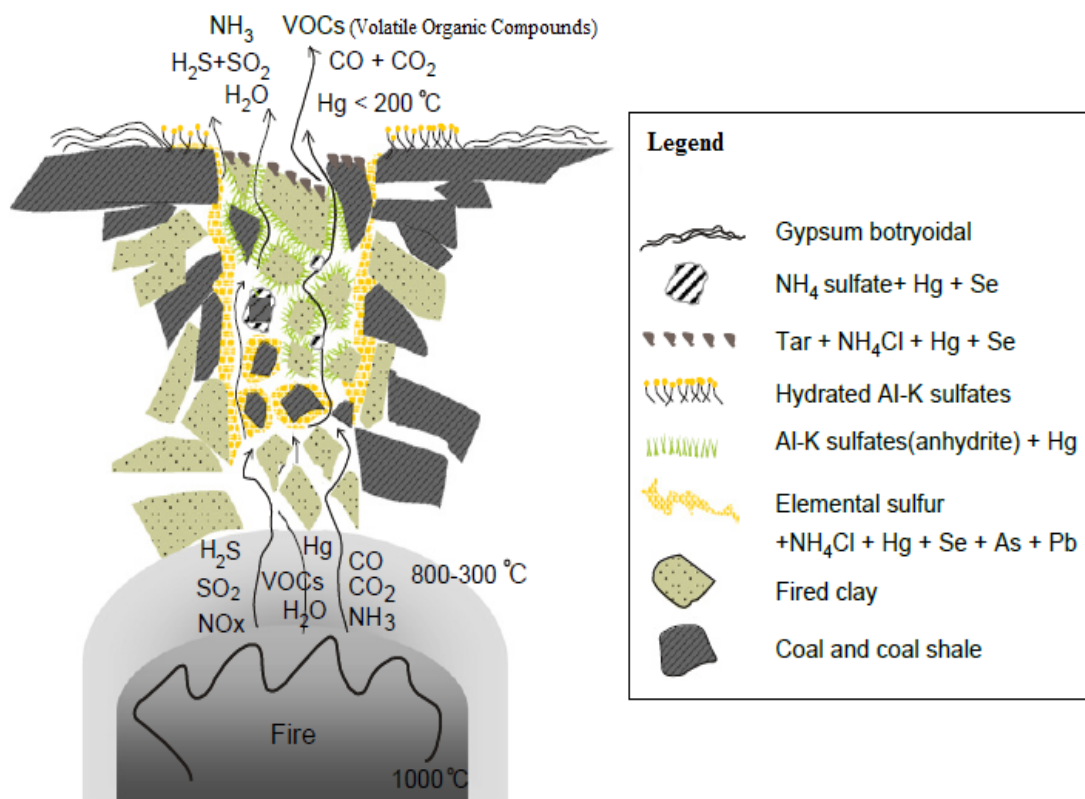
این ساز و کار تعریف شده مکانیسمی ساده و اولیه برای خودسوزی زغال سنگ است؛ پارامترهای متعددی نیز در پدیده خودسوزی زغال سنگ دارای تأثیرات مثبت و منفی هستند که در فصل پنجم به بررسی تأثیر این پارامترها پرداخته شده است.

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

خودسوزی زغال سنگ به طور مستقیم و غیرمستقیم بر مسائل زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی تأثیرگذار است که به بعضی از این موارد در زیر اشاره شده است (Ham, 2005; Nelson and Chen, 2007; Ashton Coal Project, 2014; Xstrata Coal, 2016):

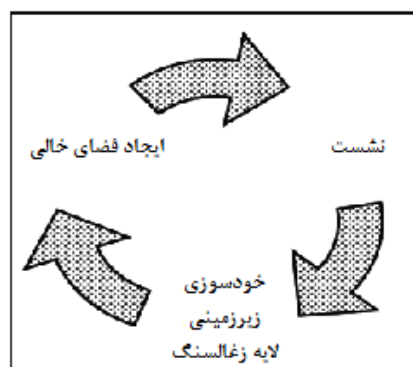
- مرگ کارکنان که یکی از اصلی ترین فجایع ناشی از خودسوزی زغال سنگ است و اختلالات روانی در بازماندگان فاجعه. بر اساس آخرین اطلاعات منتشر شده از تعداد ۱۶ مرگ اتفاق افتاده در اثر حوادث در معادن زغال سنگ ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۱۴، یک مرگ مربوط به پدیده خودسوزی زغال سنگ بوده است (World Coal, 2015).

- کاهش کیفیت هوا (تولید دود، مه و غبار) و آلودگی فوری محیط زیست توسط انتشار گازهای سمی، گلخانه ای، قابل اشتعال و قابل انفجار (شکل ۲-۱۴)؛ 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 آن ها کم، ولی از طریق خودسوزی زغال سنگ ایجاد می شوند که شامل اتان (C_2H_6)، اتیلن (C_2H_4)، استیلن (C_2H_2) و سایر هیدروکربن های دیگر که مقادیر آن ها بسیار کم است. در این بین گازهای سمی CO_2 و CH_4 در گرم شدن کره زمین مؤثر هستند.



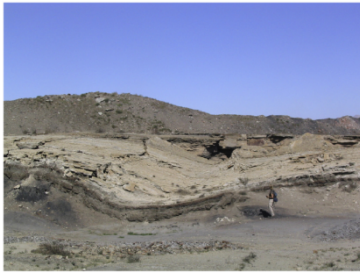
شکل ۲-۱۴: آلودگی فوری محیط‌زیست توسط انتشار گازهای مختلف ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ (Querol et al., 2011).

• نشست سطح زمین و ایجاد گودال‌های بزرگ، یکی دیگر از رخدادهای رایج در نواحی‌ای است که تحت تأثیر خودسوزی زیرسطحی زغال‌سنگ قرار گرفته‌اند و باعث تخریب ساختمان‌ها و زیرساخت‌های سطحی مانند شبکه‌های ارتباطی، خانه‌ها، خطوط راه‌آهن، جاده‌ها و تأسیسات سطحی موجود در معدن می‌شود. در شکل ۲-۱۵ رابطه بین خودسوزی زیرزمینی زغال‌سنگ و نشست سطح زمین نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵: چرخه خودسوزی زیرزمینی لایه زغال‌سنگ بر نشست (Gangopadhyay, 2008).

- انتشار گرما از طریق خودسوزی‌های زغال‌سنگ باعث افزایش دمای محلی می‌شود.
 - خودسوزی‌های زغال‌سنگ باعث افزایش هزینه‌های تولید به دلیل ایجاد مشکل در بهره‌برداری و استخراج معدن، بسته شدن معدن، از دست دادن تجهیزات و توقف عمده در تولید و یا حتی از دست دادن تولید می‌شود.
 - خودسوزی زغال‌سنگ به طور مستقیم و غیر مستقیم باعث هدر رفتن میلیون‌ها تن از ذخایر زغال‌سنگ که جز منابع انرژی با ارزش است می‌شود. به عنوان مثال خودسوزی زغال‌سنگ در منطقه زغال‌سنگ Jharia در کشور هندوستان باعث از دست رفتن حدود ۳۷ میلیون تن زغال‌سنگ کک‌شو و به طور غیر مستقیم باعث از دست رفتن حدود ۴۸ میلیون تن زغال‌سنگ به علت از بین رفتن زیرساخت‌های مربوط شد (Sinha, 1986).
 - کاهش انرژی حرارتی ویژه زغال‌سنگ.
 - آلودگی خاک و انقراض پوشش گیاهی، جانوری و کشاورزی منطقه.
 - باران اسیدی از طریق آزادسازی گازهای مضر و مواد ذره‌ای.
 - کاهش قابل توجه کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی.
 - خسارت به زیرساخت‌ها.
 - تأثیرات دراز مدت در بازسازی معادن.
- بنابراین خودسوزی زغال‌سنگ باعث به خطر افتادن سلامتی، ایمنی و دلایل مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی است. در شکل‌های ۲-۱۶ و ۲-۱۷ نمونه‌هایی از تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(و)

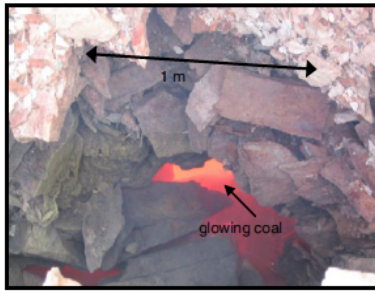


(ه)



(ز)

شکل ۲-۱۶: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ در جهان. (الف) نشست سطح زمین بر اثر خودسوزی زغال‌سنگ در زیر سطح زمین در آمریکا (Gervet, 2007). (ب) نشست سطح زمین در اثر خودسوزی زغال‌سنگ در منطقه معدنی Wuda در چین (Dijk et al., 2011). (ج) نمونه‌ای از خودسوزی زغال‌سنگ در کوه‌های ایالت کلرادو از ایالت‌های جنوب غربی آمریکا (Gervet, 2007). (د) انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر خودسوزی زغال‌سنگ در منطقه معدنی Wuda در چین (Dijk et al., 2011). (ه) نمونه‌ای از خودسوزی زغال‌سنگ در ایالت آلاباما آمریکا (Stracher, 2012). (و) نمونه‌ای از خودسوزی زغال‌سنگ در کپه‌های زغال‌سنگ در منطقه معدنی Wuda در چین (Song and Kuenzer, 2014). (ز) نمونه‌ای از خودسوزی زغال‌سنگ در ناحیه زغالی Jharia در هند (Van Genderen, 2012).



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(و)



(ه)



(ز)

شکل ۲-۱۷: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ در جهان. (الف) و (ب) خودسوزی زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی منطقه Wuda در کشور چین. (ج) خودسوزی زغال‌سنگ در یک دیپو در ناحیه معدنی Witbank در آفریقای جنوبی. (د) نشست جاده Centralia در ایالت Pennsylvania در آمریکا در اثر خودسوزی زغال‌سنگ در زیر سطح زمین (Kuenzer and Stracher, 2012). (ه) و (و) خودسوزی زغال‌سنگ در معادن چین (Mohan Ram and Kiran, 2013). (ز) خودسوزی زغال‌سنگ در کپه‌های زغالی در بندرگاه Hedland استرالیا (www.miningmayhem.com, 2013).

۲-۵- جمع‌بندی

خودسوزی زغال‌سنگ یکی از دلایل ایجاد آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ محسوب می‌شود که دارای تأثیرات زیان‌آور اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی است. خودسوزی زغال‌سنگ نه تنها خطری برای سلامتی و ایمنی است، بلکه یک منبع غیر قابل کنترل آلودگی (شامل گازهای گلخانه‌ای) است. با دانستن اینکه پدیده خودسوزی زغال‌سنگ چگونه به وجود می‌آید، استفاده‌کنندگان این ماده معدنی می‌توانند نسبت به برنامه‌ریزی، پیش‌بینی و جلوگیری از حوادث و اتفاقات ناشی از آن اقدامات لازم را انجام دهند.

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 سوم با بررسی منابع مختلف علمی موجود به بررسی روش‌های مختلف ارزیابی خودسوزی زغال‌سنگ و در فصل پنجم به بررسی نقش و تأثیر پارامترهای مؤثر بر این پدیده پرداخته خواهد شد تا دید جامعی از این پدیده به دست آید.

فصل سوم

بررسی سابقه علمی موضوع

۳-۱- مقدمه

پدیده خودسوزی زغال سنگ، از قبل از استخراج لایه تا معدنکاری آن به صورت دستی و مکانیزه در معادن زیرزمینی و روباز و حتی بعد از معدنکاری در قسمت تخریب شده، در حین حمل و نقل و حتی انباشت آن، بررسی و توجه ویژه‌ای را از لحاظ چگونگی پیدایش، پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل به علت اهمیت موضوع در مسائل اجتماعی، ایمنی، زیست‌محیطی و اقتصادی به خود اختصاص داده است.

بررسی فرآیند خودسوزی زغال سنگ همواره یکی از مسائل پیچیده و چالش‌برانگیز بوده است که عمده دلیل آن را می‌توان در تعدد پارامترهای مؤثر بر این فرآیند دانست. با وجود این پیچیدگی‌ها، تحقیقات پراکنده‌ای در حوزه بررسی قابلیت خودسوزی زغال سنگ انجام شده است که سابقه‌ی علمی موضوع مورد تحقیق به بیش از ۱۵۰ سال پیش برمی‌گردد (Wang et al., 2015) که در این فصل مهم‌ترین مطالعات انجام شده در این زمینه بیان شده است.

۳-۲- مروری بر سابقه علمی موضوع

چنانچه بیان شد، سابقه‌ی علمی موضوع مورد تحقیق به بیش از ۱۵۰ سال پیش برمی‌گردد اما با توجه به عدم موجود مستندات لازم و معتبر از تحقیقات انجام شده در آن سال‌ها و اینکه نزدیک‌ترین اطلاعات و مقالات در این زمینه از سال ۱۹۲۵ موجود است؛ به همین دلیل در جدول ۳-۱ به خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه از سال ۱۹۲۵ تا سال ۲۰۱۸ اشاره شده است.

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

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Hodges & Hinsley (1964)	به بررسی تأثیر رطوبت زغال‌سنگ در میزان تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد.
Banerjee et al. (1972)	به بررسی تعیین دماهای نقطه تقاطع (CPT ^۱) نمونه‌های زغال‌سنگ پرداخته شد. در این بررسی مشاهده شد زغال‌سنگ‌های با دماهای نقطه تقاطع بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد جز زغال‌سنگ‌هایی 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)	به بررسی تغییرات دمای نقطه تقاطع با رطوبت محتوی ^۲ ، درصد مواد فرار ^۳ و درصد اکسیژن موجود در زغال‌سنگ پرداخته شد که مشخص شد با افزایش هر یک از این اجزاء، استعداد خودسوزی بیشتر می‌شود.
Kuchta et al. (1980)	به بررسی تأثیر نوع زغال‌سنگ در تمایل به خطر خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد.
Banerjee (1985)	به بررسی تأثیر میزان رطوبت و اندازه ذرات زغال‌سنگ در خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد.
Ghosh (1986)	در این تحقیق نشان داده شد چنانچه پیریت ^۴ در زغال‌سنگ وجود داشته باشد تمایل زغال‌سنگ برای خودسوزی افزایش می‌یابد و بر تأثیر تزریق نیتروژن برای جلوگیری از خودسوزی تأکید شد.
Riley et al. (1987)	در این تحقیق نشان داده شد که خواص ذاتی زغال‌سنگ مانند نوع زغال‌سنگ، رطوبت، تخلخل، سطح تأثیر، خاکستر محتوی، پیریت محتوی و متان محتوی همگی در خودسوزی زغال‌سنگ مؤثرند.
De faveri et al. (1989)	با انجام مطالعات نظری و آزمایشگاهی در خصوص انتشار گرمای داخل توده‌های زغال‌سنگ به بررسی مکانیسم اکسایش خود به خودی زغال‌سنگ در دماهای پایین پرداخته شد.
Chandra & Prasad (1990)	به بررسی تأثیر مواد فرار در خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطع (CPT) پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد مواد فرار محتوی نمونه‌های زغال‌سنگ، تمایل این نمونه‌های برای خودسوزی بیشتر می‌شود و برعکس.
Chandra et al. (1990)	ارتباط بین میزان زغال‌شدگی ^۵ و خودسوزی زغال‌سنگ بررسی شد و مشخص شد که با افزایش درجه زغال‌شدگی، استعداد خودسوزی زغال‌سنگ به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین به این نتیجه رسیدند که مقدار ویتترینیت ^۶ و اگزینیت ^۷ محتوی لایه‌های زغال‌سنگ در استعداد زغال‌سنگ به خودسوزی مؤثرند.
Mitchell (1990)	به بررسی تأثیر روش استخراج چند لایه‌ای در خطر خودسوزی پرداخته شده است.
Chen & Stott (1993)	به بررسی تأثیر رطوبت در زیر دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد پرداخته شد و نتیجه‌گیری شد که حداکثر نرخ اکسیداسیون زغال‌سنگ‌های ساب‌بیتومینه، زمانی است که درصد وزنی رطوبت بین ۷ تا ۱۷ درصد باشد.

^۱- Crossing Point Temperature

^۲- Moisture Content

^۳- Volatile Matter

^۴- Pyrite

^۵- Coalification

^۶- Vitrinite

^۷- Exinite

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

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
کریمی (۱۳۷۲)	به بررسی علل خودسوزی در معدن باب نیزو کرمان و طراحی سیستم تهویه برای جلوگیری از آن پرداخته شد. با توجه به روش استخراج پیشرو و گاز خیزی زیاد لایه D2، تهویه مناسب روش مکشی و کناری خواهد بود.
Barve & Mahadevan (1994)	به ارائه یک شاخص پتانسیل خودسوزی (BMLI ^۱) بر اساس پارامترهای رطوبت و خاکستر محتوی نمونه زغال سنگ به صورت رابطه ۳-۱ پرداختند. $BMLI = 21.48 \times M + 0.98 \times A - 0.62 \times M^2 - 0.58 \times M \times A + 0.08 \times A^2 - 10.2 \quad (1-3)$ که در آن M میزان درصد رطوبت محتوی و A میزان درصد خاکستر محتوی نمونه زغال سنگ است و پتانسیل خودسوزی زغال سنگ با افزایش شاخص BMLI افزایش می‌یابد. همچنین یک رابطه ریاضی بین دمای نقطه تقاطع (CPT) و پارامترهای رطوبت و خاکستر محتوی نمونه زغال سنگ به صورت رابطه ۳-۲ ارائه کردند. $CPT = 170 - 5.16 \times M - 2.8 \times A - 0.005 \times M^2 + 0.28 \times M \times A + 0.02 \times A^2 \quad (2-3)$ که در آن M میزان درصد رطوبت محتوی و A میزان درصد خاکستر محتوی نمونه زغال سنگ است و پتانسیل خودسوزی زغال سنگ با کاهش CPT افزایش می‌یابد.
Carras & Young (1994)	به بررسی وضعیت خود گرمایشی انباشتگاه‌های ^۲ زغال سنگ پرداخته شد و نتیجه‌گیری شد که پدیده‌ی خود گرمایشی زغال سنگ ناشی از چندین فرآیند پیچیده‌ی فیزیکی و شیمیایی است.
Grewer (1994)	به ارائه‌ای کامل و جامع از مکانیسم خودسوزی زغال سنگ پرداخت.
Vance et al. (1996)	به بررسی خودسوزی زغال سنگ‌های ساب‌بیتومینه تحت شرایط آدیاباتیک در دامنه اختلاف دمایی ۴۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با درصد رطوبت‌های مختلف در زغال سنگ از ۴/۵ تا ۱۵/۷ درصد وزنی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که حداکثر نرخ اکسیداسیون در دمای کمتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد.
Walters (1996)	به بررسی تأثیر ترکیبات سنگ‌شناسی (پتروگرافی) در خودسوزی زغال سنگ پرداخته شده است.
Duncan (1998)	به بررسی میزان بازیابی و افت زغال سنگ در گرمایش خود به خودی زغال سنگ پرداختند.
Nugroho et al. (1998)	با استفاده از روش دمای نقطه تقاطع به ارزیابی خودسوزی نمونه‌های زغال سنگ کشور اندونزی پرداختند. از مشخصات این نمونه‌های زغالی درصد سولفور و خاکستر پایین، درجه زغال‌شدگی پایین و رطوبت نسبتاً پایین است که نتایج آزمایش پتانسیل بالای خودسوزی را در نمونه‌های زغال سنگ نشان می‌دهد.
Sensogut (1999)	به بررسی استفاده از نسبت‌های گازی مورد استفاده در تشخیص سریع خودسوزی زغال سنگ از قبیل نسبت گراهام، نسبت تریکت و غیره که توسط سایر محققین ارائه شد بود، پرداختند.
Sujanti & Zhang (1999)	به بررسی تأثیر نوع مواد غیر آلی موجود در زغال سنگ در خودسوزی زغال سنگ پرداختند.
Sujanti et al. (1999)	به بررسی تأثیر گاز خیزی، نوع زغال سنگ و اندازه ذرات در خودسوزی زغال سنگ پرداختند.
Beamish et al. (2000)	روش آزمایش ^۳ R ₇₀ را به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌ها در زمینه‌ی خودسوزی ارائه کردند.

^۱- Barve & Mahadevan Liability Index

^۲- Dumps

^۳- Rate 70

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Akgun & Essenhigh (2001)	به بررسی تأثیر رطوبت محتوی در خودسوزی توده زغال‌سنگ با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در نمونه‌های زغال‌سنگ با میزان کم رطوبت محتوی، دما به طور پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین به این نتیجه رسیدند که در نمونه‌های زغال‌سنگ با میزان زیاد رطوبت محتوی، دما در مراحل اولیه و قبل از شروع تبخیر به سرعت افزایش یافته (تا حدود دمای ۹۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد) و پس از خشک شدن نمونه، دما مجدداً به سرعت شروع به افزایش می‌کند تا به نقطه گریخت دمایی ^۱ (دمای غیر قابل کنترل) برسد.
Beamish et al. (2001)	تأثیر نوع زغال‌سنگ در خودسوزی زغال‌سنگ‌های New Zealand تحت شرایط آدیاباتیک آزمایش شد.
Jones (2001)	به بررسی تأثیر میزان رطوبت در افزایش دمای ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ پرداختند.
Kaymaki & Didari (2002)	با استفاده از آنالیز برآزش خطی و چندگانه به تعیین ارتباط بین پارامترهای خودسوزی (به دست آمده از منحنی‌های دما-زمان) و پارامترهای زغال‌سنگ پرداخته شد.
Michaylov (2002)	به گردآوری و ارائه سیستم‌های ارزیابی کمیته ملی زغال‌سنگ، سیستم ارزیابی لهستانی، سیستم ارزیابی آلمانی پرداخته شد و در نهایت یک سیستم ارزیابی را که بر اساس تجارب معدنکاری زغال‌سنگ در کشور بلغارستان ابداع شده بود، ارائه کردند.
Singh et al. (2002)	ارائه یک سیستم ارزیابی پیش‌بینی خطر خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از امتیازدهی به مشخصات مربوط به افزایش دمای زغال‌سنگ تحت شرایط آدیاباتیک و امتیازدهی به فاکتورهای ذاتی و معدنکاری زغال‌سنگ با استفاده از تجارب معدنکاری.
Kadioglu & Varamaz (2003)	به این نتیجه رسیدند که استعداد خودسوزی زغال‌سنگ‌های لیگنیت کشور ترکیه با افزایش رطوبت نمونه‌های زغال‌سنگ، کاهش می‌یابد.
Kucuk et al. (2003)	به ارزیابی خودسوزی ناحیه زغال‌سنگ Askale ترکیه با استفاده از روش نقطه‌ی تقاطع پرداخته شد. مشاهده شد استعداد خودسوزی زغال‌سنگ با کاهش اندازه ذرات و افزایش رطوبت محتوی زغال‌سنگ افزایش می‌یابد.
Mitchel (2003)	به بررسی تأثیر سیستم‌های تهویه نوع U و Y در نشت هوا به فضای استخراج شده پرداختند.
Finkelman (2004)	در این تحقیق به بررسی بیماری‌های ناشی از سوخته شدن لایه‌های زغال‌سنگ در مجاورت مناطق مسکونی و نیز سوختن زغال‌سنگ در بخاری‌های زغالی و مشکلات سلامتی ایجاد شده از آن پرداختند. در این تحقیق بیان شد بیماری‌های از قبیل تنگی نفس، برونشیت حاد، بیماری‌های پوستی، بیماری ریه و ... در اثر اکسایش زغال‌سنگ ایجاد می‌شود.
Panigrahi & Bhattacharjee (2004)	با استفاده از یک تفنگ گرمایی ^۲ IR (مادون قرمز) و یک دوربین گرماسنج به بررسی وضعیت گرمایی در پایه‌های زغال‌سنگ پرداخته شد.
Panigrahi & Sahu (2004)	با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ^۳ (ANN) به طبقه‌بندی خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ پرداخته شد.

^۱ - Thermal Runaway

^۲ - Infra Red

^۳ - Artificial Neural Networks

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Sahu et al. (2004)	تشخیص قابلیت خودسوزی ۳۰ نمونه زغال سنگ از ۷ ناحیه زغال سنگ کشور هندوستان با استفاده از روش‌های کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC ^۱) و دمای نقطه تقاطع (CPT). نتایج نشان داد که پیش‌بینی روش کاوش تفاضل گرماسنجی در مورد خودسوزی زغال سنگ دقیق‌تر از روش دمای نقطه تقاطع است.
Beamish & Blazak (2005)	به بررسی تأثیر مواد معدنی موجود در زغال سنگ و شاخص R ₇₀ و نیز ارتباط بین درصد خاکستر محتوی و شاخص خودسوزی R ₇₀ و برازش یک معادله درجه دو بین میزان خاکستر محتوی و شاخص R ₇₀ به صورت رابطه ۳-۳ پرداختند. $R_{70} = 0.0029 \times \text{ash}^2 - 0.4889 \times \text{ash} + 20.644 ; R^2 = 0.997 \quad (3-3)$
Beamish & Hamilton (2005)	به بررسی تأثیر میزان رطوبت محتوی در نرخ خودسوزی زغال سنگ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان رطوبت محتوی نمونه‌های زغال سنگ، مقدار شاخص R ₇₀ به طور چشمگیری کاهش می‌یابد که علت آن این است که گرمای تولید شده توسط اکسیداسیون زغال سنگ صرف تبخیر رطوبت شده و خودسوزی زغال سنگ به تأخیر می‌افتد.
Beamish & Jabouri (2005)	به بررسی تأثیر افزایش دمای ناشی از خودسوزی زغال سنگ بر روی میزان خروج انواع گازها در دماهای مختلف با استفاده از دستگاه UQ two-metre column و نیز تأثیر گاز خیزی زغال سنگ در خودسوزی پرداختند.
Beamish et al. (2005)	حاصل تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش خاکستر محتوی، افزایش رطوبت محتوی و افزایش درجه زغال‌شدگی باعث کاهش نرخ خودسوزی زغال سنگ می‌شود و برعکس.
Mohalik et al. (2005)	به بررسی و مزایای استفاده از تزریق گاز نیتروژن در جلوگیری از خودسوزی پرداختند. آن‌ها مزایای گاز نیتروژن را به شرح زیر بیان کردند: - سبک‌تر از هوا است و می‌تواند کل فضای ناحیه تخریب را پر کند. - دارای دمای بسیار کمتری است که باعث کاهش دمای لایه‌های زغال سنگ می‌شود. - یک گاز غیر سمی است که از هوای جو می‌تواند تأمین شود و بسیار اقتصادی است. - احتمال انفجار در ناحیه‌ی تخریب شده را کاهش می‌دهد. - انتقال آن از حالت مایع به گاز از سطح زمین به زیرزمین آسان است. - در مقایسه با گاز دی‌اکسید کربن (CO ₂) که باعث تشکیل اسید کربنیک می‌شود، نیتروژن یک گاز غیر خورنده است. - یک مترمکعب نیتروژن مایع به ۶۹۱ مترمکعب گاز نیتروژن (فشار ۱/۰۱۳ بار، دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و چگالی ۴/۶۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب) تبدیل می‌شود که پوشش مناسبی برای جلوگیری از خودسوزی در ناحیه تخریب است.
Ren & Balusu (2005)	بررسی تأثیر روش استخراج پسرودر کاهش خطر خودسوزی زغال سنگ در پهنه جبهه کار طولانی و بررسی تأثیر سیستم‌های تهویه نوع U و Y در نشت هوا به فضای استخراج شده با استفاده از مجموعه نرم‌افزار مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی CFD ^۲ .

^۱- Differential Scanning Calorimetry

^۲- Computational Fluid Dynamics

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

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Ren et al. (2005)	به بررسی تأثیر روش استخراج پسرود در کاهش خطر خودسوزی در جبهه کار طولانی پرداختند.
Sahu et al. (2005)	به تعیین قابلیت خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ با استفاده از سه روش مختلف آزمایشگاهی دمای نقطه تقاطع (CPT)، آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA ^۱) و کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC) پرداختند؛ که نتیجه آن این بود روش DSC نتایج بهتری از روش CPT ارائه می‌دهد.
Smith & Glasser (2005)	به اندازه‌گیری نرخ اولیه اکسیداسیون برای ۷۰ نمونه زغال‌سنگ در پایانه‌های کشتیرانی در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و فشار ۶۲۵ میلی‌متر جیوه پرداختند. نتیجه کار آن‌ها ارائه یک رابطه برآزش به صورت رابطه ۳-۴ بود. $\log(\text{rate}) = 0.89(\text{IM})^{0.14}(\text{VM})^{0.43} \quad (۴-۳)$
Arisoy et al. (2006)	که IM رطوبت ذاتی محتوی و VM مواد فرار محتوی نمونه زغال‌سنگ است. به بررسی خودسوزی زغال‌سنگ در کپه‌های زغال‌سنگ با استفاده از مدل‌های تئوری و روش آزمایشگاهی UQ two-metre column پرداخته شد. نتیجه کار آن‌ها نشان داد که رطوبت محتوی زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ است.
Cao et al. (2007)	به بررسی تأثیر عمق قرارگیری لایه زغال‌سنگ در خطر خودسوزی زغال‌سنگ پرداختند.
Nelson & Chen (2007)	به بررسی روش‌های مختلف آزمایشگاهی در ارزیابی اکسایش و خودسوزی زغال‌سنگ پرداختند.
Ramlu (2007)	به بررسی تأثیر میزان گاز خیزی زغال‌سنگ در کاهش خطر خودسوزی زغال‌سنگ پرداختند.
Singh et al. (2007)	در این تحقیق که در معادن زغال‌سنگ روباز انجام گرفت مشاهده شد، زغال‌سنگ فوراً اکسید شده و آتش می‌گیرد که ناشی از خواص ذاتی زغال‌سنگ مانند درجه زغال‌شدگی پایین، درصد رطوبت بالا و حضور پیریت است.
Beamish & Arisoy (2008 a)	به بررسی ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و خاکستر محتوی و نرخ خود گرمایشی زغال‌سنگ (SHT) تحت شرایط آدیاباتیک ^۲ (بی‌دررو) پرداختند. همچنین نتیجه‌گیری شد زغال‌سنگ‌های کک‌دار نرخ خودسوزی کمتری از زغال‌سنگ‌های با درصد مواد فرار بالا هستند.
Beamish & Arisoy (2008 b)	به بررسی تأثیر مواد معدنی ^۳ موجود در زغال‌سنگ در نرخ خودسوزی زغال‌سنگ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود مواد معدنی در نمونه‌های زغال‌سنگ مانعی از رخداد پدیده خودسوزی است. به این صورت که مواد معدنی مانند خاکستر مانعی از رسیدن اکسیژن به سطح کربن می‌شوند و احتمالاً از وقوع مکانیسم واکنش شیمیایی جلوگیری به عمل می‌آورد.
Beamish & Sainsbury (2008)	به بررسی تأثیر ارتباط بین خاکستر محتوی و افزایش دمای ناشی از آزمایش R ₇₀ پرداختند.
Gangopadhyay (2008)	به ارزیابی خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش سنجش از راه دور ^۴ پرداختند.
Bo-tao et al. (2009)	به بررسی تأثیر سرعت پیشروی بر روی اکسایش زغال‌سنگ پرداختند.

^۱- Differential Thermal Analyzer

^۲- Adiabatic

^۳- Mineral Matter

^۴- Remote Sensing

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Carras et al. (2009)	به اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای منتشر شده از ۱۱ معدن زغال‌سنگ در کشور استرالیا که دچار اکسیداسیون شده بودند پرداخته شده است و مشخص شد که کربن دی‌اکسید مهم‌ترین گاز منتشر شده در این فرآیند است. همچنین در مناطقی که به شدت دچار خودسوزی شده بودند مقادیر زیادی از گاز متان یافت شد.
De-ming et al. (2009)	با استفاده از روش آزمایش سینتیک ^۱ اکسایش به ارزیابی تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی پرداخته شد. آن‌ها بیان داشتند که روش‌های آزمایشگاهی موجود تنها خصوصیات یک مرحله از کل فرآیند خودسوزی را در بردارند؛ اما خودسوزی زغال‌سنگ یک فرآیند سینتیکی و غیرخطی است که می‌تواند به چندین مرحله تقسیم شود.
Mohalik et al. (2009 b)	به ارائه‌ی مروری از کاربردهای سه روش گرمایی شامل، آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA)، گرماسنجی ثقلی (TGA ^۲) و کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC) پرداخته شد.
Sahu et al. (2009)	با استفاده از الگوریتم K-means به دسته‌بندی خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ پرداخته شد.
Arisoy (2010)	به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ پرداخت.
Beamish & Beamish (2010)	به بررسی تأثیر رطوبت بر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش آزمایش R ₇₀ پرداخته شد.
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 زغال‌سنگ‌های کشور چین قابلیت اجرا داشتند، انتخاب کردند. آن‌ها با به کار بردن روش امتیازدهی کل‌نگری و تحلیل سلسله مراتبی (AHP ^۳)، تمامی فاکتورها را برای یک مدل کمی یکپارچه کردند و طبقه‌بندی به پنج مرحله تقسیم شد. همچنین یک نرم‌افزار تجاری برای ارزیابی خطر خودسوزی توسعه داده شد.
Beamish & Beamish (2011)	نتایج نشان داد که وجود پیریت همراه رطوبت بر خودسوزی زغال‌سنگ تأثیر فوق العاده‌ای دارد.
Querol et al. (2011)	تأثیر پوشش خاک در کاهش تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ در باطله‌های ناحیه تخریب شده بررسی شد.
Taraba & Michalec (2011)	در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FLUENT، به بررسی تأثیر سرعت پیشروی در روش استخراج جبهه کار طولانی در فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ در نواحی تخریب شده در معدن زغال‌سنگ (OKD) Ostrava-Karvina در جمهوری چک پرداخته شد. نتایج نشان داد که نرخ پیشروی آهسته‌تر باعث افزایش دما در ناحیه تخریبی می‌شود. زمانی که نرخ پیشروی به یک مقدار بحرانی کاهش می‌یافت، گرمایش تبدیل به خودسوزی شعله‌دار می‌شد. از طرف دیگر اگر اندازه ذرات زغال‌سنگ رها شده در نواحی تخریبی کاهش می‌یافت، دمای ناحیه تخریب شده افزایش پیدا می‌کرد و بنابراین مقادیر نرخ پیشروی بحرانی افزایش می‌یافت.

¹- Kinetics

²- Thermo Gravimetry Analysis

³- Analytic Hierarchy Process

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Wang & Luo (2011)	بررسی و مقایسه سه روش آزمایشگاهی ^۱ CSHT، R ₇₀ و TGA. مطابق با نتایج این روش‌های آزمایشگاهی مشخص شد، زمانی که مقادیر R ₇₀ زیاد است، مقدار CSHT کم است که معنای آن پتانسیل بالای زغال‌سنگ برای خودسوزی است و برعکس زمانی که مقادیر R ₇₀ کم است، مقدار CSHT زیاد است که معنای آن استعداد کم زغال‌سنگ برای خودسوزی است.
Wen (2011)	به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پیریت در زغال‌سنگ در نرخ آزادسازی CO، CO ₂ و CH ₄ پرداخته شد. نتایج نشان داد با افزایش پیریت محتوی، تولید گازهای فوق در پدیده خودسوزی زغال‌سنگ افزایش می‌یابند.
Xuyao et al. (2011)	به طور مفصل به بررسی تاریخچه استفاده از روش دمای نقطه تقاطع پرداخته شد. همچنین به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف رطوبت، درجه زغال‌شدگی، ترکیبات سولفوری موجود در زغال‌سنگ و شرایط آزمایشگاهی بر اساس روش دمای نقطه تقاطع در خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد.
Beamish et al. (2012)	در این تحقیق به بررسی تأثیر پیریت در خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شده است.
Lilley et al. (2012)	به بررسی و مقایسه سه روش مختلف برای کمی‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ در معادن روباز پرداخته شد.
Ren et al. (2012)	تأثیر سیستم تهویه نوع Y در افزایش نشت هوا به فضای استخراج شده بررسی شد.
Wu et al. (2012)	گاز رادون بر اثر تجزیه مواد رادیواکتیو به طور طبیعی در سنگ، خاک و زغال‌سنگ وجود دارد و با افزایش دمای محیط، این گاز به تدریج زیاد می‌شود که از این مکانیسم در این تحقیق برای معرفی تئوری استفاده از گاز رادون برای شناسایی مکان منبع آتش‌سوزی ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ تا عمق ۸۰۰ متری زیرزمین و روند تغییر رفتار آتش استفاده شد.
Yuan & Smith (2012)	به بررسی تأثیر میزان حجم هوای تهویه در گرمایش خود به خودی زغال‌سنگ با استفاده از یک آون هم‌دمای (ایزوترمال) قابل برنامه‌ریزی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نرخ تهویه کمتر، اکسیژن کافی برای واکنش را فراهم نمی‌کند، در حالی که نرخ تهویه بیشتر اکسیژن کافی برای واکنش را فراهم می‌کند و منجر به خودسوزی زغال‌سنگ می‌شود.
Beamish et al. (2013)	به بررسی تأثیر نوع زغال‌سنگ در پدیده گرمایش خود به خودی زغال‌سنگ پرداخته شد.
Saffari et al. (2013)	با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی در لایه‌های زغال‌سنگ ارائه شد.
Sahu and Mahapatra (2013)	با استفاده از روش فازی-عصبی به پیش‌بینی خودسوزی زغال‌سنگ بر اساس نتایج داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شده است.
Qi et al. (2013)	به بررسی تغییر روش آزمایشگاهی R ₇₀ و ارائه روشی سریع برای تعیین R ₇₀ بر اساس تعیین یک رابطه بین اختلاف مقادیر میزان مصرف اکسیژن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد (ΔC _{O₂,70}) و شاخص نرخ خود گرمایی R ₇₀ پرداختند که به صورت رابطه ۳-۵ آورده شده است.
(۵-۳)	$R_{70} = 0.68504\Delta C_{O_2,70} + 0.12098$; $R^2 = 0.98036$

¹ - Critical Self-Heating Temperature

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Avila et al. (2014)	در این تحقیق مشخصات بافتی ۲۵ نمونه زغال‌سنگ مختلف از سراسر جهان بعد از فرآیند اکسیداسیون آرام (۰/۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از ۲۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) با استفاده از روش تجزیه و تحلیل پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات نمونه‌ها، قبل و بعد از اکسیداسیون بیانگر تغییرات مهم در ضریب بازتابی ویترنیت در نمونه‌های زغال‌سنگ با واکنش‌پذیری بالا بود.
Beamish et al. (2014)	به بررسی قابلیت کارایی و میزان دقت و قابلیت تکرارپذیری آزمایش‌ها در چهار آون آدیباتیک با استفاده از روش R ₇₀ در دو آزمایشگاه مختلف در کشور استرالیا پرداختند.
Sasaki et al. (2014)	به بررسی مدل‌سازی عددی خودسوزی زغال‌سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی پرداختند. در این تحقیق همچنین به مفهوم اصلاح شده زمان در معرض اکسیداسیون معادل (EOE) در زغال‌سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی با لحاظ کردن رطوبت (EOE- Moisture time) و ظرفیت اکسیداسیون در دماهای پایین برای پیش‌بینی نرخ گرمای تولیدی به عنوان تابعی از رطوبت زغال‌سنگ و غلظت اکسیژن در توده‌های زغال‌سنگ پرداختند. نتیجه کار آن‌ها نشان داد که زغال‌سنگ‌های حاوی درصد بالایی از رطوبت، از لحاظ افزایش دما مستعدتر هستند و دارای قطر بحرانی کوچک‌تری در مقایسه با زغال‌سنگ‌های دارای رطوبت کمتر هستند.
Arisoy & Beamish (2015)	به بررسی تأثیرات دوگانه پیریت و رطوبت در نرخ خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از یک آون آدیباتیک پرداختند. در این تحقیق سه سری نمونه مختلف در یک آون آدیباتیک بررسی شد. سری اول از نمونه‌ها دارای رطوبت و پیریت بودند که بسیار مستعد از لحاظ خودسوزی قلمداد می‌شدند. سری دوم فاقد رطوبت و پیریت بودند که استعداد خودسوزی آن‌ها از سری اول کمتر بود. در سری سوم نمونه‌ها فاقد پیریت اما دارای رطوبت بودند که این سری از نمونه‌ها دارای پتانسیل خودسوزی بسیار پایینی بودند.
Beamish & Theiler (2015)	به بررسی رفتار نرخ خودسوزی در هفت نمونه زغال‌سنگ مشابه از Queensland و New South Wales کشور استرالیا از نظر درجه زغال‌شدگی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اختلاف موجود در نرخ خودسوزی ناشی از میزان رطوبت محتوی مختلف در نمونه‌های زغال‌سنگ است.
Deng et al. (2015)	آن‌ها نمونه‌های زغال‌سنگ با درصد ترکیبات مختلف پیریت از ۰/۰٪، ۰/۳٪، ۰/۵٪، ۰/۷٪ تا ۰/۹٪ را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که پیریت به صورت غیرخطی در تسریع پدیده خودسوزی زغال‌سنگ شرکت می‌کند و نمونه‌های زغال‌سنگ با ۰/۵٪ پیریت محتوی بیش‌ترین مقدار آزادسازی CO، CO ₂ و جذب سطحی اکسیژن را دارند.
Wang et al. (2015)	به بررسی آزمایشگاهی خودسوزی زغال‌سنگ در دماهای پایین تحت جریان گاز اکسیژن با غلظت کم (۰/۲۱-۰/۱۰٪) و گاز متان با غلظت کم (۰/۳-۰/۰٪) پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب اکسیژن و متان در خودسوزی زغال‌سنگ تأثیرگذارند.
Xia et al. (2015)	نتایج این تحقیق نشان داد که مناطق با دمای بالا عمدتاً در نزدیکی جریان ورودی ^۱ هوا قرار دارند. حجم جریان زیاد و مقاومت تهویه بالا باعث می‌شود مناطق خودسوز و دمای خودسوزی افزایش بیشتری داشته باشد و نرخ پیشروی بالاتر باعث کاهش دما و کوچک‌تر شدن منطقه خودسوز می‌شود.

¹ - Equivalent Oxidation Exposure- time

² - Intake Airway

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Beamish et al. (2016)	به بررسی تأثیر هم‌جواری لایه زغال‌سنگ با توده‌های نفوذی آذرین پرداختند و متوجه شدند این نمونه‌های زغال‌سنگ در مجاورت این توده‌ها به طور مصنوعی درجه زغال‌شدگی‌شان افزایش پیدا کرده است و پتانسیل خودسوزی این نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
Hetao et al. (2016)	به بررسی و تجزیه و تحلیل خطر خودسوزی زغال‌سنگ در ناحیه تخریب شده در روش جبهه کار طولانی با استفاده از ساخت مدل فیزیکی سه‌بعدی با قابلیت تنظیم شیب پرداخته شد. در این تحقیق، تأثیر روش تهویه (صعودی و نزولی) و شیب لایه (از ۴۵- درجه تا ۴۵+ درجه) در تأمین اکسیژن مورد نیاز برای انجام خودسوزی در ناحیه تخریب شده در روش جبهه کار طولانی مطالعه شد. طبق نتایج مشخص شد، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در خودسوزی در ناحیه تخریب شده چگالی جریان هوا است.
Mohalik et al. (2016)	به بررسی مکانیسم، پارامترهای مؤثر و روش‌های آزمایشگاهی بررسی خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد.
Newham et al. (2016)	با استفاده از نسبت گازی گراهام و نسبت گازی اتیلن ^۱ به اتان ^۲ (C_2H_4 / C_2H_6) به جلوگیری و مدیریت خودسوزی در منطقه زغال‌سنگ Mannering در کشور استرالیا پرداختند.
Zhang et al. (2016 a)	به بررسی مکانیسم و سینتیک اکسیداسیون زغال‌سنگ در کپه‌های زغالی و نیز تأثیر پارامترهای رطوبت، اندازه ذرات، تخلخل، باد، ارتفاع کپه و زاویه کپه در خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد.
Zhang et al. (2016 b)	به مدل‌سازی عوامل تأثیرگذار در خودسوزی کپه‌های زغال‌سنگ در نرم‌افزار FLUENT پرداخته شد. نتایج نشان داد که تبخیر رطوبت از زغال‌سنگ نقش بحرانی در این خصوص ایفا می‌کند. همچنین افزایش ارتفاع کپه، کاهش درجه زغال‌شدگی، کاهش سرعت باد، کاهش گرمای از دست رفته از قسمت زیرین کپه تأثیرات مهمی در افزایش روند خودسوزی دارند؛ لذا پیشنهاد دادند به منظور کاهش دمای کپه و در نتیجه جلوگیری از خودسوزی باید ارتفاع کپه کم، ایجاد تهویه مناسب در اطراف کپه و موادی با قابلیت هدایت و رسانایی گرمایی بالا ^۳ در زیر کپه اجرا شود.
Zhao et al. (2016)	به بررسی تأثیر خشک کردن نمونه‌های زغال‌سنگ لیگنیت در اکسایش این نوع از زغال‌سنگ‌ها پرداخته شد. حاصل این تحقیق نشان داد با خشک شدن نمونه‌ها، حفرات و خلل و فرج زغال‌سنگ افزایش یافته و تمایل آن‌ها برای جذب و واکنش با اکسیژن افزایش یافته و در نتیجه پتانسیل خودسوزی افزایش می‌یابد. در بخشی دیگر از این تحقیق مشخص شد که با افزایش نرخ جریان اکسیژن از ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تا ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و نیز افزایش غلظت محتوی اکسیژن، واکنش شیمیایی بین اکسیژن و زغال‌سنگ افزایش یافته و در نتیجه نرخ اکسیداسیون و خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ افزایش می‌یابد.
Arisoy et al. (2017)	به بررسی اثر رطوبت و حالات مختلف رطوبت در طی فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد و مدل‌های ریاضی مختلف جابه‌جایی و تبخیر رطوبت از زغال‌سنگ بررسی شد.
Beamish & Theiler (2017)	این تحقیق نشان داد که برای افزایش تأثیر پیریت در خودسوزی زغال‌سنگ، پیریت باید به شکل مناسب (اندازه و ریخت‌شناسی) باشد. همچنین به این نتیجه رسیدند که حضور رطوبت در یک میزان قابل قبول برای واکنش اکسیداسیون پیریت به عنوان یک پارامتر کلیدی تلقی می‌شود.

¹- Ethylene

²- Ethane

³- High Thermal Conductivity

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Deng et al. (2017)	در این تحقیق با استفاده از روش گرماسنجی ثقلی (TGA) به بررسی پتانسیل خودسوزی سه نمونه از زغال سنگ‌های معادن کشور چین پرداخته شد.
Dou & Zhong (2017)	به بررسی اختلافات در ساختارهای شیمیایی، حضور ترکیب‌های واکنش‌پذیر، انرژی فعال‌سازی (E_a) و تغییرات آنتالپی (ΔH) ترکیبات موجود در زغال سنگ و تأثیر آن‌ها در خودسوزی پرداخته شده است.
Feng et al. (2017)	در این تحقیق به بررسی و مطالعات آزمایشگاهی در خصوص تغییر در خواص اکسیداسیون نمونه‌های زغال سنگ در قبل و بعد از برآشامی گاز CO_2 با رویکرد جلوگیری از خودسوزی در فضای تخریب شده جبهه کار طولانی پرداخته شد. حاصل این تحقیق نشان داد، بعد از تزریق CO_2 به ناحیه تخریب و پس از آن برآشامی و درآشامی این گاز با زغال سنگ‌های باقیمانده در ناحیه تخریب، غلظت گاز CO که به عنوان یک شاخص گازی مهم در ارزیابی خطر خودسوزی است، کمتر از زمان قبل از تزریق CO_2 است و این نشان می‌دهد که تزریق گاز CO_2 در ناحیه تخریبی مانعی از بروز این خطر در ناحیه تخریب است.
Kaminsky et al. (2017)	در این تحقیق به پیش‌بینی و تخمین پارامترهای سینتیک واکنش در اکسیداسیون دما پایین زغال سنگ پرداخته شد. همچنین به بررسی مزایا و معایب روش‌های دمای نقطه تقاطع و R_{70} پرداخته شد.
Liu & Qin (2017)	در این تحقیق به بررسی مدل چند رابطه‌ای فیزیکی بین پارامترهای نشت هوا، انتقال اکسیژن، انتقال گرما و واکنش‌های گرمازا در خودسوزی زغال سنگ با استفاده از نرم‌افزار COMBUSS-3D در ناحیه تخریب شده در روش جبهه کار طولانی در معدن زغال سنگ Hedong در ایالت Shanxi چین پرداخته شد. همچنین در این تحقیق پارامترهای تأثیرگذار در خودسوزی زغال سنگ در ناحیه تخریب شده مانند نرخ پیشروی، ضخامت زغال سنگ رها شده و حجم جریان تهویه از طریق این نرم‌افزار بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش نرخ پیشروی، کاهش ضخامت زغال سنگ رها شده و کاهش حجم جریان تهویه باعث کاهش خطر خودسوزی زغال سنگ در ناحیه تخریب شده می‌شوند.
Mohalik et al. (2017 a)	به توسعه شاخص ریسک خودسوزی ^۱ در معادن زغال سنگ روباز در کشور هند پرداخته شده است. این شاخص از طریق چهار پارامتر اصلی شامل خصوصیات ذاتی زغال سنگ، شرایط زمین‌شناسی، روش معدنکاری و عوامل محیطی تعیین می‌شود. این شاخص به پنج طبقه خیلی ایمن، ایمن، ریسک متوسط، ریسک بالا و ریسک به شدت بالا طبقه‌بندی می‌شود.
Peng et al. (2017)	به مدیریت هوشمند و ارائه مدل‌های پیش‌بینی خاکستری بهبود یافته برای پیش‌بینی خودسوزی کپه‌های زغالی انباشت شده در یک نیروگاه تولید برق پرداخته شد.
Rosenblum et al. (2017)	در این تحقیق به بررسی کاهش خطر خودسوزی کانه‌های سولفیدی با رویکرد استفاده از مواد شیمیایی مانند لیگنوسولفونات ^۲ (ترکیبی از سدیم، کلسیم و آمونیوم) پرداخته شد. نتیجه این تحقیق نشان داد این ماده شیمیایی که محصول فرعی از تجزیه چوب است یکی از مؤثرترین مواد برای بازدارنده بودن خودسوزی در سطح کانه‌های سولفیدی تازه استخراج شده است.

¹- Spontaneous Heating/ Fire Risk Index (SHFRI)

²- Lignosulfonate

توضیح مختصر	مؤلف (سال انتشار)
با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی در لایه‌های زغال‌سنگ ارائه شد.	Saffari et al. (2017)
به مدل‌سازی روش دمای نقطه تقاطع ^۱ در اکسیداسیون دما پایین زغال‌سنگ با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics پرداخته شده است. همچنین در این تحقیق تأثیر چهار پارامتر دمای اولیه، تخلخل، نرخ جریان گاز و غلظت اکسیژن در خودسوزی زغال‌سنگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تخلخل و غلظت اکسیژن تأثیر بیشتری در خودسوزی نسبت به سایر موارد دارند به این نحو که با افزایش هر یک از این موارد دمای نقطه تقاطع کاهش یافته و زغال‌سنگ زودتر دچار خودسوزی می‌شود.	Saleh et al. (2017)
در این تحقیق به بررسی تأثیر میزان غلظت اکسیژن از غلظت ۶ تا ۲۱ درصد در میزان اکسیداسیون زغال‌سنگ پرداخته شده است. نتیجه این تحقیق نشان داد تا دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و غلظت اکسیژن ۱۱/۷ تا ۱۶ درصد، میزان تغییرات در نرخ مصرف اکسیژن با دما چندان مشهود نیست؛ اما در دمای بالای ۹۵ درجه سانتی‌گراد با افزایش میزان غلظت اکسیژن از ۱۶ درصد به ۲۱ درصد، نرخ مصرف اکسیژن، افزایش دما و تولید CO و C ₂ H ₄ افزایش می‌یابد.	Su et al. (2017)
در این تحقیق به بررسی گروه‌ها و ساختارهای شیمیایی موجود در نمونه‌های زغال‌سنگ و تأثیر آن‌ها در خودسوزی با استفاده از روش‌های شیمی آلی و شیمی کوانتوم پرداخته شد. در این تحقیق مشخص شد واکنش‌های درگیر در اکسیداسیون کربونیل (CH=O)، واکنش‌هایی به شدت گرمازا هستند.	Xu et al. (2017 a)
به بررسی خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطع پرداخته شد. همچنین بر اساس نرخ گرمای تولیدی زغال‌سنگ، چهار مرحله برای خودسوزی زغال‌سنگ در روش دمای نقطه تقاطع در نظر گرفتند. مرحله ۱: تا دمای حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد واکنشی رخ نمی‌دهد، مرحله ۲: مرحله گرماگیر (دمای بین ۶۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد) که صرف تبخیر رطوبت می‌شود، مرحله ۳: مرحله گرمازای شدید (دمای بین ۱۴۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) و مرحله ۴: مرحله گرمازای ثابت (دمای بین ۲۲۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد) که تمام اکسیژن موجود در محفظه واکنش مصرف می‌شود.	Xu et al. (2017 b)
در این تحقیق به بررسی اثر رطوبت و غوطه‌وری زغال‌سنگ در آب برای مدت طولانی پرداخته شد. نتیجه این تحقیق نشان داد که خودسوزی زغال‌سنگ برای زغال‌سنگ‌های مرطوب کم است. در صورت خشک شدن زغال‌سنگ و از بین رفتن رطوبت به دلیل اینکه حجم حفرات و شکستگی‌های موجود در زغال‌سنگ افزایش می‌یابد و اکسیژن بیشتری می‌تواند جذب زغال‌سنگ شود، خودسوزی زغال‌سنگ افزایش می‌یابد.	Yang et al. (2017)

^۱- Crossing Point Temperature

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
جهانبانی و همکاران (۱۳۹۶)	در این تحقیق به بررسی ارزیابی ریسک خودسوزی زغال‌سنگ در انباشتگاه زغال به روش تحلیل درخت خطای فازی پرداخته شده است. در این تحقیق ابتدا عوامل مؤثر در خودسوزی زغال‌سنگ شناسایی و سپس با استفاده از روش تحلیل درخت خطا به ریشه‌یابی خطر خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شد. به منظور محاسبه احتمال رویدادهای اساسی و در نهایت رسیدن به نرخ احتمال وقوع رویداد نهایی (خطر خودسوزی زغال‌سنگ) و با توجه به این‌که رفتار خودسوزی زغال پیچیده بوده و دستیابی به احتمال دقیق رویدادهای اساسی در ساختار درخت خطای این رویداد دشوار و با عدم قطعیت همراه است، برای تخصیص وزن احتمالات به رویدادهای اساسی از منطق و اعداد فازی استفاده شده است.
Beamish et al. (2018)	به پیاده‌سازی و ارزیابی طرح مدیریت خودسوزی در معدن زغال‌سنگ روباز Meandu در ایالت کوئینزلند کشور استرالیا پرداختند.
Behera & Sahu (2018)	به ارزیابی پتانسیل خودسوزی ۴۸ نمونه زغال‌سنگ از کشور هندوستان با استفاده از روش آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA) پرداخته شد و بین این شاخص و مشخصات ذاتی نمونه‌های زغال‌سنگ ارتباط برآزشی برقرار شد.
Deng et al. (2018)	در این تحقیق به تعیین و پیش‌بینی سه منطقه از خودسوزی زغال‌سنگ در ناحیه تخریب شده در روش تمام مکانیزه پرداخته شده است. در تعیین این سه منطقه، سه پارامتر اساسی سرعت نشت هوا، غلظت اکسیژن و دما لحاظ شده است که در این بین دما مهم‌ترین پارامتر است. در این تحقیق همچنین حداقل نرخ پیشروی برای جلوگیری از خودسوزی ۴/۸ متر در روز تعیین شد.
Onifade & Genc (2018 a, b)	در این تحقیقات به بررسی خودسوزی در نمونه‌های زغال‌سنگ و شیل زغال‌سنگ پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش کربن، رطوبت، هیدروژن، مواد فرار، نیتروژن و پیریت و کاهش خاکستر محتوی، خودسوزی زغال‌سنگ و شیل زغال‌سنگ افزایش می‌یابد.
Shi et al. (2018)	در این تحقیق به بررسی تأثیر نفوذ توده‌های آذرین در ساختارهای فیزیکی - شیمیایی زغال‌سنگ و تمایل این لایه‌ها به خودسوزی پرداخته شد. در این مطالعه موردی، نمونه‌هایی که تحت تأثیر توده‌های نفوذی آذرین قرار گرفته بودند و نمونه‌هایی که تحت تأثیر قرار نگرفته بودند از معادن زغال‌سنگ بیتومینه Daxing کشور چین جمع‌آوری شدند. در مقایسه مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها مشخص شد که نمونه‌هایی که تحت تأثیر توده‌های نفوذی آذرین قرار گرفته بودند دارای تخلخل بیشتر، حجم منافذ بیشتر و قطر منافذ متوسط بزرگ‌تری بودند که باعث می‌شود این زغال‌سنگ‌ها دارای ظرفیت انتقال اکسیژن بیشتری در منافذ باشند و دسترسی اکسیژن به سطح منافذ افزایش پیدا کند و تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی افزایش یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد حاصل کار این محققین با حاصل کار Beamish و همکارانش در سال ۲۰۱۶ کاملاً برعکس است.
Singh et al. (2018)	در این تحقیق به بررسی تأثیرات مختلف زیست‌محیطی ناشی از رخداد پدیده خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شده است و مشخص شد هوا، آب و خاک هر سه از این پدیده ناخواسته زیست‌محیطی تأثیر می‌پذیرند.

مؤلف (سال انتشار)	توضیح مختصر
Wang et al. (2018)	در این تحقیق به بررسی گرمای ناشی از مرطوب‌سازی نمونه زغال‌سنگ‌های خشک با استفاده از اصلاح دستگاه R70 پرداخته شد. در این دستگاه به تله خلا ^۱ که در آن آب ریخته می‌شود و گاز اکسیژن از آن عبور می‌کند و با نمونه زغال‌سنگ واکنش می‌دهد به تجهیزات دستگاه R70 افزوده شد و حجم نمونه از ۱۵۰ گرم به ۲۰۰ گرم افزایش و نرخ جریان اکسیژن از ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه کاهش یافت که با این تغییرات، اکسیژن کاملاً جذب زغال‌سنگ می‌شود. نتایج آزمایش نشان داد که افزایش رطوبت نقش بسیار مهمی در شروع فرآیند خودسوزی و پیشرفت خودسوزی زغال‌سنگ دارد.
Wojtacha-Rychter & Smoliński (2018)	در این تحقیق به بررسی پدیده جذب سطحی و واجذبی گاز آزاد شده در طی گرمایش زغال‌سنگ در دماهای مختلف (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) پرداخته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد، مقدار گاز جذب شده به صورت سطحی بستگی به نوع زغال‌سنگ، دمای گرمایش و نوع گاز دارد. نتایج نشان داد، بیشترین مقدار جذب مخصوص گاز پروپیلن ^۲ ، در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در زغال‌سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج نشان داد، مقدار گاز خارج شده در طی فرآیند گرمایش زغال‌سنگ بستگی به نوع زغال‌سنگ و ساختار خلل و فرج آن دارد. نتایج نشان داد در مراحل اولیه گرمایش، گازهای دی‌اکسید کربن و کربن مونوکسید تولید می‌شود و با افزایش دما گازهای اتان، اتیلن، پروپان، پروپیلن و استیلن در مراحل بعد تولید می‌شود.
Wu et al. (2018)	در این تحقیق به بررسی خودسوزی گرد زغال‌سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطع (CPT) پرداخته شد. نتایج آزمایش نشان داد که مقدار دمای نقطه تقاطع با افزایش میزان اکسیژن و افزایش درجه زغال‌شدگی کاهش می‌یابد و در نتیجه قابلیت خودسوزی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد رطوبت محتوی زغال‌سنگ باعث به تعویق افتادن فرآیند خودسوزی خواهد شد به نحوی که هرچه میزان رطوبت محتوی بیشتر باشد، فرآیند گرمایش آرام‌تر رخ خواهد داد.

جدول ۳-۲ برخی از مشخصات ذاتی، معدنکاری و زمین‌شناسی زغال‌سنگ را که توسط تعدادی از محققین در زمینه‌ی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ مورد مطالعه قرار گرفته شده است را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در برخی از این تحقیقات رابطه ریاضی خاصی بین مشخصات ذاتی زغال‌سنگ و قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ ارائه نشده است و تنها به ذکر با اهمیت بودن این پارامتر در فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ اکتفا شده است.

¹ - Vacuum Trap

² - Propylene

جدول ۳-۲: برخی از مشخصات ذاتی، معدنکاری و زمین‌شناسی زغال‌سنگ مطالعه شده توسط محققین.

	R	P	Mo	Ma	A	PS	VM	O ₂	GC	Po	MSE	II	V	EM	AR	DS	TR	DAS
Parr & Hilgard, 1925		•																
Davis & Byrne, 1926			•															
Jones and Townend, 1949			•															
Yohe, 1958			•															
Stott, 1960			•															
Hodges & Hinsley, 1964			•															
King et al., 1964			•															
Nandy et al., 1967			•															
Bhattacharyya et al., 1968			•															
Banerjee et al., 1970			•															
Guney, 1971			•															
Bhattacharyya, 1971			•															
Bhattacharyya, 1972			•															
Nandy et al., 1972			•				•	•										
Sondreal & Ellman, 1974			•															
Hodges et al., 1976			•															
Marinov, 1977 a							•											
Armstrong, 1979			•															
Humphreys, 1979				•														
Kuchta et al., 1980	•																	
Humphreys et al., 1981	•																	
Nordon & Bainbridge, 1983			•															
Banerjee, 1985			•			•							•					
Schmal et al., 1985			•															
Brooks & Glasser, 1986			•															
Ghosh, 1986		•																
Li & Skinner, 1986			•															
Rahman et al., 1986	•																	
Cole et al., 1987		•																
Riley et al., 1987	•	•	•		•	•			•									
Weise et al., 1987		•																
Chandra & Prasad, 1990		•					•											
Chandra et al., 1990	•			•														
Mitchell, 1990											•							
Palmer et al., 1990						•												
Buckmaster & Kudynska, 1992			•															
Kudynska & Buckmaster, 1992			•															
Reich et al., 1992			•															
Miron et al., 1992		•																
Chen & Stott, 1993			•															
Arisoy & Akgun, 1994			•			•		•										
Barve & Mahadevan, 1994			•		•													
Chen, 1994			•															
Bhat & Agarwal, 1996			•															
Clemens & Matheson, 1996			•															
Krishnaswamy et al., 1996			•															
Vance et al., 1996			•															
Walters, 1996		•																
Cotterell, 1997				•														
Ceglarska-Stefanska et al., 1998			•															
Garcia et al., 1999								•										
Gong et al., 1999			•															
Kawatra and Hess, 1999			•															
Ren et al., 1999			•															
Sujanti & Zhang, 1999	•					•												
Sujanti et al., 1999	•					•			•									
Nugroho et al., 2000 a,b						•												
Akgun & Essenhigh, 2001			•															
Beamish et al., 2001	•																	
Jones, 2001			•															
Panigrahi & Saxena, 2001			•		•		•											
Kadioglu & Varamaz, 2003			•							•								
Kucuk et al., 2003			•				•											
Mitchel, 2003			•										•					
Wang et al., 2003 a			•															
Beamish & Daly, 2004									•									
Beamish, 2005	•																	
Beamish & Blazak, 2005					•													
Beamish & Hamilton, 2005			•															
Beamish & Jabouri, 2005									•									
Beamish et al., 2005	•		•		•													
Ren & Balusu, 2005													•		•			
Ren et al., 2005															•			
Smith & Glasser, 2005			•			•		•										
Wu & Li, 2005		•																
Arisoy et al., 2006			•															
Cao et al., 2007																•		
Nelson & Chen, 2007	•	•																

ادامه‌ی جدول ۲-۳: برخی از مشخصات ذاتی، معدنکاری و زمین‌شناسی زغال‌سنگ مطالعه شده توسط محققین.

	R	P	Mo	Ma	A	PS	VM	O ₂	GC	Po	MSE	II	V	EM	AR	DS	TR	DAS
Ramlu, 2007									*									
Singh et al., 2007	*	*	*															
Beamish & Arisoy, 2008 a	*				*													
Beamish & Sainsbury, 2008					*													
Beamish & Schultz, 2008			*															
Majumder et al., 2008			*															
Bo-tao et al., 2009															*			
Li et al., 2009			*															
Ozdeniz, 2009						*												
Wang et al., 2009			*															
Arisoy, 2010				*														
Beamish & Beamish, 2010			*															
Baris et al., 2011	*					*												
Beamish & Beamish, 2011		*	*															
Taraba & Michalec, 2011						*									*			
Wen, 2011		*																
Beamish & Beamish, 2012			*															
Beamish et al., 2012		*																
Ren et al., 2012													*					
Yuan & Smith, 2012													*					
Beamish et al., 2013	*																	
Sahu & Mahapatra, 2013			*		*		*											
Wang et al., 2013			*															
Xu et al., 2013			*															
Hooman & Maas, 2014	*		*			*												
Panigrahi & Ray, 2014			*															
Sasaki et al., 2014	*		*															
Arisoy & Beamish, 2015		*	*															
Beamish & Theiler, 2015		*	*															
Deng et al., 2015		*																
Xia et al., 2015													*					
Beamish et al., 2016												*	*		*			
Choudhury et al., 2016			*															
Hetao et al., 2016													*					*
Zhang et al., 2016 a			*			*				*								
Zhao et al., 2016			*			*												
Arisoy et al., 2017			*															
Beamish & Theiler, 2017		*	*															
Liu & Qin, 2017													*		*		*	
Mohalik et al., 2017 b				*														
Yang et al., 2017			*															
Onifade & Genc, 2018 a, b		*	*		*		*											
Oren & Sensogut, 2018						*												
Shi et al., 2018												*						
Wang et al., 2018			*															
Wu et al., 2018	*		*					*										
Zhang et al., 2018			*															

اختصارات

R : درجه زغال‌شدگی ^۱	P : پیریت محتوی ^۲	Mo : رطوبت محتوی ^۳	Ma : ماسرال ^۴
A : خاکستر محتوی ^۵	PS : اندازه ذرات ^۶	VM : مواد فرار ^۷	O₂ : اکسیژن ^۸
GC : گاز محتوی ^۹	Po : تخلخل ^{۱۰}	MSE : استخراج چند لایه‌ای ^{۱۱}	II : توده نفوذی آذرین ^{۱۲}
V : تهویه ^{۱۳}	EM : روش استخراج ^{۱۴}	AR : نرخ پیشروی ^{۱۵}	DS : عمق لایه ^{۱۶}
TR : ضخامت لایه زغال‌سنگ باقی‌مانده ^{۱۷}	DAS : زاویه شیب لایه ^{۱۸}		

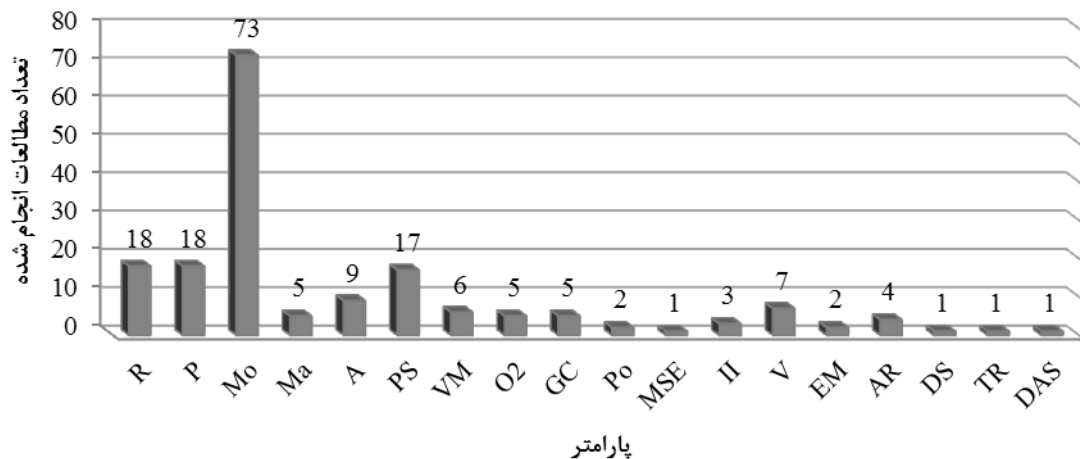
مطابق جدول ۲-۳ از میان پارامترهای مطالعه شده توسط محققین، مشخصات ذاتی زغال‌سنگ

مخصوصاً رطوبت محتوی، درجه زغال‌شدگی، پیریت محتوی، اندازه ذرات و خاکستر محتوی در اکثر

مطالعات مورد بررسی قرار گرفته شده است یا اهمیت آن‌ها مورد تأکید واقع شده‌اند که نشان از

1- Coal Rank	2- Pyrite Content	3- Moisture Content	4- Maceral	5- Ash Content
6- Particle Size	7- Volatile Matter	8- Oxygen	9- Gas Content	10- Porosity
11- Multi Seam Extraction	12- Igneous Intrusions	13- Ventilation	14- Extraction Method	15- Advanced Rate
16- Deep Seam	17- Thickness Residual	18- Dip Angles Seam		

اهمیت این عوامل دارد. در شکل ۳-۱ نیز فراوانی مطالعات انجام شده روی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر پدیده خودسوزی زغال سنگ مطابق با جدول ۳-۲ قابل مشاهده است که بیش از ۸۸ درصد مطالعات در خصوص تأثیر مشخصات ذاتی زغال سنگ بر روی خودسوزی زغال سنگ است.

