





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تأثیر پارامترهای ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ

(مطالعه موردی: معادن زغال سنگ کرمان)

دانشجو

بهمن ملک ریسی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطایی

تیر ۱۳۹۸

شماره: ۲-۴۴۹۸۴۱۰۲
تاریخ: ۱۷/۴/۹۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

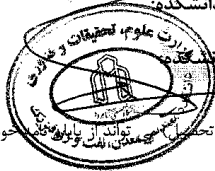
فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای بهمن ملک زینبی با شماره دانشجویی ۹۵۱۴۲۹۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان بررسی تأثیر پارامترهای ذاتی بر روی خودسوزی زغال سنگ (مطالعه موردی: معادن زغال سنگ کرمان) که در تاریخ ۱۳۹۸/۴/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: <u>خیلی خوب</u>)			
<input type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/> نظری			
امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	استاد	دکتر فرهنگ سرشکی	۱- استاد راهنمای اول
	استاد	دکتر محمد عطایی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر اصغر عزیزی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر محمد کارآموزیان	۵- استاد ممتحن اول
	استاد یار	دکتر رامین رفیعی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تصیر: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیلی) می تواند از پانزدهم به بعد خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است.

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سپرترین نگاه زندگی‌م، چشمان سپر مادرم

که هر چه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هر چه پکوشتم قطره‌ای از دریای پی‌کران
مهربانیتان را سپاس بگویم.

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

را آوردی گران سنگ‌تر از این ارزان نداشت‌م تا به خاک پایت‌ان نثار کنم، باشد که حاصل تلاش‌م
نسیم گونه غبار خستگی‌تان را برداید.

پوسه پر دستان پر مهرتان

با سپاس از سه وجود مقدس:

آن که نتوان شد تا من به توانایی پرسم.....

مویش سفید شد تا من روسفید شوم.....

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود من و روشنگر راهم باشند.....

پدرم

مادرم

استادانم

از اساتید گرامیم پروفیسور فرهنگ سرشکی و پروفیسور محمد عطائی بسیار سپاسگذارم چرا که بدون راهنمایی‌های اساتید تأمین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌نمود.

از آقای دکتر امیر صفاری به دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشمداشت ایشان که بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان‌تر نمودند.

تهدیه نامه

اینجانب **بهمن ملک رئیسی**، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن (استخراج مواد معدنی) دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده رساله با عنوان "**بررسی تأثیر عوامل ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ (مطالعه موردی معادن زغال سنگ کرمان)**"، تحت راهنمایی **دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطایی** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این رساله، توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهش‌گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این رساله تاکنون توسط خود و یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر به دانشگاه صنعتی شاهرود، تعلق دارد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود یا Shahrood University of Technology به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آوردن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در تمام مراحل انجام این رساله ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در تمام مراحل انجام این رساله در مواردی که به حوزه اطلاعاتی شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده شده است) اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

بهمن ملک رئیسی

تیرماه ۱۳۹۸

مالکیت نتایج و حق نشر

- * تمام 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 این رساله بدون ذکر منبع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

زغال سنگ یکی از مهم‌ترین منابع سوخت‌های فسیلی است که در صنایع فولاد و نیروگاه‌های برق کاربرد فراوانی دارد. یکی از جدی‌ترین خطرات در معدنکاری زغال سنگ، خطر خودسوزی زغال سنگ است. خودسوزی زغال سنگ به عوامل مختلفی بستگی دارد، که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به پارامترهای ذاتی زغال سنگ اشاره کرد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر ویژگی‌های ذاتی زغال سنگ بر میزان خودسوزی زغال سنگ در تعدادی از معادن زغال سنگ کرمان در ایران است. برای این منظور نمونه‌های زغال سنگ از ۶ معدن زغال سنگ کرمان (هشونی، پابدانا اصلی، اسداباد زیرزمینی، هجدک، همکار و گلتوت) جمع‌آوری و مشخصه‌های نمونه‌های زغال سنگ مشخص شد. در این مطالعه به منظور تعیین میزان تمایل به خودسوزی برای نمونه‌های زغالی مختلف با توجه به خواص ذاتی زغال سنگ، از آزمایش دمای نقطه تقاطعی (CPT) استفاده شد. مقادیر CPT برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد و ارتباط بین ویژگی‌های ذاتی زغال سنگ و مقادیر CPT تعیین شد. نتایج نشان داد که معدن اسداباد زیرزمینی و گلتوت دارای پتانسیل بالای احتراق خودبه خودی هستند. این نتایج همچنین نشان داد که افزایش میزان رطوبت، پیریت، ویتروپیت و لیپتینت باعث افزایش تمایل به احتراق خودبه‌خودی در این معادن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خودسوزی زغال سنگ، پارامترهای ذاتی، دمای نقطه تقاطعی (CPT)

مقالات مستخرج شده

مقالات کنفرانسی چاپ شده

ملک رئیسی ب، سرشکی ف، عطایی م، صفاری ا، (۱۳۹۷) "بررسی تأثیر پارامتر رطوبت محتوی بر خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT)"، اولین کنفرانس ملی معدنکاری و صنایع معدنی سبز ایران، دانشگاه زنجان.

ملک رئیسی ب، سرشکی ف، عطایی م، صفاری ا، (۱۳۹۷) "بررسی تأثیر پارامتر پیریت محتوی بر خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT)" دومین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالوژی و معدن ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز.

فهرست مطالب

فصل ۱ : کلیات تحقیق	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- بیان مسئله پژوهش	۳
۱-۳- ضرورت انجام تحقیق	۴
۱-۴- هدف و روش انجام تحقیق	۵
۱-۵- ساختار تحقیق	۶
فصل ۲ : مبانی، مفاهیم و مکانیزم خودسوزی	۷
۲-۱- مقدمه	۸
۲-۲- شکل گیری زغال سنگ	۹
۲-۳- آتش سوزی داخلی یا خودسوزی	۱۱
۲-۴- تاریخچه آتش سوزی در معادن	۱۲
۲-۵- مکانیزم خودسوزی زغال سنگ	۱۳
۲-۶- تأثیرهای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی خودسوزی زغال سنگ	۱۷
۲-۶-۱- تأثیرهای زیست محیطی	۱۷
۲-۶-۲- تأثیرات اجتماعی	۲۰
۲-۶-۳- تأثیرات اقتصادی	۲۰
۲-۷- مناطق مستعد بروز پدیده خودسوزی در معادن زغال سنگ	۲۰
۲-۷-۱- منطقه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی	۲۰

- ۲-۷-۲- منطقه استخراج در روش اتاق و پایه ۲۱
- ۲-۷-۳- انباشت زغال (زغال‌های ریخته شده بالایی) ۲۲
- ۲-۷-۴- لنگه‌های مرزی جانبی ۲۲
- ۲-۷-۵- زغال برجا ۲۳
- ۲-۷-۶- انباشتگاه‌های باطله در سطح زمین ۲۳
- ۲-۸-۸- پارامترهای موثر بر خودسوزی زغال سنگ ۲۳
- ۲-۸-۱- عوامل ذاتی ۲۴
- ۲-۸-۲- عوامل زمین شناسی ۳۲
- ۲-۸-۳- عوامل معدن کاری ۳۵
- ۲-۹-۹- روش‌های پیش‌گیری از خودسوزی ۴۱
- ۲-۹-۱- خنثی سازی با استفاده از نیتروژن ۴۱
- ۲-۹-۲- فوم ۳ فازی ۴۱
- ۲-۱۰-۱- جمع بندی ۴۲
- فصل سوم: سابقه علمی موضوع و روش‌های بررسی خودسوزی ۴۳
- ۳-۱- مقدمه ۴۴
- ۳-۲- پیشینه تحقیق ۴۴
- ۳-۳- روش‌های بررسی خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ ۵۴
- ۳-۳-۱- روش‌های آزمایشگاهی ۵۵
- ۳-۳-۲- روش‌های سیستمی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ ۶۲
- ۳-۳-۳- روش سنجش از راه دور ۶۳
- ۳-۴- جمع بندی ۶۵

فصل ۴: روش کار و نتایج آزمایش‌ها	۶۷
۴-۱- مقدمه	۶۸
۴-۲- حوزه زغال سنگ کرمان	۶۸
۴-۳- شرکت معادن زغال سنگ کرمان	۶۹
۴-۳-۱- معدن هجدک	۷۰
۴-۳-۲- معدن پابدانا	۷۰
۴-۳-۳- معدن همکار	۷۰
۴-۳-۴- کارخانه زغالشویی زرنند	۷۱
۴-۴- نمونه‌های زغال سنگ	۷۳
۴-۵- آماده سازی نمونه‌های آزمایشگاهی	۷۳
۴-۶- آنالیز تقریبی	۷۶
۴-۶-۱- تست رطوبت	۷۶
۴-۶-۲- تست خاکستر	۷۷
۴-۶-۳- تست مواد فرار	۷۸
۴-۷- ترکیب سنگ‌شناسی و نوع ماسرال	۸۰
۴-۸- میزان پیریت محتوی	۸۴
۴-۹- تست دمای نقطه تقاطعی	۸۵
۴-۹-۱- نتایج تست دمای نقطه تقاطعی	۸۸
۴-۱۰- تأثیر خاکستر	۹۳
۴-۱۱- تأثیر مواد فرار	۹۴

- ۹۵..... تأثیر ماسرال‌ها بر روی خودسوزی زغال‌سنگ ۱۲-۴
- ۹۶..... تأثیر میزان پیریت محتوی بر روی گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ ۴-۱۱
- ۹۷..... تأثیر میزان رطوبت محتوی بر روی خودسوزی زغال‌سنگ ۴-۱۲
- ۱۰۰..... جمع بندی ۴-۱۳
- ۱۰۱..... فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها ۱۰۱
- ۱۰۲..... نتیجه‌گیری ۵-۱
- ۱۰۵..... پیشنهادها ۵-۲
- ۱۰۶..... منابع فارسی ۱۰۶
- ۱۰۸..... منابع لاتین ۱۰۸
- ۱۱۳..... پیوست ۱۱۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: مراحل تشکیل زغال ۱۰
- شکل ۲-۲: نمای کلی از مجموعه مراحل شکل‌گیری زغال ۱۰
- شکل ۳-۲: مراحل گرمایش خودبه‌خودی زغال ۱۶
- شکل ۴-۲: میزان انتشار گاز CO₂ ناشی از سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ تا سال ۲۰۰۰ ۱۸
- ۵: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست محیطی خودسوزی زغال‌سنگ ۱۹
- شکل ۶-۲: ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و نرخ گرمایش خودبه‌خودی ۲۵
- شکل ۷-۲: ارتباط بین سطح مخصوص زغال و دمای ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغال ۲۷
- شکل ۸-۲: ارتباط بین دمای زغال و سرعت پیشروی جبهه کار ۳۸
- شکل ۹-۲: تصویر فوم سه‌فازی تولید شده ۴۲
- شکل ۱-۳: طبقه‌بندی روش‌های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ ۵۵
- شکل ۲-۳: منحنی دما-زمان در روش CPT ۵۷
- شکل ۳-۳: نمودار نرخ گرمایش خودبه‌خودی R70 ۵۸
- شکل ۴-۳: نمونه منحنی TGA ۶۰
- شکل ۵-۳: مراحل مختلف DTA ۶۲
- شکل ۶-۳: روش آشکار سازی اکسیداسیون زغال‌سنگ به کمک روش دورسنجی ۶۵
- شکل ۱-۴: موقعیت و راه‌های ارتباطی معادن زغال‌سنگ کرمان ۶۹
- شکل ۲-۴: نمای کلی از کارخانه زغال‌شویی زرنند کرمان ۷۲
- شکل ۳-۴: مرحله سنگ شکنی با سنگ شکن فکی ۷۴

- شکل ۴-۴: مرحله آسیا کردن با آسیا گلوله‌ای ۷۴
- شکل ۵-۴: سرند ذرات زغال سنگ با سرند مش ۷۰ و شماره گذاری نمونه‌ها ۷۵
- شکل ۶-۴: نمونه خاکستر و بوته بعد از خارج شدن از کوره ۷۸
- شکل ۷-۴: بوته حاوی زغال سنگ پس از حرارت دادن ۷۹
- شکل (۸-۴): روش تهیه مقطع صیقلی از نمونه زغالی ۸۱
- شکل ۹-۴: ماسرال ویتربینیت ۸۲
- شکل ۱۰-۴: ماسرال اینرتینیت ۸۲
- شکل ۱۱-۴: ماسرال لیپتینیت ۸۳
- شکل ۱۲-۴: عکس تهیه شده از تست مقطع صیقلی حاوی پیریت ۸۵
- شکل ۱۳-۴: نمای کلی از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده ۸۷
- شکل ۱۴-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن هشونی ۸۹
- شکل ۱۵-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن پابدانا اصلی ۸۹
- شکل ۱۶-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن همکار ۹۰
- شکل ۱۷-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن گلتوت ۹۰
- شکل ۱۸-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن اسدآباد زیرزمینی ۹۱
- شکل ۱۹-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن هجدک ۹۱
- شکل (۲۰-۴): نمودار رابطه بین میزان خاکستر محتوی و CPT ۹۳
- شکل (۲۱-۴): نمودار رابطه بین موادفرار و CPT ۹۵
- شکل (۲۲-۴): طرح Van Krevelen، برای تقسیم بندی سه گروه اصلی ماسرال ۹۶

شکل ۴-۲۳: ارتباط بین میزان پیریت محتوی نمونه‌های زغالی مختلف و CPT..... ۹۷

شکل ۴-۲۴: ارتباط بین میزان رطوبت محتوی نمونه‌های جدول (۴-۹) و نقطه CPT..... ۹۹

فهرست جدول ها

- جدول ۳-۱: طبقه‌بندی قابلیت خودسوزی زغال سنگ براساس CPT ۵۷
- جدول ۳-۲: مقادیر R70 و درجه تمایل به خودسوزی ۵۹
- جدول ۴-۱: شماره نمونه معادن مورد مطالعه ۷۳
- جدول ۴-۲: نتایج اولیه تست رطوبت ۷۷
- جدول ۴-۳: نتایج حاصل از تست خاکستر نمونه‌های مختلف زغال سنگ ۷۸
- جدول ۴-۴: نتایج حاصل از تست مواد فرار نمونه‌ها ۸۰
- جدول ۴-۵: درصد ماسرال‌های نمونه‌های زغالی ۸۴
- جدول ۴-۶: میزان پیریت محتوی نمونه‌های زغال سنگ ۸۵
- جدول ۴-۷: نتایج حاصل از تست‌های دمای نقطه تقاطعی ۸۸
- جدول ۴-۸: خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایشات آنالیز تقریبی و تست‌های مقاطع صیقلی ۹۲

فصل ١ : کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

زغال سنگ یکی از بزرگ‌ترین منابع انرژی مورد استفاده بشر و یکی از منابع انرژی مهم در جهان به‌شمار می‌آید. در طول سالیان متمادی، بشر از زغال سنگ برای تأمین گرمای فضا، تأمین انرژی صنایعی همچون سیمان و فولاد سازی، تولید الکتریسیته و تبدیل آن به گک و استفاده از کک در صنایع چدن و فولادسازی و غیره استفاده کرده است (اصانلو، ۱۳۸۷).

معدنکاری زغال سنگ با مخاطرات زیادی همراه است. از مهم‌ترین خطرات ناشی از استخراج زغال سنگ در معادن زیرزمینی می‌توان به انفجار گاز متان، تخریب سفره‌های آب زیرزمینی، ایجاد گودال پس از برداشت مواد معدنی، آلودگی‌های زیست محیطی، خودسوزی زغال، گازدهی و غیره اشاره کرد (کیارستمی، ۱۳۹۳).

خودسوزی در معادن زغال سنگ از نظر ایمنی و اقتصادی یکی از خطرات عمده به‌شمار می‌آید. بررسی‌های آماری نشان داده است که ۷۵ تا ۸۰ درصد آتش‌سوزی‌های معادن زغال سنگ ناشی از خودسوزی بوده است.

خودسوزی زغال سنگ در نتیجه انجام واکنش‌های گرمازای زغال با اکسیژن و تجمع گرمای تولید شده به وجود می‌آید. عوامل مؤثر در خودسوزی را می‌توان به عوامل درونی یا ذاتی و عوامل محیطی یا خارجی زغال سنگ تقسیم کرد.

در این فصل کلیاتی از مسئله مورد بررسی و هدف از انجام مطالعه‌ی حال حاضر بیان خواهد شد و همچنین به ضرورت انجام چنین تحقیق‌هایی پرداخته خواهد شد. در انتها نیز به فرآیندهای انجام گرفته شده در فصل‌های مختلف این تحقیق پرداخته شده است.

¹ Coal Spontaneous Combustion

۱-۲- بیان مسئله پژوهش

خودسوزی زغال سنگ یک فرآیند آرام و کند سوختن است، که در آن زغال سنگ با اکسیژن موجود در هوا ترکیب شده و منجر به آزادسازی گرما می شود و با ادامه جذب اکسیژن زغال سنگ شروع به سوختن و آتش گرفتن می کند. این پدیده، یکی از دلایل عمده آتش سوزی ها در معادن زیرزمینی زغال سنگ بوده و یک چالش بزرگ برای تولیدکنندگان زغال سنگ در دنیا محسوب می شود. خودسوزی زغال سنگ باعث واردکردن زیان های اقتصادی به معادن در حال کار، از دست دادن منابع عظیمی از ذخایر زغال سنگ و نیز تولید گازهای گلخانه ای می شود (عطایی، ۱۳۹۴).

خودسوزی در معادن زغال سنگ باعث به وجود آمدن مشکلاتی از قبیل: از دست رفتن میلیون ها تن زغال سنگ، مرگ کارکنان، خسارت و نابودی تجهیزات در داخل معدن، آلودگی های زیست محیطی ناشی از انتشار گازها، افزایش دمای داخل معدن و غیره می شود (عطایی، ۱۳۹۴).

برای جلوگیری از این نتایج، فرآیندهایی که منجر به وقوع این پدیده می شوند باید بررسی و عوامل مؤثر بر خودسوزی مشخص شوند. خودسوزی زغال سنگ و درجه ی خودسوزی آن به عوامل مختلفی بستگی دارد. این عوامل به دو بخش عوامل قابل کنترل و عوامل غیر قابل کنترل تقسیم بندی می شوند. عوامل غیرقابل کنترل شامل مشخصات ذاتی زغال سنگ و مشخصات زمین شناسی بوده در حالی که عوامل قابل کنترل شامل مشخصات معدن کاری می شود. در مجموع می توان با شناخت، ارزیابی و شناخت پارامترهای مذکور، قابلیت اکسیداسیون و خودسوزی زغال سنگ را پیش بینی، پیش گیری و کنترل کرد (صفاری، ۱۳۹۲).

پارامترهای ذاتی به عنوان اصلی ترین پارامترها، نقش بسیار اساسی در گرمایش خودبه خودی زغال سنگ دارند. از جمله عوامل ذاتی زغال سنگ می توان به رطوبت محتوی زغال سنگ اشاره کرد. تغییرات در میزان رطوبت محتوی زغال سنگ، تأثیر آشکاری در استعداد زغال سنگ برای گرمایش خودبه خودی

دارد. بنابراین با توجه به اهمیت مسئله خودسوزی در معادن زیرزمینی و خطرات و پیامدهای ناشی از آن، مطالعه بر روی خودسوزی زغال سنگ و تاثیر پارامتر ذاتی بر آن امری مهم و ضروری تلقی می شود.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

صنعت زغال سنگ برای انرژی جهان اهمیت زیادی دارد. در سال ۲۰۰۷ میلادی ۲۹ درصد انرژی مورد نیاز در جهان به کمک زغال سنگ تأمین می شده است. معادن زغال سنگ به عنوان منبع اصلی انرژی در انقلاب صنعتی بوده است و با پیشرفت فناوری در این خصوص با وجود آلاینده‌های زیستی آن، که البته با فناوری‌های نوین تقلیل یافته، هنوز هم یکی از اقلام مهم در سبد انرژی جهان محسوب می شود. بررسی‌ها نشان می دهد که زغال سنگ از گذشته تا به امروز همچنان جایگاه خود را در تأمین نیاز انرژی جهان حفظ کرد و سهم آن حتی افزایش اندکی داشته است.

در ایران نیز مزایای متعدد استفاده از زغال سنگ نظیر کک سازی و کاربرد آن در صنعت فولاد و کاربرد نوع حرارتی، آن را به عنوان یک حامل انرژی با پتانسیل بالقوه بالا در کشور مطرح نموده است. به دلیل عدم انجام اکتشافات تفصیلی و منظم در کشور و همچنین عدم استفاده از فناوری روز دنیا برای استحصال محصولات جدید و از همه مهم تر وجود ذخایر عظیم نفت و گاز، سبب شده است به این ماده معدنی تا حد زیادی بی توجهی شود. به همین دلیل آمارهای متعددی از میزان ذخایر زغال سنگ کشور گزارش شده است.

در هر حال نتایج به دست آمده از این آمارها نشان می دهد که ایران دارای ذخایر قابل توجهی از زغال سنگ کک شو و حرارتی است. ایران دارای پنج حوزه زغال سنگی شامل طبس، کرمان، البرز شرقی، البرز مرکزی و البرز غربی است. طبق آمار وزارت نیرو در سال ۱۳۸۷ ذخایر قطعی زغال سنگ ایران ۱/۱ میلیارد تن، ذخایر احتمالی ۳ میلیارد تن و میزان ذخایر زمین شناسی حدود ۱۴ میلیارد تن می باشد که چیزی حدود ۷۲ درصد این ذخایر از نوع کک شو و ۲۸ درصد از نوع زغال سنگ حرارتی است (وزارت نیرو، ۱۳۸۷).

اکثر معادن زغال سنگ موجود در ایران از نوع معادن زیرزمینی است و خطرات معادن زیرزمینی در مقایسه با سایر فعالیت‌های معدنی و صنعتی دارای تفاوت‌های زیادی است و به سادگی می‌توان دریافت که فعالیت در معادن زغال سنگ با گستره‌ی وسیعی از خطرات همراه است. یکی از خطراتی که در معادن زغال سنگ به میزان قابل توجهی رخ می‌دهد خطر خودسوزی زغال سنگ است.

این پدیده، یکی از عوامل عمده آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی بوده و یک چالش بزرگ برای تولیدکنندگان مهمی چون آمریکا، چین، استرالیا، هند و آلمان از نظر وارد کردن زیان‌های اقتصادی به معادن در حال کار، از دست دادن منابع عظیمی از ذخایر زغال سنگ و نیز تولید گازهای گلخانه‌ای به‌شمار می‌آید. همان‌طور که پیشتر ذکر شد پدیده خودسوزی زغال سنگ مشکلاتی از قبیل: از دست رفتن میلیون‌ها تن زغال سنگ، مرگ کارکنان، خسارت و نابودی تجهیزات در داخل معدن، نشست سطح زمین، آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازها، افزایش دمای داخل معدن و غیره به وجود می‌آورد.

تمامی معادن زغالی در یک درجه از خودسوزی قرار ندارند، علت این امر آن است که عوامل و پارامترهای مختلفی در تمایل زغال سنگ به خودسوزی نقش دارند. با توجه به اهمیت بررسی گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ و خطرات ایجاد شده در اثر آن در معدنکاری زغال سنگ، بررسی تأثیر عوامل موثر در این پدیده، مخصوصاً عوامل ذاتی ضروری است.

۱-۴- هدف و روش انجام تحقیق

در این تحقیق سعی شده است که با بررسی و مطالعه پیشینه موضوع و تحقیقات انجام شده گذشته در ایران و سایر کشورهای جهان به بررسی مسئله مورد نظر پرداخته شود. طبقه بندی‌ها و روش‌های ارائه شده پیشین به دقت مشخص شوند، کلیه پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ تعیین و به بررسی آن‌ها پرداخته شود. بنابراین هدف علمی تحقیق ارزیابی میزان تأثیر پارامترهای ذاتی به عنوان اصلی‌ترین

عوامل مؤثر بر روی خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش آزمایشگاهی دمای نقطه تقاطعی^۱ (CPT) و تعیین پتانسیل خودسوزی زغال سنگ‌های منطقه کرمان و هدف کاربردی آن، تلاش برای رسیدن به ایمنی بالاتر محیط معدن، جلوگیری از سوختن میلیون‌ها تن زغال سنگ و همچنین جلوگیری از تأثیر منفی بر محیط زیست و تغییرات آب و هوا است.

۱-۵- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر در ۵ فصل گردآوری شده است، که در شرح زیر توضیح داده می‌شود:

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

در فصل دوم ابتدا مکانیزم خودسوزی زغال سنگ، تأثیرات آن بر مسائل زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی آورده شده است. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی خودسوزی زغال سنگ بررسی می‌شود.

فصل سوم با عنوان بررسی سابقه علمی موضوع مطرح شده است، که پس از بیان تاریخچه‌ای مختصر از کارهای صورت گرفته در این زمینه، برخی از مهم‌ترین روش‌های تشخیص پتانسیل خودسوزی در معادن زغال سنگ آورده شده است.

در فصل چهارم به معرفی منطقه مورد مطالعه و شرح روند کار و انجام تست‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌ها و نتایج حاصل از آزمایش‌ها پرداخته شده است.

در فصل پنجم با عنوان "نتایج و پیشنهادها"، به بیان نتایج قابل توجه از این تحقیق پرداخته شده و پیشنهادهایی برای تحقیقات بعدی ارائه شده است.

¹ Crossing Point Temperature

فصل ۲: مبانی، مفاهیم و مکانیزم خودسوزی

۲-۱- مقدمه

مواد معدنی ستون فقرات رشد اقتصادی هر کشوری را تشکیل می‌دهند و اگر چه در دنیای امروز منابع سوخت اصلی شامل نفت و گاز هستند، ولی زغال‌سنگ هنوز هم یکی از بزرگ‌ترین منابع انرژی مورد استفاده بشر و یکی از منابع انرژی مهم در جهان به شمار می‌آید و با توجه به ذخایر فراوان، گستردگی بسیار در سطح دنیا و هزینه نسبتاً اندک هنوز هم کانون توجه در تولید انرژی جهان است.

اگر چه ذخایر زغال‌سنگ به طور گسترده‌ای در سراسر جهان توزیع شده است، ولی براساس نقد و بررسی آماری از انرژی جهانی که در سال ۲۰۰۹ منتشر شده در آن چین، ایالات متحده آمریکا و استرالیا به ترتیب در رده‌های اول تا سوم کشورهای تولید کننده با بیش از ۵ میلیون تن زغال‌سنگ هستند (قنبری، ۱۳۹۴).

خودسوزی در زغال‌سنگ و مواد باطله کربن‌دار، مشکل مهمی در صنعت زغال‌سنگ محسوب می‌شود. گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ مستلزم وقوع همزمان چندین عامل است. در اثر جذب سطحی اکسیژن توسط زغال‌سنگ دمای آن افزایش می‌یابد و منجر به افزایش واکنش‌های شیمیایی و تولید مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، گاز متان، هیدروژن و هیدروکربن‌های مختلف می‌شود، که با افزایش دما و وجود اکسیژن کافی و فقدان یک سیستم تهویه مناسب برای انتقال گرمای حاصله، باعث خودسوزی زغال‌سنگ و حریق در معدن می‌شود.

خودسوز بودن زغال و درجه خودسوزی آن به پارامترها و عوامل مختلفی بستگی دارد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ، عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری است. پارامترهای ذاتی به عنوان اساسی‌ترین پارامترها نقش بسیار مهمی در خودسوزی زغال دارند.

در این فصل، در راستای رسیدن به اهداف این پایان‌نامه به تعاریف پایه‌ای خودسوزی و عوامل مؤثر بر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته شده است.

۲-۲- شکل گیری زغال سنگ

زغال سنگ از تغییرات بیولوژیکی ناشی از افزایش فشار و بالا رفتن دما بر روی گیاهان از روزگاران بسیار دور به وجود آمده است. کربن موجود در زغال سنگ به صورت ترکیب‌های مختلف آلی از جمله اسیدهای کربوکسیلیک متراکم شده و به صورت ترکیبات آروماتیک با حلقه‌های ناجور (که علاوه بر کربن، شامل هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد نیز می‌باشند) در آمده است.

شکل گیری زغال سنگ حدود ۲۵۰ میلیون سال پیش در دوره کربونیفر آغاز شد. در این دوره روی زمین تعداد بی شماری مرداب و باتلاق وجود داشت. گیاهان به دلیل وجود آب و هوای گرم و مرطوب به وفور رشد می‌کردند. بر اثر دگرگونی بقایای گیاهی، در زیر لایه‌هایی از گل و لای موجود در باتلاق‌ها و مرداب‌ها مدفون شدند. به مرور زمان گیاهان جدید روی این لایه‌ها رویدند و این گیاهان نیز پس از رشد و سرنگون شدن توسط رسوبات پوشیده شدند. این چرخه مرتب تکرار می‌شد. به این ترتیب در طول میلیون‌ها سال بر ضخامت لایه‌هایی که قشرهایی از گیاهان را در برداشت افزوده شد. فشار و سنگینی طبقات بالایی باعث شد که گیاهان به تدریج آب و مواد فرار خود را از دست دهند؛ در نتیجه فقط کربن آن‌ها به شکل زغال سنگ باقی ماند که این زغال اولیه را زغال سنگ نارس یا تورب می‌گویند. زغال سنگ عمدتاً از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده است. انواع زغال سنگ‌ها در دوران‌های گوناگون زمین‌شناسی و تحت شرایط مختلفی به وجود آمده‌اند. زمان، فشار و گرما سه عامل تعیین کننده در میزان درجه زغال‌شدگی هستند. زغال سنگ‌ها به انواع لیگنیت^۱ (زغال قهوه‌ای-نارس)، ساب بیتومینه^۲ (زغال نیمه قیری)، بیتومینه^۳ (زغال قیری)، آنتراسیت^۴ و نهایتاً گرافیت^۵ تقسیم بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۷). در شکل (۱-۲) و شکل (۲-۲) مجموعه فرآیند زغال‌شدگی آورده شده است.

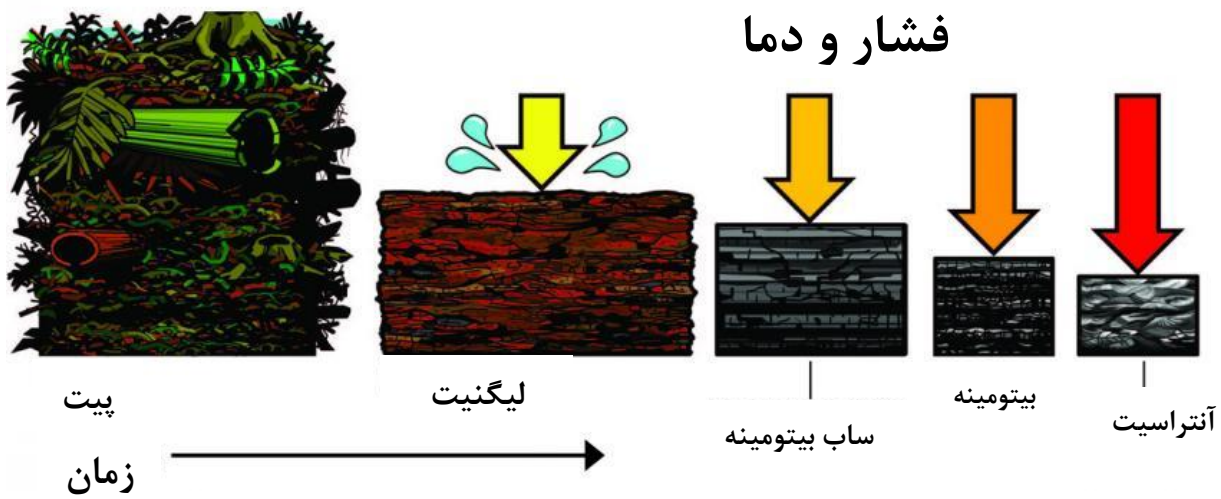
^۱-Lignite

^۲-Sub-Bituminous

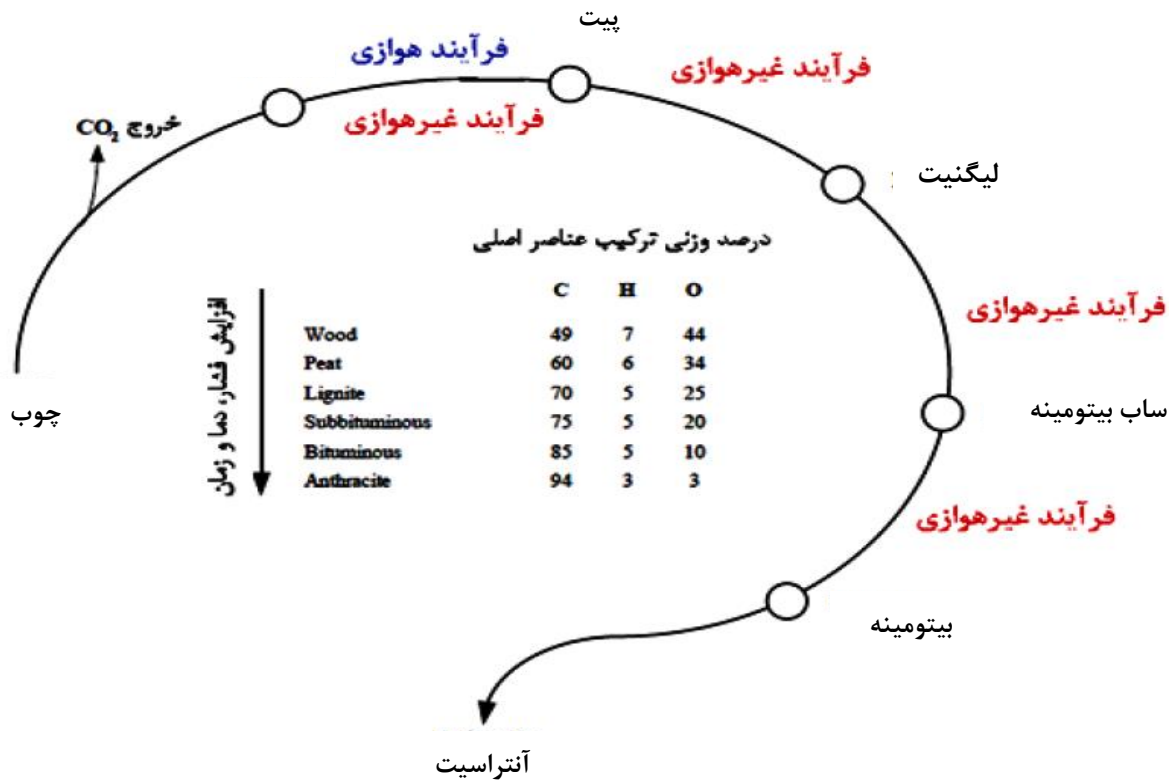
^۳-Bituminous

^۴-Anthracite

^۵-Graphite



شکل ۱-۲: مراحل تشکیل زغال (Greb et al., 2006)



شکل ۲-۲: نمای کلی از مجموعه مراحل شکل گیری زغال (Todes, 1936)

تقریباً از همه انواع زغال سنگ‌ها به منظور سوخت و تهیه زغال کک، می‌توان استفاده کرد. بیش از ۸۰ درصد مصرف زغال سنگ‌ها برای تولید برق، بخار در صنایع، حمل و نقل یا سوخت و غیره به کار می‌روند.