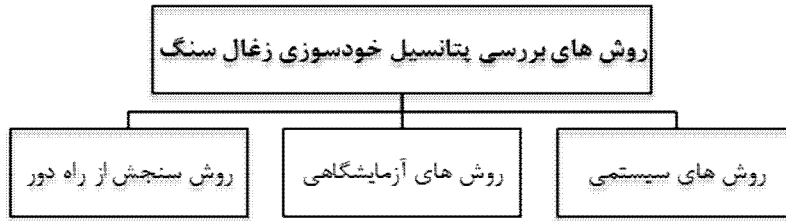


شکل ۳-۱: فراوانی مطالعات انجام شده بر روی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر پدیده خودسوزی زغال سنگ.

۳-۳- روش‌های ارزیابی خودسوزی زغال سنگ

از مطالب جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ که شامل مروری بر منابع مختلف موجود در زمینه خودسوزی زغال سنگ است، برمی‌آید تاکنون مطالعات وسیعی در خصوص چگونگی پیدایش، پیش‌بینی، پیش‌گیری، کنترل و تأثیر پارامترهای مختلف در خودسوزی زغال سنگ انجام گرفته است، در ادامه پرکاربردترین روش‌های ارزیابی رفتار و تعیین قابلیت خودسوزی در معادن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

کشورهای مختلف با توجه به اقتضای نیازشان در بررسی خودسوزی زغال سنگ از روش‌های مختلفی برای ارزیابی خودسوزی استفاده کرده‌اند؛ که مجموعه روش‌های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ را می‌توان به سه گروه کلی طبقه‌بندی کرد که این طبقه‌بندی در شکل ۳-۲ آورده شده است.



شکل ۳-۲: طبقه بندی روش های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ.

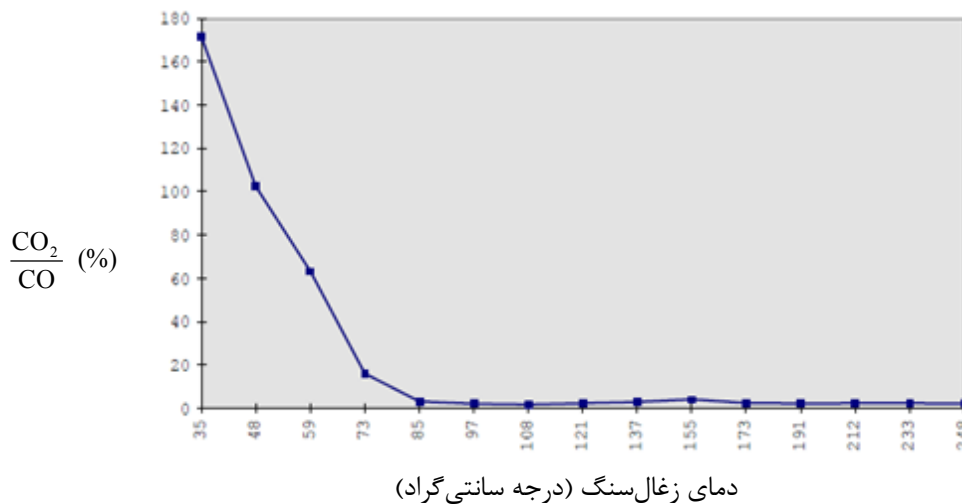
۳-۳-۱- روش های سیستمی

الف- نسبت $\frac{CO_2}{CO}$

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

در شکل ۳-۳ تأثیر افزایش دمای ناشی از اکسیداسیون و خودسوزی زغال سنگ در برابر

تغییرات نسبت $\frac{CO_2}{CO}$ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: تأثیر افزایش دما در تغییرات نسبت $\frac{CO_2}{CO}$ (Sensogut, 1999).

همان طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می شود، نسبت $\frac{CO_2}{CO}$ با افزایش دما با شیب تندی کاهش

می یابد و در حدود دمای ۱۰۸ درجه سانتی گراد 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 عبارت‌اند از (Sensogut, 1999):

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

- قابلیت ایجاد کربن مونوکسید از منابع مختلف گرمایی وجود دارد و تنها مختص به گرمایش خود به خودی زغال‌سنگ نیست.

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

ب- نسبت گراهام^۱

نسبت $\frac{CO}{O_2}$ در سال ۱۹۲۰ به عنوان مقیاسی برای تأیید وجود گرمایش استفاده شد. این نسبت همچنین به عنوان شاخص گراهام^۲ یا شاخص کربن مونوکسید^۳ 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 رابطه ۳-۶ بیان می‌شود.

$$GR = \frac{CO}{0.2648 \times N_2 - O_2} \times 100 \quad (۳-۶)$$

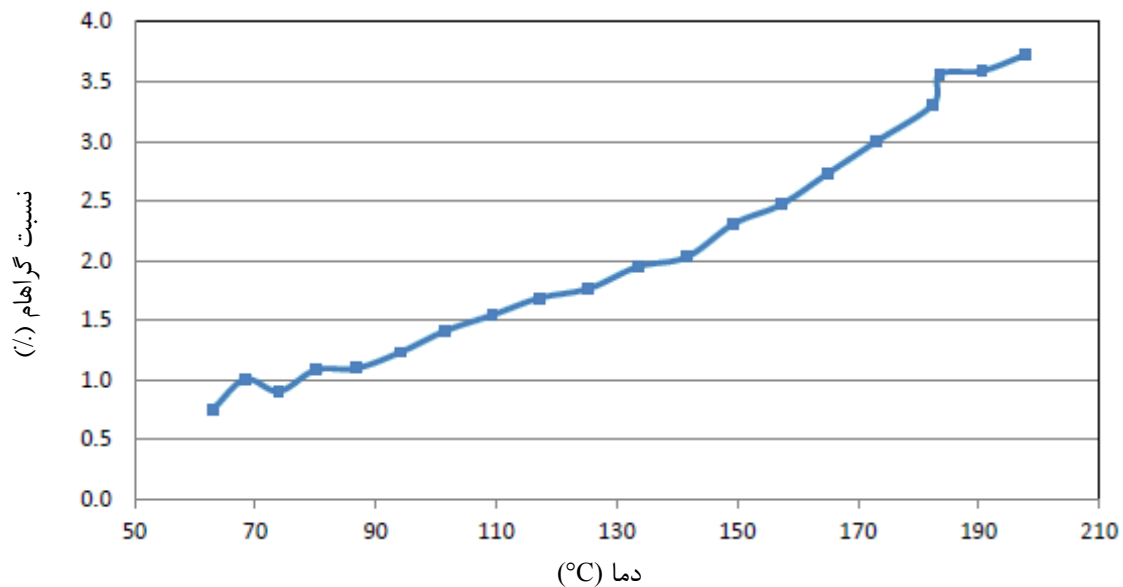
CO، N₂ و O₂ درصد گازهای مونوکسید کربن، نیتروژن و اکسیژن موجود در نمونه هوای ناحیه‌ی مورد گرمایش معدن در زمان نمونه‌برداری است.

¹- Graham's Ratio

²- Graham Index

³- Carbon Monoxide Index

در شکل ۳-۴ نمونه‌ای از نمودار نسبت گراهام در برابر افزایش دما آورده شده است. جدول ۳-۳ نیز طبقه‌بندی خطر در پدیده گرمایش خود به خودی را با استفاده از نسبت گراهام نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: نمونه‌ای از نمودار نسبت گراهام در برابر افزایش دما (Levi et al., 2013).

جدول ۳-۳: 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 آتش‌سوزی

ج- سیستم ارزیابی لهستانی^۱

Olpinski و همکاران در سال ۱۹۵۲، ارتباط بین مشخصات طبیعی زغال‌سنگ و عوامل فنی و معدنکاری مؤثر در خطر خودسوزی در کشور لهستان را به هفت فاکتور اساسی مختلف طبقه‌بندی و

^۱ - Polish System

این پارامترها را از S_1 تا S_7 نام‌گذاری کردند، سپس شاخص خطر ابتلا به خودسوزی را به صورت رابطه ۷-۳ بیان کردند (Banerjee, 1985).

$$P_s = S_z(b) + (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7) \quad (7-3)$$

P_s : احتمال خطر خودسوزی

S_1 : مقادیر عددی مربوط به روش معدنکاری (استخراج)

S_2 : مقادیر عددی مربوط به نرخ بازیابی لایه زغال سنگ

S_3 : مقادیر عددی مربوط به جهت استخراج لایه زغال سنگ

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

S_5 : مقادیر عددی مربوط به میزان رطوبت لایه زغال سنگ

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 سنگ

$S_z(b)$: شاخص Olpinski، مشخصه قابلیت زغال سنگ برای خودسوزی است که از سرعت

افزایش دمای زغال سنگ برای یک دقیقه تحت شرایط آزمایشگاهی به دست می‌آید. این شاخص از

رابطه ۸-۳ به دست می‌آید.

$$S_z(b) = S_z(a) - \frac{100}{100 - A_a} \quad (8-3)$$

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

A_a : خاکستر محتوی زغال سنگ برحسب درصد.

پتانسیل زغال سنگ برای خودسوزی با افزایش $S_z(b)$ ، افزایش می‌یابد که طبقه‌بندی شاخص

Olpinski در جدول ۴-۳ آورده شده است.

جدول ۴-۳: طبقه‌بندی شاخص Olpinski (Nimaje and Tripathy, 2016).

وضعیت خودسوزی	$S_z(b)$ ($^{\circ}C/min$)
بسیار ضعیف	< ۸۰
متوسط	۸۰-۱۲۰
شدید	> ۱۲۰

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 زغال‌سنگ به سه دسته‌ی بدون خطر، نیمه خطرناک و خطرناک طبقه‌بندی می‌شوند (Banerjee, 1985).

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

د- نسبت جونز- تریکت^۱

این نسبت در سال ۱۹۵۴ توسط Jones و Trickett ابداع شد که با رابطه ۳-۹ بیان می‌شود (Sensogut, 1999).

$$JTR = \frac{\%CO_2 + 0.75\%CO - 0.25\%H_2}{0.265\%N_2 - \%O_2} \quad (۹-۳)$$

با استفاده از نسبت جونز- تریکت و جدول ۳-۵ می‌توان محدوده‌های خطر را تعریف کرد.

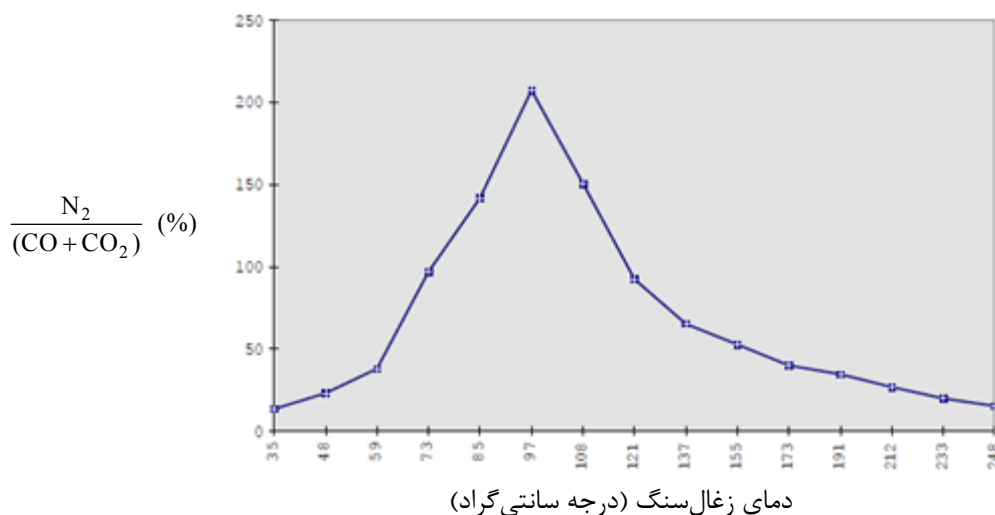
جدول ۳-۵: طبقه‌بندی نواحی خطر با استفاده از نسبت جونز- تریکت (Michalski et al., 1990).

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

^۱ - Jones- Trickett Ratio

ه- نسبت نیتروژن به اکسیدهای کربن

این نسبت اولین بار توسط Partington در سال ۱۹۱۹ برای پیش‌بینی افزایش دمای ناشی از پدیده گرمایش زغال‌سنگ بیان شد. وی بیان کرد که نسبت $\frac{N_2}{\text{اکسیدهای کربن}}$ با افزایش دما، افزایش می‌یابد؛ اما نتایج کارهای Chamberlain در سال ۱۹۷۰ تا حدودی با نتایج کارهای Partington تناقض داشت و قسمتی از کار وی را رد کرد. همان‌طور که در شکل ۳-۵ که از نتایج کار Chamberlain است، مشاهده می‌شود نسبت $\frac{N_2}{\text{اکسیدهای کربن}}$ با افزایش دما تا حدود دمای ۹۷ درجه سانتی‌گراد به سرعت افزایش می‌یابد و سپس به سرعت کاهش می‌یابد؛ لذا این نسبت، نسبت درستی برای تعیین پدیده خودسوزی زغال‌سنگ نیست (Sensogut, 1999).



شکل ۳-۵: تغییرات در نسبت $N_2/(CO+CO_2)$ با افزایش دما (Sensogut, 1999).

و- روش هندی

Banerjee در سال ۱۹۸۲ در کشور هندوستان یک سیستم کیفی برای تعیین خطر خودسوزی زغال‌سنگ ارائه کرد که در آن از ۲۲ مجموعه اجزای مختلف استفاده می‌شود، این سیستم طبقه‌بندی در جدول ۳-۶ آورده شده است.

در این سیستم، امتیازدهی کیفی به پارامترها بدین صورت انجام می‌شود که هر پارامتر به دو جز تقسیم می‌شود، هر جزئی که در خطر ابتلا به خودسوزی زغال‌سنگ کمک می‌کند احتمال «زیاد»

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

جدول ۳-۶: مجموعه اجزای مؤثر در خطر خودسوزی در روش هندی (Banerjee, 1982).

ردیف	پارامترها/ شرایط معدنکاری	مجموعه اجزا	احتمال خطر خودسوزی
۱	نوع زغال سنگ (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 زمین‌شناسی	وجود دارد.	زیاد
		وجود ندارد.	کم
۹	ترکیب 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	چداکننده‌ها	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
۱۴	وضعیت تجمع خاکه زغال سنگ	انباشت و تجمع خاکه زغال سنگ	زیاد
		جمع‌آوری خاکه زغال سنگ	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 زمین‌گرمایی	وجود دارد.	زیاد
		وجود ندارد.	کم
۱۹	میزان انتشار گاز	کم	زیاد
		زیاد	کم
۲۰	اندازه پهنا 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

ز- سیستم ارزیابی SES¹

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

سیستم ارزیابی SES برای برنامه ریزی و مدیریت تخمین خطر خودسوزی در کانسارها و ذخایر زغال سنگ جدید و نواحی زغال خیزی که داده های آماری برای ارزیابی خطر خودسوزی در آنها ناکافی است، قابل استفاده است. این سیستم در معادن تازه کار، امکان ارزیابی کارآیی تغییرات فناوری و به کارگیری روش های جدید پیشگیرانه و آشکارساز خطر را فراهم می کند (Michaylov, 2002).

در این سیستم از فاکتورهای طبیعی و فناوری، برای ارزیابی خطر استفاده شده است که در جدول ۳-۷ آورده شده اند؛ جدول ۳-۸ و جدول ۳-۹ جز اقدامات پیشگیرانه از خودسوزی است. با استفاده از امتیاز شاخص های S^1 تا S^{11} به دست آمده از جدول های ۳-۷ تا ۳-۹ و مقدار به دست آمده از رابطه ۳-۱۰، نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی به چهار دسته طبقه بندی می شوند که در جدول ۳-۱۰ آورده شده است.

$$D_s = \sum_{i=1}^{11} S^i \quad (3-10)$$

اگر در مجاورت ناحیه برنامه ریزی شده برای معدنکاری، در یک لایه مشخص، قبلاً پدیده خودسوزی زغال سنگ اتفاق افتاده باشد هر محدوده خطری که از جدول ۳-۱۰ به دست آمد به یک مرحله بالاتر انتقال می یابد. بدین معنا که مثلاً اگر پس از محاسبات، جبهه کاری در محدوده خطر «مورد 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 می یابد (Michaylov, 2002).

¹- Sponcom Expert System

جدول ۳-۷: امتیازدهی مربوط به سیستم ارزیابی SES (Michaylov, 2002).

امتیاز S ¹	فاکتور S وابسته به دگرسانی (دگرگونی) زغال سنگ، تعیین شده از طریق فاصله دمایی				قابلیت گرمایش انواع زغال سنگ (S ¹)
	لیگنیت (۱۰۰-۱۵۰) °C	زغال سنگ قهوه‌ای (۱۲۵-۱۷۵) °C	زغال سنگ سیاه -۲۰۰ °C (۱۵۰)	آنتراسیت -۲۰۰ °C (۱۵۰)	
۱-۲	< ۴	< ۱۰	< ۹	< ۸	کمترین قابلیت
۲-۶	۴-۸	۱۰-۱۶	۹-۱۵	۸-۱۲	قابلیت متوسط
۶-۱۰	> ۸	> ۱۶	> ۱۵	> ۱۲	بالاترین قابلیت
	> ۳/۲۰	۲/۴۰-۳/۲۰	۱/۲۰-۲/۴۰	< ۱/۲	ضخامت لایه (متر)
۶-۱۰	۳-۵	۲-۳	۱		امتیاز S ²
۴۵-۹۰	۳۰-۴۵	۱۵-۳۰	۰-۱۵		شیب (درجه)
۴-۵	۳	۲	۱		امتیاز S ³
> ۱۵	۱۰-۱۵	۵-۱۰	کمتر از ۵	۰	q, m ³ /Mg
۶-۸	۳-۵	۲-۳	۱	۰	امتیاز S ⁴
	فراوانی زیاد	فراوانی کم	ناموجود		وضعیت گسل‌ها
	بیشتر از ۲ عدد/ ۵۰۰ متر	کمتر از ۲ عدد/ ۵۰۰ متر	۰		فراوانی در طول امتداد لایه
۴-۶		۱-۳	۰		امتیاز S ⁵
	امتیاز S ⁶ برای سرعت هوا، m/s				نقشه (طرح) تهویه
> ۱	> ۰/۵ ≤ ۱	≤ ۰/۵			
۲	۱/۵	۱			UR,WR
۴	۳/۵	۳			YR,ZR,ZA
۸	۶/۵	۶			HA,HR,YA,UA
۱۰	۹	۸/۵			WA
در نوع طرح تهویه، کدهای R و A به ترتیب بیانگر ترتیب حفاری معکوس و ترتیب حفاری مستقیم است.					
	زیاد	محدود	نداریم		هدر رفت زغال
۵-۱۰		۱-۴	۰		امتیاز S ⁷
> ۳۵	۳۰-۳۵	۲۵-۳۰	۲۰-۲۵	۱۵-۲۰	دمای طبیعی زغال
-۱۰	۵-۸	۳-۵	۲-۳	۱	امتیاز S ⁸
۸					
	امتیاز S ⁹ برای رطوبت نسبی هوا (برحسب %)				دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)
> ۸۰	۶۵-۸۰	< ۶۵			
-۱	-۲	-۳			۱۵-۱۹
۲	۱	۰			۲۰-۲۵
۳-۵	۳-۴	۲-۳			۲۶-۳۰
۶-۱۰	۶-۷	۵-۶			> ۳۰

¹ - Scheme

جدول ۳-۸: امتیازدهی مربوط به اقدامات پیشگیرانه برای نواحی استخراج شده، (S¹⁰) (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 ۳-۹: امتیازدهی مربوط به اقدامات پیشگیرانه برای طراحی پایه‌ها و واحدهای تهویه برای نواحی استخراج شده، (S¹¹) (Michaylov, 2002).

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

جدول ۳-۱۰: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی (Michaylov, 2002).

محدوده خطر	امتیاز به دست 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

ح - سیستم ارائه شده توسط Singh و همکاران

این سیستم ارزیابی توسط Singh و همکاران در سال ۲۰۰۲ ارائه شده است. در این سیستم ارزیابی، پیش‌بینی خطر خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از اطلاعات امتیازدهی توسط دو جدول که جدول ۳-۱۱ مربوط به افزایش دما و گرماسنجی زغال‌سنگ تحت شرایط آدیاباتیک است و جدول ۳-۱۲ مربوط به فاکتورهای ذاتی و معدنکاری زغال‌سنگ است، به دست می‌آید.

ارزیابی رفتار پدیده خودسوزی زغال‌سنگ در یک عملیات معدنی از جمع کردن امتیازات حاصل از جدول‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۲ به دست می‌آید. نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی در این روش به چهار دسته، طبقه‌بندی می‌شوند که در جدول ۳-۱۳ آورده شده است (Singh et al., 2002).

جدول ۳-۱: امتیازدهی مربوط به افزایش دما و گرماسنجی زغال سنگ تحت شرایط آدیباتیک (Singh et al., 2002).

نتایج آزمایش آدیباتیک ^۱ (بی دررو)			
درجه بندی	امتیازبندی ریسک (خطر) حاصل از نتایج آزمایش آدیباتیک	افزایش دمای کل ^۳ (TTR)، (°C)	نرخ (سرعت) گرمایش اولیه ^۲ (IRH)، (°C/min)
کم	۱	<۲/۵	<۰/۶
متوسط	۲	۲/۵ تا ۴/۵	۱/۲ تا ۰/۶
زیاد	۴	۴/۵ تا ۷	۲ تا ۱/۲
خیلی زیاد	۸	>۷	>۲

جدول ۳-۱۲: امتیازدهی مربوط به فاکتورهای ذاتی و معدنکاری زغال سنگ (Singh et al., 2002).

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

^۱ - Adiabatic

^۲ - Initial Rate Heating

^۳ - Total Temperature Rise

جدول ۳-۱۳: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر ابتلا به خودسوزی (Singh et al., 2002).

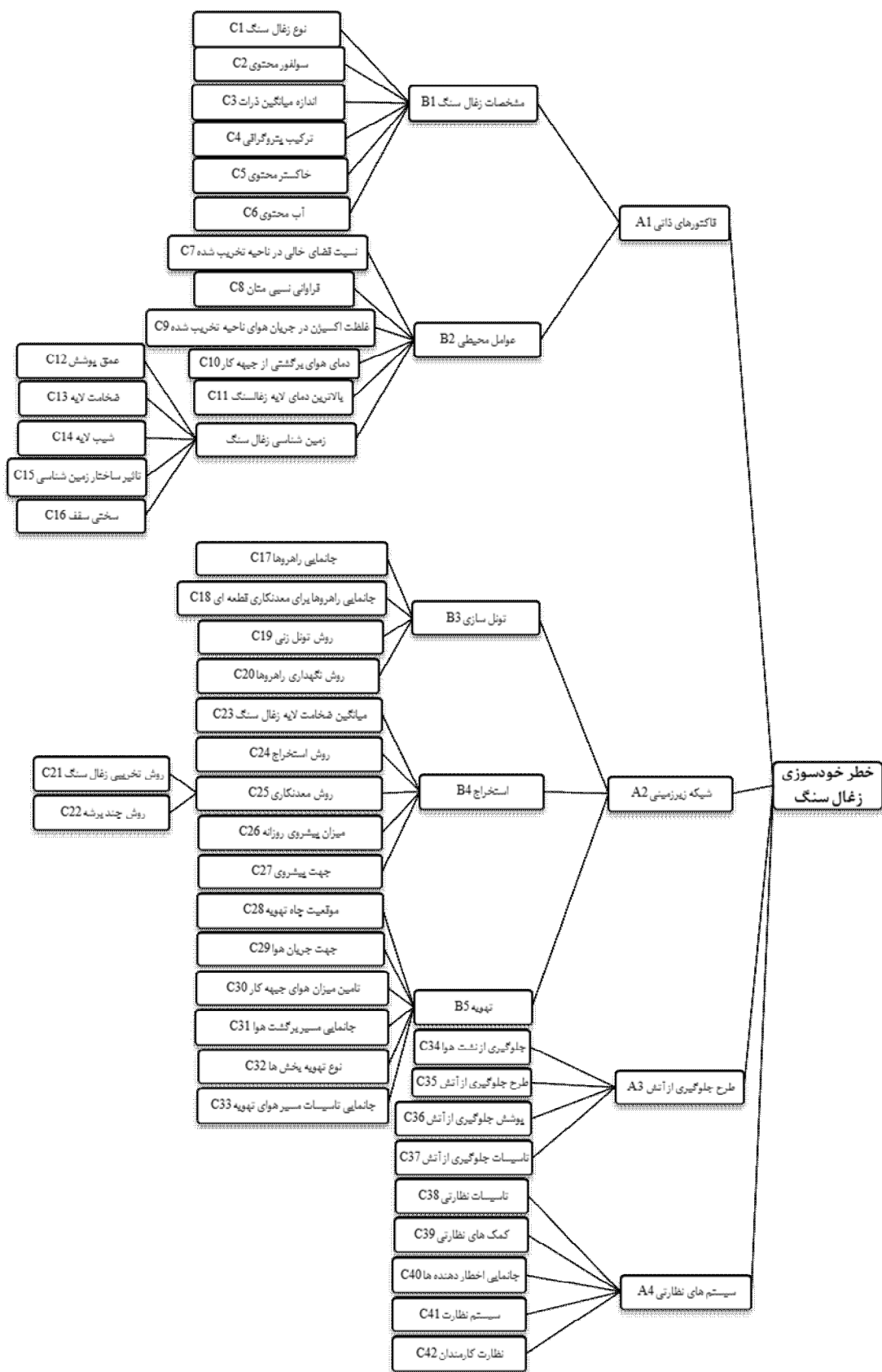
طبقه‌بندی محدوده خطر	مجموع امتیاز به دست آمده	مدت زمان دوره نهفتگی (ماه)
کم خطر	۱ تا ۱۰	> ۱۸
خطر متوسط	۱۰ تا ۲۰	۹-۱۸
خطر زیاد	۲۱ تا ۴۰	۳-۹
بسیار خطرناک	> ۴۰	۰-۳

ط - سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین

سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین در سال ۲۰۱۰ توسط Fu-bao و Lang، بر اساس شرایط خاص معادن زغال‌سنگ این کشور ابداع و معرفی شد. در سیستم ارائه شده توسط Fu-bao و Lang، با بررسی و مطالعه متون پیشین، فاکتورهای راهبردی و تأثیرگذار در خودسوزی زغال‌سنگ شناسایی شدند؛ از مجموع ۵۰ شاخص تأثیرگذار شناخته شده، تعداد ۴۲ شاخص به عنوان شاخص‌های اصلی انتخاب شدند و هشت شاخص دیگر به دلیل تأثیر نامعلوم و یا غیر مرتبط، حذف شدند. ۴۲ شاخص اصلی به صورت منظم و به صورت سلسله مراتبی و در چهار گروه اصلی شامل فاکتورهای ذاتی A1، شبکه زیرزمینی A2، طرح جلوگیری از آتش‌سوزی A3 و سیستم‌های نظارتی A4 مطابق شکل ۳-۶ طبقه‌بندی شدند؛ اما یکی از مشکلات این سیستم در نظر گرفتن پارامترهای فراوان است که استفاده از آن را مشکل می‌کند.

در این سیستم ارزیابی با استفاده از روش امتیازدهی کل‌نگری و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۱ با استفاده از تصمیم‌گیری گروهی و نظرات پنج متخصص صاحب‌نظر در این زمینه، با روش «قضاوت به اتفاق آرا» با استفاده از مقیاس نه نقطه‌ای، ماتریس مقایسه زوجی این پارامترها تشکیل شد و وزن پارامترها بدون در نظر گرفتن وزن پارامترهای بالادستی در روش تحلیل سلسله مراتبی به دست آمد. در نهایت پس از ضرب کردن وزن هر پارامتر در وزن پارامترهای بالادستی مربوط به خودش، وزن نهایی پارامترهای تأثیرگذار در خطر خودسوزی به دست آمد که در جدول ۳-۱۴ آورده شده است.

^۱ - Analytic Hierarchy Process (AHP)



شکل ۳-۶: ارزیابی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (Lang and Fu-bao, 2010).

جدول ۳-۱۴: وزن نهایی پارامترها در سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین (Lang and Fu-bao, 2010).

وزن پارامتر	پارامتر	وزن پارامتر	پارامتر	وزن پارامتر	پارامتر	وزن پارامتر	پارامتر
$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$	
۱/۵	C ₃₈	۳/۵	C ₃₄	۵/۵	C ₁₇	۴	C ₁
۱	C ₃₉	۹/۵	C ₃₅	۱	C ₁₈	۱/۵	C ₂
۱	C ₄₀	۵	C ₃₆	۳	C ₁₉	۲	C ₃
۳	C ₄₁	۲	C ₃₇	۲	C ₂₀	۱	C ₄
۰/۵	C ₄₂			۴/۵	C ₂₁	۰/۵	C ₅
				۲	C ₂₂	۰/۵	C ₆
				۰/۵	C ₂₃	۴	C ₇
				۰/۵	C ₂₄	۱	C ₈
				۱	C ₂₅	۳	C ₉
				۲/۵	C ₂₆	۵	C ₁₀
				۲	C ₂₇	۸	C ₁₁
				۱	C ₂₈	۱/۵	C ₁₂
				۱	C ₂₉	۱	C ₁₃
				۳/۵	C ₃₀	۱	C ₁₄
				۳	C ₃₁	۳	C ₁₅
				۲	C ₃₂	۰/۵	C ₁₆
				۱/۵	C ₃₃		

تاکنون فرمول‌های تجربی زیادی برای کمک به محققین به منظور تعیین فاکتورهای ذاتی مختلف زغال سنگ ارائه شده است؛ اما تنها تعدادی پارامتر از قبیل میزان سولفور محتوی، اندازه ذرات، میزان آب محتوی و غیره قابل اندازه‌گیری هستند. سایر پارامترهای تأثیرگذار در خودسوزی از قبیل ترکیبات سنگ‌شناسی زغال سنگ، روش معدنکاری و تأسیسات نظارتی قابلیت کمی‌سازی ندارند و تنها به عنوان پارامترهای کیفی تلقی می‌شوند و حتی بعضی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری از قبیل عمق و ضخامت لایه نیز تنها از طریق تخمین‌های آماری قابلیت اندازه‌گیری دارند و یک عدد دقیق و مشخص را نمی‌توان برای آن‌ها بیان کرد و عددی به صورت میانگین به آن‌ها نسبت داده می‌شود (Lang and 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 نسبت داده شده است تا کاربر بر اساس شرایط خاص مورد بررسی و تجربه کاری یک فاصله مربوط را انتخاب کند (Lang and Fu-bao, 2010).

پس از مقایسه و اولویت‌بندی پارامترها، امتیازبندی پارامترهای کیفی خطر با $S_{i,k}$ و با دامنه تغییرات امتیازی بین -۴ تا +۴ بر اساس شدت تأثیرات مختلف آن‌ها در خطر خودسوزی امتیازبندی شدند. اگر یک پارامتر باعث افزایش خودسوزی شود امتیاز مثبت و اگر باعث کاهش خودسوزی شود امتیاز منفی کسب می‌کند. به عنوان مثال پارامتر C_1 که مربوط به نوع زغال‌سنگ است اگر نوع زغال‌سنگ لیگنیت^۱ باشد امتیاز $S_{1,1}$ مربوط به آن چهار خواهد بود و اگر نوع زغال‌سنگ آنتراسیت^۲ باشد امتیاز مربوط به آن صفر خواهد بود؛ و یا پارامتر C_{26} که مربوط به میزان پیشروی روزانه است، اگر میزان پیشروی روزانه کمتر از یک متر باشد امتیاز ۲ و اگر میزان پیشروی روزانه بیشتر از چهار متر باشد امتیاز ۲- را کسب خواهد کرد (Lang and Fu-bao, 2010).

با ترکیب نتایج جدول ۳-۱۴ و امتیازبندی مربوط به پارامترهای کیفی، رابطه ۳-۱۱ به دست می‌آید.

$$u_{i,k} = 10^2 W_i S_{i,k} \quad (۱۱-۳)$$

$u_{i,k}$: امتیاز نهایی پارامترها

W_i : وزن هر پارامتر که از جدول ۳-۱۴ به دست می‌آید.

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

به عنوان مثال در مورد پارامتر C_1 که مربوط به نوع زغال‌سنگ است و اگر نوع زغال‌سنگ لیگنیت باشد امتیاز نهایی این پارامتر برابر می‌شود با شانزده. به دلیل ساختن نرم‌افزاری تجاری در این رابطه اطلاعات دقیق‌تر در رابطه با سایر بازه بندی‌ها موجود نیست.

دامنه تغییرات امتیازها از ۱۷ تا ۱۰۱ متغیر است. بر طبق شرایط عملی خطر، سطوح خطر به

^۱ - Lignite

^۲ - Anthracite

پنج طبقه تقسیم‌بندی شد و دوره نهفتگی خطر نیز متعاقباً پیش‌بینی شده است که در جدول ۳-۱۵ آورده شده است (Lang and Fu-bao, 2010).

جدول ۳-۱۵: طبقه‌بندی نواحی زغالی از لحاظ خطر خودسوزی در سیستم جامع ارزیابی خطر چین (Lang and Fu-bao, 2010).

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

منظور از «دوره نهفتگی»^۱، فاصله زمانی بین واکنش اکسیژن با زغال‌سنگ و ایجاد شرایط مساعد برای گرمایش خود به خودی تا زمان رسیدن به اشتعال است (Banerjee, 1985).

ی- سیستم ارزیابی شاخص پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ^۲ CSCPI

صفاری در سال ۱۳۹۲ با مرور منابع علمی معتبر و شناسایی پارامترهای مهم مؤثر، تلاش کرد تا این پارامترها را در یک سیستم طبقه‌بندی جامع به صورت یک روش هوشمند برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ پیشنهاد کند.

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

در سیستم ارزیابی پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ ارائه شده در این روش با استفاده روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی^۳ (FDAHP) و نیز روش سیستم‌های مهندسی سنگ^۴ (RES) با

^۱- Incubation Period

^۲- Coal Spontaneous Combustion Potential index

^۳- Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

^۴- Rock Engineering Systems

روش کدگذاری نیمه عددی خبره (ESQ¹)، وزن دهی پارامترهای موجود در سیستم طبقه‌بندی انجام شد.

تعداد ۱۵ پارامتر برای استفاده در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که این پارامترها به همراه وزن آن‌ها با استفاده از دو روش FDAHP و RES در جدول ۳-۱۶ آورده شده است.

جدول ۳-۱۶: وزن نهایی پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ در روش CSCPI (صفاری، ۱۳۹۲).

وزن (a _i) با روش RES (%)	وزن (a _i) با روش FDAHP (%)	پارامترها	پارامتر
۹/۶۹	۱۱/۵۳	درجه زغال شدگی	P1
۴/۵۹	۵/۸۵	پیریت محتوی	P2
۴/۳۴	۷/۴	رطوبت محتوی	P3
۴/۰۸	۵/۱۴	خاکستر محتوی	P4
۵/۶۱	۹/۱۳	گاز خیزی لایه	P5
۹/۶۹	۸/۲۸	عمق قرارگیری لایه	P6
۶/۸۹	۵/۳۲	ضخامت لایه	P7
۴/۵۹	۲/۹۳	شیب لایه	P8
۵/۶۱	۵/۵۷	وجود گسل در لایه	P9
۵/۱	۴/۹۳	وجود لایه زغالی غیر قابل استخراج در مجاورت لایه	P10
۱۱/۴۸	۶/۰۹	روش استخراج	P11
۳/۵۷	۵/۲۶	جهت پیشروی	P12
۹/۶۹	۷/۶۷	سرعت پیشروی	P13
۶/۸۹	۷/۵۴	روش پر کردن فضای استخراج شده	P14
۸/۱۶	۷/۳۳	ضریب استخراج	P15

$$\sum_{i=1}^{15} a_i = 100 \quad \sum_{i=1}^{15} a_i = 100$$

با توجه به اینکه، وزن نهایی اهمیت پارامترها از طریق دو روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی و سیستم‌های مهندسی سنگ به دست 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 کمی 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

¹ - Expert Semi-Quantitative

شده است. جدول نهایی امتیازدهی و بدنه کلی سیستم طبقه‌بندی شاخص قابلیت خودسوزی زغال سنگ به شرح جدول ۳-۱۷ قابل ارائه است (صفاری، ۱۳۹۲).

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 سنگ سهم بیشتری دارند (جدول ۳-۱۷) (صفاری، ۱۳۹۲).

جدول ۳-۱۷: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها (صفاری، ۱۳۹۲).

رده‌بندی اختصاص داده شده						پارامتر (واحد)
۵	۴	۳	۲	۱	۰	
---	---	ساب بیتومینه ^۲	لیگنیت ^۳	بیتومینه ^۲	آنتراسیت ^۱	درجه زغال شدگی
> ۱۰	۸-۱۰	۵-۸	۲-۵	۱-۲	< ۱	پیریت (%)
> ۲۴	۱۲-۲۴	۷-۱۲	۵-۷	۳-۵	< ۳	رطوبت (%)
---	< ۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۴۰	۴۰-۶۰	> ۶۰	خاکستر (%)
---	---	< ۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵	> ۱۵	گاز خیزی (m ³ /ton)
---	< ۵۰	۶۰-۸۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۵۰-۲۰	عمق قرارگیری لایه (متر)
---	> ۸۰	---	---	---	---	---
---	لایه ضخیم با روش چند برش	۳/۲-۵	۲/۴-۳/۲	۱/۲-۲/۴	< ۱/۲	ضخامت لایه (متر)
---	۶۰-۹۰	۴۵-۶۰	۳۰-۴۵	۱۵-۳۰	۰-۱۵	شیب لایه (درجه)
---	---	گسل بزرگ با ریزش‌های بزرگ	بیشتر از ۲ عدد گسل / ۵۰۰ متر	کمتر از ۲ عدد گسل کوچک / ۵۰۰ متر	ناموجود	وجود گسل در لایه
فاصله بین ۲ لایه کمتر از ۵ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه بین ۵-۱۰ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه بین ۱۰-۲۰ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه بین ۲۰-۳۰ برابر ضخامت لایه	فاصله بین ۲ لایه بیشتر از ۳۰ برابر ضخامت لایه	ناموجود	وجود لایه زغال غیر قابل استخراج
---	جبهه کار طولانی دستی	استخراج اتاق و پایه	جبهه کار طولانی نیمه مکانیزه با رنده ^۶	جبهه کار کوتاه	جبهه کار طولانی مکانیزه با شیرر لودر ^۵	روش استخراج
---	---	---	---	پیشرو	پسرو	جهت پیشروی
< ۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵	> ۵	نرخ پیشروی (متر/روز)
تخریبی	دستی	ثقلی	مکانیکی	پنوماتیکی	هیدرولیکی	روش پر کردن
---	< ۳۰	۳۰-۵۰	۵۰-۶۵	۶۵-۸۰	> ۸۰	ضریب استخراج

1- Anthracite

2- Bituminous

3- Lignite

4- Sub-bituminous

5- Shearer Loader

6- Plow

در نهایت با تعریف اندیس پتانسیل خودسوزی زغال سنگ (CSCP_i) به صورت رابطه ۳-۱۲ می‌توان پتانسیل خودسوزی هر لایه زغال سنگ را تعیین کرد.

$$CSCP_i = \sum_{j=1}^{15} a_j \frac{P_{ij}}{P_{Max_i}} \quad (۳-۱۲)$$

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

j: مربوط به شماره لایه.

a_i: ضریب وزنی پارامتر i ام که از جدول ۳-۱۶ به دست می‌آید.

P_{ij}: امتیاز پارامتر i ام در هر کلاس از منوی رده‌بندی (جدول ۳-۱۷) با توجه به شرایط لایه j.

P_{Max_i}: حداکثر امتیاز هر پارامتر در منوی رده‌بندی شده (جدول ۳-۱۷).

حداقل مقدار CSCP_i عدد صفر و حداکثر مقدار CSCP_i عدد ۱۰۰ است.

پس از تعیین شاخص CSCP_i، بر اساس مقدار به دست آمده برای هر لایه می‌توان قابلیت

خودسوزی زغال سنگ را پیش‌بینی کرد که برای این منظور می‌توان از جدول ۳-۱۸ استفاده کرد.

جدول ۳-۱۸: بازه بندی اندیس پتانسیل خودسوزی زغال سنگ (صفاری، ۱۳۹۲).

اندیس خودسوزی بالا		اندیس خودسوزی متوسط		اندیس خودسوزی پایین	
۱۰۰	CSCP _i	۶۶	CSCP _i	۳۳	CSCP _i

۳-۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی سودمند و فراوانی در زمینه تعیین پتانسیل خودسوزی زغال سنگ برای بیش از

۱۰۰ سال است که توسعه پیدا کرده است. بسیاری از روش‌های آزمایشگاهی از حجم نمونه کم بین

۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم و حتی گاهی موارد کمتر از این مقدار استفاده می‌کنند

(Nelson and Chen, 2007).

نمونه‌های مورد استفاده در روش‌های آزمایشگاهی اغلب نمونه‌هایی هستند که تازه هستند و

اخیراً تهیه شده‌اند؛ زیرا زغال سنگ‌هایی که برای مدت زمان زیادی از محل اصلی خود دور شده‌اند و

به اصطلاح قدیمی‌اند، دارای نرخ اکسیداسیون بسیار پایینی هستند که این نرخ کاهش با استفاده از

رابطه ۳-۱۳ بیان می‌شود (Schmidt and Elder, 1940).

$$k(t) = k_0 t^{b-1}, \quad b < 1 \quad (۳-۱۳)$$

k_0 : نرخ اکسیداسیون بعد از گذشت یک روز در آزمایش اولیه، زیرا آزمایش نمونه زغال‌سنگ بلافاصله بعد از جمع‌آوری نمونه ممکن نیست.

t : زمان برحسب روز از انجام اولین آزمایش.

b : برابر است با ۰/۱۴- برای نمونه‌های زغال‌سنگ با اندازه ذرات کمتر از ۵ میلی‌متر و

۰/۲- برای نمونه‌های زغال‌سنگ با اندازه ذرات کمتر از ۶/۴ میلی‌متر.

از مهم‌ترین شرایط نامساعد در چنین آزمایش‌هایی، شرایط انجام آزمایش است که از محیط واقعی خودسوزی در انباشتگاه‌ها، لایه زغال‌سنگ و ... دور است. به عنوان مثال، در حجم زیاد زغال‌سنگ در شرایط واقعی، انرژی آزاد شده از گرمایش خود به خودی باعث فرآیند خودسوزی می‌شود؛ اما در حجم کم نمونه زغال‌سنگ، انرژی آزاد شده از گرمایش خود به خودی برای رخداد خودسوزی ناکافی است و یک منبع گرمای خارجی برای تبدیل گرمایش خود به خودی به خودسوزی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از مهم‌ترین مزایای روش آزمایش با حجم کم نمونه، سرعت سریع به دست آوردن نتایج است.

به طور کلی روش‌های آزمایشگاهی تعیین قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ شامل روش‌های زیر

است:

- روش گرماسنجی آدیاباتیک (بی‌دررو)^۱

روش گرماسنجی آدیاباتیک یکی از رایج‌ترین روش‌ها در ارزیابی خودسوزی زغال‌سنگ است که اولین

بار در سال ۱۹۲۴ توسط Davis و Byrne توسعه پیدا کرد (Qi et al., 2013).

در این روش یک ظرف واکنش که حاوی مقدار مشخصی نمونه زغال‌سنگ است در یک آون^۲

^۱- Adiabatic Calorimetry Method

^۲- Oven

آدیباتیک یا حمام روغن قرار داده می‌شود؛ بنابراین گرمای آزاد شده از اکسیداسیون زغال‌سنگ به محیط اطراف انتقال نمی‌یابد و هدر رفت گرما به حداقل مقدار ممکن می‌رسد (Beamish et al., 2000; Qi et al., 2013). بعد از اینکه نمونه با گاز نیتروژن خشک و گرم شد، گاز خالص اکسیژن که گاز اصلی واکنش است از نمونه گذر می‌کند. یک دماسنج در داخل نمونه زغال‌سنگ و یک دماسنج دیگر نیز برای اندازه‌گیری دمای آون تعبیه شده‌اند. به طور ایده‌آل، دمای آون باید کنترل شود تا معادل با دمای نمونه زغال‌سنگ باشد تا از این طریق از تبادل گرمایی بین نمونه زغال‌سنگ و آون جلوگیری به عمل آید. از طریق چنین کنترلی اطمینان حاصل می‌شود که همه گرمای تولیدی توسط فرآیند اکسیداسیون زغال‌سنگ برای پایدار نگه داشتن واکنش و افزایش دمای نمونه زغال‌سنگ استفاده می‌شود.

روش آدیباتیک می‌تواند فرآیند گرمایش واقعی در اکسیداسیون زغال‌سنگ را به خوبی شبیه‌سازی کند؛ اگرچه در اجرای آزمایش به زمان زیادی برای دریافت نتیجه مطلوب احتیاج است زیرا گرمای آزاد شده از اکسیداسیون زغال‌سنگ در دمای پایین خیلی کم است. در همین راستا اکثر نمونه‌های زغال‌سنگ به بیشتر از ۵ ساعت برای افزایش دما از ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد احتیاج دارند (Qi et al., 2013).

روش ^۱R₇₀ یکی از بهترین روش‌های آزمایش آدیباتیک تلقی می‌شود (Wang and Luo, 2011). سایر روش‌های آدیباتیک شامل روش‌های حداقل گرمای خود گرمایشی (^۲SHT_{min})، نرخ اولیه گرمایش (^۳IRH) و افزایش گرمای کلی (^۴TTR) می‌باشند.

– روش قابلیت اشتعال^۵

این روش به عنوان روش دمای نقطه تقاطع (^۱CPT) معروف است. در این روش، نمونه زغال‌سنگ در

^۱- Rate 70

^۲- Minimum Self-Heating Temperature

^۳- Initial Rate of Heating

^۴- Total Temperature Rise

^۵- Ignitability Method

داخل یک آون یا حمام با قابلیت کنترل دمایی قرار داده می‌شود و هوای گرم از نمونه گذر می‌کند و دمای آون با یک نرخ افزایشی دو درجه سانتی‌گراد بر ساعت به طور پیوسته افزایش می‌یابد. زمانی که دمای نمونه از دمای آون بیشتر شد این دما به عنوان دمای نقطه تقاطع لحاظ می‌شود (Banerjee, 1985).

- روش ایزوترمال (هم‌دما)^۲

این روش دلالت بر برآشامی اکسیژن دارد بدین صورت که پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ با مقدار مصرف اکسیژن در یک دمای شروع ثابت تعیین می‌شود. در دمای ثابت ۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر ۱۰۱ کیلو پاسکال، یک گرم نمونه زغال‌سنگ در ۱/۵ ساعت جریان نیتروژن خشک می‌شود و سپس این نمونه در شرایط جریان اکسیژن برای جذب اکسیژن به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده می‌شود. هرچه جذب اکسیژن در نمونه زغال‌سنگ بیشتر باشد، پتانسیل نمونه برای خودسوزی بیشتر است (Wang and Luo, 2011).

- روش دینامیک (پویا)^۳

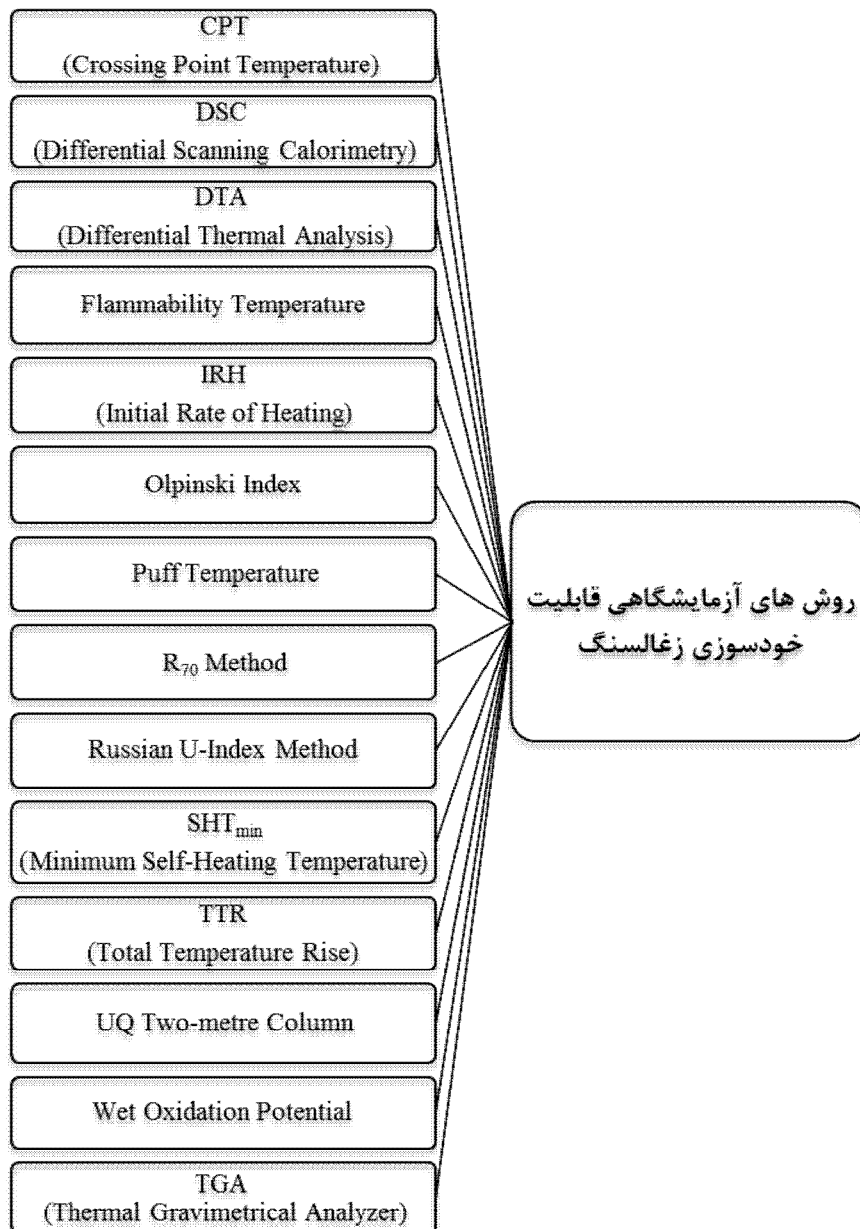
انرژی فعال‌سازی مورد نیاز در طی فرآیند اکسیداسیون نمونه زغال‌سنگ در زمانی که نمونه در یک دمای ثابت با نرخ افزایشی و تحت جریان هوا، گرم می‌شود تعیین کننده پتانسیل خودسوزی نمونه زغال‌سنگ است. روش TGA^۴ مهم‌ترین روش این بخش است (Wang and Luo, 2011). مجموعه روش‌های آزمایشگاهی بررسی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ در شکل ۳-۷ آورده شده است و در ادامه برخی از مهم‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها توضیح داده شده است.

¹- Crossing Point Temperature

²- Isothermal Method

³- Dynamic Method

⁴- Thermal Gravimetric Analyzer

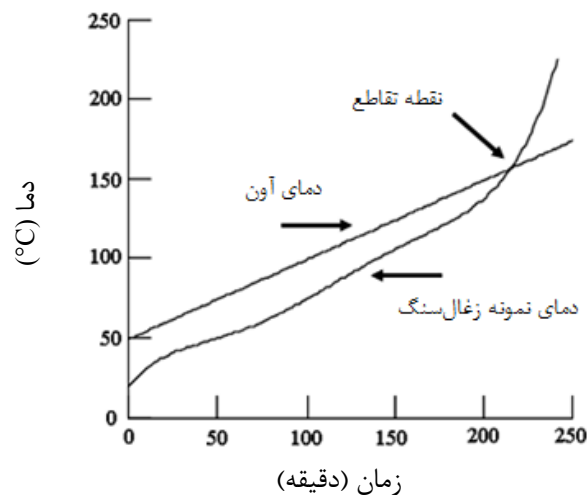


شکل ۳-۷: روش های آزمایشگاهی بررسی قابلیت خودسوزی زغال سنگ.

الف- روش دمای نقطه تقاطع (CPT)

این روش یکی از قدیمی ترین روش ها برای تعیین استعداد خودسوزی زغال سنگ است. در این روش، به نمونه زغال سنگ (وزن آن در حدود ۳۰ تا ۶۰ گرم است) موجود در لوله واکنش در آون، با نرخ افزایش دمای ثابت و میزان اکسیژن ثابت، حرارت و اکسیژن داده می شود که این نرخ افزایش دما از پیش تعیین شده است و میانگین افزایش دما یک درجه سانتی گراد بر دقیقه است و جریان هوا به مقدار ۸۰ میلی لیتر بر دقیقه از نمونه گذر می کند (Kaymakci and Didari, 2002).

دمای نمونه و دمای آون هر پنج دقیقه یکبار اندازه‌گیری و ثبت می‌شود که در نهایت منجر به تشکیل منحنی دما- زمان می‌شود که نمونه‌ای از این منحنی در شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ آورده شده است. نقطه‌ای که محل تقاطع دمای اندازه‌گیری شده نمونه و دمای آون است تحت عنوان «دمای عبوری زغال‌سنگ از دمای آون» نامیده می‌شود که به این نقطه تقاطع " Crossing Point Temperature" یا "CPT" گفته می‌شود. هرچه محل تقاطع این نقطه به مبدأ نزدیک‌تر و مقدار CPT کمتر باشد تمایل زغال‌سنگ برای خودسوزی بیشتر است (Kaymakci and Didari, 2002). در جدول ۳-۱۹ طبقه‌بندی مقادیر CPT و درجه تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی آورده شده است.



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



شکل ۳-۹: منحنی دما- زمان در روش CPT (Kim, 1995).

جدول ۳-۱۹: طبقه‌بندی مقادیر CPT و درجه تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی (Tripathy and Pal, 2001).

طبقه	مقادیر CPT (برحسب °C)	مقادیر CPT اصلاح شده (برحسب °C)	Propensity	درجه تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی
I	بیشتر از ۱۶۰	بیشتر از ۱۴۰	low (L)	ضعیف
II	۱۴۰ تا ۱۶۰	۱۴۰ تا ۱۲۰	medium (M)	متوسط
III	۱۲۰ تا ۱۴۰	کمتر از ۱۲۰	high (H)	زیاد

برای محاسبه نرخ میانگین گرمایش (AHR^1) و شاخص خودسوزی ($I_{(FCC)}$) Feng نمونه‌های

زغال‌سنگ می‌توان از روابط ۳-۱۴ و ۳-۱۵ استفاده کرد (Feng et al., 1973; Banerjee, 2000).

$$AHR = \frac{110}{t_2 - t_1} \quad (3-14)$$

$$I_{(FCC)} = \frac{AHR}{CPT} \times 1000 \quad (3-15)$$

$I_{(FCC)}$: شاخص فنگ و همکاران در سال ۱۹۷۳ (1/min).

AHR : نرخ میانگین گرمایش بین دمای ۱۱۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد ($^{\circ}C/min$).

CPT : دمای نقطه تقاطع ($^{\circ}C$).

t_2 : زمان رسیدن دمای نمونه زغال‌سنگ به ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد (دقیقه).

t_1 : زمان رسیدن دمای نمونه زغال‌سنگ به ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد (دقیقه).

وضعیت خودسوزی بر اساس شاخص $I_{(FCC)}$ در جدول ۳-۲۰ آورده شده است.

جدول ۳-۲۰: وضعیت خودسوزی بر اساس شاخص $I_{(FCC)}$ (Oren and Sensogut, 2018).

مقادیر $I_{(FCC)}$	وضعیت خودسوزی
<۵	خطر کم
۵-۱۰	خطر متوسط
>۱۰	خطر زیاد

ب- کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC^2)

روش‌های آزمایشگاهی فراوانی به عنوان روش‌های ایزوترمال یا دما ثابت شناخته می‌شوند که مفهوم

آن این است که دمای محیط ثابت در نظر گرفته می‌شود و دمای نمونه تغییر می‌کند. روش DSC

¹ - Average Heating Rate

² - Differential Scanning Calorimetry

یک روش غیر ایزوترمال است که در آن دمای محیط با یک نرخ ثابت افزایش می‌یابد. روش DSC، دارای دو ظرف یکی حاوی نمونه زغال‌سنگ (در حدود ده میلی‌گرم) و دیگری خالی است که در یک دما نگهداری می‌شوند و اختلاف موجود در رسیدن به مقدار گرمای مورد نیاز به دمای محیط در دو ظرف اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت فرآیندهای گرماگیر و گرمازا در نمونه زغال‌سنگ اتفاق می‌افتد که بیانگر فرآیند گرمایش خود به خودی است. این روش برای بررسی تأثیر کهنگی نمونه‌های زغال‌سنگ هوازده از طریق حرارت فعال اکسیداسیون در طی یک دوره ۱۰۵ روزه اندازه‌گیری می‌شود (Garcia et al., 1999).

ج- آنالیز گرماسنجی ثقلی (TGA)

در این روش بعد از تهیه و خرد کردن نمونه‌های زغال‌سنگ به اندازه کمتر از ۵۰ مش (کمتر از ۲۹۷ میکرومتر) برای جلوگیری از اکسیداسیون در کیسه‌های پلاستیکی آب‌بند^۲ در فریزر نگهداری می‌شوند. در این روش ۱۳ تا ۱۴ میلی‌گرم از نمونه زغال‌سنگ شکسته شده در یک ظرف پلاتینیوم قرار داده شده و داخل دستگاه TGA نگهداری می‌شود. در این آزمایش، جریان اکسیژن با نرخ ده میلی‌لیتر بر دقیقه و جریان نیتروژن با نرخ ۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه از نمونه زغال‌سنگ گذر می‌کند. دمای آون برای رسیدن به نرخ افزایش دمای ده درجه سانتی‌گراد بر دقیقه با دمای اولیه ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد کنترل می‌شود. آزمایش تا زمانی که وزن نمونه از دست نرود ادامه پیدا می‌کند. زمان تقریبی انجام آزمایش در حدود یک ساعت است.

دما و وزن نمونه به دقت توسط یک آنالیزور در طی فرآیند اندازه‌گیری می‌شود و منحنی‌های مربوطه ترسیم می‌شوند که نمونه‌ای از منحنی‌های TGA در شکل ۳-۱۰ آورده شده است (Wang and Luo, 2011).

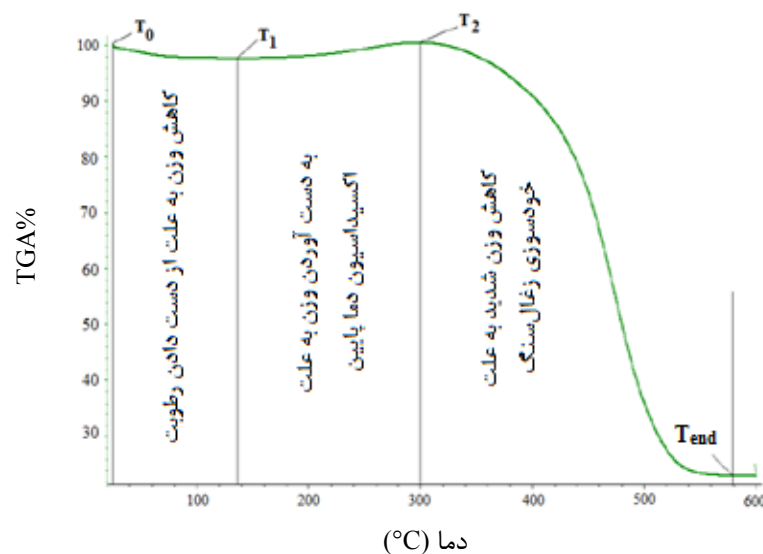
¹- Thermal Gravimetry Analyzer

²- Sealed Plastic Bags

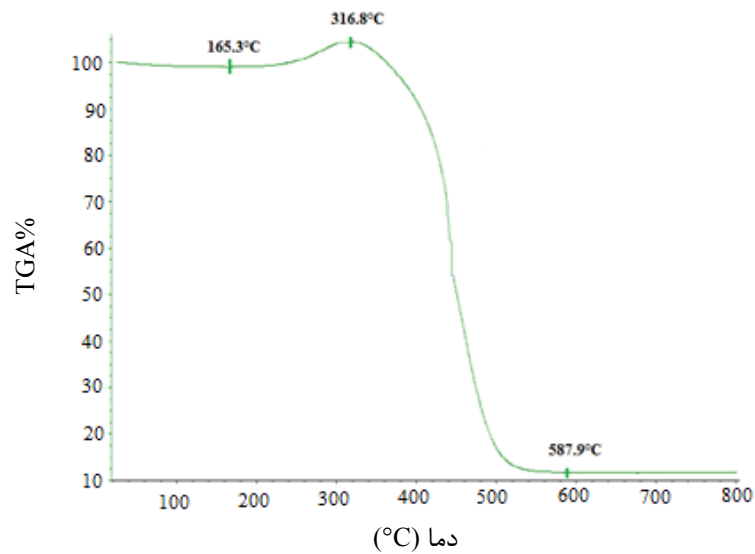
به طور ایده‌آل، یک فرآیند کامل اکسیداسیون می‌تواند به سه بخش الگوی تغییراتی از منحنی TGA تبدیل شود (شکل ۳-۱۰). همان‌طور که در شکل ۳-۱۰ مشاهده می‌شود این منحنی دارای یک مرحله اولیه از دست دادن وزن نمونه به علت تبخیر رطوبت را داراست و این مرحله در نقطه T_1 پایان می‌یابد. در مرحله دوم، نمونه به علت شروع فرآیند اکسیداسیون دما پایین، وزن از دست داده در مرحله قبل را به دست می‌آورد و این افزایش وزن تا نقطه T_2 ادامه می‌یابد. در مرحله سوم، فرآیند احتراق و گرمایش در حالی که وزن نمونه به شدت کاهش می‌یابد شروع می‌شود و در نقطه T_{end} پایان می‌یابد (Wang and Luo, 2011).

مهم‌ترین بخش از نتایج منحنی TGA خمیدگی بین نقاط T_1 و T_2 است بدین صورت که اگر نمونه زغال‌سنگ دارای خاصیت خودسوزی باشد وزن به دست آورده در طی فرآیند شاخص و بارز است؛ مانند نمونه آزمایش شده زغال‌سنگ ساب‌بیتومینه در شکل ۳-۱۱ که دارای برآمدگی زیادی در مرحله به دست آوردن وزن است.

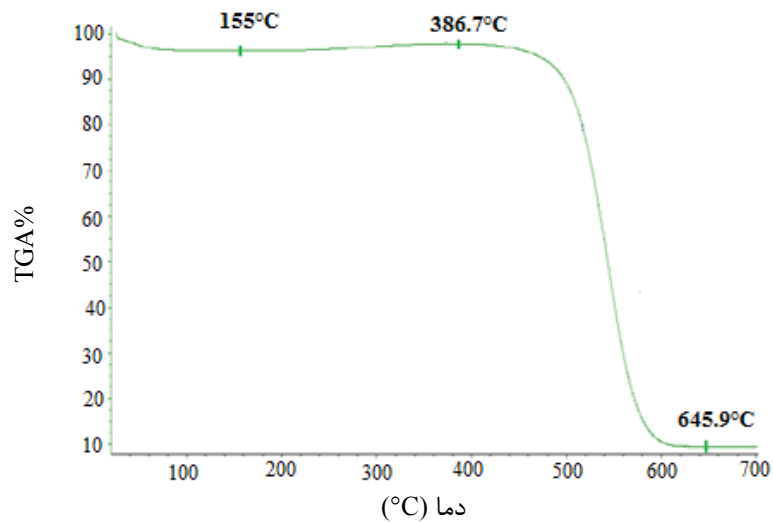
از طرف دیگر اگر نمونه زغال‌سنگ دارای خاصیت خودسوزی نباشد نشانه شاخصی در بخش به دست آوردن وزن در بازه T_1 و T_2 مشاهده نمی‌شود مانند نمونه آزمایش شده زغال‌سنگ آنتراسیت در شکل ۳-۱۲ که نشانه شاخصی در به دست آوردن وزن در آن مشخص نمی‌شود.



شکل ۳-۱۰: نمونه منحنی TGA (Wang and Luo, 2011).



شکل ۳-۱۱: نمونه منحنی TGA برای زغال سنگ ساببیتومینه (Wang and Luo, 2011).



شکل ۳-۱۲: نمونه منحنی TGA برای زغال سنگ آنتراسیت (Wang and Luo, 2011).

د- روش کمیته معدنی ایالات متحده (USBM^۱)

روش دمای بحرانی گرمایش خود به خودی (CSHT^۲) توسط محققین «کمیته معدنی ایالات متحده

(USBM) در سال‌های ۱۹۸۷ و ۱۹۹۴ توسعه پیدا کرد. در این روش دو دمای مختلف بحرانی

گرمایش خود به خودی تعیین می‌شوند (Wang and Luo, 2011).

^۱- United States Bureau of Mines

^۲- Critical Self-Heating Temperature (CSHT) Method

اولین دما بر اساس مقدار اکسیژن موجود بر اساس رابطه ۱۶-۳ که توسط Lazzara و Smith در سال ۱۹۸۷ بیان شد.

$$CSHT_{OX} = 139.74 - 6.57 \times O_{DAF} \quad (16-3)$$

در این رابطه، $CSHT_{OX}$ دمای بحرانی گرمایش خود به خودی بر اساس سطح اکسیژن و O_{DAF} میزان اکسیژن بر اساس زغال سنگ خشک عاری از خاکستر است.

دومین دما که بر اساس مطالعات Litton و Page در سال ۱۹۹۴ ارائه شد بر اساس ترکیب توانایی زغال سنگ در برآشامی آب و مقادیر کربن و مواد فرار زغال سنگ بر اساس رابطه ۱۷-۳ تعیین می شود.

$$CSHT_{VOL} = 117(1 - e^{-2.6x}) \quad (17-3)$$

در این رابطه، $CSHT_{VOL}$ دمای بحرانی گرمایش خود به خودی بر اساس کربن، مواد فرار و رطوبت برآشامی شده و X نسبت سوخت-رطوبت است که بر اساس رابطه ۱۸-۳ به دست می آید.

$$X = \left(\frac{\frac{\% \text{Fixed Carbon}}{\% \text{Volatile Matter}}}{\% \text{Moisture}} \right) \quad (18-3)$$

مقادیر پارامترهای روابط ۱۶-۳ و ۱۷-۳ بر اساس آنالیزهای آزمایشگاهی به دست می آید و پس از محاسبه مقدار میانگین $CSHT$ بر اساس دو رابطه ۱۶-۳ و ۱۷-۳ می توان با استفاده از جدول ۲۱-۳ به بررسی وضعیت پتانسیل خودسوزی پرداخت. از مزایای این روش استفاده از داده های آنالیز کیفی در فاز اکتشافی معدن است که به عنوان اطلاعات ورودی استفاده می شود.

جدول ۲۱-۳: بررسی وضعیت پتانسیل خودسوزی بر اساس روش $CSHT$ (Wang and Luo, 2011).

وضعیت پتانسیل خودسوزی	$CSHT$
پتانسیل بالای خودسوزی	$CSHT < 70^{\circ}C$
پتانسیل متوسط خودسوزی	$70^{\circ}C \leq CSHT < 100^{\circ}C$
پتانسیل کم خودسوزی	$100^{\circ}C \leq CSHT$

۵- روش نرخ گرمایش خود به خودی R70

این روش که جز روش‌های آدیاباتیک^۱ (بی‌دررو) است، روشی مناسب و استاندارد برای شبیه‌سازی مراحل اولیه خودسوزی زغال‌سنگ است (Singh et al., 2002).

روش آزمایش نرخ گرمایش خود به خودی زغال‌سنگ (R70) که در کشور استرالیا برای استفاده‌های تجاری استفاده می‌شود از جدیدترین و معروف‌ترین روش‌های آدیاباتیک برای ارزیابی خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ است که از طریق افزایش دمای نمونه‌های زغال‌سنگ تحت اکسیداسیون در یک آون آدیاباتیک به دست می‌آید (Ashton Coal Project, 2014).

روش آزمایش R70 در سال ۱۹۸۱ توسط Humphreys ابداع و در سال ۲۰۰۰ توسط Beamish و همکاران در استرالیا اصلاح و توسعه پیدا کرد.

شاخص R70 یک روش اندازه‌گیری سریع و دقیق از واکنش‌پذیری ذاتی زغال‌سنگ با اکسیژن است. مقادیر به دست آمده از روش شاخص R70 به شدت بستگی به خواص ذاتی زغال‌سنگ از قبیل نوع زغال‌سنگ، مواد معدنی موجود در آن و ترکیب پتروگرافی آن دارد (www.cb3mineservices.com, 2016).

این شاخص معادل زمان افزایش دمای نمونه زغال‌سنگ از ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ۷۰ درجه سانتی‌گراد است. این شاخص بر اساس درجه سانتی‌گراد بر ساعت (°C/h) بیان می‌شود (Ashton Coal Project, 2014).

روش انجام این آزمایش آدیاباتیک در یک فلاکس واکنش کاملاً عایق که با کمترین هدر رفت گرما طراحی شده است انجام می‌شود. فلاکس واکنش نیز در داخل یک آون آدیاباتیک که قابلیت کنترل دمایی را دارد قرار می‌گیرد. دمای آون مطابق با دمای نمونه زغال‌سنگ موجود در فلاکس واکنش برای جلوگیری از انتقال گرما بین آون و نمونه زغال‌سنگ کنترل می‌شود بدین صورت که با

^۱ - Adiabatic

افزایش دمای نمونه زغال سنگ، دمای آون نیز مطابق با دمای خود به خودی زغال سنگ تنظیم می شود (Wang and Luo, 2011).

اصول روش آزمایش R70 بدین صورت است که در ابتدا و قبل از انجام آزمایش آدیباتیک (به علت کاهش تأثیر اکسیداسیون در سطح زغال سنگ های تازه آسیا شده) یک نمونه ۱۵۰ گرمی از زغال سنگ که به اندازه کمتر از ۲۱۲ میکرون خرد شده و در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد توسط نیتروژن برای مدت تقریباً ۱۶ ساعت در یک آون آدیباتیک (بی دررو) خشک شده است و در حالی که هنوز نمونه تحت جریان نیتروژن است تا دمای حدود ۴۰ درجه سانتی گراد خنک می شود. پس از آنکه دمای زغال سنگ در حدود دمای ۴۰ درجه سانتی گراد تحت جریان نیتروژن در یک آون آدیباتیک به تعادل رسید، اکسیژن به مقدار ۵۰ میلی لیتر بر دقیقه از نمونه گذر می کند (بعد از خشک شدن نمونه، این نمونه می تواند به آون آدیباتیک در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد منتقل شود و اجازه داده شود که دمای نمونه در حالی که تحت جریان نیتروژن است به دمای ۴۰ درجه سانتی گراد برسد. پس از رسیدن دمای نمونه به ۴۰ درجه سانتی گراد گاز ورودی از نیتروژن به اکسیژن تغییر می کند). یک ثبات داده نگار دمایی^۱ افزایش دمای ناشی از گرمایش خود به خودی زغال سنگ را ثبت می کند و دمای آون مطابق با دمای نمونه زغال سنگ تغییر می کند. همچنین مارپیچ لوله مسی برای عبور جریان ورودی گاز برای به حداقل رساندن اختلاف دمایی بین گاز ورودی و دمای زغال سنگ استفاده می شود. میانگین زمان سپری شده برای رسیدن دمای نمونه زغال سنگ از ۴۰ به ۷۰ درجه سانتی گراد (شکل ۳-۱۳) برای محاسبه میانگین نرخ گرمایش خود به خودی برای افزایش دما ناشی از اکسیداسیون آدیباتیک محاسبه می شود. این شاخص تحت عنوان شاخص R70 نامیده می شود و واحد آن درجه سانتی گراد بر ساعت است (Beamish et al., 2000).

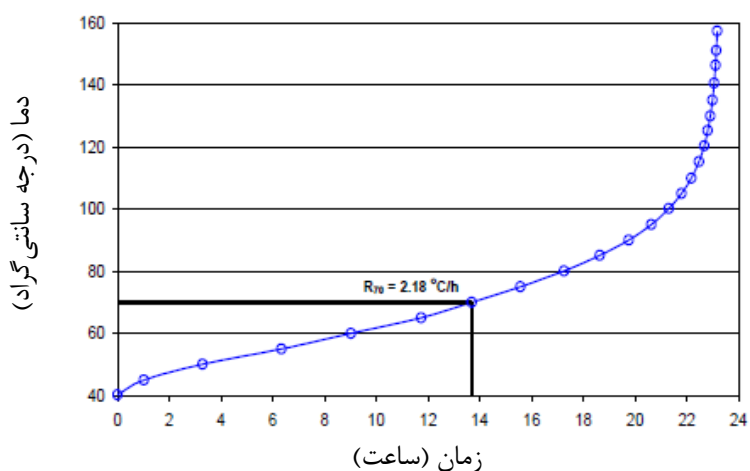
نکته قابل توجه در این است که بعد از دمای ۷۰ درجه سانتی گراد، یک افزایش دمای چشمگیر به علت خودسوزی غیر قابل کنترل زغال سنگ رخ می دهد. همچنین در دمای حدود ۷۰ درجه

^۱ - Data Logging Thermometer

سانتی گراد تغییرات اساسی در تشکیلات زغال سنگ رخ می دهد و سطح داخلی قابل دسترس نمونه افزایش می یابد که نتیجتاً باعث نرخ شتابان اکسیداسیون می شود که به همین دلیل این روش آزمایش نباید در دماهای بالاتر از ۷۰ درجه سانتی گراد انجام شود (Beamish et al., 2000).

مهم ترین مزیت این روش نمایش واضح و کامل از فرآیند گرمایش خود به خودی نمونه زغال سنگ است (Wang and Luo, 2011).

جدول ۳-۲۲ مقادیر R_{70} و درجه تمایل زغال سنگ به خودسوزی را نشان می دهد (Beamish and Arisoy, 2008 a). چنانچه از این جدول مشخص می شود هرچه مقادیر R_{70} بیشتر باشد، زغال سنگ زودتر دچار خودسوزی می شود.

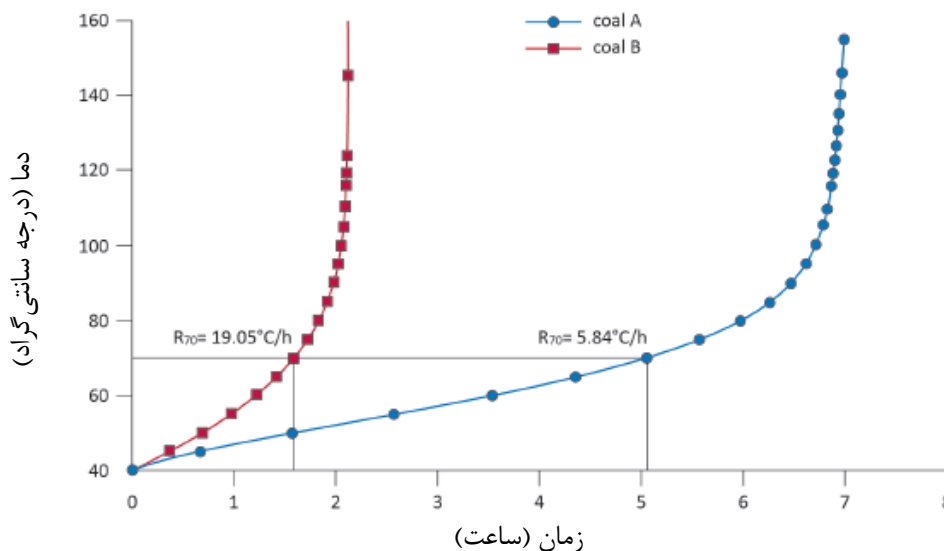


شکل ۳-۱۳: تعیین شاخص نرخ گرمایش خود به خودی R_{70} (Wang and Luo, 2011).

جدول ۳-۲۲: مقادیر R_{70} و درجه تمایل زغال سنگ به خودسوزی (MDG 1006, 2011).

درجه تمایل زغال سنگ به خودسوزی	Propensity	مقادیر R_{70} (بر حسب °C/h) بر اساس شرایط زغال سنگ New South Wales	مقادیر R_{70} (بر حسب °C/h) بر اساس شرایط زغال سنگ Queensland	طبقه
ضعیف	Low (L)	$R_{70} < 1$	$R_{70} < 0.5$	I
متوسط	Medium (M)	$1 \leq R_{70} < 2$	$0.5 \leq R_{70} < 1$	II
زیاد	High (H)	$2 \leq R_{70} < 4$	$1 \leq R_{70} < 2$	III
بسیار زیاد	(VH) Very High	$4 \leq R_{70} < 8$	$2 \leq R_{70} < 4$	IV
مافوق زیاد	(UH) Ultra High	$8 \leq R_{70} < 16$	$4 \leq R_{70} < 8$	V
به شدت زیاد	High (EH) Extremely	$16 \leq R_{70} < 32$	$8 \leq R_{70} < 16$	VI
به طور استثنایی زیاد	Exceptionally High (XH)	$R_{70} \geq 32$	$R_{70} \geq 16$	VII

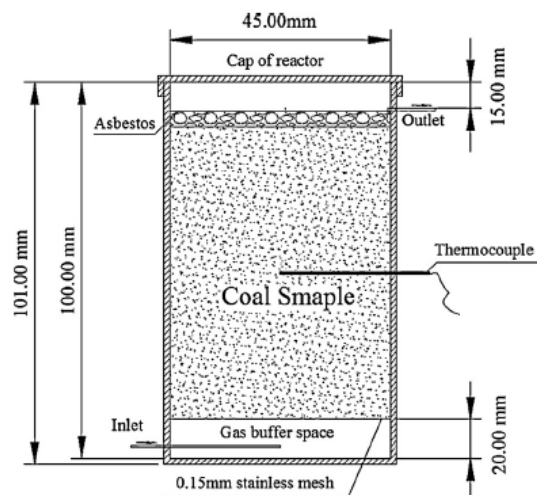
در شکل ۳-۱۴ نتایج نرخ گرمایش خود به خودی R_{70} برای دو نمونه زغال سنگ آورده شده است. چنانچه از نتایج این شکل مشاهده می‌شود، نرخ گرمایش خود به خودی R_{70} برای نمونه زغال سنگ B بسیار بیشتر از نمونه زغال سنگ A است.



شکل ۳-۱۴: نتایج نرخ گرمایش خود به خودی R_{70} برای نمونه زغال سنگ بیتومینه با مواد فرار بالا (نمونه زغال سنگ A) و برای نمونه زغال سنگ ساب بیتومینه (نمونه زغال سنگ B) (www.cb3mineservices.com, 2016).

در سال ۲۰۱۳، Qi و همکاران در دانشکده مهندسی ایمنی در دانشگاه معدن و فناوری چین در روش R_{70} تغییراتی را ایجاد کردند. Qi و همکاران ۸۰ گرم نمونه زغال سنگ (با دقت ± 0.1 گرم) که برای مدت ۱۲ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده بود، را در داخل یک فلاکس واکنش آدیاباتیک قرار دادند. سپس آن با قابلیت برنامه‌ریزی دمایی روی دمای ثابت ۴۰ درجه سانتی‌گراد در حالی که نیتروژن خالص با غلظت 99.999% با نرخ ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه از نمونه گذر می‌کرد تنظیم شد. ثبات دمانگار به طور پیوسته دمای نمونه زغال سنگ را ثبت می‌کرد. زمانی که دمای نمونه زغال سنگ به دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد رسید دمای آن با دمای نمونه تنظیم می‌شود و با افزایش دمای نمونه دمای آن نیز افزایش می‌یافت. در همین حین گاز ورودی نیز از نیتروژن خالص به اکسیژن خالص با نرخ ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تغییر می‌یابد و از نمونه گذر می‌کند. آزمایش نیز تا زمانی که دمای نمونه و آن به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد ادامه می‌یابد. بعد از این دما، دمای آن خنک شده و نمونه از فلاکس واکنش خارج می‌شود.

در این تحقیق همچنین Q_i و همکاران به این نتیجه رسیدند که می‌توانند از هوای خشک محیط نیز در فرآیند آزمایش به جای اکسیژن خالص استفاده کنند زیرا خودسوزی زغال سنگ معمولاً در هوای محیط یا اکسیژن با غلظت کم اتفاق می‌افتد. در شکل ۳-۱۵ فلاکس واکنش در تحقیقات Q_i و همکاران به همراه مشخصات آن آورده شده است. جدول ۳-۲۳ مقادیر R_{70} و درجه تمایل متناسب زغال سنگ به خودسوزی بر اساس مطالعات Q_i و همکاران را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۵: فلاکس واکنش در تحقیقات Q_i و همکاران در سال ۲۰۱۳.

جدول ۳-۲۳: مقادیر R_{70} و درجه تمایل زغال سنگ به خودسوزی در تحقیقات Q_i و همکاران در سال ۲۰۱۳ بر اساس اولین طبقه‌بندی صورت گرفته توسط Humphreys و همکاران در سال ۱۹۸۱.

طبقه	مقادیر R_{70} (بر حسب $^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	Propensity	درجه تمایل زغال سنگ به خودسوزی
I	$R_{70} > 0.8$	High (H)	زیاد
II	$0.5 \leq R_{70} \leq 0.8$	Medium (M)	متوسط
III	$R_{70} < 0.5$	Low (L)	ضعیف

و- روش آزمایش UQ^1 two-metre column

Chen در سال ۱۹۹۱ یک دستگاه آزمایش استوانه‌ای شکل به طول دو متر و قطر ۳۰ سانتی‌متر ساخت و به بررسی خودسوزی زغال سنگ‌های کشور نیوزیلند پرداخت.

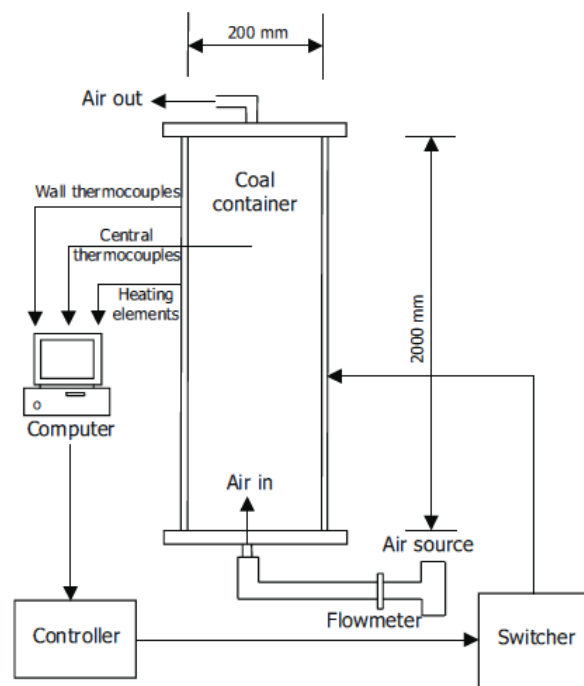
نسخه اصلاح شده از ستون آزمایش Chen در سال ۲۰۰۲ توسط Beamish و همکاران در دانشگاه کوئینزلند استرالیا ساخته شد. این مجموعه جدید دارای طول دو متر و قطر ۱۹ سانتی‌متر

¹ - University of Queensland

است. اسم این مجموعه آزمایشگاهی، دستگاه UQ two-metre column نام گذاری شد. تجهیزات مورد استفاده در این دستگاه در شکل ۳-۱۶ آورده شده است.

دستگاه UQ two-metre column دارای ظرفیت ۶۲ لیتر که بسته به وزن مخصوص زغال سنگ، معادل ۸۷ کیلوگرم است. زغال سنگ موجود در استوانه که دچار گرمایش خود به خودی می شود با استفاده از هشت ترموکوپل که در طول استوانه تعبیه شده اند مورد بررسی و دماسنجی قرار می گیرد. تعداد هشت گرم کن^۱ به طور مستقل با این ترموکوپل ها در ارتباط هستند. دمای شروع آزمایش از دمای ۳۰ درجه سانتی گراد شروع می شود و تا دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد ادامه می یابد و هوا با نرخ ۰/۲۵ لیتر بر دقیقه به محفظه وارد می شود. یک کامپیوتر هر ده دقیقه یک بار میزان افزایش دما و درصد ترکیبات خروج گازها را ثبت می کند (Beamish et al., 2002).

برای انجام یک آزمایش با این دستگاه با ۴/۴ کیلوگرم نمونه زغال سنگ ساب بیتومینه، فرآیند گرمایش خود به خودی پس از طی ۲۱ روز اتفاق افتاد (Beamish et al., 2002).



شکل ۳-۱۶: طرح تجهیزات مورد استفاده در دستگاه گرمایش خود به خودی UQ two-metre column (Beamish and Jabouri, 2005).

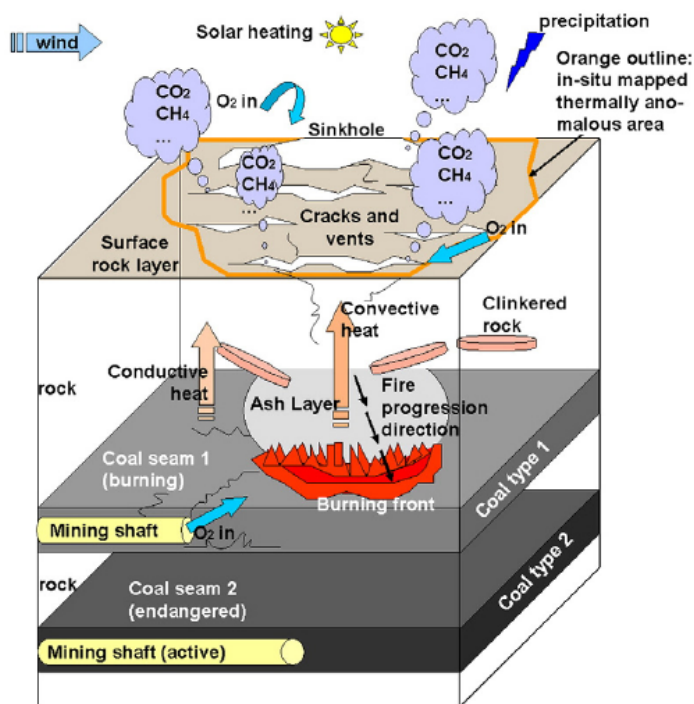
^۱- Heater

۳-۳-۳- روش سنجش از راه دور^۱

خودسوزی زغال سنگ باعث تولید مقادیر زیادی از گازهای گلخانه‌ای مانند CO_2 ، CH_4 ، SO_x و NO_x می‌شود (شکل ۳-۱۷) که این گازها تأثیر مستقیم بر روی ترکیب اتمسفر محلی و جهانی دارند (Gangopadhyay, 2008).

تولید گازهای گلخانه‌ای با تکامل مراحل اکسیداسیون زغال سنگ، از مراحل اولیه گرمایش خود به خودی تا خودسوزی و اشتعال کامل زغال سنگ با الگوهای مختلفی تعریف می‌شود که یکی از مشهورترین این الگوها، الگوی «نردبان آتش»^۲ است که نشان‌دهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای در طی مراحل پیشرفت گرمایش خود به خودی زغال سنگ است که در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است (Grewer, 1994).

شکل ۳-۱۹ نیز برحسب میزان تولید گازهای گلخانه‌ای مختلف ناشی از افزایش دما برای تعیین مراحل پیشرفت پدیده گرمایش خود به خودی زغال سنگ به کار می‌رود.

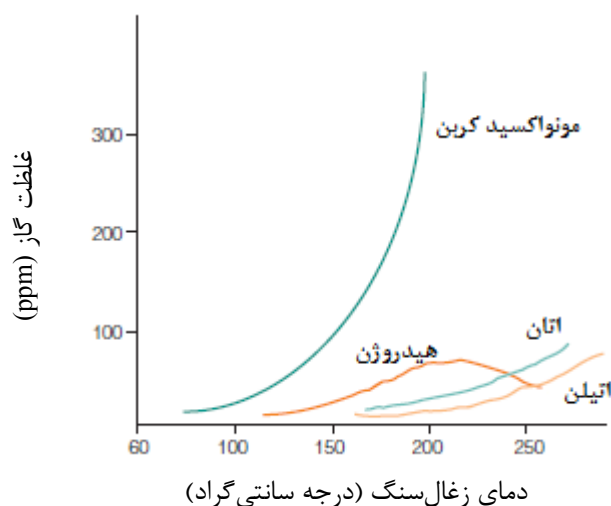


شکل ۳-۱۷: سوختن زغال سنگ در زیر سطح زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای (Dijk et al., 2011).

¹- Remote Sensing
²- Fire Ladder



شکل ۳-۱۸: «نردبان آتش»، نشان‌دهنده انتشار محصولات گازی مختلف ناشی از افزایش دما در پدیده گرمایش خود به خودی زغال‌سنگ (Grewer, 1994).



شکل ۳-۱۹: غلظت انتشار محصولات گازی مختلف ناشی از افزایش دما در پدیده گرمایش خود به خودی زغال‌سنگ (Chakravorty and Kolada, 1988).

با استفاده از آنالیز گازهای مختلف در هوای معدن روباز و استفاده از شکل ۳-۱۸ و شکل ۳-۱۹ می‌توان به پیش‌بینی گرمایش خود به خودی و تعیین مراحل پیشرفت واکنش اکسایش پی برد (Grewer, 1994).

تصویربرداری 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 شروع به کار کردند اما تا سال ۱۹۷۲ به جز برای مقاصد نظامی استفاده نمی‌شدند اما با گذشت زمان استفاده از آن‌ها چشمگیر شد (Gangopadhyay, 2008).

زمانی که یک گرمایش شعله‌دار زغال‌سنگ در سطح زمین یا زیر سطح زمین به وجود می‌آید، انرژی گرمایی قابل توجهی را از خود ساطع می‌کند (شکل ۳-۲۰) که به آسانی توسط پردازشگر گرمایی سنجش از راه دور شناسایی می‌شود.

برای تفکیک حرارت ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ از انرژی گرمایی خورشیدی، لازم است تا داده‌های 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 پرتو افکن.
- فعل و انفعال با اتمسفر جو - انعکاس و تابش انرژی از هدف از طریق اتمسفر جو 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 تصویر می‌شوند.

- تجزیه و تحلیل - تصاویر پردازش شده به صورت دیداری و یا دیجیتالی مورد تفسیر قرار می‌گیرند.

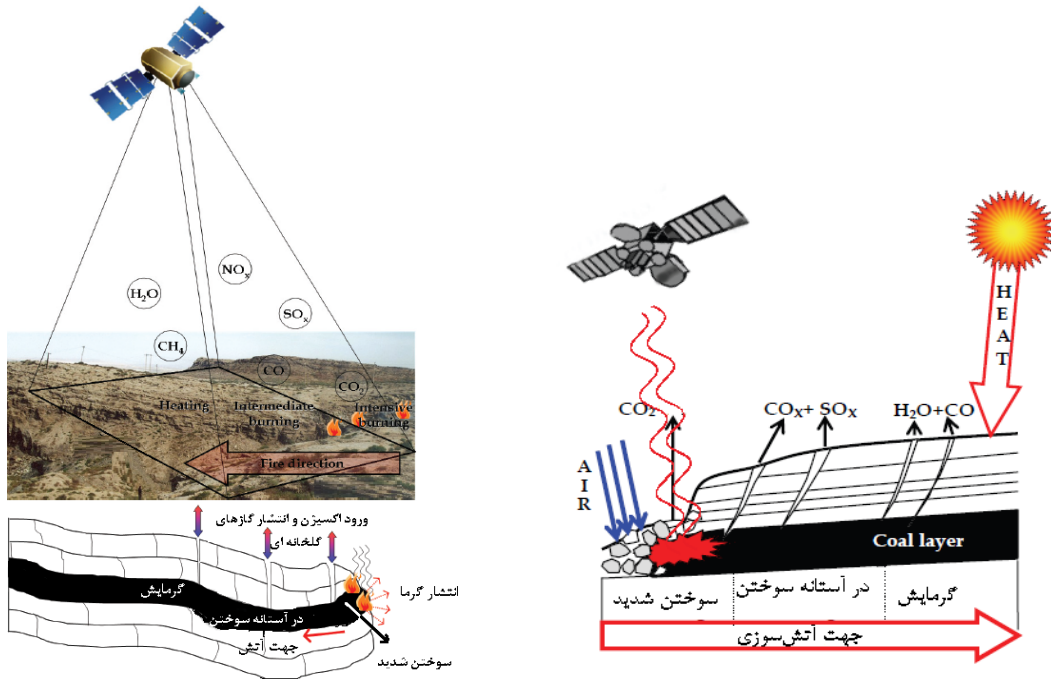
سه مرحله پیش‌نیاز، برای استفاده از سنجش از راه دور برای شناسایی خودسوزی زغال‌سنگ وجود دارد که در زیر به آن‌ها اشاره شده است (Gangopadhyay, 2008).

- گرفتن تصاویر و طول موج‌های 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 ۳-۲۱).

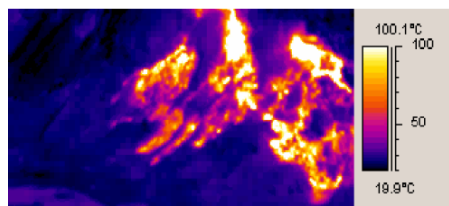
- به دست آوردن اطلاعات زمین‌شناسی منطقه.

- استفاده از دانش زمین‌شناسی برای حذف آنومالی‌هایی به جز آنومالی‌های ناشی از خودسوزی

زغال‌سنگ برای تهیه نقشه گرمایی درجه‌بندی شده با استفاده از دماهای به دست آمده از ناحیه مورد نظر.



شکل ۳-۲۰: پدیده خودسوزی زغال‌سنگ و تصاویری شماتیک از آشکارسازی خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش سنجش از راه دور (Gangopadhyay, 2008).

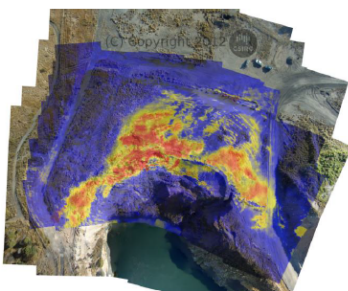


شکل ۳-۲۱: نمونه‌ای از یک تصویر مادون قرمز حرارتی از یک توده زغال‌سنگ در حال خودسوزی (Huw et al., 2003).

اتمسفر بین خودسوزی زغال‌سنگ و دریافت‌کننده‌های سنجش از راه دور نقش مهمی را در دقت برآورد دمای سطحی، مخصوصاً در مطالعات کمی ایفا می‌کنند. دمای سطح بالای یک خودسوزی زغال‌سنگ 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 تأثیر گذارند. مشخصات گرمایی سنگ نیز فاکتور

مهمی در سنجش از راه دورهای گرمایی است. برای مثال، برخی از سنگ‌ها با ظرفیت بالای گرمایی می‌توانند در تصویربرداری شبانه نیز به عنوان خودسوزی زغال‌سنگ ظاهر شوند چون این قبیل سنگ‌ها، گرمای زیادی را در مقایسه با سایر سنگ‌ها در خود ذخیره می‌کنند. به هر حال تصاویر 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 زغال‌سنگ در حال گرمایش کمک قابل توجه‌ای می‌کنند (Gangopadhyay, 2008).

یکی دیگر از روش‌های سنج از راه دور، استفاده از سیستم‌های پروازگر (پهپاد) بدون سرنشین^۱ سبک وزن است که نمونه‌ای از آن در شکل ۳-۲۲ آورده شده است. این سیستم مجهز به یک دوربین مادون قرمز همراه با حسگر دمایی و ضبط تصاویر همراه با طیف‌های مختلف دمایی است که می‌تواند تصویر سه‌بعدی از منطقه ارائه کند.



(الف) پروازگر (پهپاد) بدون سرنشین سبک وزن. (ب) دوربین مورد استفاده در پروازگر (پهپاد) بدون سرنشین. (ج) تصویر سه‌بعدی از گرمایش منطقه در یک معدن زغال‌سنگ روباز. شکل ۳-۲۲: نمونه‌ای از استفاده از سیستم‌های پروازگر (پهپاد) بدون سرنشین سبک وزن مورد استفاده در شناسایی گرمایش ناشی از خودسوزی زغال‌سنگ در معدن روباز زغال‌سنگ (Malos et al., 2013).

۳-۳-۴- سایر روش‌ها

الف- گمانه‌های اندازه‌گیری

بدیهی است که خودسوزی سطحی زغال‌سنگ به آسانی شناسایی و پایش می‌شوند؛ درحالی‌که یک خودسوزی زیرزمینی می‌تواند برای مدت زمان زیادی به فعالیت خود ادامه بدهد بدون اینکه هیچ‌گونه نشانه‌ی ظاهری از خود در سطح زمین داشته باشد.

^۱ - Unmanned Aircraft Systems (UAS)

قبل از ابداع روش «سنجش از راه دور» یکی از روش‌های شناسایی خودسوزی زغال‌سنگ در زیر سطح زمین استفاده از «گمانه‌های پایش» یا «گمانه‌های اندازه‌گیری» بود که از روش‌های مشهور در این زمینه محسوب می‌شد که نمونه‌ای از یک گمانه اندازه‌گیری در شکل ۳-۲۳ آورده شده است (Gangopadhyay, 2008).

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



شکل ۳-۲۳: نمونه‌ای از گمانه پایش و اندازه‌گیری گرمایش خود به خودی لایه زغال‌سنگ (Gangopadhyay, 2008).

ب- گرماسنج مادون قرمز بدون تماس فیزیکی^۱

این وسیله با استفاده از تابش و دریافت نور لیزر، در مکان‌هایی که حس‌گرهای^۲ حرارتی نمی‌توانند استفاده شوند، کاربرد دارد. از این وسیله در مکان‌هایی که حمل و نقل و جابجایی وجود دارد (مانند نوار نقاله‌ها)، مکان‌هایی که اندازه‌گیری بدون تماس فیزیکی به علت آلودگی بالا و خطرات مورد نیاز است (مانند نواحی تخریب شده در روش جبهه کار طولانی)، مکان‌هایی که فاصله قابل دسترس زیاد است و یا در مکان‌هایی که دما آن قدر زیاد است که ترموکوپل‌ها و حس‌گرهای موجود قادر به اندازه‌گیری دمای محل مورد نظر نیستند، استفاده می‌شود. نمونه‌ای از یک دستگاه گرماسنج مادون قرمز بدون تماس فیزیکی در شکل ۳-۲۴ آورده شده است.

^۱ - Non-Contact Infrared Thermometers

^۲ - Sensors



شکل ۳-۲۴: نمونه‌ای از دستگاه گرماسنج مادون قرمز بدون تماس فیزیکی (www.omega.com, 2016).

۳-۴- نقد و بررسی مطالعات گذشته

از مجموعه مطالب این فصل چنین برمی‌آید که تاکنون مطالعات فراوانی در زمینه قابلیت خودسوزی زغال سنگ صورت گرفته شده است. در این میان برخی از محققین به بررسی پارامترهای ذاتی زغال سنگ و برخی هم به بررسی مشخصات زمین‌شناسی و برخی دیگر نیز به بررسی پارامترهای معدنکاری در زمینه فرآیند خودسوزی زغال سنگ پرداخته‌اند. از میان این پارامترها، مشخصات ذاتی زغال سنگ از جمله مهم‌ترین پارامترهایی بوده است که بیش از ۸۸ درصد از مطالعات را به خود اختصاص داده است.

مطالعات انجام شده در زمینه طبقه‌بندی خودسوزی زغال سنگ‌ها را می‌توان در دو بخش ارائه روابط و نمودارهای آزمایشگاهی و سیستم‌های طبقه‌بندی تقسیم‌بندی کرد. متأسفانه در مطالعاتی که تاکنون در این دو بخش انجام شده است تمامی پارامترهای مؤثر در زمینه قابلیت خودسوزی زغال سنگ به خوبی پوشش داده نشده است. برای مثال در بیشتر روابط و نمودارهای آزمایشگاهی تنها از تعداد محدودی پارامتر برای ارزیابی خودسوزی زغال سنگ استفاده شده است. در بخش سیستم‌های طبقه‌بندی خودسوزی زغال سنگ، مطالعات آزمایشگاهی و طبقه‌بندی تنها برای تعداد محدودی از زغال سنگ‌ها که تحت آزمایش قرار گرفتند انجام شده است. از سوی دیگر در همین راستا وجود محدودیت‌های مرزی در سیستم‌های طبقه‌بندی ارائه شده باعث شده است که برخی از زغال سنگ‌ها در این طبقه‌بندی‌ها جایی نداشته باشند. به هر حال این قبیل مطالعات و طبقه‌بندی‌ها تنها در شرایط

خاص آزمایشگاهی و تنها برای نمونه زغال سنگ‌های مورد مطالعه قابل ارزیابی بوده و برای تعمیم آن برای سایر زغال سنگ‌ها به یک سیستم طبقه‌بندی یا رابطه ریاضی جامع و کامل نیاز است تا با توجه به مشخصات ذاتی زغال سنگ بتوان قابلیت خودسوزی زغال سنگ را مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار داد. به طور کلی مهم‌ترین انتقادهای موجود در این تحقیقات را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- عدم وجود ضرایب منطقی در معادلات ارائه شده توسط محققین

یکی از مهم‌ترین مواردی را که در بحث تحلیل و ارزیابی معادلات آماری می‌بایست به آن توجه کرد وجود ضرایب منطقی یا به عبارت دیگر پیروی معادله از طبیعت ذاتی و علمی موضوع است. متأسفانه در برخی از روابط ارائه شده در زمینه قابلیت خودسوزی زغال سنگ این مسئله مورد توجه قرار گرفته نشده است.

- وجود محدودیت‌های مرزی و هم‌پوشانی برخی از پارامترها در طبقه‌بندی‌های موجود

نکته حائز اهمیت در سیستم‌های طبقه‌بندی، وجود محدودیت‌های مرزی در مشخصات زغال سنگ است. یکی دیگر از موارد مهم و حائز اهمیت در ارائه یک طبقه‌بندی جامع، انتخاب پارامترهای طبقه‌بندی، عدم هم‌پوشانی با سایر پارامترهای موجود و درجه اهمیت هر یک از پارامترها است که توجه کمتری به آن‌ها شده است. به هر حال آنچه مسلم است قبل از انتخاب پارامترهای یک سیستم طبقه‌بندی انجام آنالیز حساسیت و بررسی هم‌پوشانی پارامترها برای کاهش تعداد پارامترها و کاربردی کردن طبقه‌بندی لازم و ضروری است.

به طور مثال در سیستم ارزیابی شاخص پتانسیل خودسوزی زغال سنگ CSCPi که توسط صفاری در سال ۱۳۹۲ ارائه شد محدودیت‌های مرزی لحاظ نشده است و از دیدگاه فازی یا احتمالاتی به پارامترها نگاه نشده است.

- وجود نتایج متناقض در اکثر مطالعات انجام شده

به طور مثال در خصوص تأثیر میزان رطوبت محتوی که دارای یک نقش مهم و کلیدی در خودسوزی زغال سنگ است مطالعات فراوانی توسط محققین مختلف انجام شده است که همگی آن‌ها به یک

رهیافت یکسان دست نیافته‌اند. Nandy و همکاران در سال ۱۹۶۷، Ellman و Sondreal در سال ۱۹۷۴، Chen و Stott در سال ۱۹۹۳ و Vance و همکاران در سال ۱۹۹۶ بیان کردند که یک میزان رطوبت محتوی بحرانی باعث می‌شود که نرخ اکسیداسیون زغال‌سنگ به حداکثر مقدار ممکن خود برسد. همچنین Hodges و Hinsley در سال ۱۹۶۴، Bhattacharyya و همکاران در سال ۱۹۶۸ و Kadioglu و Varamaz در سال ۲۰۰۳ بیان کردند که واکنش‌پذیری زغال‌سنگ با اکسیژن در زمانی که زغال‌سنگ مرطوب است بسیار سریع‌تر از زمانی است که زغال‌سنگ خشک است. در حالی که Li و Skinner در سال ۱۹۸۶، Akgun و Essenhigh در سال ۲۰۰۱، Beamish و Hamilton در سال ۲۰۰۵ و Beamish و همکاران در سال ۲۰۰۵ بیان کردند که واکنش‌پذیری نسبی زغال‌سنگ‌های مرطوب در قیاس با زغال‌سنگ‌های خشک، کمتر است و شاخص واکنش‌پذیری خودسوزی به شدت کاهش می‌یابد. از سویی دیگر Banerjee در سال ۱۹۸۵، Kaymakci و Didari در سال ۲۰۰۲، Kucuk و همکاران در سال ۲۰۰۳، Singh و همکاران در سال ۲۰۰۷، Beamish و Beamish در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، Saffari و همکاران در سال ۲۰۱۳، Sasaki و همکاران در سال ۲۰۱۴ و صفاری در سال ۱۳۹۲ بیان کردند که با افزایش میزان رطوبت محتوی نمونه‌های زغال‌سنگ، دمای زغال‌سنگ نیز با شدت بیشتری افزایش یافته و تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ افزایش می‌یابد. از سویی دیگر Arisoy و Beamish در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر و نقش دوگانه پیریت و رطوبت پرداختند. همچنین Wang و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که افزایش رطوبت گاز اکسیژن نقش بسیار مهمی در شروع فرآیند خودسوزی و پیشرفت خودسوزی زغال‌سنگ دارد. در جدول ۳-۲۴ نظرات مختلف در مورد تأثیر میزان رطوبت محتوی در تمایل به خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ آورده شده است.

از مجموع این بررسی‌ها چنین نتیجه می‌شود که مجموعه مطالعات انجام شده تاکنون به یک رهیافت یکسان و یکپارچه منجر نشده و دارای نتایج ضد و نقیضی هستند که شاید یکی از علل آن

بررسی تک پارامتری و نگاه جز گرا به این پدیده باشد که باید با یک نگاه کل گرا و با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مؤثر به یک رهیافت اساسی منجر شود.

جدول ۳-۲۴: نظرات مختلف در مورد تأثیر میزان رطوبت محتوی در تمایل به خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ.

مؤلف (سال انتشار)	افزایش رطوبت افزایش خودسوزی	افزایش رطوبت کاهش خودسوزی
Jones & Townend, 1949	•	
Berkowitz, 1951	•	
Yohe, 1958	•	
Hodges & Hinsley, 1964	•	
King et al., 1964	•	
Nandy et al., 1967	•	
Bhattacharyya et al., 1968	•	
Banerjee et al., 1970	•	•
Bhattacharyya, 1972	•	•
Sondreal & Ellman, 1974	•	
Hodges et al., 1976	•	
Armstrong, 1979	•	
Schmal et al., 1985	•	
Brooks & Glasser, 1986	•	
Li & Skinner, 1986	•	
Buckmaster & Kudynska, 1992	•	
Kudynska & Buckmaster, 1992	•	
Reich et al., 1992	•	
Chen & Stott, 1993	•	
Arisoy & Akgün, 1994	•	
Bhat & Agarwal, 1996	•	
Clemens & Matheson, 1996	•	
Krishnaswamy et al., 1996	•	
Vance et al., 1996	•	
Ceglarska-Stefanska et al., 1998	•	
Gong et al., 1999	•	
Kawatra & Hess, 1999	•	
Ren et al., 1999	•	
Akgun & Essenhigh, 2001	•	
Kaymakci & Didari, 2002	•	
Kadioğlu & Varamaz, 2003	•	
Küçük et al., 2003	•	
Wang et al., 2003 a	•	
Beamish & Hamilton, 2005	•	
Beamish et al., 2005	•	
Pone et al., 2007	•	
Singh et al., 2007	•	
Majumder et al., 2008	•	
Li et al., 2009	•	
Wang et al., 2009	•	
Beamish & Beamish, 2010	•	
Beamish & Beamish, 2011	•	
Saffari et al., 2013	•	
Wang et al., 2013	•	
Xu et al., 2013	•	
Panigrahi & Ray, 2014	•	
Choudhury et al., 2016	•	
Onifade & Genc, 2018 a	•	
Wang et al., 2018	•	
Wu et al., 2018	•	

- عدم بررسی نقش و تأثیر ماسرال‌ها در خودسوزی زغال‌سنگ

تاکنون در خصوص تأثیر ماسرال‌ها بر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ کار ارزنده‌ای انجام نشده است که نشان از یک خلل و نقص اساسی در مطالعات انجام شده است. در سری مطالعات گذشته، Humphreys در سال ۱۹۷۹ به این نتیجه رسید که تمایل به خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ با افزایش ویترونیته محتوی افزایش می‌یابد. Cotterell در سال ۱۹۹۷ نتوانست ارتباطی بین ماسرال محتوی و تمایل به خودسوزی پیدا کند. Arisoy در سال ۲۰۱۰ بیان کرد ماسرال محتوی یک پارامتر مؤثر در تخمین پتانسیل خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ نیست. انتظار می‌رود در تحقیق حاضر به بررسی نقش و تأثیر این پارامتر بر خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شود.

- در نظر گرفتن پارامترهای ذاتی و عملیاتی با هم در یک سیستم

در روش هندی، سیستم ارزیابی SES، سیستم ارائه شده توسط Singh و همکاران، سیستم جامع ارزیابی خطر خودسوزی چین و سیستم ارزیابی شاخص پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ CSCPI، مجموعه پارامترهای ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری با هم در یک سیستم طبقه‌بندی لحاظ شده‌اند که این شیوه طبقه‌بندی در یک کار مهندسی اشتباه است. علت این امر نیز آن است که در ابتدا و قبل از طراحی یک معدن باید بر اساس مشخصات ذاتی یک لایه زغال‌سنگ قابلیت خودسوزی آن لایه را مورد سنجش و ارزیابی قرار داد و بر اساس میزان خودسوز بودن آن لایه به طراحی و محاسبه پارامترهای معدنکاری یا به اصلاح پارامترهای عملیاتی پرداخت تا قابلیت خودسوزی لایه زغال‌سنگ بر اساس پارامترهای عملیاتی از بین رفته یا به حداقل مقدار ممکن خود برسد؛ که در سری تحقیقات بیان شده به این نکته کلیدی توجه نشده بود.

۳-۵- جمع‌بندی

چنانچه 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 سنگ یک نیاز اصلی و اولیه برای توسعه و پیشرفت طرح مدیریت خودسوزی به حساب می آید 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 علمی معتبر، روش های مختلف ارزیابی پتانسیل خطر خودسوزی زغال سنگ که توسط دانشمندان مختلف از کشورهای مختلف ارائه شده بود، جمع آوری و ارائه شد.

همان طور که مشاهده می شود در سری تحقیقات انجام یافته گذشته، هیچ کدام از این روش ها تمامی پارامترهای بحرانی و کلیدی را با هم مورد توجه قرار نمی دهند و جامعیت لازم را ندارند. همچنین با دقت در مطالعات انجام شده قبلی به وضوح آشکار می شود که نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه واحد و یک رهیافت اساسی برای ارزیابی قابلیت خطر خودسوزی زغال سنگ نمی انجامد.

مشکل عمده تحقیقات پیشین، مطالعه جداگانه پارامترهای مؤثر بر قابلیت گرمایش خود به خودی یا بررسی آنها به صورت کیفی است. این در حالی است که قابلیت خودسوزی زغال سنگ به پارامترهای بسیار زیادی وابسته است که این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ با هم می باشند.

از مطالب این فصل چنین نتیجه می شود که تاکنون مطالعات بسیار زیادی بر روی تأثیر پارامترهای مختلف بر پدیده خودسوزی زغال سنگ انجام شده است. با این حال به وضوح مشخص است که کلیه نتایج حاصل از این تحقیقات هر یک به طور جداگانه قابلیت خودسوزی زغال سنگ را مورد ارزیابی قرار داده اند؛ لذا ایجاد یک روش مبتنی بر پارامترهای ذاتی در مرحله طراحی که قابلیت اندازه گیری داشته باشند به منظور ایجاد همگرایی بیشتر این تحقیقات لازم به نظر می رسد.

فصل چهارم

مواد و روش تحقیق

۴-۱- مقدمه

انجام آزمایش خودسوزی زغال سنگ مستلزم فراهم کردن مواد اولیه، آشنایی با دستگاه‌ها، شناخت دقیق عملکرد آن‌ها، مشخص کردن شرایط کلی برای انجام آزمایش، معین کردن پارامترهای مورد بررسی و نحوه‌ی محاسبه‌ی هر یک از آن‌ها و در نهایت انجام آزمایش‌ها است. از این رو باید از ابتدای فعالیت با مشخص کردن طرح کلی اقدامات و برنامه‌ریزی برای انجام آن‌ها اقدام کرد. اهمیت این نحوه‌ی عملکرد، زمانی مشخص می‌شود که در صورت بروز مشکل کوچک و حتی در نگاه اول بی‌اهمیت، مجبور به شروع مجدد کل فرآیند شده و از نظر زمانی و مالی متضرر خواهیم شد. به همین علت بهتر آن است که ابتدا شناخت اولیه و کاملی بر موضوع پیدا کرد. با توجه به اهمیت موضوع در این فصل در ابتدا به نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها، روش‌های تعیین مشخصات ذاتی زغال سنگ، تعیین ترکیبات پتروگرافی نمونه‌های زغال سنگ، طراحی و ساخت دستگاه خودسوزی زغال سنگ و در نهایت پایگاه داده مورد استفاده پرداخته شده است.

۴-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق سعی شد با توجه به امکانات موجود، جامعه آماری کامل و دقیقی از نمونه زغال سنگ‌های معادن کشور (طبس، البرز شرقی، کرمان و البرز مرکزی) تهیه شود. پس از انجام آزمایش‌های مربوط به تعیین مشخصات ذاتی زغال سنگ و ماسرال‌شناسی آن‌ها، آزمایش بررسی قابلیت خودسوزی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. روش نگهداری نمونه از معدن تا آزمایشگاه به این صورت بود که نمونه‌های زغال سنگ در بسته‌های پلاستیکی آب‌بند هوا ناپذیر^۱ قرار گرفته (شکل ۴-۱) و سپس با ورقه‌ای از آلومینیوم پوشیده می‌شوند و سپس در یک ظرف عایق پر از یخ نگهداری می‌شوند تا اینکه به محل آزمایشگاه انتقال داده شوند. پس از ورود به آزمایشگاه گاز نیتروژن به بسته‌های حاوی نمونه تزریق شد تا از

^۱- Airtight

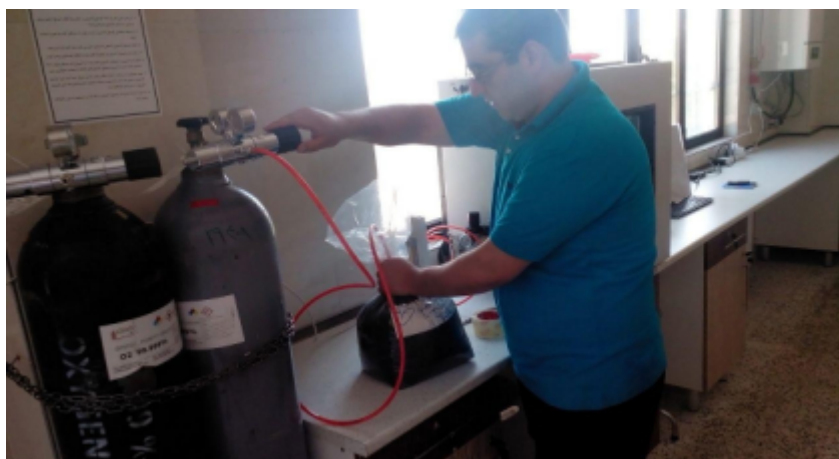
اکسیداسیون آن‌ها جلوگیری شود (شکل ۴-۲)، سپس در آزمایشگاه در محلی سرد از نمونه‌ها نگهداری شد. انجام آزمایش نمونه‌های زغال سنگ نباید بیش از یک هفته (تا حداکثر دو هفته) از زمان جمع‌آوری نمونه تا انجام آزمایش به طول انجامد زیرا در غیر این صورت نمونه‌های زغال سنگ دچار اکسایش شده و نتایج از اعتبار لازم برخوردار نیستند.

در آزمایشگاه، نمونه زغال سنگ پس از نمونه‌برداری به وسیله‌ی سنگ‌شکن فکی تحت خردایش قرار گرفت و سپس توسط آسیای گلوله‌ای تحت آسیا قرار گرفت تا ابعاد مورد نیاز به دست آیند. در هر مرحله، ۱۵۰۰ گرم خوراک ورودی به آسیای حاوی مجموعاً ۶۵۶۹/۵ گرم گلوله وارد شد (جدول ۴-۱). عملیات آسیا در هر مرحله به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد.

بعد از انجام خردایش و آسیا برای رسیدن به ابعاد مورد نیاز، نمونه‌های زغال سنگ با استفاده از روش تجزیه سرنندی، دانه‌بندی شدند. در هر بار عملیات دانه‌بندی مقدار حدود ۱۵۰۰ گرم از نمونه به مدت ۱۵ دقیقه توسط شیکر دانه‌بندی شد و سپس نمونه‌ها بعد از همگن شدن به کیسه‌های پلاستیکی آب‌بند هوا ناپذیر منتقل شدند و گاز نیتروژن به آن‌ها تزریق شد و تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند.



شکل ۴-۱: نگهداری نمونه‌های زغال سنگ از معدن تا آزمایشگاه در بسته‌های پلاستیکی آب‌بند هوا ناپذیر.



شکل ۴-۲: تزریق گاز نیتروژن به بسته‌های حاوی نمونه زغال‌سنگ.

جدول ۴-۱: مشخصات گلوله‌های به کار رفته در عملیات آسیا کنی.

وزن (گرم)		تعداد	گلوله	
کل	هر گلوله			
۱۳۵۸/۴	۲۸/۳	۴۸	کوچک ۱	●
۲۵۰۵/۶	۶۹/۶	۳۶	کوچک ۲	●
۲۴۴۷/۲	۱۲۸/۸	۱۹	متوسط	●
۲۵۸/۳	۲۵۸/۳	۱	بزرگ	●
۶۵۶۹/۵	مجموع	وزن خوراک ورودی: ۱۵۰۰ گرم		

۴-۳- تعیین مشخصات ذاتی نمونه‌های زغال‌سنگ

۴-۳-۱- روش تعیین رطوبت

واژه رطوبت به آب‌های آزاد سطح^۱، بخارهای جذب شده در سطح و یا حتی درون اجزای زغال‌سنگ، داخل درزه، ترک، شکاف یا منافذ داخلی و آب مولکولی زغال‌سنگ اطلاق می‌شود. تمام زغال‌سنگ‌ها دارای رطوبت ذاتی هستند به طوری که مقدار آن بستگی به نوع زغال‌سنگ و درجه تکامل آن دارد (اصانلو، ۱۳۷۸؛ یزدی، ۱۳۸۲).

^۱ - Loosely Water

طبق استاندارد (2017) ASTM D-3173-11 برای تعیین درصد رطوبت زغال سنگ، مقدار ۲۰۰ تا ۲۵۰ گرم از نمونه پودری زغال سنگ با ابعاد ۲۵۰ میکرون یا همان مش شماره ۶۰ را به مدت ۱۶ ساعت در آون در دمای ۱۰۴ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد (به طور متوسط ۱۰۵ درجه سانتی گراد) گذاشته و پس از مدت زمان بیان شده از توزین اختلاف زغال سنگ اولیه و زغال سنگ خشک شده مطابق با رابطه‌ی ۴-۱ برای تعیین درصد رطوبت استفاده می‌شود.

$$M(\%) = [(A - B) / A] \times 100 \quad (1-4)$$

M: میزان رطوبت موجود در نمونه (بر حسب درصد)

A: وزن نمونه اولیه زغال سنگ مورد استفاده برای تعیین رطوبت (بر حسب گرم)

B: وزن نمونه زغال سنگ پس از گرم شدن (بر حسب گرم)

۴-۳-۲- روش تعیین خاکستر

یکی از پارامترهای اصلی تعیین کننده‌ی کیفیت زغال سنگ، تعیین میزان خاکستر است. خاکستر حاوی مواد غیر آلی و زائدی مثل رس‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها، کربنات‌ها و غیره هستند که پس از سوختن کامل زغال سنگ، به جا می‌مانند (یزدی، ۱۳۸۲).

طبق استاندارد (2011) ASTM D-3174-12 برای تعیین درصد خاکستر زغال سنگ، مقدار یک گرم از نمونه پودری زغال سنگ با ابعاد ۲۵۰ میکرون یا همان مش شماره ۶۰ را در بوته چینی وزن کرده، سپس بوته به مدت یک ساعت و سی دقیقه در کوره که دمای آن به ۸۵۰ درجه سانتی گراد رسیده است، قرار داده می‌شود. پس از مدت زمان بیان شده بوته‌ها از کوره خارج شده و بر روی آجرنسوز قرار می‌گیرند تا به دمای محیط رسیده و بتوان آن‌ها را وزن کرد.

برای محاسبه‌ی خاکستر از توزین بوته‌ی خالی، بوته حاوی زغال سنگ و وزن بوته و خاکستر باقی مانده بعد از کوره استفاده می‌شود. به همین علت باید بوته را بعد از کوره روی آجرنسوز قرار داد تا در وهله‌ی اول

باعث آتش‌سوزی نشود و در مرحله‌ی بعد در اثر چسبیدن ذرات به بوته‌های داغ در وزن نهایی مشکلی پیش نیاید. رابطه‌ی ۲-۴ برای تعیین درصد خاکستر استفاده می‌شود.

$$\text{Ash}(\%) = [(A - B) / C] \times 100 \quad (2-4)$$

Ash: میزان خاکستر موجود در نمونه (بر حسب درصد)

A: وزن بوته و خاکستر باقی‌مانده بعد از کوره (بر حسب گرم)

B: وزن بوته خالی (بر حسب گرم)

C: وزن نمونه اولیه خشک زغال‌سنگ مورد استفاده برای تعیین خاکستر (بر حسب گرم)

۳-۳-۴- روش تعیین مواد فرار

مواد فرار عبارت است از گازهایی که در اثر تقطیر زغال‌سنگ در ظروف سربسته در دمای حدود ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد از آن خارج می‌شود و شامل هیدروکربن‌ها، گازهای گوگردی، آمونیاک، هیدروژن، بخار قطران و بخار آب است (رضایی، ۱۳۸۰).

طبق استاندارد (ASTM D-3175-17 (2017) برای تعیین درصد مواد فرار زغال‌سنگ، مقدار پنج

گرم از نمونه پودری زغال‌سنگ با ابعاد ۲۱۲ میکرون (مش شماره ۷۰) یا ۲۵۰ میکرون (مش شماره ۶۰) را در داخل بوته چینی درب دار ریخته و به مدت هفت دقیقه در کوره که دمای آن به ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است، قرار داده می‌شود. پس از خنک شدن بوته، مطابق رابطه‌ی ۳-۴ میزان مواد فرار محاسبه می‌شود.

$$\text{VM}(\%) = [(A - B) / C] \times 100 \quad (3-4)$$

VM: میزان مواد فرار موجود در نمونه (بر حسب درصد)

A: وزن بوته و نمونه باقی‌مانده بعد از کوره (بر حسب گرم)

B: وزن بوته خالی (بر حسب گرم)

C: وزن نمونه اولیه خشک زغال سنگ مورد استفاده برای تعیین مواد فرار (بر حسب گرم)

۴-۳-۴- روش تعیین کربن ثابت

درصد کربن ثابت یا عیار زغال سنگ میزان درصد کربن باقی مانده در نمونه زغال سنگ بعد از خروج مواد فرار در نمونه زغال سنگ است. درصد کربن ثابت مستقیماً محاسبه نمی شود و طبق استاندارد ASTM D-3176-15 (2015) و از کسر عدد ۱۰۰ از میزان مجموع رطوبت، خاکستر و مواد فرار مطابق رابطه ی ۴-۴ حاصل می شود.

$$FC(\%) = 100 - [M + Ash + VM] \quad (۴-۴)$$

FC: میزان کربن ثابت موجود در نمونه (بر حسب درصد)

M: میزان رطوبت موجود در نمونه (بر حسب درصد)

Ash: میزان خاکستر موجود در نمونه (بر حسب درصد)

VM: میزان مواد فرار موجود در نمونه (بر حسب درصد)

۴-۴- تعیین ترکیبات پتروگرافی نمونه های زغال سنگ

زغال سنگ از اجزای آلی ریز میکروسکوپی به نام ماسرال^۱ تشکیل شده است. ماسرال ها بخش با ارزش تشکیل دهنده زغال هستند که شامل سه گروه ویتترینیت^۲، لیپتینیت^۳ و اینرتینیت^۴ هستند. خواص زغال سنگ تابعی از نوع و میزان ماسرال های تشکیل دهنده زغال سنگ است (Cui and Bustin, 2006; ASTM D-2799-11, 2011).

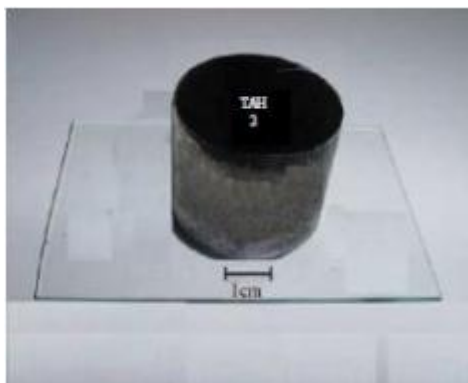
^۱- Maceral

^۲- Vitrinite

^۳- Liptinite

^۴- Inertinite

برای انجام مطالعات ماسرال‌شناسی، بایستی از نمونه‌های زغال‌سنگ مقطع صیقلی تهیه شود و سپس مقاطع صیقلی مورد مطالعه قرار گیرند. برای تهیه مقطع صیقلی حدود ۲۰۰ گرم نمونه زغال‌سنگ تا محدوده ابعادی (۱۰۰+۱۰۰-) میکرون توسط هاون خرد می‌شود (Zdravkov and Kortenski, 2004). پس از آن نمونه‌های خرد شده را در داخل قالب‌های پلاستیکی به قطر ۲۰ میلی‌متر توسط چسب رزین مخلوط کرده و به مدت ۴۸ ساعت در معرض هوا قرار داده می‌شود تا نمونه خشک شود. سپس نمونه‌های خشک شده را برش داده و از قالب جدا کرده و سپس به همراه پودرهای صیقل (از درشت به سمت ریز، ۱۰۰ تا ۱۰۰۰) توسط یک صفحه دیسکی چرخان صیقل داده می‌شوند (شکل ۴-۳). پس از آن در آزمایشگاه اپتیک نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ با بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.



(ب) قالب‌های خارج شده



(الف) قالب‌های پلاستیکی تهیه مقطع صیقلی



(ج) صفحه دیسکی چرخان

شکل ۴-۳: روش تهیه مقطع صیقلی از نمونه زغال‌سنگ.

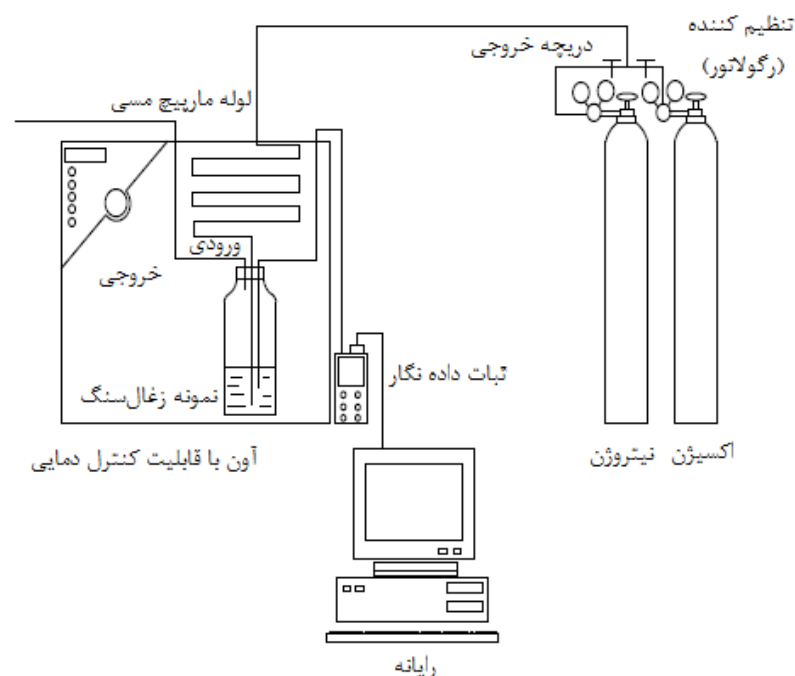
محاسبه درصد نسبی هر یک از ماسرال‌ها در گذشته با استفاده از حرکت تار رتیکول در امتداد یک خط و شمارش هر یک از ماسرال‌ها صورت می‌گرفت که به این روش آنالیز خطی گفته می‌شود و امروزه از روش نقطه شماری، بیشتر استفاده می‌شود. در این روش صفحه میکروسکوپ به اندازه یک واحد در هر بار به سمت جلو حرکت می‌کند. هر بار که ماسرالی در زیر تار رتیکول قرار می‌گیرد شمارش می‌شود. فراوانی هر یک از ماسرال‌ها از تعداد نقاطی که در آن ماسرال مشخص می‌شود به کل نقاط شمارش شده اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری در یک شبکه کامل و با حداکثر نقاط شمارش شده انجام می‌شود. در آنالیز میکروسکوپی مقاطع صیقلی، شمارش بر اساس حداقل ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نقطه انجام می‌گیرد (Speight, 1982; ISO-7404-3, 2009; ISO 7404-5, 2009; Stach, 2015).

در مطالعه حاضر شمارش با استفاده از نرم‌افزار انجام شد، به این صورت که ابتدا توسط میکروسکوپ مجهز به دوربین در رفلکت نور سفید با بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر مقطع مورد مطالعه قرار گرفت. سپس از هر مقطع عکس گرفته شد و تصاویر گرفته شده توسط نرم‌افزار Matlab پردازش شد. به این صورت که دامنه رنگ‌های مورد نظر به عنوان داده‌های ورودی و درصد ماسرال مورد نظر از طریق شناسایی رنگ به عنوان خروجی نرم‌افزار در نظر گرفته شد. با استفاده از وجه تمایز رنگ ماسرال‌ها و مینرال‌ها که محدوده‌های تغییر رنگ آن بین سیاه مطلق تا سفید مطلق تغییر می‌کرد، جداسازی و سپس درصدگیری توسط نرم‌افزار صورت گرفت.

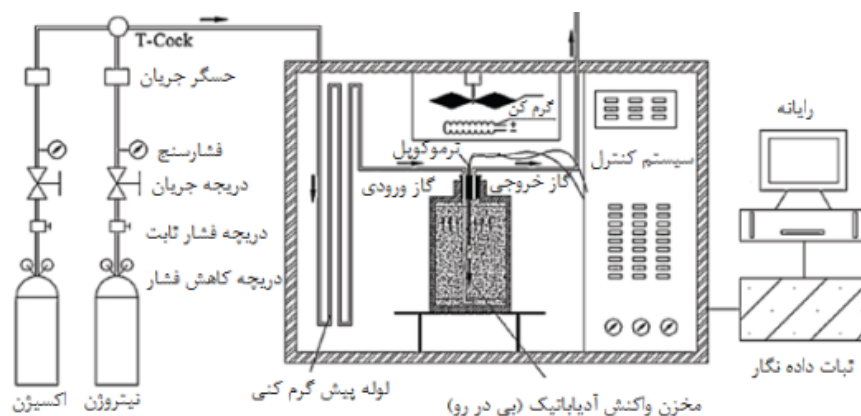
۴-۵- طراحی و ساخت دستگاه خودسوزی زغال سنگ

به طور کلی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق را می‌توان به دو بخش زیر تقسیم‌بندی کرد:
الف) تعیین مشخصات ذاتی و پتروگرافی نمونه‌های زغال سنگ که در بخش‌های قبل به تفصیل تشریح شد.

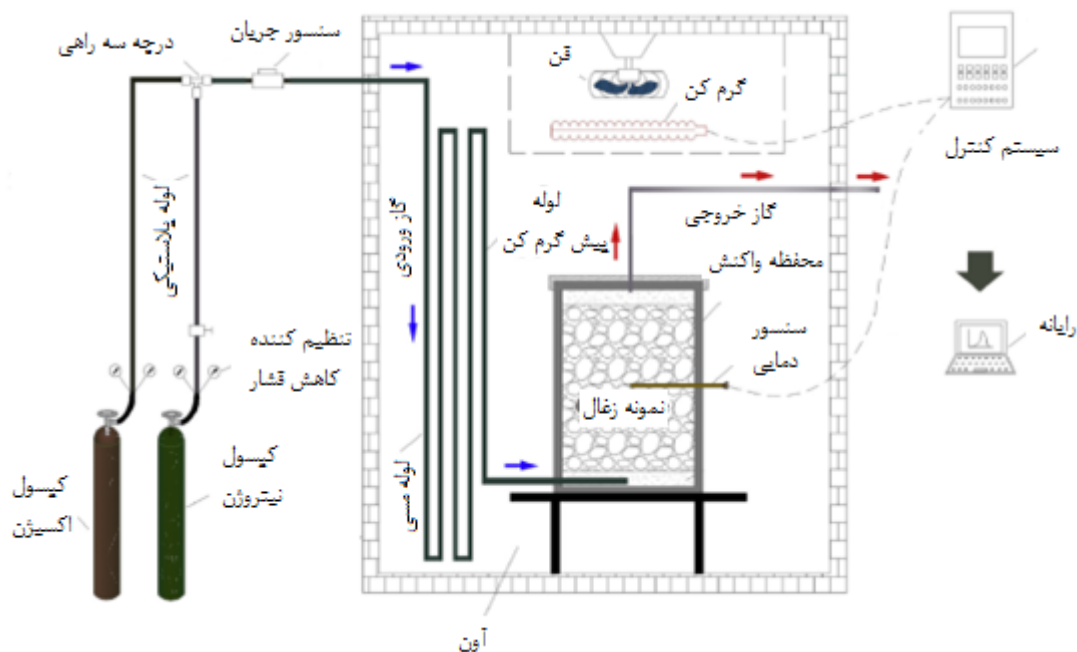
ب) راهاندازی دستگاه خودسوزی زغال سنگ و انجام آزمایش‌های مربوطه برای درک بهتر فرآیند خودسوزی زغال سنگ که در این بخش به تفصیل به شرح اجزا آن پرداخته شده است. در این تحقیق به منظور انجام آزمایش خودسوزی زغال سنگ در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از مطالعه منابع علمی مختلف به بررسی روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ پرداخته شد و دستگاه مورد نظر برای شبیه‌سازی شرایط خودسوزی زغال سنگ که ترکیبی از روش CPT و R70 که در فصل سوم از تحقیق حاضر تشریح شد، طراحی و ساخته شد. شکل ۴-۴ تا ۴-۶ نمای شماتیک و شکل ۴-۷ نمای کلی از دستگاه مورد نظر را نشان می‌دهد.