قسمت دیگر زغال سنگ در کربونیزاسیون برای تولید کک، گاز زغال سنگ، آمونیاک، قطران زغال سنگ و محصولات نفتی سبک مصرف می‌شود. علاوه بر این، مقادیر قابل توجهی از زغال سنگ به عنوان پرکننده، رنگدانه، در تصفیه آب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳- آتش سوزی داخلی یا خودسوزی

خودسوزی زغال سنگ، یکی از دلایل عمده آتش سوزی در معادن زغال سنگ است، که به دلیل تمایل زغال سنگ به آزادسازی گرما در هنگام تماس با اکسیژن و هدایت حرارتی ضعیف که باعث تجمع گرما می‌شود، بدون یک منبع یا عامل خارجی رخ می‌دهد.

در معادن زغال سنگ هر کجا که زغال سنگ در معرض هوا قرار می‌گیرد، جذب سطحی اکسیژن رخ می‌دهد و بدون یک منبع خارجی گرما تولید می‌شود. اگر گرمای تولید شده از محیط خارج نشود، دمای زغال سنگ بالا می‌رود و سرعت واکنش افزایش خواهد یافت. افزایش سرعت واکنش ممکن است باعث شود که زغال شروع به سوختن کند. نرخ گسترش خودسوزی به صورت یک تابع نمایی افزایش می‌یابد. شرایط لازم برای شروع چنین اتفاقی وجود اکسیژن کافی و نبودن سیستم تهویه صحیح برای انتقال گرمای ایجاد شده می‌باشد (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴).

خودسوزی نوعی از آتش سوزی است که با چشم قابل مشاهده نیست و در خود زغال سنگ اتفاق می‌افتد. در بعضی شرایط، تقریباً هر نوع زغال سنگی در اثر خودسوزی، آتش می‌گیرد. اثرات خودسوزی ماده معدنی از افزایش مختصر مونوکسید کربن موجود در هوا، تا آتش سوزی بزرگ که ممکن است کل معدن را در بر بگیرد تغییر می‌کند. به منظور متمایز شدن خودسوزی از آتش سوزی، وقوع آن را با عنوان " گرمایش " یا " احتراق خودبه خودی " بیان می‌کنند (صفاری، ۱۳۹۲).

۲-۴- تاریخچه آتش‌سوزی در معادن

گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ که منجر به احتراق خودبه‌خودی زغال‌سنگ می‌شود، مهم‌ترین علت آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ در سراسر جهان است (Ramlu et.al. 1985). قبل از بیان تعریف و مکانیزم خودسوزی زغال‌سنگ برخی از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین آتش‌سوزی‌های مربوط به زغال‌سنگ در نقاط مختلف جهان آورده شده است.

چین

در چین به عنوان بزرگترین کشور تولیدکننده زغال‌سنگ با تولید سالانه حدود ۲/۵ میلیارد تن، آتش‌سوزی زغالی یک مشکل جدی در معادن زغال‌سنگ آن است. تخمین زده شده است، که حدود ۱۰-۲۰ میلیون تن زغال‌سنگ سالانه در اثر سوختن از بین می‌رود. علاوه بر از دست رفتن زغال‌سنگ در اثر سوختن، این آتش‌سوزی‌ها به آلودگی هوا کمک می‌کنند و باعث افزایش قابل توجه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

ایالات متحده

بسیاری از لایه‌های زغال‌سنگ در ایالات متحده در معرض خطر خودسوزی زغال‌سنگ قرار دارند. اداره فدرال معدنکاری سطحی یک پایگاه داده را نگهداری می‌کند که براساس داده‌های موجود در این پایگاه داده که در سال ۱۹۹۹ جمع‌آوری شدند، ۱۵۰ منطقه که در معرض خطر آتش‌سوزی داخلی قرار دارند را فهرست بندی کرد است. در پنسیلوانیا، ۴۵ منطقه با احتمال خطر احتراق خودبه‌خودی شناسایی شدند. معروف‌ترین آن‌ها آتش‌سوزی در معدن مرکزی در منطقه کلمبیا است.

هند

در معادن زغال سنگ هند حدود ۷۵٪ درصد آتش سوزی زغال سنگ در اثر خودسوزی زغال سنگ اتفاق می افتد (Singh et.al. 2004). اولین آتش سوزی ثبت شده در لایه های زغال سنگ، به سال ۱۸۶۵ باز می گردد که در این سال لایه های زغال سنگ در منطقه رانیگانج شروع به احتراق خودبه خودی کردند.

۲-۵- مکانیزم خودسوزی زغال سنگ

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

اگر یک لایه زغالی دچار آتش سوزی 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 گرمایش خودبه خودی و خودسوزی زغال سنگ و مجموعه عوامل شتاب دهنده در این زمینه داشته باشیم تا مخاطرات این اتفاق توسط کنترل مجموعه فرآیندها و عوامل تأثیرگذار در خودسوزی زغال کاهش و به حداقل مقدار ممکن برسد (Nelson & Chen, 2007; Mohalik et al., 2009)؛ لذا در ادامه به تشریح مکانیزم خودسوزی خواهیم پرداخت.

تقریباً تمام انواع زغال سنگ ها در تماس با اکسیژن موجود در هوا اکسید شده و نشانه هایی از هوازدگی را از خود نشان می دهند که نتیجه آن کاهش انرژی حرارتی زغال سنگ و آزادسازی میزان قابل توجهی گاز و گرما است. بخشی از گرمای تولید شده توسط خود زغال سنگ جذب شده و باعث تسریع در واکنش خواهد شد.

¹Raniganj

واکنش بین اکسیژن و زغال سنگ بسیار پیچیده است و با وجود بیش از یک قرن تحقیق مجموعه مراحل تشکیل آن هنوز به طور کامل شناسایی نشده است. اما مکانیزم پیشنهاد شده برای توصیف پدیده گرمایش خودبه خودی زغال سنگ که چندین فرآیند گرمازا را شامل می‌شود، به شرح زیر است (Greuer, 1994; Mohalik et al., 2009; Yuan and Smith, 2012):

الف) جذب سطحی یا فیزیکی اکسیژن بر روی سطح زغال سنگ؛

ب) جذب شیمیایی اکسیژن که باعث تشکیل ترکیب‌های پایدار زغال و اکسیژن بر روی سطح زغال می‌شود؛

ج) واکنش شیمیایی و اکسیداسیون مستقیم، که در آن اکسیژن با زغال سنگ دچار واکنش شیمیایی شده، که باعث تجزیه ترکیب‌های زغال و اکسیژن تشکیل یافته از مرحله قبل می‌شود و منجر به آزادسازی و تولید گازهایی از قبیل مونوکسید کربن، دی اکسید کربن و بخار آب می‌شود. در دماهای بالاتر، گازهای دیگری مانند هیدروژن، متان، اتان و دیگر هیدروکربن‌ها تشکیل می‌شود.

از بین این فرآیندها، فرآیند آخر گرمای بیشتری تولید می‌کند. این فرآیندهای پیچیده تحت تأثیر عوامل ذاتی یا داخلی زغال سنگ و عوامل خارجی مثل شرایط محیطی، زمین‌شناسی و شیوه‌های مدیریت است.

در اولین فرآیند، در دمای زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد، واکنش بین زغال سنگ و اکسیژن عمدتاً به صورت جذب فیزیکی است به این صورت که اکسیژن جذب سطحی یا برآشامی^۱ زغال می‌شود (Greuer, 1994).

^۱ Adsorption

در دومین مرحله، پس از قرار گرفتن اکسیژن در سطح زغال سنگ، اکسیژن از طریق شکستگی‌ها و منافذ زغال سنگ جذب درونی زغال می‌شود که اصطلاحاً این فرآیند درآشامی^۱ گفته می‌شود و باعث افزایش سرعت اکسیداسیون زغال و اکسیژن می‌شود (Greuer, 1994).

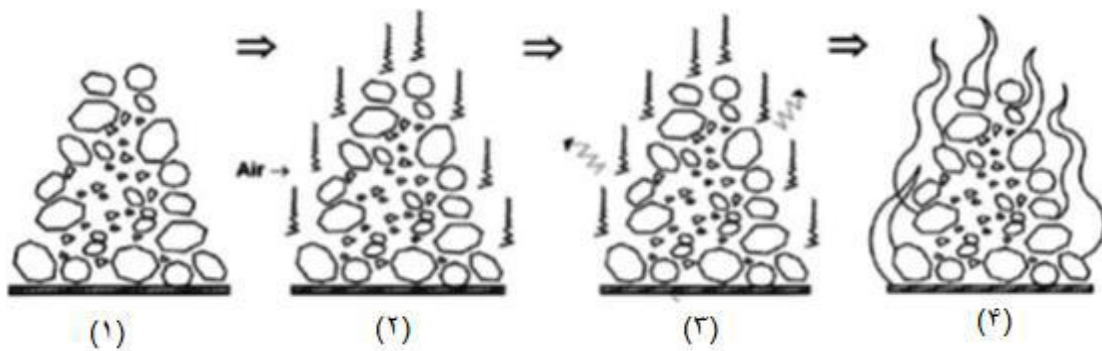
در دمای زیر ۸۰ درجه سانتی‌گراد ترکیبات ناپایدار اکسیژن به محصولات گازی و ترکیبات پایدار شکسته می‌شوند که نتیجه آن هوازگی زغال سنگ توسط اکسیژن است. در درجه حرارت بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد و در طول بالا رفتن دما ناشی از فرآیند شیمیایی زغال، ترکیب‌های پایدار اکسیژن و زغال سنگ باعث تولید گرما و گازهای بیشتری می‌شود که این گازها بیشتر شامل دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، متان، هیدروژن و بخار آب می‌شوند که به این دما «دمای آستانه» گفته می‌شود. محدوده این دما بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Greuer, 1994).

اگر گرما تولید شده ناشی از اکسیداسیون زغال توسط سیستم تهویه از محیط به بیرون از محدوده زغالی هدایت شود، افزایش دمای زغال سنگ ادامه پیدا نمی‌کند و زغال سنگ سرد باقی می‌ماند. در صورت فقدان کامل جریان هوا، اکسیژن کاملاً مصرف شده و اکسیداسیون متوقف گردیده و زغال سنگ سرد باقی خواهد ماند. در غیر اینصورت حرارت اکسیداسیون با سرعت کافی پراکنده نمی‌شود تا زغال سنگ سرد باقی بماند در نتیجه حرارت زغال بالا می‌رود و از آنجایی که سرعت اکسیداسیون همراه حرارت افزایش می‌یابد این فرآیند سرعت می‌گیرد. در دمای ۷۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رطوبت محتوی زغال سنگ از زغال جدا می‌شود که این عمل باعث جذب بیشتر اکسیژن از طریق منافذ و ترک‌های ایجاد شده در سطح زغال و افزایش دمای زغال سنگ می‌شود. هر زغالی دارای یک درجه حرارت بحرانی است که به «حد اقل دمای خود گرمایشی^۲ یا SHT» مشهور است. این دما پایین‌ترین درجه حرارتی است که نوعی واکنش پایدار گرمازا یا افزایش غیر قابل کنترل دمایی را باعث می‌شود. محدوده این دما بین ۵۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است. اگر اجازه داده شود زغال به SHT برسد و

^۲-Absorption

^۱-Self-Heating Temperature

تبادل گرمایی برقرار نگردد (تبادل گرمایی یعنی دور شدن حرارت تولیدی با جریان هوا و عدم افزایش بیشتر حرارت) فرآیند اکسیداسیون و افزایش درجه حرارت سرعت گرفته تا اینکه مواد ملتهب و گداخته می‌شوند که شروع فرآیند مرحله سوم و به عبارتی شروع آتش‌سوزی زغال‌سنگ است (Grewer, 1994).
در شکل (۲-۳) مراحل مختلف خودسوزی زغال‌سنگ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳: مراحل گرمایش خودبه‌خودی زغال (۱) زغال‌سنگ با دانه بندی متفاوت. (۲) خودسوزی اولیه به وسیله نفوذ هوا. (۳) اتلاف گرما به وسیله هدایت، انتقال و تابش. (۴) تجمع گرما و شروع خودسوزی (Sipila et al., 2012).

به طور خلاصه مکانیزم پیشنهاد شده برای توصیف فرآیند گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ را می‌توان براساس ۷ مرحله زیر بیان کرد (Grewer, 1994):

- (۱) ایجاد فرآیند اکسیداسیون زمانی که اکسیژن با زغال‌سنگ واکنش نشان دهد؛
- (۲) شروع فرآیند اکسیداسیون و تولید گرما؛
- (۳) افزایش دما تا حدود ۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد و تولید گازهای مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن؛
- (۴) با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون افزایش یافته و مقدار تولید گازهای مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و سایر گازها افزایش می‌یابد.

۵) اگر گرمای تولید شده توسط اکسایش زغال سنگ توسط سنگ‌های اطراف جذب شود و یا توسط هوای تهویه پراکنده شود، دمای زغال افزایش نمی‌یابد و اکسایش با دمای کم صورت می‌گیرد.

۶) اگر گرمای تولید شده پراکنده نشود و از محیط اکسیداسیون خارج نشود، دمای زغال افزایش یافته و باعث می‌شود اکسایش سریع‌تر انجام شود. با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون به صورت نمایی افزایش می‌یابد به طوری که به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما، سرعت اکسیداسیون تقریباً ۲ برابر می‌شود.

۷) سرانجام در یک دمای بحرانی آتش‌سوزی و اشتعال زغال صورت می‌گیرد.

۲-۶- تأثیرهای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی خودسوزی زغال سنگ

خودسوزی زغال به طور مستقیم و غیرمستقیم بر مسائل زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی تاثیرگذار است که به بعضی از این موارد در زیر اشاره شده است:

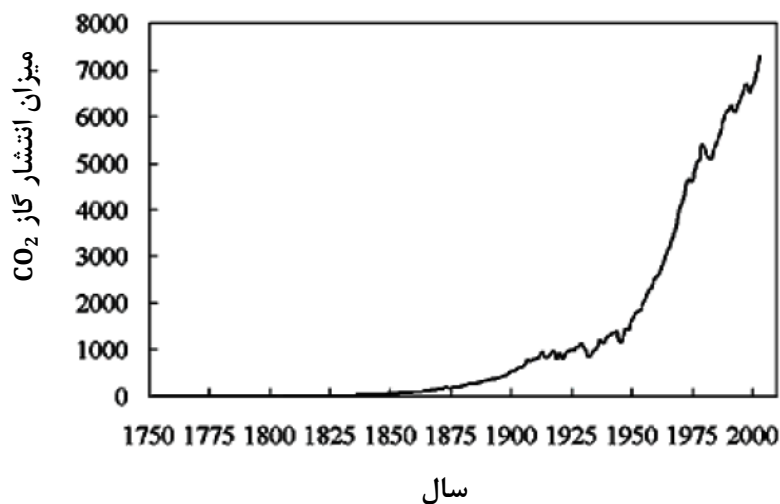
۲-۶-۱- تأثیرهای زیست محیطی

تأثیرهای زیست محیطی خودسوزی زغال سنگ شامل موارد زیر می‌شود (Ham, 2005):

- انتشار گرما از طریق آتش‌سوزی‌های زغالی که باعث افزایش دمای محلی می‌شود؛
- به غیر از تغییر چشم‌انداز، معادن زغال سنگ با افزایش ذرات گرد و غبار، انفجار، حمل و نقل و انتشار گازهای سمی، قابل اشتعال و قابل انفجار مانند دی‌اکسید کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای سولفور (SO_x)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، هیدروژن سولفید (H_2S)، متان (CH_4)، هیدروژن (H_2) و سایر گازها که مقادیر آن‌ها کم، ولی از طریق خودسوزی زغال سنگ ایجاد می‌شوند که عبارتند از: اتان (C_2H_6)، اتیلن (C_2H_6)، استیلن (C_2H_2) و سایر هیدروکربن‌های دیگر که مقادیر آن بسیار کم است. در بین این گازهای سمی CO_2 و CH_4 در گرم شدن زمین نقش دارند؛

- نشت زمین و ایجاد گودال‌های بزرگ، یکی از رخداد‌های رایج در نواحی است که تحت تأثیر آتش‌سوزی‌های زیر سطحی زغال‌سنگ قرار گرفته‌اند؛
- آلودگی خاک و انقراض پوشش گیاهی و جانوری؛
- کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد؛
- تغییر در الگوی زهکشی و سطح آب‌های محلی.

محققین افزایش غلظت گاز CO_2 در اتمسفر را از زمان انقلاب صنعتی به بعد تأیید کرده‌اند به نحوی که غلظت این گاز در اتمسفر جهانی در مرحله هشدار قرار دارد. شکل (۲-۴) نشان‌دهنده میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ میلادی به بعد است (Gangopadhyay, 2008).

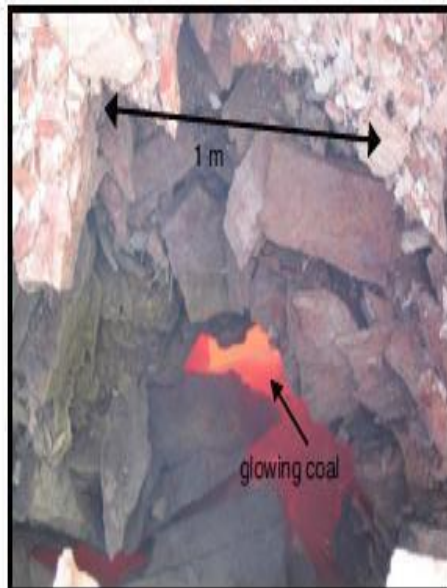


شکل ۲-۴: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ میلادی تا سال ۲۰۰۰ (Gangopadhyay, 2008)

در شکل (۲-۵) نمونه‌هایی از تأثیرات زیست محیطی خودسوزی زغال‌سنگ نشان داده شده است.



ب- نشست سطح زمین.



الف- از دست رفتن ماده معدنی.



د- انقراض پوشش گیاهی



ج- خودسوزی در انباشتگاه زغال

شکل ۲-۵: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست محیطی خودسوزی زغال سنگ

۲-۶-۲- تأثیرات اجتماعی

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

۲-۶-۴- تأثیرات اقتصادی

خودسوزی زغال سنگ باعث افزایش هزینه های تولید به دلیل ایجاد مشکل در بهره برداری و استخراج معدن، بسته شدن معدن، ازدست تجهیزات و حتی از دست دادن تولید می شود. علاوه بر این، خودسوزی زغال سنگ باعث هدر رفتن میلیون ها تن از ذخایر زغال سنگ که جز منابع انرژی باارزش است می شود (Ham, 2005).

۲-۷- مناطق مستعد بروز پدیده خودسوزی در معادن زغال سنگ

اطلاع از ویژگی های خودسوزی و مکان هایی که در یک معدن ممکن است دچار خودسوزی شوند، برای توسعه طرح مدیریت خودسوزی (SCMP) و کاهش اثرات زیان آور و پیامدهای نامطلوب زیست محیطی، ضروری است. پیشگیری، تشخیص زود هنگام، کنترل خطر خودسوزی و کاهش اثرات زیست محیطی آن، تا زمانی که پتانسیل بروز خطر و مکان ایجاد آن به درستی شناسایی نشود، مؤثر نخواهد بود (MDG1006, 2011).

مناطق که در یک معدن زغال سنگ دارای پتانسیل بروز پدیده خودسوزی هستند، عبارتند از (MDG1006, 2011):

۲-۷-۱- منطقه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی

بروز پدیده خودسوزی در منطقه تخریب شده بیشتر از سایر قسمت های معدن است. خودسوزی در منطقه تخریب شده ممکن است به دلیل نشت هوا به این قسمت و پشت سیستم نگهداری رخ دهد. این منطقه دارای بیشترین خطر در قسمت زغال های خرد شده، حفره ها، تخریب ناقص و نزدیکی به راهروهای تهویه است. نفوذپذیری بیشتر هوا و فشار بالای تهویه باعث می شود که هوا به منطقه تخریب

¹Spontaneous Combustion Management Plan= SCMP

شده وارد شود و سپس اکسیژن به زغال سنگ‌های رها شده در این ناحیه برسد که با توجه به میزان زغال سنگ رها شده و حجم هوای نشت پیدا کرده پدیده اکسیداسیون زغال سنگ و تولید گرما اتفاق می‌افتد. عامل اصلی جلوگیری از خودسوزی جدا نگه داشتن زغال سنگ از اکسیژن به وسیله انباشتن گاز (گاز نیتروژن) بر روی لایه‌ها است (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۷-۲- منطقه استخراج در روش اتاق و پایه

در روش اتاق و پایه خودسوزی می‌تواند به روش‌های زیر کنترل شود:

- تحکیم منطقه‌ای که در آن تخریب کامل صورت می‌گیرد؛
- نرخ استخراج منظم و بالا؛
- حداقل کردن مقدار فشار در سراسر منطقه بسته شده؛
- بازرسی و نگهداری از مناطق بسته شده برای کنترل نشست؛
- نمونه برداری و تجزیه و تحلیل هوای منطقه بسته شده؛
- پوشش روی رگه‌های زغالی.

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

خودسوزی در مناطق بسته شده به دلیل نشت هوا به این مناطق یا وجود مقدار زیادی هوا رخ می‌دهد. به‌علاوه، مشکلات ساختاری لایه و کنترل سقف ممکن است باعث شود مقداری زغال در منطقه استخراج شده باقی بماند. استخراج ناقص ممکن است منجر به تخریب تاخیری، حرکت جریان هوای بیشتر به این منطقه و در نهایت سبب وقوع خودسوزی زغال شود (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۷-۳- انباشت زغال^۱ (زغال‌های ریخته شده بالایی)

خودسوزی ممکن است در انباشت‌های زغالی و یا زغال‌های ریخته شده بالایی توسعه یابد. انباشت زغال را می‌توان به انباشت گاه‌های سطحی که در آن‌ها خودسوزی توسعه می‌یابد، تشبیه کرد. شرایط توسعه خودسوزی در انباشت زغال عبارتند از (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴):

- جریان تهویه محدود در سراسر انباشت زغال؛
- ارتفاع و حجم انباشت زغال؛
- نفوذ رطوبت؛
- نظارت بی‌اثر.

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

۲-۷-۴- لنگه‌های مرزی جانبی^۲

دلایل خودسوزی در پایه‌ها عبارتند از (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴):

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

¹-Stowage

²-Rib Side Pillar

- مسیره‌های نشت هوا مرتبط با شکستگی‌ها، ترک‌ها، گسل، درزه‌ها و گمانه‌های بسته نشده در لایه‌ها؛

شاتکریت یا مواد عایق‌کاری معادل گاهی اوقات به منظور کنترل پایداری سقف و پایه‌های مرزی و همچنین کاهش مسیره‌های نشت هوا، تونل‌های دنبال لایه و چاه‌های متقاطع در لایه به کار می‌روند. شاتکریت گاهی اوقات یک عامل کمک کننده به مهار یا کشف خودسوزی‌ها و یا کاهش دهنده نشت هوا است (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۷-۵- زغال برجا^۱

خودسوزی ممکن است در زغال‌سنگ سقف یا کف که به وسیله همگرایی، ترک خورده و یا شکسته شده‌اند، رخ دهد. زغال‌های سقف یا کف که در طول مراحل معدنکاری فرو ریخته‌اند، در شرایط مطلوب می‌توانند دچار خودسوزی شوند (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۷-۶- انباشتگاه‌های باطله آذر سطح زمین

انباشتگاه‌های باطله بسیار ناهمگن بوده و تمایل زیادی به خودسوزی دارند. در برخی موارد، خودسوزی با دود و تصاعد بخار یا حتی شعله باز دیده می‌شود، در حالی که در موارد دیگر ممکن است خودسوزی شدیدی در اعماق انباشتگاه رخ دهد و در سطح دیده نشود (Glenn et al, 2015).

۲-۸- پارامترهای موثر بر خودسوزی زغال‌سنگ

خودسوز بودن زغال‌سنگ و درجه خودسوزی آن به عوامل مختلفی بستگی دارد. تاکنون متخصصان متعددی از کشورهای مختلف به بررسی نقش و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته‌اند. مطالعات انجام شده پیشین و منابع معتبر در دسترس بیان کننده این واقعیت است که دلیل اصلی در درک مشکل مکانیزم گرمایش خودبه‌خودی، علاوه بر تمایل ذاتی خود زغال‌سنگ به

¹In-situ Coal

²Spoil Pile or Stockpile

گرمایش، حضور تعدادی پارامتر داخلی و خارجی که بر نرخ اکسیداسیون تأثیر می‌گذارند. تمامی پارامترهای مؤثر بر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ را می‌توان به ۳ گروه اصلی و به شرح زیر ارزیابی و طبقه‌بندی کرد (Glenn, 2015):

(۱) مشخصات ذاتی زغال‌سنگ؛

(۲) مشخصات زمین‌شناسی؛

(۳) مشخصات معدنکاری.

از میان سه گروه فوق، گروه اول و دوم عموماً پارامترهای "غیرقابل کنترل" و یا "پارامترهای مستقل" و گروه سوم پارامترهای "قابل کنترل" و یا "پارامترهای وابسته" نامیده می‌شوند.

۲-۸-۱- عوامل ذاتی

مشخصات ذاتی زغال‌سنگ بعنوان اصلی‌ترین پارامترها نقش بسیار اساسی در گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ دارند. در ادامه به تشریح مهم‌ترین مشخصات ذاتی زغال‌سنگ پرداخته شده است.

الف- درجه زغال‌شدگی^۱ (نوع زغال)

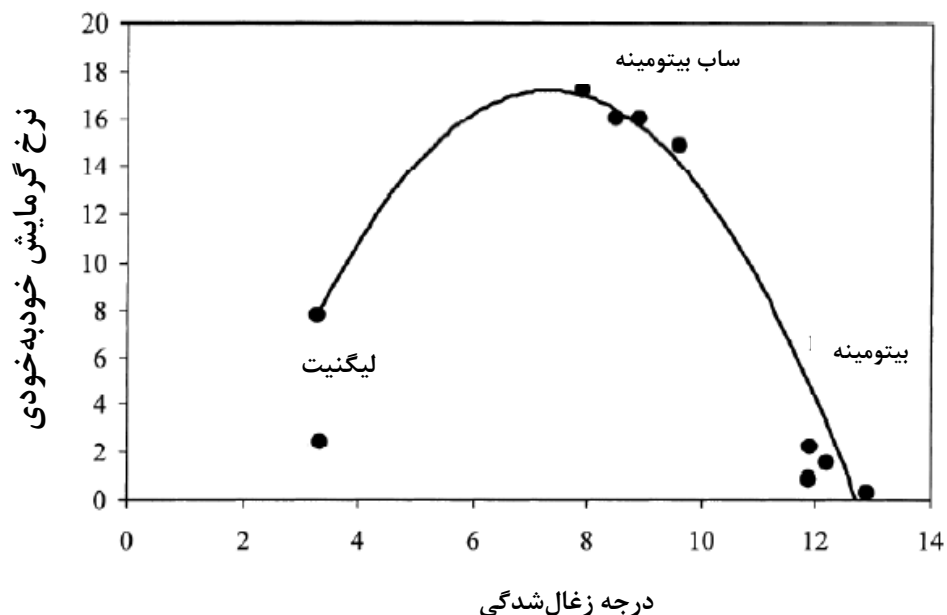
به مجموعه تغییرات فیزیکی و شیمیایی که باعث تبدیل مواد باقی مانده گیاهی به زغال‌سنگ می‌شود زغالی شدن (Coalification) می‌گویند و شدت‌های متفاوت آن را درجه یا شاخص زغالی شدن می‌نامند. با شدت دگرگونی، عمق تدفین، زمان زغالی شدن، درجه حرارت محیط و میزان درصد کربن رابطه مستقیم دارد. همچنین با مقدار اکسیژن، هیدروژن، رطوبت و مواد فرار رابطه عکس دارد.

گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ یک پدیده وابسته به نوع زغال است. درجه زغال‌شدگی زغال‌سنگ به مشخصات بقایای گیاهی که از آن تشکیل شده است و مقدار تغییری که مواد آلی آن در طول دوره شکل‌گیری داشته‌اند، بستگی دارد. به طور کلی، تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ در ارتباط معکوس با درجه زغال‌شدگی آن است (Glenn et al., 2015). به طوری که زغال‌سنگ‌های با درجه پایین

^۱-Rank of Coal

زغال‌شدگی نسبت به زغال‌سنگ‌ها با درجه بالای زغال‌شدگی مستعدتر به احتراق خودبه‌خودی هستند و استخراج، انباشت و حمل و نقل این نوع زغال‌ها مدیریت و برنامه‌ریزی خاصی را طلب می‌کند (Beamish, 2005; Beamish et al., 2013; Kaymakci & Didari, 2002).

درجه زغال‌شدگی تأثیر مهمی بر روی گرمایش خودبه‌خودی زغال دارد. به طور کلی هر چه درجه زغال‌شدگی پایین‌تر باشد تمایل زغال برای گرمایش خودبه‌خودی بیشتر از زغال‌های با درجه بالای زغال‌شدگی است (Beamish, 2005; Beamish et al., 2001). اما با توجه به شکل (۲-۶)، در زغال‌سنگ‌های لیگنیت پتانسیل به خودسوزی ممکن است کمتر از زغال‌سنگ ساب بیتومینه باشد. دلیل کاهش خودسوزی در این نوع زغال‌سنگ نسبت به زغال‌سنگ ساب بیتومینه وجود میزان رطوبت بالا در نمونه زغال‌سنگ لیگنیت می‌باشد. افزایش بیش از حد رطوبت در زغال‌سنگ باعث کاهش تجمع گرما در زغال و کاهش میزان واکنش اکسیژن و زغال می‌شود، که در نتیجه آن دمای زغال کاهش و اکسیداسیون زغال متوقف می‌شود. در نتیجه تمایل به خودسوزی در زغال‌سنگ لیگنیت نسبت به زغال‌سنگ ساب بیتومینه کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۶: ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و نرخ گرمایش خودبه‌خودی (Beamish et al., 2001)

با کاهش درجه زغال‌شدگی، رطوبت محتوی، اکسیژن محتوی، مواد فرار، هیدروژن محتوی و سطح تأثیر داخلی زغال سنگ همگی افزایش یافته و کربن محتوی کاهش می‌یابد. افزایش هر یک از این عوامل باعث افزایش سرعت اکسیداسیون می‌شوند که تمایل به خودسوزی زغال را افزایش می‌دهند. زغال‌های با درجه زغال‌شدگی پایین‌تر، سرعت اکسیداسیون سریع‌تری داشته و تمایل به خودسوزی بیشتری از خود نشان می‌دهند (MDG 1006, 2011). در حالی که زغال‌سنگ‌های با درجه بالای زغال‌شدگی حاوی درصد بالایی از کربن و درصد کمی از اکسیژن و هیدروژن هستند (Nelson et al., 2007). به عنوان مثال آنتراسیت با بالاترین درجه زغال‌شدگی، کندترین فرآیند اکسیداسیون را داراست، در حالی که لیگنیت با درجه زغال‌شدگی پایین، به سرعت اکسید شده و اغلب اظهار داشته‌اند که نمی‌تواند پس از استخراج ذخیره شود (Morris and Atkinson, 1998).