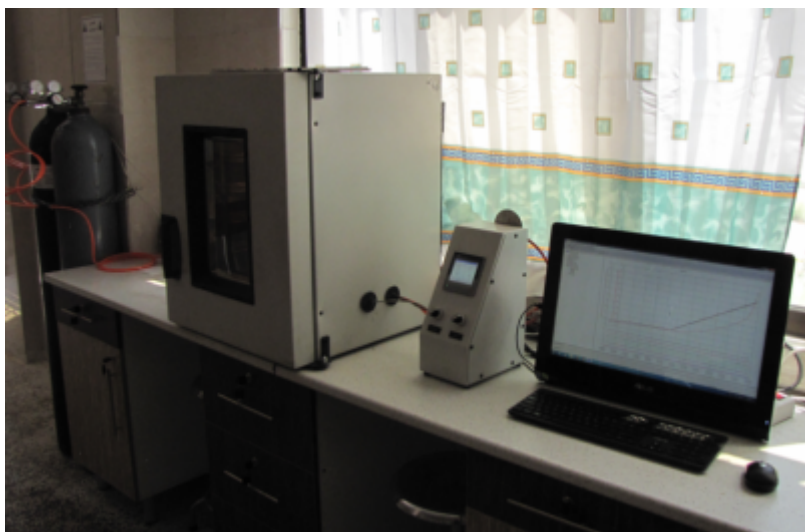
شکل ۴-۴: نمای شماتیک از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ.



شکل ۴-۵: نمای شماتیک از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ.



شکل ۴-۶ نمای شماتیک از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ.



شکل ۴-۷: نمای کلی از مجموعه سیستم آزمایش بررسی قابلیت پتانسیل خودسوزی زغال سنگ.

از قابلیت‌های این دستگاه جدید قابلیت اندازه‌گیری مقادیر R_{70} و CPT است. در مجموعه دستگاه‌های قبلی تنها یک روش آزمایشگاهی قابلیت اندازه‌گیری داشت، اما در این دستگاه جدید با تعبیه یک کنترلر چند حالتی هر دو روش مذکور قابلیت اندازه‌گیری را دارند و لذا به این ترتیب می‌توان نتایج دو روش را با یکدیگر اعتبارسنجی کرد.

زیرسیستم‌های دستگاه مورد آزمایش به شرح زیر است:

- کپسول نیتروژن ۵۰ لیتری (برای پیش گرم‌کنی نمونه زغال‌سنگ تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در روش CPT و خشک کردن نمونه زغال‌سنگ در دمای ۱۰۵-۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در روش R₇₀) که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.
- کپسول اکسیژن ۵۰ لیتری (برای تأمین گاز مورد نظر واکنش و ارسال آن به محفظه واکنش) که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.
- فلومتر روتامتر هوا که نوعی دبی سنج است که می‌تواند دبی سیال عبوری از یک لوله را اندازه‌گیری کند.



شکل ۴-۸: کپسول‌های نیتروژن و اکسیژن ۵۰ لیتری به همراه رگلاتور سر کپسولی دو مرحله‌ای و فلومتر روتامتر هوا ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به همراه پایه نگهدارنده آلومینیومی طراحی شده.

- لوله مسی مارپیچ به طول ۱۵ متر و قطر ۶ میلی‌متر که برای تأمین گاز مورد نظر و گرم کردن گاز عبوری از لوله و ورود به محفظه واکنش استفاده می‌شود و به صورت مارپیچ در داخل آن تعبیه شده است (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹: نمای داخلی آون به همراه لوله مسی ماریپیچ.

- کنترلر^۱ دمایی قابل برنامه‌ریزی و ثابت داده‌نگار^۲ مدل JUMO Dicon touch آلمان با

پانل لمسی و نمایشگر رنگی دیجیتال ۳/۵ اینچی و قابلیت اجرا ۱۰ برنامه مستقل زمان-دما با ۵۰ شیب دمایی مختلف همراه با نمایشگر موقعیت برنامه و خروجی USB و کامپیوتر و کارت‌های اضافه برای ثبت تغییرات دمایی آون و نمونه زغال‌سنگ از طریق سنسورهای دمایی و تبعیت ورودی دوم از ورودی اول که دمایی از آن در شکل ۴-۱۰ و ۴-۱۱ آورده شده است.

^۱- Micro Controller
^۲- Data Logger



شکل ۴-۱۰: کنترلر دمایی قابل برنامه‌ریزی و ثبت داده نگار مدل JUMO Dicon touch آلمان.



کنترلر دمایی قابل برنامه‌ریزی و ثبت داده نگار

شکل ۴-۱۱: کنترلر دمایی قابل برنامه‌ریزی و ثبت داده نگار مدل JUMO Dicon touch آلمان به همراه پایه نگهدارنده و کامپیوتر.

- سنسور دمایی^۱ PT100 (PT به معنای پلاتین و ۱۰۰ معرف مقاومت فلز برحسب اهم در دمای صفر درجه سانتی‌گراد است) نوع K که برای ارزیابی دمایی استفاده می‌شوند. این سنسور با مغزی JUMO آلمان، طول غلاف ۱۸ سانتی‌متر، قطر غلاف ۶ میلی‌متر، رزوه ۱/۲ اینچ، به همراه ۲ متر کابل شیلددار سه سیمه با قابلیت اندازه‌گیری حداقل دمای ۵۰- درجه سانتی‌گراد و حداکثر دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است که نمایی از آن در شکل ۴-۱۲ آورده شده است. یک سنسور دمایی در

^۱ - Thermocouple

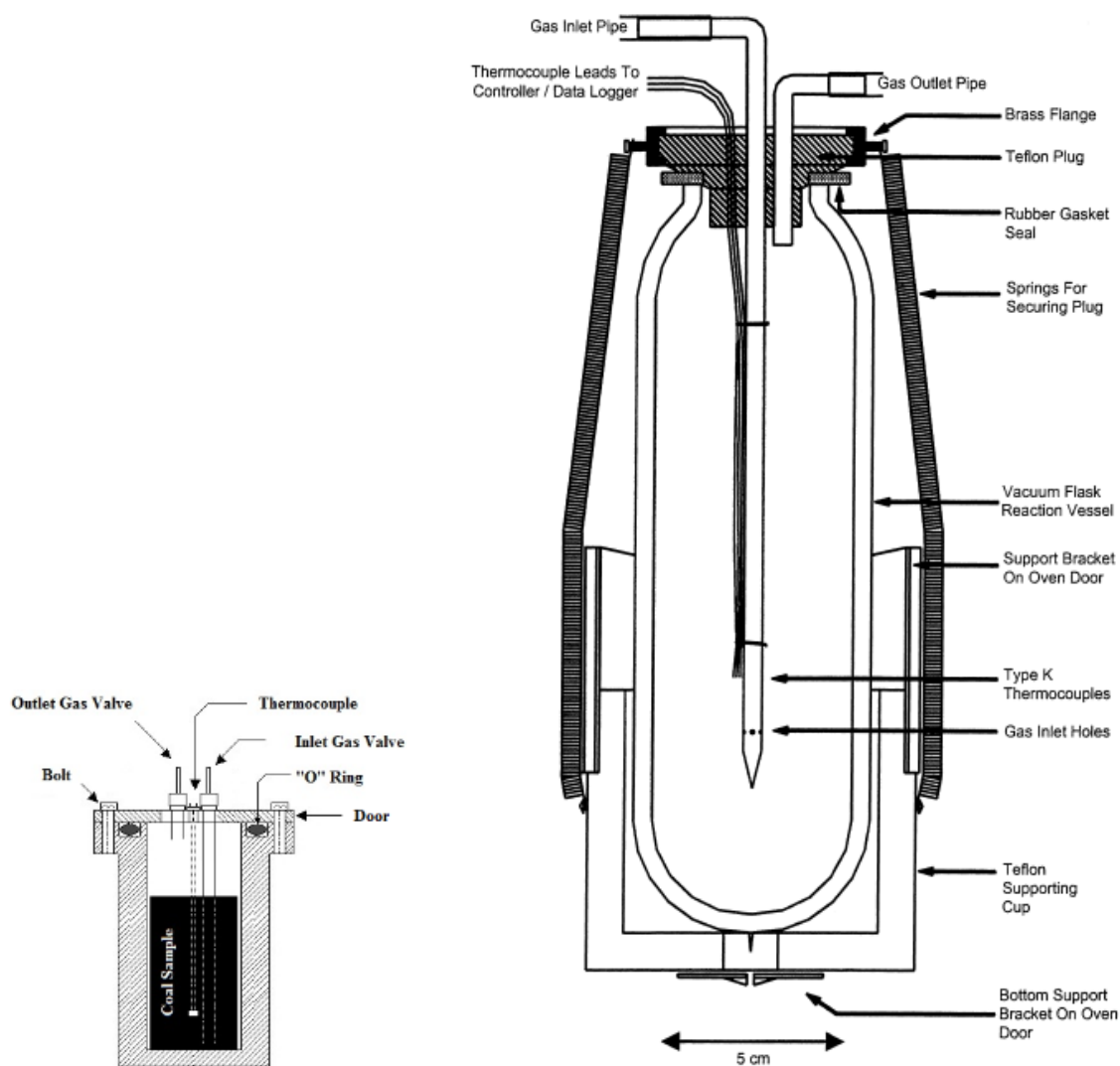
داخل آون قرار داده می‌شود و به ثبات داده نگار و کنترلر برای ارزیابی و کنترل دمای آون متصل می‌شوند. یک سنسور دمایی دیگر در رآکتور آدیاباتیک واکنش (فلاکس) و به ثبات داده نگار، کنترلر و کلید خاموش^۱ متصل می‌شود و برای اندازه‌گیری دمای نمونه زغال سنگ استفاده شده است.



شکل ۴-۱۲: سنسور PT100 با مغزی JUMO آلمان.

- رآکتور آدیاباتیک واکنش (فلاکس) محفظه‌ای است که نمونه زغال سنگ در آن قرار داده می‌شود و واکنش اکسیداسیون و خودسوزی زغال سنگ در آن انجام می‌شود. این محفظه در ابعاد کوچک برای کاربرد آزمایشگاهی و تحقیقاتی ساخته و تولید شده است. رآکتور آدیاباتیک واکنش با حجم داخلی ۱۰۰۰ میلی‌لیتر که با درپوشی عایق بسته و آب‌بند می‌شود و دقیقاً در مرکز آون قرار داده می‌شود. دو لوله مسی از درب این فلاکس عبور می‌کنند. یک لوله که بلندتر است (۱۵۰ میلی‌متر و قطر داخلی سه میلی‌متر) و برای عبور گاز نیتروژن و اکسیژن استفاده می‌شود و انتهای آن در نمونه زغال سنگ قرار می‌گیرد. لوله کوتاه‌تر برای خروج گازهای تولید شده ناشی از فرآیند اکسیداسیون از بالای نمونه زغال سنگ و خروج آن به بیرون آون استفاده می‌شود. شکل ۴-۱۳ نمای شماتیک و شکل ۴-۱۴ نمای کلی از رآکتور آدیاباتیک واکنش را نشان می‌دهد.

^۱ - Limit Switch



شکل ۴-۱۳: نمای شماتیک رآکتور آدیباتیک واکنش.



شکل ۴-۱۴: نمای کلی از رآکتور آدیباتیک واکنش به همراه لوله‌های ورود و خروج گاز و سنسور دمایی.

- آون آديباتيك قائم الكتريكي آزمايشگاهي ۴۰۰ درجه سانتي-گرادي ۶۰ ليتري با

گردش جريان هواي گرم و قابليت برنامه‌ريزي دمائي در سه حالت مختلف

آون مورد نظر كه به يك كنترلر^۱ براي كنترل دمائي آون و نمونه زغال‌سنگ مجهز است داراي سه بخش از تنظيمات است: حالت ايزوترمال (هم‌دما)^۲، حالت افزايش دمائي قابل برنامه‌ريزي^۳ و حالت كنترل از دور^۴.

• در حالت ايزوترمال (هم‌دما)، آون براي اجرائي يك دمائي معين تنظيم مي‌شود و اين دما تا زمان اجرائي برنامه ديگر تغيير نمي‌كند كه پيش شرط اجرائي دو روش R70 و CPT خواهد بود.

• در حالت برنامه‌ريزي، آون براي اجرائي يك نرخ گرمايش معين تنظيم مي‌شود كه از اين حالت براي اجرائي روش آزمايش CPT استفاده خواهد شد.

• در حالت كنترل از دور، افزايش دمائي آون با دمائي زغال‌سنگ تنظيم مي‌شود كه از اين حالت براي اجرائي روش آزمايش R70 استفاده خواهد شد.

در اين آون محيطي با دمائي دقيق و يكنواخت توسط المنت و يك فن كه در پشت آون قرار داده شده است براي توزيع يكسان دما در فضاي داخلي آون فراهم مي‌شود تا دمائي گاز گذرنده از نمونه همان دمائي محيط آون باشد، زيرا گاز قبل از اينكه به نمونه دميده شود از لوله مارپيچ مسي با طول حدود ۱۵ متر كه در آون تعبيه شده است گذر كرده و گرم مي‌شود و سپس وارد ظرف آديباتيك واكنش مي‌شود.

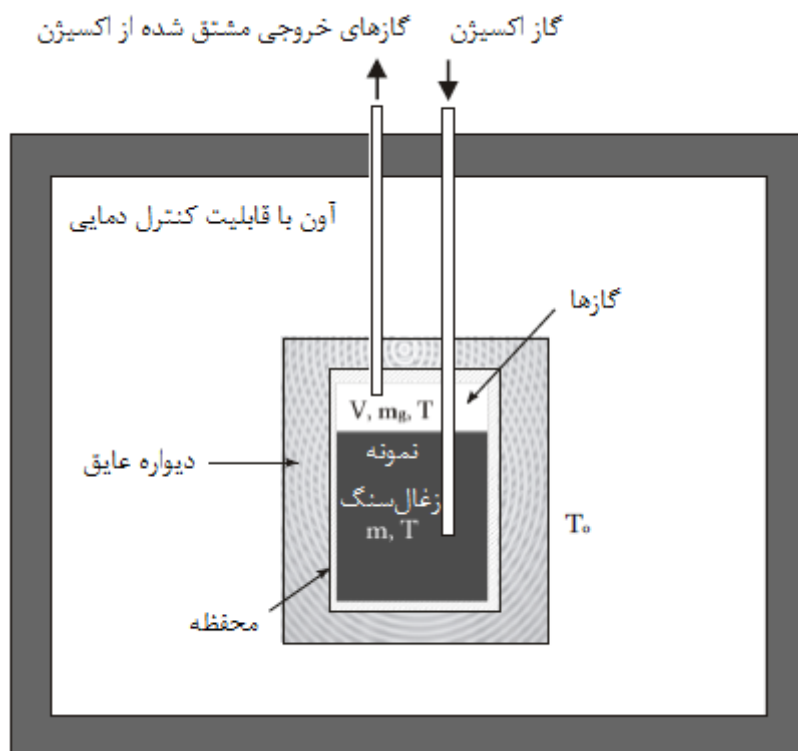
مشخصات آون قائم الكتريكي آزمايشگاهي مورد استفاده در ساخت دستگاه آزمايش خودسوزي زغال‌سنگ به شرح زير است و نمائي شماتيك و كلي از آن در شكل‌هاي ۴-۱۵ و ۴-۱۶ آورده شده است.

¹- Controller

²- Isothermal Mode

³- Programmable Temperature Rising Mode

⁴- Remote Mode



شکل ۴-۱۵: نمای شماتیک محفظه داخلی آون و رآکتور آدیاباتیک واکنش.



شکل ۴-۱۶: نمای کلی از آون.

- آون آزمایشگاهی الکتریکی با گردش جریان هوای گرم و فرمت قائم رومیزی با محفظه استیل ضد زنگ.
- حجم مفید ۶۰ لیتر با ابعاد داخلی ۵۰۰×۳۵۰×۳۵۰ (h×w×d/mm) و وزن ۸۰ کیلوگرم.

- حداکثر دمای کارکرد دائم ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای طراحی ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد با قابلیت تنظیم از دمای محیط برای انجام عملیات متنوع آزمایشگاهی.
- توان الکتریکی 3Kw، برق تک فاز و ۲۲۰ ولت و با حداکثر رشد دمایی ۲۴ درجه بر دقیقه و با قابلیت تنظیم.
- تثبیت دما با دقت ± 1 درجه سانتی‌گراد و یکنواختی^۱ دما در داخل آون ± 2 درجه سانتی‌گراد.
- مجهز به دو کانال یک اینچ برای ورود و خروج لوله‌های مورد نیاز کاربر (شکل ۴-۱۷).



شکل ۴-۱۷: کانال‌های یک اینچ برای ورود و خروج لوله‌های مورد نیاز.

- مجهز به ورودی هوای فشرده برای کنترل کولینگ به واسطه یک واحد مراقبت و شیرهای برقی و همچنین لوله‌های ارتباطی به داخل چمبر (شکل ۴-۱۸).

^۱- Uniformity



شکل ۴-۱۸: واحد مراقبت و شیرهای برقی ورودی هوای فشرده برای کنترل کولینگ.

- درب باز شونده از روبرو به همراه سیلینگ سیلیکونی مقاوم به حرارت با قفل اتومات در هنگام بسته شدن و عملکرد سریع در حالت باز شدن.
- جداره‌های داخلی، سقف و مبدا از جنس استنلس استیل مقاوم به حرارت با طراحی خاص، لیزر کات شده و بدون جوش.
- عایق جداره‌های خارجی پشم سنگ و الیاف فیبر سرامیکی ایزولایت.
- مجهز به سیستم گردش جریان هوای گرم توسط فن سانتریفیوژ با کوپل مستقیم و شافت هوا خنک بدون نیاز به کولینگ آبگرد.
- آگزوز برای خروج بخارات حاصل از عملیات با دمپر (دریچه تخلیه هوا) و قابلیت کنترل دستی.
- المنت‌های کانتال سوئد مستقر بر روی ایزولاتورهای سرامیکی ۱۲۶۰ درجه و جاسازی شده در کانال‌های هدایت هوا با دسترسی آسان.
- مدارات قدرت تمام تریستوری بدون ایجاد هارمونی‌های مزاحم در شبکه برق.
- مجهز به سنسور و کنترلر دیجیتال ثانوی به عنوان سیستم ایمنی و هشدار دهنده صوتی در صورت افزایش دمای نامطلوب و حفاظت^۱ دما با قطع اضطراری.

^۱ - Police

- تابلو برق کامل شامل کلیه قطعات کنترلی و حفاظتی از برندهای معتبر اروپایی یا ژاپنی مورد تأیید با اتصال به خط ارت.
- دارای ۴ عدد زیر سری و به همراه ۱ عدد سینی استیل مشبک با قابلیت جابجایی در راستای ارتفاع.
- مجهز به لامپ روشنایی داخل محفظه.
- مجهز به پنجره دید با شیشه دوجداره سکوریت شده.
- سازه رومیزی با رنگ الکترواستاتیک و شمای ظاهری بسیار مناسب برای محیط‌های آزمایشگاهی.

۴-۶- پایگاه داده

پایگاه داده مورد استفاده در این رساله شامل اندازه‌گیری مشخصات ذاتی، پتروگرافی و قابلیت خودسوزی ۶۴ نمونه زغال‌سنگ با دو روش CPT و R70 است و از این اطلاعات به عنوان ورودی فصل پنجم برای تجزیه و تحلیل اطلاعات، ارتباط بین پارامترها و ارائه مدل کمی و کیفی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ استفاده خواهد شد.

۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل در ابتدا به نحوه جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها، روش‌های تعیین مشخصات ذاتی و پتروگرافی نمونه‌های زغال‌سنگ بر اساس آخرین استانداردهای روز دنیا، طراحی و ساخت دستگاه خودسوزی زغال‌سنگ با قابلیت اندازه‌گیری دو روش CPT و R70، پایگاه داده مورد استفاده پرداخته شد. در فصل بعد، از اطلاعات پایگاه داده جمع‌آوری شده به عنوان داده ورودی برای تجزیه و تحلیل اطلاعات، ارتباط بین پارامترها و ارائه مدل کمی و کیفی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ استفاده خواهد شد.

فصل پنجم

**ارائه مدل کمی و کیفی
ارزیابی قابلیت خودسوزی
لایه‌های زغال سنگ**

خودسوزی زغال سنگ فرآیندی است که طبیعتاً بر اثر اکسایش اتفاق می‌افتد و طبیعت اکسایش زغال سنگ غیر قابل کنترل است که می‌تواند منجر به خودسوزی زغال سنگ شود. چنانچه در فصل دوم بدان اشاره شد، خودسوزی زغال سنگ فرآیندی است که ناشی از تعدادی فرآیند گرمازای پیچیده است. استعداد زغال سنگ به خودسوزی، وابسته به تعدادی از پارامترهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل است. از منظری دیگر این پارامترها را می‌توان به دو دسته اصلی، مشخصات زغال سنگ (عوامل ذاتی) و شرایط محیطی (عوامل بیرونی) طبقه‌بندی کرد (IEA Clean Coal Centre, 2010).

مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ مشخصات مربوط به عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری است. چنانچه در فصل سوم نیز بیان شد بیش از ۸۸ درصد مطالعات انجام شده تاکنون در خصوص تأثیر مشخصات ذاتی زغال سنگ بر روی خودسوزی آن انجام شده است که این مطلب بیان می‌کند، پارامترهای ذاتی به عنوان اصلی‌ترین پارامترها نقش بسیار اساسی در خودسوزی زغال سنگ دارند.

تاکنون متخصصان متعددی از کشورهای مختلف به بررسی نقش و تأثیر پارامترهای مختلف بر خودسوزی زغال سنگ پرداخته‌اند. مطالعات انجام شده پیشین و منابع معتبر در دسترس به طور مناسبی تأثیر پارامترهای مختلف را بر خودسوزی زغال سنگ 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 زغال سنگ را مطالعه نکرده و هیچ‌گونه بحثی بر روی درجه اهمیت هر یک از پارامترها انجام نداده‌اند.

در ادامه این فصل مهم‌ترین پارامترهای ذاتی مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ با توجه به تحقیقات گذشته و تحقیق حاضر به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. سپس مدل کیفی در قالب سیستم طبقه‌بندی توسعه داده شده است که خروجی آن شاخص کیفی برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ است. سیستم طبقه‌بندی در مرحله بعد با داده‌های واقعی اعتبار سنجی

می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از ۸۰ درصد پایگاه داده ارائه شده در انتهای فصل چهارم، یک مدل کمی ارائه شده است و برای اعتبارسنجی این مدل از ۲۰ درصد باقیمانده پایگاه داده ارائه شده استفاده شده است.

۵-۲- بررسی عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

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

دلیل اصلی در درک مشکل مکانیسم خودسوزی زغال سنگ، به جز تمایل طبیعی زغال سنگ به خودسوزی، حضور تعدادی پارامتر مهم داخلی و خارجی تأثیرگذار بر شروع و گسترش این پدیده است که بر خودسوزی زغال سنگ تأثیرگذار می‌باشند. این عوامل عمدتاً در سه گروه اصلی عوامل ذاتی، عوامل زمین‌شناسی و عوامل معدنکاری تقسیم‌بندی می‌شوند. به دلیل اهمیت بیش از حد عوامل ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ تنها تأثیر این عوامل با استفاده از روش‌های CPT و R70 که در فصل سوم و چهارم به آن‌ها اشاره شد در رساله حاضر بررسی شده است.

۵-۲-۱- عوامل ذاتی مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

الف- درجه زغال‌شدگی^۱

خودسوزی زغال سنگ یک پدیده وابسته به نوع زغال سنگ است به طوری که زغال سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی نسبت به زغال سنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی، مستعدتر برای خودسوزی هستند که علت آن ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی در زغال سنگ‌های مختلف است و استخراج، انباشت و حمل و نقل این نوع از زغال سنگ‌ها مدیریت و برنامه‌ریزی خاصی را طلب می‌کند

^۱ - Rank of Coal

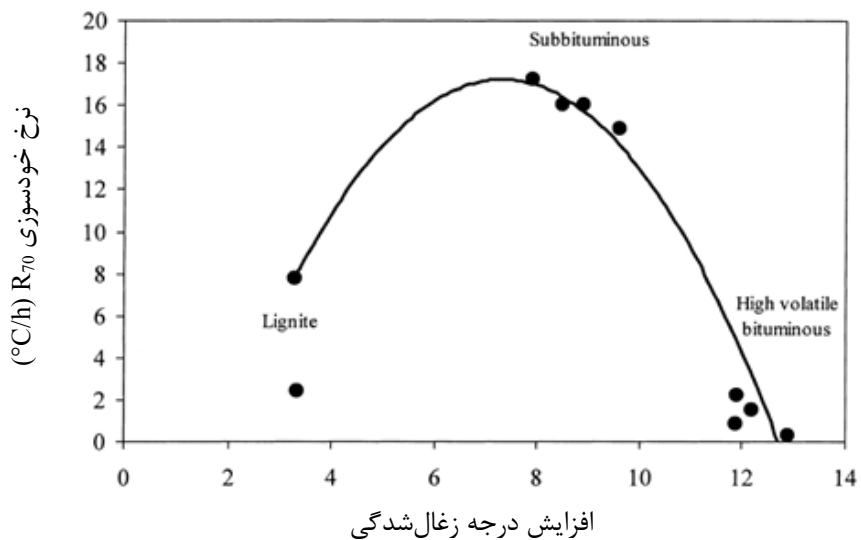
(Kuchta et al., 1980; Beamish, 2005; Beamish et al., 2013; Beamish et al., 2016). بدین ترتیب زغال سنگ‌های لیگنیت و ساب بیتومینه مستعدتر از زغال سنگ‌های بیتومینه و آنتراسیت در خودسوزی هستند (Rahman et al., 1986; Beamish and Arisoy, 2008 a; IEA Clean Coal Centre, 2010).

همان‌طور که در شکل ۱-۵ و شکل ۲-۵ که حاصل نتایج Beamish و همکاران در سال ۲۰۰۱ و Beamish در سال ۲۰۰۵ است مشاهده می‌شود، با افزایش درجه زغال‌شدگی، نرخ خودسوزی R_{70} کاهش می‌یابد به طوری که در زغال سنگ‌های آنتراسیت این مقدار به کمترین میزان خود می‌رسد و در زغال سنگ‌های ساب بیتومینه این مقدار به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

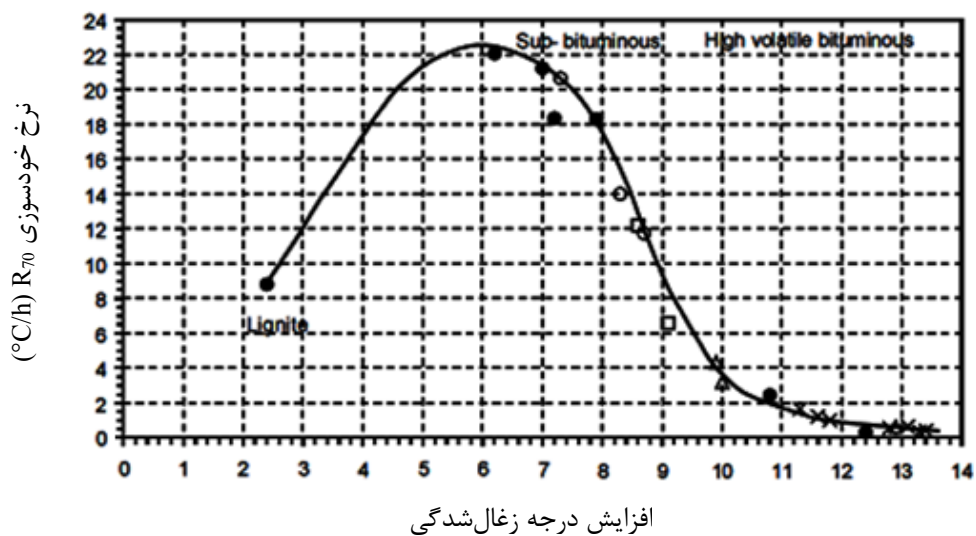
در شکل ۳-۵ و شکل ۴-۵ که حاصل نتایج رساله حاضر است مشاهده می‌شود در روش R_{70} و روش دمای نقطه تقاطع خودسوزترین نمونه‌های زغال سنگ‌های در میزان کربن ثابت ۴۰ تا ۵۰ درصد رخ می‌دهد که مؤید کارهای Beamish و همکاران در سال ۲۰۰۱ و Beamish در سال ۲۰۰۵ است. همچنین ضریب تعیین حاصل از برازش‌های ارائه شده در شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.

با کاهش درجه زغال‌شدگی، رطوبت محتوی، اکسیژن محتوی، مواد فرار، هیدروژن محتوی و سطح تأثیر داخلی زغال سنگ همگی افزایش می‌یابند. افزایش هر یک از این عوامل باعث افزایش سرعت اکسیداسیون می‌شود که تمایل به خودسوزی زغال سنگ را افزایش می‌دهند. درحالی‌که زغال سنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی حاوی درصد بالایی از کربن و درصد کمی از اکسیژن و هیدروژن هستند (Michalski et al., 1990; Nelson and Chen, 2007). اکسیژن محتوی زغال سنگ نقش مهمی در خودسوزی زغال سنگ ایفا می‌کند. اکسیداسیون زغال سنگ ممکن است ناشی از درآشامی اکسیژن از هوای اطراف یا از طریق اکسیژن ذاتی موجود در زغال سنگ باشد. زغال سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی، نسبتاً دارای اکسیژن محتوی بالاتری هستند و لذا این قبیل از زغال سنگ‌ها در قیاس با زغال سنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی مستعدتر برای خودسوزی هستند

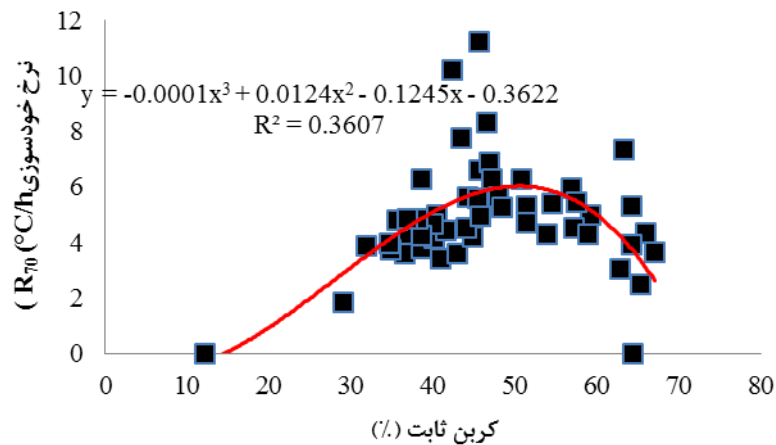
(Garcia et al., 1999; Nugroho et al., 2000 a; Nelson and Chen, 2007; Mohalik et al., 2016)



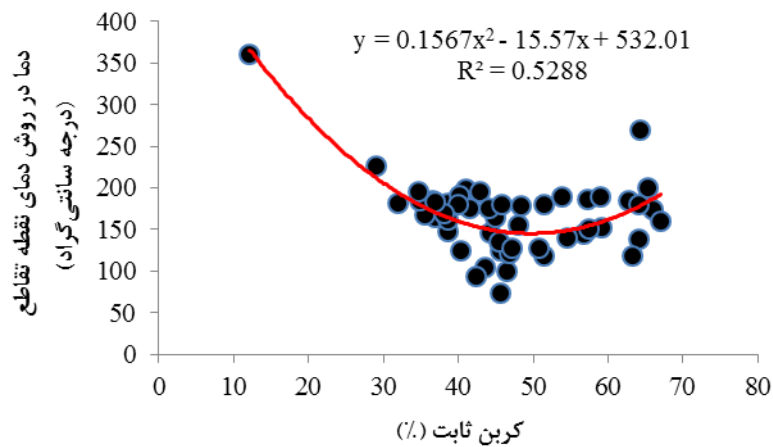
شکل ۵-۱: ارتباط بین درجه زغال شدگی و نرخ خودسوزی R₇₀ (Beamish et al., 2001)



شکل ۵-۲: ارتباط بین درجه زغال شدگی و نرخ خودسوزی R₇₀ (Beamish, 2005)



شکل ۳-۵: ارتباط بین میزان کربن ثابت و نرخ خودسوزی R_{70} .

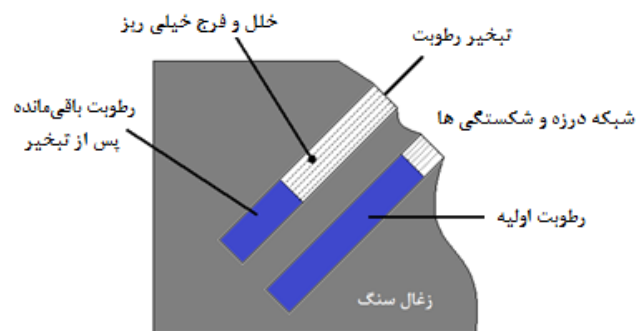


شکل ۴-۵: ارتباط بین میزان کربن ثابت و روش CPT.

علاوه بر این، زغال سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی اغلب دارای تخلخل بیشتری نسبت به زغال سنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی هستند و بنابراین سطح بیشتری در معرض اکسیژن و فرآیند اکسیداسیون قرار دارد. همچنین زغال سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی دارای زنجیره‌های هیدروکربنی طولانی‌تری هستند که آن‌ها را در مقایسه با زغال سنگ‌هایی مثل آنتراسیت که دارای ترکیب‌های هیدروکربنی کوتاه‌تری هستند کم مقاومت‌تر می‌سازد (Sujanti et al., 1999). با این حال نرخ اکسیداسیون برای زغال سنگ‌های در یک درجه یکسان، ممکن است دارای اختلاف زیادی باشد که این امر بستگی به سایر عوامل مؤثر در خودسوزی زغال سنگ دارد (Sujanti and Zhang, 1999; Kaymakci and Didari, 2002).

Sasaki و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از مجموعه نرم افزار مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ CFD به مدل سازی خودسوزی زغال سنگ های با درجه پائین زغال شدگی پرداختند. آن ها در مطالعات شان به این نتیجه رسیدند که زغال سنگ های با درجه پایین زغال شدگی مانند زغال سنگ قهوه ای^۲ و لیگنیت که شامل مقادیر زیادی رطوبت و اکسیژن محتوی هستند و همچنین خلل و فرج و سطح داخلی آن ها زیادتر است در طی حمل و نقل و ذخیره سازی در معرض خطر خودسوزی بیشتری قرار می گیرند که علت آن، خودسوزی ناشی از خشک شدن یا حذف رطوبت بالا و اکسیژن محتوی موجود در این نوع از زغال سنگ ها که حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد از وزن این زغال سنگ ها را تشکیل می دهند، است.

همان طور که در شکل ۵-۵ مشاهده می شود با تبخیر رطوبت در زغال سنگ های با درجه پایین زغال شدگی که حاوی مقادیر بیشتری رطوبت هستند خلل و فرج این قبیل از زغال سنگ ها از رطوبت خالی شده و بیشتر در معرض اکسایش با اکسیژن هوا قرار می گیرند و در نتیجه مستعدتر برای خودسوزی هستند.



شکل ۵-۵: تأثیر تبخیر رطوبت در افزایش خلل و فرج زغال سنگ.

ب- پیریت محتوی^۳

مطالعه در خصوص بررسی نقش گوگرد در خودسوزی زغال سنگ بسیار حائز اهمیت است. سه شکل از گوگرد در زغال سنگ موجود است که عبارت اند از پیریت، سولفات^۱ و سولفور آلی^۲؛ که در این بین

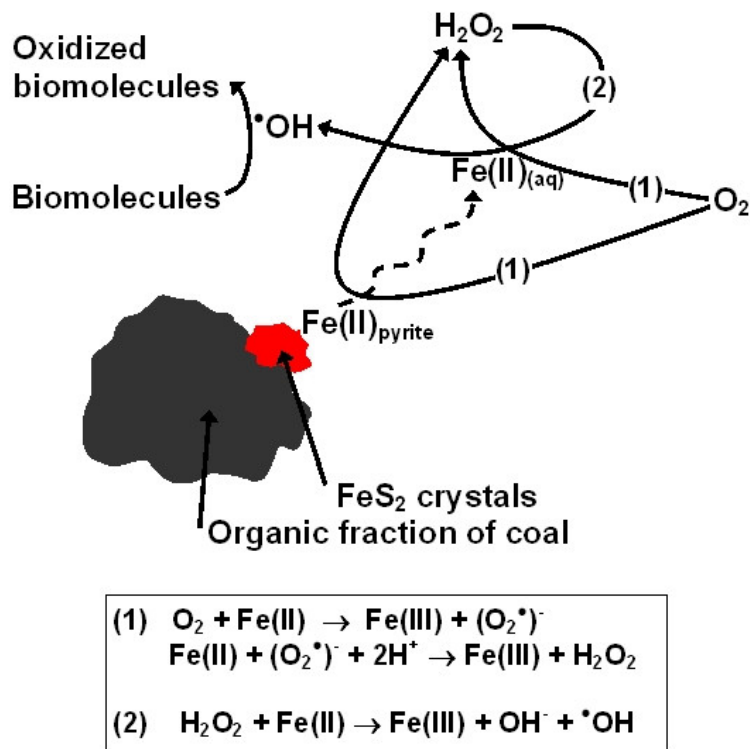
^۱- Computational Fluid Dynamics

^۲- Brown Coal

^۳- Pyrite Content

پیریت نقش اساسی در خودسوزی زغال سنگ ایفا می کند. (Parr and Hilgard, 1925; Deng et al., 2015)

نقش پیریت (FeS_2) موجود در زغال سنگ در تأثیر آن بر پدیده خطر خودسوزی زغال سنگ به عنوان یک عامل اصلی و شتابدهنده سال ها است که مطرح است (شکل ۵-۶) و توسط محققین مختلفی بر این موضوع تأکید شده است (Kaymakci and Didari, 2002).



شکل ۵-۶: نقش پیریت موجود در زغال سنگ در تأثیر آن بر پدیده خطر خودسوزی زغال سنگ.

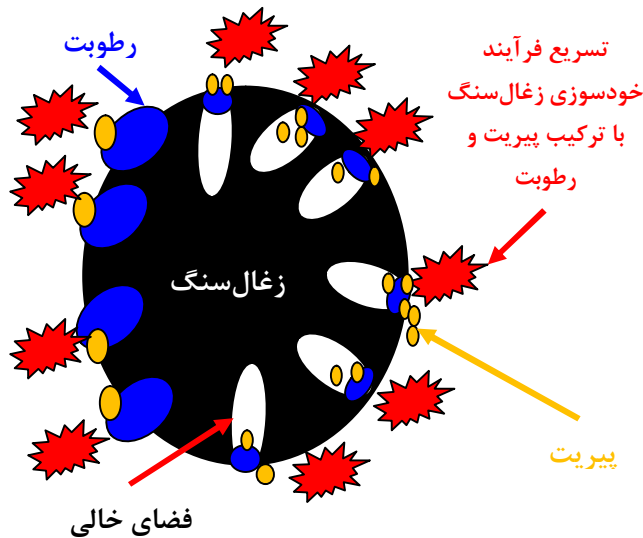
پیریت از دو جهت به افزایش خودسوزی زغال سنگ کمک می کند (Nelson and Chen, 2007):

- به عنوان یک کاتالیزور و شتابدهنده در واکنش اکسایش شرکت می کند.

- پیریت در رطوبت موجود در هوا اکسید شده و به عنوان عاملی برای فراهم کردن منبع

گرمایی دوم عمل می کند و باعث تسریع در فرآیند خودسوزی زغال سنگ می شود (شکل ۵-۷).

¹- Sulfate
²- Organic Sulfur



شکل ۵-۷: اکسیداسیون زغال سنگ حاوی نمونه پیریت و رطوبت.

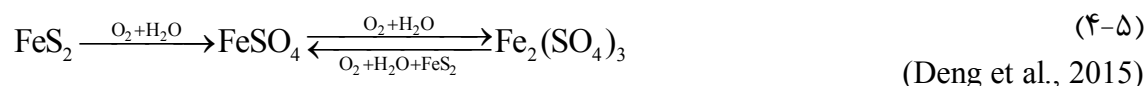
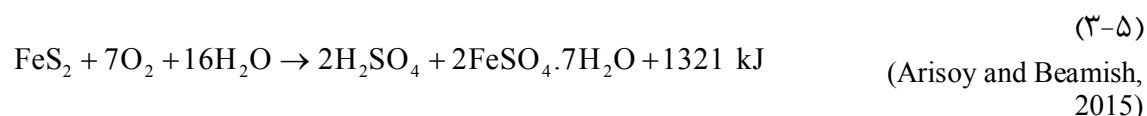
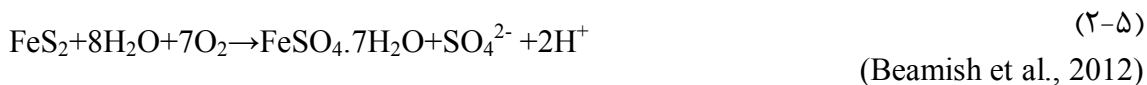
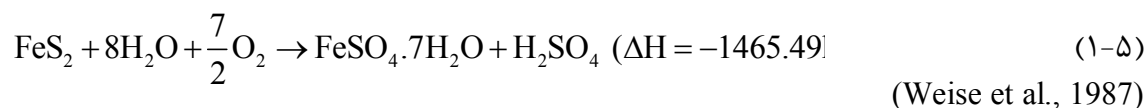
زمانی که پیریت به صورت یک رگه در لایه زغال سنگ قرار دارد سطح کمی از زغال سنگ در معرض واکنش با اکسیژن قرار می‌گیرد و در نتیجه خودسوزی زغال سنگ کم است؛ اما زمانی که پیریت به صورت مواد دانه‌ریز در زغال سنگ وجود دارد سطح بزرگ‌تری از زغال سنگ در معرض واکنش با اکسیژن قرار می‌گیرد و باعث تولید گرمای زیادی می‌شود (MDG 1006, 2011).

پیریت باعث تولید گرما از طریق اکسایش هوازی می‌شود و گرمای تولید شده از اکسیداسیون پیریت باعث افزایش دمای زغال سنگ می‌شود و همچنین سرعت اکسیداسیون را زیاد می‌کند و همچنین باعث افزایش حجم شکستگی‌ها در زغال سنگ و در نتیجه افزایش سطحی که در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد، می‌شود. معمولاً باید پیریت در تمرکزهای بیشتر از دو درصد در زغال سنگ وجود داشته باشد تا در پدیده خودسوزی زغال سنگ نقش به‌سزایی ایفا کند (MDG 1006, 2011; Arisoy and Beamish, 2015).

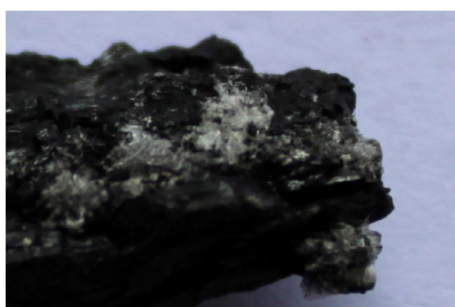
Beamish و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر نقش پیریت در خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش آزمایش R₇₀ پرداختند. نتیجه‌گیری کار آن‌ها این بود که با افزایش میزان پیریت محتوی نمونه‌های زغال سنگ سرعت واکنش خودسوزی زغال سنگ افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها

بیان کردند که پیریت بدون حضور رطوبت و در حالت خشک به طور مؤثر واکنش خاصی در فرآیند خودسوزی از خود بروز نمی‌دهد.

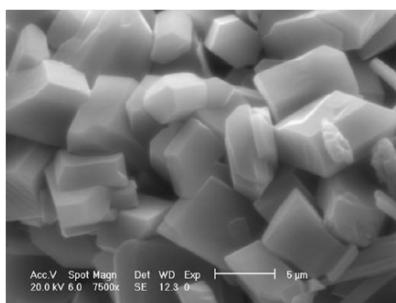
معادلات مختلفی برای واکنش اکسیداسیون پیریت در منابع علمی مختلف وجود دارد که تعدادی از آن‌ها در روابط ۱-۵ تا ۴-۵ آورده شده است.



واکنش اکسیداسیون پیریت به شدت گرمازا است و نتیجه آن تولید سولفات هیدراته است که می‌توان نمونه‌ای از کریستال‌های آن را در سطح زغال‌سنگ در شکل ۸-۵ و شکل ۹-۵ مشاهده کرد (Beamish et al., 2012).

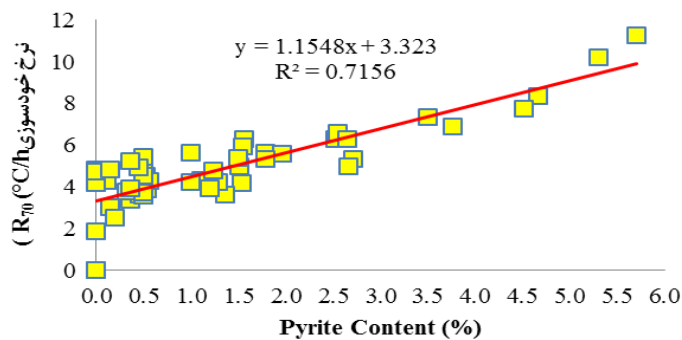


شکل ۸-۵: نمونه‌ای از کریستال‌های سولفات هیدرات حاصل از واکنش پیریت در سطح زغال‌سنگ (Beamish et al., 2012).

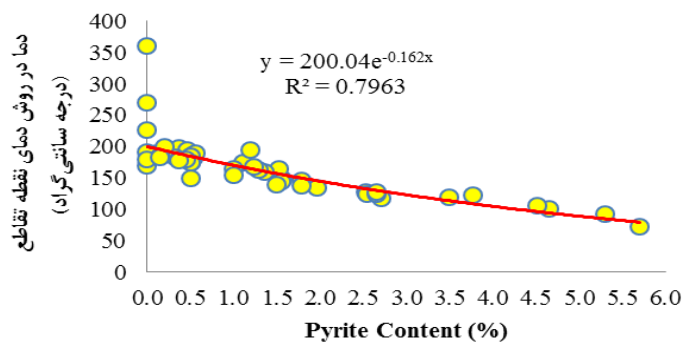


شکل ۹-۵: عکس میکروسکوپ الکترونی از کریستال‌های پیریت در زغال‌سنگ (Arisoy and Beamish, 2015).

در شکل ۵-۱۰ و شکل ۵-۱۱ که حاصل نتایج رساله حاضر است مشاهده می‌شود در روش R_{70} و روش دمای نقطه تقاطع با افزایش درصد پیریت محتوی، واکنش خودسوزی دارای سرعت بیشتری می‌شود که مؤند کارهای انجام شده توسط Beamish و همکاران در سال ۲۰۱۲ است. همچنین ضریب تعیین حاصل از برازش‌های ارائه شده در شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.



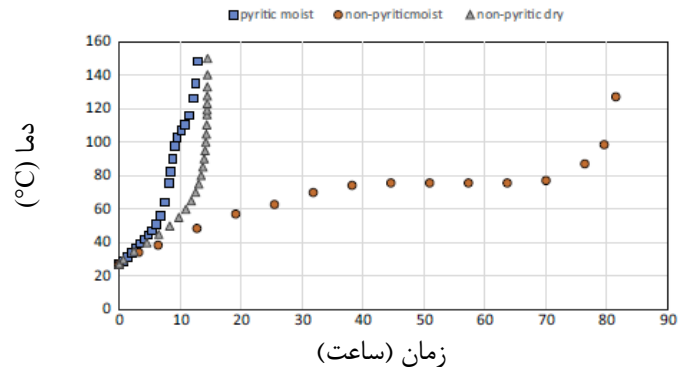
شکل ۵-۱۰: ارتباط بین میزان پیریت محتوی و نرخ خودسوزی R_{70} .



شکل ۵-۱۱: ارتباط بین میزان پیریت محتوی و روش CPT.

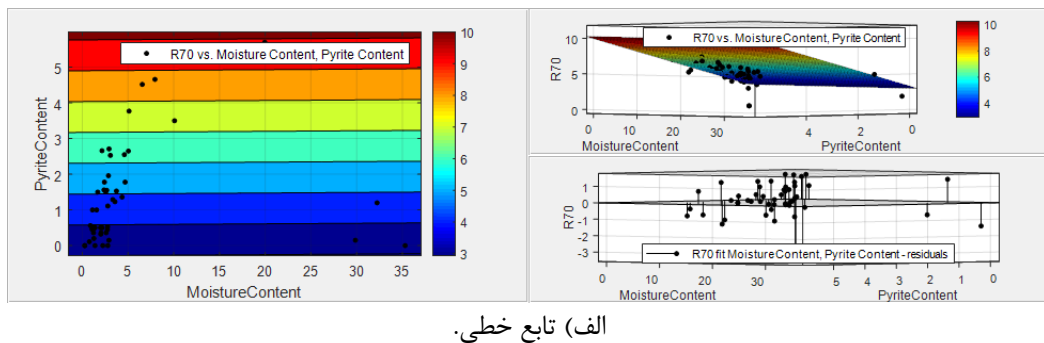
Beamish و Arisoy در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر دوگانه رطوبت و پیریت در خودسوزی زغال‌سنگ پرداختند که نتایج کار آن‌ها در شکل ۵-۱۲ آورده شده است. در این تحقیق سه سری نمونه مختلف در یک آون آدیاباتیک بررسی شد. سری اول از نمونه‌ها دارای رطوبت و پیریت بودند که بسیار مستعد از لحاظ خودسوزی قلمداد می‌شدند. سری دوم فاقد رطوبت و پیریت بودند که استعداد خودسوزی آن‌ها از سری اول کمتر بود. در سری سوم، نمونه‌ها فاقد پیریت اما دارای رطوبت بودند که این سری از نمونه‌ها دارای پتانسیل خودسوزی بسیار پایینی بودند که علت آن این بود که تمام

گرمایی که نمونه دریافت می‌کرد صرف تبخیر رطوبت موجود می‌شد و لذا دمای نمونه افزایش چشمگیری پیدا نمی‌کرد.

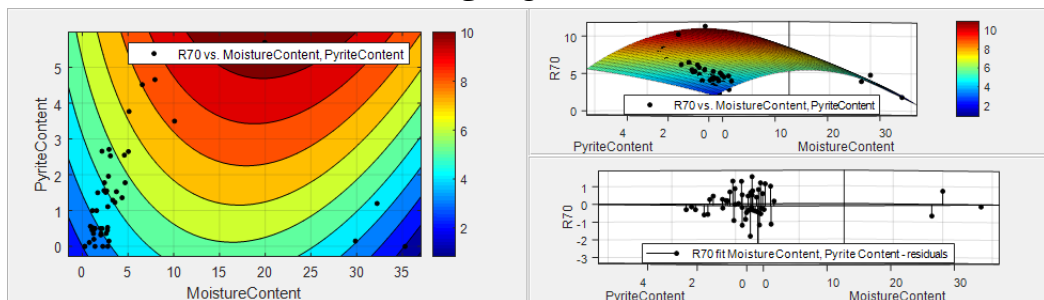


شکل ۵-۱۲: بررسی تأثیر دوگانه رطوبت و پیریت در خودسوزی زغال‌سنگ (Arisoy and Beamish, 2015).

برای بررسی دقیق‌تر این موضوع در رساله حاضر نمونه‌های زغال‌سنگ با درصد ترکیبات مختلف از میزان رطوبت محتوی و پیریت محتوی با روش‌های آزمایشگاهی R_{70} و CPT مورد بررسی و تحلیل از نظر خودسوزی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۵-۱۳ و شکل ۵-۱۴ آورده شده است. روند کلی نتایج نشان می‌دهد که تمایل به خودسوزی در زغال‌سنگ، با افزایش میزان رطوبت محتوی و پیریت محتوی افزایش می‌یابد و برعکس.

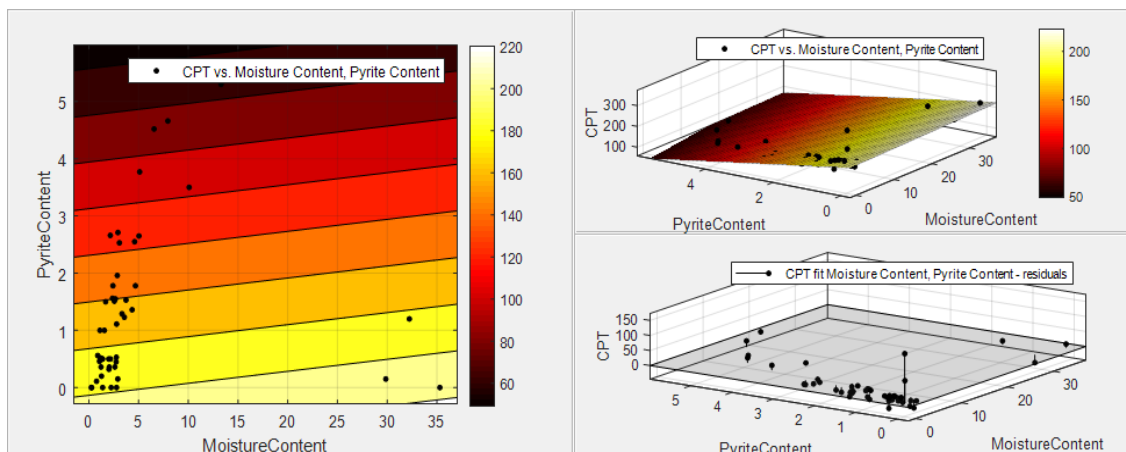


الف) تابع خطی.

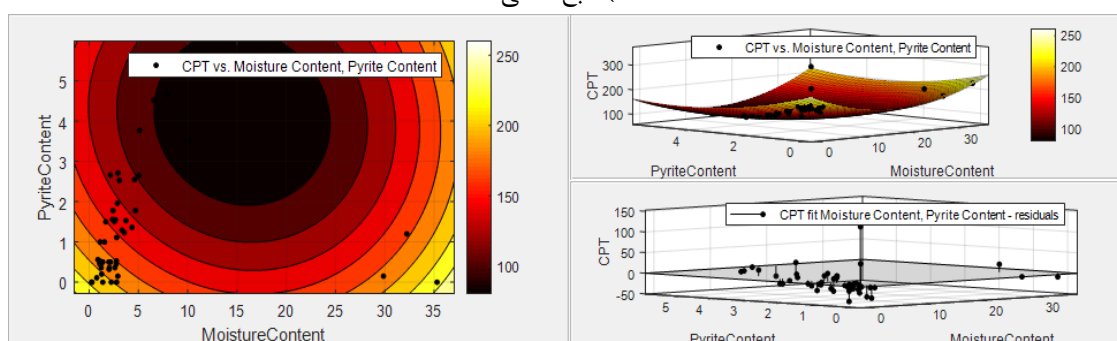


ب) تابع غیرخطی درجه دو.

شکل ۵-۱۳: نمایش سه‌بعدی تغییرات R_{70} نسبت به رطوبت محتوی و پیریت محتوی. الف) تابع خطی. ب) تابع غیرخطی درجه دو.



الف) تابع خطی.



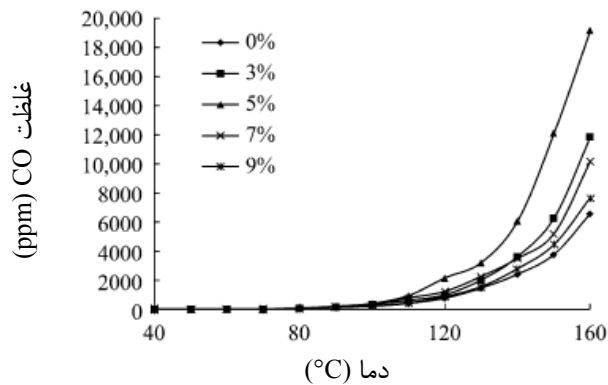
ب) تابع غیرخطی درجه دو.

شکل ۵-۱۴: نمایش سه بعدی تغییرات CPT نسبت به رطوبت محتوی و پیریت محتوی. الف) تابع خطی. ب) تابع غیرخطی درجه دو.

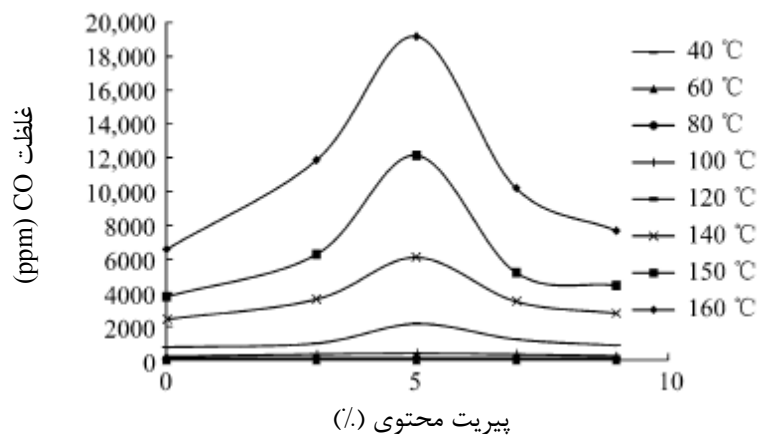
Deng و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر پیریت در پدیده خودسوزی زغال سنگ پرداختند. آن‌ها در طی آزمایش‌های مربوطه، نمونه‌های زغال سنگ با درصد ترکیبات مختلف پیریت از صفر، سه، پنج، هفت تا نه درصد را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند که نتایج کار آن‌ها در شکل‌های ۵-۱۵ تا ۵-۱۸ آورده شده است.

چنانچه از شکل ۵-۱۵ نتیجه می‌شود تغییرات CO برای درصدهای مختلف پیریت تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً یکسان است و پس از این دما به تدریج شاهد افزایش غلظت CO خواهیم بود که بیش‌ترین افزایش غلظت CO در پیریت محتوی پنج درصد رخ داده است.

از شکل ۵-۱۶ نتیجه می‌شود که افزایش پیریت محتوی در نمونه‌های زغال سنگ باعث افزایش آزادسازی CO در طی خودسوزی زغال سنگ می‌شود که این میزان افزایش پس از پنج درصد پیریت محتوی کاهش می‌یابد.

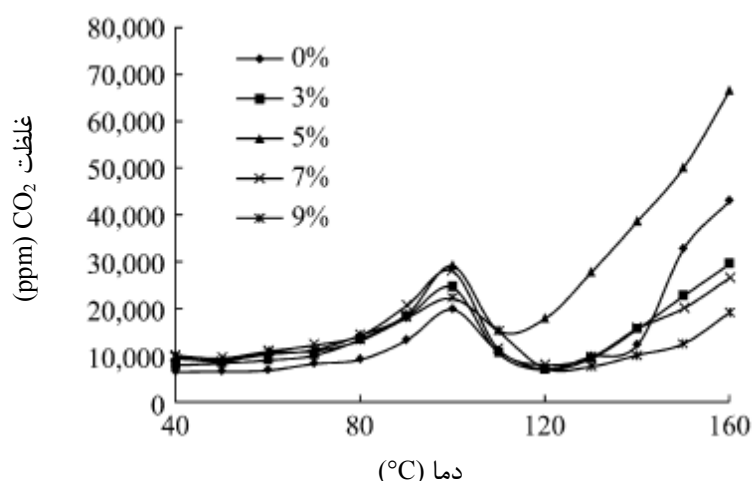


شکل ۵-۱۵: منحنی تغییرات CO در طی اکسیداسیون زغال سنگ تحت شرایط دمایی قابل برنامه ریزی مختلف (Deng et al., 2015).



شکل ۵-۱۶: منحنی تغییرات CO در درصد‌های مختلف پیریت در دماهای مختلف (Deng et al., 2015).

در شکل ۵-۱۷ نیز تغییرات آزادسازی CO₂ در طی اکسیداسیون زغال سنگ نشان داده شده است. روند تغییرات CO₂ همانند تغییرات CO برای درصد‌های مختلف پیریت تا حدود دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد تقریباً یکسان است. در دماهای بین ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد آزادسازی CO₂ کاهش می‌یابد که علت آن احتمالاً تبخیر رطوبت در نمونه‌ها است. بعد از دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد، آزادسازی CO₂ به شدت افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار آزادسازی نیز در ترکیب زغال سنگ با پیریت محتوی پنج درصد است.

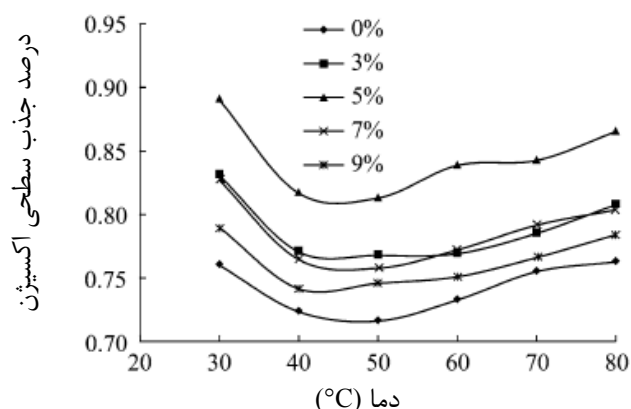


شکل ۵-۱۷: منحنی تغییرات CO₂ در طی اکسیداسیون زغال سنگ تحت شرایط دمایی قابل برنامه‌ریزی مختلف (Deng et al., 2015).

در شکل ۵-۱۸ مشخص است که تغییرات در میزان جذب سطحی اکسیژن با افزایش دما یک روند مشابه را در نمونه‌های با درصد مختلف پیریت محتوی نشان می‌دهد. جذب سطحی اکسیژن در مراحل اولیه کاهش و پس از رسیدن به یک دمای مشخص افزایش می‌یابد که دلیل آن جذب سطحی فیزیکی وابسته به نیروی واندروالسی^۱ است که نقش غالب را در فرآیند اکسیداسیون با دمای پایین اجرا می‌کند. با افزایش دما، جذب سطحی فیزیکی ضعیف و سست شده و جذب شیمیایی به تدریج قوی‌تر می‌شود و بعد از یک دمای معین جذب اکسیژن افزایش می‌یابد.

از شکل ۵-۱۸ همچنین نتیجه می‌شود که وجود پیریت می‌تواند یک نقش شتاب‌دهنده در واکنش اکسیداسیون را ایفا کند؛ به نحوی که با افزایش پیریت محتوی تا پنج درصد، جذب سطحی اکسیژن در طی فرآیند اکسیداسیون افزایش می‌یابد و پس از آن نقش پیریت در اکسیداسیون کاهش می‌یابد.

^۱ - Van der Waals' Force



شکل ۵-۱۸: منحنی تغییرات جذب سطحی اکسیژن در دماهای مختلف با درصد پیریت محتوی‌های مختلف (Deng et al., 2015).

پیریت در زغال سنگ می‌تواند منجر به جذب سطحی اکسیژن و آزادسازی گرما شود که دلیلی بر تسریع پدیده اکسیداسیون زغال سنگ است. گرمای مخصوص پیریت حدود یک سوم زغال سنگ است، اما همین گرما با جذب سطحی اکسیژن به سه برابر زغال سنگ افزایش می‌یابد. در کنار این موضوع، اسید سولفوریک^۱ (H_2SO_4) نیز در طی اکسیداسیون پیریت تولید می‌شود که H^+ موجود در اسید سولفوریک می‌تواند منجر به درآشامی مولکولی اکسیژن شده و یک لایه از غشای غنی از اکسیژن را تشکیل دهد؛ بنابراین H^+ نقش تسریع کننده در فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ را ایفا می‌کند. از نتایج حاصل از این تحقیق مشخص شد که جذب سطحی اکسیژن در زمانی که پیریت محتوی بیش از پنج درصد است کمتر می‌شود که دو دلیل در توضیح این پدیده می‌تواند بیان شود. اول آنکه هرچه پیریت محتوی افزایش یابد باعث تولید اسید سولفوریک و H^+ بیشتر می‌شود که غلظت بالای H^+ می‌تواند مانعی در برابر نفوذ مولکول‌های اکسیژن از غشای مایع تولیدی شود. از طرف دیگر پیریت بیشتر در نمونه قادر به انتقال به فریک هیدروکسید^۲ ($Fe(OH)_3$) با قطر ۱۰۰-۱ نانومتر می‌شود؛ در حالی که خلل و فرج مولکول‌های زغال سنگ عموماً بزرگ‌تر از ۱۰۰ نانومتر هستند و بنابراین $Fe(OH)_3$ می‌تواند به این خلل و فرج وارد شده و باعث کاهش سطح تماس بین زغال سنگ و اکسیژن شود (Deng et al., 2015).

^۱- Sulphuric Acid

^۲- Ferric Hydroxide

ج- رطوبت محتوی^۱

واژه رطوبت به آب‌های آزاد سطح^۲، بخارهای جذب شده در سطح و یا حتی درون اجزای زغال‌سنگ، داخل درزه، ترک، شکاف یا منافذ داخلی و آب مولکولی زغال‌سنگ اطلاق می‌شود. تمام زغال‌سنگ‌ها دارای رطوبت ذاتی هستند به طوری که مقدار آن بستگی به نوع زغال‌سنگ و درجه تکامل آن دارد (اصانلو، ۱۳۷۸؛ یزدی، ۱۳۸۲). رطوبت محتوی لایه زغال‌سنگ همچنین بستگی به نفوذپذیری و درجه اشباع‌شدگی لایه زغال‌سنگ دارد. اگر رطوبت از لایه زغال‌سنگ تخلیه شود، فضای خالی شده با گاز پر می‌شود (MDG 1006, 2011).

تغییرات در میزان رطوبت محتوی زغال‌سنگ یعنی خشک یا خیس بودن زغال‌سنگ، تأثیر آشکاری در استعداد زغال‌سنگ برای خودسوزی دارد (Banerjee, 1985; Kaymakci and Didari, 2002).

تأثیر رطوبت در خودسوزی زغال‌سنگ به دو طریق است:

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

- استعداد خودسوزی زغال‌سنگ با مرطوب‌سازی زغال‌سنگ افزایش می‌یابد. همان‌طور که در رابطه ۵-۵ مشاهده می‌شود واکنش زغال‌سنگ با رطوبت باعث تولید گرما و حرارت می‌شود (Jones, 2001).

(۵-۵) $Dry\ coal + moisture \rightarrow wet\ coal + heat$

رطوبت هم می‌تواند باعث کاهش حرارت و هم افزایش حرارت شود که بستگی به شرایط معدن دارد. در زمانی که جریان هوای خشک به زغال‌سنگ مرطوب دمیده شود، تبخیر آب رخ می‌دهد. تبخیر آب از سطح نیاز به گرما دارد که تحت عنوان «گرمای نهان تبخیر» نامیده می‌شود. این گرما از

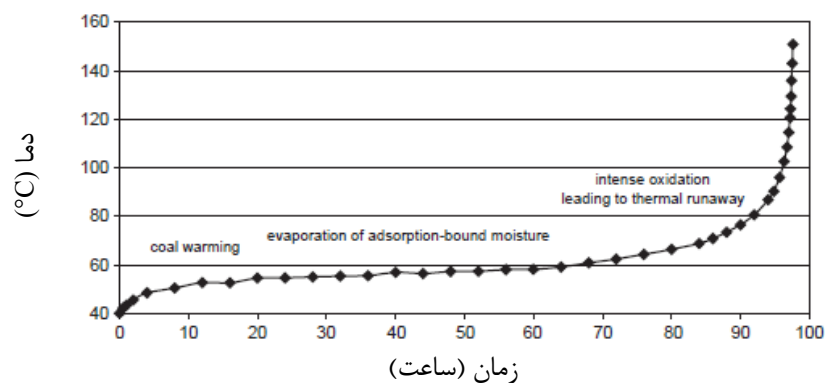
¹ - Moisture Content

² - Loosely Water

سطح جامد گرفته می‌شود که نتیجه آن خنک‌سازی و کاهش دمای سطح زغال‌سنگ و یک فرآیند گرماگیر است (Ren et al., 1999; Nelson and Chen, 2007; MDG 1006, 2011).