ب- اندازه ذرات^۱

اندازه ذرات نقش مهمی در تعیین نرخ اکسیداسیون زغال‌سنگ دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که با کاهش اندازه ذرات، سطح تأثیر زغال‌سنگ افزایش و جذب بیشتر اکسیژن توسط زغال‌سنگ اتفاق می‌افتد و تمایل زغال‌سنگ برای خودسوزی افزایش می‌یابد (Ren et al., 1999; Kaymakci & Didari, 2002).

در طول عملیات معدنکاری زغال‌سنگ شکسته شده و سطح تأثیر آن افزایش می‌یابد هر چه سطح تأثیر افزایش یابد به دلیل مجاورت بیشتر اکسیژن با زغال، خطر خودسوزی افزایش می‌یابد. مناطقی که ممکن است زغال شکسته شده در آن‌ها یافت شود عبارتند از (MDG 1006, 2011):

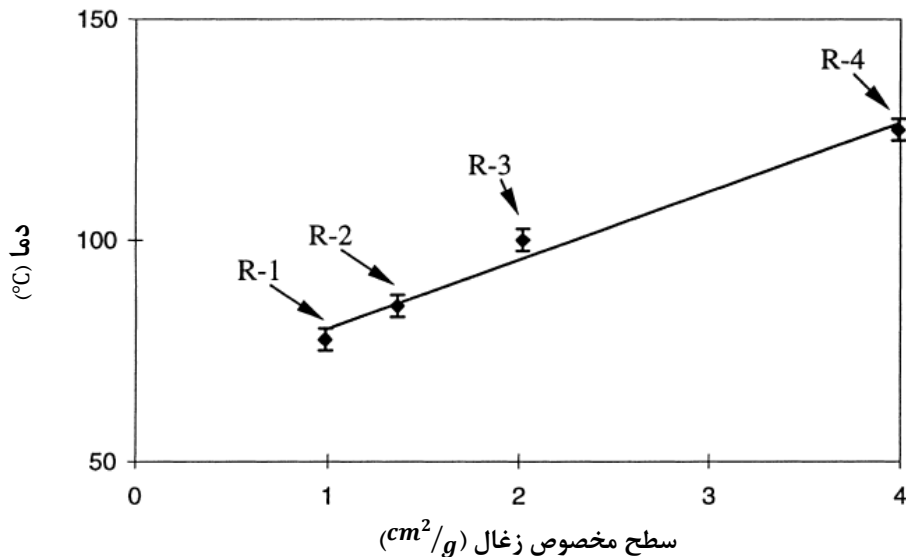
- اطراف پایه‌های شکسته شده؛
- اطراف کارگاه‌های استخراج؛
- اطراف گسل‌ها و دایک‌ها؛

²Particle Size

- اطراف نوار نقاله؛
- مناطق تخریب شده^۱.

هر چه تردی و شکنندگی زغال بیشتر باشد، زغال دارای شکاف و شکستگی بیشتری می‌باشد و در این حالت سطح بیشتری از زغال در معرض جذب اکسیژن و اکسیداسیون قرار می‌گیرد. به‌طور کلی با افزایش سطح تأثیر، میزان نفوذ هوا به داخل زغال افزایش یافته و تمایل زغال به سمت گرمایش خودبه‌خودی افزایش می‌یابد (Banerjee, 1985).

سرعت اکسیداسیون زغال با سطح تأثیر آن دارای یک رابطه خطی است که در شکل (۷-۲) مشاهده می‌شود. بنابراین، زغال‌هایی که دارای تردی و شکنندگی بیشتری هستند سطح تأثیر بزرگ‌تری از آن‌ها در معرض اکسیداسیون قرار دارد، در نتیجه گرمای بیشتری در واحد حجم یکسان از زغال دارای تردی بیشتر انتشار می‌یابد (Sujanti et al., 1999).



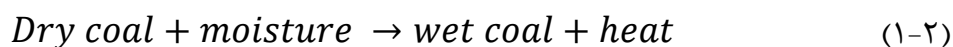
شکل ۷-۲: ارتباط بین سطح مخصوص زغال و دمای ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغال (Sujanti et al., 1999)

³-Goaf/Gob

ج- رطوبت محتوی^۱

رطوبت زغال سنگ دارای دو منشأ بیرونی (داخل حفرات، درزه و شکافها قرار می گیرد) و منشأ درونی (داخل ترکیب ماسرال و کانیها) است. هر چه درجه زغال شدگی بیشتر باشد مقدار رطوبت کمتر است. تمام زغال سنگها دارای رطوبت ذاتی هستند که مقدار آن به درجه زغال شدگی بستگی دارد. تغییرات در میزان رطوبت محتوی زغال سنگ، تأثیر آشکاری در میزان گرمایش خودبه خودی زغال سنگ دارد. به طور کلی، وجود رطوبت در زغال باعث افزایش تمایل به گرمایش خودبه خودی می شود به طوری که با افزایش میزان رطوبت محتوی، دمای زغال نیز با سرعت بیشتری افزایش یافته و دارای تمایل بیشتری برای خودسوزی هست (عطایی، ۱۳۹۴).

همانطور که در معادله (۱-۲) مشاهده می شود واکنش رطوبت با زغال باعث تولید گرما و حرارت می شود (Jones, 2001).



د- پیریت محتوی^۲

از انتشار اولین مقاله در رابطه با خودسوزی توسط پلات^۳ در سال ۱۸۶۸ تا اواسط قرن نوزدهم، فرض بر این بود که سولفور^۴ موجود در پیریت علت اصلی خودسوزی است. با این حال، مشاهده شد که زغال سنگ حتی در غیاب سولفید نیز اکسیژن را جذب کرده و خودسوزی اتفاق می افتد. با انجام تحقیقات بیشتر و اصلاح این دیدگاه، نظریه فعلی حاکی بر این است که نقش پیریت موجود در زغال سنگ به عنوان یک کاتالیزور و شتابدهنده در واکنش اکسایش مطرح است (Morris and Atkinson, 1998).

¹Moisture Content

¹Pyrite Content

²R. Plott

³Sulphur

مواد معدنی حاوی سولفور و پیریت آهن و مارکازیت^۱ ممکن است در لایه‌های زغال به صورت رگه‌های بسیار کریستاله یا به صورت مواد دانه ریز در سراسر لایه وجود داشته باشند. زمانی که پیریت به صورت رگه‌ای باشد سطح کمی از زغال در معرض واکنش با اکسیژن قرار می‌گیرد و نرخ اکسیداسیون نیز کوچک می‌باشد. اما زمانی که پیریت به صورت مواد دانه ریز در زغال وجود دارد سطح قابل توجهی از زغال در معرض واکنش با اکسیژن قرار می‌گیرد که باعث تولید گرمای زیادی می‌شود که سبب افزایش دمای زغال‌سنگ و افزایش نرخ خودسوزی می‌شود به طور کلی پیریت زمانی اثر قابل توجهی در پدیده گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی زغال‌سنگ دارد که در تمرکزهای بیشتر از ۲٪ در زغال‌سنگ وجود داشته باشد (MDG 1006, 2011).

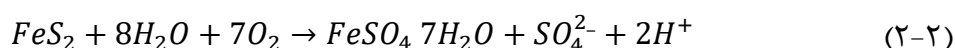
به طور کلی، پیریت از ۲ جهت به افزایش اکسیداسیون و خودسوزی زغال‌سنگ کمک می‌کند که عبارتند از (Nelson and Chen, 2007):

(۱) به عنوان یک کاتالیزور و شتاب دهنده در واکنش اکسایش شرکت می‌کند؛

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

بیمیش^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی به بررسی تأثیر پیریت بر خودسوزی زغال با استفاده از روش آزمایش R₇₀ پرداختند. نتیجه‌گیری کار آن‌ها این بود که با افزایش میزان پیریت محتوی نمونه‌های زغالی سرعت واکنش گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ افزایش می‌یابد.

واکنش پیریت در پدیده گرمایش خودبه‌خودی به صورت معادله (۲-۲) است (Beamish et al., 2012):



این واکنش به شدت گرمازا است و نتیجه آن تولید سولفات هیدرات است.

^۴Marcasite

^۱Beamish

ه- خاکستر محتوی^۱

زغال سنگ‌ها حاوی مواد غیر آلی و زائدی 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). از نظر منشأ دو دسته هستند ذاتی (داخل اجزا مثلاً برگ بیشترین خاکستر را در اجزا ماسرال دارد) و ثانویه (در زمان استخراج و دیاژنز). به طور کلی وجود مقادیر کم از مواد غیر قابل احتراق در زغال سنگ به معنی تمایل پایین‌تر به خودسوزی است.

خاکستر زغال سنگ عمدتاً شامل اکسید سیلیس، اکسید آلومینیوم^۲، کلسیم کلراید^۳ می‌باشد. تجزیه خاکستر نمونه‌های زیادی از زغال سنگ‌ها نشان می‌دهد که سیلیس درصد قابل توجهی از خاکستر را تشکیل می‌دهد. مقدار خاکستر زغال سنگ‌ها بسیار متفاوت و به عوامل متعددی بستگی و متوسط محدوده آن بین ۲ تا ۲۵ درصد متغیر است (اصانلو، ۱۳۷۸).

برخی ترکیبات خاکستر مانند ترکیبات آهن، کربنات‌ها و آهک می‌توانند باعث افزایش واکنش پذیری شده و اثر شتاب‌دهنده‌ای در خودسوزی به وجود آورند اما چون میزان آن‌ها در زغال سنگ بسیار کم است، تأثیر چندانی ندارند، در صورتی که برخی ترکیبات دیگر مانند اکسید آلومینیوم، سیلیس (سیلیکا)^۴ و کلسیم کلراید که درصد قابل توجهی از خاکستر را تشکیل می‌دهند باعث یک اثر تأخیری و کند کننده در فرآیند اکسایش و خودسوزی زغال سنگ دارند (Kaymakci and Didari, 2002).

به طور کلی، افزایش درصد خاکستر محتوی در زغال سنگ باعث کاهش تمایل زغال سنگ به خودسوزی می‌شود و فرآیند اکسایش زغال سنگ دچار تأخیر می‌شود. به عبارت دیگر میزان خاکستر محتوی با استعداد خودسوزی زغال سنگ رابطه عکس دارد یعنی هر چه میزان خاکستر محتوی کمتر باشد استعداد زغال سنگ به خودسوزی افزایش می‌یابد و هر چه میزان خاکستر محتوی بیشتر باشد استعداد

²- Ash Content

²-Alumina

³-Calcium Chloride

⁴Silica

زغال سنگ به خودسوزی کاهش می‌یابد به این علت که هر چه میزان خاکستر محتوی نمونه‌های زغالی بیشتر باشد، خاکستر موجود گرمای بیشتری را به خود جذب می‌کند و اجازه نمی‌دهد که دمای زغال افزایش یابد (عطایی، ۱۳۹۴).

و- ترکیب سنگ‌شناسی^۱ (پتروگرافی)

ترکیبات سنگ‌شناسی زغال سنگ توسط طبیعت مواد گیاهی اصلی تشکیل دهنده زغال و محیطی که زغال در آن شکل گرفته است تعیین می‌شود. ترکیبات سنگ‌شناسی زغال، ترکیباتی همگن و میکروسکوپی هستند که اصطلاحاً «ماسرال» نامیده می‌شوند (یزدی، ۱۳۸۲). ماسرال اجزای آلی ریز میکروسکوپی در بخش با ارزش تشکیل دهنده زغال سنگ می‌باشند ماسرال‌ها از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی کاملاً متفاوت و غیر یکسان و غیر کریستالیزه هستند (اصانلو، ۱۳۸۷). تقسیم بندی‌های متفاوتی برای ماسرال‌ها وجود دارد که با توجه به منشأ اولیه گیاهی‌شان به ۳ دسته اصلی ویترنیت^۲، لیپتینیت^۴ (اگزینیت^۵) و اینرتینیت^۶ (فوزینیت) تقسیم می‌شوند که هر کدام از این گروه‌ها به زیر گروه‌های دیگری نیز تقسیم می‌شوند (اصانلو، ۱۳۷۸؛ یزدی، ۱۳۸۲).

ویترنیت از بخش سلولزی گیاه تشکیل شده و میزان اکسیژن بالایی دارد. بخش شفاف و براق زغال است و در نور انعکاسی به رنگ خاکستری روشن و در نوع پلاریزه به رنگ کدر با حاشیه قرمز تا قهوه‌ای دیده می‌شود و در زیر میکروسکوپ با روغن امریسون قابل تشخیص است. اینرتینیت از خرده‌های لیگنیتی، رشته‌ها و مواد قارچی و در شرایط بی‌هوازی تشکیل می‌شوند. در زیر میکروسکوپ بالاترین قدرت انعکاس را داشته و به رنگ خاکستری روشن تا سفید دیده می‌شود. اینرتینیت‌ها دارای کربن بالا و هیدروژن پایین بوده و درصد خروج مواد فرار آن کم و نیز از نظر شیمیایی غیرفعال هستند.

¹-Petrographic Composition

²-Maceral

³-Vitrinite

⁴-Liptinite

⁵-Exinite

⁶-Inertinite

لیپتینیت‌ها ماسرال‌هایی هستند که به ندرت دیده می‌شوند. این ماسرال‌ها از اسپورها، کاتین‌ها، قسمت‌های چوب پنبه‌ای، رزین‌ها و سمغ و بخش روغنی گیاه تشکیل شده‌اند (Stach, 1982).

زغال‌های با درجه پایین زغال‌شدگی لیپتینیت‌ها از ویتترینیت‌ها قابل تشخیص هستند. این ماسرال‌ها حاوی درصد بالایی از هیدروژن می‌باشند و در زغال‌های با درصد کربن کم قابل مشاهده هستند و با افزایش کربونیزاسیون تشخیص آن‌ها از ویتترینیت‌ها امکان پذیر نیست. حداقل انعکاس را داشته و به صورت خاکستری تیره تا سیاه رنگ دیده می‌شوند (شرکت ملی ذوب‌آهن، ۱۳۵۶).

در بین ماسرال‌های زغال لیپتینیت نرخ خودسوزی بیشتری نسبت به ویتترینیت و اینرتینیت را داراست (Morris and Atkinson, 1988). همچنین با افزایش مقادیر ویتترینیت و لیپتینیت تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ افزایش و با افزایش اینرتینیت، تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی کاهش می‌یابد (Chandra et al., 1990; Walters, 1996).

اما به نظر می‌رسد که درجه زغال‌شدگی نسبت به ترکیبات سنگ‌شناسی نقش مهم‌تر و مؤثرتری را در پدیده گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی زغال ایفا کند (صفاری، ۱۳۹۲).

۲-۸-۲- عوامل زمین‌شناسی

الف- عمق قرارگیری لایه (ضخامت روباره)

به طور کلی، با افزایش عمق لایه، دمای طبیعی لایه و در نتیجه دمای زغال‌سنگ افزایش یافته و استعداد و پتانسیل گرمایش خودبه‌خودی لایه زغال زیاد می‌شود (Morris and Atkinson, 1988). با افزایش هر ۴۰ متر ضخامت روباره، دمای لایه زغال ۱ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد (Banerjee, 1985).

با افزایش عمق لایه میزان بار و فشار وارد بر پایه‌ها افزایش می‌یابد، افزایش فشار سبب شکسته و خرد شدن زغال شده و در نهایت احتمال خودسوزی در لایه افزایش می‌یابد (MDG 1006, 2011). به طور کلی عمق لایه بیش از ۳۰۰ متر، باعث تولید شکستگی‌های بیشتری در لایه زغال و افزایش خطر

گرمایش خودبه‌خودی زغال می‌شود (Banerjee, 1982; Banerjee, 1985). از طرف دیگر، زمانی که استخراج در اعماق نسبتاً کم صورت می‌گیرد، بین درز و شکاف‌های موجود در سطح، و ترک‌ها و حفرات لایه ارتباط به وجود آمده و باعث می‌شود که جریان هوا از سطح به منطقه استخراج شده نفوذ کند و خطر خودسوزی افزایش یابد (MDG 1006, 2011).

عمق کمتر از ۵۰ متر، به ورود هوا از سطح زمین به لایه زغال کمک می‌کند و باعث افزایش خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال می‌شود (Banerjee, 1985).

ب- ضخامت لایه^۱

هر چه ضخامت لایه زغال بیشتر باشد، مساحت بیشتری از زغال در معرض واکنش با اکسیژن و اکسیداسیون قرار می‌گیرد و احتمال بروز خطر خودسوزی در لایه زغال افزایش می‌یابد. زمانی که ضخامت لایه زغال زیاد است ممکن تنها قسمتی از لایه زغال استخراج شود و بقیه ضخامت لایه در بالا یا پایین در قسمت استخراج شده باقی گذاشته شود که این ضخامت باقی مانده در معرض خطر اکسیداسیون و خودسوزی است (Banerjee, 1982; Michaylov, 2002; Singh et al., 2002).

اگر ضخامت لایه زیاد باشد و باقی گذاشتن آن در قسمت‌های استخراج شده صرفه اقتصادی نداشته باشد، باید لایه زغال را در چند مرحله استخراج کرد که در چنین حالتی سرعت پیشروی آهسته است و لایه زغال مدت زمان بیشتری در معرض جریان تهویه هوا قرار دارد، که این عامل باعث افزایش خطر گرمایش خودبه‌خودی می‌شود (صفاری، ۱۳۹۲).

از طرف دیگر حجم زغال‌های شکسته و خرد شده با افزایش ضخامت لایه افزایش می‌یابد که در نتیجه آن، پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ افزایش می‌یابد (MDG 1006, 2011). به طور کلی لایه‌های زغال

^۱- Seam thickness

با ضخامت بیش از ۵ متر دارای خطر بیشتری از لحاظ احتراق و گرمایش خودبه‌خودی هستند (Banerjee, 1985).

ج- شیب لایه

در لایه‌های با شیب زیاد، کنترل خودسوزی پیچیده‌تر خواهد شد و به دلیل اینکه میزان ضریب استخراج لایه کمتر می‌شود و زغال بیشتری در سقف و کف کارگاه باقی می‌ماند، خطر خودسوزی زغال افزایش می‌یابد. البته با انتخاب روش استخراج مناسب در شیب زیاد می‌توان ضریب استخراج را افزایش داد، در نتیجه میزان خطر خودسوزی زغال سنگ کاهش می‌یابد. لایه‌های با شیب کم، کمتر مستعد گرمایش خودبه‌خودی هستند (Michaylov, 2002).

د- وجود گسل در لایه

ساختارهایی مانند گسل و درزه‌های باز ممکن است در سقف و کف کارگاه وجود داشته باشند که این ساختارها با مناطق ضعف همراه هستند. هر چه تعداد این ساختارها بیشتر باشد، شرایط کار مشکل‌تر شده و راندمان کار کاهش می‌یابد (عطایی، ۱۳۹۴).

حضور گسل، درزه و نواحی شکسته در اطراف لایه‌های زغال مشکلاتی زیادی ایجاد کرده و باعث ورود اکسیژن به داخل لایه زغالی می‌شوند، و ممکن است به کانون‌های افزایش تنش در منطقه تبدیل شوند، بنابراین به توجه ویژه‌ای نیاز دارند (صفاری، ۱۳۹۲). از طرف دیگر وجود ساختارهایی مانند گسل، درزه و شکاف باعث کاهش نرخ استخراج و سرعت پیشروی می‌شوند. نرخ استخراج پایین‌تر سبب می‌شود که سطح بیشتری از زغال در معرض اکسیژن هوا قرار گرفته و در نتیجه پتانسیل خودسوزی افزایش می‌یابد (Kaymakci & Didari, 2002; Michaylov, 2002).

از طرف دیگر مناطق دارای گسل، دایک و درزه‌های باز باعث ایجاد شکستگی‌های بیشتر در لایه‌های زغال شده در نتیجه اکسیژن بیشتری از طریق این شکستگی‌ها وارد لایه‌های زغال می‌شود و باعث افزایش خودسوزی می‌شوند (Morris and Atkinson, 1996; Singh, 2013).

ه- استخراج چند لایه‌ای^۱

خودسوزی زغال یکی از مشکلات غالب در معادن چند لایه‌ای است. استخراج در لایه‌ای که بالا یا پایین لایه‌های دیگر قرار دارد که آن لایه‌ها قابلیت استخراج را دارند یا به خاطر شرایط فیزیکی قابلیت استخراج را ندارند به خاطر شرایط سقف ضعیف، نشت هوا و غیره خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال افزایش می‌یابد. در هر جا که یک موقعیت چند لایه‌ای وجود دارد هم در استخراج لایه اول و هم در استخراج لایه‌های بالا و پایین خطر گرمایش خودبه‌خودی وجود دارد. تنها در صورتی خطر گرمایش خودبه‌خودی رفع می‌شود که فاصله بین لایه‌ها حدود ۳۰ برابر ضخامت لایه باشد (Mitchell, 1990).

۲-۸-۳- عوامل معدن کاری

الف- روش استخراج^۲

روش استخراج نقش مهمی در خودسوزی ایفا می‌کند، هر چه روش استخراج کامل‌تر باشد و زغال کمتری به‌صورت برجا (در سقف لایه، کف لایه و چه به صورت پایه‌های نگهداری) از دست رود و یا به‌صورت انباشت شده برای انتقال به بیرون بر اثر استخراج باقی بماند آن روش استخراج کامل‌تر و خطر خودسوزی زغال در آن کمتر است. بنابراین روش استخراج اتاق و پایه^۳ خطر بیشتری نسبت به روش استخراج جبهه کار طولانی^۴ دارد (عطایی، ۱۳۹۴).

در روش‌های استخراجی مانند اتاق و پایه و جبهه کار کوتاه که از ماشین استخراج پیوسته^۵ استفاده می‌شود سرعت استخراج از سیستم جبهه کار طولانی که با شیرر لودر^۶ کار می‌شود کمتر است؛ و سرعت استخراج در روش استخراج جبهه کار طولانی دستی (سنتی) از همه روش‌ها کمتر و خطر خودسوزی

^۱Multi-seam workings

^۲Extraction Method

^۳Room and Pillar

^۴Longwall Mining Method

^۵Continuous Miner Machine

^۶Shearer Loader

در آن بیشتر است زیرا زغال مدت زمان بیشتری در معرض جریان هوا و اکسیداسیون قرار می‌گیرد (عطایی، ۱۳۹۴).

برخی از اقدامات احتیاطی در روش‌های معدنکاری برای جلوگیری از خودسوزی عبارتند از

(Morris and Atkinson, 1986):

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

ب- جهت پیشروی^۱

در روش استخراج جبهه کار طولانی، به دو طریقه پیشرو^۲ و یا پسرو^۳ ممکن است استخراج صورت گیرد. در صورتی که زغال دارای خاصیت خودسوزی بالا باشد، برای جلوگیری از آن باید ارتباط هوا با زغال قطع شود، که در روش پسرو جدا کردن پهنه‌های استخراجی راحت‌تر و ساده‌تر صورت می‌گیرد (صفاری، ۱۳۹۲). در سیستم‌های استخراج پیشرو به دلیل باقی ماندن گرد زغال و همچنین امکان نشت^۴ هوا به قسمت‌های استخراج شده^۵ مشکل خودسوزی زغال‌سنگ بیشتر از روش پسرو است (Ren et al, 2005).

³-Advance Direction

⁴-Advance Long Wall

⁵-Retreating Long Wall

¹-Leakage

²-Gob/Goaf

به طور کلی، با توجه به دلایل و مشکلات گفته شده، در شرایط با خطر بالای خودسوزی زغال سنگ روش پسر بر روش پیشرو ترجیح داده می‌شود (عطایی، ۱۳۹۴).

ج- نرخ (سرعت) پیشروی^۱

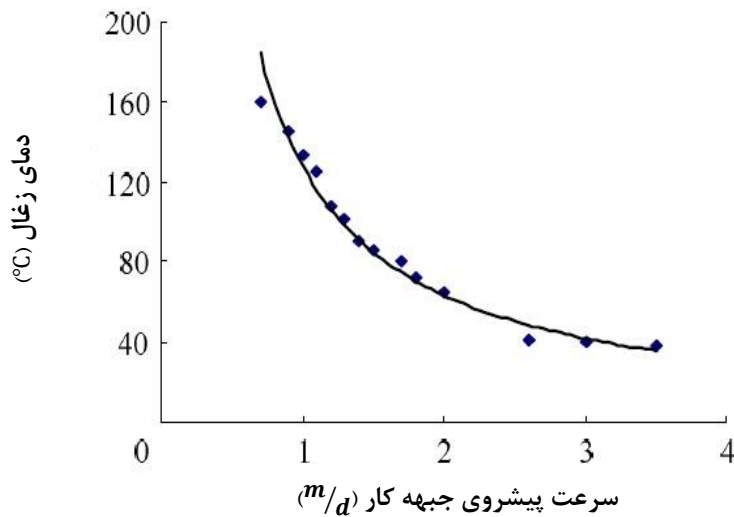
نرخ یا سرعت پیشروی یکی از عوامل و فاکتورهای تأثیر گذار بر پدیده خودسوزی زغال سنگ است. نرخ استخراج به عواملی از قبیل عرض پهنه^۲ (یا طول جبهه کار) کارگاه استخراج، فاکتورهای زمین شناسی و ژئوتکنیکی، زمان و تجهیزات استخراجی بستگی دارد (صفاری، ۱۳۹۲). وجود عوامل زمین شناسی مانند گسل، دایک و درزه‌های باز، باعث ایجاد شکاف‌ها و شکستگی‌های بیشتر و کاهش سرعت استخراج می‌شود در نتیجه کاهش سرعت پیشروی سبب افزایش خطر خودسوزی زغال سنگ می‌شود (MDG (1006, 2011).

هر چه طول جبهه کار افزایش یابد، سرعت پیشروی کمتر می‌شود و زغال زمان بیشتری در معرض جریان هوای تهویه قرار می‌گیرد که پتانسیل احتراق خودبه‌خودی افزایش می‌یابد. اما اگر طول جبهه کار کاهش یابد، سرعت پیشروی بیشتر و زغال زمان کمتری در معرض جریان هوای تهویه قرار می‌گیرد در نتیجه خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال کاهش می‌یابد (Singh., 2002).

در شکل (۸-۲) ارتباط بین سرعت پیشروی جبهه کار و افزایش دمای زغال آورده شده است.

³Rate of Advance

⁴Panel



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

از شکل بالا نتیجه می‌شود هر چه سرعت پیشروی در یک جبهه کار سریع‌تر باشد، سرعت افزایش دمای زغال سنگ کمتر می‌شود و برعکس. در بریتانیا، حداقل نرخ پیشروی جبهه کار حدود ۵/۵ متر در هفته به ازای هر کارگر در نظر گرفته می‌شود (Morris and Atkinson, 1986).

د- نشت هوا به فضای تخریب شده

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

در حین معدنکاری و استخراج زغال، نشت هوا به قسمت‌های استخراج شده و پشت سیستم‌های نگهداری باعث می‌شود تا جابجایی آرام هوا به نواحی استخراج شده صورت گیرد و اکسیژن به زغال‌های رها شده در نواحی تخریبی برسد که با توجه به میزان زغال رها شده و حجم هوای نشت پیدا کرده پدیده اکسیداسیون و تولید گرما اتفاق می‌افتد (صفاری، ۱۳۹۲).

مقدار نشت هوا به نواحی استخراج شده بستگی به مشخصات قسمت استخراج شده و نوع سیستم تهویه دارد (صفاری، ۱۳۹۲). در مورد مشخصات قسمت استخراج شده یعنی این که در محل استخراج شده،

تخریب صورت گرفته است و یا اینکه از روش‌های پر کردن استفاده شده است که میزان نشت هوا در روش‌های مختلف پر کردن نیز متفاوت می‌باشد، به طوری که در روش پر کردن هیدرولیکی مقدار نشت به کمترین مقدار خود می‌رسد در حالی که در روش‌های تخریبی میزان نشت به حداکثر مقدار خود می‌رسد (صفاری، ۱۳۹۲).

همچنین میزان نشت در سیستم‌های مختلف تهویه نیز متفاوت است. از اصلی‌ترین و پرکاربردترین سیستم‌های تهویه در معادن جبهه کار طولانی سیستم‌های تهویه نوع U و Y می‌باشد، سیستم تهویه نوع Y نسبت به سیستم تهویه نوع U سطح بالاتری از اکسیژن را به فضای تخریب شده منتقل می‌کند و لذا خطر خودسوزی زغال در سیستم نوع Y بیشتر است (Ren and Balusu, 2005; Ren et al., 2012).

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

ه- ضریب بازیابی (نسبت استخراج) زغال‌سنگ

نسبت بین حجم زغال‌سنگ استخراج شده از لایه به کل زغال‌سنگ موجود در لایه ضریب بازیابی نامیده می‌شود. که هر چه این نسبت به بزرگ‌تر باشد یعنی به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، خطر خودسوزی زغال‌سنگ کاهش می‌یابد.

ضریب استخراج متأثر از میزان زغال باقیمانده در نواحی استخراج شده است و مقدار زغال باقیمانده و استخراج نشده از لایه زغال نیز متأثر از ضخامت لایه، شیب لایه، کیفیت زغال، وجود گسل در لایه و غیره است (Singh., 2002).

هیچ سیستم استخراجی پیشرفته‌ای نمی‌تواند بازیابی کل لایه زغال را تضمین کند و همیشه مقداری از زغال‌سنگ در نواحی استخراج شده باقی می‌ماند که یکی از عوامل جدی در خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ در مناطق استخراج شده است (عطایی، ۱۳۹۴).

و- سیستم تهویه و حجم جریان هوا

براساس آمار، سیستم تهویه معدن می‌تواند ۸۰-۹۰ درصد گاز را در کل معدن، ۷۰-۸۰ درصد گاز در سطح زغال‌سنگ، ۲۰-۳۰ درصد گرد و خاک و ۶۰-۷۰ درصد گرما در عمق را از بین ببرد (Meng, 2013).

سیستم تهویه نقش بسیار مهم و پیچیده‌ای را در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی ایفا می‌کند، زیرا از یک طرف جریان هوا تامین کننده اکسیژن است و اکسیژن یکی از ۳ عامل اصلی در پدیده خودسوزی زغال‌سنگ است و از طرف دیگر سیستم تهویه مناسب باعث پراکندگی و اتلاف گرمای تولید شده ناشی از اکسایش زغال می‌شود و مانع از تجمع گرما می‌شود (Kaymakci & Didari, 2002).

روش تهویه و میزان حجم جریان تهویه دارای تأثیر بزرگی در وقوع پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ است. به نحوی که اگر جریان تهویه کم باشد نمی‌تواند مانع از وقوع اکسیداسیون زغال شود و اگر حجم جریان تهویه زیاد باشد اجازه تجمع گرمای ناشی از اکسیداسیون را نمی‌دهد (Banerjee, 1985) اما غلظت بالای اکسیژن موجود در هوا باعث می‌شود که سرعت واکنشی اکسایش شتاب بیشتری به خود بگیرد (Ramlu, 2007).

سطح (تراز) بهینه تهویه برای جلوگیری از پدیده خودسوزی بستگی به شرایط انتقال و همرفتی گرما، میزان نشت هوا (مقاومت شبکه تهویه، راه‌های فرار هوا و غیره)، میزان گازخیزی معدن، تعداد کارکنان و ماشین‌آلات و عوامل متعدد دیگری دارد (Banerjee, 1985).

۲-۹- روش‌های پیش‌گیری از خودسوزی

۲-۹-۱- خنثی‌سازی با استفاده از نیتروژن

در بسیاری از کشورها، برای کنترل خودسوزی زغال‌سنگ از نیتروژن مایع استفاده می‌شود. بدین منظور، مخزن‌های حاوی نیتروژن مایع را به داخل معدن می‌برند و آن را در تبخیر کننده‌ها حرارت می‌دهند تا به گاز تبدیل شود. سپس گاز را به وسیله‌ی لوله‌هایی به قسمت‌های در حال خودسوزی تزریق می‌کنند. نیتروژن جای هوا را می‌گیرد و بدین ترتیب، به علت کاهش غلظت اکسیژن، خودسوزی کنترل می‌شود. این یک روش بسیار موفق است، اما تنها زمانی امکان پذیر است که ذخیره عظیمی از نیتروژن مایع در دسترس باشد. (Wang-xing et al., 2011)

۲-۹-۲- فوم سه‌فازی

فوم سه‌فازی که می‌تواند در پیش‌گیری از خودسوزی زغال‌سنگ به کار رود، از مواد غیر قابل احتراق (خاکستر بادی، گل زرد و غیره)، گاز بی‌اثر (نیتروژن) و آب که همگی مواد مؤثر برای کنترل آتش هستند، تشکیل شده است. ابتدا عامل فوم ساز به خاکستر بادی یا گل زرد اضافه شده و پس از آن گاز نیتروژن تزریق می‌شود. از طریق بهم زنده مکانیکی فیزیکی توسط ژنراتور فوم، محلول چند فازی با ذرات خاکستر بادی و یا گل زرد متصل به سطح حباب شکل می‌گیرد، که کف سه‌فازی نامیده می‌شود (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴).

در مقایسه با فناوری و مواد موجود قبلی برای کنترل آتش‌سوزی، فوم سه‌فازی مزایای استفاده از هر دو روش گاز بی‌اثر و دوغاب در کنترل آتش را ارائه می‌دهد. مقدار زیادی از ترکیبات فوم سه‌فازی پس از نیتروژن به دوغاب حاوی عامل فوم ساز تزریق شده و حجم فوم به شدت افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۲-۹) نشان داده شده فوم می‌تواند بر روی خود انباشته شود و کمک کند منطقه آتش‌سوزی پر شود و جای خالی زغال تخلیه شده در فضای خالی را پر کند. نیتروژن محصور شده در فوم می‌تواند زمان بیشتری در منطقه آتش‌سوزی برای خاموش کردن آتش معدن باقی بماند (Wang-xing et al., 2011; Ren and wu, 2009).



شکل ۲-۹: تصویر فوم سه فازی تولید شده (Wang-xing et al., 2011)

۲-۱۰- جمع بندی

در این فصل به ارائه کلیاتی در مورد مکانیزم خودسوزی زغال سنگ و پارامترهای مؤثر بر این پدیده پرداخته شد. در یک جمع بندی کلی از مجموعه مطالب این فصل می توان نتیجه گرفت که خودسوزی زغال سنگ مهم ترین دلیل آتش سوزی در معادن زغال سنگ می باشد که دارای آثار زیان آور اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی و فیزیکی است. از طرف دیگر پدیده گرمایش خودبه خودی زغال سنگ یک فرآیند پیچیده است که عوامل و پارامترهای مختلفی در آن تأثیر گذار است؛ لذا در این فصل به بررسی پدیده خودسوزی زغال سنگ پرداخته شد و سپس تأثیر مهم ترین پارامترها و عوامل مؤثر بر آن و همچنین روش های پیش گیری از خودسوزی نیز مورد بحث قرار گرفت.

در فصل سوم به بررسی سابقه علمی موضوع مورد بررسی و روش های مختلف ارزیابی پتانسیل گرمایش خودبه خودی زغال سنگ پرداخته خواهد شد.

فصل سوم: سابقه علمی موضوع و روش‌های بررسی

خودسوزی

۳-۱- مقدمه

گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ، یکی از دلایل عمده آتش‌سوزی‌ها در معادن زغال‌سنگ و تهدیدی جدی در برای استخراج این معادن در سراسر جهان است. سالیانه حدود ۳۰۰ نوع آتش‌سوزی ناشی از خودسوزی در معادن زغال‌سنگ چین رخ می‌دهد و حدود ۱۰۰ میلیون تن زغال دچار خودسوزی شده و از بین می‌رود.

برای درک درست و بهتر از موضوع گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ و غلبه بر این مشکل لازم است تحقیقات و پژوهش‌های بنیادین بر روی این موضوع انجام گیرد. برای این منظور باید پیشینه تحقیق را بررسی کرد و پژوهش جدید را با پژوهش‌های پیشین ارتباط داد. تحقیق در مورد موضوع گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ در سال‌های اخیر مورد توجه محققان کشورهای مختلف قرار گرفته است. در این فصل ابتدا پیشینه تحقیق را مورد بررسی قرار داده و در ادامه به مطالعه روش‌های بررسی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته خواهد شد.

۳-۲- پیشینه تحقیق

اهمیت خودسوزی در معادن زغال‌سنگ به طور کلی مستلزم تحقیقات زیادی است. سابقه مطالعاتی موضوع خودسوزی زغال‌سنگ به سال ۱۹۱۰ برمی‌گردد. پژوهشگران در سراسر جهان به تحقیق و بررسی برای پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته‌اند و با استفاده از روش‌های مختلف اثر عوامل و پارامترهای مؤثر بر خودسوزی را مورد بررسی قرار دادند، که با توجه به اقتضای تحقیق حاضر و دسترسی کم منابع معتبر علمی برخی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده پیشین به دقت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته شده در زیر آورده شده است.

مطالعات بانرجی و همکاران (۱۹۷۲)

با استفاده از آزمایش دمای نقطه تقاطعی (CPT) به بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ‌های مختلف پرداختند. در این بررسی مشاهده شد زغال‌های با دمای نقطه تقاطعی بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد جز زغال‌هایی با استعداد بالای خودسوزی محسوب می‌شوند و در دمای بالاتر از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تمایل به خودسوزی بسیار ضعیف‌تر است. در بین دماهای ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تمایل به خودسوزی حالت بینابینی دارد (Banerjee et al., 1972).

مطالعات ناندی و همکاران (۱۹۷۲)

با استفاده از آزمایش دمای نقطه تقاطعی به بررسی تأثیر رطوبت محتوی، درصد مواد فرار و درصد اکسیژن موجود در زغال سنگ بر روی خودسوزی زغال سنگ پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش هر یک از این اجزا، دمای نقطه تقاطعی کاهش یافته و استعداد خودسوزی افزایش می‌یابد (Nandy et al., 1972).

مطالعات پیتر و همکاران (۱۹۷۸)

مشاهده کردند که اکسیداسیون موادی که در معرض هوا قرار گرفته‌اند دارای انرژی فعال ظاهری بین ۶۳/۹ تا ۶۹/۰ کیلو ژول بر مول هستند که مستقل از رطوبت محتوی آن است. با این حال، میزان اکسیداسیون زغال سنگ با افزایش میزان رطوبت افزایش می‌یابد و با افزایش دما کربنیزاسیون منبع زغال سنگ کاهش می‌یابد و همچنین میزان هوازدگی زغال سنگ افزایش می‌یابد (Peter et al., 1978).

مطالعات بانرجی (۱۹۸۲)

با مطالعه بر روی ۲۲ پارامتر معدن کاری در معادن زغال سنگ هندوستان یک سیستم جامع کیفی برای طبقه بندی و تعیین خطر خودسوزی زغال سنگ ارائه داد (Banerjee, 1982).

مطالعات سینگ و همکاران (۱۹۸۴)

روش های رایج ارزیابی شاخص های ریسک احتراق خودبه خودی را برای طبقه بندی لایه های زغال سنگ که تمایل به خودسوزی دارند مشخص کرد. استعداد زغال سنگ به احتراق خودبه خودی بستگی به پارامترهای ذاتی و همچنین پارامترهای خارجی مؤثر بر خودسوزی دارد. سیستم های طبقه بندی ریسک بر مبنای امتیازدهی معین به عوامل ذاتی و بیرونی هستند. اقدامات احتیاطی برای کنترل خطر خودسوزی در استخراج جبهه کار طولانی، ذخیره سازی و حمل و نقل زغال سنگ همراه با تکنیک های پیشگیرانه برای کنترل آتش سوزی مانند استفاده از نیتروژن مایع توضیح داده شده است (Singh et al., 1984).

مطالعات قوش و همکاران (۱۹۸۶)

در این تحقیق به بررسی تأثیر پیریت بر روی خودسوزی زغال سنگ و ارائه روشی برای پیش گیری از خودسوزی زغال سنگ پرداخته شد. آن ها مشاهده کردند که وجود پیریت در زغال سنگ تمایل زغال به خودسوزی را افزایش می دهد و در صورت حضور رطوبت در لایه زغال نیز دمای زغال افزایش می یابد. بنابراین نتیجه گیری شد که اسپری آب و سیلاب به عنوان یک راه حل مؤثر جهت کنترل خودسوزی زغال سنگ نمی تواند مطرح گردد و نیز بر تأثیر تزریق نیتروژن برای جلوگیری از خودسوزی زغال سنگ تأکید شد (Ghosh et al., 1986).

مطالعات طرفدار و همکاران (۱۹۸۹)

برای نمونه های زغالی مختلف دمای نقطه تقاطعی را تعیین کردند و مشاهده کردند که نمونه های زغال سنگ با دمای نقطه تقاطعی بین ۱۳۲ تا ۱۳۷ درجه سانتی گراد نسبت به خودسوزی زغال سنگ حساس تر هستند (Tarafdar et al., 1989).

مطالعات رایلی و همکاران (۱۹۸۷)

در این کار پژوهشی با جمع‌آوری اطلاعات نمونه‌های زغالی مشخص شد که پارامترهای ذاتی زغال سنگ مانند نوع زغال، رطوبت محتوی، تخلخل، سطح تأثیر، خاکستر محتوی، پیریت محتوی و غیره همگی در گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ مؤثر هستند. همچنین مشخص شد که شرایط محیطی شامل تغییر در میزان رطوبت محیط پیرامون و حرکت هوا از میان انباشت‌های زغالی نیز ممکن است سهمی در خودسوزی زغال سنگ داشته باشند (Riley et al., 1987).

مطالعات سینگ و همکاران (۲۰۰۷)

در این تحقیق برای توسعه و گسترش ارزیابی خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ در روش جبهه کار طولانی در معادن زغال سنگ یک سیستم تخصصی ارائه شد (Singh et al., 2007).

مطالعات چاندرا و همکاران (۱۹۹۰)

یک بررسی اولیه از احتمال وقوع آتش سوزی به علت احتراق خود به خود در لایه‌های مختلف منطقه زغال خیز Raniganj انجام داد و احتمال وجود ارتباط بین درجه زغال‌شدگی و احتراق خود به خود زغال سنگ را نشان داد. علاوه بر این، با توجه به مطالعات انجام شده ثابت شد، میزان ویترونیته و مواد فرار در لایه‌های زغال در قابلیت احتراق خودبه‌خودی لایه‌های زغال سنگ تأثیر دارند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در منطقه زغال خیز Raniganj پیریت هیچ تأثیری بر قابلیت اشتعال لایه‌های زغال سنگ ندارد. به این نتیجه رسید که تمایل زغال سنگ‌ها به خودسوزی به درجه زغال‌شدگی وابسته است. با افزایش درجه زغال‌شدگی، از شدت احتراق خود به خودی به تدریج کاهش می‌یابد (Chandra et al., 1990).

مطالعات اولایینکا و همکاران (۱۹۹۰)

نشان داد CPT زغال‌های نیجریه با افزایش درجه زغال‌شدگی کاهش می‌یابد. شاخص استعداد خودسوزی، که ارزیابی خوبی از استعداد زغال‌سنگ به گرمایش خود به خودی دارد، نشان داد با افزایش درجه زغال‌شدگی و کاهش مقدار اکسیژن و رطوبت موجود در زغال‌سنگ تمایل زغال به خودسوزی کاهش می‌یابد. از چهار نمونه زغال‌سنگ مورد مطالعه، زغال سنگ بیتومینه با میزان مواد فرار بالا دارای کمترین حساسیت به احتراق خودبه‌خودی است، در حالی که زغال‌سنگ ساب بیتومینه بیشترین حساسیت را دارد (Olayinka et al., 1990).

مطالعات گرور (۱۹۹۴)

مکانیزم خودسوزی زغال‌سنگ را به طور کامل و جامع بررسی و ارائه کرد، و نتیجه گرفت، عوامل زیادی در خودسوزی زغال‌سنگ مؤثر است که نمی‌توان آن‌ها را به طور جداگانه مورد بررسی قرار داد و بایستی همه‌ی عوامل ذاتی مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ را به صورت همزمان مورد بررسی قرار داد (Greuer, 1994).

مطالعات بات و همکاران (۱۹۹۶)

یک رویکرد جدید برای بررسی اثر رطوبت، تبخیر و تراکم بر میزان اکسیداسیون زغال‌سنگ با اعمال تعادل بین میزان رطوبت و اکسیژن اجازه محاسبه تأثیر مرزی این دو بر اکسیداسیون را محاسبه کرده‌اند. نتایج این آزمایش تأثیر توازن میزان رطوبت و اکسیژن با اعمال توازن انرژی یا تأثیر دو برابری افزایش میزان رطوبت بر افزایش پتانسیل احتراق خود به خود زغال را نشان می‌دهد (Bhatt et al., 1996).

سجنتی و همکاران (۱۹۹۹)

یک مطالعه آزمایشگاهی در مورد تأثیر ناخالصی‌ها بر احتراق خود به خودی زغال سنگ انجام داده‌اند. نتایج حاصله گویای تأثیر افزایش میزان کربنات کلسیم، استات سدیم، پتاسیم استات و پرییت، بر افزایش احتراق خود به خودی زغال سنگ است. از طرفی در این آزمایش اثر بارگذاری افزودنی برای یک عامل مهارکننده (KCl) و یک عامل ارتقا دهنده (NaAc) مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است که اثربخشی این عوامل ارتقاء و مهار با افزایش بارگذاری افزودنی افزایش می‌یابد (Sujanti et al., 1999).

مطالعات جونز (۲۰۰۱)

در این پژوهش به بررسی تأثیر میزان رطوبت محتوی در افزایش دمای ناشی از احتراق خودبه‌خودی زغال سنگ پرداخته شد. وی نتیجه گرفت، با افزایش درصد رطوبت محتوی تمایل و استعداد زغال سنگ به گرمایش خودبه‌خودی افزایش می‌یابد (Jones, 2001).

مطالعات کوکاک و همکاران (۲۰۰۳)

در این تحقیق به ارزیابی خطر خودسوزی زغال سنگ لیگنیت در ناحیه زغالی آسکال ترکیه پرداخته شد. تأثیرات میزان جریان گاز، رطوبت زغال، رطوبت هوا و اندازه ذرات در گرمایش خودبه‌خودی نمونه‌های زغالی با استفاده از آزمایش دمای نقطه تقاطعی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که تمایل زغال سنگ به خودسوزی با کاهش اندازه ذرات و افزایش رطوبت محتوی زغال افزایش می‌یابد (Kucuk et al., 2003).

مطالعات بیمیش (۲۰۰۵)

در این مقاله به بررسی تأثیر درجه زغال‌شدگی بر روی گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ پرداخته شد. نتایج حاصله بیان می‌کند، هر چه درجه زغال‌شدگی بیشتر شود میزان کربن افزایش می‌یابد و درصد

اکسیژن، هیدروژن و مواد فرار کاهش می‌یابد. با کاهش هر یک از این مواد و افزایش درصد کربن استعداد زغال سنگ به خودسوزی کاهش می‌یابد (Beamish, 2005).

مطالعات ساهو و همکاران (۲۰۰۵)

در این پژوهش به بررسی خطر خودسوزی زغال سنگ با استفاده از ۳ روش مختلف آزمایشگاهی دمای نقطه تقاطعی^۱ (CPT)، آنالیز حرارتی تفاضلی^۲ (DTA)، و کاوش گرماسنجی تفاضلی^۳ (DSC) پرداخته شد. آن‌ها از این بررسی‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی روش کاوش گرماسنجی تفاضلی در مورد گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ دقیق‌تر از روش دمای نقطه تقاطعی است (Sahu et al., 2005).

مطالعات سینگ و همکاران (۲۰۰۷)

مشاهده کرد که در معادن روباز، زغال سنگ بلافاصله اکسیده شده و آتش می‌گیرد، که ناشی از ویژگی‌های ذاتی زغال سنگ مانند درجه زغال‌شدگی پایین، رطوبت بالا، مواد فرار بالا، خاکستر محتوی، حضور گوگرد در قالب پیریت، دمای نقطه تقاطعی پایین (CPT) و مقدار درجه حرارت اشتعال (IPT) است. هدف از این مقاله ارائه مطالعات موردی مختلف در مورد مدیریت ایمنی معادن زغال سنگ روباز در برابر وقوع خودسوزی است (Singh et al., 2007).

مطالعات بیمیش و شولتز (۲۰۰۸)

در این مطالعه به بررسی و ارزیابی اثر درصد رطوبت محتوی زغال سنگ، بر روی خودسوزی زغال سنگ پرداخته شد. مشاهده شد که با افزایش درصد رطوبت محتوی زغال سنگ تمایل زغال برای گرمایش خودبه‌خودی افزایش می‌یابد (Beamish and Schultz, 2008).

¹Crossing Point Temperature

²Differential Thermal Analyzer

³Differential Scanning Calorimetry

جان و همکاران (۲۰۰۹)

در این مقاله به بررسی احتراق خود به خودی زغال سنگ و تأثیر آن بر انتشار گازهای گلخانه‌ای با توجه به اندازه‌گیری میزان انتشار CO_2 و CH_4 از لایه‌های مختلف ۱۱ معدن واقع در استرالیا پرداخته‌اند. که نتایج حاصله تقسیم بندی معادن به سه دسته عمده بر اساس شدت احتراق خود به خودی و تأثیر آن بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده است؛ از دیگر نتایج مندرج در مقاله اثبات اندازه اولیه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأیید این مطلب که از مهمترین عوامل دیگر مؤثر بر این مورد عوامل بیولوژیک است (John et al., 2009).

سیپلا و همکاران (۲۰۱۲)

در این مقاله به بررسی احتراق خود به خودی زغال سنگ با توجه به مکان ذخایر زغال سنگ و سیستم حمل و نقل تعیین کرده‌اند و موارد پیش گیری و کنترل برای کاهش آسیب های احتمالی نیز اعمال شده است (Sipila et al., 2012).

مطالعات مائو و همکاران (۲۰۱۳)

برای بررسی احتراق خود به خودی زغال سنگ، یک آزمایش با ۱۵۰۰ کیلوگرم زغال سنگ بر روی دستگاه XK-III انجام دادند. در آزمایش آن‌ها که به مدت ۳۹ روز برای رسیدن به دمای ۱۵۸ درجه سانتی گراد (دمای احتراق خود به خودی زغال سنگ) طول کشید، پس از ۳۰ روز با افزایش ۶۰ درجه دما، جهش حرارتی و افزایش میزان مصرف اکسیژن قابل توجهی ملاحظه شد. تغییر میزان تولید CO و CO_2 دیگر نتیجه حاصل از آزمایش آن‌ها بوده است (Mao et al, 2013).

مطالعات هومن و همکاران (۲۰۱۴)

در مقاله خود به لحاظ نظری، مسئله احتراق خود به خودی زغال سنگ را بررسی کرده‌اند، برای این بررسی تبادل حرارتی (بدون شرایط باد) با توجه به پارامترهای کلیدی مانند: نوع زغال، مقدار رطوبت

، قطر ذرات و همچنین دمای هوای محیط را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده که برای بیان این مفهوم دو پارامتر دمای ذخیره و نقطه انفجار (زمانی که ذخایر زغال کاملاً خشک می شوند) ارائه داده‌اند (Hooman et al., 2014).

ژان دنگ و همکاران (۲۰۱۵)

به بررسی تأثیر پیریت بر احتراق خود به خود زغال‌سنگ پرداخته است. در این آزمایش پارامترهای احتراق خود به خودی مانند: گازهای شاخص، دما و حرارت آزاد شده و غیره و تأثیر آن بر خودسوزی بررسی شده است. نتایج حاصله نشان دهنده این است که حضور پیریت می‌تواند گرانی زغال‌سنگ را به سمت احتراق خود به خود تغییر دهد (Jun Deng et al., 2015).

نیماج و همکاران (۲۰۱۶)

در این مقاله به بررسی احتراق خود به خود زغال‌سنگ با توجه به خواص ذاتی و شاخص‌های حساسیت پرداخته‌اند. در این مقاله نمونه‌های زغال‌سنگ، از نواحی مختلف هند جمع‌آوری شده، شاخص‌های مختلفی مانند: نقطه تقاطعی دما، دمای اشتعال، شاخص اولپینسکی، تجزیه و تحلیل پتانسیل اکسیداسیون و تجزیه و تحلیل حرارتی دیفرانسیل برای تعیین پتانسیل احتراق خود به خودی زغال‌سنگ بررسی شده است. این آزمایش نشان دهنده این مورد است که شاخص اولپینسکی نسبت به دیگر شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (Nimaje et al., 2016).

مطالعات مهالیک و لستر (۲۰۱۶)

برای تعیین قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ به بررسی روش‌های مختلف آزمایشگاهی پرداختند. روش‌های مختلف آزمایشگاهی را به ۳ دسته روش‌های آنالیز حرارتی، روش‌های بیوشیمیایی و روش‌های آنالیز تقریبی و نهایی تقسیم شدند (Mohalik, and Lester, 2016).

مطالعات گانگ ونگ و همکاران (۲۰۱۶)

در این پژوهش بر روی فوم ۳ فازی با خاصیت کنترل احتراق خودبه‌خودی زغال‌سنگ تحقیق کرد؛ مشاهده کردند که این فوم اثر خنک کننده بر زغال‌سنگ دارد و سرعت واکنش اکسیداسیون را کاهش می‌دهد (Gang Wang et al., 2016).

مطالعات وی لو و همکاران (۲۰۱۷)

در مقاله خود به توسعه بحث احتراق خود به خودی زغال‌سنگ پرداخته و برای این مورد با ساخت مدل رفتاری جریان هوا به تجزیه و تحلیل درزهای موجود در زغال‌سنگ پرداخته‌اند که در تحقیق آن‌ها از مطالعات انجام شده ۱۰ سال اخیر لایه‌های زغال‌سنگ چین استفاده شده، پس از بررسی نهایی یک روش پیش‌گیری و کنترل پنج مرحله‌ای (شناسایی، پیش‌گیری، جلوگیری، تزریق و تنظیم فشار) ارائه شده است (Wei Lu et al., 2017).

مطالعات دیجیان و همکاران (۲۰۱۸)

به بررسی تأثیر رطوبت، شرایط گاز، جریان جرمی و میزان گرمای ایجاد شده بر احتراق خود به خود زغال‌سنگ با استفاده از آزمایش‌های کوره‌ی Grever پرداخته‌اند. نتایج آزمایش انجام شده گویای این مطلب است که با افزایش کسر مولی اکسیژن و میزان درجه زغال‌شدگی، دمای نقطه تقاطعی کاهش می‌یابد و از طرفی میزان تأثیر گرما در مقایسه با رطوبت و جریان گاز نسبت به دمای نقطه تقاطعی، نسبتاً شدید است (Dejian et al., 2018).

مطالعات صفاری و همکاران (۱۳۹۳)

در این مقاله ابتدا عوامل مؤثر بر پدیده خودسوزی زغال‌سنگ شناسایی، سپس با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ به طبقه‌بندی خودسوزی لایه‌های مناطق زغالی پشکلات و رزمجا از مجموعه معادن البرز شرقی پرداخته‌اند (صفاری و همکاران، ۱۳۹۳).

مطالعات جهانبانی و همکاران (۱۳۹۴)

در این مطالعه تأثیرات زیست محیطی ناشی از خودسوزی زغال سنگ را عنوان و همچنین دلایل مؤثر خودسوزی در ریزش تونل‌های معادن زیرزمینی زغال سنگ را شناسایی کرده و در نهایت روش‌هایی برای پیشگیری از احتراق خود به خودی و آتش‌سوزی در ریزش تونل‌های معادن زیرزمینی زغال سنگ ارائه داده‌اند (جهانبانی و همکاران، ۱۳۹۴).

مطالعات منوچهری و موسوی (۱۳۹۴)

به بررسی امکان خودسوزی زغال سنگ در لایه (E1) معدن همکار کرمان پرداخته‌اند؛ سپس به کمک یک نرم‌افزار تجزیه و تحلیل دقیقی به عمل آورده و با توجه به مستعد بودن زغال سنگ ناحیه مذکور به خودسوزی، روش‌هایی برای جلوگیری و کنترل آن ارائه داده‌اند (منوچهری و موسوی، ۱۳۹۴).

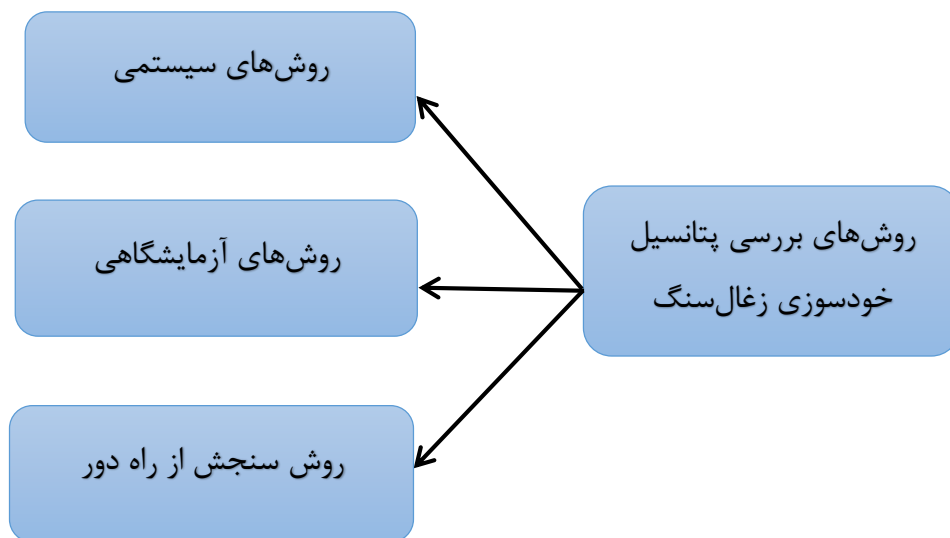
از مجموعه مطالب این بخش که شامل مروری بر منابع مختلف موجود در زمینه خودسوزی زغال سنگ است، این طور برمی‌آید که پژوهش‌ها و تحقیقات زیادی در زمینه مکانیزم، عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ و روش‌های بررسی تأثیر پارامترهای مختلف انجام گرفته است. بیشتر محققان بر این موضوع تأکید دارند که پارامترهای ذاتی نقش اصلی و اساسی در پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ دارند. برخی از مهم‌ترین روش‌ها که به بررسی پیش‌بینی پتانسیل خودسوزی در معادن زغال سنگ پرداخته است نیاز به تشریح و تفصیل بیشتری دارند که با توجه به اقتضای این تحقیق و نیز محدودیت دسترسی به منابع، در ادامه از میان روش‌های ذکر شده، پرکاربردترین روش‌های ارزیابی رفتار و قابلیت خودسوزی در معادن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۳-۳- روش‌های بررسی خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ

با توجه به خطرات ناشی از پدیده خودسوزی زغال سنگ، بررسی مسائل فنی، اقتصادی و ایمنی در حین فرآیند معدنکاری امری ضروری است. برای جلوگیری از وقوع این مشکلات باید راه‌های پیش‌بینی و

بررسی قابلیت خودسوزی زغال سنگ را به طور کامل شناخت، تا بتوان از وقوع بسیاری از این آتش سوزی ها با اقدامات پیش گیرانه مناسب جلوگیری کرد.

مجموعه روش های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ را می توان به ۳ گروه کلی طبقه بندی نمود که این طبقه بندی در شکل ۱-۳ آورده شده است:



شکل ۱-۳: طبقه بندی روش های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ

۱-۳-۳- روش های آزمایشگاهی

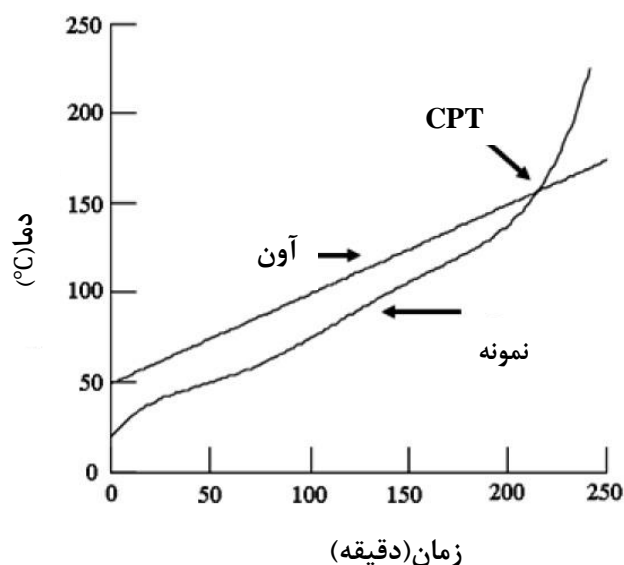
در روش های آزمایشگاهی به ارزیابی پدیده خودسوزی زغال سنگ از طریق تجزیه و تحلیل نتایج تست های انجام شده بر روی نمونه های زغالی پرداخته می شود. از مزایای روش آزمایشگاهی می توان به حجم کم نمونه و مدت زمان اندک برای رسیدن به نتایج و از معایب آن منطبق نبودن شرایط آزمایشگاهی با شرایط محیط واقعی خودسوزی اشاره کرد. در ادامه برخی از مهم ترین و پرکاربردترین این روش ها توضیح داده شده است.

الف- روش دمای نقطه تقاطعی (CPT)

روش دمای نقطه تقاطعی یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش‌هایی است که به طور گسترده برای تعیین و ارزیابی استعداد زغال‌سنگ برای گرمایش خودبه‌خودی و خودسوزی استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا نمونه زغال‌سنگ (حدود ۶۰ گرم به صورت پودر شده) در لوله واکنش در آون قرار می‌گیرد. سپس نمونه زغالی موجود در لوله واکنش، با نرخ افزایش دمای ثابت و میزان اکسیژن ثابت، حرارت و اکسیژن داده می‌شود که این سرعت افزایش دمای و اکسیژن به صورت برنامه‌ریزی شده و از پیش تعیین شده است و میانگین افزایش دما ۱ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه ($1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$) است و جریان هوا به میزان ۸۰ میلی‌لیتر بر دقیقه ($80 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$) از نمونه گذر می‌کند (Kaymacki and Didari, 2002).

فرآیند اکسیداسیون زغال‌سنگ یک فرایند گرماده است، گرمای به وجود آمده نیز باعث افزایش دمای زغال‌سنگ می‌شود. بنابراین با گذشت زمان اختلاف دمای زغال‌سنگ و دمای آون کاهش می‌یابد. دمای نمونه زغالی و دمای آون هر ۱ دقیقه اندازه‌گیری و ثبت می‌شود تا درجه حرارت زغال از درجه حرارت آون عبور کند که در نهایت منجر به تشکیل منحنی دما-زمان می‌شود، که نمونه‌ای از این منحنی در شکل (۲-۳) آورده شده است. نقطه‌ای که محل تقاطع دمای اندازه‌گیری شده نمونه و دمای آون است تحت عنوان «دمای برابر سازی دمای نمونه و دمای آون» نامیده می‌شود. که این دمای برابر سازی دمای نقطه تقاطعی (CPT) گفته می‌شود و مطابق شکل (۲-۳) هر چه محل تقاطع این دو نمودار به مبدأ نزدیک‌تر باشد استعداد زغال‌سنگ به احتراق خودبه‌خودی بیشتر است (Mohalik and Laster, 2016; Mahadevan and Ramlu, 1985).

¹Crossing Point Temperature



شکل ۳-۲: منحنی دما-زمان در روش CPT (Kaymacki and Didari, 2002).

جدول ۳-۱: طبقه‌بندی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ براساس CPT (Mahadevan and Ramlu, 1985)

قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ	مقدار CPT
زیاد	۱۲۰ تا ۱۴۰
متوسط	۱۴۰ تا ۱۶۰
کم	بیشتر از ۱۶۰

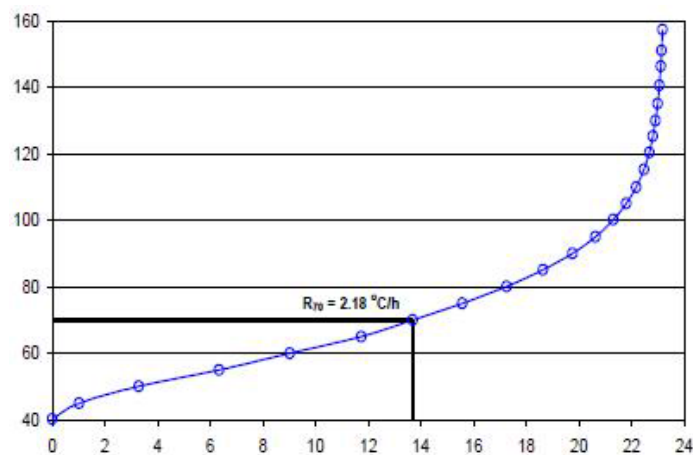
ب- روش نرخ گرمایش خودبه‌خودی R_{70}

روش آزمایش R_{70} که در سال ۲۰۰۰ میلادی توسط Beamish و همکاران ابداع شد یک روش آدیاباتیک (بی‌دررو) است، که برای بررسی پتانسیل گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ استفاده می‌شود. مراحل این روش بدین صورت است که، ابتدا یک نمونه ۱۵۰ گرمی از زغال‌سنگ خرد و آسیا شده که ابعاد به اندازه کمتر از ۲۱۲ میکرومتر ($212 \mu\text{m}$) رسیده، به مدت تقریباً ۱۶ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد توسط نیتروژن در یک آون آدیاباتیک خشک می‌شود. پس از آن، زغال‌سنگ تا دمای حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد خنک می‌شود.