از طرف دیگر، در زمانی که جریان هوای مرطوب به زغال‌سنگ خشک دمیده شود، برآشامی رطوبت صورت می‌گیرد که بخار آب بر روی سطح زغال‌سنگ تغلیظ شده و تبدیل به مایع می‌شود. گرمای میعان (مخالف تبخیر) باعث افزایش دمای سطح زغال‌سنگ می‌شود. همچنین خطر خودسوزی زغال‌سنگ ممکن است توسط گرمای آزاد شده از طریق جذب آب به داخل زغال‌سنگ افزایش یابد (Ren et al., 1999; Nelson and Chen, 2007; MDG 1006, 2011).

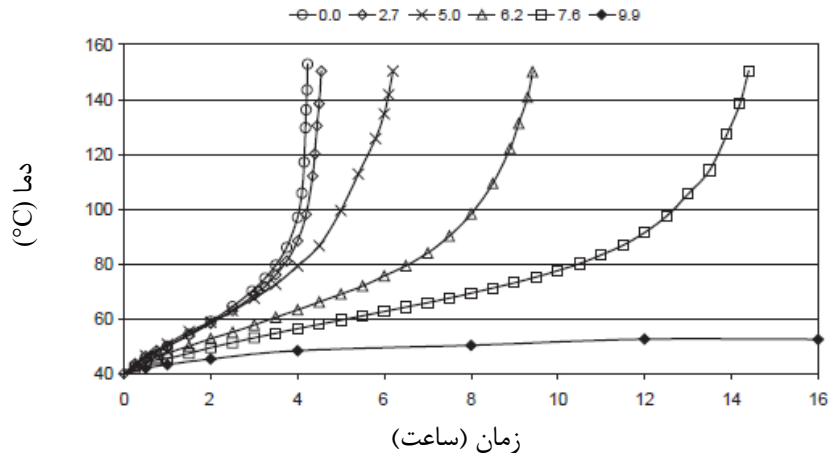
در شکل ۵-۱۹ مراحل مختلفی که یک زغال‌سنگ مرطوب تحت جریان هوا قرار می‌گیرد تا دچار خودسوزی شود نشان داده شده است در مرحله اول و حدود دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد زغال‌سنگ گرم شده، پس از آن تا حدود دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تبخیر رطوبت از زغال‌سنگ انجام می‌شود و پس از آن دمای زغال‌سنگ به شدت افزایش یافته و دچار اکسیداسیون شدید می‌شود و مرحله غیر قابل کنترل دمایی شکل می‌گیرد.



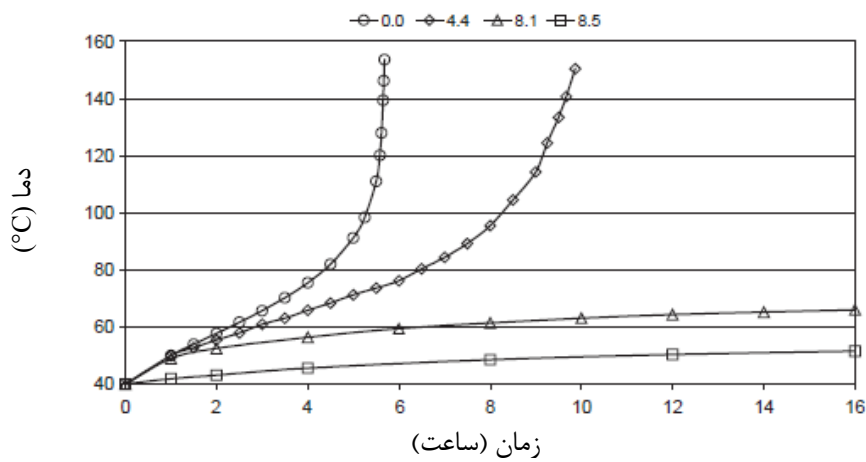
شکل ۵-۱۹: مراحل مختلفی که یک زغال‌سنگ مرطوب تحت جریان هوا قرار می‌گیرد تا دچار خودسوزی شود (Beamish and Hamilton, 2005).

Beamish و Hamilton در سال ۲۰۰۵ و Beamish و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی تأثیر رطوبت بر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش R₇₀ پرداختند که نتایج کار آن‌ها در شکل ۵-۲۰ تا شکل ۵-۲۲ آورده شده است. آن‌ها در این تحقیقات به این نتیجه رسیدند که هرچه میزان

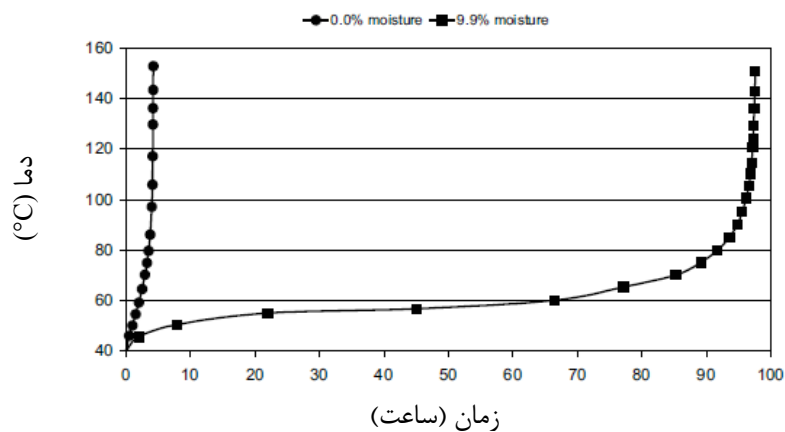
رطوبت محتوی نمونه‌های زغال سنگ افزایش پیدا کند واکنش پذیری زغال سنگ از دیدگاه خودسوزی کاهش می‌یابد و برعکس.



شکل ۵-۲۰: منحنی‌های خودسوزی زغال سنگ در یک آون آدیباتیک با درصدهای مختلف از رطوبت محتوی نمونه زغال سنگ (Beamish and Hamilton, 2005).

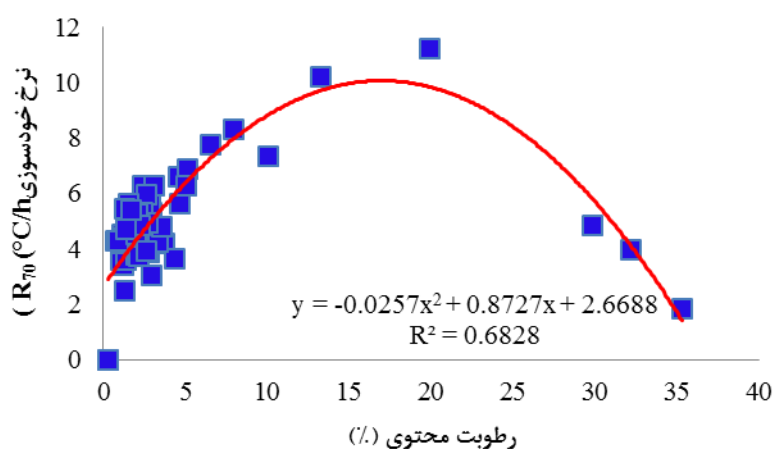


شکل ۵-۲۱: منحنی‌های خودسوزی زغال سنگ در یک آون آدیباتیک با درصدهای مختلف از رطوبت محتوی نمونه زغال سنگ (Beamish and Hamilton, 2005).

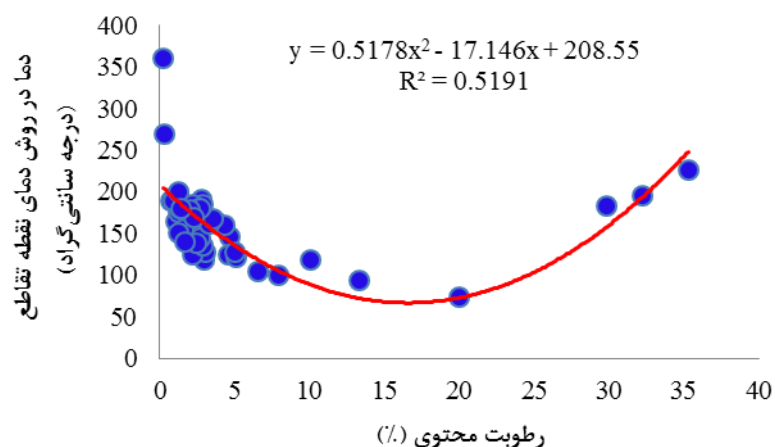


شکل ۵-۲۲: تأثیر رطوبت محتوی در نرخ خودسوزی زغال سنگ (Beamish et al., 2005).

در شکل ۲۳-۵ و شکل ۲۴-۵ که حاصل نتایج رساله حاضر است مشاهده می‌شود در روش R_{70} و روش دمای نقطه تقاطع با افزایش درصد رطوبت محتوی تا حدود ۲۰ درصد، واکنش خودسوزی دارای سرعت بیشتری می‌شود و پس از این مقدار رطوبت محتوی شاخص خودسوزی زغال‌سنگ کاهش می‌یابد که علت آن این است که گرمای ناشی از واکنش صرف تبخیر رطوبت می‌شود و اجازه افزایش دما به زغال‌سنگ داده نمی‌شود. همچنین ضریب تعیین حاصل از برآزش‌های ارائه شده در شکل‌های ۲۳-۵ و ۲۴-۵، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.



شکل ۲۳-۵: ارتباط بین میزان رطوبت محتوی و نرخ خودسوزی R_{70} .

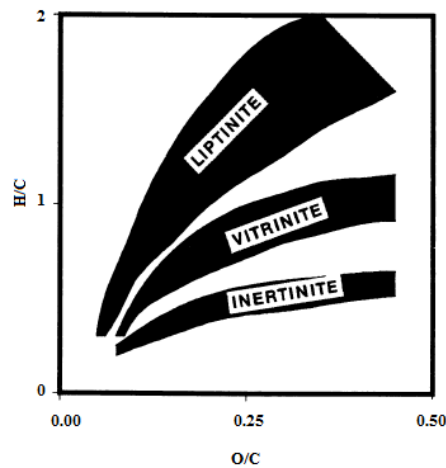


شکل ۲۴-۵: ارتباط بین میزان رطوبت محتوی و روش CPT.

د- ترکیب پتروگرافی^۱

ترکیب پتروگرافی زغال سنگ تابع مواد گیاهی اصلی تشکیل دهنده زغال سنگ و محیطی است که زغال سنگ در آن شکل گرفته است. ترکیبات پتروگرافی زغال سنگ، ترکیباتی همگن، آلی و میکروسکوپی هستند که اصطلاحاً «ماسرال^۲» نامیده می‌شوند. ماسرال‌ها بخش با ارزش اجزای زغال سنگ هستند (سرشکی و همکاران، ۱۳۹۵).

در حالت کلی، همان‌طور که در شکل ۵-۲۵ نشان داده شده است، ماسرال‌های زغال سنگ با توجه به منشأ اولیه گیاهی‌شان به سه گروه اصلی ویتترینیت^۳، لیپتینیت^۴ و اینرتینیت^۵ تقسیم می‌شوند (Van Krevelen, 1961) که هر کدام از این گروه‌ها به زیرگروه‌های دیگری نیز تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۷۸؛ یزدی، ۱۳۸۲). شکل ۵-۲۵ نشان‌دهنده اختلاف بین ماسرال‌ها از نظر تغییرات ترکیبات محتوی با افزایش درجه زغال‌شدگی است؛ که این تغییرات در ترکیبات محتوی موجود فراهم‌کننده اطلاعات مهمی برای ارزیابی پتانسیل خودسوزی نمونه‌های زغال سنگ است.



شکل ۵-۲۵: گروه‌های تقریبی برای سه گروه اصلی از ماسرال‌ها (Van Krevelen, 1961).

تمامی گروه‌های ماسرالی زغال سنگ با در نظر گرفتن زمان، دما و شرایط محیطی مستعد هوازدهی و اکسیداسیون هستند (Mohalik et al., 2016). همان‌طور که در شکل ۵-۲۵ نشان داده

^۱- Petrographic Composition
^۲- Maceral
^۳- Vitrinite
^۴- Liptinite
^۵- Inertinite

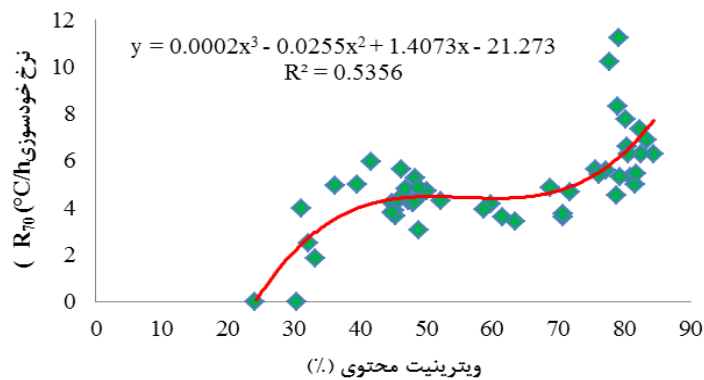
شده است ویترینیت و لیپتینیت دارای نسبت‌های بزرگ‌تری از H/C و O/C در مقایسه با اینرتینیت هستند. وجود اتم‌های هیدروژن و اکسیژن در زغال‌سنگ باعث افزایش پتانسیل خودسوزی خواهد شد (Michalski et al., 1990). از سویی دیگر ترکیبات شیمیایی اینرتینیت دارای مقادیر بالاتری از کربن و مقادیر کمتری از هیدروژن و اکسیژن در مقایسه با ویترینیت است که استعداد این قبیل از زغال‌سنگ‌ها که دارای مقادیر بالاتری از اینرتینیت است در خصوص خودسوزی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که اینرتینیت دارای درجه زغال‌شدگی بالاتری در مقایسه با ویترینیت و لیپتینیت است (Van Krevelen, 1993).

فرآیند اکسیداسیون زغال‌سنگ در مرحله اول با بخش‌های غیرگیاهی^۱ واکنش نشان می‌دهد. این نوع از بخش‌های غیرگیاهی معمولاً در ویترینیت و لیپتینیت مخصوصاً در زغال‌سنگ‌های با درجه پایین زغال‌شدگی به نسبت بیشتری وجود دارند (Falcon, 1986). ویترینیت در ساختار مولکولی‌اش دارای بخش‌های غیرگیاهی بیشتری نسبت به اینرتینیت است؛ به همین دلیل ویترینیت دارای واکنش‌پذیری بالاتری است؛ بنابراین اکسیژن با انرژی فعال‌سازی کمتری در ساختارهای مولکولی در واحد سطح یکسان به نسبت بیشتری در ویترینیت جذب سطحی شده و اکسیداسیون از این طریق آسان‌تر و سریع‌تر در دماهای پایین‌تر به نسبت اینرتینیت شکل می‌گیرد (Falcon and Synman, 1986).

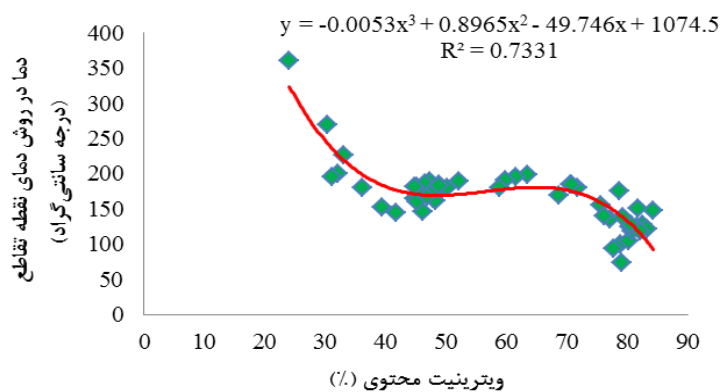
برای بررسی دقیق‌تر این موضوع در رساله حاضر نمونه‌های زغال‌سنگ با درصد ترکیبات مختلف از ماسرال‌ها با روش‌های آزمایشگاهی R₇₀ و CPT مورد بررسی و تحلیل از نظر خودسوزی قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۵-۲۶ تا ۵-۳۷ آورده شده است. روند کلی نتایج نشان می‌دهد که تمایل به خودسوزی در زغال‌سنگ، با افزایش مقادیر ویترینیت و لیپتینیت افزایش و با افزایش محتوای اینرتینیت در زغال‌سنگ، تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی کاهش می‌یابد که حاصل نتایج رساله حاضر با نتایج انجام شده توسط Chandra و همکاران در سال ۱۹۹۰، Walters در سال ۱۹۹۶

^۱ - Non-Aromatic

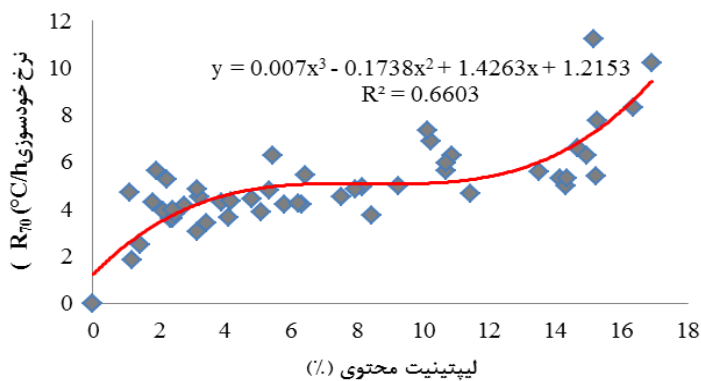
و Nimaje و Tripathy در سال ۲۰۱۶ یکسان است. همچنین ضریب تعیین حاصل از برازش‌های ارائه شده در شکل‌های ۵-۲۶ تا ۵-۳۷، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.



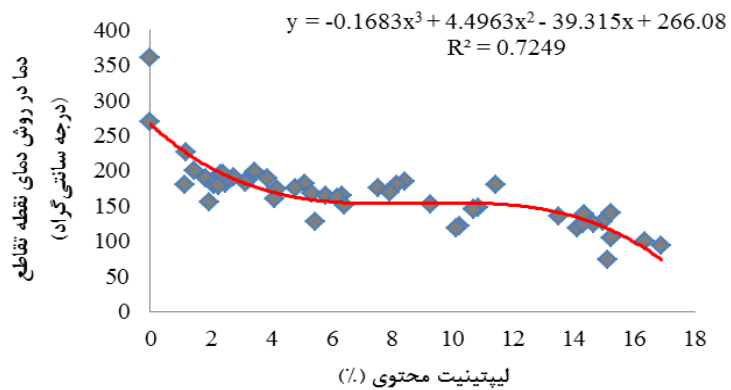
شکل ۵-۲۶: ارتباط بین میزان ویترینیت محتوی و نرخ خودسوزی R_{70} .



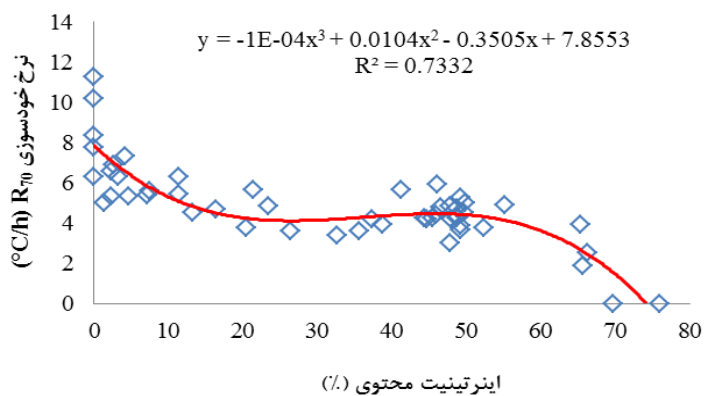
شکل ۵-۲۷: ارتباط بین میزان ویترینیت محتوی و روش CPT.



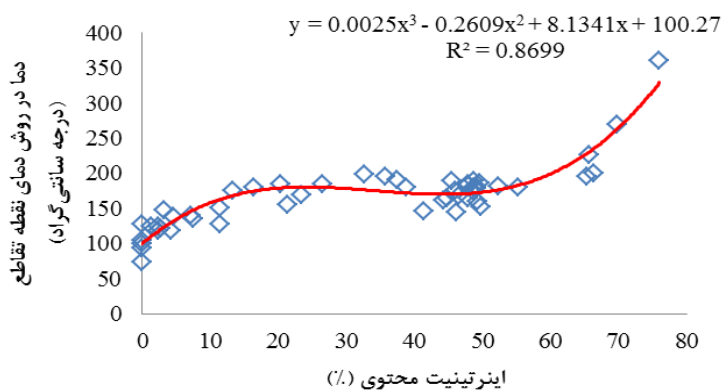
شکل ۵-۲۸: ارتباط بین میزان لیپتینیت محتوی و نرخ خودسوزی R_{70} .



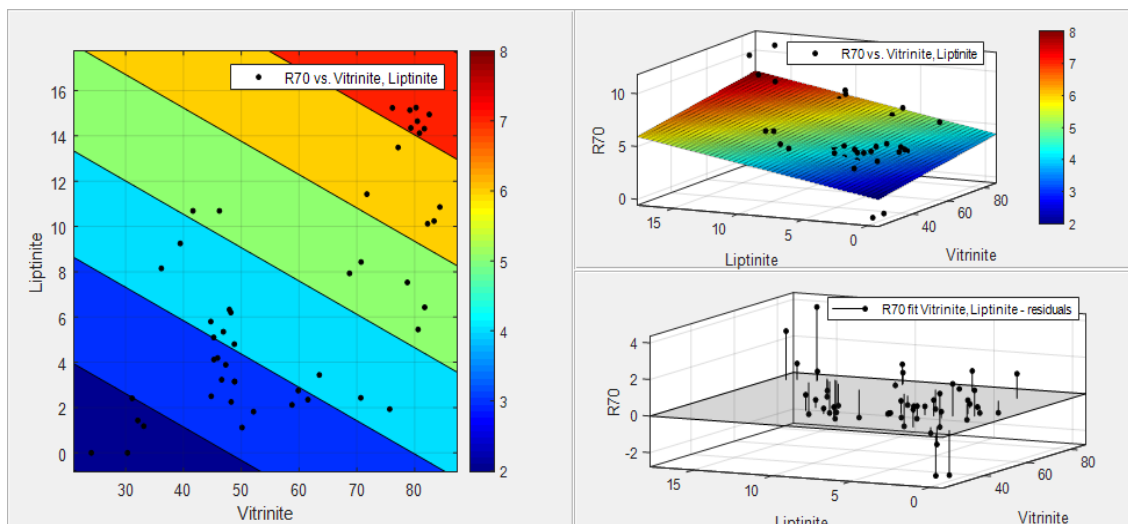
شکل ۵-۲۹: ارتباط بین میزان لیتینیوم محتوی و روش CPT.



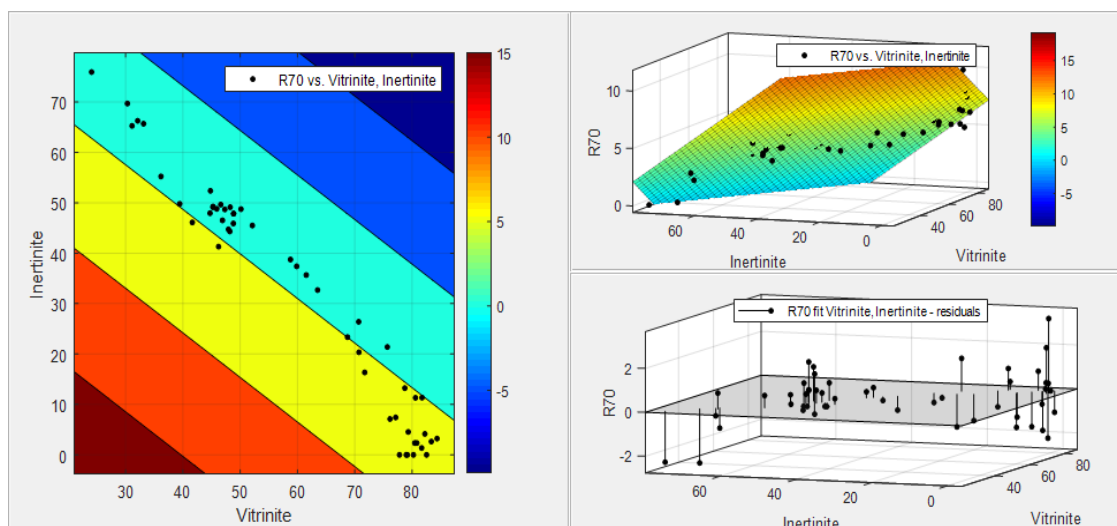
شکل ۵-۳۰: ارتباط بین میزان اینرتینیوم محتوی و نرخ خودسوزی R_{70} .



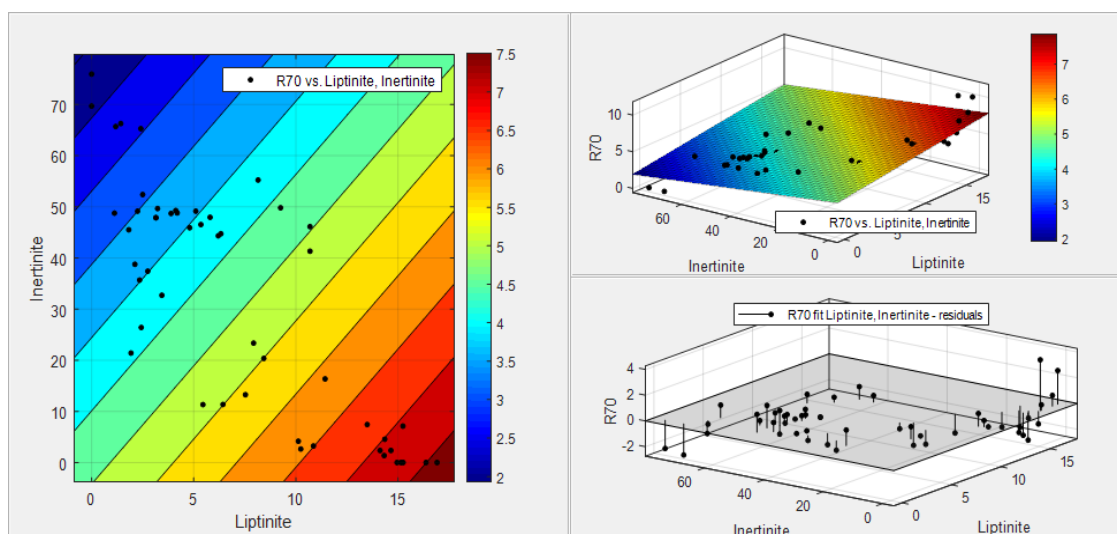
شکل ۵-۳۱: ارتباط بین میزان اینرتینیوم محتوی و روش CPT.



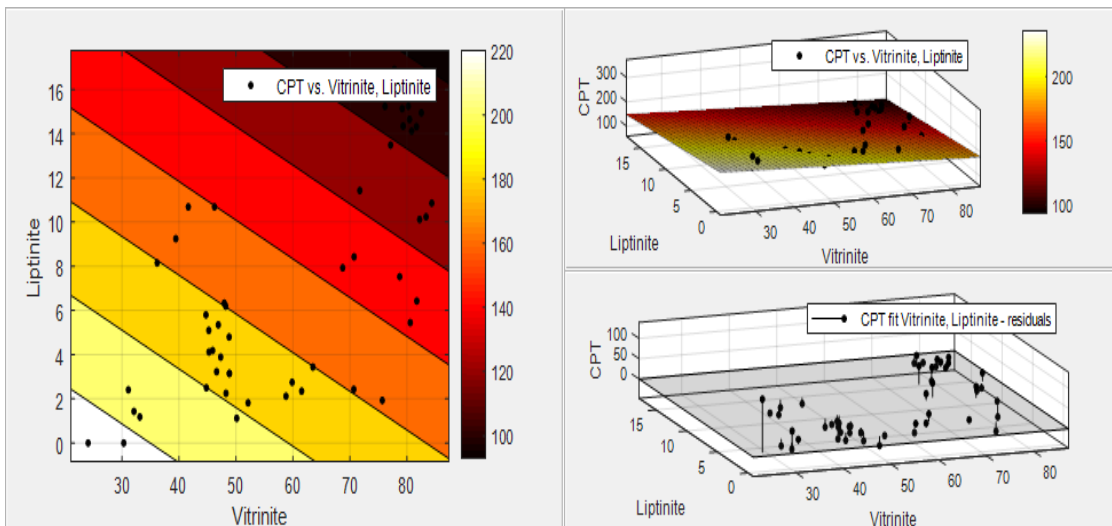
شکل ۵-۳۲: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین R_{70} در مقابل ویتترینیت و لیپتینیت.



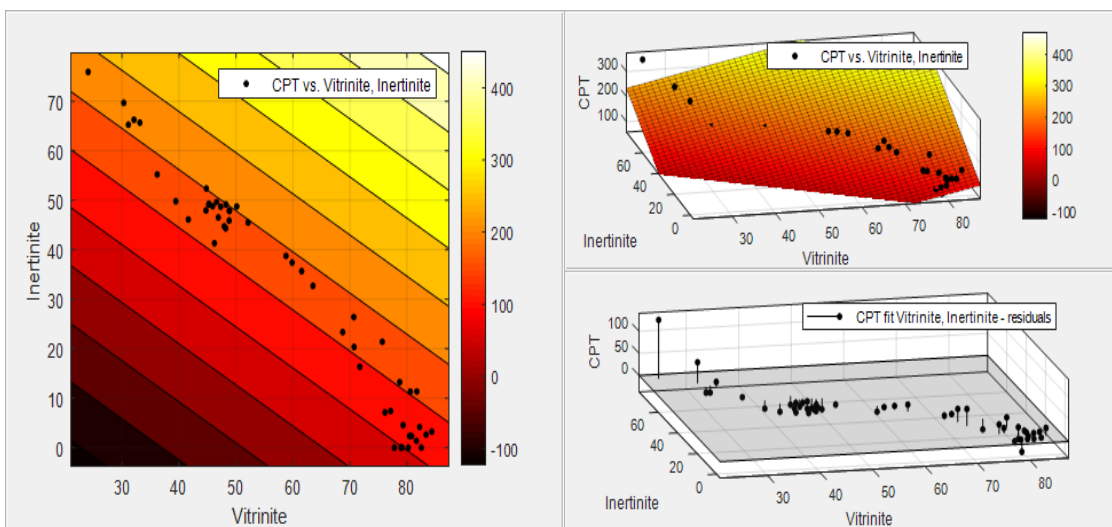
شکل ۵-۳۳: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین R_{70} در مقابل ویتترینیت و اینرتینیت.



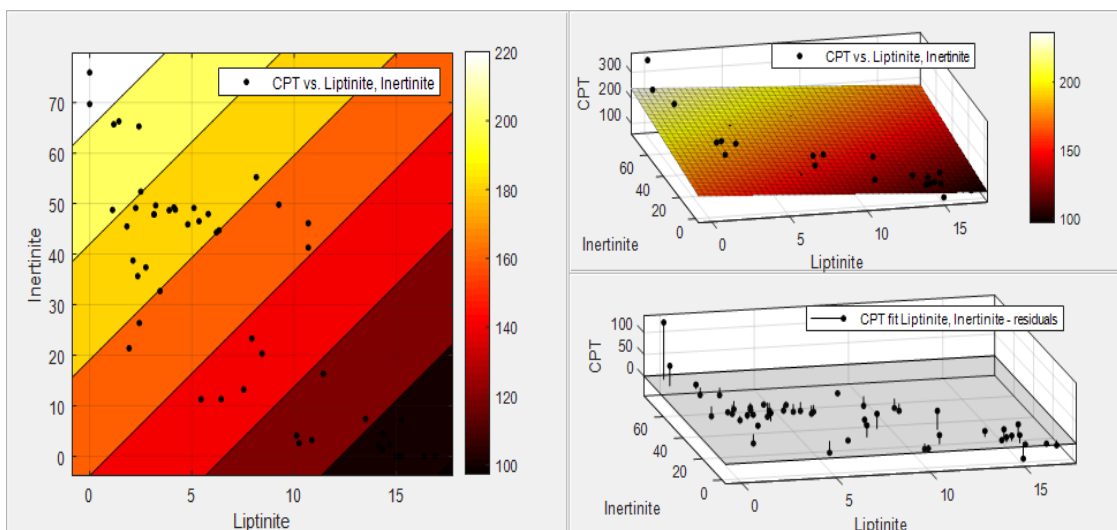
شکل ۵-۳۴: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین R_{70} در مقابل لیپتینیت و اینرتینیت.



شکل ۵-۳۵: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین CPT در مقابل ویترینیت و لیپتینیت.



شکل ۵-۳۶: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین CPT در مقابل ویترینیت و اینرتینیت.



شکل ۵-۳۷: نمودار سه‌بعدی ارتباط بین CPT در مقابل لیپتینیت و اینرتینیت.

ه- خاکستر محتوی^۱

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

خاکستر زغال سنگ عمدتاً شامل سیلیس (دی‌اکسید سیلیسیوم) (SiO_2)، اکسید آلومینیوم یا آلومین (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) است. علاوه بر کانی‌های فوق‌الذکر رس و سیلت نیز از کمر بالا و کمر پایین لایه زغال سنگ یا از قسمت‌های قطع شده زغال سنگ در خاکستر مشاهده می‌شوند. تجزیه خاکستر نمونه‌های زیادی از زغال سنگ‌ها نشان می‌دهد که سیلیس درصد قابل توجه‌ای از خاکستر را تشکیل می‌دهد. مقدار خاکستر زغال سنگ‌ها بسیار متفاوت و به عوامل متعددی بستگی دارد و متوسط محدوده آن بین دو تا ۶۰ درصد متغیر است (اصانلو، ۱۳۷۸).

برخی ترکیبات خاکستر مانند آهک، کربنات سدیم (سودا^۲) و ترکیبات آهن دارای یک تأثیر شتاب‌دهنده در خودسوزی زغال سنگ هستند اما میزان آن‌ها در زغال سنگ بسیار کم است و تأثیر چندانی ندارند، در صورتی که برخی ترکیبات دیگر مانند اکسید آلومینیوم^۳، سیلیس (سیلیکا^۴) و کلراید کلسیم^۵ که درصد قابل توجه‌ای از خاکستر را تشکیل می‌دهند، باعث یک اثر تأخیری و کند کننده در فرآیند اکسایش و خودسوزی زغال سنگ می‌شوند (Kaymakci and Didari, 2002).

تأثیر مواد ذاتی و غیر آلی در اکسیداسیون دمای پایین و خودسوزی زغال سنگ توسط Zhang و Sujanti در سال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰، Zhang و Watanabe در سال ۲۰۰۱ و Zhang و Sujanti در سال ۱۹۹۹ انجام شد که خلاصه‌ای از نتایج آن‌ها در جدول ۵-۱ آورده شده است

^۱- Ash Content

^۲- Soda

^۳- Alumina

^۴- Silica

^۵- Calcium Chloride

(Nelson and Chen, 2007). همان‌طور که مشاهده می‌شود برخی از این مواد باعث پیشرفت و برخی

دیگر بازدارنده از خودسوزی تلقی می‌شوند.

جدول ۵-۱: تأثیر مواد ذاتی و غیر آلی در خودسوزی زغال‌سنگ (Nelson and Chen, 2007).

بی تأثیر	بازدارنده	پیشرفت دهنده	فرمول شیمیایی	نوع ماده
[a]			NH ₄ Cl	Ammonium chloride
[c] [d]	[b]		Ca(Ac) ₂	Calcium acetate
		[a] [b]	CaCO ₃	Calcium carbonate
	[a] [b] [c] [d]		CaCl ₂	Calcium chloride
		[b]	Ca(OH) ₂	Calcium hydroxide
		[b] [c] [d]	Cu(Ac) ₂	Copper acetate
		[b]	CuCO ₃	Copper carbonate
	[a] [b] [c] [d]		Mg(Ac) ₂	Magnesium acetate
	[b]		MgCO ₃	Magnesium carbonate
	[a]		*	Montan powder
		[a] [b] [c] [d]	KAc	Potassium acetate
		[b]	K ₂ CO ₃	Potassium carbonate
	[a]		KCl	Potassium chloride
		[a]	FeS ₂	Pyrite
		[a] [b] [c] [d]	NaAc	Sodium acetate
		[b]	Na ₂ CO ₃	Sodium carbonate
	[a] [b] [c] [d]		NaCl	Sodium chloride
	[b]		NaOH	Sodium hydroxide
[a]			NaNO ₃	Sodium nitrate

[a] Sujanti and Zhang, 1999; [b] Sujanti and Zhang, 2000; [c] Watanabe and Zhang, 2001; [d] Zhang and Sujanti, 1999.
 * Montan powder عبارت است از sodium dodecyl sulfate 3% + calcium chloride powder.

به طور کلی، افزایش درصد خاکستر در زغال‌سنگ باعث کاهش تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی می‌شود (Beamish and Blazak, 2005; Beamish et al., 2005; Beamish and Sainsbury, 2008). علت این امر ناشی از این موضوع است که هرچه میزان خاکستر محتوی نمونه‌های زغال‌سنگ بیشتر باشد، خاکستر موجود گرمای بیشتری را به خود جذب می‌کند و اجازه نمی‌دهد که دمای زغال‌سنگ افزایش یابد

Beamish و Blazak در سال ۲۰۰۵ برای ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و نرخ خودسوزی

R₇₀ یک معادله درجه دو را برازش کردند که در رابطه ۵-۶ بیان شده است.

$$R_{70} = 0.0029 \times \text{Ash}^2 - 0.4889 \times \text{Ash} + 20.644 \quad (6-5)$$

$$R^2 = 0.997$$

Beamish و Sainsbury در سال ۲۰۰۸ برای ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و نرخ

خودسوزی R_{70} یک معادله خطی را برازش کردند که در رابطه ۵-۷ بیان شده است.

$$R_{70} = -0.6162 \times \text{Ash} + 7.027 \quad (7-5)$$

$$R^2 = 0.9696$$

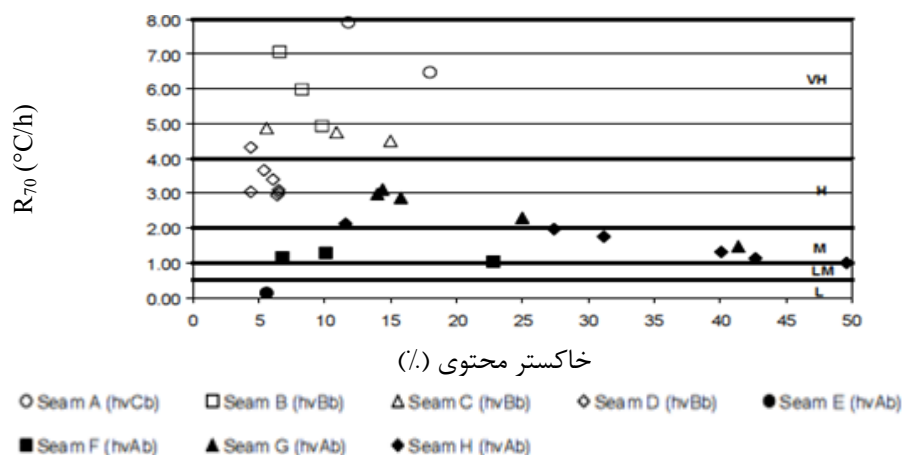
ارتباط بین میزان خاکستر محتوی، نوع زغال سنگ و شاخص R_{70} در شکل ۵-۳۸ آورده شده

است. همان طور که مشاهده می شود هرچه میزان خاکستر محتوی افزایش می یابد میزان R_{70} کاهش

می یابد یا به عبارت دیگر هرچه میزان خاکستر محتوی نمونه های زغال سنگ بیشتر باشد مدت زمان

بیشتری برای رسیدن به شاخص R_{70} لازم است و میزان خاکستر محتوی با خودسوزی زغال سنگ

رابطه عکس دارد (Beamish and Arisoy, 2008 a).



شکل ۵-۳۸: ارتباط بین خاکستر محتوی نمونه های زغال سنگ و شاخص R_{70} (Beamish and Arisoy, 2008 a).

برای بررسی دقیق تر این موضوع در رساله حاضر نمونه های زغال سنگ با درصد های مختلف از

خاکستر محتوی با روش های آزمایشگاهی R_{70} و CPT مورد بررسی و تحلیل از نظر خودسوزی قرار

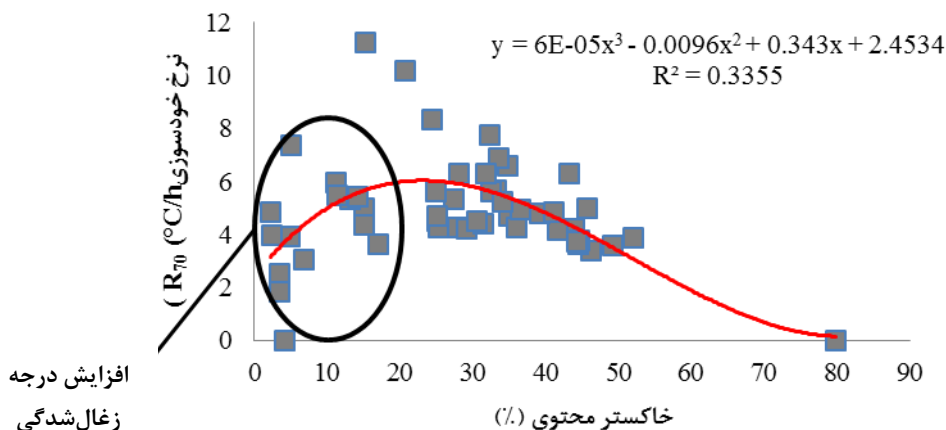
گرفت که نتایج آن در شکل ۵-۳۹ و شکل ۵-۴۰ آورده شده است. نتایج نشان داد که هرچه درجه

زغال شدگی بیشتر باشد شیب منحنی آزمایش R_{70} و CPT بسیار ملایم تر است و نمونه های زغال سنگ

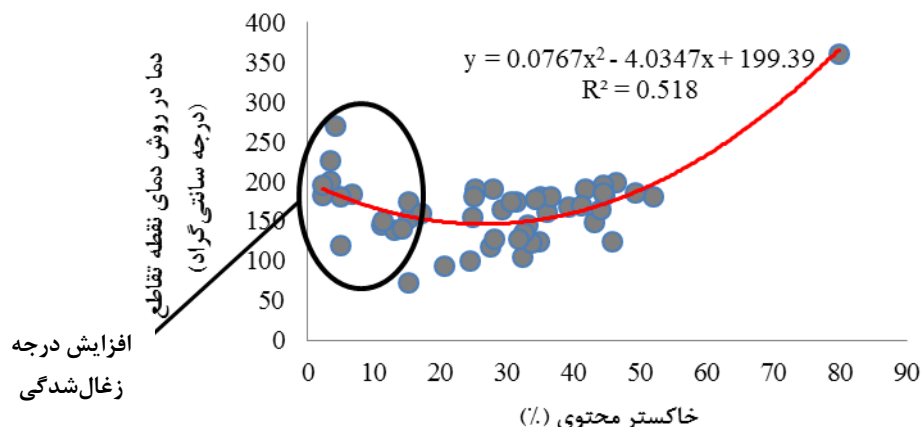
با درجه بالای زغال شدگی، استعداد و پتانسیل ضعیف تری برای خودسوزی زغال سنگ دارند. از طرف

دیگر میزان خاکستر محتوی با خودسوزی زغال سنگ رابطه عکس دارد، بدین نحو که با افزایش میزان

خاکستر محتوی مفادیر R_{70} و CPT به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و برعکس که این نتایج مؤید کارهای فوق‌الذکر است. همچنین ضریب تعیین حاصل از برازش‌های ارائه شده در شکل‌های ۵-۳۹ و ۵-۴۰، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.



شکل ۵-۳۹: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و نرخ خودسوزی R_{70} .



شکل ۵-۴۰: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و روش CPT.

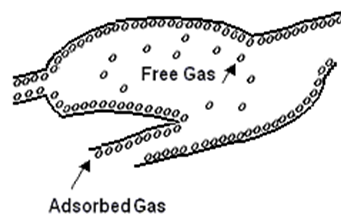
و- مواد فرار

ساختار زغال‌سنگ از دو نوع حفره‌های میکروسکوپی (کمتر از دو نانومتر) و ماکروسکوپی (بیشتر از ۵۰ نانومتر) تشکیل شده است. ذخیره شدن گاز در درون زغال‌سنگ به دو صورت است (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵):

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

- به صورت گاز آزاد

معمولاً بیش از ۹۵ درصد از گاز زغال سنگ به صورت جذب سطحی به شکل لایه‌های تک مولکولی بر روی سطح زغال سنگ و کمتر از پنج درصد به صورت گاز آزاد است (شکل ۵-۴۱). تحقیقات نشان می‌دهد یک کیلوگرم زغال سنگ بین ۲۰,۰۰۰ تا ۲۰۰,۰۰۰ مترمربع سطح دارد که این سطح می‌تواند به ازای یک تن زغال سنگ تا ۲۵ مترمکعب بر تن گاز جذب کند. مکانیسم نگهداری گاز در درون زغال سنگ به صورت جذب سطحی است که بستگی زیادی به خلل و فرج میکروسکوپی دارد زیرا حدود ۸۵ درصد از خلل و فرج به این صورت می‌باشند (توکلی و سرشکی، ۱۳۸۵).



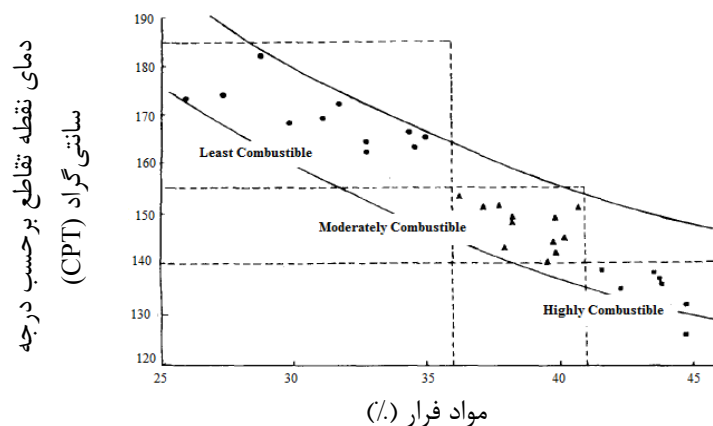
شکل ۵-۴۱: طرز قرارگیری گاز در لایه‌های زغال سنگ (Sereshki, 2005).

به هنگام تشکیل زغال سنگ بخش قابل توجه‌ای از مواد فرار در اثر حرارت و فشار از مواد تشکیل دهنده زغال سنگ خارج می‌شوند؛ اما با افزایش درجه متامرفیسم و افزایش عمق و فشار در زغال سنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی، این زغال سنگ‌ها 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 سنگ مانعی برای ترکیب اکسیژن با زغال سنگ است و فرآیند اکسیداسیون خصوصاً در لایه‌های پر گاز کند می‌شود و به تعویق می‌افتد؛ بنابراین گاز موجود در لایه زغال سنگ یک عامل مهار کننده در پدیده خودسوزی زغال سنگ محسوب می‌شود؛ زیرا گاز موجود در حفرات زغال سنگ، اجازه جذب اکسیژن توسط زغال سنگ را نمی‌دهد (Beamish and Jabouri, 2005; Ramlu, 2007).

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

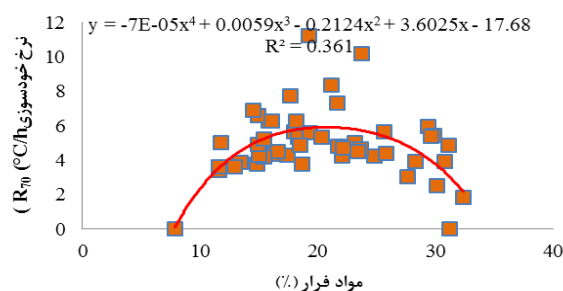
زغال سنگ‌های حاوی کمتر از پنج مترمکعب متان در هر تن زغال سنگ، نشان‌دهنده سرعت بالای جذب سطحی اکسیژن هستند و بیشتر مستعد خودسوزی هستند (Ramlu, 2007) در حالی که زغال سنگ‌های با مقدار گاز متان بالای هشت مترمکعب متان در هر تن زغال سنگ، دچار اکسایش نمی‌شوند (Sujanti et al., 1999).

در همین راستا، Raju در سال ۱۹۸۸ و Chandra و Prasad در سال ۱۹۹۰ به بررسی تأثیر مواد فرار در خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطع پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد مواد فرار محتوی نمونه‌های زغال سنگ، تمایل این نمونه‌ها برای خودسوزی بیشتر می‌شود و برعکس که حاصل تحقیقات Chandra و Prasad در سال ۱۹۹۰ در شکل ۵-۴۲ آورده شده است. Raju در سال ۱۹۸۸ نیز به این نتیجه رسید که روش دمای نقطه تقاطع، با افزایش درصد مواد فرار محتوی نمونه‌های زغال سنگ تا ۳۵ درصد، کاهش می‌یابد و بعد از این مقدار مواد فرار تغییر مهمی در دمای نقطه تقاطع مشاهده نمی‌شود.

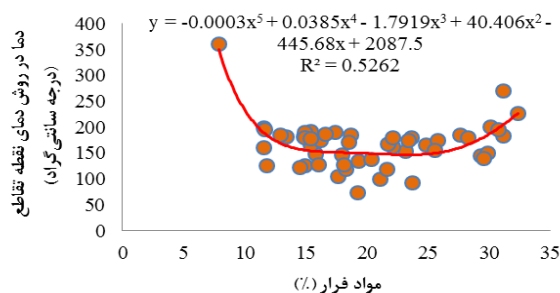


شکل ۵-۴۲: تأثیر مواد فرار در خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطع (Chandra and Prasad, 1990).

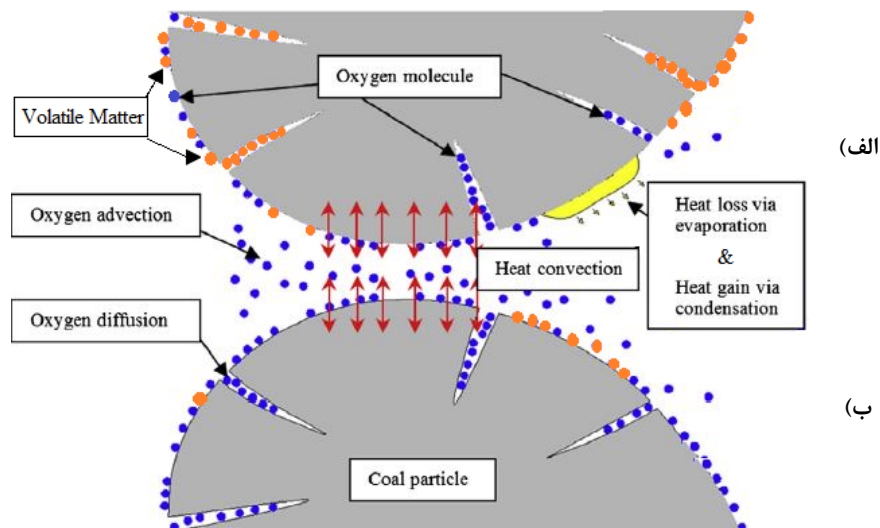
برای بررسی دقیق تر این موضوع در رساله حاضر نمونه‌های زغال سنگ با درصد‌های مختلف از مواد فرار با روش‌های آزمایشگاهی R_{70} و CPT مورد بررسی و تحلیل از نظر خودسوزی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۵-۴۳ و شکل ۵-۴۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که با کاهش درصد مواد فرار تا زیر حدود ۱۲/۵ درصد خودسوزی کاهش می‌یابد که علت این امر آن است که مواد فرار به عنوان یک منبع سوخت ثانویه کاهش یافته و خودسوزی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش میزان مواد فرار در مقادیر بالاتر از ۲۷/۵ درصد نیز خودسوزی کاهش می‌یابد که علت آن این است که حضور گاز و مواد فرار در خلل و فرج و منافذ ریز و درشت لایه زغال سنگ مانعی برای ترکیب اکسیژن با زغال سنگ است و فرآیند اکسیداسیون به تعویق می‌افتد (شکل ۵-۴۵)؛ بنابراین مواد فرار زیاد در زغال سنگ یک عامل مهار کننده در پدیده خودسوزی زغال سنگ محسوب می‌شود؛ زیرا اجازه جذب اکسیژن توسط زغال سنگ را نمی‌دهد. طبق بررسی‌های انجام شده در رساله حاضر زمانی که میزان مواد فرار در حدود ۱۲/۵ تا ۲۷/۵ درصد باشد بیشترین میزان خودسوزی در نمونه‌های زغال سنگ رخ می‌دهد. همچنین ضریب تعیین حاصل از برازش‌های ارائه شده در شکل‌های ۵-۴۳ و ۵-۴۴، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.



شکل ۵-۴۳: ارتباط بین میزان مواد فرار و نرخ خودسوزی R_{70} .



شکل ۵-۴۴: ارتباط بین میزان مواد فرار و روش CPT.



شکل ۵-۴۵: ارتباط بین میزان مواد فرار و جذب اکسیژن. الف) مواد فرار زیاد مانع جذب اکسیژن توسط زغال سنگ می‌شود. ب) مواد فرار کم مانعی برای جذب اکسیژن توسط زغال سنگ نیست (اصلاح شده از Zhang et al., 2016 a).

ح- اندازه ذرات^۱

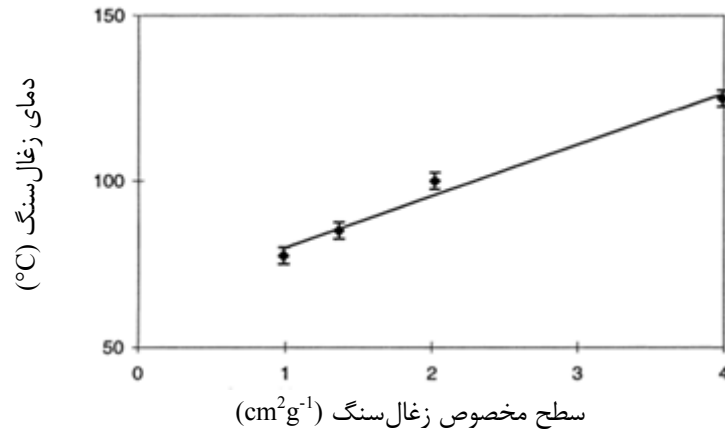
در طی عملیات استخراج، زغال سنگ به قطعات شکسته شده و خرد شده تبدیل می‌شود. پس از خرد شدن زغال سنگ، سطح زغال سنگ افزایش یافته و سطح بیشتری از زغال سنگ در واحد حجم یکسان در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد و بنابراین خطر خودسوزی زغال سنگ نیز افزایش می‌یابد (Akgun and Arisoy, 1994; MDG 1006, 2011).

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

سرعت اکسیداسیون زغال سنگ با سطح تأثیر آن دارای یک رابطه خطی است که در شکل ۵-۴۶ مشاهده می‌شود؛ بنابراین، زغال سنگ‌هایی که دارای تردی و شکنندگی بیشتری هستند سطح

^۱ - Particle Size

تأثیر بزرگ‌تری از آن‌ها در معرض اکسیداسیون قرار دارد، در نتیجه گرمای بیشتری در واحد حجم یکسان از زغال‌سنگ‌های دارای تردی بیشتر انتشار می‌یابد (Sujanti et al., 1999).



شکل ۵-۴۶: ارتباط بین سطح مخصوص زغال‌سنگ و دمای ناشی از خودسوزی (Sujanti and Zhang, 1999).

تحقیقات نشان می‌دهد که با کاهش اندازه ذرات و افزایش نرمی و ریزی ذرات و در نتیجه افزایش سطح تأثیر زغال‌سنگ، جذب بیشتر اکسیژن توسط زغال‌سنگ اتفاق می‌افتد و تمایل زغال‌سنگ برای خودسوزی افزایش می‌یابد (Ren et al., 1999; Nugroho et al., 2000 a; Kaymakci and Didari, 2002; Kadioglu and Varamaz, 2003; Kucuk et al., 2003; Taraba and Michalec, 2011). این نرخ افزایشی اکسیداسیون در مقابل کاهش اندازه ذرات تا زمان رسیدن به قطر بحرانی ادامه پیدا می‌کند. در بالای اندازه‌ی بحرانی، نرخ اکسیداسیون متناسب با ریشه سوم مساحت سطح خارجی ذرات زغال‌سنگ است (Kucuk et al., 2003). در کمتر از اندازه بحرانی، کاهش بیشتر اندازه ذرات، تأثیر کمتری در نرخ اکسیداسیون دارد (Kaji et al., 1985; Palmer et al., 1990; Ren et al., 1999). قطر بحرانی وابسته به عواملی نظیر شرایط واکنش و تخلخل زغال‌سنگ است (Nelson and Chen, 2007).

اندازه بحرانی ۵۰ میکرومتر (Palmer et al., 1990)، بین ۱۳۸ تا ۳۸۷ میکرومتر (Carpenter and Sergeant, 1966 a,b) و ۱۰۰۰ میکرومتر (Kaji et al., 1985) در طی تحقیقات به عمل آمده گزارش شده است.

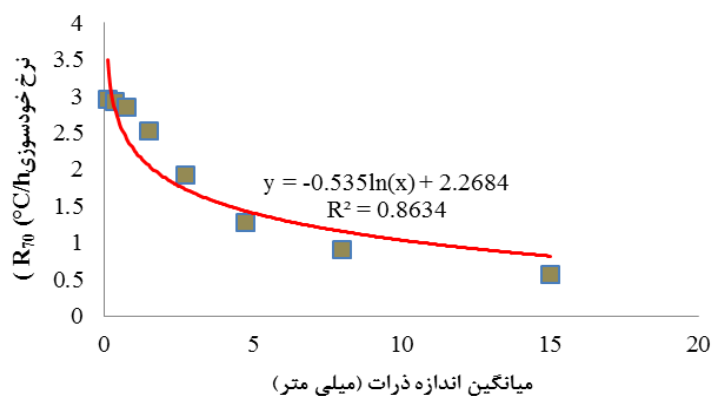
Hall و Chamberlain در سال ۱۹۷۳ به این نتیجه رسیدند که اختلاف معناداری در نرخ

اکسیداسیون برای اندازه ذرات کمتر از ۲۱۰ میکرومتر و ۲۵۰ تا ۴۵۰ میکرومتر وجود ندارد.

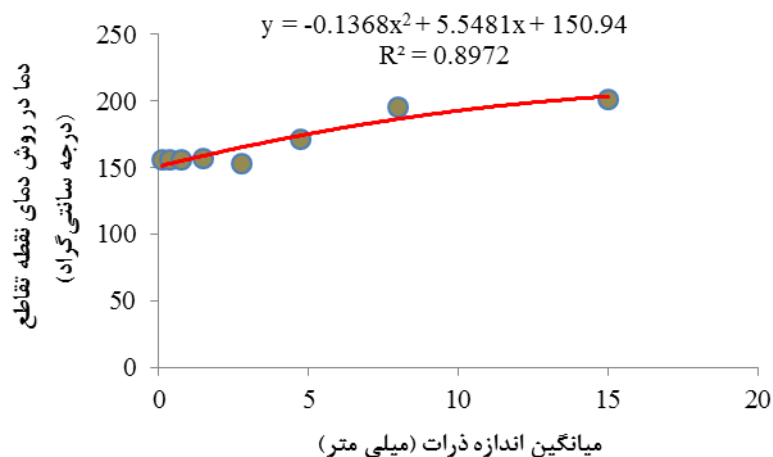
برای بررسی دقیق تر این موضوع در رساله حاضر یک نمونه زغال سنگ با قابلیت خودسوزی متوسط با میانگین اندازه ذرات مختلف با روش های آزمایشگاهی R_{70} و CPT مورد بررسی و تحلیل از نظر خودسوزی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲-۵ و شکل های ۴۷-۵ و ۴۸-۵ آورده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه ذرات، خودسوزی کاهش می یابد و از حدود ۸ میلی متر به بعد نرخ خودسوزی ثابت می ماند. علت این امر آن است که با کاهش درزه و شکستگی موجود در زغال سنگ (شکل ۴۹-۵) و افزایش اندازه ذرات (شکل ۵۰-۵) اکسیژن کمتری جذب زغال سنگ شده و خودسوزی زغال سنگ کاهش می یابد. همچنین ضریب تعیین حاصل از برازش های ارائه شده در شکل های ۴۷-۵ و ۴۸-۵، نشان می دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.

جدول ۲-۵: تأثیر میانگین اندازه ذرات مختلف در قابلیت خودسوزی زغال سنگ.

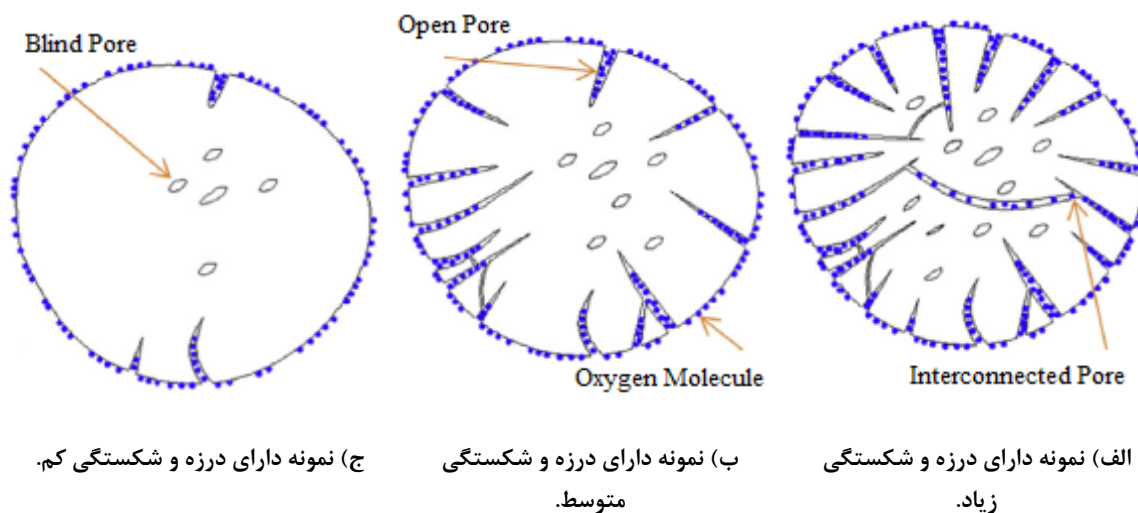
نرخ خودسوزی R_{70} ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	روش دمای نقطه تقاطع ($^{\circ}\text{C}$)	میانگین اندازه ذرات (میلی متر)	اندازه ذرات (میلی متر)
2.96	155.9	0.1	<0.2
2.92	156.3	0.35	0.2-0.5
2.85	156.2	0.75	0.5-1
2.52	156.9	1.5	1-2
1.93	153.3	2.75	2-3.5
1.28	171.8	4.75	3.5-6
0.91	195.9	8	6-10
0.57	201.4	15	10-20



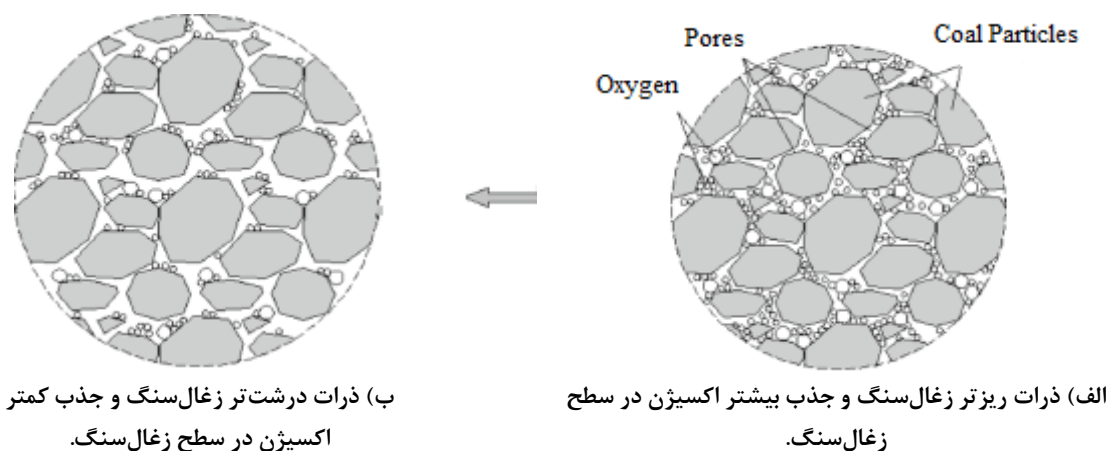
شکل ۴۷-۵: ارتباط بین میانگین اندازه ذرات و نرخ خودسوزی R_{70} .



شکل ۵-۴۸: ارتباط بین میانگین اندازه ذرات و روش CPT.



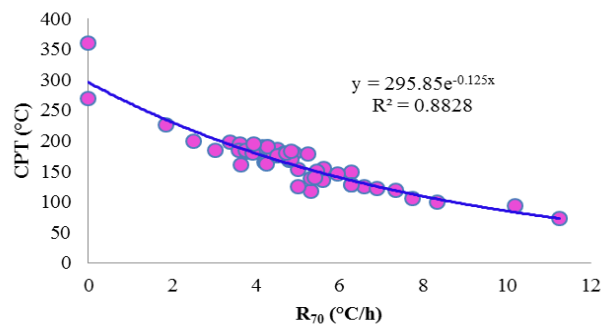
شکل ۵-۴۹: ارتباط بین درزه و شکستگی‌های موجود در نمونه زغال سنگ و تأثیر آن بر جذب اکسیژن و خودسوزی (Zhang et al., 2016 a).



شکل ۵-۵۰: ارتباط بین اندازه ذرات زغال سنگ و تأثیر آن بر جذب اکسیژن و خودسوزی (Yang et al., 2017).

۵-۳- ارزیابی ارتباط بین دو روش آزمایشگاهی R_{70} و CPT

چنانچه در فصل اول بیان شد یکی از جنبه‌های جدید بودن و نوآوری تحقیق حاضر ساخت یک دستگاه آزمایشگاهی برای تعیین قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس مشخصات ذاتی زغال‌سنگ با استفاده از دو روش آزمایشگاهی R_{70} و CPT است که در این بخش از تحقیق حاضر ارتباط بین دو روش آزمایشگاهی R_{70} و CPT در شکل ۵-۵ آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد و برعکس. همچنین ضریب تعیین حاصل از برازش ارائه شده در شکل ۵-۵، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.



شکل ۵-۵: ارزیابی ارتباط بین دو روش آزمایشگاهی R_{70} و CPT.

۵-۴- انتخاب پارامترها در مدل‌های ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های

زغال‌سنگ

در علوم مهندسی، همواره برای ارائه مدل، انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار هم یکی از مهم‌ترین مراحل به شمار می‌رود. در مدل‌های جامع همواره سعی می‌شود با کمترین تعداد پارامترها بهترین قضاوت صورت گیرد؛ لذا در این رساله انتخاب پارامترهای مؤثر برای ارائه مدل، بر اساس اولویت‌هایی صورت گرفته است که در نهایت با استفاده از روش فازی سیستم‌های مهندسی سنگ^۱ (FRES)، روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری^۲ (DEMATEL) و روش آنالیز

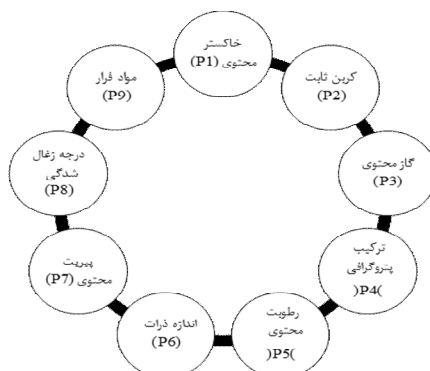
^۱- Fuzzy Rock Engineering Systems

^۲- Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)

مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها لحاظ شده است. اولویت‌های اولیه برای انتخاب پارامترهای مؤثر به شرح زیر است:

- از کمترین تعداد پارامترها برای طبقه‌بندی استفاده شود.
- درصد استفاده در مدل‌های قبلی (بر اساس درصد به کارگیری حاصل از جدول ۳-۲ و شکل ۳-۱).
- برطرف کردن کمبودهای مدل‌های پیشین (مانند عدم در نظر گرفتن ترکیب پتروگرافی).
- سادگی اندازه‌گیری پارامتر و در نتیجه از به کارگیری پارامترهایی که قابلیت اندازه‌گیری ندارند پرهیز شود.
- در نظر گرفتن حداکثری پارامترهای مؤثر در عین سادگی مدل با رعایت عدم همپوشانی (همبستگی) پارامترها (از به کارگیری پارامترهای هم‌ارزش، هم‌ارز و دارای هم‌پوشانی پرهیز شود).
- نظرات کارشناسان.