پس از تثبیت دمای زغال سنگ در حدود دمای ۴۰ درجه سانتی گراد که تحت جریان نیتروژن در یک آون بی دررو به حالت تعادل رسیده است، اکسیژن به مقدار ۵۰ میلی لیتر بر دقیقه ($50 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$) از نمونه گذر می کند. افزایش دمای ناشی از گرمایش خودبه خودی زغال سنگ در فاصله ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد ثبت می شود. میانگین افزایش دما بین این دو مقدار شاخص نرخ گرمایش خودبه خودی R_{70} نامیده می شود و واحد آن درجه سانتی گراد بر ساعت ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}}$) است. هر چه مقادیر R_{70} بیشتر باشد، تمایل زغال سنگ به گرمایش خودبه خودی بیشتر است (Beamish et al., 2005).

شکل (۳-۳) نمونه ای از نمودار نرخ گرمایش خودبه خودی R_{70} برای یک نمونه زغالی را نشان

می دهد.



شکل ۳-۳: نمودار نرخ گرمایش خودبه خودی R_{70} (Wang. and Luo, 2011)

جدول (۲-۳) مقادیر R_{70} و درجه گرایش زغال سنگ به گرمایش خودبه خودی را نشان می دهد

(Beamish and Arisoy, 2008).

جدول ۲-۳: مقادیر R_{70} و درجه تمایل به خودسوزی (Beamish and Arisoy, 2008)

درجه تمایل به خودسوزی	مقادیر R_{70} ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{h}}$)	طبقه
ضعیف	$R_{70} < 50$	I
متوسط	$0.5 \leq R_{70} < 1$	II
زیاد	$1 \leq R_{70} < 2$	III
بسیار زیاد	$2 \leq R_{70} < 4$	IV
مافوق زیاد	$4 \leq R_{70} < 8$	V
به شدت زیاد	$8 \leq R_{70} < 16$	VI
به طور استثنایی زیاد	$R_{70} \geq 16$	VII

ت- آنالیز گرماسنجی ثقلی (TGA)

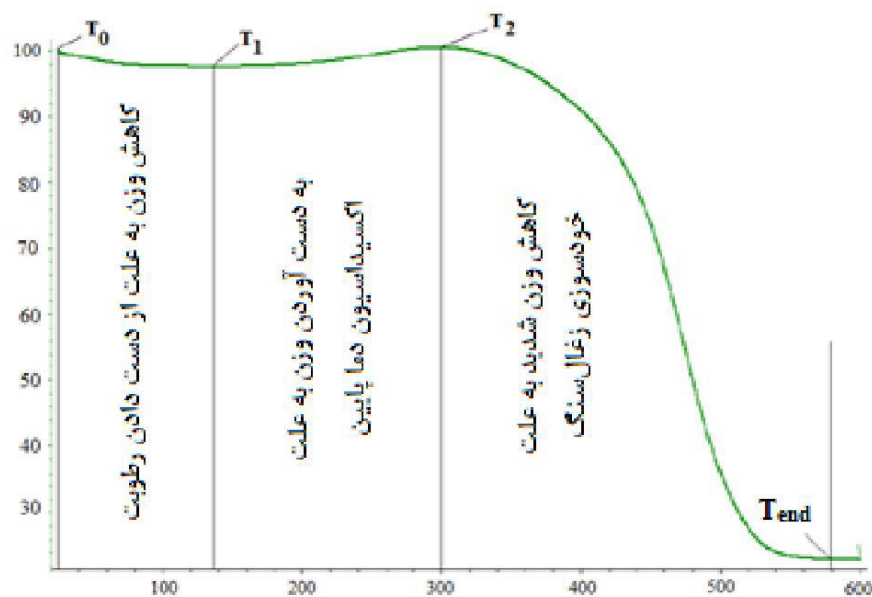
در روش آنالیز گرماسنجی ثقلی، ابتدا نمونه‌های زغال‌سنگ را تهیه و به اندازه کمتر از ۵۰ مش (کمتر از ۲۹۷ میکرومتر) خرد می‌کنند و پس از آن برای جلوگیری از اکسیداسیون، در کیسه‌های پلاستیکی عایق و مقاوم در مقابل نفوذ آب، به صورت فریز شده نگهداری می‌شوند. برای انجام آزمایش حدود ۱۳ تا ۱۴ گرم نمونه زغال‌سنگ خرد و آسیا شده را در یک ظرف واکنش پلاتینیومی قرار داده، سپس داخل دستگاه TGA نگهداری می‌شود. پس از قرار دادن نمونه زغالی داخل دستگاه، جریان اکسیژن با نرخ ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه ($10 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$) و جریان نیتروژن نیتروژن با نرخ ۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه ($40 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$) از نمونه زغال‌سنگ گذر می‌کند. دمای اولیه آون ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد است و دمای آن تا زمان رسیدن به نرخ افزایش دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه به طور دقیق کنترل و ثبت می‌شود. تا زمانی که وزن نمونه زغالی از بین نرود آزمایش ادامه پیدا می‌کند. زمان تقریبی انجام آزمایش در حدود یک ساعت است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷).

در طول انجام آزمایش دما و وزن نمونه به دقت توسط یک آنالیزور اندازه‌گیری می‌شود و منحنی‌های مربوطه ترسیم می‌شوند که نمونه‌ای از منحنی‌های TGA در شکل (۳-۴) آورده شده است. به طور ایده‌آل، یک فرآیند کامل اکسیداسیون می‌تواند به سه بخش الگوی تغییراتی از منحنی TGA تبدیل

¹Thermogravimetry Analyzer

شود، همان‌طور که در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود این منحنی‌ها 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 & 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؛ 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 (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷).



شکل ۳-۴: نمونه منحنی TGA (Wang, and Luo, 2011)

ث- کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC)

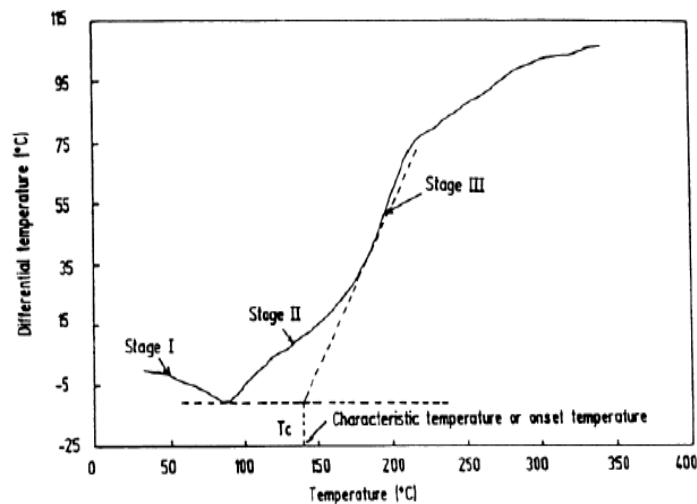
این روش برای بررسی پتانسیل اکسیداسیون زغال سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در روش DSC نمونه زغال سنگ و ظرف با حرارتی یکسان برای مدتی گرم می‌شوند، که باعث عدم تفاوت در انرژی ناشی از هر نوع بوته می‌شود. در این روش، اختلاف بین مقدار گرما لازم برای افزایش دمای نمونه زغال سنگ و مقدار گرمای لازم برای بالا بردن دمای مواد مرجع، به عنوان تابعی از دما اندازه‌گیری می‌شود و فرآیندهای گرماگیر و فرآیندهای گرمازا در نمونه زغال سنگ اتفاق می‌افتد که بیانگر فرآیند احتراق خود به خودی زغال سنگ است (mohalik & lester, 2016).

ج- آنالیز حرارت تفاضلی (DTA)

روش آنالیز حرارت تفاضلی برای اندازه‌گیری تغییرات دمایی در نمونه‌های زغال سنگ، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، با استفاده از مقدار کمی نمونه (کمتر از ۲۰ میلی‌گرم) زغال سنگ را در معرض گرمایی با نرخ ثابت قرار می‌دهد، و همچنین اختلاف دما بین نمونه و مواد مرجع شامل آلفا آلومینا و هوا محیط، که در شرایط مشابه گرم می‌شوند را اندازه‌گیری می‌کند. به این منظور نرخ گرمادهی روی ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه ثابت می‌شود تا دما به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد. سپس، از این اختلاف گرمایی برای بررسی گرمایش نمونه به خودسوزی استفاده می‌شود. مطابق شکل (۳-۵) نمودار گرمایی به دست آمده از نتایج را می‌توان در طی فرآیند گرمایش به سه مرحله مختلف تقسیم کرد. در مرحله اول بیشتر واکنش‌های گرماگیر انجام می‌شود و درجه حرارت به دلیل انتشار رطوبت افت می‌کند. سپس، مرحله دوم، نسبت به شروع فرایند اکسیداسیون، کمی گرماده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که شیب کم‌تر نمودار با تمایل کمتر به خودسوزی همراه است. مرحله سوم واکنش بسیار گرماده است، و آغاز این مرحله به عنوان دمای گذار شناخته می‌شود، این دما با قابلیت

¹- Differential Scanning Calorimetry

زغال برای خودسوزی مرتبط است. از مرحله سوم به بعد واکنش‌های گرماده رخ داده کامل می‌شود و دما به شدت افزایش می‌یابد (Nimaje et al, 2010; Banerjee & Chakravart, 1967).



شکل ۳-۵: مراحل مختلف DTA (Nimaje et al, 2010)

۳-۳-۲- روش‌های سیستمی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ

رخداد مکرر پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ از مرحله استخراج تا حمل و نقل و صادرات در سرتاسر جهان باعث شد که محققان مختلفی به بررسی دلایل و پارامترهای مؤثر در این پدیده بپردازند و سیستم‌های ارزیابی و طبقه‌بندی مختلفی برای پیش‌بینی پدیده خودسوزی زغال سنگ ارائه نمایند. در روش‌های سیستمی سعی شده است که با استفاده از یک سیستم کیفی و طبقه‌بندی و همچنین نسبت‌های گازی به بررسی خطر خودسوزی زغال سنگ بپردازند. از جمله نسبت‌های گازی می‌توان به نسبت جونز تریکت؛^۱ نسبت گراهام؛^۲ نسبت $\frac{CO_2}{CO}$ و نسبت $\frac{N_2}{CO+CO_2}$ اشاره کرد (صفری و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین از جمله سیستم‌های طبقه‌بندی می‌توان به سیستم لهستانی؛^۳ سیستم هندی، سیستم ارزیابی SES^۴، سیستم ارائه شده توسط سینگ و همکاران و سیستم ارزیابی شاخص پتانسیل

^۱ Jones- Trickett Ratio

^۲ Graham's Ratio

^۳ Polish System

^۴ Sponcom Expert System

خودسوزی زغال سنگ^۱ CSCPI، که توسط صفاری و همکاران ارائه شد، اشاره کرد. در نسبت‌های گازی با استفاده از نسبت مورد نظر به طبقه‌بندی خطر خودسوزی پرداخته شده و در سیستم‌های کیفی با امتیاز دادن به پارامترهای مختلف مؤثر بر خودسوزی و بررسی امتیاز نهایی پتانسیل خودسوزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین نقدهای موجود به روش‌های سیستمی، وجود محدودیت‌های مرزی در مشخصات زغال سنگ و هم پوشانی بعضی از پارامترهای در نظر گرفته شده با سایر پارامترهای موجود است.

۳-۳-۳- روش سنجش از راه دور^۲

سنجش از راه دور علم بررسی، پردازش و تفسیر تصاویری است که حاصل ثبت و تعامل انرژی الکترومغناطیس با سطح زمین بدون تماس مستقیم و فیزیکی می‌باشد. سنجش از راه دور در بسیاری از زمینه‌های علمی و تحقیقاتی کاربردهای گسترده‌ای دارد. از جمله از کاربردهای فن سنجش از راه دور می‌توان به استفاده از آن در زمین شناسی، آب شناسی، معدن، کارتوگرافی، جغرافیا و به طور کلی منابع زمینی و غیره اشاره کرد.

امروزه فناوری‌های سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی کاربردهای فراوانی در حوزه مدیریت ریسک و مخاطرات طبیعی یافته‌اند. آتش‌سوزی در عرصه منابع طبیعی یکی از مخاطرات است که از دیرباز خسارات جبران‌ناپذیر است محیطی، اجتماعی و اقتصادی را به همراه داشته است. یکی از عوامل تأثیرگذار بر مدیریت آتش‌سوزی، در دست داشتن اطلاعات و نقشه‌های مرتبط با میزان خطر یا ریسک آتش‌سوزی در قالب شاخص‌های خطر یا ریسک آتش‌سوزی در بازه‌های زمانی کوتاه مدت است. این اطلاعات معمولاً شاخص‌هایی ارائه می‌شوند و معیاری برای نشات دادن احتمال اشتعال، نرخ گسترش و سختی کنترل آتش‌سوزی هستند.

⁵⁻ Coal Spontaneous Combustion Potential index

⁶⁻ Remote Sensing

بیشترین کاربرد دور سنجی در مواردی است که، آتش‌سوزی در نزدیکی سطح زمین اتفاق افتاده است. این روش با ثبت تغییرات حرارتی سطح زمین، تغییر فرونشست زمین که ناشی از آتش‌سوزی می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌دهد. تجزیه و تحلیل تصاویر حرارتی بر اساس انرژی گرمایی قابل توجهی است که در هنگام آتش‌سوزی‌های زغالی آزاد می‌شود (Voigta et al, 2004).

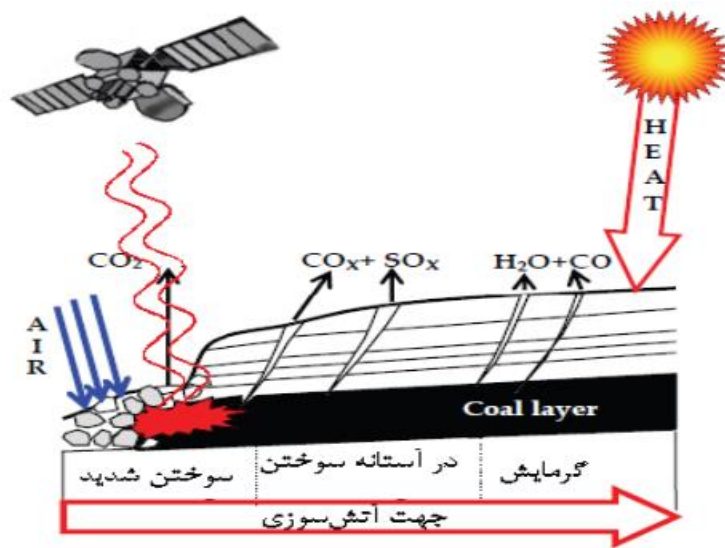
هنگامی که زغال‌سنگ شروع به سوختن می‌کند، باعث تولید انرژی گرمایی قابل توجهی می‌شود (شکل ۳-۶) که به راحتی توسط پردازشگر گرمایی سنجش از راه دور قابل شناسایی می‌شود. در زمان ثبت داده‌های سنجش از راه دور باید به این نکته توجه شود که، برای جداسازی گرمای تولید شده از سوختن زغال‌سنگ از انرژی گرمایی خورشید، ضروری است که اندازه‌گیری و ثبت داده‌های سنجش از راه دور در شب انجام شود تا اشتباهی رخ ندهد.

اجزای مختلف سنجش از راه دور عبارتند از (Gangopadhyay, 2008):

- منبع انرژی برای ارسال انرژی الکترومغناطیسی به هدف مورد نظر؛
- پرتو افکنی به منظور انتقال انرژی منبع به هدف مورد نظر؛
- فعل و انفعالات با هدف، وابسته به خصوصیات هدف و پرتو افکن؛
- فعل و انفعالات با اتمسفر جو، انعکاس و تابش انرژی از هدف از طریق اتمسفر جو انجام می‌شود؛
- ثبت انرژی در گیرنده‌ها، یک گیرنده تشعشعات الکترومغناطیسی بازگشتی را ثبت می‌کند؛
- پردازش، داده‌های ثبت شده توسط گیرنده‌ها پردازش و به عکس تبدیل می‌شوند؛
- تجزیه و تحلیل، عکس‌های پردازش شده آنالیز شده و تفسیر می‌شوند.

اتم‌سفر بین آتش‌سوزی زغال و دریافت کننده‌های سنجش از راه دور نقش مهمی در دقت برآورد دمای سطحی، مخصوصاً در مطالعات کمی ایفا می‌کنند. دمای سطح بالا یک آتش‌سوزی زغالی به چندین عامل مانند خواص ذاتی (قابلیت تابندگی و دمای آتش) و شرایط نواحی اطراف (نوع خاک، توپوگرافی، دمای محلی، شکاف‌ها و شکستگی‌های سطحی و عمق آتش) بستگی دارد. رطوبت خاک و باد همچنین

بر روی دمای سطح تأثیر گذاراند. مشخصات گرمایی سنگ نیز فاکتور مهمی در سنجش از راه دورهای گرمایی است. برای مثال، رخی از سنگ‌ها با ظرفیت بالای گرمایی می‌توانند در عکس‌های شبانه به عنوان آتش‌سوزی‌های زغالی ظاهر شوند چون آن‌ها گرمای زیادی را در مقایسه با سایر سنگ‌ها در خود ذخیره می‌کنند. به هر حال عکس‌های گرفته شده پیش از طلوع آفتاب همراه با اطلاعات خوب در زمینه شرایط زمین‌شناسی منطقه مانع از ایجاد آناملی‌های نادرست می‌شوند (Gangopadhyay, 2008).



شکل ۳-۶: روش آشکار سازی اکسیداسیون زغال سنگ به کمک روش دورسنجی (Gangopadhyay, 2008)

۳-۴- جمع بندی

در کشورهای توسعه یافته، زغال سنگ یکی از اقتصادی‌ترین و فراوان‌ترین منابع انرژی است. یقیناً استفاده صحیح از این منبع انرژی مهم و تجدید ناپذیر، نیاز به یک برنامه ریزی صحیح و مدیریت همه جانبه دارد. آتش‌سوزی‌های زغالی یکی از شایع‌ترین مشکلات در اکثر کشورهای تولید کننده زغال سنگ است. بررسی و شناخت روش‌های تشخیص و پیش‌گیری از خودسوزی زغال سنگ می‌تواند نقش مهمی را در شناسایی و پایش این مشکل محیط زیستی که باعث اتلاف ذخایر اقتصادی و فجایع زیست محیطی می‌شود ایفا نماید. به همین دلیل در این فصل ابتدا منابع و سابقه علمی خودسوزی زغال سنگ

مورد بررسی قرار گرفت. سپس با توجه به اقتضای تحقیق حاضر و دسترسی به منابع علمی معتبر، روش‌های مختلف ارزیابی پتانسیل گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ که توسط دانشمندان مختلف از کشورهای ارائه شده بود مورد بررسی قرار گرفت.

با مطالعه پیشینه و سابقه تحقیق حاضر مشخص شد که روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ وجود دارد که به طور کلی به سه دسته روش‌های آزمایشگاهی، روش‌های سیستمی و روش‌های سنجش از دور تقسیم می‌شوند. مزیت روش‌های آزمایشگاهی نسبت به روش دیگر در استفاده از حجم کم نمونه و مدت زمان اندک در رسیدن به نتایج است. روش دمای نقطه تقاطعی (CPT) یک روش مهم در تشخیص قابلیت خودسوزی است و در فصل آینده پارامترهای تاثیر گذار بر روی خودسوزی زغال‌سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT) بررسی می‌شود.

فصل ۴: روش کار و نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- مقدمه

دلیل اصلی در درک مشکل مکانیزم گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ حضور تعداد زیادی پارامتر داخلی و خارجی مختلف است که در فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ نقش دارند. به طور کلی در کلیه مطالعات پیشین، چنانچه در فصل دوم و سوم مورد بحث قرار گرفت، پارامترهای ذاتی و اندرکنش بین این پارامترها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی هستند.

در این تحقیق با توجه به مرور کلیه منابع معتبر و شناخته شده جهانی و نیز شناسایی و جمع پارامترهای مهم مؤثر بر گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ، تلاش شده است که با استفاده از روش آزمایشگاهی دمای نقطه تقاطعی تأثیر پارامترهای ذاتی مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ و به طور خاص تأثیر پارامتر رطوبت محتوی زغال مورد بررسی قرار گیرد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوزه زغالی کرمان و معادن مربوط به شرکت زغال‌سنگ کرمان است. معادن زغال‌سنگ کرمان قریب به نیم قرن گرمابخش صنعت فولاد کشور بوده و از قدیمی‌ترین معادن زغال‌سنگ کشور محسوب می‌شوند.

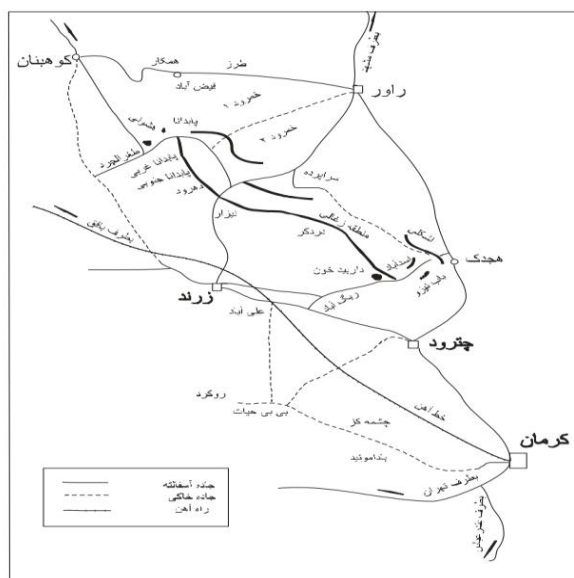
۴-۲- حوزه زغال‌سنگ کرمان

ناحیه زغال‌سنگ کرمان در قسمت شرقی ایران مرکزی قرار دارد و در محدوده چین خوردگی‌های کرمان-یزد واقع شده است. معادن زغال‌سنگ این ناحیه به فاصله ۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر کرمان واقع شده‌اند. رسوبات زغال‌دار در حوزه کرمان با میانگین ارتفاع از سطح دریا ۴۸۷۰ متر از شمال شرقی (۲۵۲۰ متر) به جنوب غربی (۷۴۰۰ متر) تغییر ارتفاع می‌دهند. تعداد لایه‌های زغالی کارپذیر و غیر کارپذیر آن ۹۴ لایه است، که ۶۳ لایه آن با ضخامت حداکثر ۰/۳ تا ۰/۴ متر هستند. ضریب زغال‌خیزی کلی این حوزه ۰/۸ درصد و ضریب زغال‌خیزی کارپذیر آن ۰/۲۴ درصد است. زغال‌خیزی اصلی در بخش‌های دهرود، داربید خون و طغرآنچه قرار دارد و بخش‌های نیزار، باب نیزو و دشت خاک فاقد زغال‌خیزی است و فقط در بعضی از مناطق آن لایه‌های نازک و عدسی زغال‌سنگ وجود دارد.

۳-۴- شرکت معادن زغال سنگ کرمان

از حدود سال‌های ۱۳۴۴-۱۳۴۵ همزمان با فکر تأسیس کارخانه ذوب آهن اصفهان جهت تأمین کک مورد نیاز کوره بلند؛ اکتشاف و بهره‌برداری از معادن زغال سنگ در برنامه‌های دولت وقت قرار گرفت. لذا با توجه به اطلاعات اولیه و گزارشات کارشناسان زمین‌شناسی که به وجود زغال سنگ در شمال استان کرمان اشاره نموده بودند، مطالعات زمین‌شناسی در این محدوده در قالب شرکت معادن زغال سنگ کرمان وابسته به شرکت ملی ذوب آهن ایران با اهداف اکتشاف و تحقیقات وسیع در نواحی زغال دار، طراحی؛ ساخت و تجهیز معادن زغال سنگ کرمان و تغلیظ زغال سنگ استخراج شده و تولید کنسانتره زغال سنگ از شهریور ماه ۱۳۴۵ آغاز گردید (www.coal.kr.ir).

در حال حاضر مناطق معدنی این شرکت که در شمال استان کرمان واقع شده‌اند بدین شرح می‌باشد: پابدانا، همکار، هشونی، هجدک، کمسار، آب نیل و کارخانه زغالشویی زرنند که فرآوری زغال‌های این معادن را برعهده دارد نیز در گستره این شرکت وجود دارند. در شکل (۴-۱) موقعیت این معادن نشان داده شده است (www.coal.kr.ir).



شکل ۴-۱: موقعیت و راه‌های ارتباطی معادن زغال سنگ کرمان

۴-۳-۱- معدن هجدک

این معدن در ۷۰ کیلومتری شمال شرقی کرمان و در انتهای جنوب شرق ناودیس زغال‌دار کرمان واقع شده است و شامل محدوده‌های اشکلی و اسدآباد نیز می‌باشد که پس از انجام اکتشافات تفصیلی در سال ۱۳۵۵ به بهره‌برداری می‌رسد. مجموعاً دارای ۱۲/۵ میلیون تن ذخیره زمین شناسی کک شو بوده و لایه‌های قابل کار آن d1-d2 از نواحی زغالی D با شیب ۶۵ تا ۸۰ درجه و با ضخامت تا ۲ متر می‌باشد. روش استخراج در این معدن استخراج ستونی بالارو با شیب متوسط ۳۵ درجه می‌باشد.
(www.coal.kr.ir).

۴-۳-۲- معدن پابدانا

این معدن در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شمال غرب کرمان به مساحت تقریبی ۱۱ کیلومتر مربع بوده و اکتشاف آن از سال‌های ۴۵-۱۳۴۴ آغاز و در سال ۱۳۵۱ در محدوده معدن اولیه پابدانا و در سال ۱۳۵۷ در محدوده معدن بزرگ پابدانا به بهره‌برداری رسیده است. ذخیره فعلی معدن قریب ۱ میلیون تن زغال کک شو و لایه‌های قابل کار آن d2-d3-d4-d5-d6 از ناحیه زغالی D با شیب ۱۰ تا ۶۰ درجه و با ضخامت تا ۲/۵ متر می‌باشد. در حال حاضر با ۱۳ کارگاه فعال از پایین‌ترین افق کاری ۲۳۸۰+ تا سطح زمین در قالب ۵ افق کاری به استخراج زغال می‌پردازد. همچنین طراحی افق‌های زیر ۲۴۰۰+ معدن در دست اجرا و تکمیل مطالعات و گزارشات مربوط است. روش استخراج در این معدن جبهه کار طولانی می‌باشد (www.coal.kr.ir).

۴-۳-۳- معدن همکار

معدن زغال‌سنگ همکار یکی از معادن بخش مرکزی شهرستان کوهبنان استان کرمان است. فاصله‌ی این معدن تا کوهبنان ۲۵ کیلومتر و تا شهر کرمان ۱۹۳ کیلومتر است. مساحت تقریبی معدن زغال‌سنگ همکار، ۴/۵ کیلومتر مربع است. عملیات اکتشاف این معدن از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۵۶ انجام شده و در سال ۱۳۶۳ نیز به بهره‌برداری رسیده است. ذخیره زمین شناسی آن قریب به ۳۱/۶ میلیون

تن زغال کک شو و لایه‌های زغال قابل کار آن در ۲ ناحیه جداگانه‌ی D و E با ضخامت حداکثر ۳/۳۵ متر قرار دارد (www.coal.kr.ir).

شرکت زغال‌سنگ کرمان بهره‌بردار معدن زغال‌سنگ همکار است. ظرفیت تولید این معدن در سال ۱۳۸۵ برابر با ۱۶۰ هزار تن در سال و تعداد کارگران آن ۸۸۵ نفر در دو بخش امانی و خصوصی بوده است. با بهره‌برداری از معدن جدید زغال‌سنگ همکار در شهریور ۱۳۸۷، ظرفیت تولید این معدن به ۳۰۰ هزار تن در سال افزایش یافت. ذخیره قابل استحصال این معدن، ۳۵ میلیون تن است. روش استخراج در این معدن در شیب‌های تا ۵۰ درجه به صورت پلکانی معکوس و در شیب‌های بیش از ۵۰ درجه به صورت گزنگی است (www.coal.kr.ir).

۴-۳-۴- کارخانه زغالشویی زرنند

کارخانه زغالشویی زرنند در ۷۵ کیلومتری شهر کرمان در ابتدای شهر زرنند واقع گردیده است. بهره‌برداری کارخانه زغالشویی زرنند از سال ۱۳۵۷ به منظور شستشوی زغال‌سنگ‌های منطقه کرمان-زرنند آغاز شد. این کارخانه در زمینی به مساحت ۲۴۶۰۰ متر مربع احداث شده است و دارای ۱۰۲ کیلومتر لوله و تاسیسات آبرسانی، ۷/۵ کیلومتر نوار نقاله و ۵۵۴ کیلومتر کابل کشی برق می‌باشد. در شکل (۴-۲) نمایی کلی از ساختمان اصلی کارخانه مشاهده می‌شود (www.coal.kr.ir).



شکل ۴-۲: نمای کلی از کارخانه زغال‌شویی زرنند کرمان

این کارخانه سه شیفت کاری در شبانه روز (به صورت دو شیفت تولید و یک شیفت تعمیرات) طراحی شده است و با این شرایط قادر است در هر سال معادل ۲ میلیون تن زغال‌سنگ را فرآوری نماید. کارخانه از ۴ واحد اصلی شامل ساختمان پذیرش بار و خوراک دهی؛ ساختمان تغلیظ، ساختمان خشک کن و ساختمان ذخیره و بارگیری کنسانتره تشکیل شده است. عکلیات فرآوری زغال‌سنگ خام در ساختمان تغلیظ انجام می‌گیرد. این ساختمان از ۵ واحد واسطه سنگین، جیگ، فلوتاسیون، دایناویرپول و سیلکون مارپیچ تشکیل شده است. واحدهای دایناویرپول و سیلکون مارپیچ در طرح اولیه وجود نداشته و حدود ۱۰ سال است که به تدریج به مدار شستشو اضافه شده‌اند. محصول میانی واحد جیگ توسط مدار دایناویرپول فرآوری می‌گردد. واحدهای هیدروسیلکون مارپیچ نیز برای فرآوری بخش ابعادی ۳۰۰ میکرون تا ۱۵۰۰ میکرون (۵/۱ میلی‌متر) در ۳ نقطه از ساختمان طراحی و نصب شده‌اند (www.coal.kr.ir).

این کارخانه با تجهیز آزمایشگاه و انجام خصوصیت سنجی زغال اقدام به پایش مداوم فرآیندها نموده است و با این کار نقاط ضعف فرآیندها و روش‌های رفع آن‌ها به صورت پیوسته در برنامه کار خود دارد.

تاکنون بیش از ۵۰ پروژه تحقیقاتی در کارخانه انجام شده است که نتیجه آن بهبود کیفیت زغال سنگ کنسانتره، با افزایش راندمان و کاهش توقفات بوده است (www.coal.kr.ir).

۴-۴- نمونه‌های زغال سنگ

تعداد ۶ نمونه زغال سنگ از معادن زغال سنگ کرمان و به طور مشخص از معادن شرکت زغال سنگ کرمان (معادن: هشونی، پابدانا اصلی، همکار، گلتوت، اسدآباد زیرزمینی و هجدک) جمع‌آوری شد، سپس نمونه‌ها داخل پلاستیک‌های مخصوص جهت از ایجاد تغییر در میزان رطوبت و هوازدهی بسته بندی شدند و در سریع‌ترین زمان ممکن به آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود تحویل داده شدند. نمونه‌های معادن پابدانا اصلی، هجدک و همکار از معدن جمع‌آوری شده، و نمونه‌های معادن هشونی، گلتوت و اسدآباد زیرزمینی از کارخانه زغال‌شویی واقع در شهرستان زرنند جمع‌آوری شد.

در جدول (۴-۱) نام معادن و شماره نمونه هر یک از معادن مورد مطالعه آورده شده است.

جدول ۴-۱: شماره نمونه معادن مورد مطالعه

شماره نمونه	معادن
۱	هشونی
۲	پابدانا اصلی
۳	همکار
۴	گلتوت
۵	اسدآباد زیرزمینی
۶	هجدک

۴-۵- آماده سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های جمع‌آوری شده از معادن مورد اشاره در جدول (۴-۱) به آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل شده و سپس سطح نمونه‌ها برداشته شد و هسته داخلی نمونه‌ها برای برداشت نمونه‌های آزمایشگاهی، مطابق شکل (۴-۳) در آزمایشگاه ابتدا به وسیله سنگ شکن فکی خرد شده و به ابعاد کوچکتر تبدیل شد.