بر این مبنا پس از بررسی تمام اولویت‌های ذکر شده نهایتاً ۹ پارامتر در دسته عوامل ذاتی مطابق شکل ۵-۵۲ برای توسعه مدل‌های ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ انتخاب شدند که در بخش‌های بعد این تعداد کمتر خواهد شد.



شکل ۵-۵۲: پارامترهای اولیه انتخاب شده برای توسعه مدل‌های ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ.

^۱ - Principal Component Analysis

پارامترهای در نظر گرفته شده در شکل ۵-۵ همگی از نوع ذاتی و غیر قابل کنترل هستند. دلیل این امر آن است که قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ را باید ویژگی ذاتی ثانویه دانست. قابلیت خودسوزی ذاتی است چرا که مشخصه‌ای از یک کیفیت محیطی است و ثانویه است زیرا از تجمیع و تأثیر پارامترهای ذاتی اصلی محیط نشأت می‌گیرد. پارامترهای عملیاتی تغییری در این توانایی ندارند و تنها در کیفیت بروز آن تأثیرگذار هستند. با توجه به اینکه ایجاد یک شاخص برای بررسی این توانایی ذاتی در این قسمت مدنظر بوده است، تنها پارامترهای ذاتی لایه زغال‌سنگ در نظر گرفته شده‌اند.

۵-۵- توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

به منظور توسعه مدل کیفی به طور موازی از ترکیب روش فازی با روش سیستم‌های مهندسی سنگ و روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری برای تعیین وزن پارامترها استفاده شده است. در این راستا از این دو روش با هدف تعیین ساختار و شبکه مسئله و همچنین ارتباطات داخلی استفاده شده است. در مرحله بعد بر اساس این دو روش سوپرمارتیس‌های مربوطه تشکیل و وزن هر یک از پارامترها محاسبه شده است. در مرحله بعد با بازبندی هر یک از پارامترها، شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ^۱ (CSCSi) در قالب سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی کیفی قابلیت خودسوزی ارائه شده است. هر یک از مراحل عنوان شده در ادامه تشریح شده است.

از آنجایی که توسعه مدل کیفی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره صورت گرفته است، بنابراین برای دریافت نظرات کارشناسان از پرسشنامه‌هایی استفاده شده است. گروه کارشناسان و خبرگان مورد استفاده در این رساله شامل اساتید دانشگاهی در ایران و استرالیا و خبرگان صنعتی شاغل در معادن زغال‌سنگ ایران بوده است. پس از دریافت پرسشنامه‌ها و بررسی آن‌ها در نهایت از ۶

^۱- Coal Seam Combustion Spontaneously index

پرسشنامه برای تحلیل‌ها استفاده شده است که نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها با توجه به ساختار هر روش آورده شده است.

۵-۵-۱- استفاده از روش DEMATEL برای تعیین وزن پارامترها

روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری یا DEMATEL از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره بر اساس مقایسه‌های زوجی است که بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۷۶ توسط Fontela و Gabus طی برنامه علوم بشر مؤسسه بتل مموریال^۱ در پروژه اجرا شده مرکز تحقیقاتی ژنو^۲، توسعه یافته است. در این روش علاوه بر بررسی تأثیرگذاری‌ها، پارامترها به انواع علت و معلول تقسیم می‌شوند و از این طریق در یک گراف نمایش داده می‌شوند. این رویکرد با این عقیده ایجاد شد که استفاده مناسب از روش‌های پژوهش علمی، می‌تواند ساختار پیچیده مسائل را بهبود بخشد و در شناسایی راه‌حل‌های عملی با ساختار سلسله مراتبی مشارکت کند. برای اجرای این روش گام‌هایی مطابق با مراحل ذکر شده در ادامه باید اجرا شود (Fontela and Gabus, 1974; Fontela and Gabus, 1976; Tzeng et al., 2007; Li and Tzeng, 2009; Lin and Tzeng, 2009; Lee et al., 2013).

گام اول: جمع‌آوری نظرات کارشناسان

در گام اول، یک ماتریس برای تمام عوامل (پارامتر یا متغیر) انتخاب شده، تهیه می‌شود. در این ماتریس مربعی، پارامترها (Pi) در سطرها و ستون‌ها قرار می‌گیرند. این ماتریس در اختیار کارشناسان قرار می‌گیرد و از آن‌ها خواسته می‌شود میزان تأثیر مستقیم متغیر قرار گرفته بر روی سطر را بر روی متغیرهای قرار گرفته بر روی ستون را بر اساس جدول ۵-۳ ارزیابی کنند. نتایج حاصل از نظرسنجی‌ها در این رساله در جدول‌های ۵-۴ تا ۵-۹ آورده شده است.

جدول ۵-۳: مقادیر عددی شدت اثرگذاری.

رده	عدم وجود تأثیر	تأثیر بسیار کم	تأثیر کم	تأثیر زیاد	تأثیر بسیار زیاد
امتیاز	۰	۱	۲	۳	۴

^۱ - Battelle Memorial Institute

^۲ - Geneva Research Center

جدول ۵-۴: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۱ در روش DEMATEL

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0	3	1	4	0	1	3	3	1
P2	0	0	3	4	0	1	0	4	3
P3	0	0	0	4	0	0	0	1	4
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	2	3	3	0	3	3	3	3
P6	0	0	4	0	3	0	2	0	4
P7	0	1	0	3	1	2	0	2	0
P8	3	3	3	4	3	4	3	0	4
P9	0	0	4	4	0	0	0	1	0

جدول ۵-۵: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۲ در روش DEMATEL

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0	3	3	4	1	1	3	3	1
P2	0	0	3	3	0	1	0	3	3
P3	0	0	0	3	0	0	0	0	3
P4	0	0	0	0	0	1	0	1	0
P5	0	3	2	3	0	3	4	3	4
P6	0	0	3	0	4	0	1	0	4
P7	1	1	2	2	3	1	0	3	2
P8	4	4	4	3	4	3	4	0	3
P9	0	0	4	3	0	0	0	0	0

جدول ۵-۶: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۳ در روش DEMATEL

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0	2	3	3	1	1	4	2	2
P2	0	0	3	2	0	3	0	3	4
P3	0	0	0	3	1	0	0	0	3
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	3	4	4	0	4	4	4	3
P6	0	0	4	1	4	0	1	0	3
P7	3	3	2	3	2	4	0	4	2
P8	3	3	4	4	4	3	3	0	3
P9	0	0	4	3	1	0	0	0	0

جدول ۵-۷: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۴ در روش DEMATEL

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0	3	2	3	1	2	2	4	2
P2	0	0	2	4	0	2	0	4	2
P3	0	0	0	4	0	0	0	0	4
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	3	2	2	0	4	4	4	3
P6	0	0	3	1	3	0	2	0	3
P7	1	2	1	4	3	2	0	2	1
P8	3	3	4	4	4	3	2	0	3
P9	0	0	4	4	0	0	0	0	0

جدول ۵-۸: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۵ در روش DEMATEL.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0	3	2	4	1	2	3	3	2
P2	0	0	4	3	0	2	0	4	3
P3	0	0	0	4	0	0	0	1	4
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	3	4	4	0	4	4	3	4
P6	0	0	3	1	4	0	1	0	3
P7	3	2	1	4	2	3	0	3	1
P8	3	4	4	3	4	2	3	0	4
P9	0	0	4	4	0	0	0	1	0

جدول ۵-۹: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۶ در روش DEMATEL.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0	4	2	4	2	0	4	3	2
P2	0	0	2	3	0	1	0	3	2
P3	0	0	0	3	1	0	0	0	4
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	3	3	2	0	4	4	4	4
P6	0	0	4	1	3	0	1	0	4
P7	3	3	1	3	3	2	0	4	1
P8	4	3	4	4	4	2	3	0	4
P9	0	0	4	3	1	0	0	0	0

گام دوم: محاسبه ماتریس میانگین

پس از جمع‌آوری ماتریس‌های نظرسنجی از کارشناسان (جدول‌های ۵-۴ تا ۵-۹) برای انجام محاسبات بعدی، از ماتریس میانگین حسابی نظرات کارشناسان که با A مشخص می‌شود استفاده می‌شود. برای این منظور هر یک از درایه‌های ماتریس میانگین یعنی a_{ij} ، میانگین حسابی درایه‌های متناظر در ماتریس‌های نظرسنجی است. به زبان ریاضی درایه‌های ماتریس A به صورت رابطه ۵-۸ محاسبه می‌شود. نتایج ماتریس میانگین حاصل از نظرسنجی‌ها در این رساله در جدول ۵-۱۰ آورده شده است.

$$[a_{ij}]_{n \times n} = \frac{1}{h} \sum_{k=1}^h [x_{ij}^k]_{n \times n} \quad (۵-۸)$$

جدول ۵-۱۰: نتایج محاسبه ماتریس میانگین (ماتریس A).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Σ
P1	0.0000	3.0000	2.1667	3.6667	1.0000	1.1667	3.1667	3.0000	1.6667	18.8333
P2	0.0000	0.0000	2.8333	3.1667	0.0000	1.6667	0.0000	3.5000	2.8333	14.0000
P3	0.0000	0.0000	0.0000	3.5000	0.3333	0.0000	0.0000	0.3333	3.6667	7.8333
P4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1667	0.0000	0.1667	0.0000	0.3333
P5	0.0000	2.8333	3.0000	3.0000	0.0000	3.6667	3.8333	3.5000	3.5000	23.3333
P6	0.0000	0.0000	3.5000	0.6667	3.5000	0.0000	1.3333	0.0000	3.5000	12.5000
P7	1.8333	2.0000	1.1667	3.1667	2.3333	2.3333	0.0000	3.0000	1.1667	17.0000
P8	3.3333	3.3333	3.8333	3.6667	3.8333	2.8333	3.0000	0.0000	3.5000	27.3333
P9	0.0000	0.0000	4.0000	3.5000	0.3333	0.0000	0.0000	0.3333	0.0000	8.1667
Σ	5.1667	11.1667	20.5000	24.3333	11.3333	11.8333	11.3333	13.8333	19.8333	

گام سوم: نرمال کردن ماتریس میانگین

در این مرحله ماتریس میانگین به دست آمده در مرحله قبل نرمال می‌شود. برای این منظور درایه‌های ماتریس میانگین بر بیشینه مقدار جمع سطرها یا ستون‌های آن تقسیم می‌شود. به ماتریس حاصل شده، ماتریس روابط مستقیم اولیه نرمال شده گویند و با D نمایش می‌دهند. نحوه محاسبه ریاضیاتی این ماتریس به صورت رابطه ۵-۹ است (Fontela and Gabus, 1974).

$$D = \frac{A}{s} \quad (9-5)$$

A ماتریس میانگین و S بیشینه مقدار جمع سطرها یا ستون‌ها و به صورت رابطه ۵-۱۰ است.

$$s = \max \left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}, \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \quad (10-5)$$

در ماتریس D هر درایه d_{ij} نشان دهنده تأثیر مستقیم از پارامتر X_i به X_j است. از این رو ماتریس D تأثیر مستقیمی که هر پارامتر بر روی دیگر پارامترها می‌گذارد و یا دریافت می‌کند را نشان می‌دهد. درایه‌های ماتریس D در حقیقت رابطه‌ای ساختاری میان عناصر سیستم را نشان می‌دهد و از این رو می‌توان آن را به صورت یک مدل ساختاری به نام گراف رابطه- تأثیر نمایش داد. نتایج نرمال کردن ماتریس میانگین در این رساله در جدول ۵-۱۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱۱: نرمال کردن ماتریس میانگین (ماتریس D).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0.0000	0.1098	0.0793	0.1341	0.0366	0.0427	0.1159	0.1098	0.0610
P2	0.0000	0.0000	0.1037	0.1159	0.0000	0.0610	0.0000	0.1280	0.1037
P3	0.0000	0.0000	0.0000	0.1280	0.0122	0.0000	0.0000	0.0122	0.1341
P4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061	0.0000	0.0061	0.0000
P5	0.0000	0.1037	0.1098	0.1098	0.0000	0.1341	0.1402	0.1280	0.1280
P6	0.0000	0.0000	0.1280	0.0244	0.1280	0.0000	0.0488	0.0000	0.1280
P7	0.0671	0.0732	0.0427	0.1159	0.0854	0.0854	0.0000	0.1098	0.0427
P8	0.1220	0.1220	0.1402	0.1341	0.1402	0.1037	0.1098	0.0000	0.1280
P9	0.0000	0.0000	0.1463	0.1280	0.0122	0.0000	0.0000	0.0122	0.0000

گام چهارم: محاسبه ماتریس روابط کلی

بر اساس قوانین موجود در تئوری گراف‌ها، مجموع آثار مستقیم و غیرمستقیم رئوس بر یکدیگر با در نظر گرفتن کلیه بازخوردهای ممکن به صورت مجموع جمله‌های یک تصاعد هندسی نامحدود است. از این رو ماتریس روابط کلی T که نشان‌دهنده هر دو نوع تأثیر مستقیم و غیرمستقیم پارامترها روی یکدیگر است به صورت رابطه ۵-۱۱ تعریف می‌شود (Fontela and Gabus, 1974).

$$\begin{aligned}
 T &= \sum_{m=1}^{\infty} D^m = D + D^2 + D^3 + \dots + D^{\infty} \\
 &= D(I + D + D^2 + D^3 + \dots + D^{m-1}) \\
 &= D(I - D)^{-1}(I - D)(I + D + D^2 + D^3 + \dots + D^{m-1}) \\
 &= D(I - D)^{-1}(I - D^m) = D(I - D)^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{۱۱-۵}$$

رابطه ۵-۱۱ را می‌توان به صورت رابطه ۵-۱۲ نیز به دست آورد.

$$\begin{aligned}
 T &= \lim_{m \rightarrow \infty} (D + D^2 + \dots + D^m) = \lim_{m \rightarrow \infty} D(I + D + D^2 + \dots + D^{m-1}) \\
 &= \lim_{m \rightarrow \infty} D \left(\frac{I - D^m}{I - D} \right) = \frac{D}{I - D} = D(I - D)^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{۱۲-۵}$$

با همین استدلال، تأثیر غیرمستقیم پارامتر i بر روی پارامتر j با افزایش توان ماتریس D به طور پیوسته کاهش پیدا می‌کند. مشابه با ماتریس حالت مانای زنجیره مارکوف، این رویداد همگرایی پاسخ‌ها به وارون ماتریس را تضمین می‌کند. از این رو ماتریس روابط غیرمستقیم ID را می‌توان از طریق رابطه ۵-۱۳ محاسبه کرد.

$$ID = D^2 + D^3 + \dots = \sum_{i=2}^{\infty} D^i = D^2(I - D)^{-1}
 \tag{۱۳-۵}$$

راه دیگر محاسبه ماتریس T استفاده از ماتریس روابط غیرمستقیم به صورت رابطه ۵-۱۴ است.

$$T = D + ID \quad (14-5)$$

به طور کلی ماتریس روابط کلی T که نشان دهنده هر دو نوع تأثیر مستقیم و غیر مستقیم

پارامترها روی یکدیگر است به صورت رابطه ۵-۱۵ تعریف می‌شود.

$$T = \sum_{m=1}^{\infty} D^m = D(I-D)^{-1} \quad (15-5)$$

اگر درایه‌های ماتریس روابط کلی T به صورت t_{ij} باشد، مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس T

به صورت بردارهای r و c محاسبه می‌شوند (روابط ۵-۱۶ و ۵-۱۷).

$$[r_i]_{n \times 1} = \left(\sum_{j=1}^n t_{ij} \right)_{n \times 1} \quad (16-5)$$

$$[c_j]_{1 \times n} = \left(\sum_{i=1}^n t_{ij} \right)_{1 \times n} \quad (17-5)$$

بنابراین مجموع سطر i ام ماتریس T به صورت $[r_i]_{n \times 1}$ است و نشان دهنده تأثیر کلی (هر دو

نوع تأثیر مستقیم و غیرمستقیم) پارامتر واقع در سطر i بر روی دیگر پارامترهاست. همچنین مجموع

ستون j ام ماتریس T به صورت $[c_j]_{1 \times n}$ و نشان دهنده تأثیر کلی (هر دو نوع تأثیر مستقیم و

غیرمستقیم) گرفته شده از دیگر پارامترها توسط پارامتر واقع در ستون j است؛ بنابراین زمانی که $i=j$

است مقدار r_i+c_j شاخصی است که مجموع تأثیر گذاشته و گرفته شده توسط پارامتر i را نشان

می‌دهد؛ به عبارت دیگر r_i+c_j نشان دهنده درجه اهمیتی (مجموع تأثیر گذاشته شده و گرفته شده)

است که پارامتر i در سیستم دارد و هرچه مقدار آن برای پارامتری بیشتر باشد، آن عامل تعامل

بیشتری با سایر عوامل سیستم دارد. این مقدار را برتری^۱ می‌نامند.

مقدار r_i-c_j نشان دهنده تأثیر خالصی است که پارامتر i در سیستم به اشتراک گذاشته و با آن

در تعامل است و ارتباط^۲ نامیده می‌شود. اگر مقدار r_i-c_j مثبت باشد، پارامتر i به عنوان تأثیرگذار

قطعی و یک متغیر علت است. زمانی که این مقدار منفی باشد، متغیر به عنوان یک تأثیرپذیر قطعی و

یک متغیر معلول است. وزن هر پارامتر نیز از رابطه ۵-۱۸ محاسبه می‌شود (Fontela and Gabus, 1974).

(1974)

¹- Prominence

²- Relation

$$W_i = \frac{r_i + c_i}{\sum_{i=1}^n r_i + \sum_{i=1}^n c_i} \quad (18-5)$$

i: تعداد پارامترهای اصلی

W_i : وزن پارامتر i ام

r_i : مجموع سطری پارامتر i ام در ماتریس روابط کلی (ماتریس T).

c_i : مجموع ستونی پارامتر i ام در ماتریس روابط کلی (ماتریس T).

قابل ذکر است که برای هر سه ماتریس D, ID, T می توان نمودار رابطه- تأثیر را به صورت

مجزا ترسیم کرد. نتایج ماتریس روابط کلی در این رساله در جدول های ۵-۱۲ و ۵-۱۳ و شکل ۵-۵۳

آورده شده است، همچنین وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه های زغال سنگ با استفاده از روش

DEMATEL در شکل ۵-۷۱ آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود درجه زغال شدگی

(P8) دارای بیشترین مقدار اثرگذاری و ترکیب پتروگرافی (P4) دارای کمترین میزان اثرگذاری هستند؛

بنابراین ترکیب پتروگرافی (P4) باید دارای بیشترین مقدار تأثیرپذیری باشد که نتایج حاصل شده نیز

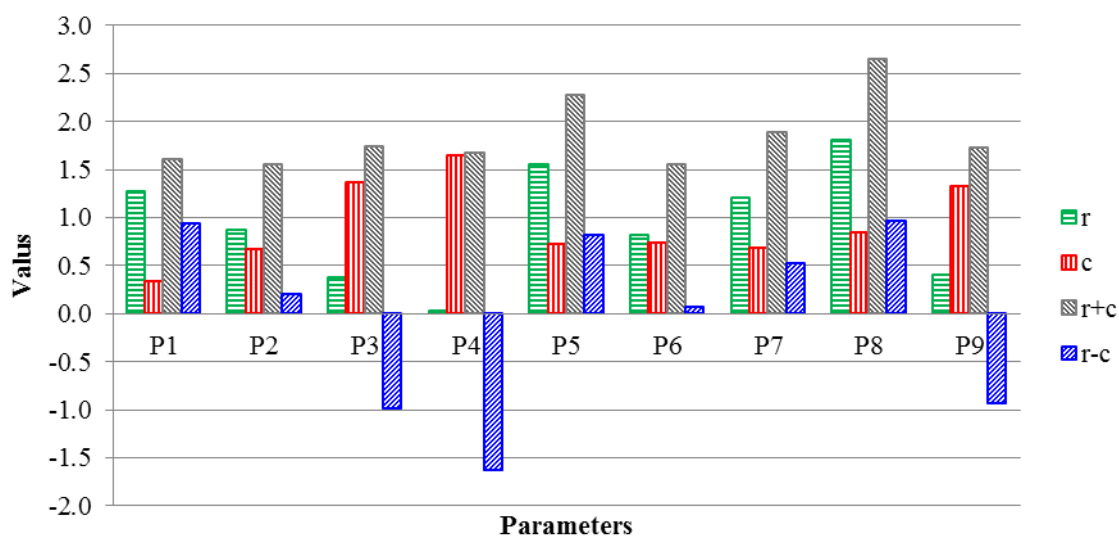
مؤید این نکته است. همچنین خاکستر محتوی (P1)، دارای کمترین میزان اثرپذیری در سیستم است.

جدول ۵-۱۲: ماتریس روابط کلی (ماتریس T).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0.0308	0.1543	0.1728	0.2508	0.0909	0.0977	0.1553	0.1671	0.1542
P2	0.0198	0.0262	0.1696	0.1940	0.0390	0.0875	0.0282	0.1470	0.1666
P3	0.0027	0.0049	0.0276	0.1563	0.0183	0.0063	0.0053	0.0191	0.1443
P4	0.0009	0.0013	0.0028	0.0025	0.0021	0.0074	0.0015	0.0069	0.0027
P5	0.0354	0.1517	0.2308	0.2522	0.0738	0.1916	0.1847	0.1884	0.2429
P6	0.0097	0.0266	0.1881	0.1079	0.1490	0.0331	0.0765	0.0372	0.1880
P7	0.0907	0.1213	0.1407	0.2245	0.1373	0.1380	0.0545	0.1636	0.1382
P8	0.1449	0.1828	0.2736	0.3021	0.2022	0.1744	0.1736	0.0926	0.2600
P9	0.0027	0.0050	0.1569	0.1580	0.0185	0.0063	0.0053	0.0193	0.0276

جدول ۵-۱۳: مقادیر r, c, r+c و وزن پارامترها در ماتریس روابط کلی (ماتریس T).

پارامتر	اثرگذاری (r)	اثرپذیری (c)	برتری (r+c)	ارتباط (r-c)	وزن (W_i)	وزن W_i (%)
P1	1.2739	0.3375	1.6114	0.9363	0.0965	9.6531
P2	0.8778	0.6741	1.5519	0.2037	0.0930	9.2964
P3	0.3848	1.3629	1.7477	-0.9782	0.1047	10.4695
P4	0.0282	1.6483	1.6764	-1.6201	0.1004	10.0427
P5	1.5514	0.7312	2.2826	0.8202	0.1367	13.6740
P6	0.8161	0.7422	1.5583	0.0738	0.0933	9.3348
P7	1.2087	0.6848	1.8935	0.5239	0.1134	11.3430
P8	1.8061	0.8411	2.6472	0.9651	0.1586	15.8581
P9	0.3996	1.3245	1.7241	-0.9249	0.1033	10.3284
	$\sum = 8.3466$	$\sum = 8.3466$	$\sum = 16.6931$	$\sum = 0$	$\sum = 1$	$\sum = 100$



شکل ۵-۵۳: مقادیر r ، c ، $r+c$ ، $r-c$ پارامترها در ماتریس روابط کلی (ماتریس T).

جدول ۵-۱۴: وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از روش DEMATEL.

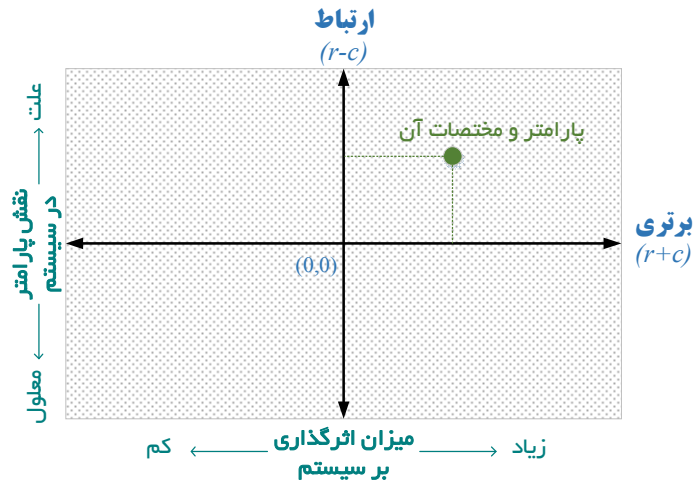
وزن پارامترها با استفاده از روش DEMATEL	پارامترهای مؤثر در خودسوزی
9.65	خاکستر محتوی (P1)
9.30	کربن ثابت (P2)
10.47	گاز محتوی (P3)
10.04	ترکیب پتروگرافی (P4)
13.67	رطوبت محتوی (P5)
9.34	اندازه ذرات (P6)
11.34	پیریت محتوی (P7)
15.86	درجه زغال شدگی (P8)
10.33	مواد فرار (P9)

گام پنجم: ترسیم نمودار علی^۱

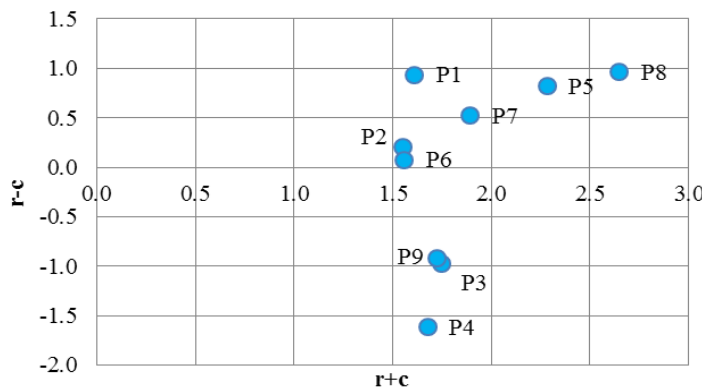
در این قسمت نموداری در یک دستگاه مختصات دکارتی ترسیم می‌شود که در آن محور طولی مقدار برتری (r_i+c_j) و محور عرضی بر اساس مقدار ارتباط (r_i-c_j) است؛ بنابراین موقعیت هر عامل با نقطه‌ای به مختصات $(r+c, r-c)$ در دستگاه معین می‌شود. نمونه‌ای از این نمودار در شکل ۵-۵۴ مشاهده

^۱ - Casual Diagram

می‌شود. به دلیل مشخص شدن پارامترها در این نمودار از جنبه علت و معلولی، آن را نمودار علی می‌نامند. نمودار علی پارامترهای مورد استفاده در این رساله در شکل ۵-۵۵ آورده شده است.



شکل ۵-۵۴: نمونه‌ای از نمودار علی.



شکل ۵-۵۵: نمودار علی پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از روش DEMATEL.

در شکل ۵-۵۵ مشاهده می‌شود که پارامترهای گاز محتوی (P3)، ترکیب پتروگرافی (P4) و مواد فرار (P9) به صورت معلول بوده و دیگر پارامترها به صورت علت هستند. علاوه بر این درجه زغال شدگی (P8) دارای بیشترین مقدار برتری است و از این رو دارای بیشترین اهمیت در قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ است و کربن ثابت (P2) و اندازه ذرات (P6) دارای کمترین مقدار برتری هستند. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود درجه زغال شدگی (P8) دارای بیشترین تعامل و ترکیب پتروگرافی (P4) دارای کمترین مقدار تعامل با سیستم است.

گام ششم: رسم نقشه روابط شبکه‌ای^۱ (NRM)

با استفاده از اطلاعات ماتریس T می‌توان روابط ساختار میان پارامترها را نشان داد. این ساختار به صورت یک نقشه روابط شبکه‌ای است که در آن ارتباط میان پارامتر با گراف‌های جهت‌دار مشخص می‌شود. این ساختار را می‌توان در نمودار علی گنجانده و یا به صورت مجزا ترسیم کرد. بر اساس ماتریس T هر یک از درایه‌های t_{ij} در آن اطلاعاتی را درباره اینکه پارامتر i چگونه بر j تأثیر می‌گذارد فراهم می‌کند. اگر همه اطلاعات حاصل از ماتریس T در نمودار آورده شود، شلوغی و پیچیدگی حاصل شده و نمایش اطلاعات ضروری را برای تصمیم‌گیرنده سخت خواهد کرد. از این رو برای حصول یک شکل مفید، باید یک مقدار حد آستانه^۲ برای سطح تأثیرات در نظر گرفته شود. در این صورت تنها روابطی که دارای سطح تأثیری بیش از این حد آستانه باشند در گراف آورده خواهند شد؛ بنابراین، تعیین یک مقدار حد آستانه برای جلوگیری از نمایش تأثیرات واضحی که توسط عناصر ماتریس T تبیین می‌شود برای توضیح ساختار عناصر لازم است.

انتخاب این حد آستانه یکی از چالش‌های روش DEMATEL است که تاکنون روش‌های مختلفی برای تعیین آن پیشنهاد شده است. این مقدار می‌تواند توسط تصمیم‌گیرنده و یا از طریق نظرسنجی از خبرگان تعیین شود. راه دیگر استفاده از میانگین مقدار درایه‌های ماتریس T است. به هر حال اگر این مقدار بسیار کم انتخاب شود، گراف برای نمایش اطلاعات ضروری بسیار شلوغ و پیچیده خواهد بود. از طرف دیگر اگر این مقدار بسیار بزرگ انتخاب شود، بسیاری از عوامل به صورت مستقل نمایش داده می‌شوند و در نتیجه روابط آن‌ها با دیگر پارامترها نشان داده نمی‌شود. از این رو انتخاب یک مقدار معقول برای حد آستانه می‌تواند متضمن نمایش اطلاعات ضروری در عین سادگی گراف باشد.

به منظور رسم نقشه روابط شبکه‌ای بر اساس اطلاعات ماتریس روابط کلی (جدول ۵-۱۲)، حد آستانه از طریق روش میانگین حسابی بعلاوه انحراف معیار درایه‌های ماتریس T ، برابر با $0/18$ به

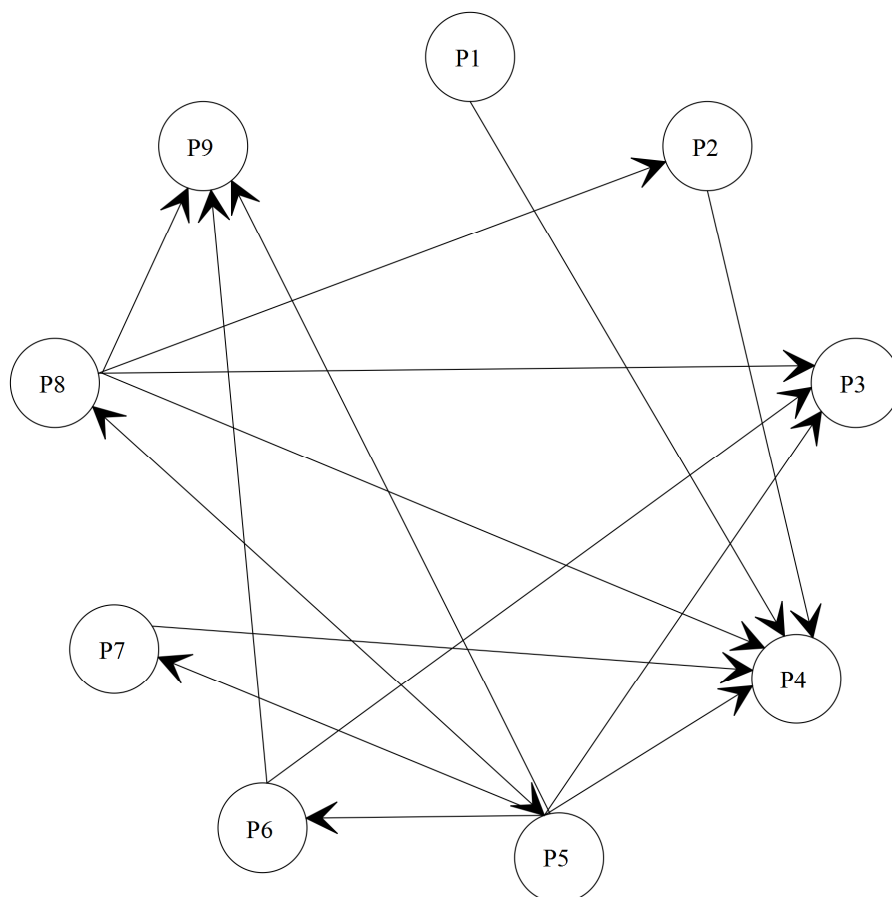
^۱ - Network Relationship Map (NRM)

^۲ - Threshold Value

دست آمده است. برای این منظور در NRM تنها روابطی نمایش داده می‌شود که مقدار آن‌ها در ماتریس T بیش از ۰/۱۸ باشد که در جدول ۵-۱۵ با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند. این بدان معنا است که یال‌های جهت‌دار این شبکه دارای مجموع تأثیرهای مستقیم و غیرمستقیم بیش از ۰/۱۸ از رأس مبدأ به رأس مقصد است. بر این اساس شکل ۵-۵۶ نقشه روابط شبکه‌ای پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ را به منظور تبیین ساختار داخلی آن‌ها نمایش می‌دهد.

جدول ۵-۱۵: ماتریس روابط کلی حد آستانه از طریق روش میانگین حسابی درایه‌های ماتریس T.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P1	0.0308	0.1543	0.1728	0.2508	0.0909	0.0977	0.1553	0.1671	0.1542
P2	0.0198	0.0262	0.1696	0.1940	0.0390	0.0875	0.0282	0.1470	0.1666
P3	0.0027	0.0049	0.0276	0.1563	0.0183	0.0063	0.0053	0.0191	0.1443
P4	0.0009	0.0013	0.0028	0.0025	0.0021	0.0074	0.0015	0.0069	0.0027
P5	0.0354	0.1517	0.2308	0.2522	0.0738	0.1916	0.1847	0.1884	0.2429
P6	0.0097	0.0266	0.1881	0.1079	0.1490	0.0331	0.0765	0.0372	0.1880
P7	0.0907	0.1213	0.1407	0.2245	0.1373	0.1380	0.0545	0.1636	0.1382
P8	0.1449	0.1828	0.2736	0.3021	0.2022	0.1744	0.1736	0.0926	0.2600
P9	0.0027	0.0050	0.1569	0.1580	0.0185	0.0063	0.0053	0.0193	0.0276



شکل ۵-۵۶: ساختار شبکه‌ای پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ.

بر اساس شکل ۵-۵۶ نتایج زیر قابل دریافت است:

✓ بیشترین تأثیر گذاشته شده (بیشترین یال خروجی) متعلق به پارامتر P5 یعنی رطوبت محتوی است، یعنی تغییرات رطوبت محتوی منجر به تغییرات در تعداد بیشتری پارامتر خواهد شد.

✓ بیشترین تأثیر دریافت شده (بیشترین یال ورودی) متعلق به پارامتر P4 یعنی ترکیب پتروگرافی است، یعنی تغییرات تعداد بیشتری از پارامترها، منجر به تغییرات در این پارامتر خواهد شد.

✓ کمترین تأثیر گرفته شده مربوط به پارامتر P1 یعنی خاکستر محتوی است. از آنجایی که هیچ یالی به این رأس وارد نشده یعنی تغییرات هیچ پارامتری موجب ایجاد تغییرات در خاکستر محتوی نخواهد شد.

۵-۵-۲- استفاده از روش FRES برای تعیین وزن پارامترها

در هنگام طراحی یک ساختار در یک مسئله، 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 برای 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 and Harrison, 1992).

این رویکرد با در نظر گرفتن مسئله به صورت یک سیستم واقعی و با استفاده از ویژگی‌ها و تفکر سیستمی، امروزه به عنوان راه حلی جدید برای مسائل پیچیده مهندسی به شمار می‌رود (خالو کاکائی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸). رویکرد مذکور تاکنون در بسیاری از علوم مهندسی نظیر محیط‌زیست و شناخت گستره آلودگی‌ها، مهندسی عمران، مهندسی معدن، آتشیباری و ناپایداری شیب‌های سنگی و غیره به کار رفته است (Frough and Torabi, 2013).

برای اجرای روش فازی سیستم‌های مهندسی سنگ، گام‌هایی باید اجرا شود که عبارت‌اند از:

گام اول: جمع‌آوری نظرات کارشناسان

در روش کلاسیک سیستم‌های مهندسی سنگ، ماتریس در اختیار کارشناسان قرار می‌گیرد و از آن‌ها خواسته می‌شود میزان تأثیر مستقیم متغیر قرار گرفته بر روی سطر را بر روی متغیرهای قرار گرفته بر روی ستون را بر اساس جدول ۵-۱۶ ارزیابی کنند. نتایج حاصل از نظرسنجی‌ها در این رساله در جدول‌های ۵-۱۷ تا ۵-۲۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱۶: کدهای انتخابی در روش کدگذاری نیمه کمی خبره (Hudson, 1992).

رده	عدم وجود اندرکنش	اندرکنش ضعیف	اندرکنش متوسط	اندرکنش قوی	اندرکنش اثر بحرانی و شدید
امتیاز	۰	۱	۲	۳	۴

جدول ۵-۱۷: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۱ در روش FRES.

P1	3	1	4	0	1	3	3	1
0	P2	3	4	0	1	0	4	3
0	0	P3	4	0	0	0	1	4
0	0	0	P4	0	0	0	0	0
0	2	3	3	P5	3	3	3	3
0	0	4	0	3	P6	2	0	4
0	1	0	3	1	2	P7	2	0
3	3	3	4	3	4	3	P8	4
0	0	4	4	0	0	0	1	P9

جدول ۵-۱۸: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۲ در روش FRES.

P1	3	3	4	1	1	3	3	1
0	P2	3	3	0	1	0	3	3
0	0	P3	3	0	0	0	0	3
0	0	0	P4	0	1	0	1	0
0	3	2	3	P5	3	4	3	4
0	0	3	0	4	P6	1	0	4
1	1	2	2	3	1	P7	3	2
4	4	4	3	4	3	4	P8	3
0	0	4	3	0	0	0	0	P9

جدول ۵-۱۹: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۳ در روش FRES.

P1	2	3	3	1	1	4	2	2
0	P2	3	2	0	3	0	3	4
0	0	P3	3	1	0	0	0	3
0	0	0	P4	0	0	0	0	0
0	3	4	4	P5	4	4	4	3
0	0	4	1	4	P6	1	0	3
3	3	2	3	2	4	P7	4	2
3	3	4	4	4	3	3	P8	3
0	0	4	3	1	0	0	0	P9

جدول ۵-۲۰: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۴ در روش FRES.

P1	3	2	3	1	2	2	4	2
0	P2	2	4	0	2	0	4	2
0	0	P3	4	0	0	0	0	4
0	0	0	P4	0	0	0	0	0
0	3	2	2	P5	4	4	4	3
0	0	3	1	3	P6	2	0	3
1	2	1	4	3	2	P7	2	1
3	3	4	4	4	3	2	P8	3
0	0	4	4	0	0	0	0	P9

جدول ۵-۲۱: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۵ در روش FRES.

P1	3	2	4	1	2	3	3	2
0	P2	4	3	0	2	0	4	3
0	0	P3	4	0	0	0	1	4
0	0	0	P4	0	0	0	0	0
0	3	4	4	P5	4	4	3	4
0	0	3	1	4	P6	1	0	3
3	2	1	4	2	3	P7	3	1
3	4	4	3	4	2	3	P8	4
0	0	4	4	0	0	0	1	P9

جدول ۵-۲۲: جمع‌آوری نظرات کارشناس ۶ در روش FRES.

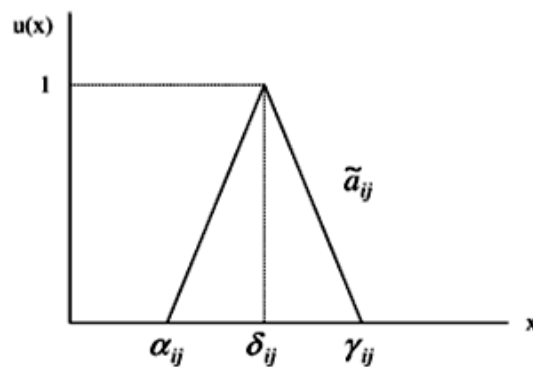
P1	4	2	4	2	0	4	3	2
0	P2	2	3	0	1	0	3	2
0	0	P3	3	1	0	0	0	4
0	0	0	P4	0	0	0	0	0
0	3	3	2	P5	4	4	4	4
0	0	4	1	3	P6	1	0	4
3	3	1	3	3	2	P7	4	1
4	3	4	4	4	2	3	P8	4
0	0	4	3	1	0	0	0	P9

گام دوم: تشکیل ماتریس فازی

یکی از کارآمدترین این تکنیک‌ها، فرآیند فازی است. در روش فازی، پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌شوند، در حالی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلند مدت، 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 پیش‌بینی بلند مدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی بپردازیم. بدین ترتیب اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ کرده و مورد تحلیل قرار می‌دهیم. این روش تحلیل، روش فازی نامیده می‌شود.

گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرات خبرگان مورد استفاده قرار داد، اما در این رساله برای سهولت انجام محاسبات از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. در این روش ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای مؤثر به صورت کمی نظرسنجی به عمل آمد که نتایج حاصل از نظرسنجی‌ها در این رساله در جدول‌های ۵-۱۷ تا ۵-۲۲ آورده شده است.

برای محاسبه اعداد فازی (\tilde{a}_{ij}) نظرهای حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مدنظر قرار می‌گیرند. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر اساس توابع عضویت مختلف همچون روش مثلثی و یا حالت دوزنقه‌ای محاسبه کرد. با توجه به کاربرد زیاد و سهولت محاسبه روش مثلثی از این روش برای فازی‌سازی در این رساله استفاده شده است. محاسبه اعداد فازی مثلثی در شکل ۵-۵۷ نشان داده شده است. در این حالت در روش فازی یک عدد فازی به صورت رابطه ۵-۱۹ تا ۵-۲۲ تعریف می‌شود (Liu and Chen, 2007).



شکل ۵-۵۷: تابع عضویت مثلثی در روش فازی (Liu and Chen, 2007).

$$\tilde{a}_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (۱۹-۵)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), \quad k = 1, 2, \dots, \lambda \quad (۲۰-۵)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^{\lambda} \beta_{ijk} \right)^{1/n}, \quad k = 1, 2, \dots, \lambda \quad (۲۱-۵)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), \quad k = 1, 2, \dots, \lambda \quad (۲۲-۵)$$

در روابط فوق β_{ijk} نشان‌دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام است و α_{ij} و γ_{ij} به ترتیب حد بالا و پایین نظرهای پرسش‌شوندگان و δ_{ij} میانگین هندسی نظرهای پرسش‌شوندگان است. بدیهی است که مؤلفه‌های عدد فازی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$ (عطائی، ۱۳۸۹). حاصل نتایج تشکیل ماتریس فازی بر اساس جدول‌های ۵-۱۷ تا ۵-۲۲ در جدول ۵-۲۳ آورده شده است.

جدول ۵-۲۳: حاصل نتایج تشکیل ماتریس فازی بر اساس جدول‌های ۵-۱۷ تا ۵-۲۲.

P1	(2,2.942,4)	(1,2.040,3)	(3,3.634,4)	(0,0,2)	(0,0,2)	(2,3.086,4)	(2,2.942,4)	(1,1.587,2)	(11,16.231,25)
(0,0,0)	P2	(2,2.749,4)	(2,3.086,4)	(0,0,0)	(1,1.513,3)	(0,0,0)	(3,3.464,4)	(2,2.749,4)	(10,13.562,19)
(0,0,0)	(0,0,0)	P3	(3,3.464,4)	(0,0,1)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,1)	(3,3.634,4)	(6,7.098,10)
(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	P4	(0,0,0)	(0,0,1)	(0,0,0)	(0,0,1)	(0,0,0)	(0,0,2)
(0,0,0)	(2,2.804,3)	(2,2.884,4)	(2,2.884,4)	P5	(3,3.634,4)	(3,3.813,4)	(3,3.464,4)	(3,3.464,4)	(18,22.948,27)
(0,0,0)	(0,0,0)	(3,3.464,4)	(0,0,1)	(3,3.464,4)	P6	(1,1.260,2)	(0,0,0)	(3,3.464,4)	(10,11.652,15)
(0,0,3)	(1,1.817,3)	(0,0,2)	(2,3.086,4)	(1,2.182,3)	(1,2.140,4)	P7	(2,2.884,4)	(0,0,2)	(7,12.110,25)
(3,3.302,4)	(3,3.302,4)	(3,3.813,4)	(3,3.634,4)	(3,3.813,4)	(2,2.749,4)	(2,2.942,4)	P8	(3,3.464,4)	(22,27.019,32)
(0,0,0)	(0,0,0)	(4,4,4)	(3,3.464,4)	(0,0,1)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,1)	P9	(7,7.464,10)
(3,3.302,7)	(8,10.865,14)	(15,18.950,25)	(18,23.254,29)	(7,9.459,15)	(7,10.037,18)	(8,11.101,14)	(10,12.754,19)	(15,18.363,24)	

Fuzzy Effect (FE)

Fuzzy Cause (FC)

گام سوم: تشکیل نمودار علت-اثر

نمودار علت-اثر پارامترها که از تأثیر ماتریس اندرکنش به دست می‌آید امکان شناسایی پارامترهای غالب طراحی و شدت اندرکنش هر یک بر رفتار سیستم را نشان می‌دهد. در نمودار علت-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. برعکس، 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 «علت^۱» یا اثر P_i روی سیستم و مجموع مقادیر هر ستون به عنوان «تأثیر^۲» یا اثر سیستم روی پارامتر است؛ که در نهایت منجر به وجود آمدن محورهای C و E می‌شوند؛ بنابراین C نشان‌دهنده نحوه تأثیرات P_i بر روی سیستم است و E نشان‌دهنده تأثیری است که سیستم بر روی پارامتر P_i می‌گذارد (Hudson, 1992). برای محاسبه علت فازی و تأثیر فازی به ترتیب از رابطه ۵-۲۳ و رابطه ۵-۲۴ استفاده می‌شود.

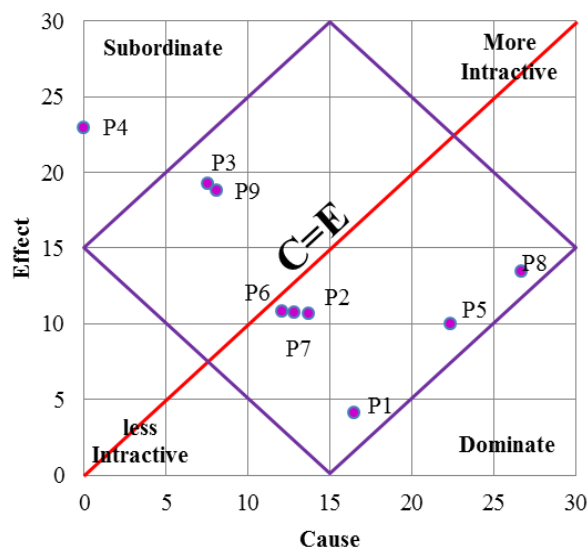
¹ - Cause
² - Effect

$$FC_{pi} = \sum_{j=1}^n (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (23-5)$$

$$FE_{pj} = \sum_{i=1}^n (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (24-5)$$

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

پس از کدگذاری ماتریس، علت فازی FC به صورت مجموع تمام کدهای سطر و اثر فازی FE به صورت مجموع تمام کدهای ستون برای هر پارامتر قابل محاسبه است. مقادیر علت و اثر غیر فازی هر پارامتر به روی محورهای X و Y منتقل شده و بنابراین نمودار علت-اثر را به وجود آورده‌اند (شکل ۵-۵۸). قطر این نمودار نشان‌دهنده مکان هندسی (C=E) است و در طول این قطر، مجموع C+E افزایش می‌یابد. در جدول‌های ۲۴-۵ و ۲۵-۵ و شکل ۵-۵۹، مقادیر مختلف پارامترها در حالت فازی و غیرفازی آورده شده است.



شکل ۵-۵۸: نمودار علت-اثر پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ.

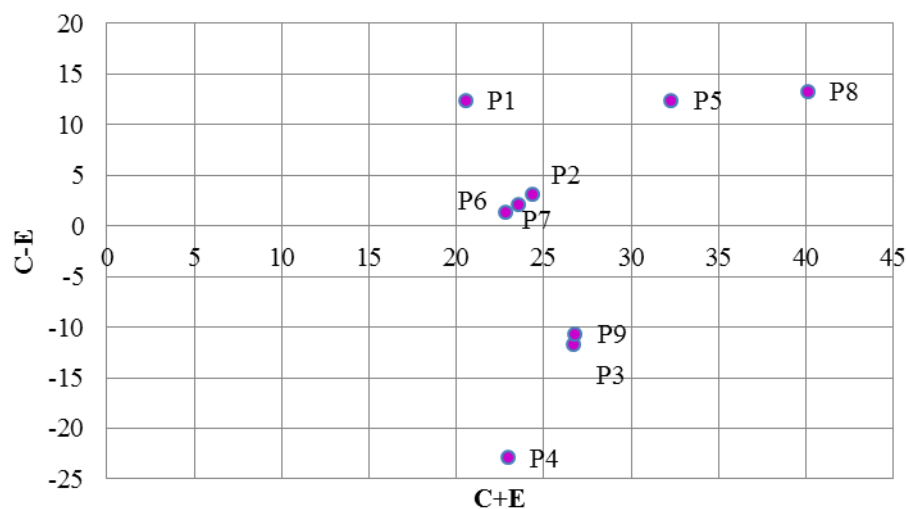
جدول ۵-۲۴: مقادیر علت فازی، اثر فازی، مجموع علت و اثر فازی، وزن فازی و وزن غیر فازی هر پارامتر.

Parameters	FC	FE	FC+FE	\tilde{a}_i	(%) w_i
P1	(11,16.231,25)	(3,3.302,7)	(14,19.533,32)	(0.042,0.083,0.176)	8.51
P2	(10,13.562,19)	(8,10.865,14)	(18,24.427,33)	(0.055,0.103,0.181)	10.08
P3	(6,7.098,10)	(15,18.950,25)	(21,26.048,35)	(0.064,0.110,0.192)	11.05
P4	(0,0,2)	(18,23.254,29)	(18,23.254,31)	(0.055,0.098,0.170)	9.71
P5	(18,22.948,27)	(7,9.459,15)	(25,32.407,42)	(0.076,0.137,0.231)	13.39
P6	(10,11.652,15)	(7,10.037,18)	(17,21.689,33)	(0.052,0.092,0.181)	9.50
P7	(7,12.110,25)	(8,11.101,14)	(15,23.211,39)	(0.045,0.098,0.214)	9.86
P8	(22,27.019,32)	(10,12.754,19)	(32,39.773,51)	(0.097,0.168,0.280)	16.60
P9	(7,7.464,10)	(15,18.363,24)	(22,25.827,34)	(0.067,0.109,0.187)	11.08

$$\sum_{i=1}^9 FC_i = (91,118.085,165) \quad \sum_{i=1}^9 FE_i = (91,118.085,165) \quad \sum_{i=1}^9 FC_i + \sum_{i=1}^9 FE_i = (182,236.17,330) \quad \dots \quad \sum_{i=1}^9 w_i = 100$$

جدول ۵-۲۵: مقادیر علت، اثر، مجموع علت و اثر و تفاضل علت و اثر هر پارامتر در حالت کلاسیک برای هر پارامتر.

Parameters	C	E	C+E	C-E
P1	16.465	4.108	20.573	12.357
P2	13.710	10.676	24.386	3.033
P3	7.524	19.226	26.749	-11.702
P4	0.000	22.982	22.982	-22.982
P5	22.342	9.977	32.320	12.365
P6	12.046	10.814	22.860	1.232
P7	12.845	10.753	23.598	2.092
P8	26.694	13.432	40.126	13.262
P9	8.054	18.768	26.822	-10.714



شکل ۵-۵۹: نمودار C-E/C+E هر پارامتر.

نمودار علت-اثر شکل ۵-۵۸، 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 تسلط 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 علت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه دارای اهمیت بوده و می‌تواند اثرات متقابل مفید و غیرمفید از نظر مهندسی را مشخص کند. محاسبه میزان اندرکنش به صورت مقدار C+E می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی شود که لازم است تحت کنترل قرار بگیرند، چرا که تغییر در این پارامترها احتمالاً می‌تواند باعث القای تغییرات مهمی در سیستم شود.

از جدول‌های ۲۴-۵ و ۲۵-۵ و شکل ۵-۵۹، مشخص می‌شود که پارامتر P4 یعنی ترکیب پتروگرافی کاملاً تحت اثر سیستم بوده و مغلوب سیستم است و دارای کمترین مقدار C-E است و پارامتر P8 یعنی درجه زغال‌شدگی بیشترین تسلط را بر روی سیستم دارد و غالب‌ترین پارامتر سیستم است و علت آن این است که بیشترین مقدار C-E را دارا است.

انتخاب C+E (مجموع علت و اثرها) به عنوان فاکتور تمایز بین پارامترها به دلیل تمرکز بر نقش اندرکنش سیستم بوده است. به طور کلی هر چه اندرکنش یک سیستم بیشتر باشد، آن سیستم به صورت بالقوه ناپایدار است، زیرا شانس بیشتری وجود دارد که تغییر کوچک در یک پارامتر تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر بگذارد. با بررسی C+E هر پارامتر مشخص شد پارامترهای P8 (درجه زغال‌شدگی)، P5 (رطوبت محتوی) و P9 (مواد فرار) که به ترتیب دارای بیشترین مقادیر C+E هستند جز مهم‌ترین پارامترهای تعاملی در سیستم به حساب می‌آیند. همچنین پارامتر P1 (خاکستر محتوی) دارای کمترین مقدار C+E است و کم‌تعالی‌ترین پارامتر سیستم است.

گام چهارم: به دست آوردن وزن فازی هر پارامتر

در نهایت برای به دست آوردن وزن هر پارامتر در سیستم از رابطه ۲۵-۵ استفاده می‌شود (Mazzoccola and Hudson, 1996):

$$\tilde{a}_i = \frac{FC_i + FE_i}{\sum_{i=1}^n FC_i + \sum_{i=1}^n FE_i} \quad (25-5)$$

i: تعداد پارامترهای اصلی

FC_i : اثرگذاری فازی پارامتر i ام در سیستم

FE_i : تأثیرپذیری فازی پارامتر i ام در سیستم

مجموع FC_i در کل سیستم: $\sum_{i=1}^n FC_i$

مجموع FE_i در کل سیستم: $\sum_{i=1}^n FE_i$

\tilde{a}_i : وزن فازی پارامتر i ام

برای محاسبه اعداد فازی در رابطه‌های ۲۳-۵ تا ۲۵-۵ می‌توان از رابطه‌های ۲۶-۵ و ۲۷-۵

استفاده کرد.

$$\tilde{M}_1 = (a_1, b_1, c_1); \tilde{M}_2 = (a_2, b_2, c_2) \rightarrow \tilde{M}_1 + \tilde{M}_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2) \quad (26-5)$$

$$\tilde{M}_1 = (a_1, b_1, c_1); \tilde{M}_2 = (a_2, b_2, c_2) \rightarrow \frac{\tilde{M}_1}{\tilde{M}_2} = \left\{ \left(\frac{a_1}{c_2}, \frac{b_1}{b_2}, \frac{c_1}{a_2} \right) \right\} \quad \tilde{M}_1 > 0, \tilde{M}_2 > 0 \quad (27-5)$$

گام پنجم: به دست آوردن وزن غیر فازی هر پارامتر

بر اساس رابطه ۲۵-۵، \tilde{a}_i وزن فازی پارامتر i ام ($\tilde{a}_i = (a_i, b_i, c_i)$) است. برای غیر فازی ساختن وزن

هر پارامتر می‌توان از میانگین هندسی اعداد فازی مثلثی، وزن غیر فازی هر پارامتر را مطابق با رابطه

۲۸-۵ به دست آورد.

$$W_i = \left(\prod_i ((a_i, b_i, c_i)) \right)^{1/3} \quad (28-5)$$

i : تعداد پارامترهای اصلی

W_i : وزن غیر فازی پارامتر i ام (بر حسب درصد)

همچنین برای انجام غیر فازی اعداد FC_i و FE_i می‌توان از رابطه ۲۸-۵ استفاده کرد.

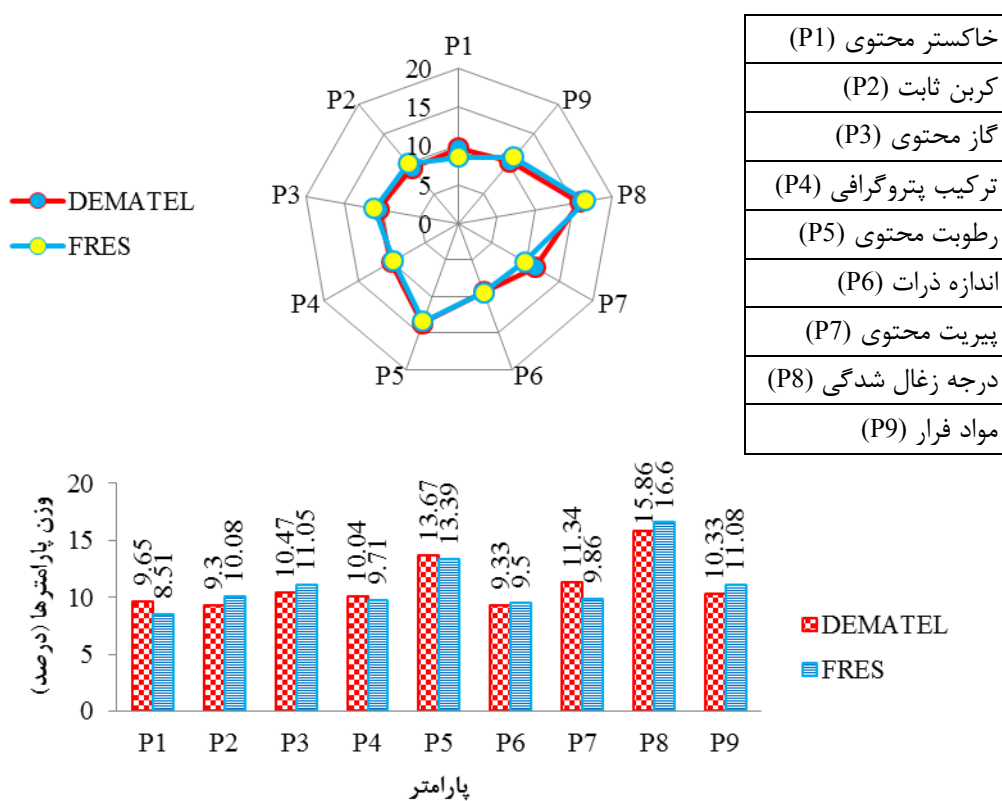
وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از روش FRES در جدول

۲۶-۵ آورده شده است. در شکل ۶۰-۵ نیز تفاوت وزن پارامترها در روش‌های DEMATEL (جدول

۱۴-۵) و FRES (شکل ۲۶-۵) آورده شده است که نتایج تطابق خوبی با هم دارند.

جدول ۵-۲۶: وزن پارامترهای مؤثر در خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از روش FRES.

پارامترهای مؤثر در خودسوزی	وزن پارامترها با استفاده از روش RES
خاکستر محتوی (P1)	8.51
کربن ثابت (P2)	10.08
گاز محتوی (P3)	11.05
ترکیب پتروگرافی (P4)	9.71
رطوبت محتوی (P5)	13.39
اندازه ذرات (P6)	9.5
پیریت محتوی (P7)	9.86
درجه زغال شدگی (P8)	16.6
مواد فرار (P9)	11.08



شکل ۵-۶: تفاوت وزن پارامترها در روش‌های DEMATEL و FRES.

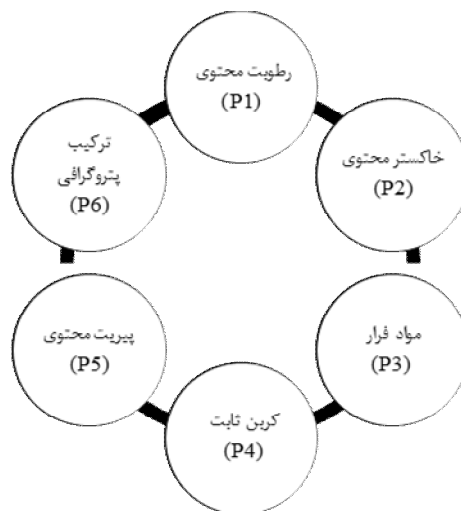
۵-۵-۳- ارائه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

به منظور ارائه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ باید مهم‌ترین پارامترها انتخاب شوند و وزن هر یک از پارامترها تعیین شود. همچنین هر یک از پارامترها بایستی بازه‌بندی

شده و میزان مشخصی از وزن کل پارامتر به هر یک از بازه‌های آن اختصاص داده شود. برای این هدف سیستم طبقه‌بندی جدید با حداکثر دقت و حداکثر سهولت ارائه شده است. برای اجرای این روش گام‌هایی باید اجرا شود که عبارت‌اند از:

گام اول: انتخاب مهم‌ترین پارامترها و تعیین وزن آن‌ها

به منظور ارائه سیستم طبقه‌بندی کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ و متعاقب آن شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ^۱ (CSCSi)، بر اساس اولویت‌های ذکر شده در بخش ۴-۵، بایستی مهم‌ترین پارامترهای ذکر شده در بخش‌های ۱-۵-۵ و ۲-۵-۵ را انتخاب کرد که اولاً قابلیت اندازه‌گیری در آزمایشگاه را داشته باشند و ثانیاً به پارامترهای عملیاتی استخراجی وابسته نباشند و همچنین دارای همپوشانی با سایر پارامترها نباشند؛ لذا بر این اساس پارامتر گاز محتوی به دلیل همپوشانی با پارامتر مواد فرار، پارامتر اندازه ذرات به علت اینکه یک پارامتر عملیاتی استخراجی است و پارامتر درجه زغال شدگی نیز به علت اینکه قابلیت اندازه‌گیری در آزمایشگاه را نداشت، در ارائه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ حذف شده‌اند. پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ در شکل ۵-۶۱ آورده شده است.



شکل ۵-۶۱: پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ.

^۱ - Coal Seam Combustion Spontaneously index

برای محاسبه وزن جدید پارامترهای ذکر شده، وزن پارامترهای گاز محتوی، اندازه ذرات و درجه زغال‌شدگی در شکل ۵-۶۰ را صفر فرض کرده و با نرمالایز کردن وزن پارامترهای باقیمانده و میانگین‌گیری از وزن‌های به دست آمده از روش‌های DEMATEL و FRES وزن جدید پارامترهای انتخاب شده به دست می‌آید. وزن پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ در جدول ۵-۲۷ آورده شده است. همچنین وزن جدید به دست آمده از پارامتر ترکیب پتروگرافی بین ماسرال‌های زیرمجموعه آن یعنی سه گروه اصلی ویتترینیت، لیپتینیت و اینرتینیت به طور مساوی تقسیم شده است که نتایج نهایی در جدول ۵-۲۸ آورده شده است.

جدول ۵-۲۷: وزن جدید پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ.

پارامتر	وزن قدیم در روش DEMATEL (%)	وزن قدیم در روش FRES (%)	وزن جدید نرمالایز شده در روش DEMATEL (%)	وزن جدید نرمالایز شده در روش FRES (%)	وزن جدید میانگین از روش‌های DEMATEL و FRES (%)
رطوبت محتوی (P1)	13.67	13.39	21.25	21.38	21.32
خاکستر محتوی (P2)	9.65	8.51	15.00	13.59	14.30
مواد فرار (P3)	10.33	11.08	16.05	17.69	16.87
کربن ثابت (P4)	9.30	10.08	14.45	16.09	15.27
پیریت محتوی (P5)	11.34	9.86	17.63	15.74	16.69
ترکیب پتروگرافی (P6)	10.04	9.71	15.61	15.50	15.56
جمع کل (%)	64.34	62.63	100	100	100

جدول ۵-۲۸: وزن نهایی پارامترهای انتخاب شده برای توسعه مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ.

پارامتر	وزن نهایی (%)
رطوبت محتوی (P1)	21.32
خاکستر محتوی (P2)	14.30
مواد فرار (P3)	16.87
کربن ثابت (P4)	15.27
پیریت محتوی (P5)	16.69
ویتترینیت (P6)	5.18
لیپتینیت (P7)	5.18
اینرتینیت (P8)	5.18
جمع کل	100

گام دوم: تشکیل فهرست‌های رده‌بندی

با توجه به اینکه تا این مرحله از کار، وزن نهایی اهمیت پارامترها به دست آمده است، لازم است که مقادیر واقعی پارامترها نیز وارد شده و داده‌های ورودی با جزئیات کامل از لایه‌ها به دست آیند. جدول نهایی امتیازدهی و بدنه کلی مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ به شرح جدول ۲۹-۵ قابل ارائه است.

در سیستم طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای تمام پارامترها چهار بازه پیشنهاد شده است و به هر یک از بازه‌ها یک امتیاز بین صفر تا سه تخصیص داده شده است. نکته قابل توجه در آن است که اگر امتیاز پارامتری در بازه مشترک دو رده‌بندی قرار گرفت، امتیاز پارامتر مربوطه از میانگین حسابی دو بازه حاصل می‌شود. برای نحوه امتیازدهی به تک‌تک پارامترها و حدود بازه‌ها از کلیه نمودارهای این فصل استفاده شده است و تخصیص امتیاز هر یک با توجه به نقش هر پارامتر در قابلیت خودسوزی صورت گرفته است.

جدول ۲۹-۵: منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها.

رده‌بندی اختصاص داده شده				پارامتر (واحد)	ردیف
۳	۲	۱	۰		
۱۵-۲۵	۱۰-۱۵	۵-۱۰	< ۵	رطوبت محتوی (%)	۱
	۲۵-۳۰	۳۰-۳۵	> ۳۵		
۱۵-۳۰	۳۰-۴۵	۴۵-۶۰	< ۱۵	خاکستر محتوی (%)	۲
			> ۶۰		
۱۷/۵-۲۲/۵	۱۲/۵-۱۷/۵	۷/۵-۱۲/۵	< ۷/۵	مواد فرار (%)	۳
	۲۲/۵-۲۷/۵	۲۷/۵-۳۲/۵	> ۳۲/۵		
۴۰-۵۰	۳۰-۴۰	۲۰-۳۰	< ۲۰	کربن ثابت (%)	۴
	۵۰-۶۰	۶۰-۷۰	> ۷۰		
> ۳	۲-۳	۱-۲	< ۱	پیریت محتوی (%)	۵
> ۷۰	۵۰-۷۰	۳۰-۵۰	< ۳۰	ویترینیت (%)	۶
> ۱۴	۱۰-۱۴	۶-۱۰	< ۶	لیپتینیت (%)	۷
< ۱۰	۱۰-۳۰	۳۰-۶۰	> ۶۰	اینرتینیت (%)	۸

به ترکیب مقادیر پارامترها و کلاس‌های اختصاص یافته شده برای پارامترها اصطلاحاً

فهرست‌های رده‌بندی گفته می‌شود که در عمل، مقادیر پارامترها از این فهرست‌های رده‌بندی انتخاب

می‌شوند. در این تحقیق، چهار کلاس برای مقادیر هر پارامتر در نظر گرفته شده است که صفر برای «سهم بسیار کم» و سه برای «سهم بسیار زیاد» پارامترها تعیین شده است؛ بنابراین مقادیر بالاتر به کلاس‌هایی از مقدار پارامترها اختصاص می‌یابند که در خصوص پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ سهم بیشتری دارند (جدول ۵-۲۹).

گام سوم: تعریف شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ (CSCSi)
 آسیب‌پذیری^۱ به عنوان حد 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 آسیب‌پذیری به عنوان یک ترکیب خطی از وزن پارامترها a_i و مقدار این پارامترها (P_i) بیان می‌شود. رابطه اندیس آسیب‌پذیری به صورت رابطه ۵-۲۹ بیان می‌شود (Mazzoccola and Hudson, 1996):

$$VI = \sum_{i=1} a_i \frac{P_i}{P_{Max}} \quad (۲۹-۵)$$

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 یگه کردن).