شکل ۴-۳: مرحله سنگ شکنی با سنگ شکن فکی

در مرحله بعد برای خردایش بهتر و ریزتر شدن نمونه‌ها و رسیدن به ابعاد مورد نظر مطابق شکل (۴-۴) نمونه‌های خرد شده با استفاده از آسیا گلوله‌ای ریز شدند، تا ابعاد زغال سنگ به ۲۱۲ میکرون برسند.



شکل ۴-۴: مرحله آسیا کردن با آسیا گلوله‌ای

مطابق شکل (۴-۵) پس از آسیا کردن نمونه‌ها عملیات الک کردن نمونه‌ها با استفاده از سرنده ۷۰ و شیکر انجام شد. سپس ذرات زغال سنگ با اندازه کمتر از ۲۱۲ میکرون را در پلاستیک‌های مخصوص برچسب‌دار ریخته و آماده آزمایش شدند.



شکل ۴-۵: سرنده ذرات زغال سنگ با سرنده ۷۰ و شماره گذاری نمونه‌ها

۴-۶- آنالیز تقریبی

برای بررسی تمایل زغال سنگ به گرمایش خودبه خودی و به دست آوردن نقطه CPT ابتدا نمونه‌هایی از معادن مختلف کرمان جمع آوری شده و میزان رطوبت، خاکستر، مواد فرار، ماسرال‌ها و پیریت نمونه‌های مختلف زغالی تعیین شده است.

تجزیه و تحلیل تقریبی زغال سنگ عمدتاً شامل تعیین میزان رطوبت، خاکستر و مواد فرار محتوی زغال می‌باشد. در پژوهش حاضر از استاندارد آمریکایی (ASTM) استفاده شده است.

۴-۶-۱- تست رطوبت

آب موجود در زغال سنگ دارای دو منشأ بیرونی و درونی است. آب‌هایی که در داخل حفرات، درزه و ترک‌های وجود دارند دارای منشأ بیرونی و آب‌هایی که بخشی از ترکیب ماسرال و کانی‌های زغال سنگ هستند دارای منشأ درونی می‌باشد. هر چه درجه زغال‌شدگی زغال سنگ بیشتر باشد، مقدار رطوبت محتوی کمتر است. برای تعیین میزان رطوبت محتوی زغال سنگ، نمونه زغال سنگ پس از خردایش و آسیا بوسیله سرند شماره ۷۰ الک شده و از نمونه‌های با اندازه ۰/۲۱۰ میلی‌متر برای انجام تست رطوبت استفاده شد. ابتدا وزن ظرف اندازه‌گیری شده و سپس نمونه‌های پودر شده به وزن تقریباً ۱۲۰ گرم در ظرف ریخته و به مدت ۱۳ ساعت در داخل فر با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است. با داشتن وزن ظرف و نمونه قبل و بعد از قرار دادن در فر میزان رطوبت محتوی زغال سنگ را با استفاده از رابطه (۴-۱) محاسبه می‌شود. (ABINASH, 2010)

$$M = \frac{X - Y}{Z} \times 100 \quad (1-4)$$

M: درصد رطوبت نمونه

X: وزن نمونه و ظرف قبل از خشک شدن (بر حسب گرم)

Y: وزن نمونه و ظرف بعد از خشک شدن (بر حسب گرم)

Z: وزن نمونه زغال اولیه (بر حسب گرم)

در جدول (۲-۴) نتایج اولیه تست رطوبت نمونه‌های مختلف زغال سنگ آورده شده است.

جدول ۲-۴: نتایج اولیه تست رطوبت

شماره نمونه	وزن ظرف (گرم)	وزن نمونه زغال اولیه (گرم)	وزن کل قبل از آون (گرم)	وزن نمونه با ظرف بعد از خشک شدن (گرم)	درصد رطوبت (%)
۱	۱۰۵/۴۷	۱۱۴/۶۳	۲۲۰/۱۰	۲۱۸/۶۵	۱/۲۶۵
۲	۱۰۷/۶۹	۱۲۸/۳۸	۲۳۶/۳۴	۲۳۳/۱۷	۲/۲۳۶
۳	۹۹/۰۷	۱۲۲/۸۵	۲۲۱/۹۲	۲۱۹/۸۵	۱/۶۸۵
۴	۱۰۲/۸۹	۱۱۹/۱۳	۲۲۲/۰۲	۲۲۰/۳۷	۱/۳۸۵
۵	۹۸/۷۹	۱۳۳/۵۰	۲۳۲/۲۹	۲۱۴/۵۵	۱۳/۲۸۸
۶	۱۰۶/۲۷	۹۵/۴۲	۲۰۱/۶۹	۱۹۲/۰۷	۱۰/۰۸۲

۲-۶-۴- تست خاکستر

برای تعیین میزان خاکستر، مطابق شکل (۴-۶)، ۱ گرم نمونه زغال سنگ خشک شده در بوته چینی که وزن آن توسط ترازوی الکتریکی اندازه گیری شده ریخته می‌شود، سپس بوته چینی را داخل کوره الکتریکی قرار داده می‌شود. نمونه‌های زغال سنگ به مدت ۹۰ دقیقه در داخل کوره با دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود. در ادامه بوته چینی از کوره خارج شده و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق قرار داده می‌شود، زمانی که دمای بوته به دمای محیط رسید وزن بوته اندازه‌گیری شده و میزان خاکستر محتوی هر نمونه زغال سنگ با استفاده از رابطه (۲-۴) محاسبه می‌شود (ABINASH, 2010)..

$$A = \left(\frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \right) \times 100 \quad (2-4)$$

A: درصد خاکستر نمونه

M₁: وزن بوته بر حسب گرم

M₂: وزن بوته و نمونه بر حسب گرم

M₃: وزن بوته و خاکستر بعد از کوره بر حسب گرم



شکل ۴-۶: نمونه خاکستر و بوته بعد از خارج شدن از کوره

در جدول (۳-۴) نتایج آزمایش تست خاکستر و درصد خاکستر محتوی هر یک از نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۳-۴: نتایج حاصل از تست خاکستر نمونه‌های مختلف زغال سنگ

شماره نمونه	وزن بوته (گرم)	وزن نمونه زغال اولیه (گرم)	وزن بوته و خاکستر بعد از کوره (گرم)	درصد خاکستر (%)
۱	۹/۹۴۶۹	۱/۰۰۹۵	۹/۹۸۱۱	۳/۳۳۸
۲	۳۵/۶۸۹۶	۱/۰۲۲۷	۳۶/۱۱۰۷	۴۱/۱۷۵
۳	۹/۹۴۶۹	۱/۰۴۴۲	۱۰/۰۹۴۰	۱۴/۱۳۵
۴	۳۶/۱۳۷۴	۱/۰۲۲۱	۳۶/۳۹۳۱	۲۵/۰۱۷
۵	۳۵/۶۷۶۸	۱/۰۴۰	۳۵/۸۹۱۲	۲۰/۶۱۵
۶	۳۶/۰۶۴۸	۱/۰۲۰۹	۳۶/۱۱۵۶	۴/۹۷۶

۴-۶-۳- تست مواد فرار

پس از تعیین میزان رطوبت و خاکستر محتوی نمونه‌های مختلف زغالی، به بررسی میزان مواد فرار هر یک از نمونه‌های زغال سنگ پرداخته شد. برای بررسی درصد مواد فرار نمونه‌های زغال سنگ مانند روش

به دست آوردن خاکستر عمل می‌کنیم با این تفاوت که، ۵ گرم نمونه زغالی خشک شده را در ظرف درب داری که وزن ظرف و درب آن اندازه گیری شده است ریخته و پس از آن نمونه به مدت ۷ دقیقه داخل کوره با دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود. مطابق شکل (۷-۴) ظرف را از کوره خارج کرده و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق قرار می‌گیرد، پس از خنک شدن ظرف آن را وزن کرده و درصد مواد فرار نمونه زغال‌سنگ با توجه به رابطه (۳-۴) بدست می‌آید (ABINASH, 2010).

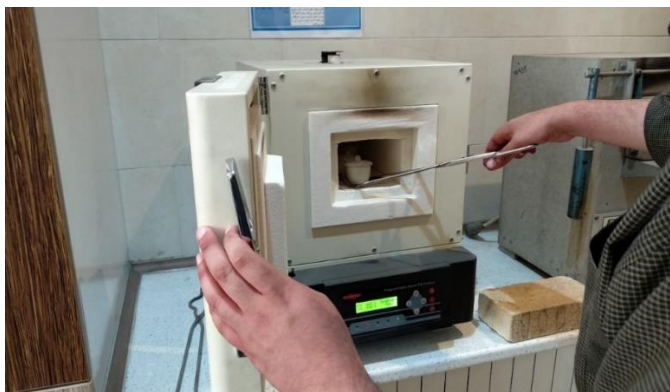
$$V = \left(\frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \right) \times 100 \quad (3-4)$$

V: درصد مواد فرار نمونه

M₁: وزن بوته خالی و درب

M₂: وزن بوته به همراه درب و نمونه قبل از کوره

M₃: وزن بعد از کوره (نمونه باقی مانده+درب+بوته)



شکل ۷-۴: بوته حاوی زغال‌سنگ پس از حرارت دادن

در جدول (۴-۴) نتایج به دست آمده از تست مواد فرار نمونه‌های زغال آورده شده است.

جدول ۴-۴: نتایج حاصل از تست مواد فرار نمونه‌ها

شماره نمونه	وزن درب (گرم)	وزن بوتله (گرم)	وزن درب و بوتله (گرم)	وزن نمونه زغال اولیه (گرم)	وزن بعد از کوره (گرم)	درصد مواد فرار (%)
۱	۲۹/۹۵۹۷	۷۱/۱۴۲۴	۱۰۱/۱۰۲۱	۵/۰۰۷۱	۱۰۴/۶۰۲۴	۳۰/۹۳
۲	۱۷/۶۵۲۶	۳۴/۱۲۶۰	۵۱/۷۷۸۶	۵/۰۳۴۳	۵۵/۸۸۱۵	۱۸/۵۰۱
۳	۱۷/۳۹۸۳	۳۴/۶۴۵۳	۵۲/۰۴۳۶	۵/۲۰۱۴	۵۵/۷۰۶۸	۲۹/۵۷۳
۴	۱۷/۶۵۰۷	۳۴/۶۴۳۴	۵۲/۲۹۴۱	۵/۰۱۴۹	۵۶/۱۹۸۳	۲۲/۱۴۸
۵	۱۸/۳۷۰۵	۳۴/۶۳۷	۵۳/۰۰۷۵	۵/۰۰۵۹	۵۶/۸۲۵۲	۲۳/۷۳۶
۶	۱۷/۶۵۱۲	۳۴/۱۲۵۱	۵۱/۷۷۶۳	۵/۰۷۰۷	۵۵/۷۴۹۱	۲۱/۶۵۲

۴-۷- ترکیب سنگ‌شناسی و نوع ماسرال

به طور کلی، زغال سنگ ترکیب پیچیده و ناهمگنی از اجزای آلی (ماسرال) و غیر آلی (ماده کانیاپی) است. ماسرال‌ها بخش اصلی زغال سنگ را تشکیل داده که نوع و رتبه زغال سنگ را تعیین می‌کنند. تمامی خواص سودمند زغال سنگ مانند: انرژی خروجی حاصل از سوختن، نقش در فرآیندهای متالورژیکال و ظرفیت برای جذب متان همگی از این بخش زغال سنگ مشتق می‌شوند. ماده کانیاپی بخش غیرآلی و غیر قابل اشتعال زغال سنگ است که پس از سوختن به صورت خاکستر باقی می‌ماند و بیشتر مشکلات زیست محیطی از جمله معدنکاری زغال سنگ، سرباره حاصل از سوختن زغال سنگ در کوره بلند ذوب آهن، خوردگی و چسبندگی کوره و زهاب اسیدی معدن از این بخش زغال سنگ ناشی می‌شود.

ماسرال‌های زغال سنگ معادن مورد بررسی، در نمونه‌های دستی و به صورت ماکروسکوپی قابل تشخیص نیستند. به همین دلیل برای تشخیص دقیق تر و کامل باید به صورت میکروسکوپی مورد بررسی قرار بگیرند. به همین منظور برای آنالیز پتروگرافی نمونه‌های مورد آزمایش از مقطع صیقلی استفاده می‌شود. برای تهیه مقطع صیقلی، در آزمایشگاه سنگ ۱۴ گرم نمونه‌های زغال سنگ با دانه بندی مورد نظر را در داخل قالب‌های مخصوص مقطع صیقلی با قطر ۲۰ میلی‌متر با مایعی که شامل ۵ قسمت چسب

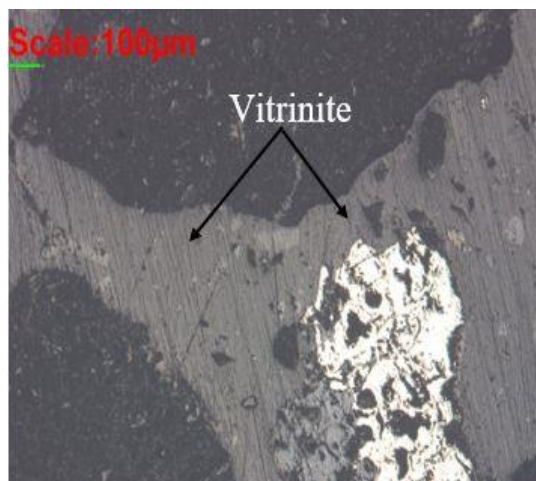
اپوکسی و ۱ قسمت سخت کننده است، مخلوط کرده و به مدت ۲۴ ساعت نمونه در هوای آزاد قرار می‌گیرد تا مخلوط نمونه و چسب کاملاً خشک شود. نمونه‌های خشک شده را برش داده و از قالب‌ها جدا کرده، سپس سطح قرص را روی دیسک‌هایی با اندازه ۲۴۰، ۳۲۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مش (از درشت به سمت ریز) سایش می‌دهیم شکل (۸-۴). مطابق شکل (۸-۴) طی دو مرحله دیگر، توسط پودر آلومینیوم ۱ و ۳ میکرون سطح قرص را صیقل می‌دهیم، تا سطح صیقلی کاملاً صاف و یکنواخت شود و برای مطالعه در نور انعکاسی آماده گردد. از مقاطع صیقلی به منظور بررسی و تعیین نوع و درصد ماسرال‌های نمونه‌های مختلف زغالی و مینرال محتوی هر نمونه استفاده می‌شود.

مقطع صیقلی با استفاده از میکروسکوپ Olympus BX51، با بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر در نور انعکاسی مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های استاندارد مورد استفاده، روش‌های معرفی شده توسط کمیته بین المللی پتروگرافی و استانداردهای ISO 7404-3 and ISO 7404-5 می‌باشند.



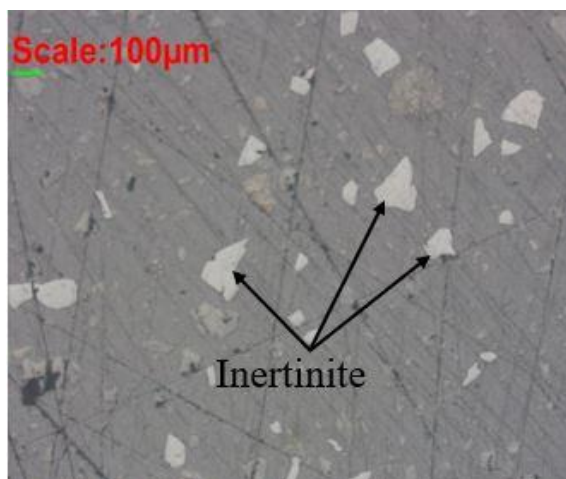
شکل (۸-۴): روش تهیه مقطع صیقلی از نمونه زغالی.

به طور کلی ماسرال‌های نمونه‌های زغال سنگ معادن کرمان به سه گروه ویتترینیت، اینرتینیت، لیپتینیت تقسیم می‌شود. در شکل (۹-۴)، ماسرال نوع ویتترینیت که مهم‌ترین گروه ماسرال زغال سنگ است مشخص می‌باشد، که مشخصه این نوع ماسرال شکل براق و شفاف آن است. این نوع ماسرال قابلیت ذوب شدگی داشته و در نور انعکاسی خاکستری روشن به نظر می‌رسند.



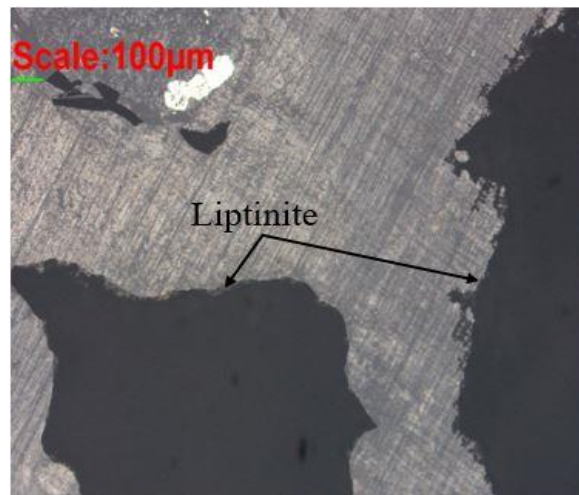
شکل ۴-۹: ماسرال ویتترینیت

اینرتینیت‌ها نوعی دیگر از ماسرال‌های زغال‌سنگ معادن کرمان می‌باشند که برخلاف ویتترینیت‌ها مات و کدر هستند و قابلیت ذوب شدن ندارند، و در اثر اکسایش بافت‌ها و اجزای کمابیش خرد شده به وجود می‌آیند. مطابق شکل (۴-۱۰) مشاهده می‌شود که این ماسرال‌ها در مقاطع صیقلی انعکاس نوری بالایی دارند.



شکل ۴-۱۰: ماسرال اینرتینیت

گروه سوم ماسرال‌های معادن کرمان، لیپتینیت است، که شامل اجزایی است که مطابق شکل (۴-۱۱) انعکاس نوری پایینی دارد این نوع بیشتر از تجزیه گیاهان چرب به وجود می‌آید لیپتینیت‌ها در مراحل اولیه دگرگونی در اثر حرارت می‌سوزند.



شکل ۴-۱۱: ماسرال لیپتینیت

پس از شناسایی ماسرال‌ها، برای تعیین درصد ماسرال‌های نمونه‌های زغال‌سنگ از نرم افزار و روش‌های پردازش تصویر استفاده می‌شود. در این تحقیق، به منظور بررسی و تعیین نوع و درصد ماسرال‌های نمونه‌های مختلف زغالی در دسترس، تست‌های مقطع صیقلی برای نمونه‌های مختلف آماده شده و فرآیند کار به این صورت است که، از هر مقطع تعداد ۱۰ عکس میکروسکوپی، با میکروسکوپ Olympus BX51 گرفته شد. در مرحله بعد، تصاویر گرفته از هر مقطع با استفاده از نرم‌افزار اتوکد پردازش شد، به این صورت که، با میانگین‌گیری از نسبت مساحت هر ماسرال نسبت به کل عکس در نرم‌افزار اتوکد برای تمامی عکس‌ها، درصد ماسرال هر نمونه تعیین شد.

با استفاده از نرم‌افزار اتوکد نسبت مساحت هر ماسرال به مساحت کل را برای هر ۱۰ عکس میکروسکوپی به دست آورده و با گرفتن میانگین، درصد ماسرال هر نمونه تعیین شد. میزان ماسرال‌های

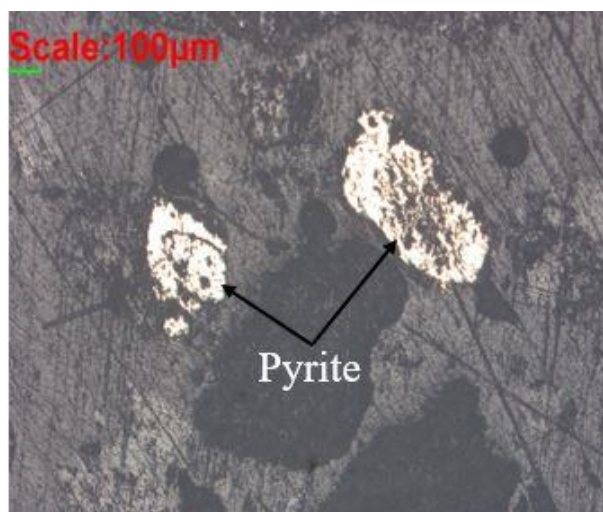
مختلف برای نمونه‌های زغالی با توجه به نتایج حاصل از تست مقاطع صیقلی در جدول (۴-۵) آورده شده است.

جدول ۴-۵: درصد ماسرال‌های نمونه‌های زغالی

شماره نمونه	اینرتینیت (%)	لیپتینیت (%)	ویترینیت (%)
۱	۶۶/۲۷	۱/۴۳	۳۲/۱
۲	۲۳/۳۵	۷/۹۳	۶۸/۷۲
۳	۷/۱۲	۱۵/۲۴	۷۶/۱۴
۴	۴۸/۷۵	۱/۱۲	۵۰/۱۳
۵	۰/۰۰	۱۶/۹۱	۷۷/۷۹
۶	۴/۱۶	۱۰/۱۲	۸۲/۲۲

۴-۸- میزان پیریت محتوی

برای بررسی و تعیین درصد پیریت محتوی نمونه‌های زغال‌سنگ، برای هر نمونه تست‌های مقطع صیقلی مطابق بخش (۴-۷) آماده شده و ابتدا مطابق شکل (۴-۱۲) تعداد ۱۰ عکس میکروسکوپی با بزرگنمایی ۴۰ برابر توسط میکروسکوپ Olympus BX51 گرفته شد و مقطع مورد مطالعه قرار گرفت. سپس نسبت مساحت پیریت موجود به مساحت کل عکس را برای هر ۱۰ عکس میکروسکوپی با استفاده از نرم‌افزار اتوکد محاسبه شد و با میانگین‌گیری از نتایج به دست آمده از ۱۰ عکس گرفته شده از مقطع صیقلی، میزان پیریت هر نمونه تعیین شد.



شکل ۴-۱۲: عکس تهیه شده از تست مقطع صیقلی حاوی پیریت

نتایج به دست آمده از مقاطع صیقلی و درصد پیریت محتوی برای هر نمونه زغال سنگ در جدول ۶-۴ آورده شده است که کمترین میزان پیریت مربوط به معادن پابدانا اصلی و گلتوت و بیشترین میزان پیریت مربوط به معدن اسدآباد زیرزمینی است.

جدول ۴-۶: میزان پیریت محتوی نمونه‌های زغال سنگ

شماره نمونه	درصد پیریت (%)
۱	۰/۲۰
۲	۰/۰۰
۳	۱/۵۰
۴	۰/۰۰
۵	۵/۳۰
۶	۳/۵۰

۴-۹- تست دمای نقطه تقاطعی

سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای انجام آزمایش دمای نقطه تقاطعی و شبیه‌سازی فرآیند گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ که در آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شده است، شامل یک سری تجهیزات برای شبیه‌سازی فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ و ترموکوپل می‌باشد. تجهیزات

شبهه سازی شامل ۲ سیلندر گاز (گاز نیتروژن و گاز اکسیژن)، دستگاه فلومتر (برای کنترل حجم ورودی گاز)، محفظه کنترل دمای برنامه ریزی شده، لوله گاز، آون وظرف واکنش زغال سنگ است. کنترل دمای محیط و زغال سنگ توسط ۲ ترموکوپل انجام می شود که یکی در راکتور برای اندازه گیری دمای زغال سنگ و دیگری در آون برای اندازه گیری دمای محیط تعبیه شده اند. گاز نیتروژن برای پیش گرم کردن نمونه زغالی که تست های بررسی خودسوزی بر روی آن انجام می شود استفاده می شود. دبی ورودی گاز نیتروژن بر روی ۳۰ میلی متر بر دقیقه تنظیم شده است. محفظه دمایی برنامه ریزی شده با استفاده از یک حمام گاز یک دمای یکنواخت برای محیط اطراف فراهم می کند. دمای گاز معادل دمای محیط است، زیرا گاز قبل از رسیدن به مخزن واکنش زغال سنگ گرم شده است. این گاز با عبور از میان یک لوله مسی که درون محفظه برنامه ریزی شده جای دارد، گرم شده است. محفظه ی عکس العمل زغال سنگ از جنس مس خالص است که رسانای بسیار خوب گرما است، همانطور که در شکل (۴-۱۳) نمایش داده شده است. دو ترموکوپلی که در دستگاه قرار دارند به طور همزمان دمای زغال سنگ و آون را اندازه گیری می کنند. ترموکوپل ۱، در مرکز محفظه گرمایی برنامه ریزی شده جانمایی شده است که برای بررسی و کنترل دمای پیرامونی استفاده می شود. در حالی که ترموکوپل ۲، در مرکز محفظه ی عکس العمل زغال سنگ جای دارد که برای بررسی و ثبت دمای زغال سنگ استفاده می شود. این دو ترموکوپل به دستگاهی به نام ترموکنترلر متصل هستند، که این دستگاه وظیفه ثبت دما و همچنین کنترل افزایش دمای داخل آون و راکتور را بر عهده دارد.

بر روی ترموکنترلر دو کلید تعبیه شده است که یکی برای روشن و خاموش کردن چراغ درون دستگاه و دیگری کلید استارت ترموکنترلر می باشد. برای ترموکنترلر نرم افزار jumo dicon touch تعریف شده است که به نام شرکت سازنده آن نامگذاری شده است. در این نرم افزار ۱۰ برنامه با ۵۰ شیب دمایی مختلف را می توان تعریف کرد، که در تحقیق حاضر از برنامه CPT برای بررسی تمایل زغال سنگ های مختلف به خودسوزی استفاده شده است. این برنامه باید به این صورت باشد که آون از دمای محیط در مدت زمان ۳۰ دقیقه به ۵۰ درجه سانتی گراد برسد، سپس به مدت یک ساعت روی ۵۰ درجه

سانتی‌گراد بماند تا دمای آون و رآکتور واکنش هم‌دما شود، بعد از آن از دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تا ۲۵۰ سانتی‌گراد با نرخ ثابت فزاینده به مدت ۲۰۰ دقیقه بالا برود. در شکل (۴-۱۲) نمای کلی از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده آورده شده است.



شکل ۴-۱۳: نمای کلی از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده

برای انجام تست‌های خودسوزی بر روی نمونه‌های زغالی مختلف، پس از بدست آوردن رطوبت محتوی، خاکستر، مواد فرار، میزان ماسرال‌های مختلف نمونه‌های زغال سنگ و درصد پیریت هر یک از نمونه‌های زغالی مختلف برای بررسی میزان تمایل زغال سنگ به خودسوزی و بدست آوردن نقطه CPT، نمونه‌ی ۶۰ گرمی زغال سنگ درون آون موجود در دستگاه قرار می‌گیرد. سپس دستگاه با دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد روشن شده و هوای خشک با اکسیژن ۲۰/۹۶ درصد از محفظه‌ی عکس‌العمل زغال سنگ با دبی ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه عبور داده می‌شود. یک دماسنج پیشرفته برای برداشت پیوسته‌ی دمای زغال سنگ و محیط اطراف آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که دمای زغال به ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رسید، محفظه‌ی برای افزایش دما برنامه ریزی شده است و دما را با نرخ ۱ درجه‌ی سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش خواهد داد در حالی که نرخ عبور هوا در ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه ثابت باقی مانده است. دمای نمونه زغال و آون به‌طور پیوسته هر ۱ دقیقه یکبار توسط دماسنج‌های تعبیه شده اندازه گیری و

ثبت می‌شود و در نهایت منجر به تشکیل منحنی دما-زمان مربوط به نمونه مورد آزمایش می‌گردد. زمانی که دمای زغال سنگ برابر با دمای محیط اطراف شود و منحنی دمایی آن را قطع کند، زغال سنگ در آن دما شروع به سوختن می‌کند. محلی که نقطه تقاطع دمای اندازه‌گیری شده و دمای آن باشد همان نقطه CPT است که هر چه این نقطه به مبدأ نزدیک‌تر باشد تمایل زغال به خودسوزی بیشتر است.

۴-۹-۱- نتایج تست دمای نقطه تقاطعی

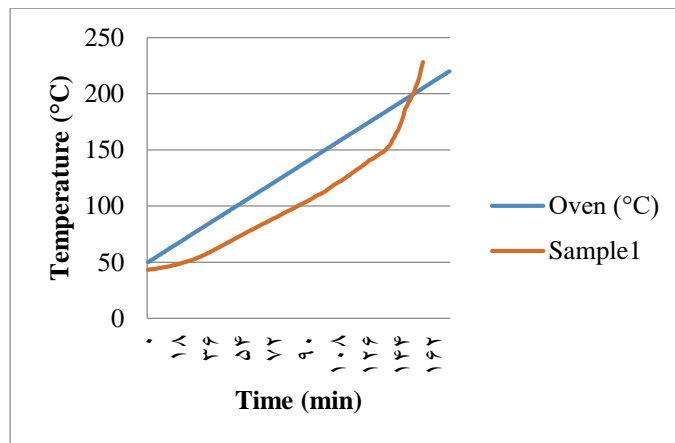
روش دمای نقطه تقاطعی یک روش آزمایشگاهی قدیمی است که به طور گسترده برای بررسی تمایل زغال سنگ به گرمایش خودبه‌خودی استفاده می‌شود. نتایج حاصل از تست‌های CPT برای نمونه‌های زغال سنگ معادن مختلف کرمان و به طور مشخص معادن شرکت زغال سنگ کرمان نشان می‌دهد که کم‌ترین دمای عبور و بیش‌ترین تمایل به خودسوزی برای نمونه شماره ۵ متعلق به معدن اسداباد زیرزمینی ثبت شد؛ همچنین کم‌ترین تمایل به خودسوزی در نمونه شماره ۱ متعلق به معدن هشونی ثبت شد. نتایج حاصل از تست‌های دمای نقطه تقاطعی با توجه به جدول (الف) در پیوست، در جدول (۷-۴) و شکل‌های (۴-۱۴) تا (۴-۲۲) برای نمونه‌های مختلف آورده شده است.

نتایج حاصل از تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه‌های زغال سنگ معادن مختلف در جدول (۷-۴) آورده شده است.

جدول ۷-۴: نتایج حاصل از تست‌های دمای نقطه تقاطعی

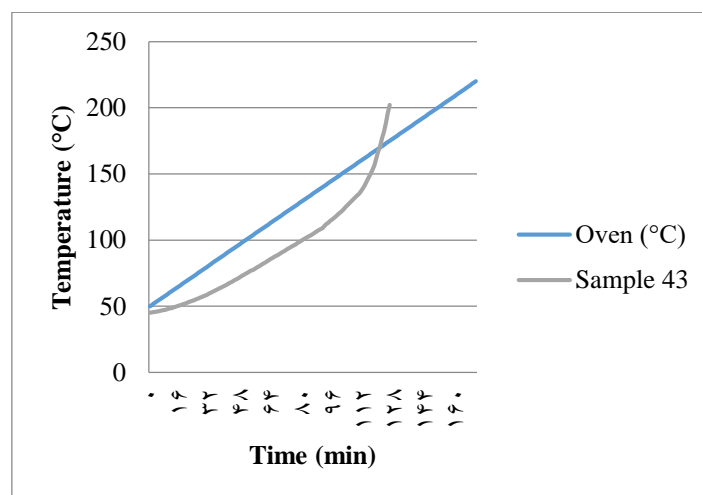
شماره نمونه	CPT (°C)
۱	۲۰۰
۲	۱۷۰
۳	۱۴۰
۴	۱۸۰
۵	۹۳
۶	۱۱۹

شکل (۴-۱۴) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن هشونی را نشان می‌دهد، نقطه CPT برابر ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است که نشان دهنده این است که تمایل به گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ در معدن هشونی پایین است.



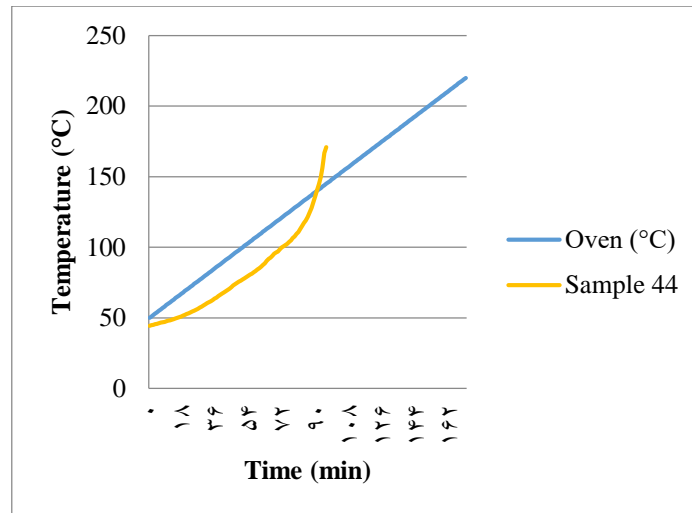
شکل ۴-۱۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن هشونی

شکل (۴-۱۵) نتیجه حاصل از تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن پابدانا اصلی را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد است که نشان می‌دهد که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن پابدانا اصلی در حد پایین قرار دارد.