بدین ترتیب می‌توان شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ (CSCSi) را از رابطه ۵-

۳۰ محاسبه کرد.

$$CSCSi_j = \sum_{i=1}^8 a_i \frac{P_{ij}}{P_{Max_i}} \quad (۳۰-۵)$$

i: مربوط به پارامترها (از ۱ تا ۸ پارامتر)

j: مربوط به شماره لایه

a_i : ضریب وزنی پارامتر i ام که از جدول ۵-۲۸ به دست می‌آید.

¹- Vulnerability

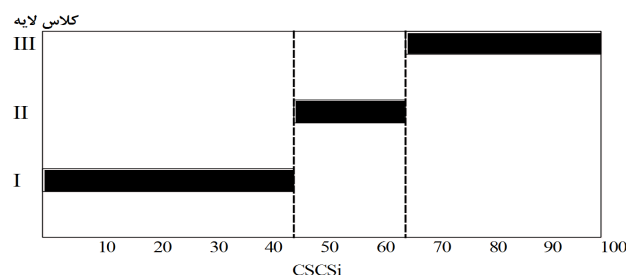
P_{ij} : امتیاز پارامتر i ام در هر کلاس از منوی رده‌بندی (جدول ۵-۲۹) با توجه به شرایط لایه z
 P_{Max_i} : حداکثر امتیاز هر پارامتر در منوی رده‌بندی شده (۳ برای تمام پارامترها) (جدول ۵-۲۹).

مقدار CSCSi بیانگر سطح قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ است، به طوری که مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده قابلیت خودسوزی بالاتر (پتانسیل بالاتر برای خودسوزی) است و برعکس. فرآیند محاسبه CSCSi در این رویکرد مشخص می‌کند که این شاخص در بازه صفر تا ۱۰۰ متغیر است. از بررسی و تحلیل مقادیر مختلف CSCSi نتیجه گرفته می‌شود که روند صعودی بین این شاخص و سطح قابلیت خودسوزی برقرار است. چنین رابطه‌ای را می‌توان توسط تابع خطی بیان کرد. با این استدلال، طبقه‌بندی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس CSCSi، در جدول ۵-۳۰ و شکل ۵-۶۲ نمایش داده شده است و سطح قابلیت خودسوزی لایه زغال‌سنگ را به سه کلاس از ایمن تا نا ایمن طبقه‌بندی می‌کند.

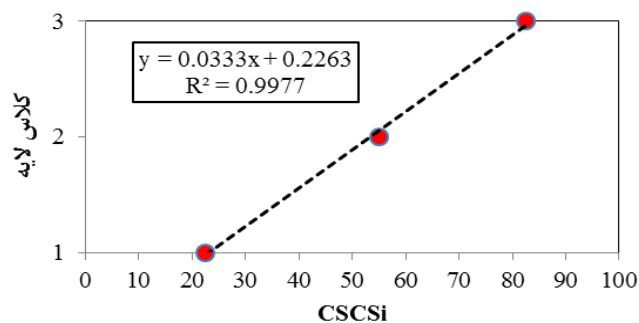
به منظور تأیید طبقه‌بندی صورت گرفته، تابع خطی بر روی مراکز طبقه‌بندی CSCSi برآزش شده است. ضریب تعیین حاصل از این برآزش نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده بین شاخص CSCSi و سطح قابلیت خودسوزی در طبقه‌بندی ارائه شده به خوبی رعایت شده است. این برآزش در شکل ۵-۶۳ نشان داده شده است.

جدول ۵-۳۰: بازه‌بندی شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس CSCSi.

مقدار CSCSi	کلاس لایه	قابلیت خودسوزی	توصیف وضعیت لایه
< ۴۵	I	پایین	ایمن
۴۵-۶۵	II	متوسط	احتیاط
> ۶۵	III	بالا	نا ایمن



شکل ۵-۶۲: بازه‌بندی شاخص قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بر اساس CSCSi.



شکل ۵-۶۳: برازش منحنی خطی بر روی مراکز طبقه‌بندی ارائه شده بر اساس CSCSi.

۵-۴-۵- اعتبارسنجی مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ

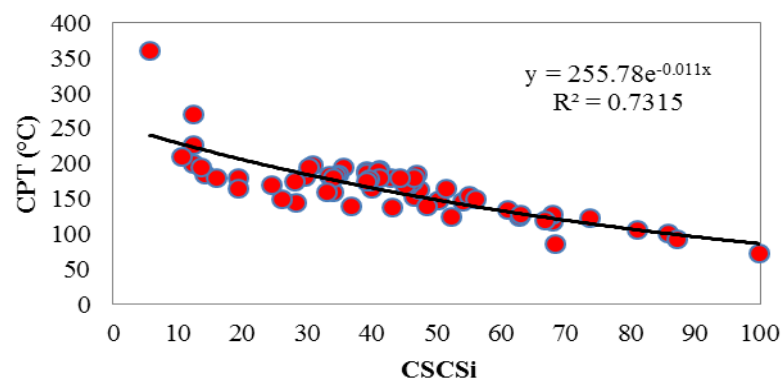
به منظور اعتبارسنجی مدل کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ، از مجموعه پایگاه داده ارائه شده در فصل چهارم استفاده شده است.

با استفاده از جدول‌های ۵-۲۸ تا ۵-۳۰ و رابطه ۵-۳۰، لایه‌های زغال سنگ مورد مطالعه از لحاظ قابلیت خودسوزی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که جزئیات مربوط به محاسبه پتانسیل خودسوزی لایه‌های زغال سنگ مربوطه در جدول ۵-۳۱ آورده شده است. مقادیر اختصاص داده شده به هر پارامتر از هر لایه (از ۰ تا ۳) با توجه به رده‌بندی‌های تعریف شده در جدول ۵-۲۹ آورده شده است. در نهایت شاخص قابلیت خودسوزی ارائه شده برای نمونه‌های مورد نظر با مقادیر اندازه‌گیری شده CPT و R_{70} مقایسه شدند که مقایسه‌ها تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

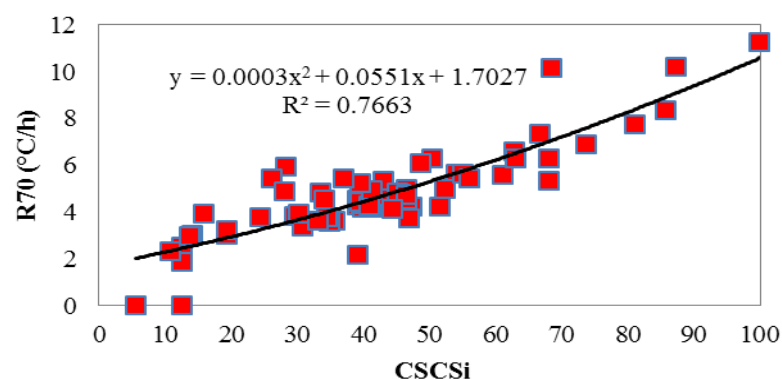
تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده CPT و R_{70} نسبت به CSCSi در شکل‌های ۵-۶۴ و ۵-۶۵ نمایش داده شده است. از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، افزایش CSCSi منجر به کاهش CPT (شکل ۵-۶۴) و افزایش CSCSi منجر به افزایش R_{70} (شکل ۵-۶۵) شده است. همچنین تغییرات بین CSCSi و مقادیر اندازه‌گیری شده CPT و R_{70} به ترتیب به صورت تابع نمائی و تابع درجه دو است. ضریب تعیین حاصل از برازش‌های ارائه شده در شکل‌های ۵-۶۴ و ۵-۶۵، نشان می‌دهد ارتباط تحلیلی عنوان شده به خوبی رعایت شده است.

جدول ۵-۳۱: محاسبه شاخص قابلیت خودسوزی پایگاه داده ارائه شده در فصل چهارم و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده CPT و R₇₀.

R ₇₀ (°C/h)	CPT (°C)	مقدار شاخص CSCSI	امتیازبندی پارامترها								وزن پارامتر
			P ₈	P ₇	P ₆	P ₅	P ₄	P ₃	P ₂	P ₁	
4.27	190	39.18	1	0	1	0	2	2	3	0	۱
8.34	100	85.78	3	3	3	3	3	3	3	1	۲
5	153	46.47	1	1	1	1	2	2	3	0	۳
5.65	146	54.14	1	2	1	1	3	3	2	0	۴
6.29	148	50.34	3	2	3	1	2	2	2	0	۵
7.74	105	81.01	3	3	3	3	3	3	2	1	۶
5.32	118	68.02	3	3	3	2	2	3	3	0	۷
4.2	165	39.98	1	0	1	1	2	2	2	0	۸
6.29	128	68.02	3	3	3	2	2	3	3	0	۹
6.59	125	62.72	3	3	3	2	3	2	2	0	۱۰
3.85	181	29.65	1	0	1	0	2	2	1	0	۱۱
4.34	174	39.65	1	0	1	1	1	2	3	0	۱۲
5	125	52.33	3	3	3	2	3	1	1	0	۱۳
0	360	5.62	0	0	0	0	0	1	0	0	۱۴
3.64	160	34.03	1	0	1	1	1	1	3	0	۱۵
3.39	198	30.84	1	0	2	0	3	1	1	0	۱۶
3.61	195	35.61	1	0	2	0	3	1	2	0	۱۷
6.9	122	73.66	3	2	3	3	3	2	2	1	۱۸
3.59	185	34.83	2	0	3	0	2	2	1	0	۱۹
4.52	186	39.18	1	0	1	0	2	2	3	0	۲۰
3.78	182	34.41	1	0	1	0	2	2	2	0	۲۱
4.17	191	41.23	1	0	2	0	3	2	2	0	۲۲
5.61	135	61.05	3	2	3	1	3	3	2	0	۲۳
5.95	145	28.27	1	2	1	1	2	1	0	0	۲۴
4.22	165	51.56	1	1	1	1	3	2	3	0	۲۵
4.41	175	39.50	1	0	1	0	3	2	2	0	۲۶
4.68	180	43.05	2	2	3	0	2	2	2	0	۲۷
4.25	162	47.33	1	1	1	1	2	3	2	0	۲۸
4.79	168	45.60	1	0	1	1	2	3	2	0	۲۹
3.02	184	14.17	1	0	1	0	1	1	0	0	۳۰
6.29	128	62.92	2	0	3	2	3	2	2	1	۳۱
5.33	138	43.06	3	3	3	1	1	3	0	0	۳۲
4.27	190	40.91	1	0	2	0	2	2	3	0	۳۳
5.63	155	55.01	2	0	3	1	3	2	3	0	۳۴
3.75	185	46.94	2	1	3	0	2	3	2	0	۳۵
5.45	150	26.16	2	1	3	0	2	1	0	0	۳۶
4.52	175	46.41	2	1	3	0	3	2	2	0	۳۷
3.92	180	15.89	1	0	2	0	1	1	0	0	۳۸
0	270	12.44	0	0	1	0	1	1	0	0	۳۹
4.92	180	41.23	1	1	1	0	3	2	2	0	۴۰
5.25	178	39.50	1	0	1	0	3	2	2	0	۴۱
2.5	200	12.44	0	0	1	0	1	1	0	0	۴۲
4.85	170	45.22	2	1	2	0	2	3	2	0	۴۳
5.41	140	36.91	3	3	3	1	2	1	0	0	۴۴
4.72	180	46.53	1	0	2	0	2	3	3	0	۴۵
10.2	93	87.26	3	3	3	3	3	2	3	2	۴۶
7.34	119	66.68	3	2	3	3	1	3	0	2	۴۷
4.85	183	33.47	1	0	1	0	2	1	0	2	۴۸
3.95	195	30.20	0	0	1	1	2	1	0	1	۴۹
1.85	226	12.44	0	0	1	0	1	1	0	0	۵۰
11.25	73	99.99	3	3	3	3	3	3	3	3	۵۱
3.03	180	19.26	1	0	1	0	2	1	0	0	۵۲
4.52	180	34.05	2	2	3	0	1	3	0	0	۵۳
3.8	170	24.44	2	1	2	0	2	1	0	0	۵۴
5.45	150	55.96	3	2	3	1	2	3	2	0	۵۵
4.12	180	44.27	1	0	1	0	3	2	3	0	۵۶
2.15	175	39.18	1	0	1	0	2	2	3	0	۵۷
3.64	160	33.02	1	0	1	0	3	0	3	0	۵۸
2.3	210	10.71	0	0	0	0	1	1	0	0	۵۹
6.1	140	48.57	3	3	3	3	1	2	0	0	۶۰
2.98	195	13.63	1	0	1	0	2	0	0	0	۶۱
3.22	165	19.26	1	0	1	0	2	1	0	0	۶۲
10.15	85	68.40	3	3	3	3	1	3	0	2	۶۳
4.9	175	28.09	1	0	2	0	2	1	0	1	۶۴



شکل ۵-۶: تغییرات CPT نسبت به CSCSi.



شکل ۵-۶: تغییرات R70 نسبت به CSCSi.

۵-۶- توسعه مدل کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ

هدف از تعیین عوامل مؤثر بر خودسوزی لایه‌های زغال سنگ، رسیدن به مدلی است که قادر به پیش‌بینی خودسوزی لایه‌های زغال سنگ با توجه به خصوصیات ذاتی آن‌ها باشد. یکی از روش‌های مطالعه روابط بین متغیرها و تعیین نحوه وابستگی یک متغیر به متغیرهای دیگر، تحلیل برازش است. الگوی روابط بین متغیرها ممکن است به صورت خطی یا غیرخطی باشد. برای حصول اطمینان از نتایج به دست آمده از مدل‌های برازشی لازم است متغیرهای مستقل مدل ناهمبسته باشند. چرا که مشکل اصلی در برازش، وجود هم‌خطی در یک معادله برازشی است که نشان‌دهنده همبستگی^۱ بالا بین متغیرهای مستقل است؛ لذا در این بخش از رساله برای انتخاب مهم‌ترین و تأثیرگذارترین

^۱ - Correlation

پارامترها از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) استفاده شده است و پس از آن با استفاده از مدل‌های برازشی به ارائه مدل کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ پرداخته شده است. همچنین معیارهای ارزیابی یک رابطه برازشی، بیان شده است.

۵-۶-۱- اصول روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی^۲

روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی از روش‌های آماری چند متغیره و مبتنی بر مقادیر ویژه است که در آن با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه^۳، جهت‌هایی با حداکثر تغییرپذیری شناسایی می‌شود. سپس با تعریف مؤلفه‌های جدیدی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند، ابعاد متغیرهای اولیه کاهش یافته و نقش هر یک از این متغیرها در تغییرپذیری مشخص می‌شود. در این روش، متغیرها در عامل‌هایی قرار می‌گیرند، به طوری که از عامل اول به عامل‌های بعدی درصد واریانس کاهش می‌یابد، از این رو متغیرهایی که در عامل‌های اولی قرار می‌گیرند، تأثیرگذارترین هستند.

این روش بر این اساس استوار است که یک یا چند متغیر از کل متغیرهایی که همبستگی قوی دارند، لحاظ می‌شود، به عبارت دیگر، در تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی تعداد اندکی از مؤلفه‌های اصلی^۴ (PC) بیانگر بخش مهم و زیادی از کل اطلاعات می‌باشند. در این روش متغیرهای موجود در یک فضای چند حالته همبسته به یک مجموعه از مؤلفه‌های غیرهمبسته خلاصه می‌شوند که هر یک از آن‌ها ترکیب خطی از متغیرهای اصلی می‌باشند. مؤلفه‌های غیرهمبسته به دست آمده، مؤلفه‌های اصلی (PC) نامیده می‌شوند که از بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس یا ماتریس همبستگی متغیرهای اصلی به دست می‌آیند. به طور کلی کاربرد عمده روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی عبارت است از، کاهش تعداد متغیرها و یافتن ساختار ارتباطی بین متغیرها که در حقیقت همان دسته‌بندی متغیرها است. از محاسن روش PCA، آن است که این روش محدود به جمعیت‌های با پراکنش نرمال نیست.

^۱ - Principal Component Analysis

^۲ - مطالب بخش آنالیز مؤلفه‌های اصلی برگرفته از افشانی و همکاران (۱۳۹۱) و مؤمنی و فعال قیومی (۱۳۹۱) است.

^۳ - Eigenvectors

^۴ - Principal Component

در حالت تئوری، اگر یک مجموعه p متغیری X_1, X_2, \dots, X_p داشته باشیم، PCA متغیرهای اصلی را با استفاده از ماتریس همبستگی متغیرها، به PC_1, PC_2, \dots, PC_p که فاقد همبستگی با یکدیگر هستند، تبدیل می‌کند. این متغیرهای فاقد همبستگی، مؤلفه‌های اصلی مجموعه داده‌ها هستند که به صورت رابطه ۵-۳۱ معرفی می‌شوند (Suzuki et al, 1994).

$$\begin{aligned} PC_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \\ PC_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p \\ PC_p &= a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p \end{aligned} \quad (31-5)$$

در این معادلات a_{ij} ها، مقدار کواریانس بین دو متغیر هستند؛ بنابراین با تعریف p مؤلفه مستقل جدید، می‌توان کل واریانس موجود در داده‌ها را توجیه کرد، به طوری که رابطه ۵-۳۲ همواره برای مؤلفه‌های ایجاد شده برقرار است. البته هنگام تجزیه متغیرها به مؤلفه‌های جدید، همواره امید بر آن است که واریانس تعدادی از مؤلفه‌ها آن قدر کم باشد که صرف نظر کردن از آن مشکلی ایجاد نکند. در این حالت، تغییرات در مجموعه داده‌ها با تعداد کمتری از متغیرهای PC و البته با برخورداری از واریانس‌های قابل توجیه، توضیح داده می‌شود.

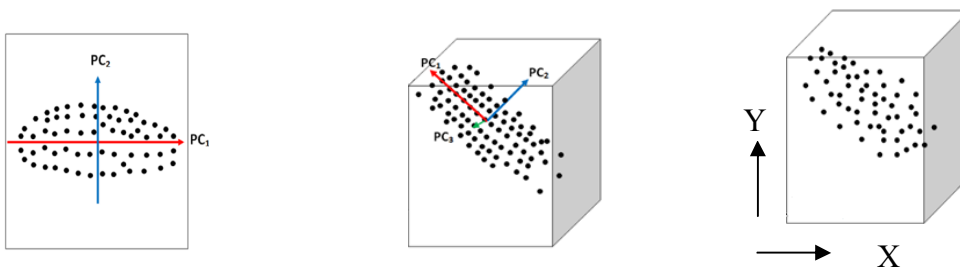
$$\text{Var}(PC_1) \geq \text{Var}(PC_2) \geq \dots \geq \text{Var}(PC_p) \quad (32-5)$$

در شکل ۵-۶۶ الف مجموعه‌ای از داده‌ها که در فضای مختصات پراکنده شده‌اند، نشان داده شده است. این پراکندگی در جهت دو محور X و Y قرار ندارد؛ بنابراین جهتی که واریانس بیشتری از داده‌ها را در بر می‌گیرد، به عنوان جهت اصلی در نظر گرفته می‌شود. جهات اصلی که داده‌ها در آن تغییر می‌کنند با محور PC_1 به عنوان مؤلفه اصلی اول و محور PC_2 به عنوان مؤلفه اصلی دوم و عمود بر محور اول، نشان داده شده است (شکل ۵-۶۶ ب). پس از آن با انتقال محورها به راستای PC_1 و PC_2 ، ضمن آن که محورها در راستای بیشترین واریانس داده‌ها قرار می‌گیرند، داده‌ها مجدداً همبستگی پیدا می‌کنند (شکل ۵-۶۶ ج). با توجه به این که دوران^۱ به نحوی صورت می‌گیرد که

¹ - Rotation

محورها با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند، کواریانس بین مؤلفه‌ها صفر خواهد بود (Engelbrecht, 2007).

در این مختصات جدید، واریانس در جهت محور PC_1 بزرگ‌تر از محور PC_2 است. با توجه به اینکه PCA متغیرهای جدید را به صورت ترکیبی از متغیرهای اصلی محاسبه می‌کند، هر چقدر همبستگی متغیرهای اولیه بیشتر باشد، واریانس مؤلفه اصلی اول بیشتر است؛ بنابراین مؤلفه‌های اصلی با تشکیل ماتریس کواریانس داده‌های اولیه و تعیین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن ماتریس، تعیین می‌شوند.



الف) پراکندگی داده‌ها نسبت به محورهای مختصات. ب) جهت مؤلفه‌های اصلی. ج) جهت مؤلفه‌های اصلی پس از چرخش.

شکل ۵-۶: پراکندگی داده‌ها و تعیین جهات مؤلفه‌های اصلی (Engelbrecht, 2007).

اگر Σ ماتریس کواریانس، I ماتریس یکه، λ مقدار ویژه و A بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه باشند، مؤلفه‌های اصلی با تعیین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه با استفاده از روابط ۵-۳۴ و ۵-۳۵ برای ماتریس Σ ارائه شده در رابطه ۵-۳۳ به دست می‌آیند (فرشادفر، ۱۳۸۴).

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{cov}(x_1, x_1) & \text{cov}(x_1, x_2) & \dots & \text{cov}(x_1, x_p) \\ \text{cov}(x_2, x_1) & \text{cov}(x_2, x_2) & \dots & \text{cov}(x_2, x_p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(x_p, x_1) & \text{cov}(x_p, x_2) & \dots & \text{cov}(x_p, x_p) \end{bmatrix} \quad (۳۳-۵)$$

$$|\Sigma - \lambda I| = 0 \quad (۳۴-۵)$$

$$\Sigma A = \lambda A \quad (۳۵-۵)$$

انتخاب چند مؤلفه اصلی اول که بیشترین مقدار واریانس را دارند و به عنوان مؤلفه‌های اصلی شناخته می‌شوند، از اساسی‌ترین اقدامات در تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی است؛ چرا که با انتخاب چند مؤلفه اصلی اول، سایر مؤلفه‌ها از محاسبات حذف می‌شوند. به منظور تعیین تعداد مؤلفه‌های

اصلی مورد نیاز که بیشترین تغییرات داده‌ها را در بر داشته‌اند، می‌توان از نموداری تحت عنوان اسکری پلات^۱ که در آن مقادیر ویژه در مقابل شماره مؤلفه‌ها رسم می‌شوند، استفاده کرد. در این نمودار مرز بین مؤلفه‌های اصلی و غیر اصلی، محلی است که شیب نمودار کم شده و نمودار میل به خطی شدن پیدا می‌کند و این نقطه محلی است که مقادیر ویژه در مقابل تغییر شماره مؤلفه تغییر چندانی نمی‌کند.

غیر از نمودار اسکری پلات می‌توان از نمودار سه‌بعدی، برای نشان دادن توزیع فضایی متغیرهای تعیین شده در هر مؤلفه اصلی نیز استفاده کرد. این نمودار در حقیقت اهمیت هر متغیر را در هر مؤلفه اصلی نشان می‌دهد.

۵-۶-۲- پیاده‌سازی روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی در تعیین مهم‌ترین پارامترهای ذاتی مؤثر در ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ

برای تحلیل عاملی پارامترهای ذاتی مؤثر در ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ، نتایج ۶۴ داده با هشت پارامتر ذاتی از لایه‌های زغال‌سنگ شامل رطوبت محتوی (Mo)، خاکستر محتوی (A)، مواد فرار (VM)، کربن ثابت (FC)، پیریت محتوی (P)، ویتروینیت (V)، لیپتینیت (L) و اینترتینیت (I) به عنوان پارامترهای ورودی به نرم‌افزار SPSS وارد شد که در ادامه خروجی‌های مختلف نرم‌افزار آورده شده است.

در جدول ۵-۳۲، آماره‌های توصیفی از قبیل میانگین، انحراف معیار و تعداد مشاهده‌های مورد استفاده برای تک‌تک پارامترها محاسبه شده است.

جدول ۵-۳۲: آماره‌های توصیفی برای تک‌تک پارامترها.

پارامترها	میانگین	انحراف معیار	تعداد مشاهده
Mo	4.95888	7.777231	64
A	25.20006	15.982935	64
VM	21.64353	6.702052	64
FC	48.19750	11.292538	64
P	1.28266	1.475354	64
V	58.84875	17.854173	64
L	7.20969	4.943061	64
I	32.65891	22.655257	64

¹ - Scree-plot

در جدول ۵-۳۳، ماتریس ضرایب همبستگی متغیرهای انتخابی به صورت یک ماتریس مثلثی شکل محاسبه شده است که عناصر قطر اصلی آن یک است. هر چه عناصر خارج از قطر اصلی این ماتریس به یک نزدیک تر باشد، مطلوبیت روش تحلیل عاملی بیشتر خواهد بود. دترمینان ماتریس ضرایب همبستگی نیز محاسبه شده است. هر قدر مقدار به دست آمده کمتر باشد، انجام تحلیل عاملی معتبرتر خواهد بود. مشاهده می شود دترمینان ماتریس ضرایب همبستگی برابر صفر است بنابراین انجام تحلیل عاملی معتبر است.

جدول ۵-۳۳: ماتریس ضرایب همبستگی متغیرهای انتخابی.

		Correlation Matrix ^a							
		Mo	A	VM	FC	P	V	L	I
Correlation	Mo	1.000	-.397	.287	-.297	.220	-.076	.023	.040
	A	-.397	1.000	-.768	-.686	-.078	.119	-.028	-.083
	VM	.287	-.768	1.000	.296	-.208	-.264	-.114	.246
	FC	-.297	-.686	.296	1.000	.082	.040	.091	-.056
	P	.220	-.078	-.208	.082	1.000	.594	.772	-.702
	V	-.076	.119	-.264	.040	.594	1.000	.710	-.982
	L	.023	-.028	-.114	.091	.772	.710	1.000	-.828
	I	.040	-.083	.246	-.056	-.702	-.982	-.828	1.000

a. Determinant = .000

در جدول ۵-۳۴، به ترتیب اشتراک^۱ اولیه^۲ و اشتراک استخراجی^۳ پارامترها آورده شده است. اشتراک یک متغیر برابر مربع همبستگی چندگانه (R^2) برای متغیرهای مربوطه با استفاده از عاملها (به عنوان پیش بینی کننده) است. چون ستون اشتراک اولیه، اشتراکها را قبل از اشتراک عامل (عاملها) بیان می کند، تمامی اشتراکهای اولیه برابر یک است. هرچه مقادیر اشتراک استخراجی بزرگ تر باشد، عاملهای استخراج شده، متغیرها را بهتر نمایش می دهند. اگر هر یک از مقادیر اشتراک استخراجی بسیار کوچک باشند، ممکن است استخراج عامل دیگری الزامی شود. چنانچه مشاهده می شود خاکستر محتوی (A)، اینرتینیت (I) و رطوبت محتوی (Mo) به ترتیب با مقادیر اشتراک استخراجی ۰/۹۸۵، ۰/۹۴۲ و ۰/۹۳۱ به ترتیب اصلی ترین مؤلفهها در فرآیند خودسوزی زغال سنگ محسوب می شوند.

¹ - Communnality

² - Initial

³ - Extraction

جدول ۵-۳۴: محاسبه اشتراک اولیه و اشتراک استخراجی پارامترها.

پارامترها	اشتراک اولیه	اشتراک استخراجی
Mo	1.000	.931
A	1.000	.985
VM	1.000	.751
FC	1.000	.917
P	1.000	.761
V	1.000	.841
L	1.000	.828
I	1.000	.942

Extraction Method: Principal Component Analysis.

جدول ۵-۳۵ که مجموع واریانس توضیح داده شده است حاوی سه بخش است که عبارت است از: بخش اول (با برچسب Initial Eigenvalues) مربوط به مقادیر ویژه بوده و تعیین کننده عامل‌هایی است که در تحلیل باقی می ماند (عامل‌هایی که دارای مقدار ویژه کمتر از یک هستند از تحلیل خارج می شوند). عوامل خارج شده از تحلیل، عواملی هستند که حضور آن‌ها باعث تبیین بیشتر واریانس نمی شود. بخش دوم (با برچسب Extraction Sums of Squared Loadings) مربوط به مقدار ویژه عوامل استخراجی بدون چرخش است. بخش سوم (با برچسب Rotation Sums of Squared Loadings) نشان دهنده مقدار ویژه عوامل استخراجی با چرخش است. در تمام موارد مشاهده می شود خاکستر محتوی (A)، اینرتینیت (I) و رطوبت محتوی (Mo) به ترتیب اصلی ترین مؤلفه‌ها در فرآیند خودسوزی زغال سنگ محسوب می شوند. در این تحقیق عامل‌های ۱، ۲ و ۳ که در بالا نیز بیان شد، دارای مقدار ویژه بزرگ‌تر از یک هستند و در تحلیل باقی می مانند. این سه عامل می توانند تقریباً ۸۷ درصد از تغییرپذیری (واریانس) متغیرها را توضیح دهند.

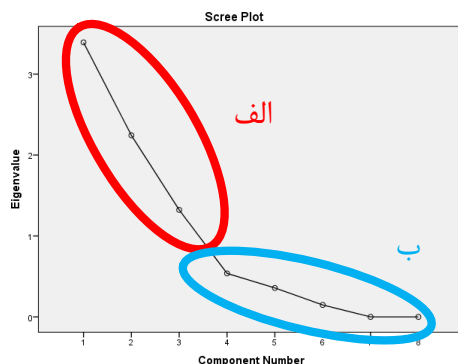
جدول ۵-۳۵: مجموع واریانس توضیح داده شده.

Component	Total Variance Explained								
	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative%	Total	% of Variance	Cumulative%	Total	% of Variance	Cumulative%
1	3.392	42.399	42.399	3.392	42.399	42.399	3.352	41.903	41.903
2	2.243	28.043	70.442	2.243	28.043	70.442	2.255	28.183	70.086
3	1.322	16.521	86.963	1.322	16.521	86.963	1.350	16.877	86.963
4	.538	6.719	93.682						
5	.358	4.471	98.153						
6	.148	1.847	100.000						
7	3.271E-010	4.088E-009	100.000						
8	-1.698E-016	-2.123E-015	100.000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

یک راه دیگر برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز که بیشترین تغییرات داده‌ها را در بر داشته باشند، استفاده از نمودار Scree است که مقدار ویژه هر مؤلفه را نشان می‌دهد. نمودار Scree شکل ۵-۶۷، نتایج جدول ۵-۳۵ مبنی بر تعداد مناسب عامل را به صورت تصویری نشان می‌دهد و برای تعیین تعداد بهینه مؤلفه‌ها به کار می‌رود. مقدار ویژه هر مؤلفه در حل اولیه به صورت نمودار در آمده است. در حالت کلی، می‌خواهیم مؤلفه‌ها را در شیب تند استخراج نماییم (بخش الف نمودار شکل ۵-۶۷). مؤلفه‌های روی شیب کم، کمتر در تحلیل کمک می‌کنند (بخش ب نمودار شکل ۵-۶۷). این نمودار برای ۸ مؤلفه ایجاد شده در شکل ۵-۶۷ نشان داده شده است. هر نقطه در این نمودار شماره مؤلفه و مقدار ویژه مربوط به آن مؤلفه را نشان می‌دهد. نمودار Scree ایجاد شده نشان می‌دهد که از مؤلفه چهارم به بعد با مقادیر ویژه کوچک‌تر از یک، نمودار میل به خطی شدن پیدا می‌کند؛ بنابراین سه مؤلفه اول به عنوان مؤلفه‌های اصلی انتخاب می‌شوند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی به تعداد متغیرهای مورد بررسی مؤلفه ایجاد می‌کند و مؤلفه‌هایی با مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک را به عنوان مؤلفه‌های اصلی در نظر می‌گیرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که PCA تعداد مؤلفه‌های سیستم را با استفاده از تعیین ماتریس مقادیر ویژه و روابط ارائه شده، از هشت مؤلفه به سه مؤلفه کاهش داد. از این تحلیل چنین می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای خاکستر محتوی (A)، اینرتینیت (I) و رطوبت محتوی (M0) به ترتیب اصلی‌ترین مؤلفه‌ها در فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ محسوب می‌شوند.



شکل ۵-۶۷: نمودار Scree پارامترها برای تعیین تعداد بهینه مؤلفه‌ها.

جدول ۵-۳۶ ماتریس اجزا را نشان می‌دهد که شامل بارهای عاملی (نمرات عاملی) هر یک از متغیرها در عامل‌های باقی‌مانده است. چنانچه مشاهده می‌شود متغیرهای ویترونیست (V)، لیپتینیست (L)، پیریت محتوی (P) و خاکستر محتوی (A) به ترتیب با مؤلفه اول یعنی خاکستر محتوی (A) دارای بیشترین بار عاملی هستند. مواد فرار (VM) و کربن ثابت (FC) نیز با مؤلفه دوم یعنی اینترتینیست (I) دارای بیشترین بار عاملی هستند. همچنین رطوبت محتوی (Mo) و اینترتینیست (I) نیز با مؤلفه سوم یعنی رطوبت محتوی (Mo) دارای بیشترین بار عاملی هستند.

جدول ۵-۳۶: ماتریس اجزا.

Component Matrix ^a			
Parameters	Component		
	1	2	3
I	-.967	-.074	.042
V	.914	.019	-.078
L	.887	.203	.030
P	.821	.219	.199
A	.162	-.979	.003
VM	-.368	.776	.112
Mo	-.033	.370	.890
FC	.012	.670	-.684

Extraction Method: Principal Component Analysis.
a. 3 components extracted.

تفسیر بارهای عاملی بدون چرخش ساده نیست؛ بنابراین عامل‌ها را می‌چرخانیم تا تفسیرپذیری آن‌ها افزایش یابد. در جدول ۵-۳۷ که همبستگی‌های باز تولید شده ناشی از چرخش است عناصر پایین قطر اصلی آن ضرایب همبستگی تبدیل یافته بین متغیرها، عناصر قطر اصلی میزان اشتراکات عامل‌ها و عناصر بالای قطر اصلی باقیمانده‌های روش تحلیل عاملی هستند. در مجموع روش تحلیل عاملی زمانی مفید است که مانده‌ها در این ماتریس کوچک و نزدیک به صفر باشند.

جدول ۵-۳۷: ماتریس اجزا همبستگی‌های باز تولید شده ناشی از چرخش.

		Reproduced Correlations							
		Mo	A	VM	FC	P	V	L	I
Reproduced Correlation	Mo	.931 ^a	-.365	.399	-.361	.231	-.093	.072	.042
	A	-.365	.985 ^a	-.820	-.657	-.081	.129	-.055	-.084
	VM	.399	-.820	.751 ^a	.439	-.110	-.330	-.165	.303
	FC	-.361	-.657	.439	.917 ^a	.020	.077	.126	-.090
	P	.231	-.081	-.110	.020	.761 ^a	.738	.778	-.801
	V	-.093	.129	-.330	.077	.738	.841 ^a	.812	-.888
	L	.072	-.055	-.165	.126	.778	.812	.828 ^a	-.871
	I	.042	-.084	.303	-.090	-.801	-.888	-.871	.942 ^a
Residual ^b	Mo		-.032	-.113	.064	-.011	.017	-.049	-.002
	A	-.032		.051	-.029	.002	-.010	.027	.002
	VM	-.113	.051		-.143	-.098	.066	.052	-.057
	FC	.064	-.029	-.143		.062	-.037	-.035	.033
	P	-.011	.002	-.098	.062		-.145	-.006	.100
	V	.017	-.010	.066	-.037	-.145		-.101	-.094
	L	-.049	.027	.052	-.035	-.006	-.101		.043
	I	-.002	.002	-.057	.033	.100	-.094	.043	

Extraction Method: Principal Component Analysis.

a. Reproduced communalities

b. Residuals are computed between observed and reproduced correlations. There are 13 (46.0%) nonredundant residuals with absolute values greater than 0.05.

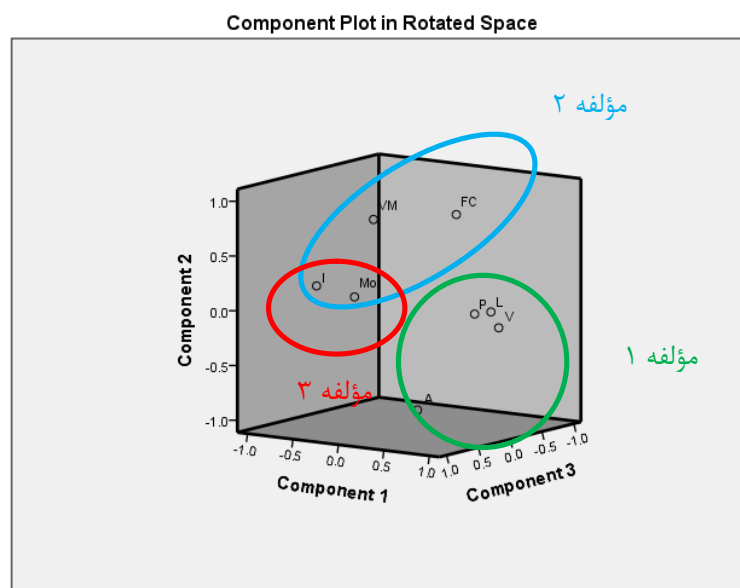
جدول ۵-۳۸، ماتریس چرخیده شده اجزا را نشان می‌دهد که شامل بارهای عاملی هر یک از متغیرها در عامل‌های باقی‌مانده پس از چرخش است. هر چقدر مقدار این ضرایب بیشتر باشد، عامل مربوطه نقش بیشتری در کل تغییرات (واریانس) متغیر مورد نظر دارد. چنانچه از جدول ۵-۳۸ مشاهده می‌شود متغیرهای لیپتینیت (L)، ویتروینیت (V)، پیریت محتوی (P) و خاکستر محتوی (A) به ترتیب با مؤلفه اول یعنی خاکستر محتوی (A) دارای بیشترین بار عاملی هستند. اینرتینیت (I)، مواد فرار (VM) و کربن ثابت (FC) نیز با مؤلفه دوم یعنی اینرتینیت (I) دارای بیشترین بار عاملی هستند. همچنین رطوبت محتوی (Mo) نیز با مؤلفه سوم یعنی رطوبت محتوی (Mo) دارای بیشترین بار عاملی است. تنها تفاوت بین ماتریس اجزا (جدول ۵-۳۶) و ماتریس چرخیده شده اجزا (جدول ۵-۳۸) در این است که اینرتینیت (I) در ماتریس اجزا با رطوبت محتوی (Mo) به عنوان مؤلفه سوم و در ماتریس چرخیده شده اجزا با اینرتینیت (I) به عنوان مؤلفه دوم دارای بیشترین بار عاملی است که این موضوع در شکل ۵-۶۸ نیز قابل مشاهده است که اینرتینیت (I) در مؤلفه دوم و سوم مشترک است. در جدول ۵-۳۹ که ماتریس تبدیل اجزا است مشاهده می‌شود مؤلفه اول با دو مؤلفه دیگر دارای رابطه معکوس است. مؤلفه دوم با دو مؤلفه دیگر دارای رابطه مستقیم است و مؤلفه سوم با مؤلفه اول دارای رابطه مستقیم و با مؤلفه دوم دارای رابطه معکوس است. در جدول ۵-۴۰ که ماتریس کوواریانس مؤلفه‌های اصلی است، مشاهده می‌شود کوواریانس بین مؤلفه‌ها صفر است و نشان از مستقل بودن مؤلفه‌ها دارد.

جدول ۵-۳۸: ماتریس چرخیده شده اجزا.

Rotated Component Matrix ^a			
Parameters	Component		
	1	2	3
I	-.963	.093	.080
L	.909	.035	.015
V	.900	-.130	-.122
P	.851	.035	.188
A	-.020	-.980	-.159
VM	-.217	.800	.252
FC	.119	.761	-.570
Mo	.056	.219	.938

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 4 iterations.



شکل ۵-۶۸: طرح اجزا در فضای چرخشی.

جدول ۵-۳۹: ماتریس تبدیل اجزا.

Component Transformation Matrix			
Component	1	2	3
1	.983	-.177	-.053
2	.183	.970	.157
3	.023	-.164	.986

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

جدول ۵-۴۰: ماتریس کوواریانس مؤلفه‌های اصلی.

Component Score Covariance Matrix			
Component	1	2	3
1	1.000	.000	.000
2	.000	1.000	.000
3	.000	.000	1.000

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.
Component Scores.

۵-۶-۳- ارائه مدل کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ

به منظور انجام برآزش‌های تک متغیره، اطلاعات مربوط به ۵۱ نمونه تصادفی از پایگاه داده فصل چهارم به عنوان داده‌های آموزش برای مدل‌سازی و ۱۳ نمونه تصادفی دیگر نیز به عنوان داده‌های آزمون استفاده شدند که نتایج برآزش‌های تک متغیره بر اساس داده‌های آموزش در شکل‌های ۵-۳، ۵-۴، ۵-۱۰، ۵-۱۱، ۵-۲۳، ۵-۲۴، ۵-۲۶ تا ۵-۳۱، ۵-۳۹، ۵-۴۰، ۵-۴۳ و ۵-۴۴ بر اساس دو روش CPT و R_{70} آورده شده است که از تکرار نمودارها و روابط ارائه شده در این بخش اجتناب شده است.

با توجه به اینکه هدف از این بخش از رساله ارائه یک مدل کمی بر پایه یک رابطه برازشی چند متغیره با تعداد بهینه متغیر مستقل است؛ لذا برای پیش‌بینی خودسوزی زغال‌سنگ بر اساس دو روش CPT و R70 با استفاده از مدل برازش خطی چندگانه از روش ورود توأم که در آن کلیه متغیرهای مستقل به صورت همزمان وارد تحلیل می‌شوند، استفاده شده است که نتایج روابط حاصل از انجام برازش خطی چند متغیره و ضریب تعیین مربوط به هر رابطه بر اساس پارامترهای وابسته CPT و R70 به ترتیب در جدول‌های ۵-۴۱ و ۵-۴۲ آورده شده است. برای رسیدن به این رابطه، مقادیر CPT و R70 هر بار به طور جداگانه به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای تعیین شده از هر مؤلفه اصلی که در بخش قبل به دست آمدند به عنوان متغیرهای مستقل در سه مدل مختلف وارد شدند. در یک مرحله دیگر تنها مقادیر سه مؤلفه اول به عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل شدند. همچنین در یک مرحله دیگر کلیه هشت پارامتر ذاتی مشخصات زغال‌سنگ به عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل شدند. نتایج نشان می‌دهد همان‌طور که انتظار می‌رفت رابطه‌های دارای هشت پارامتر (رابطه‌های ۵-۴۱ و ۵-۴۷) و روابط دارای پارامترهای قرار گرفته در دسته مؤلفه اول (رابطه‌های ۵-۳۶ و ۵-۴۲) دارای بیشترین مقدار ضریب تعیین هستند که هدف از این بخش را پوشش می‌دهند. نکته قابل توجه در این است که رابطه‌های ۵-۳۶ و ۵-۴۲ با بهینه‌ترین تعداد پارامتر ممکن بر اساس روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی دارای بهینه‌ترین مقدار ضریب تعیین هستند.

جدول ۵-۴۱: روابط حاصل از انجام برازش خطی چند متغیره بر اساس پارامتر وابسته CPT.

شماره رابطه	R ²	رابطه	توضیحات ۱	توضیحات ۲
(۳۶-۵)	0.747	$CPT = 225.34 + 0.55A - 11.35P - 0.77V - 1.85L$	پارامترهای مؤلفه اول از PCA	
(۳۷-۵)	0.632	$CPT = 163.02 - 0.565VM - 0.659FC + 1.439I$	پارامترهای مؤلفه دوم از PCA	عدم وجود ضرایب منطقی
(۳۸-۵)	0.603	$CPT = 123.14 - 0.75Mo + 1.426I$	پارامترهای مؤلفه سوم از PCA قبل از چرخش	
(۳۹-۵)	0.012	$CPT = 168.89 - 0.583Mo$	پارامترهای مؤلفه سوم از PCA بعد از چرخش	ضریب تعیین بسیار پایین
(۴۰-۵)	0.659	$CPT = 102.3 - 0.202Mo + 0.677A + 1.458I$	سه مؤلفه اول از PCA	
(۴۱-۵)	0.750	$CPT = 311852.91 - 3118.02Mo - 3117.64A - 3118.08VM - 3118.32FC - 9.88P + 1.21V + 1.92I$	کلیه پارامترها	تعداد پارامتر زیاد

جدول ۵-۴: روابط حاصل از انجام برازش خطی چند متغیره بر اساس پارامتر وابسته R_{70} .

شماره رابطه	R^2	رابطه	توضیحات ۱	توضیحات ۲
(۴۲-۵)	0.799	$R_{70} = 2.06 - 0.009A + 0.91P + 0.028V + 0.02L$	پارامترهای مؤلفه اول از PCA	
(۴۳-۵)	0.570	$R_{70} = 6.596 + 0.002VM + 0.006FC - 0.066I$	پارامترهای مؤلفه دوم از PCA	عدم وجود ضرایب منطقی
(۴۴-۵)	0.638	$R_{70} = 6.641 + 0.068Mo - 0.067I$	پارامترهای مؤلفه سوم از PCA قبل از چرخش	
(۴۵-۵)	0.055	$R_{70} = 4.485 + 0.06Mo$	پارامترهای مؤلفه سوم از PCA بعد از چرخش	ضریب تعیین بسیار پایین
(۴۶-۵)	0.642	$R_{70} = 6.909 + 0.061Mo - 0.009A - 0.068I$	سه مؤلفه اول از PCA	
(۴۷-۵)	0.817	$R_{70} = -47998.62 + 480.09Mo + 480.05A + 480.05VM + 480.06FC + 0.79P - 0.03V - 0.05I$	کلیه پارامترها	تعداد پارامتر زیاد

۵-۶-۴- تعیین بهترین مدل تخمین و اعتبارسنجی مدل کمی ارزیابی قابلیت

خودسوزی لایه‌های زغال سنگ

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های کمی ارائه شده در رابطه‌های ۵-۳۶ تا ۵-۴۷ و تعیین بهترین مدل کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ، از اطلاعات مربوط به ۱۳ نمونه تصادفی از پایگاه داده فصل چهارم استفاده شده است.

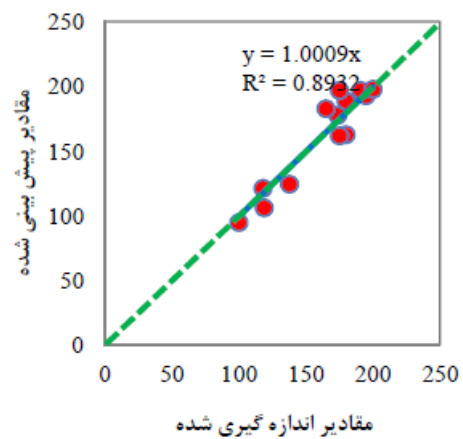
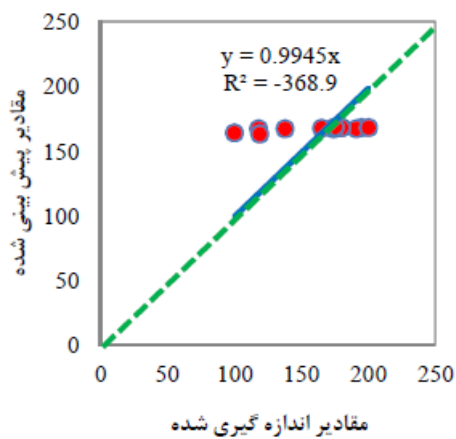
در جدول‌های ۵-۴۳ و ۵-۴۴، مقادیر پیش‌بینی شده دو روش CPT و R_{70} برای لایه‌های زغال سنگ مورد مطالعه با استفاده از رابطه‌های ۵-۳۶ تا ۵-۴۷ آورده شده است و مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده و وضعیت آن‌ها نسبت به خط نیمساز برای دو روش CPT و R_{70} در شکل‌های ۵-۶۹ و ۵-۷۰ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد همان‌طور که انتظار می‌رفت رابطه‌های ۵-۳۶، ۵-۴۱، ۵-۴۲ و ۵-۴۷ دارای بهترین تخمین (ضریب تعیین بالا) هستند.

جدول ۵-۴۳: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ برای روش CPT.

شماره نمونه													شماره رابطه	مقادیر پیش‌بینی شده در روش CPT (°C) بر اساس رابطه‌های ۳۸-۵ تا ۴۳-۵
۶۲	۵۷	۵۲	۴۷	۴۲	۳۷	۳۲	۲۷	۲۲	۱۷	۱۲	۷	۲		
182.9	196.8	188.5	106.3	197.6	161.9	124.7	162.6	197.1	192.8	178	121.3	94.8	(۳۶-۵)	
181.3	186.8	181.3	115.1	198.4	139.8	115.8	146.9	181.7	179.5	180.7	122.2	120.4	(۳۷-۵)	
191.4	192.2	193	121.5	216.7	140.5	127.8	145.4	174.4	173.2	190.6	124.3	117.2	(۳۸-۵)	
167.7	168.6	168.2	163	168.2	167.7	167.5	168.1	167.3	168.3	167.3	167.2	164.3	(۳۹-۵)	
183.1	190.8	183.6	109.7	201	141.8	117.3	149.6	184.4	184.2	183.1	123.7	117.2	(۴۰-۵)	
182	196.2	188.3	105.4	194.9	163.6	122.5	164	194.9	192.6	177.3	120.3	94.5	(۴۱-۵)	
165	175	180	119	200	175	138	180	191	195	174	118	100	مقادیر اندازه‌گیری شده در روش CPT (°C)	

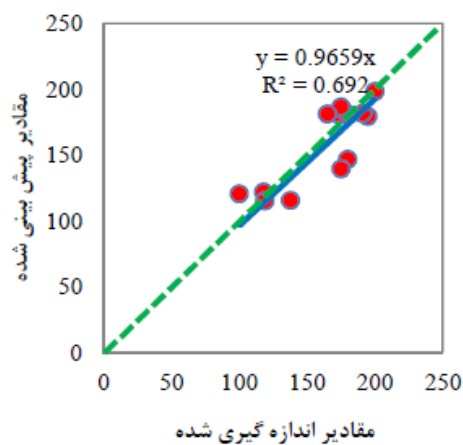
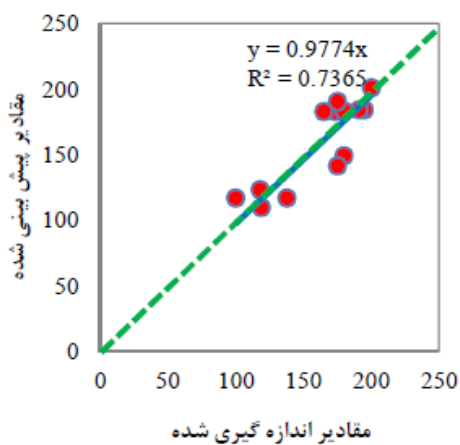
جدول ۵-۴۴: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ برای روش R₇₀.

شماره نمونه													شماره رابطه	مقادیر پیش‌بینی شده در روش R ₇₀ (°C/h) بر اساس رابطه‌های ۴۴-۵ تا ۴۹-۵
۶۲	۵۷	۵۲	۴۷	۴۲	۳۷	۳۲	۲۷	۲۲	۱۷	۱۲	۷	۲		
3.71	3.24	3.31	7.7	3.14	4.6	6.07	4.44	3.42	3.85	4.3	6.82	8.62	(۴۲-۵)	
3.75	3.73	3.7	6.74	2.67	6.03	6.72	5.80	4.4	4.52	3.8	6.79	6.92	(۴۳-۵)	
3.5	3.41	3.4	7.05	2.29	5.89	6.5	5.64	4.32	4.32	3.56	6.68	7.18	(۴۴-۵)	
4.61	4.51	4.56	5.09	4.56	4.6	4.63	4.57	4.65	4.55	4.65	4.66	4.96	(۴۵-۵)	
3.57	3.39	3.49	7.2	2.45	5.86	6.63	5.56	4.16	4.15	3.62	6.68	7.17	(۴۶-۵)	
3.51	2.97	3.07	7.5	2.9	4.26	5.91	4.24	3.67	3.55	3.68	6.61	8.48	(۴۷-۵)	
3.22	2.15	3.03	7.34	2.5	4.52	5.33	4.68	4.17	3.61	4.34	5.32	8.34	مقادیر اندازه‌گیری شده در روش R ₇₀ (°C/h)	



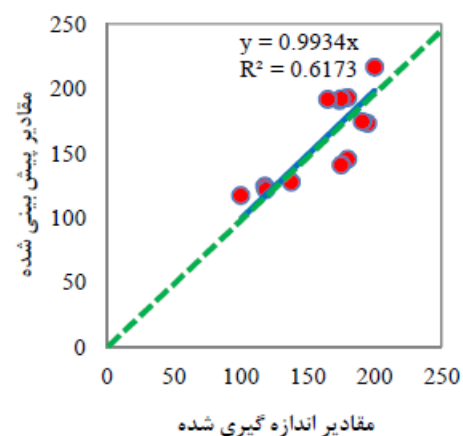
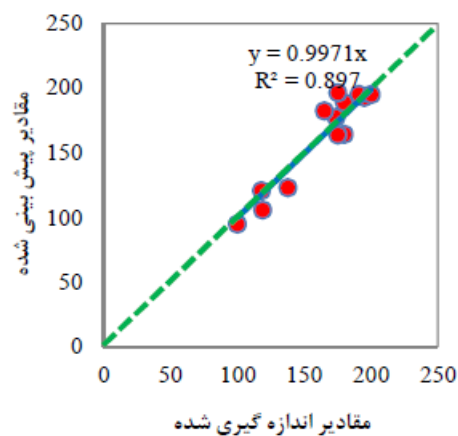
د) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۳۹-۵.

الف) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۳۶-۵.



ه) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۴۰-۵.

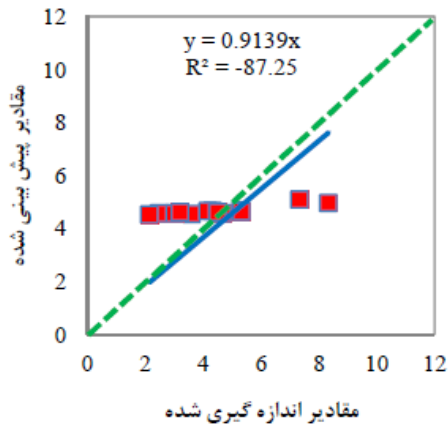
ب) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۳۷-۵.



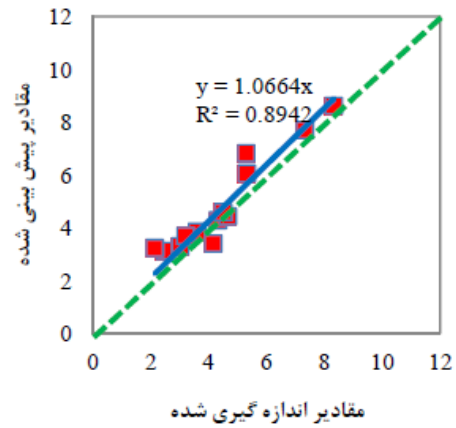
و) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۴۱-۵.

ج) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۳۸-۵.

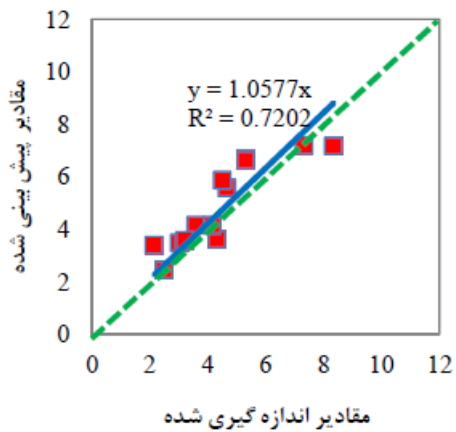
شکل ۵-۶۹: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ برای روش CPT.



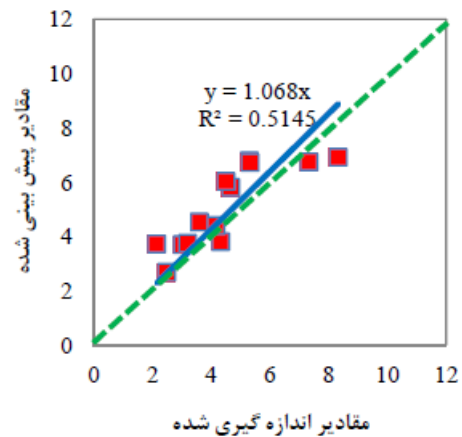
د) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۵-۴۵.



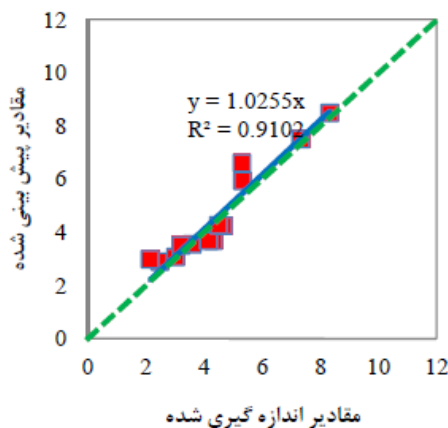
الف) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۵-۴۲.



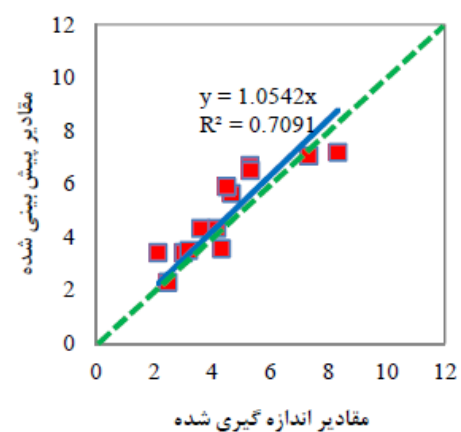
ه) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۵-۴۶.



ب) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۵-۴۳.



و) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۵-۴۷.



ج) مقایسه مقادیر بر اساس رابطه ۵-۴۴.

شکل ۵-۷۰: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های کمی با مقادیر اندازه‌گیری شده خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ برای روش R_{70} .

برای تعیین مناسب‌ترین رابطه از میان رابطه‌های ارائه شده از ضریب تعیین R^2 جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، شاخص عملکرد^۲ (VAF)، میانگین درصد خطای مطلق^۳ (MAPE) و خطای مطلق میانگین^۴ (MAE) استفاده شده است. RMSE متوسط خطای نتایج به دست آمده از خروجی مدل را نشان می‌دهد. کاهش این شاخص موجب افزایش ضریب تعیین رابطه شده و کارایی بهتر مدل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، هر چه VAF، بزرگ‌تر و MAPE و MAE کوچک‌تر و نزدیک به صفر باشد، مدل مناسب‌تر است. نحوه محاسبه این شاخص‌ها در رابطه‌های ۵-۴۸ تا ۵-۵۲ ارائه شده است (Gokceoglu, 2002).

$$R^2 = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^N (Y_{meas} - \bar{Y}_{meas})(Y_{Esti} - \bar{Y}_{Esti}) \right)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{meas} - \bar{Y}_{meas})^2 \sum_{i=1}^N (Y_{Esti} - \bar{Y}_{Esti})^2}} \right] \times 100 \quad \text{مقدار ایده‌آل} = 100 \quad (48-5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Y_{Meas} - Y_{Esti})^2} \quad \text{مقدار ایده‌آل} = 0 \quad (49-5)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(Y_{Meas} - Y_{Esti})}{\text{var}(Y_{Meas})} \right] \times 100 \quad \text{مقدار ایده‌آل} = 100 \quad (50-5)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_{Meas} - Y_{Esti}}{Y_{Meas}} \right| \times 100 \quad \text{مقدار ایده‌آل} = 0 \quad (51-5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \times \left[\sum_{i=1}^n |Y_{Meas} - Y_{Esti}| \right] \quad \text{مقدار ایده‌آل} = 0 \quad (52-5)$$

در این رابطه‌ها، Y_{Meas} و Y_{Esti} به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، \bar{Y}_{meas} و \bar{Y}_{Esti} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، var به معنی واریانس مقادیر و n تعداد نمونه‌های آزمون است.

مقادیر پنج معیار بیان شده در بالا برای هر ۱۲ رابطه خطی ارائه شده در جدول‌های ۵-۴۱ و ۵-۴۲، در جدول ۵-۴۵ آورده شده است.

1- Root Mean Square Error
2- Variance Account For
3- Mean Absolute Percentage Error
4- Mean Absolute Error

جدول ۵-۴: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای رابطه‌های ارائه شده با توجه به جدول‌های ۵-۳ و ۵-۴.

MAE	MAPE	VAF	RMSE	R ²	شماره رابطه از جدول‌های ۵-۴ و ۵-۳	پیش‌بینی روش
9.84	6.26	85.97	11.72	89.32	(۳۶-۵)	CPT
13.98	8.98	70.23	17.68	69.2	(۳۷-۵)	
17.97	10.91	58.33	20.19	61.73	(۳۸-۵)	
24.31	17.91	7.47	30.48	---	(۳۹-۵)	
13.96	9.03	71.86	16.88	73.65	(۴۰-۵)	
9.67	6.19	86.59	11.50	89.7	(۴۱-۵)	R ₇₀
0.52	14.11	89.73	0.66	89.42	(۴۲-۵)	
0.93	22.95	72.33	1.05	51.45	(۴۳-۵)	
0.78	18.88	78.26	0.90	70.91	(۴۴-۵)	
1.25	33.2	15.75	1.59	---	(۴۵-۵)	
0.73	17.82	79.36	0.88	72.02	(۴۶-۵)	
0.43	11.33	90.49	0.55	91.02	(۴۷-۵)	

مقایسه شاخص‌های ارزیابی ارائه شده برای هر رابطه نشان می‌دهد که در پیش‌بینی روش CPT، بیشترین میزان R²، کمترین میزان RMSE، بیشترین میزان VAF و کمترین میزان MAPE و MAE متعلق به رابطه‌های ۵-۴۱ و ۵-۳۶ است. همچنین در پیش‌بینی روش R₇₀، بیشترین میزان R²، کمترین میزان RMSE، بیشترین میزان VAF و کمترین میزان MAPE و MAE متعلق به رابطه‌های ۵-۴۷ و ۵-۴۲ است؛ بنابراین انتخاب مناسب‌ترین رابطه از میان رابطه‌های فوق انجام می‌شود. اما از آنجا که هدف در این رساله ارائه‌ی یک رابطه برازشی چند متغیره با تعداد بهینه متغیر است برای پیش‌بینی روش‌های CPT و R₇₀ به ترتیب رابطه‌های ۵-۳۶ و ۵-۴۲ پیشنهاد می‌شود.

۵-۷- نتیجه‌گیری

تاکنون مطالعات بسیار زیادی در مورد تأثیر پارامترهای مختلف بر پدیده خودسوزی لایه‌های 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 لایه زغال‌سنگ را مورد ارزیابی قرار داده‌اند؛ لذا ایجاد یک روش مبتنی بر پارامترهای ذاتی در مرحله طراحی که قابلیت اندازه‌گیری داشته باشند به منظور ایجاد همگرایی بیشتر این تحقیقات لازم به نظر می‌رسد که در این فصل از تحقیق حاضر به انجام رسید.

در این فصل به ارائه مدل ارزیابی کیفی و کمی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ بر اساس مشخصات ذاتی لایه زغال سنگ پرداخته شد. نتایج بررسی مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد این مدل‌ها ارائه کننده شاخص قابل اطمینانی هستند که بر مبنای آن‌ها و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی می‌توان خودسوزی لایه‌های زغال سنگ را پیش‌بینی کرد.

در این فصل در ابتدا سعی شد تا کلیه پارامترهای مهم و مؤثر در قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ شناسایی و مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند و نقش و تأثیر آن‌ها بر خودسوزی لایه زغال سنگ لحاظ شود. سپس بین نتایج حاصل از روش‌های آزمایشگاهی CPT و R70 یک رابطه ریاضی برقرار شد.

ضریب اهمیت هر یک از این پارامترها با توجه به نظرسنجی از خبرگان و دو روش FRES و DEMATEL که به ارزیابی وزن پارامترها می‌پردازند تعیین شدند.

در مرحله بعد یک سیستم طبقه‌بندی جدید، بر اساس مهم‌ترین پارامترها، برای ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ ارائه شد. در ادامه قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ مورد مطالعه با کمک سیستم طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت.

با توجه به تعداد زیاد متغیرها روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش حجم متغیرها و انتخاب مؤثرترین آن‌ها معرفی شد و با استفاده از این روش مهم‌ترین پارامترها برای ورود به مدل کمی انتخاب شدند. در بخش مدل کمی، تحلیل برآزش برای بررسی رابطه بین خودسوزی لایه زغال سنگ با متغیرهای مورد مطالعه انتخاب شد.

به طور کلی نقاط قوت مدل‌های پیشنهادی این رساله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

✓ شناسایی دسته عوامل مؤثر بر قابلیت خودسوزی لایه‌ها و بررسی اندرکنش آن‌ها با یکدیگر و چگونگی تغییرات و تأثیرات آن‌ها بر قابلیت خودسوزی و انتخاب مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها از میان پارامترهای موجود با توجه به رعایت اصولی از قبیل:

- عدم هم‌پوشانی پارامترها با یکدیگر.

- پوشش تمامی خصوصیات ذاتی لایه زغال سنگ.
 - سعی در به حداقل رساندن پارامترها.
 - سهولت در دسترسی و انجام آزمایش‌های مربوطه.
 - درصد استفاده در مدل‌های قبلی.
 - برطرف کردن کمبودهای مدل‌های پیشین (مانند عدم در نظر گرفتن ترکیب پتروگرافی).
 - سادگی اندازه‌گیری پارامتر و در نتیجه از به کارگیری پارامترهایی که قابلیت اندازه‌گیری ندارند پرهیز شود.
 - در نظر گرفتن حداکثری پارامترهای مؤثر در عین سادگی مدل با رعایت عدم همپوشانی (همبستگی) پارامترها (از به کارگیری پارامترهای هم‌ارزش، هم ارز و دارای هم‌پوشانی پرهیز شود).
- ✓ مدل‌های ارائه شده قابلیت خودسوزی را به صورت کیفی و کمی ارزیابی می‌کنند.
- ✓ پارامترهای مدل به راحتی چه در زمان امکان‌سنجی و چه پس از اکتشافات تفصیلی قابل اندازه‌گیری هستند و از این رو مدل‌های ارائه شده برای کاربرد در این مراحل نیز قابل استفاده است.
- ✓ در ارائه مدل کیفی از یک روش علمی استفاده شده که در آن به منظور کاهش عدم قطعیت نظر کارشناسان در روش FRES اعداد فازی به کار برده شده است. سیستم طبقه‌بندی نیز دارای رده‌های امتیازدهی پیوسته‌ای است که موجب کاهش عدم قطعیت بازه‌بندی پارامترها می‌شود.
- ✓ با استفاده از سیستم طبقه‌بندی کیفی جدید می‌توان لایه‌های زغال سنگ را از نظر قابلیت خودسوزی به سه کلاس ایمن، احتیاط و نایمن طبقه‌بندی کرد.
- ✓ در مدل‌های ارائه شده از داده‌های واقعی برای بیان کمی تغییرات خودسوزی استفاده شده

است که دارای قابلیت اطمینان بالایی است.

✓ بررسی صحت و سقم مدل‌های آماری با استفاده از شاخص‌های ارزیابی R^2 ، RMSE، VAF،

MAPE و MAE.