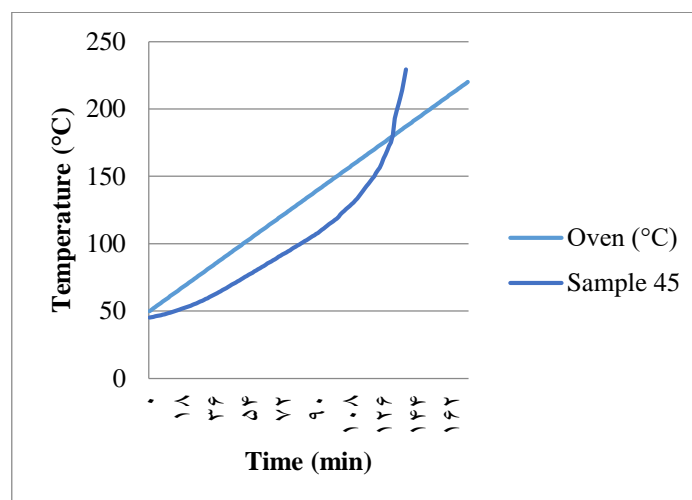
شکل ۴-۱۵: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن پابدانا اصلی

شکل (۴-۱۶) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن همکار را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن همکار در حد متوسط قرار دارد.



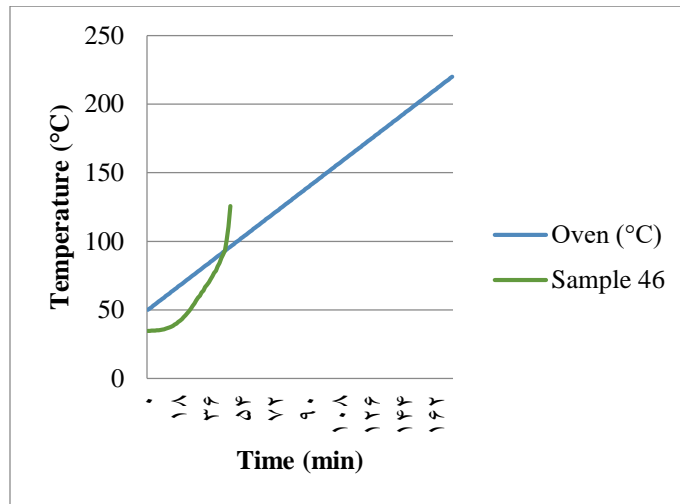
شکل ۴-۱۶: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن همکار

شکل (۴-۱۷) نشان دهنده نتایج حاصل از تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن گل‌توت می‌باشد، نقطه تقاطع برابر ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است، که این نکته را بازگو می‌کند که، تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ در معدن گل‌توت در حد پایین قرار دارد.



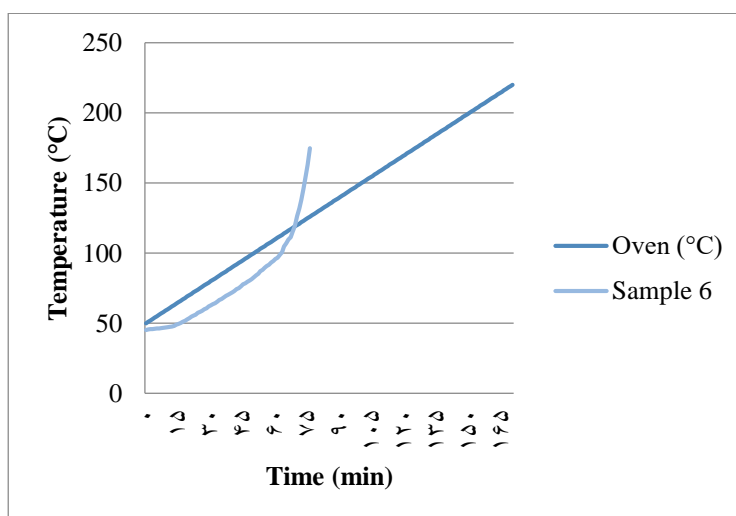
شکل ۴-۱۷: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن گل‌توت

شکل (۴-۱۸) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن اسدآباد زیرزمینی را نشان می‌دهد، دمای تقاطعی برابر ۹۳ درجه سانتی‌گراد است که بیان‌گر این است که، خطر خودسوزی زغال‌سنگ در معدن اسدآباد زیرزمینی بسیار بالا است.



شکل ۴-۱۸: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن اسدآباد زیرزمینی

شکل (۴-۱۹) نتایج حاصل از آزمایش CPT را برای نمونه زغال‌سنگ مربوط به معدن هجدک را نشان می‌دهد، دمای نقطه تقاطعی برابر ۱۱۹ درجه سانتی‌گراد است که نشان می‌دهد که، تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ در معدن هجدک به طور کلی در حد بالایی قرار دارد.



شکل ۴-۱۹: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن هجدک

در جدول (۴-۸) خلاصه نتایج به دست آمده از تست‌های آنالیز تقریبی (تست رطوبت، خاکستر و مواد فرار) و تست‌های مقاطع صیقلی (تعیین میزان ماسرال‌ها و درصد پیریت) آورده شده است.

جدول ۴-۸: خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایشات آنالیز تقریبی و تست‌های مقاطع صیقلی

شماره نمونه	پیریت محتوی (%)	رطوبت محتوی (%)	مواد فرار (%)	کربن ثابت (%)	خاکستر محتوی (%)	اینرتینیت (%)	لیپتینیت (%)	ویترنیت (%)	CPT (°C)
۱	۰/۲۰	۱/۲۶۵	۳۰/۹۳	۶۴/۲۵۴	۳/۳۸۸	۶۶/۲۷	۱/۴۳	۳۲/۱۰	۲۰۰
۲	۰/۰۰	۲/۲۳۶	۱۸/۵۰۱	۳۸/۰۸۸	۴۱/۱۷۵	۲۳/۳۵	۷/۹۳	۶۸/۷۲	۱۷۰
۳	۱/۵۰	۱/۶۸۵	۲۹/۵۷۳	۵۴/۶۰۷	۱۴/۱۳۵	۷/۱۲	۱۵/۲۴	۷۶/۱۴	۱۴۰
۴	۰/۰۰	۱/۳۸۵	۲۲/۱۴۸	۵۱/۴۵۰	۲۵/۰۱۷	۴۸/۷۵	۱/۱۲	۵۰/۱۳	۱۸۰
۵	۵/۳۰	۱۳/۲۸۸	۲۳/۷۳۹	۴۲/۳۶۰	۲۰/۶۱۵	۰/۰۰	۱۶/۹۱	۷۷/۷۹	۹۳
۶	۳/۵۰	۱۰/۰۸۲	۲۱/۶۵۲	۶۳/۲۹۰	۴/۹۷۶	۴/۱۶	۱۰/۱۲	۸۲/۲۲	۱۱۹

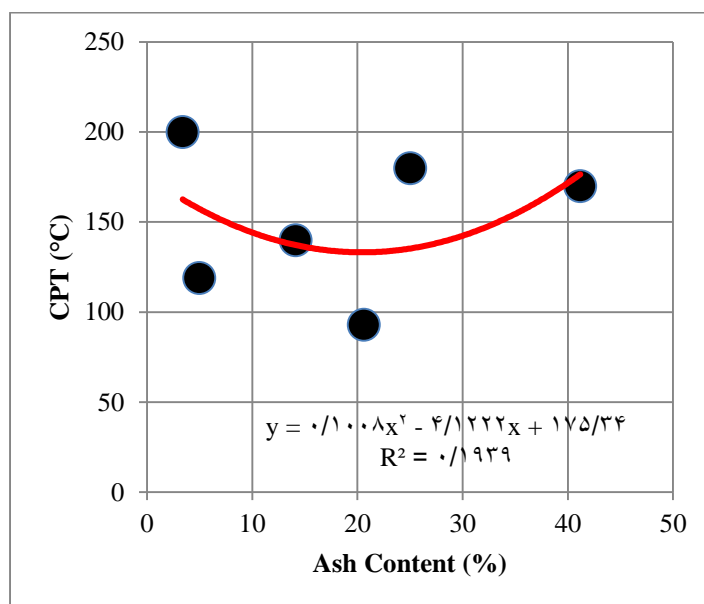
از جدول (۴-۸) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار CPT به عوامل مختلفی بستگی دارد و از عوامل مختلف تأثیرپذیری متفاوتی دارد، و از بعضی عوامل تأثیر بیشتری می‌پذیرد، که پارامترهای پیریت محتوی و رطوبت محتوی از مهم‌ترین این عوامل هستند. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان این طور ارزیابی کرد که پارامتر CPT به عنوان یک پارامتر وابسته به عوامل مستقل مختلفی، وابسته است. هر کدام از این عوامل تأثیر متفاوتی بر خودسوزی زغال‌سنگ دارند و باید به طور همزمان مورد بررسی قرار بگیرند. برای مثال مقدار CPT برای نمونه‌های معادن همکار و هشونی به ترتیب ۱۴۰ و ۲۰۰ می‌باشد در حالی که مقدار رطوبت و مواد فرار تقریباً برابری دارند اما به دلیل بالا بودن درصد پیریت محتوی و لیپتینیت نمونه زغال‌سنگ معدن همکار نسبت به معدن هشونی با وجود افزایش درصد خاکستر در زغال‌سنگ معدن همکار مشاهده می‌شود که مقدار CPT کاهش چشم‌گیری داشته است، که بیان‌کننده تأثیر بیشتر پیریت و لیپتینیت بر روی تمایل زغال به گرمایش خودبه‌خودی در زغال‌سنگ این معدن می‌باشد. در نمونه معدن اسداباد زیرزمینی مقدار خاکستر نسبت به معدن هشونی افزایش چشم‌گیری داشته است و انتظار می‌رود مقدار CPT افزایش پیدا کند اما با توجه به سایر پارامترها نظیر رطوبت و پیریت

بالا مقدار CPT کاهش می‌یابد. پس می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که مقدار CPT به صورت هم‌زمان به عوامل مختلفی وابسته است و به این صورت نیست که تأثیر یک پارامتر به صورت قطعی باعث افزایش یا کاهش مقدار CPT و در نتیجه خودسوزی شود پس بایستی همه عوامل را هم‌زمان بررسی کرد.

۴-۱۰- تأثیر خاکستر

زغال سنگ حاوی مواد غیرآلی و زائدی مثل رس‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها، کربنات‌ها و غیره هستند که پس از سوزاندن زغال سنگ به صورت خاکستر برجا می‌مانند که به خاکستر زغال سنگ معروف هستند. خاکستر زغال سنگ باعث افت حرارتی زغال سنگ و یک عامل مزاحم در تولید سوخت است و باعث آسیب رسانی به کوره‌های حرارتی و محیط زیست می‌شود.

در شکل (۴-۲۰) ارتباط بین خاکستر محتوی زغال سنگ و مقدار CPT نشان داده شده است. مقدار R^2 برابر با ۰/۱۹۳۹ است، که بیانگر ارتباط ضعیف بین درصد خاکستر محتوی و مقدار CPT است.



شکل (۴-۲۰): نمودار رابطه بین میزان خاکستر محتوی و CPT

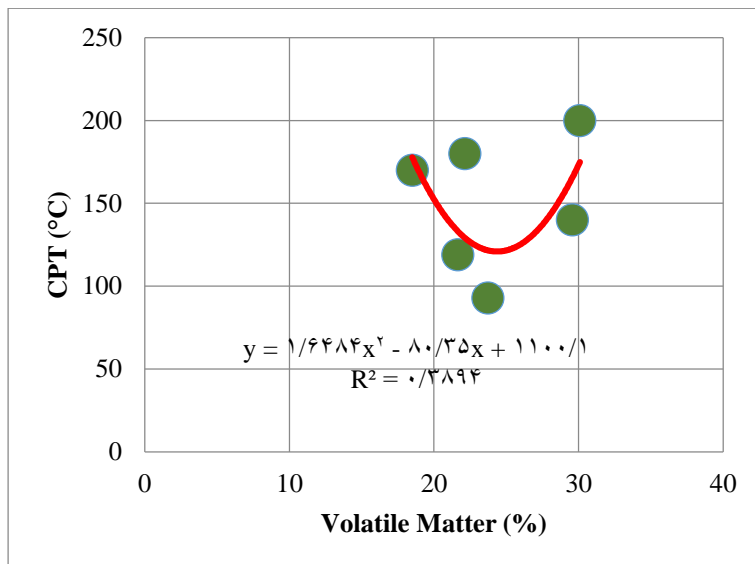
به طور کلی با افزایش میزان خاکستر محتوی، میزان CPT افزایش می‌یابد، در نتیجه تمایل زغال سنگ به خودسوزی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که هر چه درصد خاکستر بیشتر باشد، خاکستر گرمای بیشتری به خود جذب می‌کند و مانع از افزایش دمای زغال سنگ می‌شود، اما به دلیل اینکه پدیده گرمایش خودبه‌خودی زغال سنگ به عوامل مختلفی بستگی دارد. در بعضی از نمونه‌ها با وجود افزایش خاکستر میزان CPT کاهش یافته و تمایل زغال به خودسوزی افزایش می‌یابد. برای مثال با توجه به نتایج آزمایش دمای نقطه تقاطعی با وجود افزایش میزان خاکستر در نمونه گرفته شده از معدن اسداباد نسبت به نمونه برداشت شده از معدن هسونی، مشاهده می‌شود که مقدار CPT کاهش یافته است. دلیل این کاهش، نقش بیشتر سایر پارامترها (افزایش پیریت، افزایش رطوبت و افزایش لیپتینیت) در تمایل زغال سنگ این معدن به خودسوزی می‌باشد.

۴-۱۱- تأثیر مواد فرار

مواد فرار زغال سنگ شامل یک سری گازهایی است که در خلل و فرج و درزه و شکاف‌های زغال سنگ محفوظ شده‌اند و در اثر سوزاندن زغال سنگ در یک ظرف سربسته تا حرارت حدود ۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد همه آن‌ها به صورت گاز و بخار خارج می‌شود. مواد فرار شامل ترکیبات گازی نظیر SO_2 ، NH_3 ، CL ، CH_4 ، N_2O ، CO و CO_2 و بخار آب هستند.

حضور مواد فرار در زغال سنگ می‌تواند باعث افزایش تمایل زغال سنگ به گرمایش خودبه‌خودی شود، و می‌تواند نقش سوخت ثانویه و مکمل را داشته باشد. اما افزایش بیش از حد مواد فرار باعث ایجاد یک غشا پوششی در سطح زغال سنگ می‌شود، که مانع از نفوذ اکسیژن محیط از طریق ترک‌ها و شکاف‌های سطحی زغال سنگ به درون آن می‌شود. در نتیجه با عدم نفوذ اکسیژن به نمونه زغالی دمای زغال سنگ افزایش نمی‌یابد و تمایل زغال سنگ به خودسوزی کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۴-۲۱) مشاهده می‌شود، با افزایش میزان مواد فرار در نمونه‌های زغالی میزان CPT کاهش می‌یابد. ولی افزایش بیش

از ۲۷ درصد مواد فرار باعث افزایش مقدار CPT و در نتیجه کاهش تمایل نمونه‌های زغالی به خودسوزی می‌شود.

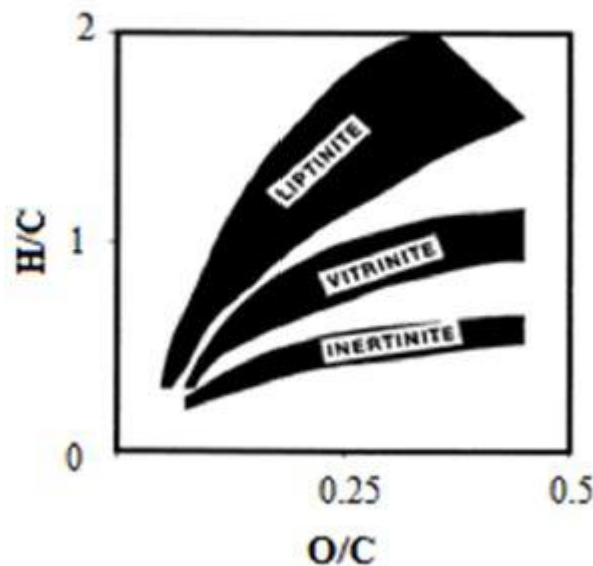


شکل (۴-۲۱): نمودار رابطه بین مواد فرار و CPT

۴-۱۲- تأثیر ماسرال‌ها بر روی خودسوزی زغال سنگ

برای بررسی تأثیر ماسرال‌ها بر گرمایش خودبه‌خودی نمونه‌های زغال سنگ معادن زغال سنگ کرمان درصد ماسرال‌های مختلف با استفاده از تست مقطع صیقلی و با نرم‌افزار اتو کد محاسبه شد و CPT هر نمونه به دست آورده شد که در جدول (۴-۸) نشان داده شده است. ماسرال‌ها از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی کاملاً متفاوت و غیر یکسان و غیر کریستالیزه هستند. ماسرال‌ها براساس ترکیبات و منشأ اولیه گیاهی‌شان به سه گروه اصلی ویتروئیت، اینترتینیت و لیپتینیت تقسیم می‌شوند. یکی از این تقسیم بندی‌ها توسط ون کریولن ارائه شده است که در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در اینترتینیت نسبت‌های اتمی H/C و O/C نسبت به ویتروئیت و لیپتینیت پایین‌تر است، که هر چه مقدار H و O کمتر باشد تمایل زغال سنگ به گرمایش خودبه‌خودی کمتر می‌شود. بنابراین با افزایش ماسرال اینترتینیت در نمونه زغال سنگ تمایل زغال سنگ به احتراق خودبه‌خودی

کاهش پیدا می‌کند. با آزمایش CPT تأثیر هر یک از ماسرال‌ها بر روی تمایل نمونه زغال‌سنگ به خودسوزی بررسی شد. نمودار مربوط به ارتباط بین انواع ماسرال و نقطه CPT، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها برای نمونه‌های مختلف در شکل‌های الف، ب و ت در پیوست آورده شده است.



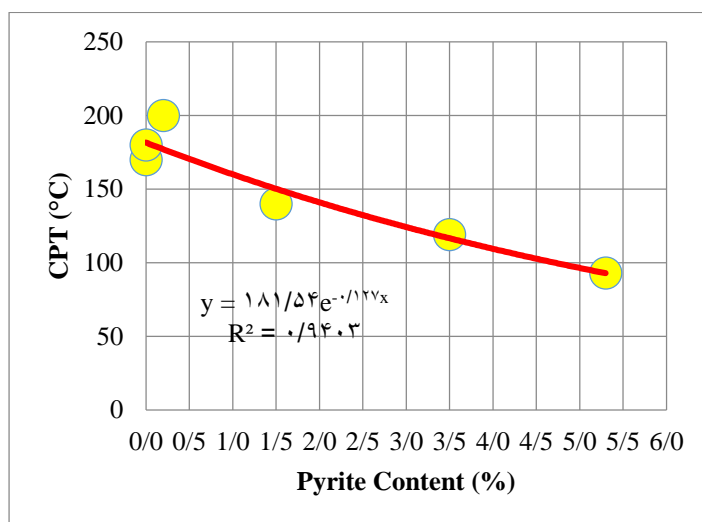
شکل (۴-۲۲): طرح Van Krevelen، برای تقسیم بندی سه گروه اصلی ماسرال (Van Krevelen)

۱۱-۴- تأثیر میزان پیریت محتوی بر روی گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ

گوگرد یکی از مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در زغال‌سنگ است که به شکل‌های مختلف، از جمله به صورت پیریت در زغال‌سنگ یافت می‌شود. از مهم‌ترین معایب وجود پیریت در زغال می‌توان به کاهش ارزش حرارتی زغال و افزایش آلودگی محیط‌زیست و تأثیر مخرب بر فرآیند خودسوزی زغال‌سنگ اشاره کرد.

نتایج آزمایش دمای نقطه تقاطعی برای نمونه‌های مختلف حاوی درصد پیریت متفاوت نشان می‌دهد که به طور کلی مطابق شکل (۴-۲۳) هر چه درصد پیریت بیشتر باشد منحنی دمایی مربوط به نمونه سریع‌تر منحنی دمایی آن را قطع می‌کند و نقطه CPT کاهش می‌یابد. به این صورت که در ابتدا رطوبت با افزایش دما تبخیر می‌شود، که میزانی از گرما را مصرف می‌کند و تجمع گرما در زغال را کاهش می‌دهد از آنجایی که بعد از تبخیر رطوبت منافذ و سوراخ‌های زیادی در زغال‌سنگ ایجاد

می‌شود، دمای زغال‌سنگ به سرعت افزایش می‌یابد و همین عاملی محرک برای پیریت موجود در زغال‌سنگ می‌شود، پیریت در حالت کلی به مانند یک کاتالیزور عمل کرده و سرعت اکسایش زغال‌سنگ را افزایش می‌دهد ولی اگر این واکنش در حضور رطوبت انجام شود، باعث تصاعد بیشتر و تسریع در خودسوزی زغال‌سنگ می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴-۱۶) مشاهده می‌شود برای نمونه معدن گلتوت که پیریتی ندارد، مقدار CPT در این نمونه به شدت افزایش یافته و پیریتی وجود ندارد که سرعت واکنش را افزایش دهد، تا منحنی دمایی مربوط به نمونه گلتوت سریع‌تر منحنی دمایی آن را قطع کند. در صورتی که مطابق شکل (۴-۱۷) برای نمونه معدن اسدآباد زیرزمینی که حاوی ۵/۳۰ درصد پیریت است، با تبخیر شدن رطوبت، پیریت فعال شده و دمای زغال‌سنگ افزایش پیدا می‌کند (افزایش دمای آن ۳ برابر حالتی است که رطوبت حضور نداشته باشد)، در واقع رطوبت نقش کاتالیزور را برای پیریت دارد. پیریت به عنوان یک کاتالیزور سرعت واکنش به صورت تصاعدی افزایش می‌دهد و در نتیجه دمای نمونه به سرعت بالا رفته و منحنی دمایی آن را قطع می‌کند.



شکل ۴-۲۳: ارتباط بین میزان پیریت محتوی نمونه‌های زغالی مختلف و CPT

۴-۱۲- تأثیر میزان رطوبت محتوی بر روی خودسوزی زغال‌سنگ

رطوبت، کم یا زیاد، در انواع زغال‌سنگ‌ها وجود دارد به طوری که مقدار آن بستگی به نوع زغال و درجه تکامل آن دارد. میزان رطوبت محتوی در لیگنیت تا ۲۰ درصد، در بیتومینه تا ۱۹ درصد وزنی و در

آنتراسیت بین ۱ تا ۲ درصد را رطوبت تشکیل می‌دهد. رطوبت محتوی لایه زغال همچنین بستگی به نفوذ پذیری و درجه اشباع شدگی لایه زغال دارد. اگر رطوبت از لایه زغال تخلیه شود، فضای خالی با گاز پر می‌شود.

نمونه‌های زغال سنگ براساس روش موجود در بخش (۴-۹) مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش درجه حرارت زغال سنگ برای نمونه‌های با رطوبت مختلف، متفاوت است. نمونه‌های با رطوبت محتوی کم دارای منحنی صاف هستند همانطور که در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است. در مقابل نمونه‌های با رطوبت محتوی بالا نشان‌دهنده یک تأخیر در افزایش دما است، همانطور که در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است. تأخیر به علت رطوبت در زغال سنگ است. اگرچه رطوبت اثر بسیار کمی بر ساختار شیمیایی زغال سنگ دارد، از طریق جذب سطحی و غیر سطحی بر روی اکسیداسیون زغال سنگ تأثیر می‌گذارد. رطوبت با افزایش دما تبخیر می‌شود، که میزانی از گرما را مصرف می‌کند و تجمع گرما در زغال را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، رطوبت یک غشا پوششی در سطح زغال سنگ تشکیل می‌دهد. بنابراین اکسیژن قبل از تماس و واکنش با زغال سنگ با غشا رطوبت حل می‌شود. در نتیجه رطوبت ممکن مانع انتقال گرما و ایجاد ارتباط بین زغال سنگ و اکسیژن شود.

در صورتی که میزان رطوبت محتوی زغال سنگ بالا باشد، تبخیر رطوبت و غشا سطحی باعث پدیده تأخیر می‌شود. از آنجایی که بعد از تبخیر رطوبت منافذ و سوراخ‌های زیادی در زغال سنگ ایجاد می‌شود، که باعث جذب بیشتر اکسیژن از طریق منافذ ایجاد شده می‌شود و دمای زغال سنگ به سرعت پس از مرحله تأخیر افزایش می‌یابد.

تغییرات در میزان رطوبت محتوی زغال سنگ یعنی خشک یا خیس بودن زغال سنگ تأثیر آشکاری استعداد زغال برای گرمایش خودبه‌خودی دارد. به طور کلی، وجود رطوبت در زغال سنگ باعث افزایش تمایل به گرمایش خودبه‌خودی می‌شود.

به طور خلاصه، می‌توان بیان کرد که تأثیر رطوبت در احتراق خودبه‌خودی زغال به ۲ طریق است:

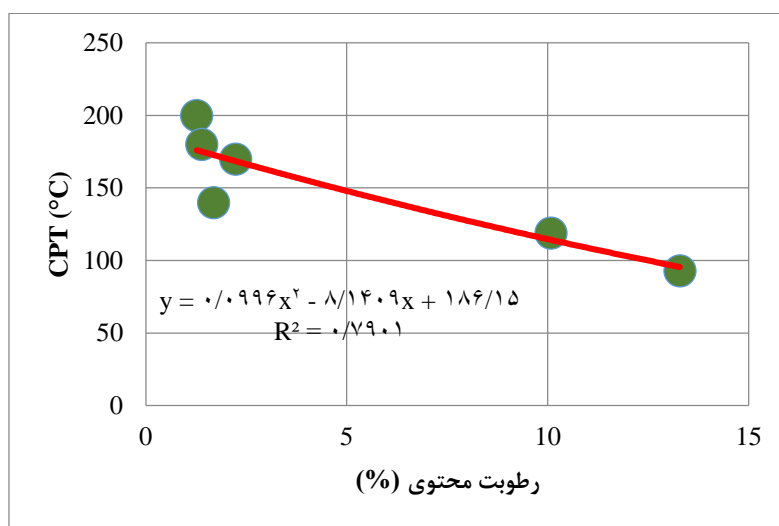
(۱) تبخیر رطوبت باعث مصرف انرژی می‌شود که این عامل مانع از ایجاد فرآیند گرمایش خودبه‌خودی می‌شود؛

(۲) استعداد گرمایش خودبه‌خودی زغال با مرطوب سازی زغال افزایش می‌یابد.

همانطور که در معادله (۱-۴) مشاهده می‌شود واکنش رطوبت با زغال باعث تولید گرما و حرارت می‌شود.



در این آزمایش تعداد ۶ نمونه زغالی از معادن زغال سنگ کرمان را برای بررسی تأثیر رطوبت بر قابلیت خودسوزی زغال جمع‌آوری کرده و با استفاده از روش CPT مورد آزمایش قرار دادیم، که میزان رطوبت محتوی نمونه‌های زغالی در جدول (۲-۴) آورده شده است. تأثیر میزان رطوبت محتوی بر افزایش دما و قابلیت خودسوزی در شکل (۲۴-۴) آورده شده است. نتیجه کار نشان داد زغال‌های با درصد رطوبت محتوی کمتر از ۵ درصد دارای قابلیت خودسوزی کم تا متوسط، بین ۵ تا ۱۰ درصد دارای قابلیت خودسوزی بالا و بیشتر از ۱۰ درصد دارای قابلیت خودسوزی خیلی بالا هستند.



شکل ۲۴-۴: ارتباط بین میزان رطوبت محتوی نمونه‌های جدول (۲-۴) و نقطه CPT

۱۳-۴- جمع بندی

در این فصل ابتدا به معرفی حوزه زغالی کرمان و شرکت زغال سنگ کرمان پرداخته شد و سپس برخی از معادن مورد مطالعه و کارخانه زغال شویی زرنند معرفی و بررسی شد. در ادامه با استفاده از روش آنالیز تقریبی و تست مقطع صیقلی برای نمونه‌های مختلف درصد رطوبت محتوی، خاکستر محتوی، مواد فرار، درصد ماسرال‌های مختلف نمونه‌های زغالی و میزان پیریت محتوی هر نمونه تعیین شد. سپس با استفاده از روش دمای نقطه تقاطعی که یک روش آزمایشگاهی است، تأثیر هر یک از پارامترهای فوق بر روی تمایل زغال سنگ به خودسوزی برای نمونه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه نتایج به دست آمده از آزمایشات ارائه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که کمترین دمای تقاطعی نمونه زغال سنگ و آون که نشان دهنده بیشترین تمایل به خودسوزی می‌باشد مربوط به معدن اسداباد زیرزمینی و بیشترین دمای تقاطعی که نشان دهنده کمترین تمایل به خودسوزی است مربوط به معدن هشونی می‌باشد. در نهایت به بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف با نقطه CPT پرداخته شد و تأثیر این پارامترها به ویژه پارامتر رطوبت محتوی بر روی خودسوزی نمونه‌های مختلف بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در نهایت در فصل پنجم نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادات برای کاهش خطر خودسوزی زغال سنگ در معادن مورد مطالعه ارائه می‌شود.

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها

۱-۵- نتیجه‌گیری

خودسوزی در معادن زغال‌سنگ از نظر ایمنی و اقتصادی یکی از خطرات عمده به شمار می‌آید. بررسی‌های آماری نشان داده است که ۸۰ درصد آتش‌سوزی‌های معادن زغال‌سنگ ناشی از خودسوزی بوده است. روش‌های جدید معدنکاری مستلزم سرمایه‌گذاری هنگفتی است، بنابراین یک جبهه کار فعال ممکن است خسارات سنگینی به بار آورد. حتی وقفه‌ای کوتاه در تولید می‌تواند گران تمام شود. خودسوزی می‌تواند مقادیر کشته‌ای گاز مونواکسید کربن تولید کند و در نتیجه تهدیدی جدی برای سلامتی و ایمنی معدن کاران می‌باشد. خودسوزی زغال‌سنگ به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که می‌توان با شناخت و ارزیابی و کنترل این پارامترها، آن را کاهش داد.

در تحقیق حاضر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ به عنوان یکی از مهم‌ترین خطرات معدنکاری زغال‌سنگ در معادن زیرزمینی و پارامترهای ذاتی مؤثر بر پدیده خودسوزی زغال‌سنگ مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این پایان‌نامه برای بررسی تأثیر پارامترهای ذاتی مختلف به ویژه پارامتر رطوبت محتوی زغال‌سنگ بر روی گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT) استفاده شد. روش دمای نقطه تقاطعی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی خودسوزی زغال‌سنگ است.

در تحقیق حاضر، در مرحله اول به بیان کلیاتی از مکانیزم خودسوزی زغال‌سنگ و اثرات زیست محیطی، اجتماعی و فیزیکی پرداخته شد. سپس کلیه پارامترهای مهم و تأثیرگذار در قابلیت گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

در ادامه به بررسی منابع مختلف، تحقیقات مهم و تأثیرگذار در زمینه قابلیت گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ پرداخته شد. همچنین روش‌های مختلف بررسی خطر گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ معرفی و مهم‌ترین آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند.