✓ مدل‌های ارائه شده به صورت دانش‌محور هستند و برای شرایط خاصی تعریف نشده‌اند و برای

تمام معادن زغال‌سنگ قابل کاربرد است.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادها

هدف اصلی این رساله ارائه مدل کمی و کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ بوده است. بر همین اساس در این رساله در فصل اول به کلیات رساله پرداخته شده است. در فصل نخست پس از بیان مسئله رساله، سؤال‌های تحقیق، ضرورت و اهداف آن تشریح و سپس فرض‌های تحقیق و جنبه نوآوری رساله بیان شد و در نهایت روند اجرای رساله تبیین شد. در فصل دوم سعی شد تا به بررسی و شناخت مکانیسم خودسوزی زغال‌سنگ به صورت کامل پرداخته شود. پس از آن در فصل سوم سابقه علمی موضوع رساله به صورت کامل مرور شده و خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده، روابط و طبقه‌بندی‌های ارائه شده در این فصل آورده شد و در قسمت انتهایی فصل سوم مطالعات قبلی مورد بررسی و نقد قرار گرفتند. در فصل چهارم مواد، روش تحقیق، مراحل ساخت دستگاه آزمایش خودسوزی زغال‌سنگ، توصیف مناطق مورد مطالعه و در نهایت پایگاه داده فراهم شده برای این رساله تشریح شد. در فصل پنجم که خروجی رساله حاضر محسوب می‌شود و به عنوان فصل کلیدی رساله است، پارامترهای مختلف مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ به صورت کلی بیان و پارامترهای ذاتی به تفصیل بیان شده است. پس از شناسایی و تعیین مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترهای ذاتی، مراحل ارائه مدل‌های کیفی و کمی همراه با ارزیابی آن‌ها به تفصیل و به صورت گام به گام ارائه و تشریح شده است و شاخص‌های جدیدی با استفاده از مطالعات آماری برای پیش‌بینی و ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ ارائه شده است. در فصل آخر که فصل حاضر رساله است به بررسی نتایج حاصل شده از تحقیق و پیشنهادهایی نیز در راستای ارتقاء تحقیقات آینده ارائه شده است.

۲-۶- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این رساله به شرح زیر است:

- ✓ با کاهش درجه زغال‌شدگی، رطوبت محتوی، اکسیژن محتوی، مواد فرار، هیدروژن محتوی و سطح تأثیر داخلی زغال‌سنگ همگی افزایش می‌یابند. افزایش هر یک از این عوامل باعث افزایش سرعت اکسیداسیون می‌شود که تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ را افزایش می‌دهند. درحالی‌که زغال‌سنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی حاوی درصد بالایی از کربن و درصد کمی از اکسیژن و هیدروژن هستند.
- ✓ نقش پیریت موجود در زغال‌سنگ در تأثیر آن بر پدیده خطر خودسوزی زغال‌سنگ به عنوان یک عامل اصلی و شتاب‌دهنده مطرح است.
- ✓ تمایل به خودسوزی در زغال‌سنگ، با افزایش میزان رطوبت محتوی و پیریت محتوی به طور همزمان افزایش می‌یابد.
- ✓ با افزایش درصد رطوبت محتوی تا حدود ۲۰ درصد، واکنش خودسوزی دارای سرعت بیشتری می‌شود و پس از این مقدار رطوبت محتوی، شاخص خودسوزی زغال‌سنگ کاهش می‌یابد که علت آن این است که گرمای ناشی از واکنش صرف تبخیر رطوبت می‌شود و اجازه افزایش دما به زغال‌سنگ داده نمی‌شود.
- ✓ تمامی گروه‌های ماسرالی زغال‌سنگ با در نظر گرفتن زمان، دما و شرایط محیطی مستعد هوازگی و اکسیداسیون هستند به نحوی که ویترنیت و لیپتینیت دارای نسبت‌های بزرگتری از H/C و O/C در مقایسه با اینرتینیت هستند. وجود اتم‌های هیدروژن و اکسیژن در زغال‌سنگ باعث افزایش پتانسیل خودسوزی خواهد شد. از سویی دیگر ترکیبات شیمیایی اینرتینیت دارای مقادیر بالاتری از کربن و مقادیر کمتری از هیدروژن و اکسیژن در مقایسه با ویترنیت است که استعداد این قبیل از زغال‌سنگ‌ها که دارای مقادیر بالاتری از اینرتینیت

است در خصوص خودسوزی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که اینرتینیت دارای درجه زغال‌شدگی بالاتری در مقایسه با ویتترینیت و لیپتینیت است.

✓ افزایش درصد خاکستر در زغال‌سنگ باعث کاهش تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی می‌شود به نحوی که خاکستر دارای یک اثر تأخیری و کند کننده در فرآیند اکسایش و خودسوزی زغال‌سنگ دارد.

✓ با کاهش درصد مواد فرار تا زیر حدود ۱۲/۵ درصد خودسوزی کاهش می‌یابد که علت این امر آن است که مواد فرار به عنوان یک منبع سوخت ثانویه کاهش یافته و خودسوزی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش میزان مواد فرار در مقادیر بالاتر از ۲۷/۵ درصد نیز خودسوزی کاهش می‌یابد که علت آن این است که حضور گاز و مواد فرار در خلل و فرج و منافذ ریز و درشت لایه زغال‌سنگ مانعی برای ترکیب اکسیژن با زغال‌سنگ است و فرآیند اکسیداسیون به تعویق می‌افتد؛ بنابراین مواد فرار زیاد در زغال‌سنگ یک عامل مهار کننده در پدیده خودسوزی زغال‌سنگ محسوب می‌شود؛ زیرا اجازه جذب اکسیژن توسط زغال‌سنگ را نمی‌دهد. طبق بررسی‌های انجام شده در رساله حاضر زمانی که میزان مواد فرار در حدود ۱۲/۵ تا ۲۷/۵ درصد باشد بیشترین میزان خودسوزی در نمونه‌های زغال‌سنگ رخ می‌دهد.

✓ هرچه تردی و شکنندگی زغال‌سنگ بیشتر باشد، زغال‌سنگ دارای شکاف و شکستگی بیشتری می‌شود و در این حالت سطح بیشتری از زغال‌سنگ در معرض جریان هوا و اکسیداسیون قرار می‌گیرد. به طور کلی با افزایش سطح تأثیر، میزان نفوذ هوا به داخل زغال‌سنگ افزایش یافته و تمایل زغال‌سنگ برای خودسوزی افزایش می‌یابد به نحوی که سرعت اکسیداسیون زغال‌سنگ با سطح تأثیر آن دارای یک رابطه خطی و مستقیم است.

✓ نتایج روش DEMATEL برای بررسی اندرکنش بین پارامترهای انتخابی نشان داد که درجه زغال‌شدگی دارای بیشترین مقدار اثرگذاری و ترکیب پتروگرافی دارای کمترین میزان اثرگذاری هستند؛ بنابراین ترکیب پتروگرافی باید دارای بیشترین مقدار تأثیرپذیری باشد.

همچنین خاکستر محتوی، دارای کمترین میزان اثرپذیری در سیستم است. پارامترهای گاز محتوی، ترکیب پتروگرافی و مواد فرار به صورت معلول بوده و دیگر پارامترها به صورت علت هستند. علاوه بر این درجه زغال شدگی دارای بیشترین مقدار برتری است و از این رو دارای بیشترین اهمیت در قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ است و کربن ثابت و اندازه ذرات دارای کمترین مقدار برتری هستند.

✓ نتایج روش FDRES برای بررسی اندرکنش بین پارامترهای انتخابی نشان داد که ترکیب پتروگرافی کاملاً تحت اثر سیستم بوده و مغلوب سیستم است و درجه زغال‌شدگی بیشترین تسلط را بر روی سیستم دارد و غالب‌ترین پارامتر سیستم است. همچنین درجه زغال‌شدگی، رطوبت محتوی و مواد فرار جز مهم‌ترین پارامترهای تعاملی در سیستم به حساب می‌آیند و خاکستر محتوی کم تعامل‌ترین پارامتر سیستم است.

✓ بر اساس روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی مشخص شد خاکستر محتوی، اینرتینیت و رطوبت محتوی به ترتیب با مقادیر اشتراک استخراجی ۰/۹۸۵، ۰/۹۴۲ و ۰/۹۳۱ به ترتیب اصلی‌ترین مؤلفه‌ها در فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ محسوب می‌شوند. این سه عامل می‌توانند تقریباً ۸۷ درصد از تغییرپذیری (واریانس) متغیرها را توضیح دهند.

✓ نمودار Scree ایجاد شده در روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی نشان داد متغیرهای ویترنیت، لپتینیت، پیریت محتوی و خاکستر محتوی به ترتیب با مؤلفه اول یعنی خاکستر محتوی دارای بیشترین بار عاملی هستند. مواد فرار و کربن ثابت نیز با مؤلفه دوم یعنی اینرتینیت دارای بیشترین بار عاملی هستند. همچنین رطوبت محتوی و اینرتینیت نیز با مؤلفه سوم یعنی رطوبت محتوی دارای بیشترین بار عاملی هستند.

✓ با چرخش عامل‌ها در روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی مشخص شد تنها تفاوت بین ماتریس اجزا و ماتریس چرخیده شده اجزا در این است که اینرتینیت در ماتریس اجزا با رطوبت محتوی به عنوان مؤلفه سوم و در ماتریس چرخیده شده اجزا با اینرتینیت به عنوان مؤلفه دوم دارای

بیشترین بار عاملی است.

- ✓ در رابطه‌های کمی ارائه شده مشخص شد رابطه‌ای که ناشی از پارامترهای مؤلفه اول از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی است از دیدگاه مقادیر شاخص‌های ارزیابی جز بهترین مدل‌های ارائه شده در پیش‌بینی روش CPT است.
- ✓ در رابطه‌های کمی ارائه شده مشخص شد رابطه‌ای که ناشی از کلیه پارامترها است از دیدگاه مقادیر شاخص‌های ارزیابی جز بهترین مدل‌های ارائه شده در پیش‌بینی روش R70 است.

۳-۶- پیشنهادها

بر اساس نتایج این رساله، پیشنهادهای زیر برای مطالعات بیشتر در آینده ارائه می‌شود:

- ✓ سایر روش‌های آزمایشگاهی که در این رساله به آن‌ها پرداخته شد به طور دقیق‌تر شناسایی شوند و در صورت امکان دستگاه‌های اندازه‌گیری جدید خودسوزی زغال‌سنگ طراحی و ساخته شوند و نتایج روش‌های مختلف با هم بررسی شوند.
- ✓ یک دستگاه کروماتوگراف گازی در خروجی رآکتور واکنش نصب و درصد گازهای خروجی ناشی از فرآیند اکسیداسیون زغال‌سنگ در مراحل مختلف اندازه‌گیری شود و بر اساس این درصد گازهای مختلف به بررسی و تجزیه و تحلیل خودسوزی پرداخته شود.
- ✓ نتایج خودسوزی زغال‌سنگ علاوه بر گاز اکسیژن با ترکیبی از گازهای دیگر نظیر ترکیب گاز اکسیژن و گاز متان نیز برآورد شود.
- ✓ از سایر روش‌های سیستمی برای ارائه مدل‌های کیفی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ استفاده شود.
- ✓ از سایر روش‌های ریاضی برای ارائه مدل‌های کمی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال‌سنگ استفاده شود.
- ✓ با تلفیق پارامترهای ذاتی و عملیاتی و استفاده از مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی فیزیکی به

بررسی تأثیر همزمان این پارامترها در خودسوزی لایه زغال سنگ در حین معدنکاری و پس از معدنکاری در ناحیه تخریب پرداخته شود.

✓ با ساخت یک فضای آزمایشگاهی در یک معدن آموزشی زغال سنگ به بررسی تأثیر حجم و سرعت تهویه بر میزان گرمایش زغال سنگ پرداخته شود.

منابع و مراجع

- اصانلو، م. (۱۳۷۸). مهندسی زغال سنگ، انتشارات ناقوس.
- افشانی، س.ع.ر؛ حسینی رامشه، ز؛ نوربان، م. و مهدوی زفرقندی، م. (۱۳۹۱). مرجع کاربردی SPSS 20، انتشارات بیشه.
- آرشیو شرکت زغال سنگ البرز شرقی. (۱۳۹۶). اداره آموزش شرکت معادن زغال سنگ البرز شرقی.
- آقا نباتی، ع. (۱۳۸۸). فرهنگ چینه‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، جلد دوم.
- آقا نباتی، ع. و حقی‌پور، ع. (۱۹۷۸). نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰۰ طیس، نقشه شماره ۱۷، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- جلالی، س.م.؛ نجفی، م. و خالو کاکائی، ر. (۱۳۹۲). پیش امکان‌سنجی کاربرد روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) برای تولید برق؛ مطالعه موردی: منطقه زغالی تخت، مجله نظام مهندسی معدن، شماره ۱۹، صفحات ۳-۱۸.
- جهانبانی، ز؛ عطائی، م؛ سرشکی، ف. و قنبری، ک. (۱۳۹۶). ارزیابی ریسک خودسوزی زغال سنگ در انباشت‌گاه زغال به روش تحلیل درخت خطای فازی، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره دوازدهم، شماره ۳۵، صفحات ۱-۱۲.
- خالو کاکائی، ر. و زارع نقدی، م. (۱۳۸۸). تحلیل و رده‌بندی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش بیلاق با استفاده از رویکرد سیستمی، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ۲، شماره ۱ و ۲، صفحات ۱۹ تا ۳۳.
- رضایی، ب. (۱۳۸۰). تکنولوژی زغال‌شویی، چاپ دوم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- رضوی ارمغانی، م.ب. و معین السادات، ح. (۱۳۷۲). زغال سنگ، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. (۱۳۸۰). نقشه زمین‌شناسی منطقه شاهرود.
- سایت اینترنتی شرکت زغال سنگ پروده طیس. (۱۳۹۶). <http://www.tpc.co.ir>، تاریخ مشاهده: ۱۳۹۶/۹/۹.
- سرشکی، ف؛ واعظیان، ا. و صفاری، ا. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر ماسرال‌ها در نفوذپذیری زغال سنگ‌های معادن پروده و طزره، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، سال ۳۲، شماره پیاپی ۶۳، شماره ۲، صفحات ۲۳-۳۴.
- سعیدی، غ.ر؛ ادیب، ا. و محمودی، ن.ا. (۱۳۹۱). مدل‌سازی عددی زاویه جابجایی سنگ در استخراج لایه‌های همجوار در معدن زغال سنگ همکار، اولین کنگره ملی زغال سنگ ایران، ۸-۱۰ شهریورماه، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شریعت‌نیا، م.ح. (۱۳۷۴). ویژگی‌های زمین‌شناسی گستره پروده از حوضه زغال دار طیس، ایران مرکزی، فصل‌نامه علوم زمین، شماره ۱۵-۱۶، صفحات ۵۰-۶۰.
- شیبانی صفت، م. و زارع مطلق، س. (۱۳۹۱). بررسی وضعیت طراحی و بازیابی لنگه‌های زغالی در روش استخراج اتاق و پایه معدن مرکزی پرورده طیس، اولین کنگره ملی زغال سنگ، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- صفاری، ا. (۱۳۹۲). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ارائه‌ی یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- 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.

فرشادفر، ع. (۱۳۸۴). اصول و روش‌های آماری چند متغیره، چاپ دوم، انتشارات طاق‌بستان.

قربانی ده نوی، م؛ امیری، ع. و سهرابی، ح. (۱۳۹۷). ارزیابی ژئوشیمیایی (آلی و معدنی) و پتروگرافی آلی معدن زغال‌سنگ پابدانا، حوضه زغالی کرمان، چهارمین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، شرکت زغال‌سنگ پروده طبس، ۲۷ تا ۲۹ فروردین‌ماه ۱۳۹۳.

قربانی ده نوی، م؛ جرجندی‌پور، م. و عزیزان، ح.ا. (۱۳۹۳). ویژگی‌های ژئوشیمیایی زغال‌سنگ‌های ناحیه کرمان، دومین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، شرکت معادن زغال‌سنگ کرمان، پنجم تا هفتم شهریورماه ۱۳۹۳.

کریمی، ر. (۱۳۷۲). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی علل خودسوزی زغال‌سنگ معدن باب نیزو کرمان و طراحی سیستم تهویه برای جلوگیری از آن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

گزارش زمین‌شناسی و اکتشاف مقدماتی معدن پروده چهار طبس. (۱۳۸۶). دفتر طراحی معدن زغال‌سنگ پروده چهار طبس.

گزارش عملیات اکتشافی طرح اکتشاف و تجهیز معدن زغال‌سنگ تخت. (۱۳۸۰). شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی.

گزارش عملیات زمین‌شناسی زمستان یورت. (۱۳۷۸). شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی.

محمودی، خ؛ شفایی، س.ض؛ کارآموزیان، م. و ضیایی، م. (۱۳۸۹). طبقه‌بندی زغال‌سنگ‌های البرز شرقی بر اساس ماسرال‌های موجود توسط روش آنالیز تصویری، چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه ارومیه.

مدنی، ح. (۱۳۷۳). بازرسی در معادن، گروه مترجمان، انتشارات بصیر.

مؤمنی، م. و فعال قیومی، ع. (۱۳۹۱). تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS، انتشارات گنج شایگان.

ناصری، س؛ مهدی ایرانمنش، م. و میرزایی، م. (۱۳۹۳). مقایسه فاکتورهای فنی و زمین‌شناسی مؤثر بر ریزش (بررسی در دو معدن از حوضه زغالی کرمان)، دومین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران، شرکت معادن زغال‌سنگ کرمان، پنجم تا هفتم شهریورماه ۱۳۹۳.

نتایج تحقیقات اکتشافی منطقه پشکلات. (۱۳۵۶). شرکت ملی ذوب آهن ایران، جلد اول.

نجفی، م؛ جلالی، س.م؛ خالو کاکائی، ر؛ سرشکی، ف. و رمضان‌زاده، ا. (۱۳۹۱). امکان‌سنجی استحصال انرژی از منابع زغال‌سنگ با استفاده از فناوری پیشرفته گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG)، مطالعه موردی: منطقه زغالی مزینوی طبس، دومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی.

وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی. (۱۳۸۷). آمار و نمودارهای ایران و جهان ۲۰۰۸، ۱۳۸۷، صفحه ۱۱۱.

یزدی، م. (۱۳۸۲). زغال‌سنگ (از منشأ تا اثرات زیست‌محیطی)، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

A

- Akgun, F. and Arisoy, A. (1994). Effect of particle size on the spontaneous heating of a coal stockpile. *Combustion and Flame*. 99 (1): 137-146. doi: 10.1016/0010-2180(94)90085-X.
- Akgun, F. and Essenhigh, R.H. (2001). Self-ignition characteristics of coal stockpiles: theoretical prediction from a two-dimensional unsteady-state model. *Fuel*. 80: 409-415.
- Ardebili, L., Babazadeh, V., Mammadov, M. and Navi, P. (2012). Geochemical characteristics of Galandrud coal in central Alborz, Iran. *International Journal of Mining Science and Technology*. 22 (1): 101-106.
- Arisoy, A. (2010). Coal mine safety and preventing self-combustion of coal. In Conference: Inerma, At Istanbul, Turkey.
- Arisoy, A. and Akgun, F. (1994). Modelling of spontaneous combustion of coal with moisture content included. *Fuel*. 73 (2): 281-286.
- Arisoy, A. and Beamish, B. (2015). Mutual effects of pyrite and moisture on coal self-heating rates and reaction rate data for pyrite oxidation. *Fuel*. 139: 107-114.
- Arisoy, A., Beamish, B. and Yoruk, B. (2017). Moisture moderation during coal self-heating. *Fuel*. 210: 352-358.
- Arisoy, A., Beamish, B.B. and Çetegen, E. (2006). Modelling spontaneous combustion of coal. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 30 (3): 193-201.
- Armstrong, W. (1979). Aeration in plants. *Advances in Botanical Research*. 14: 225-332.
- Ashton Coal Project. (2014). Spontaneous combustion management plan. Version B. Ashton Coal Part of the YANCOAL Australia Group.
- ASTM (D-2799-11). (2011). Standard Test Method for Microscopical Determination of the Maceral Composition of Coal: Annual Book of ASTM Standards, Petroleum Products, Lubricants, and Fossil Fuels, v.05.06, Gaseous Fuels; Coal and Coke: ASTM International, West Conshohocken, PA, p. 464-469, doi 10.1520/D2799-11, <http://www.astm.org/Standards/D2799.htm>.
- ASTM (D-3173-11). (2017). Standard test methods for moisture in the analysis sample of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM (D-3174-12). (2011). Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal and standard classification of coals by rank. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM (D-3175-17). (2017). Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM (D-3176-15). (2015). Standard practice for ultimate analysis of coal and coke and standard test methods for total sulfur in the analysis sample of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- Avila, C. (2012). Predicting self-oxidation of coals and coal/biomass blends using thermal and optical methods. Ph.D. Thesis. University of Nottingham.
- Avila, C., Wu, T. and Lester, E. (2014). Petrographic characterization of coals as a tool to detect spontaneous combustion potential. *Fuel*. 125: 173-182.

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*. 30 (8): 399-406.

- Banerjee, S.C. (1985). Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires, Dhanbad-India: Central Mining Research Station. Oxford & IBH Publishing Co. Balkema. Rotterdam. 168 P.
- Banerjee, S.C. (2000). Coal categorisation vis-à-vis spontaneous fire risk, Prevention and Combating Mine Fires. Special Indian edition. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 67, 113.
- Banerjee, S.C., Banerjee, B.D. and Chakravorty, R.N. (1970). Rate studies of aerial oxidation of coal at low temperatures (30-170 °C). *Fuel*. 49 (3): 324-331.
- 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*. 59 (2): 15-31.
- Baris, K., Aydin, H. and Didari, V. (2011). Statistical modeling of the effect of rank, temperature, and particle size on low-temperature oxidation of Turkish coals. *Combustion Science and Technology*. 183 (2): 105-121.
- Barve, S.D. and Mahadevan, V. (1994). Prediction of spontaneous heating liability of Indian coals based on proximate constituents. *Proceedings of the 12th International Coal Preparation Congress*. Cracow. Poland. pp. 557-562.
- Beamish, B. (2005). Comparison of the R₇₀ self-heating rate of New Zealand and Australian coals to Suggate rank parameter. *International Journal of Coal Geology*. 64 (1-2): 139-144.
- Beamish, B. and Arisoy, A. (2008 a). 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). ISBN 978-0-615-20009-5. Wallace. pp. 149-153.
- Beamish, B. and Arisoy, A. (2008 b). Effect of mineral matter on coal self-heating rate. *Fuel*. 87: 125-130.
- Beamish, B. and Beamish, R. (2010). Benchmarking moist coal adiabatic oven testing. *Coal Operators' Conference*. University of Wollongong. Australia. pp. 264-268.
- Beamish, 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. and Beamish, R. (2012). Benchmarking coal self-heating using a moist adiabatic oven test. In: *Proceedings of the fourteenth US/North American mine ventilation symposium*. Salt Lake City. pp. 423-427.
- Beamish, B. and Blazak, D.G. (2005). Relationship between ash content and R₇₀ self-heating rate of Callide Coal. *International Journal of Coal Geology*. 64 (1-2): 126-132.
- Beamish, B. and Daly, M.D. (2004). Self-heating of gas-drained coal. In *Proceedings 2004 CRC Mining Research and Effective Technology Transfer Conference*.
- Beamish, B. and Hamilton, G.R. (2005). Effect of moisture content on the R₇₀ self-heating rate of Callide coal. *International Journal of Coal Geology*. 64: 133-138.
- Beamish, 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. 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.
- Beamish, B. and Schultz, T.J. (2008). Moisture content impact on the self-heating rate of a highly reactive subbituminous coal. *Coal Operators' Conference*. University of Wollongong. Australia. pp. 155-160.

- Beamish, B. and Theiler, J. (2015). Contrast in Self-Heating Rate Behaviour for Coals of Similar Rank. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 300-304.
- Beamish, B. and Theiler, J. (2017). Assessing the reactivity of pyrite. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 391-394.
- Beamish, B., Barakat, M.A. and George, J.D.S. (2001). Spontaneous combustion propensity of New Zealand coals under adiabatic conditions. *International Journal of Coal Geology*. 45 (2-3): 217-224.
- Beamish, B., Barakat, M.A. and George, J.D.S. (2000). Adiabatic testing procedures for determining the selfheating propensity of coal and sample ageing effects. *Thermochimica Acta*. 362 (1-2): 79-87.
- Beamish, 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., Cosgrove, M. and Theiler, J. (2016). Self-Heating Behaviour of Heat-Affected Coal. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 451-455.
- Beamish, B., Edwards, D. and Theiler, J. (2018). Implementation of Interactive Spontaneous Combustion Hazard Assessment and Management at Meandu Mine. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 329-335.
- Beamish, B., Lau, A.G., Moodie, A.L. and Vallance, T.A. (2002). Assessing the self-heating behaviour of Callide coal using a 2-metre column. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 15: 385-390. doi:10.1016/S0950-4230(02)00020-7.
- Beamish, 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., 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., Theiler, J., Saurat, J. and Levi, T. (2014). Commissioning Adiabatic Oven Testing- an Inter-Laboratory Comparison. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 324-329.
- Behera, B. and Sahu, H. (2018). Assessment of auto-oxidation potential of some Indian coals by differential thermal analysis (DTA) technique. *Journal of Mines, Metals & Fuels*. pp. 347-353.
- Berkowitz, N. (1951). Heats of Wetting and the Spontaneous Ignition of Coal. *Fuel*. 30: 94-96.
- Bhat, S. and Agarwal, P.K. (1996). The effect of moisture condensation on the spontaneous combustibility of coal. *Fuel*. 75 (13): 1523-1532.
- Bhattacharyya, K.K. (1971). The role of absorption of water vapour in the spontaneous heating of coal. *Fuel*. 50 (4): 367-380.
- Bhattacharyya, K.K. (1972). The role of desorption of moisture from coal in its spontaneous heating. *Fuel*. 51 (3): 214-220.
- Bhattacharyya, K.K., Hodges, D.J. and Hinsley, F.B. (1968). The influence of humidity on the initial stages of the spontaneous heating of coal. *Min. Eng.* 126: 274-284.
- 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)*. 19 (4): 446-451.

- Bowes, P.C. (1984). *Self-Heating: Evaluating and Controlling the Hazards*. Amsterdam. The Netherlands. Elsevier. 500 P.
- Bragin, N., Golubev, S.A. and Polianski, B.V. (1981). Paleogeography of main stage of Lower Mesozoic coal measures accumulations in Iran, *Litol. Polens. Iskop.* 1: 69-80.
- Brooks, K. and Glasser, D. (1986). A simplified model of spontaneous combustion in coal stockpiles. *Fuel.* 65 (8): 1035-1041.
- Buckmaster, H.A. and Kudynska, J. (1992). Dynamic in situ 9 GHz cw-epr low-temperature oxidation study of selected Alberta coals: 4. Influence of moisture on hv bituminous coal. *Fuel.* 71 (10): 1147-1151.

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.* 18: 23-30. doi: 10.1130/2007.4118(03).
- Carpenter, D.L. and Sergeant, G.D. (1966 a). Initial stages of oxidation of coal with molecular oxygen. 3. Effect of particle size on rate of oxygen consumption. *Fuel.* 45 (4): p. 311.
- Carpenter, D.L. and Sergeant, G.D. (1966 b). Initial stages of oxidation of coal with molecular oxygen. 4. Accessibility of internal surface to oxygen. *Fuel.* 45 (6): p. 429.
- 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.* 20 (1): 1-15.
- Carras, J.N., Day, S.J., Saghafi, A. and Williams, D.J. (2009). Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia. *International Journal of Coal Geology.* 78 (2): 161-168.
- Ceglarska-Stefanska, G., Brzóska, K. and Winnicki, J. (1998). Sorption of water vapour on exinite concentrations. *Chemistry and Materials Science.* 4: 313-319.
- Chakravorty, R.N. and Kolada, R.J. (1988). Prevention and control of spontaneous combustion in coal mines. *Mining Engineering (Littleton, CO).* 40 (10): 952-956.
- Chamberlain, E.A.C. and Hall, D.A. (1973). The ambient temperature oxidation of coal in relation to the early detection of spontaneous heating. *The Mining Engineer.* pp. 387-397.
- Chandra, D. and Prasad, Y.V.S. (1990). Effect of coalification on spontaneous combustion of coals. *International Journal of Coal Geology.* 16: 225-229.
- 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.* 55 (3): 130-136.
- Chen, X.D. (1991). *The Spontaneous Heating of Coal: Large Scale Laboratory Assessment Supporting Theory*. Ph.D. Thesis. Christchurch. New Zealand. University of Canterbury. 197 P.
- Chen, X.D. (1994). The effect of drying heat and moisture content on the maximum temperature rise during spontaneous heating of a moist coal pile. *Coal Preparation.* 14 (3-4): 223-236.
- Chen, X.D. and Stott, J.B. (1993). The effect of moisture content on the oxidation rate of coal during near-equilibrium drying and wetting at 50 C. *Fuel.* 72 (6): 787-792.
- Choudhury, D., Sarkar, A. and Ram, L.C. (2016). An autopsy of spontaneous combustion of lignite. *International Journal of Coal Preparation and Utilization.* 36 (2): 109-123.
- Clemens, A.H. and Matheson, T.W. (1996). The role of moisture in the self-heating of low-rank coals. *Fuel.* 75 (7): 891-895.

- Clemens, A.H., Matheson, T.W. and Rogers, D.E. (1991). Low temperature oxidation studies of dried New Zealand coals. *Fuel*. 70 (2): 215-221.
- Cole, D.A., Simmons, G.W., Herman, R.G., Klier, K. and Czako-Nagy, I. (1987). Transformations of iron minerals during coal oxidation. *Fuel*. 66 (9): 1240-1248.
- Cotterell, M.E. (1997). The effect of coal maceral composition on spontaneous combustion. BE thesis (unpublished), University of Queensland.
- Cui, X. and Bustin, R.M. (2006). Controls of coal fabric on coalbed gas production and compositional shift in both field production and canister desorption test. *SPE Journal*. 11 (1): 111-119.

D

- Davis, J.D. and Byrne, J.F. (1924). An adiabatic method for studying spontaneous heating of coal. *Journal of the American Ceramic Society*. 7 (11): 809-816.
- Davis, J.D. and Byrne, J.F. (1926). Influence of moisture on the spontaneous heating of coal. *Industrial & Engineering Chemistry*. 18 (3): 233-236.
- 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*. 21 (2): 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*. 1 (1): 20-26.
- Deng, J., Lei, C., Xiao, Y., Cao, K., Ma, L., Wang, W. and Laiwang, B. (2018). Determination and prediction on “three zones” of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face. *Fuel*. 211: 458-470.
- Deng, J., Li, Q., Xiao, Y. and Wen, H. (2017). The effect of oxygen concentration on the non-isothermal combustion of coal. *Thermochimica Acta*. 653: 106-115.
- Deng, J., Ma, X., Zhang, Y., Li, Y. and Zhu, W. (2015). Effects of pyrite on the spontaneous combustion of coal. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2 (4): 306-311.
- DeRosa, M.I. (2004). Analysis of Mine Fires for all U.S. Underground and Surface Coal Mining Categories: 1990-1999. NIOSH Information Circular/2004 IC 9470. 36 P.
- Dietze, V., Seyed-Emami, K. and Raoufian, A. (2014). Morphoceras Douvillé, 1880 and Ebrayiceras Buckman, 1920 from the Dalichai Formation (Lower Bathonian) North and Northeast of Damghan (Northeast Alborz), Iran. *Zitteliana*. pp. 15-22.
- 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*. 86 (1): 108-119.
- Dou, G. and Zhong, X. (2017). Study on the differences in the oxidation characters of two chinese coals. *RSC Advances*. 7 (30): 18374-18378.
- Draper, N.R. and Smith, H. (2014). *Applied regression analysis* (Vol. 326). John Wiley & Sons.
- Duncan, G.J. (1998). Hydraulic coal mining developments in New Zealand. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 333-342.

E

- Engelbrecht, A.P. (2007). *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons.

F

- Falcon, R.M.S. (1986). Classification of coals in Southern Africa. In: Anhaeusser, C.R., Maske, S. (Eds.), Mineral Deposits of Southern Africa, vols. I and II. Geological Society of South Africa, Johannesburg, pp. 1879-1898.
- Falcon, R.M.S. and Snyman, C.P. (1986). An introduction to coal petrography: atlas of petrographic constituents in the bituminous coals of Southern Africa. Geological Society of South Africa.
- Feng, G., Zhang, C., Hu, S., Shao, H., Xu, G., Ren, X. and Wang, Z. (2017). Changes on the low-temperature oxidation characteristics of coal after CO₂ adsorption: A case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Article in press.
- Feng, K.K., Chakravorty, R.N. and Cochrane, T.S. (1973). Spontaneous combustion-coal mining hazard. *CIM Bulletin*. 66 (738): 75-84.
- Finkelman, R.B. (2004). Potential health impacts of burning coal beds and waste banks. *International Journal of Coal Geology*. 59 (1): 19-24.
- Fontela, E. and Gabus, A. (1974). DEMATEL, innovative methods, technical report no. 2, structural analysis of the world problematique. Battelle Geneva Research Institute.
- Fontela, E. and Gabus, A. (1976). The DEMATEL observer. Battelle Institute, Geneva Research Center.
- Frough, O. and Torabi, S.R. (2013). An application of rock engineering systems for estimating TBM downtimes. *Engineering Geology*. 157: 112-123.
- Fürsich, F.T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K., Cecca, F. and Majidifard, M.R. (2005). The upper Shemshak Formation (Toarcian–Aalenian) of the Eastern Alborz (Iran): Biota and palaeoenvironments during a transgressive– regressive cycle. *Facies*. 51 (1-4): 365-384.

G

- Gangopadhyay, P.K. (2008). Coalfire related CO₂ emissions and remote sensing. Ph.D. Thesis. The Netherlands. University of Utrecht. ISBN 978-90-6164-267-1. 176 P.
- Garcia, P., Hall, P.J. and Mondragon, F. (1999). The use of differential scanning calorimetry to identify coals susceptible to spontaneous combustion. *Thermochimica Acta*. 336: 41-46. doi: 10.1016/S0040-6031(99)00183-5.
- Gervet, B. (2007). Coal fire emission contributes to global warming. Department of Civil and Environmental Engineering Lulea University of Technology. Sweden. pp. 1-14.
- Gethner, J.S. (1985). Thermal and oxidation chemistry of coal at low temperatures. *Fuel*. 64 (10): 1443-1446.
- Gethner, J.S. (1987 a). The mechanism of the low temperature oxidation of coal by O₂: observation and separation of simultaneous reactions using in situ FT-IR difference spectroscopy. *Applied Spectroscopy*. 41 (1): 50-63.
- Gethner, J.S. (1987 b). Kinetic study of the oxidation of Illinois No. 6 coal at low temperatures: Evidence for simultaneous reactions. *Fuel*. 66 (8): 1091-1096.
- Ghosh, R. (1986). Spontaneous combustion of certain Indian coals- some physico-chemical considerations. *Fuel*. 65 (8): 1042-1046.
- Glantz, S.A., Slinker, B.K. and Neilands, T.B. (1990). Primer of applied regression and analysis of variance (Vol. 309). New York: McGraw-Hill.
- Gokceoglu, C. (2002). A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology*. 66 (1-2): 39-51.

- Gong, R., Burnell, J. G. and Wake, G. C. (1999). Modelling spontaneous combustion in wet lignite. *Combustion Theory and Modelling*. 3 (2): 215-232.
- Goodarzi, F., Sanei, H., Stasiuk, L.D., Bagheri-Sadeghi, H. and Reyes, J. (2006). A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran. *International Journal of Coal Geology*. 65 (1-2): 35-50.
- Grewer, T. (1994). Thermal hazards of chemical reaction. Industrial Safety Series. Elsevier Press. Amsterdam. Vol. 4. 444 P.
- Grubb, J. W. (2008). Preventative measures for spontaneous combustion in underground coal mines (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library).
- Guney, M. (1971). An adiabatic study of the influence of moisture on the spontaneous heating of coal. *CIM Bull.* 64: 138-146.

H

- Ham, B. (2005). A Review of Spontaneous Combustion Incidents. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 237-242.
- Hetao, S., Fubao, Z., Xiaolin, S., Bobo, S. and Shaohua, S. (2016). Risk analysis of coal self-ignition in longwall gob: A modeling study on three-dimensional hazard zones. *Fire Safety Journal*. 83: 54-65.
- Hodges, D.J. and Hinsley, FB. (1964). The influence of moisture on the spontaneous heating of coal. *Mining Engineer*. 123: 211-224.
- Hodges, D.T., Tucker, J.R. and Hartwick, T.S. (1976). Basic physical mechanisms determining performance of the CH₃F laser. In *International Conference on Infrared Physics (CIRP)* (pp. 175-182).
- Hooman, K. and Maas, U. (2014). Theoretical analysis of coal stockpile self-heating. *Fire Safety Journal*. 67: 107-112.
- 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*. 25 (2): 93-105.
- Humphreys, D., Rowlands, D. and Cudmore, J.F. (1981). Spontaneous combustion of some Queensland coals. *Proc. Ignitions, Explosions and Fires in Coal Mines Symposium*. The AusIMM Illawarra Branch. Melbourne. Australia. pp. 5-1:5-19.
- Humphreys, D.R. (1981). A Study of the Propensity of Queensland Coals to Spontaneous Combustion. Brisbane. Australia. The University of Queensland. 108 P.
- Humphreys, M.A. (1979). The variation of comfortable temperatures. *International Journal of Energy Research*. 3 (1): 13-18.
- 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. 134 P.

I

- IEA Clean Coal Centre. (2010). Propensity of coal to self-heat. Profiles- PF 10-14.
- Iglesias, M.J, De la Puente, G., Fuente, E. and Pis, J.J. (1998). Compositional and structural changes during aerial oxidation of coal and their relations with technological properties. *Vibrational Spectroscopy*. 17: 41-52.

Industrial Fire Prevention. (2015). The fire triangle, fire tetrahedron and dust explosion pentagon. <http://industrialfireprevention.blogspot.co.uk/2010/04/fire-triangle-and-fire-tetrahedron.html>. Visited Mar 2015.

ISO 7404-5. (2009). Methods for the petrographic analysis of coal-part 5: Methods of determining microscopically the reflectance of vitrinite.

ISO-7404-3. (2009). Methods for the petrographic analysis of coals. Part 3. Methods of determining maceral group composition.

J

Jones, J.C. (2001). On the extrapolation of results from oven heating tests for propensity to self-heating. *Combustion and Flame*. 124 (1-2): 334-336.

Jones, R.E. and Townend, D.T.A. (1949). The oxidation of coal. *Journal of the Society of Chemical Industry*. 68 (7): 197-201.

K

Kadioglu, Y. and Varamaz, M. (2003). The effect of moisture content and airdrying on spontaneous combustion characteristics of two Turkish lignites. *Fuel*. 82 (13): 1685-1693.

Kaji, R., Hishinuma, Y. and Nakamura, Y. (1985). Low temperature oxidation of coals: Effects of pore structure and coal composition. *Fuel*. 64 (3): 297-302. doi: 10.1016/0016-2361(85)90413-2.

Kaminsky, V.A., Obvintseva, N.Y. and Epshtein, S.A. (2017). The estimation of the kinetic parameters of low-temperature coal oxidation. *AIMS Energy*. 5 (2): 163-172.

Kawatra, S.K. and Hess, M.J. (1999). Environmental beneficiation of machining wastes—Part II: Measurement of the effects of moisture on the spontaneous heating of machining swarf. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 49 (4): 477-481.

Kaymakci, E. and Didari, V. (2002). Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*. 26: 59-64.

Kim, A.G. (1995). Relative self-heating tendencies of coal, carbonaceous shales, and coal refuse. RI9537. Washington, D.C., USA. Department of the Interior. Bureau of Mines. 21 P.

King, J., Krug, D. and Zepf, D. (1964). The role of oxygen complex in oxidation of carbonaceous compounds. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 42 (2): 297-299.

Krishnaswamy, S., Agarwal, P.K. and Gunn, R.D. (1996). Low-temperature oxidation of coal. 3. Modelling spontaneous combustion in coal stockpiles. *Fuel*. 75 (3): 353-362.

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. 37 P.

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*. 133 (3): 255-261.

Kudynska, J. and Buckmaster, H.A. (1992). Dynamic in situ 9 GHz cw-epr low-temperature oxidation study of selected Alberta coals: 3. Influence of exinite macerals and moisture in an hv bituminous coal. *Fuel*. 71 (10): 1141-1145.

Kudynska, J. and Buckmaster, H.A. (1996). Low-temperature oxidation kinetics of high-volatile bituminous coal studied by dynamic in situ 9 GHz c.w. e.p.r.spectroscopy. *Fuel*. 75: 872-878.

Kuenzer, C. and Stracher, G.B. (2012). Geomorphology of coal seam fires. *Geomorphology*. 138 (1): 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*. 82 (1-2): 27-36.
- Lee, H.S., Tzeng, G.H., Yeih, W., Wang, Y.J. and Yang, S.C. (2013). Revised DEMATEL: resolving the infeasibility of DEMATEL. *Applied Mathematical Modelling*. 37 (10-11): 6746-6757.
- Levi, T., Saurat, J., Boaz, G., Beamish, B. and Theiler, J. (2013). Mine hazards- assessing the hazard of coal spontaneous combustion. *International Pittsburgh Coal Conference*. Beijing. China.
- Li, C.W. and Tzeng, G.H. (2009). Identification of a threshold value for the DEMATEL method using the maximum mean de-entropy algorithm to find critical services provided by a semiconductor intellectual property mall. *Expert Systems with Applications*. 36 (6): 9891-9898.
- Li, X., Song, H., Wang, Q., Meesri, C., Wal, L.T. and Yu, J. (2009). Experimental study on drying and moisture re-adsorption kinetics of an Indonesian low rank coal. *Journal of Environmental Sciences*. 21: S127-S130.
- Li, Y.H. and Skinner, J.L. (1986). Deactivation of dried subbituminous coal. *Chemical Engineering Communications*. 49 (1-3): 81-98.
- Lilley, W., Day, S., Williams, D., Rae, M. and Carras, J. (2012). A comparison of three methods for the quantification of greenhouse gas emissions from spontaneous combustion in open-cut coal mines. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 2(2-3), 93-105.
- Lin, C.L. and Tzeng, G.H. (2009). A value-created system of science (technology) park by using DEMATEL. *Expert systems with applications*. 36 (6): 9683-9697.
- Litton, C.D. and Page, S.J. (1994). Letter to publisher. *Fuel Magazine*. 73 (8): 1369.
- Liu, W. and Qin, Y. (2017). Multi-physics coupling model of coal spontaneous combustion in longwall gob area based on moving coordinates. *Fuel*. 188: 553-566.
- Liu, Y.C. and Chen, C.S. (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering geology*. 89 (1-2): 129-143.
- Lopez, D., Sanada, Y. and Mondragon, F. (1998). Effect of low-temperature oxidation of coal on hydrogen-transfer capability. *Fuel*. 77: 1623-1628.

M

- Mahadevan, V. and Ramlu, M.A. (1985). Fire risk rating of coal mines due to spontaneous heating. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 33 (8): 357-362.
- Majumder, A.K., Jain, R., Banerjee, P. and Barnwal, J.P. (2008). Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. *Fuel*. 87 (13-14): 3077-3081.
- Malos, J., Beamish, B., Munday, L., Reid, P. and James, C. (2013). Remote monitoring of subsurface heatings in opencut coal mines. *Coal Operators' Conference*. University of Wollongong. Australia. pp. 228-232.
- Marinov, V.N. (1977 a). Self-ignition and mechanisms of interaction of coal with oxygen at low temperatures. 1. Changes in the composition of coal heated at constant rate to 250 °C in air. *Fuel*. 56: 153-157.
- Marinov, V.N. (1977 c). Self-ignition and mechanisms of interaction of coal with oxygen at low temperatures. 3. Changes in the composition of coal heated in air at 60 °C. *Fuel*. 56: 165-170.
- Marinov, V.N. (1977 b). Self-ignition and mechanisms of interaction of coal with oxygen at low temperatures. 2. Changes in weight and thermal effects on gradual heating of coal in air in the range 20-300 °C. *Fuel*. 56: 158-164.

- Marts, J. (2015). Nitrogen injection in progressively sealed longwall gobs and the formation of a complete and dynamic seal (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library).
- 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 and Hydrogeology*. 29 (1): 37-56.
- MDG 1006. (2011). Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline. Produced by Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW.
- Michalski, S.R., Winschel, L.J. and Gray, R.E. (1990). Fires in abandoned coal mines. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 27 (4): 479-495.
- Michaylov, M. (2002). Expert system for assessment of risk from spontaneous combustion. *Mining and Mineral Processing*. 44-45 (2): 27-35.
- Miron, Y., Lazzara, C.P. and Smith, A.C. (1992). Cause of floor self heatings in an underground coal mine. US Department of the Interior, Bureau of Mines (USBM RI-9415). pp. 1-22.
- Mitchel, P. (2003). Controlling and Reducing Heat on Longwall Faces. Coal Operators' Conference. University of Wollongong. Australia. pp. 234-245.
- Mitchell, D.W. (1990). Mine Fires Prevention, Detection, Fighting. United States of America: Maclean Hunter Publishing Company. ISBN 0-92531-10-8. 167 P.
- Mohalik, N. K., Singh, R. V. K., Pandey, J. and Singh, V. K. (2005). Application of nitrogen as preventive and controlling subsurface fire-Indian context. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 64: 273-280.
- Mohalik, N., Singh, R., Singh, V. and Tripathi, D. (2009 a). 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.
- Mohalik, N.K., Lester, E. and Lowndes, I.S. (2016). Review of experimental methods to determine spontaneous combustion susceptibility of coal- Indian context. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 31 (5):301-332.
- Mohalik, N.K., Lester, E. and Lowndes, I.S. (2017 b). Development of a petrographic technique to assess the spontaneous combustion susceptibility of Indian coals. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. pp. 1-24. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1360874>.
- Mohalik, N.K., Pandey, J. and Singh, R.V.K. (2017 a). Development of a Spontaneous Heating/Fire Risk Index for Opencast Coal Mines. *Mining Engineers Journal*. 18 (10): 16-24.
- Mohalik, N.K., Panigrahi, D.C. and Singh, V.K. (2009 b). Application of thermal analysis techniques to assess proneness of coal to spontaneous heating. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 98 (2): 507-519. doi: 10.1007/s10973-009-0305-z.
- Mohan Ram, A. and Kiran, B.R. (2013). A Brief Review on the Status of Coal Fire in India. *International Journal of Environmental Biology*. 3 (3): 133-142.
- Moore, F. and Esmaili, A. (2012). Mineralogy and geochemistry of the coals from the Karmozd and Kiasar coal mines, Mazandaran province, Iran. *International Journal of Coal Geology*. 96: 9-21.
- Moosavirad, S.M., Rasouli, J., Janardhana, M.R., Moghadam, M.R. and Shankara, M. (2013). Petrographic, mineralogy, and geochemistry of coals of Pabedana, Kerman Province, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 6 (10): 3623-3634.

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*. 20 (2): 41-48.
- Nandy, D.K., Banerjee, D.D., Banerjee, S.C. and Chakravorty, R.N. (1967). Effect of moisture on the self-heating characteristics of coal. *J. Mines, Met. Fuels*. 15 (10): 297-301.
- 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*. 18: 31-83.
- Newham, B., Beamish, B., Brady, M. and Fellowes, M. (2016). Interpreting the Status of an Underground Coal Mine Heating for Valid Risk Management and Control. *Coal Operators' Conference*. University of Wollongong, Australia. pp. 456-462.
- Nimaje, D.S. and Tripathy, D.P. (2016). Characterization of some Indian coals to assess their liability to spontaneous combustion. *Fuel*. 163: 139-147.
- Nordon, P. and Bainbridge, N.W. (1983). Heat of wetting of a bituminous coal. *Fuel*. 62: 619-620.
- Nugroho, Y.S., McIntosh, A.C. and Gibbs, B.M. (1998). Using the crossing point method to assess the self-heating behavior of Indonesian coals. In *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*. pp. 2981-2989.
- Nugroho, Y.S., McIntosh, A.C. and Gibbs, B.M. (2000 a). Low-temperature oxidation of single and blended coals. *Fuel*. 79: 1951-1961. doi: 10.1016/S0016-2361(00)00053-3.
- Nugroho, Y.S., McIntosh, A.C. and Gibbs, B.M. (2000 b). On the prediction of thermal runaway of coal piles of differing dimension by using a correlation between heat release and activation energy. In: *Twenty-Eighth Symposium (International) on Combustion: Pittsburgh*. Pennsylvania. The Combustion Institute. pp. 2321-2327.

O

- Onifade, M. and Genc, B. (2018 a). Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology*. pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.013>.
- Onifade, M. and Genc, B. (2018 b). Modelling spontaneous combustion liability of carbonaceous materials. *International Journal of Coal Science & Technology*. 5 (2): 191-212.
- Oren, O. and Sensogut, C. (2018). Determination of Safe Storage Types for Coals with Regard to Their Susceptibility to Spontaneous Combustion–Tuncbilek Coal Case. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 38 (6): 290-301.
- Ozdeniz, H. (2009). Statistical modeling of spontaneous combustion in industrial-scale coal stockpiles. *Energy Sources, Part A*. 31 (15): 1368-1375.

P

- Palmer, A.D., Cheng, M., Goulet, J.C. and Furimsky, E. (1990). Relation between particle size and properties of some bituminous coals. *Fuel*. 69 (2): 183-188.
- Panigrahi, D.C. and Bhattacharjee, 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*. 104 (7): 367-380.
- Panigrahi, D.C. and Ray, S.K. (2014). Assessment of self-heating susceptibility of Indian coal seams—a neural network approach. *Archives of Mining Sciences*. 59 (4): 1061-1076.
- 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*. 22 (4): 457-476.
- Panigrahi, D.C. and Saxena, V.K. (2001). An investigation into spontaneous combustion characteristics

of coals using differential thermal analysis. Proceedings 7th International Mine Ventilation Congress. Krakow. Poland. pp. 495-500.

Parr, S.W. and Hilgard, E.R. (1925). Oxidation of Sulfur as a Factor in Coal Storage. *Industrial & Engineering Chemistry*. 17 (2): 117-118.

Peng, G., Wang, H., Song, X. and Zhang, H. (2017). Intelligent management of coal stockpiles using improved grey spontaneous combustion forecasting models. *Energy*. 132: 269-279.

Pone, J.D.N., Hein, K.A.A., Stracher, G.B., Annegarn, H.J., Finkleman, R.B., Blake, D.R., McCormack, J.K. and Schroeder, P. (2007). The spontaneous combustion of coal and its by-products in the Witbank and Sasolburg coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*. 72 (2): 124-140.

Q

Qi, X., Xin, H., Wang, D. and Qi, G. (2013). A rapid method for determining the R₇₀ self-heating rate of coal. *Thermochimica Acta*. 571: 21-27.

Querol, X., Zhuang, X., Font, O., Izquierdo, M., Alastuey, A., Castro, I., Van Drooge, B.L., Moreno, T., Grimalt, J.O., Elvira, J., Cabanas, M., Bartroli, R., Hower, J.C., Ayora, C., Plana, F. and Lopez-Soler, A. (2011). Influence of soil cover on reducing the environmental impact of spontaneous coal combustion in coal waste gobs: a review and new experimental data. *International Journal of Coal Geology*. 85 (1): 2-22.

R

Rahman, M., Hasan, A. R. and Baria, D. N. (1986). Low temperature oxidation of low rank coals. *Chemical Engineering Communications*. 46 (4-6): 209-226.

Raju, G.S.N. (1988). Auto oxidation in Indian coal mines- an investigation. *J. Mine Met. Fuels*. 9: 437-441.

Ramlu, M.A. (2007). *Mine Disasters and Mine Rescue*. 2nd edition. Chapter 1. mine fires. Hyderabad: Universities Press. ISBN: 9788173715730. pp. 2-15.

Reich, M.H., Snook, I.K. and Wagenfeld, H.K. (1992). A fractal interpretation of the effect of drying on the pore structure of Victorian brown coal. *Fuel*. 71 (6): 669-672.

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*. 78 (14): 1611-1620.

Ren, T.X., Wang, Z., Nemicik, J.A., 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.

Rhead, T.F.E. and Wheeler, R.V. (1910). Effect of Temperature on the Equilibrium $2\text{CO}=\text{CO}_2+\text{C}$. *Jour. Chem. Soc.* 97: 2178-2189.

Riley, J.T., Reasoner, J.W., Fatemi, S.M. and Yates, G.S. (1987). Self-heating of coal in barges. *Journal Article Department of Chemistry and Center for Coal Science*. Western Kentucky University. Bowling Green. Kentucky. pp. 162-170.

Rosenblum, F., Nasset, J.E., Moon, S., Finch, J.A. and Waters, K.E. (2017). Reducing the self-heating of sulphides by chemical treatment with lignosulfonates. *Minerals Engineering*. 107: 78-80.

Rumsey, D.J. (2015). *U Can: statistics for dummies*. John Wiley & Sons.

S

Saffari, A., Sereshki, F., Ataei, M. and Ghanbari, K. (2013). Applying Rock Engineering Systems (RES) approach to Evaluate and Classify the Coal Spontaneous Combustion Potential in Eastern Alborz Coal Mines. *International Journal of Mining & Geo-Engineering*. 47 (2): 115-127.

Saffari, A., Sereshki, F., Ataei, M. and Ghanbari, K. (2017). Presenting an engineering classification system for coal spontaneous combustion potential. *International Journal of Coal Science & Technology*. 4 (2): 110-128.

Sahu, H.B. and Mahapatra, S.S. (2013). Forecasting Spontaneous Heating Susceptibility of Indian Coals Using Neuro Fuzzy System. *Geotechnical and Geological Engineering*. 31 (2): 683-697.

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*. 52 (7-8): 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.

Saleh, M., Muharram, Y. and Nugroho, Y.S. (2017). Modeling of the crossing point temperature phenomenon in the low-temperature oxidation of coal. *International Journal of Technolog*. 8 (1): 104-113.

Sasaki, K. and Sugai, Y. (2011). Equivalent Oxidation Exposure- Time for Low Temperature Spontaneous Combustion of Coal, in *Heat Analysis and Thermodynamic Effects* (ed: A Ahsan). pp. 235-254.

Sasaki, K., Wang, Y., Sugai, Y. and Zhang, X. (2014). Numerical modelling of low rank coal for spontaneous combustion. *Coal Operators' Conference*. University of Wollongong. Australia. pp. 344-349.

Schmal, D., Duyzer, J.H. and van Heuven, J.W. (1985). A model for the spontaneous heating of coal. *Fuel*. 64 (7): 963-972.

Schmidt, L.D. and Elder, J.L. (1940). Atmospheric oxidation of coal at moderate temperatures. *Engineering and Industrial Chemistry*. 32 (2): 249-256. doi: 10.1021/ie50362a021.

Sensogut, C. (1999). Spontaneous combustion related fire ratios. *Journal of Engineering Sciences*. 5 (1): 1009-1014.

Sereshki, F. (2005). Improving coalmine safety by identifying factors that influence the sudden release of gasses in outburst-prone zones. Ph.D. thesis, School of Civil, Mining, and Environmental Engineering, University of Wollongong, Australia 2005.

Shi, Q., Qin, B., Liang, H., Gao, Y., Bi, Q., and Qu, B. (2018). Effects of igneous intrusions on the structure and spontaneous combustion propensity of coal: A case study of bituminous coal in Daxing Mine, China. *Fuel*. 216: 181-189.

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*. 69

(3): 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*. 11 (2): 147-163. doi: 10.1142/S0950609802000938.
- Singh, R.V.K., Tripathi, D.D., Mohalik, N.K., Khalkho, A., Pandey, J. and Mishra, R.K. (2018). Environmental Issues Due to Fire in Coal Mines: Its Impact and Suggestions for Implementing Precautionary and Control Measures. In *Environmental Pollution conference*. pp. 27-35.
- Sinha, P.R. (1986). Mine fires in indian coalfields. *Energy*. 11 (11-12): 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*. 25 (3): 617-622.
- Smith, A.C. and Lazzara, C.P. (1987). Spontaneous Combustion Studies of U.S. Coal. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation No. 9079. 28 P.
- Smith, M.A. and Glasser, D. (2005). Spontaneous combustion of carbonaceous stockpiles. Part II: Factors affecting the rate of the low-temperature oxidation reaction. *Fuel*. 84 (9): 1161-1170. doi: 10.1016/j.fuel.2004.12.005.
- Sondreal, E. A. and Ellman, R. C. (1974). Laboratory determination of factors affecting storage of North Dakota lignite: computer simulation of spontaneous heating. [28 refs; graphs] (No. BM-RI-7887). Bureau of Mines, Grand Forks, N. Dak. (USA). Grand Forks Energy Research Lab.
- Song, Z. and Kuenzer, C. (2014). Coal fires in China over the last decade: a comprehensive review. *International Journal of Coal Geology*. 133: 72-99.
- Speight, J.G. (2015). *Handbook of coal analysis*. John Wiley & Sons. ISBN 9780471522737.
- Stach, E. (1982). *Stach's textbook of coal petrology*. 3rd ed. Gebr.Borntrager, Berlin/Stuttgart. ISBN 978-3-443-01018-8. 535 P.
- Stott, J.B. (1960). Influence of moisture on the spontaneous combustion of coals. *Nature*. 54 P.
- Stracher, G.B. (2012). Coal Fires of the United States, In *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Volume 2: Photographs and Multimedia Tours Stracher, G.B., Prakash, A. and Sokol, E.V. (eds). The Netherlands. Elsevier. pp. 441-528.
- Su, H., Zhou, F., Li, J. and Qi, H. (2017). Effects of oxygen supply on low-temperature oxidation of coal: A case study of Jurassic coal in Yima, China. *Fuel*. 202: 446-454.
- Sujanti, W. and Zhang, D.K. (1999). A laboratory study of spontaneous combustion of coal: the influence of inorganic matter and reactor size. *Fuel*. 78 (5): 549-556. doi: 10.1016/S0016-2361(98)00188-4.
- Sujanti, W. and Zhang, D.K. (2000). Investigation into the role of inherent inorganic matter and additives in low-temperature oxidation of a Victorian brown coal. *Combustion Science and Technology*. 152 (1): 99-114.
- 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*. 117 (3): 646-651.
- Suzuki, T., Ohtaguchi, K. and Koide, K. (1994). Correlation between flash points and chemical structures of organic compounds, using principal component analysis, *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 16, No. 6 (1990), Japan. *International Chemical Engineering*. 34 (3): 393-402.

T

- Taraba, B. and Michalec, Z. (2011). Effect of longwall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area- CFD modeling. *Fuel*. 90: 2790-2797.
- Taraba, B., Peter, R., Slovak, V. and Maršalek, R. (2006). Interaction of oxygen with coal matter from the chemical engineer point of view. In: Conference Benefit of the universities to regions transformation. Ostrava. Ostrava University. ISBN:80-7368-225-7 [in Czech]. pp. 149-152.
- Tripathy, D.P. and Pal, B.K. (2001). Spontaneous heating susceptibility of coals-Evaluation based on experimental techniques. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 49 (7): 236-240.
- Tzeng, G.H., Chiang, C.H. and Li, C.W. (2007). Evaluating intertwined effects in e-learning programs: A novel hybrid MCDM model based on factor analysis and DEMATEL. *Expert systems with Applications*. 32 (4): 1028-1044.

U

- Uludag, S. (2001). Assessing Spontaneous Combustion Risk in South African Coal Mines Using a GIS Tool. M.Sc. Dissertation. University of Witwatersrand. South Africa. 154 P.

V

- Van Genderen, J.L. (2012). Coal and peat fires: a global perspective. Volume 1: Coal- geology and combustion.
- Van Krevelen, D.W. (1961). *Coal*. Elsevier, Amsterdam.
- Van Krevelen, D.W. (1993). *Coal: Typology-Physics-Chemistry-Constitution (Coal Science & Technology)*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Vance, W.E., Chen, X.D. and Scott, S.C. (1996). The rate of temperature rise of a subbituminous coal during spontaneous combustion in an adiabatic device: The effect of moisture content and drying methods. *Combustion and Flame*. 106: 261-270.

W

- Walters, A.D. (1996). Joseph Conrad and the spontaneous combustion of coal- part 1. coal preparation. Amsterdam B.V. Published in The Netherlands under license by Gordon and Breach Science Publishers. 17 (3-4): 147-165.
- Wang, G., Xie, J., Xue, S. and Wang, H. (2015). Laboratory study on low-temperature coal spontaneous combustion in the air of reduced oxygen and low methane concentration. *Tehnički vjesnik*. 22 (5): 1319-1325.
- Wang, H., Dlugogorski, B.Z. and Kennedy, E.M. (2003 a). Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*. 29 (6): 487-513.
- Wang, H., Dlugogorski, B.Z. and Kennedy, E.M. (2003 b). Pathways for production of CO₂ and CO in low-temperature oxidation of coal. *Energy & fuels*. 17 (1): 150-158.
- Wang, J.R., Sun, Y.Q., Zhao, Q.F., Deng, C.B. and Deng, H.Z. (2008). Basic theory research of coal spontaneous combustion. *Journal of coal science & engineering*. 14 (2): 239-243.
- Wang, Q.S., Guo, S. and Sun, J.H. (2009). Oxygen and moisture effects on the thermal behavior of coal powder at elevated temperature. *Fire Saf. Sci*. 1: 1-5.
- Wang, W., Wang, G. and Liu, H. (2013). Heat release regular pattern of different moisture content coal in low temperature. *CSIRO Earth Sci. Resour. Eng*. 94: 419-425.
- Wang, X., Luo, Y. and Vieira, B. (2018). Experimental technique and modeling for evaluating heat of rewetting effect on coals' propensity of spontaneous combustion based on adiabatic oxidation method. *International Journal of Coal Geology*. 187: 1-10

- Wang, X.Y. and Luo, Y. (2011). Experimental Studies of Spontaneous Combustion Propensity of Coal. 2011 International Pittsburgh Coal Conference. Pittsburgh. PA.
- Watanabe, W.S. and Zhang, D.K. (2001). The effect of inherent and added inorganic matter on low-temperature oxidation reaction of coal. *Fuel Processing Technology*. 74 (3): 145-160.
- Weise, R.G., Powell, M.A. and Fyfe, W.S. (1987). Spontaneous formation of hydrated iron sulfates on laboratory samples of pyrite- and marcasite- bearing coals. *Chemical Geology*. 63 (1-2): 29-38.
- Wen, H. (2011). Experiment research on effect of sulfur on characteristic parameters of coal spontaneous combustion. *Safety in Coal Mines*. 42 (10): 5-7.
- Wojtacha-Rychter, K. and Smoliński, A. (2018). The interaction between coal and multi-component gas mixtures in the process of coal heating at various temperatures: An experimental study. *Fuel*. 213: 150-157.
- World Coal. (2015). Coal news international: a spate of fatal; accidents refocuses attention on mine safety. *World coal*.
- Wu, C. and Li, Z. (2005). A simple method for predicting the spontaneous combustion potential of sulphide ores at ambient temperature. *Mining Technology*, 114(2), 125-128.
- Wu, D., Norman, F., Vanierschot, M., Verplaetsen, F. and Berghmans, J. (2018). Self-heating characteristics of coal dust deposits by a hot gas flow in oxy-fuel atmospheres. *Applied Thermal Engineering*. 131: 947-957.
- Wu, J., Wu, Y., Wang, J. and Zhou, C. (2012). Radon measuring to detect coal spontaneous combustion fire source at Bulianta mine, Shendong. *Coal Operators' Conference*. University of Wollongong. Australia. pp. 300-304.
- www.cb3mineservices.com (2016). Date of review site: June 12, 2016.
- www.miningmayhem.com (2013). Date of review site: September 29, 2017.
- www.omega.com (2016). Date of review site: November 25, 2016.

X

- Xi, Z., Guo, X. and Liew, J.R. (2018). Investigation of thermoplastic powder synergizing polymorphic foam to inhibit coal oxidation at low temperature. *Fuel*. 226: 490-497.
- Xia, T., Wang, X., Zhou, F., Kang, J., Liu, J. and Gao, F. (2015). Evolution of coal self-heating processes in longwall gob areas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 86: 861-868.
- Xstrata Coal. (2016). Spontaneous Combustion Management Plan. Liddell Coal Operations. Mining Plan. LCO MIN PLN 0007.
- Xu, T., Wang, D.M. and He, Q.L. (2013). The study of the critical moisture content at which coal has the most high tendency to spontaneous combustion. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 33 (3): 117-127.
- Xu, T., Xie, Q. and Kang, Y. (2017a). Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes. *Advanced Powder Technology*. 28 (8): 1841-1848. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2017.01.015>.
- Xu, Y.L., Wang, L.Y., Tian, N., Zhang, J.P., Yu, M.G. and Delichatsios, M.A. (2017b). Spontaneous combustion coal parameters for the Crossing-Point Temperature (CPT) method in a Temperature-Programmed System (TPS). *Fire Safety Journal*. Article in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.084>.
- Xuyao, Q., Wang, D., Milke, J.A. and Zhong, X. (2011). Crossing point temperature of coal. *Mining science and technology (China)*. 21 (2): 255-260.

Y

- Yang, Y., Li, Z., Si, L., Gu, F., Zhou, Y., Qi, Q. and Sun, X. (2017). Study governing the impact of long-term water immersion on coal spontaneous ignition. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 42 (4): 1359-1369.
- Yohe, G.R. (1958). *Oxidation of Coal*. Illinois State Geological Survey Report, No 207, 79 P.
- Yuan, L. and Smith, A.C. (2010). Effect of longwall face advance on spontaneous heating in longwall gob area. *Mining Eng.* 62 (3): 34-38.
- Yuan, L. and Smith, A.C. (2012). The effect of ventilation on spontaneous heating of coal. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 25: 131-137.

Z

- Zdravkov, A. and Kortenski, J. (2004). Maceral composition and depositional environment of the coals from Beli Breg basin, Bulgaria. *Rev Bulg Geolog Soc.* 65: 157-66.
- Zhang, D.K. and Sujanti, W. (1999). The effect of exchangeable cations on low temperature oxidation and self-heating of a Victorian brown coal. *Fuel*. 78: 1217-1224. doi: 10.1016/S0016-2361(99)00036-8.
- Zhang, J., Choi, W., Ito, T., Takahashi, K. and Fujita, M. (2016 b). Modelling and parametric investigations on spontaneous heating in coal pile. *Fuel*. 176: 181-189.
- Zhang, J., Ren, T., Liang, Y. and Wang, Z. (2016 a). A review on numerical solutions to self-heating of coal stockpile: Mechanism, theoretical basis, and variable study. *Fuel*. 182: 80-109.
- Zhang, Y., Dong, J., Guo, F., Chen, X., Wu, J. and Miao, Z. (2018). Experimental Study on the Effects of Drying Methods on the Stabilities of Lignite. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 26 (7): 1545-1554
- Zhao, H., Geng, X., Yu, J., Xin, B., Yin, F. and Tahmasebi, A. (2016). Effects of drying method on self-heating behavior of lignite during low-temperature oxidation. *Fuel Processing Technology*. 151: 11-18.

Abstract

The hazards of coal mining are one of the limiting factors in mining design. One of the most important hazards associated with coal mining is coal spontaneous combustion. The process of coal spontaneous combustion should be carefully considered because of the direct impact on the safety and environmental contamination. Therefore, the subject of this research was titled "**Presentation of a quantitative and qualitative model for evaluation of coal seam spontaneous combustion potential**" to make the first progress in this field by making a coal spontaneous combustion evaluator system. In this thesis, the first step was to investigate the various literature reviews and then, using coal sampling from the mines, and carrying out precise experiments, the coal spontaneous combustion process and the effective parameters were investigated. In the next step, a new qualitative and quantitative model was presented. These models consist of all of the coal intrinsic characteristics to determine the coal seam spontaneous combustion potential. Using these new indexes, we can assess the relationship between the coal intrinsic characteristics and the results of coal spontaneous combustion. For this purpose, the qualitative model has been developed using a combination of fuzzy Delphi rock engineering systems method (FDRES) and decision making trial and evaluation laboratory method (DEMATEL). This model presents an index entitled CSCSi (Coal Seam Combustion Spontaneously index) as a classification system with accuracy and ease of use that describes the coal seam spontaneous combustion potential in three safe, precautionary and unsafe classes. In order to develop a quantitative model using principal component analysis (PCA), the most important components and parameters were identified and based on which a quantitative model was presented. To validate the models, the laboratory data related to the 13 seams of the central Alborz coal mines were used. It was concluded the proposed models are simple and efficient tools to evaluate the coal seam spontaneous combustion potential.

Keywords

Coal, Coal Spontaneous Combustion Potential, Coal Intrinsic Characteristics, CPT Method, R₇₀ Method, Qualitative Model, Quantitative Model.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mineral Exploitation

Presentation of a quantitative and qualitative model for evaluation of coal seam spontaneous combustion potential

By: Amir Saffari

Supervisors:
Prof. Farhang Sereshki
Prof. Mohammad Ataei

July, 2019