در مرحله آخر به بررسی تأثیر پارامترهای ذاتی زغال سنگ در قابلیت خودسوزی زغال سنگ تعدادی از معادن حوزه زغالی کرمان پرداخته شد و نتایج زیر برای این منطقه مورد بررسی حاصل شد:

- با توجه به نمودارهای حاصل شده از آزمایش CPT این طور برآورد می شود که میزان رطوبت محتوی با CPT رابطه عکس دارد، به عبارت دیگر با افزایش میزان رطوبت محتوی زغال سنگ، CPT نمونه آزمایشگاهی کاهش می یابد و کاهش آن نشان دهنده افزایش تمایل به خودسوزی است، در نتیجه با افزایش درصد رطوبت محتوی زغال سنگ تمایل زغال سنگ به گرمایش خودبه خودی افزایش می یابد.
- با توجه به نقاط CPT به دست آمده برای نمونه های مختلف می توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان ماسرال اینرتینیت تمایل زغال سنگ به خودسوزی کاهش می یابد و میزان ماسرال اینرتینیت و تمایل به خودسوزی نمونه های زغالی مختلف رابطه عکس با هم دارند. همچنین با توجه به نمودارهای به دست آمده مشاهده شد که با افزایش درصد ماسرال های لیپتینیت و ویتیرینیت تمایل به خودسوزی زغال سنگ برای نمونه های زغالی مختلف افزایش می یابد.
- برای معادن مورد بررسی میزان پیریت محتوی نمونه های زغالی با انجام تست مقطع صیقلی و نرم افزار اتوکلد بدست آمد و مشاهده شد که با افزایش درصد پیریت محتوی میزان CPT کاهش می یابد و با کاهش CPT تمایل زغال سنگ به خودسوزی افزایش می یابد. به عبارت دیگر تمایل به خودسوزی در زغال سنگ با میزان پیریت محتوی آن رابطه مستقیم دارد.
- پس از انجام تست های CPT مشاهده شد که مقدار CPT به صورت هم زمان به عوامل مختلفی وابسته است و به این صورت نیست که تأثیر یک پارامتر به صورت قطعی باعث افزایش یا کاهش مقدار CPT و در نتیجه خودسوزی شود پس بایستی همه عوامل را هم زمان بررسی کرد.
- با انجام تمامی آزمایشات مشخص شد که، بیشترین تمایل به گرمایش خودبه خودی مربوط به معدن اسدآباد زیرزمینی و کمترین تمایل به گرمایش به گرمایش خودبه خودی برای نمونه

مربوط به معدن هشونی ثبت شد. برای سایر معادن تمایل به گرمایش خودبه‌خودی کم تا متوسط است.

۲-۵- پیشنهادها

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

- با توجه به تأثیر پذیری متفاوت خودسوزی از عوامل ذاتی پیشنهاد می‌شود عوامل ذاتی مختلف مؤثر بر خودسوزی زغال‌سنگ به صورت فازی بررسی شود تا میزان تأثیر هر یک از عوامل بر روی خودسوزی زغال به میزان دقیق‌تری مشخص گردد.
- پیشنهاد می‌شود سایر مناطق زغالی کشور نیز با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی موجود از لحاظ قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ مورد ارزیابی قرار گیرند.
- با توجه به اینکه علاوه بر عوامل ذاتی، عوامل زمین‌شناسی و معدنکاری نیز در قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ نقش دارند، پیشنهاد می‌شود تأثیر هر یک از عوامل فوق بر روی خطر خودسوزی زغال مورد بررسی و ارزیابی قرار بگیرند.

منابع فارسی

- احمدی ر؛ و کریمی ا، (۱۳۹۵) "تعیین جایگاه زغال سنگ ایران در خاورمیانه، قاره آسیا و جهان براساس مطالعات آماری میزان تولید، مصرف و مقدار خالص صادرات و واردات"، سومین کنگره ملی زغال سنگ ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- احمدیان پ، (۱۳۹۵)، "بررسی و پیش‌بینی خودسوزی زغال سنگ با استفاده از رویکرد سیستمی و منطق فازی مطالعه موردی "معادن زغال سنگ کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- اصلو م، (۱۳۷۸)، "مهندسی زغال سنگ"، انتشارات ناقوس، تهران.
- جهانبانی ز؛ مرادی ح؛ سرشکی ف و عطایی م، (۱۳۹۴)، "تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی و حریق در معادن زغال سنگ و راه‌های ابتکاری تشخیص و کنترل آن"، سومین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه ترویجی دوستداران محیط زیست.
- زاده کبیر ا، مجموعه کتاب ۴ جلدی زغال سنگ، انتشارات سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)، سال ۱۳۹۰، جلد ۱.
- صفاری ا، (۱۳۹۲)، "تأثیرات زیست محیطی خودسوزی زغال سنگ و راه‌کارهای جلوگیری از آن در دپوهای کارخانه زغال‌شویی"، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران.
- صفاری ا، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "ارائه یک سیستم طبقه بندی مهندسی برای ارزیابی خطر خودسوزی زغال در معادن زغال سنگ"، دانشکده مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- صفاری ا؛ سرشکی ف و عطایی م، (۱۳۹۷)، "روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ، چهارمین کنگره ملی زغال سنگ ایران"، طبس، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- صفاری ا؛ سرشکی ف و عطایی م، (۱۳۹۷)، "روش‌های سیستمی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ، چهارمین کنگره ملی زغال سنگ ایران"، طبس، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عطایی م، (۱۳۹۴)، "مباحث ویژه در معدنکاری زیرزمینی"، چاپ اول، شاهرود، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قنبری ک، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "امکان سنجی انجام عملیات گاز زدایی در معادن زغال سنگ البرز مرکزی، مطالعه موردی: معدن رضی"، دانشکده مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کیارستمی ک، (۱۳۹۳)، "سوخت فسیلی زغال سنگ و پیامدهای زیست محیطی آن"، مجله رشد زمین‌شناسی، دوره نوزدهم، شماره ۴، ص ۲۱-۱۴.
- مدنی ح، (۱۳۷۳)، "بازرسی در معادن"، گروه مترجمان، انتشارات بصیر.

- مدنی ح، (۱۳۸۷)، "تهویه در معادن"، چاپ ششم، مرکز نشر دانشگاهی تهران.
- مرتضی نژادی، (۱۳۹۷)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی تأثیر پارامترهای ذاتی بر روی خودسوزی زغال‌سنگ (مطالعه موردی: معادن زغال‌سنگ البرز مرکزی)"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ملکی ا و آگاه آ، (۱۳۹۳)، "بررسی وضعیت زغال‌سنگ ایران نسبت به جهان، دومین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران"، کرمان، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- منوچهری م، موسوی راد م، (۱۳۹۴)، "بررسی امکان خودسوزی زغال‌سنگ در لایه‌های شیب‌دار یک سیستم استخراج مکانیزه"، اولین کنگره سالیانه جهان و بحران انرژی، شیراز، موسسه عالی علوم و فناوری خوارزمی.
- وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، آمار و نمودارهای ایران و جهان ۲۰۰۸، ۱۳۸۷، صفحه ۱۱۱.
- یزدی م، (۱۳۸۲)، "زغال‌سنگ از منشأ تا اثرات زیست محیطی"، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- یزدی م. (۱۳۸۸)، "زغال‌سنگ معدن و معدنکاری زغال‌سنگ"، زغال‌سنگ تأثیر بر محیط زیست"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد امیرکبیر، ص ۲۸۱.

- Arisoy A, Beamish B.B, Yoruk B. (2017). “Moisture moderation during coal self-heating “. Fuel. doi.10.1016/j.fuel.08.075.
- Banerjee S.C., (1982), “A Theoretical Design to the Determination of Risk Index of Spontaneous Fires in Coal Mines”, Journals of Mines, Metals & Fuels, Vol. 30, No. 8 pp. 399-406.
- Banerjee S.C., (1985), “Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fire”, Dhanbad-India: Central Mining Research Station., Oxford & IBH Publishing Co, pp. 168.
- Banerjee S.C., Nandy D.K., Banerjee D.D. and Chakravorty R.N., (1972), “Classification of coal with respect to their Susceptibility to Spontaneous Combustion”, Trans. Min. Geol. & Met. Inst. of India, Vol. 59, Issue 2, pp. 15-31.
- Beamish B.B. and Arisoy A., (2008), “Effect of intrinsic coal properties on self-heating rates”, 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, (The Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Littleton, USA), Wallace, pp. 149-153, ISBN 978-0-615-20009-5.
- Beamish B.B. and Arisoy A., (2008), “Effect of intrinsic coal properties on self-heating rates”, 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, (The Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Littleton, USA), Wallace, pp. 149-153, ISBN 978-0-615-20009-5.
- Beamish B.B. and Blazak D.G., (2005), “Relationship between ash content and R70 self-heating rate of Callide Coal”, International Journal of Coal Geology, Vol. 64, Issues 1-2, pp. 126-132.
- Beamish B.B. and Schultz T.J., (2008), “Moisture Content Impact on the Self-Heating Rate of a Highly Reactive Subbituminous Coal”, Coal Operators Conference, pp. 155-160.
- Beamish B.B., (2005), “Comparison of the R70 self-heating rate of New Zealand and Australian coals to Suggate rank parameter”, International Journal of Coal Geology, Vol. 64, Issues 1-2, pp. 139-144.
- Beamish B.B., Barakat M.A. and George J.D. St., (2001), “Spontaneous combustion propensity of New Zealand coals under adiabatic conditions”, International Journal of Coal Geolog, Vol. 45, Issues 2–3, pp. 217-224.
- Beamish B.B., Lin Z. and Beamish R., (2012), “Investigating the influence of reactive pyrite on coal self-heating”, Coal Operators' Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 294-299.
- Beamish B.B., McLellan P., Endara H., Turunc U., Raab M. and Beamish R., (2013), “Delaying spontaneous combustion of reactive coals through inhibition” Coal Operators Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 221-226.
- Bhatt S and Agarwal P.K, “The effect of moisture condensation on the spontaneous combustibility of coal”, Fuel, Volume 75, Issue 13, 1996, pp 1523-1532.
- Bo-tao Q., Qing-guo S., De-ming W., Lei-lin Z. and Qin X., (2009), “Analysis and key control technologies to prevent spontaneous coal combustion occurring

- at a fully mechanized caving face with large obliquity in deep mines”, *Journal of Mining Science and Technology (China)*, Vol. 19, Issue 4, pp. 446-451.
- Chandra D., Bhattacharya S.K., Ghosh R. and Dasgupta N., (1990), “On evaluation and classification of coal with respect to proneness to spontaneous combustion”, *Q. J. Geol. Min. Metall. Soc. India*, Vol. 55, Issue 3, pp. 130–136.
 - Chandra D., Bhattacharya S.K., Ghosh R. and Dasgupta N., (1990), “On evaluation and classification of coal with respect to proneness to spontaneous combustion”, *Q. J. Geol. Min. Metall. Soc. India*, Vol. 55, Issue 3, pp. 130–136.
 - Gangopadhyay P.K., (2008), Ph.D. thesis, “Coalfire related CO₂ emissions and remote sensing”, The Netherlands, University of Utrecht, pp. 176, ISBN 978-90-6164-267-1.
 - Ghosh R., (1986), “Spontaneous combustion of certain Indian coals- some physico-chemical considerations”, *Fuel*, Vol. 65, Issue 8, pp. 1042-1046.
 - Glenn B.S., Prakash A., V.Sokol E., (2015), “Spontaneous Combustion in open-cut mines: Australian Experience and Research”, *Coal and Peat fires: A Global Perspective*, Australia. doi:10.1016/B978-0-444-59509-6.00001-6
 - Greb S.F., Eble C.F., Peters D.C. and Papp A.R., (2006), “COAL and the Environment”, American Geological Institute In cooperation with Illinois Basin Consortium U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory Office of Surface Mining, ISBN: 0-922152-77-2.
 - Grewer T., (1994), “Thermal hazards of chemical reaction”, Vol. 4, *Industrial Safety Series*, Elsevier Press, Amsterdam, pp. 444.
 - Ham B., (2005), “A Review of Spontaneous Combustion Incidents”, *Coal Operators' Conference*, University of Wollongong, Australia, pp. 237-242.
 - Hooman K, Maas U. (2014). “Theoretical analysis of coal stockpile self-heating”. *Fire Safety Journal*, pp:107–112. doi.org/10.1016/j.firesaf. 05.011.
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Coal_seam_fire
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Burning_Mountain
 - John N. Carras, Stuart J. Day, Abou Saghafi, David J. Williams. (2009). “Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia”. *International Journal of Coal Geology*. doi:10.1016/j.coal.2008.12.001.
 - Jones JC, (2001), “On the extrapolation of results from oven heating tests for propensity to self-heating”, *Combustion and Flame*, Vol. 124, No. 1-2, pp. 334-336, ISSN 0010-2180.
 - Jones JC, (2001), “On the extrapolation of results from oven heating tests for propensity to self-heating”, *Combustion and Flame*, Vol. 124, No. 1-2, pp. 334-336, ISSN 0010-2180.
 - Kaymakci E. and Didari V., (2002), “Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters”, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, Vol. 26, pp. 59-64.
 - Kucuk A., Kadioglu Y. and Gulaboglu M.S., (2003), “A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air”, *Combustion and Flame*, Vol. 133, Issue 3, pp. 255-261.
 - Mahadevan, V., and Ramlu, M.A., 1985, Fire risk rating of coal mines due to spontaneous heating: *Journal of Mines, Metals and Fuels*, v. 8, p. 357–362.

- MDG 1006, (2011), “Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline”, Produced by Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW.
- Meng J., (2015), “Reliability Analysis of Ventilation System Based on Fuzzy Fault Tree”, *Advanced Materials Research*, Vols. 634-638, pp. 3670-3677.
- Michaylov M., (2002), “Expert system for assessment of risk from spontaneous combustion”, *Mining and Mineral Processing*, Vol. 44-45, Part 2, pp. 27-35.
- Mitchell D.W., (1990), “MINE FIRES Prevention, Detection, Fighting”, United States of America: Maclean Hunter Publishing Company, pp. 167, ISBN 0-92531-10-8.
- Mohalik N.K., Panigrahi D.C. and Singh V.K., (2009), “Application of thermal analysis techniques to assess proneness of coal to spontaneous heating”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 98, Issue 2, pp. 507-519, doi: 10.1007/s10973-009-0305-z.
- Mohalik, N.K. and Lester, Edward and Lowndes, Ian (2016), Review of experimental methods to determine spontaneous combustion susceptibility of coal – Indian context. *International Journal of Mining, Reclamation*.
- Morris R. and Atkinson T., (1988), “Seam Factor and The Spontaneous Heating of Coal”, *Mining Science and Technology*, Vol. 7, pp. 149-159.
- NANDA A., (2010), “CORRELATION ANALYSIS OF SPONTANEOUS HEATING OF SOME SECL COALS”. Bachelor thesis, National Institute of Technology Rourkela.
- Nelson M.I. and Chen X.D., (2007), “Survey of experimental work on the self-heating and spontaneous combustion of coal”, *The Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, Vol. 18, pp. 31-83, doi: 1130/2007.4118(04).
- Nimaje, D.S. and Tripathy, D.P., (2016), “Characterization of some Indian coals to assess their liability to spontaneous combustion”. *Fuel*, 163, pp. 139-147.
- Ramlu M.A., (1985), “Mine Disasters and Mine Rescue”, 2nd edition, chapter-1, “mine fires”, Hyderabad: Universities Press, pp. 2-15, ISBN: 9788173715730.
- Ramlu M.A., (2007), “Mine Disasters and Mine Rescue”, 2nd edition, chapter-1, “mine fires”, Hyderabad: Universities Press, pp. 2-15, ISBN: 9788173715730.
- Ren T., Wang Z., Nemcik J., Aziz N., and Wu J., (2012), “Investigation of Spontaneous Heating Zones and Proactive Inertisation of Longwall Goaf in Fenghuangshan Mine”, *Coal Operators' Conference*, University of Wollongong, Australia, pp. 212-220.
- Ren T.X., Balusu R. and Humphries P., (2005), “Development of Innovative Goaf Inertisation Practices to Improve Coal Mine Safety”, *Coal Operators' Conference*, University of Wollongong, Australia, pp.315-322.
- Ren T.X., Edwards J.S. and Clarke D., (1999), “Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous combustion”, *Fuel*, Vol 78, Issue 14, pp. 1611-1620.
- Ren, W.X, Wu, B.W., (2009), “Study on The Fire Prevention Technology of High gassy and Easy Spontaneous Combustion Super Large Underhand Working Face”, *Journal of Mining & Safety Engineering*, Chinese, pp. 198-202.

- 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.
- 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.
- Singh A.K., Singh R.V.K., Singh M.P., Chandra H. and Shukla N.K., (2007), “Mine fire gas indices and their application to Indian underground coal mine fires”, International Journal of Coal Geology, Vol. 69, Issue 3, pp. 192-204.
- Singh R., (2013), “Spontaneous heating and fire in coal mines”, Procedia Engineering, pp 78-90.
- Singh R.N., Shonhardt J.A. and Terezopoulos N., (2002), “A new dimension to studies of spontaneous combustion of coal”, Mineral Resources Engineering, Vol. 11, Issue 2, pp. 147-163, doi: 10.1142/S0950609802000938.
- Singh, R.P., Ray, S.K., Singh, A.K., Varma, N.K., Sahay, N., (2004), “Studies on spontaneous heating behaviour of coal”, Journal of Mines, Metals and Fuels (5-6), pp. 105-109
- Sipila J., Auerkari P., Heikkila A.M., Tuominen R., Vela I., Itkonen J., Rinne M. and Aaltonen K., (2012), “Risk and mitigation of self-heating and spontaneous combustion in underground coal storage”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 25, Issue 3, pp 617-622.
- Sipila J., Auerkari P., Heikkila A.M., Tuominen R., Vela I., Itkonen J., Rinne M. and Aaltonen K., (2012), “Risk and mitigation of self-heating and spontaneous combustion in underground coal storage”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 25, Issue 3, pp 617-622.
- Stach, E., (1982), “Coal Petrology”, vol. 3, by Gebruder Borntraeger, Berlin, p. 471
- Sujanti W. and Zhang D-K., (1999), “A laboratory study of spontaneous combustion of coal: the influence of inorganic matter and reactor size”, Fuel, Vol. 78, Issue 5, pp 549-556.
- Tarafadar and Guha, (1989), “Application of wet oxidation processes for the assessment of the spontaneous heating of coal”, Fuel Vol 68, pp 315 – 317.
- Todes D., (1936), “Acta physicochim”, URSS, Vol. 5, pp. 785.
- Van Krevelen, D.W. (1961). Coal. Elsevier, Amsterdam.
- Voigta S, Tetzlaff A, Zhang JZ, et al. (2004), "Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China," International Journal of Coal Geology, 59, 121– 136.
- Walters A.D., (1996), “Joseph Conrad and the spontaneous combustion of coal—part 1”, coal preparation, Amsterdam B.V., Published in The Netherlands under license by Gordon and Breach Science Publishers, Vol. 17, Issue 3-4, pp. 147-166.
- Wang G, Yan G, Zhang X, Du W, Huang Q, Sun L, Zhang X. (2016). “Research and development of foamed gel for controlling the spontaneous combustion of coal in coal mine”. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.10.013

- Wang-xing. R, Zeng-hui. K, De-ming,(2011), Causes of Spontaneous Combustion of Coal and Its Prevention Technology in the Tunnel Fall of Ground of Extra-thick Coal Seam, First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering, pp. 717-724.
- Wei Lu, Ying-Jiazi Cao, Jerry C. Tien. (2017). " Method for prevention and control of spontaneous combustion of coal seam and its application in mining field". International Journal of Mining Science and Technology. doi:10.1016/j.ijmst.2017.07.018.
- Wu D, Norman F, Vanierschot M, Verplaetsen F. (2018), "Self-heating characteristics of coal dust deposits by a hot gas flow in oxy-fuel atmospheres". Doi:10.1016/j.applthermaleng.11.144.
- www.coal.kr.ir
- Xie J., Xue S., Cheng W., Wang G., (2011), "Early detection of spontaneous combustion of coal in underground coal mines with development of an ethylene enriching system", International Journal of Coal Geology, pp 123-12.
- Yuan L. and Smith A.C., (2012), "The effect of ventilation on spontaneous heating of coal", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 25, pp. 131-137.
- Zhanli Mao, Hongya Zhu, Xuejuan Zhao, Jinhua Sun, Qingsong Wang. (2013), "Experimental study on characteristic parameters of coal spontaneous combustion". Procedia Engineering 62, 1081 – 1. doi: 10.1016/j.proeng. 08.164.

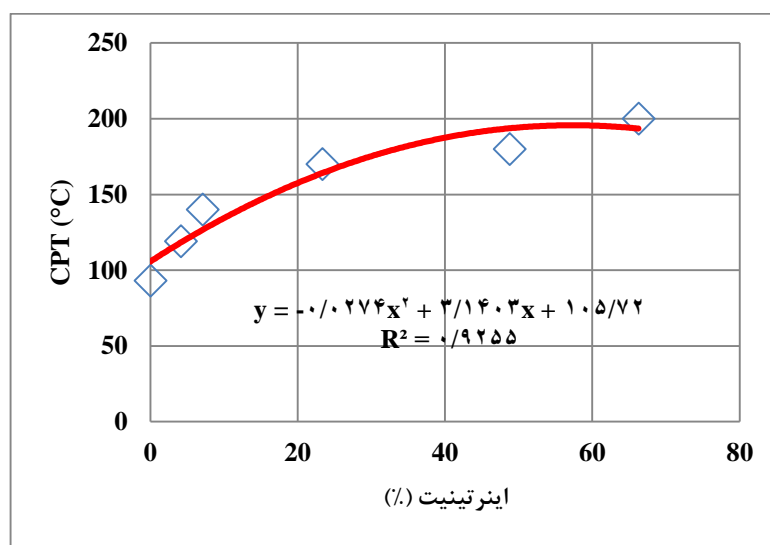
جدول الف: نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای حاصل شده از دستگاه

Time (min)	Oven (°C)	Sample 42	Sample 43	Sample 44	Sample 45	Sample 46	Sample 47
0	50	43/222	45/003	44/459	45/200	34/687	45/179
1	51	43/428	45/257	44/751	45/465	34/721	45/565
2	52	43/643	45/543	45/079	45/750	34/773	45/803
3	53	43/861	45/818	45/533	46/033	34/834	45/931
4	54	44/081	46/092	45/825	46/324	34/892	46/068
5	55	44/322	46/395	46/136	46/639	35/003	46/247
6	56	44/576	46/707	46/528	46/968	35/125	46/395
7	57	44/840	47/007	46/833	47/299	35/310	46/440
8	58	45/139	47/381	47/199	47/680	35/531	46/690
9	59	45/417	47/753	47/602	48/058	35/858	46/993
10	60	45/734	48/142	47/897	48/431	36/200	47/222
11	61	46/060	48/545	48/198	48/817	36/662	47/471
12	62	46/391	48/963	48/647	49/245	37/179	47/766
13	63	46/755	49/429	49/017	49/674	37/771	48/182
14	64	47/119	49/994	49/534	50/149	38/477	49/030
15	65	47/515	50/451	50/105	50/596	39/236	49/553
16	66	47/905	50/918	50/485	51/043	40/105	50/132
17	67	48/315	51/401	50/927	51/509	41/083	51/064
18	68	48/742	51/905	51/642	51/998	42/125	51/729
19	69	49/171	52/405	52/123	52/481	43/340	52/617
20	70	49/625	52/983	52/668	53/012	44/643	53/609
21	71	50/103	53/529	53/228	53/541	46/014	54/762
22	72	50/583	54/068	53/890	54/072	47/516	55/516
23	73	51/075	54/610	54/534	54/609	49/157	56/181
24	74	51/592	55/198	55/030	55/181	50/891	57/412
25	75	52/138	55/778	55/748	55/756	52/758	58/160
26	76	52/696	56/367	56/402	56/344	54/700	58/830
27	77	53/305	56/992	57/259	56/968	56/784	60/050
28	78	53/941	57/599	58/025	57/593	58/997	60/701
29	79	54/572	58/179	58/779	58/211	60/245	61/924
30	80	55/253	58/829	59/567	58/874	62/593	62/633
31	81	55/954	59/506	60/375	59/560	64/039	63/520
32	82	56/705	60/229	61/118	60/280	66/526	64/390
33	83	57/430	60/960	61/844	60/997	68/305	65/412
34	84	58/241	61/696	62/725	61/752	70/129	66/660
35	85	59/006	62/407	63/568	62/473	72/245	67/344
36	86	59/813	63/159	64/411	63/231	74/654	68/331
37	87	60/656	63/902	65/436	63/998	76/935	69/496
38	88	61/486	64/654	66/353	64/766	78/635	70/256
39	89	62/341	65/441	67/170	65/556	81/625	71/169
40	90	63/193	66/257	68/016	66/359	84/218	72/138
41	91	64/048	67/038	68/788	67/147	87/902	72/959
42	92	64/920	67/873	69/726	67/969	90/215	74/349
43	93	65/790	68/677	70/650	68/776	93/214	75/087

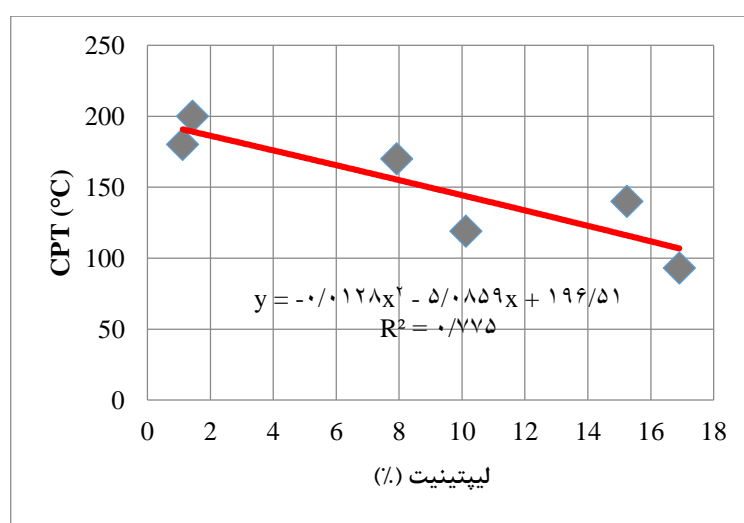
44	94	66/657	69/554	71/763	69/611	100/123	76/491
45	95	67/524	70/335	72/838	70/412	110/458	77/740
46	96	68/384	71/110	73/928	71/204	125/654	78/353
47	97	69/241	71/985	74/814	72/037		79/650
48	98	70/088	72/847	75/616	72/866		80/522
49	99	70/935	73/697	76/454	73/689		81/519
50	100	71/767	74/560	77/192	74/514		82/840
51	101	72/607	75/408	78/024	75/333		84/228
52	102	73/448	76/250	78/856	76/159		85/376
53	103	74/296	76/966	79/688	76/926		87/024
54	104	75/136	77/617	80/553	77/665		88/141
55	105	75/960	78/461	81/399	78/484		89/556
56	106	76/774	79/387	82/185	79/336		90/763
57	107	77/597	80/256	83/191	80/164		91/764
58	108	78/417	81/106	84/186	80/986		93/248
59	109	79/242	82/061	85/185	81/856		94/366
60	110	80/041	82/949	86/368	82/689		95/701
61	111	80/875	83/884	87/561	83/553		96/775
62	112	81/705	84/777	88/709	84/399		98/771
63	113	82/505	85/715	90/376	85/251		100/595
64	114	83/312	86/511	91/736	86/053		104/675
65	115	84/133	87/330	92/686	86/863		107/045
66	116	84/927	88/124	94/068	87/662		109/620
67	117	85/746	88/907	95/523	88/458		111/400
68	118	86/534	89/917	96/412	89/344		115/254
69	119	87/365	90/875	97/075	90/225		119/295
70	120	88/178	91/499	98/600	90/954		126/390
71	121	88/998	92/633	99/857	91/909		131/835
72	122	89/810	93/379	100/528	92/691		137/845
73	123	90/593	94/205	101/520	93/495		145/989
74	124	91/438	95/260	102/558	94/424		155/067
75	125	92/231	95/996	103/722	95/201		163/050
76	126	93/058	96/745	104/949	95/996		174/773
77	127	93/883	97/768	106/500	96/905		
78	128	94/688	98/651	107/756	97/744		
79	129	95/529	99/617	109/475	98/640		
80	130	96/334	100/408	110/758	99/445		
81	131	97/164	101/272	113/220	100/292		
82	132	97/999	102/125	115/010	101/138		
83	133	98/792	102/944	117/196	101/952		
84	134	99/603	103/777	119/008	102/795		
85	135	100/422	104/721	121/399	103/678		
86	136	101/246	105/677	124/604	104/566		
87	137	102/050	106/615	127/819	105/436		
88	138	102/873	107/428	131/404	106/266		
89	139	103/698	108/289	135/803	107/118		
90	140	104/525	109/099	140/322	107/946		
91	141	105/331	110/660	144/655	109/085		
92	142	106/153	112/066	149/786	110/202		
93	143	106/988	113/166	156/395	111/174		
94	144	108/092	114/457	166/954	112/483		

95	145	108/929	115/607	170/985	113/482		
96	146	109/779	116/795		114/495		
97	147	110/613	117/996		115/502		
98	148	111/477	119/290		116/560		
99	149	112/333	120/535		117/598		
100	150	113/187	121/806		118/660		
101	151	114/269	123/235		119/996		
102	152	115/605	124/831		121/659		
103	153	116/680	126/314		123/039		
104	154	117/792	127/829		124/438		
105	155	118/907	129/341		125/854		
106	156	119/807	130/753		127/004		
107	157	120/700	132/173		128/146		
108	158	121/617	133/603		129/362		
109	159	122/517	134/979		130/577		
110	160	123/703	136/845		132/199		
111	161	124/630	138/867		133/610		
112	162	125/825	141/359		135/506		
113	163	127/050	144/317		137/321		
114	164	128/015	147/100		139/264		
115	165	129/268	149/786		140/971		
116	166	130/483	152/972		142/902		
117	167	131/550	156/395		144/578		
118	168	132/780	161/627		146/447		
119	169	133/558	166/954		148/325		
120	170	134/625	170/985		149/908		
121	171	135/983	177/040		152/429		
122	172	137/328	181/794		154/393		
123	173	138/188	188/319		156/329		
124	174	139/518	196/196		159/616		
125	175	140/903	202/149		163/197		
126	176	141/523			166/152		
127	177	142/025			169/416		
128	178	143/165			172/552		
129	179	144/563			175/175		
130	180	145/500			180/600		
131	181	146/953			193/091		
132	182	147/625			198/640		
133	183	148/435			203/820		
134	184	150/178			208/280		
135	185	151/965			213/980		
136	186	153/260			221/530		
137	187	155/468			229/270		
138	188	158/893					
139	189	161/445					
140	190	164/923					
141	191	167/263					
142	192	171/603					
143	193	174/903					
144	194	180/193					
145	195	186/383					

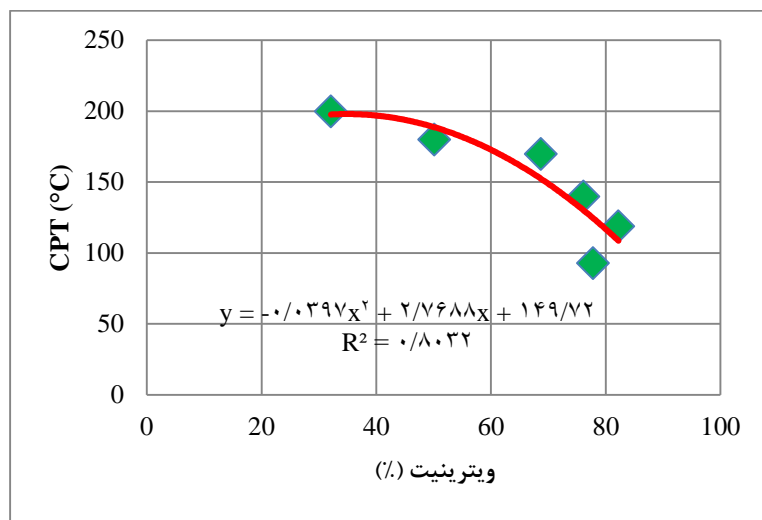
146	196	189/033					
147	197	192/345					
148	198	194/903					
149	199	198/183					
150	200	200/975					
151	201	205/585					
152	202	209/710					
153	203	214/815					
154	204	221/370					
155	205	228/135					



شکل الف: نمودار رابطه بین ماسرال اینرتینیت و CPT



شکل ب: نمودار ارتباط بین ماسرال لیپیتینیت و CPT



شکل ت: نمودار ارتباط بین ماسرال ویترینیت و CPT

Abstract

Coal is one of the most important sources of fossil fuels used in steel and electric power plants. One of the most serious hazards in coal mining is the hazard of coal self-heating. The coal self-heating depends on a variety of factors, among which the most important are the intrinsic parameters of coal. The purpose of this study was to investigate the effect of coal's intrinsic characteristics on the coal self-heating in A number of Kerman coal mines are in Iran. For this purpose, coal samples were collected from 6 Kerman's coal mines (Hoshuni, Pabdana Main, Asad Abad zirzamini, Hejdak, hamkar and Galetot) and characteristics of coal samples. In this study, in order to determine the rate of coal self-heating tendency for different coals, according to the intrinsic properties of coal, an crossing point temperature(CPT) test was used. CPT values were obtained for different samples, and the relationship between the intrinsic characteristics of coal and CPT values was determined. The results showed that the Asadabad zirzamini and Galetot mines have high spontaneous combustion potential. These results also showed that increasing the amount of moisture, pyrite, vitrinite and lipitinit would increase the inclination to spontaneous combustion in these mines.

Key words: Coal self-heating, intrinsic parameters, crossing



Shahrood university of technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Investigating the effect of Intrinsic Factors on coal
spontaneous combustion (Case Study: Kerman Coal Mines)**

Bahman Malekraeisi

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Mohammad Ataei

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of
Master of Science (M.Sc.) In Exploitation Mining Engineering

July 2019

