

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تأثیر عوامل ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ

(مطالعه موردی: معادن زغال سنگ البرز مرکزی)

دانشجو

یاسین مرتضی نژاد

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطایی

بهمن ۱۳۹۷



شماره: ۶۸۷۴۰۵۱  
تاریخ: ۹۷/۱۲/۱۸

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 خانم / آقای یاسین مرتضی نژاد با شماره دانشجویی ۹۵۳۳۶۲۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان بررسی تأثیر پیریت بر خودسوزی زغال سنگ در معادن زغال سنگ زیرزمینی (مطالعه موردی: معادن زغال سنگ البرز مرکزی) که در تاریخ ۹۷/۱۱/۰۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ...): <input checked="" type="checkbox"/> مردود <input type="checkbox"/>			
نوع تحقیق: نظری <input checked="" type="checkbox"/> عملی <input type="checkbox"/>			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	فرهنگ سرشکی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	محمد عطایی	استاد	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	مهدی نوروزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	محمد کارآموزیان	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	حمید آقاجانی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد عطایی



تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:  
تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در صورت امکان) تحصیلات تکمیلی (توانا) از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به :

استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سپزترین نگاه زندگیم، چشمان سپز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه پکوشتم قطره ای از دریای پی کران

مهربانیتان را سپاس نتوانم پگویم.





سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

«قُمْ عَنْ مَجْلِسِكَ لِأَيْبِكَ وَ مُعَلِّمِكَ وَ إِنْ كُنْتَ أَمِيرًا»

به احترام پدر و معلّم از جای برخیز، گرچه فرمان روا باشی

امام علی (ع) (عُدد الحکم، ص ۱۳۶)

نمی توانم معنایی بالاتر از تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطایی آشکار نمایم، که هر چه گویم و سراپیم، کم گفته ام و همچنین تشکر فراوان از آقای مهندس امیر صفاری که مرا صمیمانه در انجام این پایان نامه یاری دادند.



## تهدنامه

اینجانب **یا سین مرتضی نژاد**، 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 معاد زغال سنگ البرز مرکزی)**"، تحت راهنمایی **دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطایی** متعهد می‌شوم:

- 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 به دست 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.

یاسین مرتضی نژاد

بهمن‌ماه ۱۳۹۷

### 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

آتش‌سوزی، از جمله حوادث زیان‌باری است که هم در معادن زیرزمینی و هم در معادن روباز اتفاق می‌افتد، اما اگر آتش‌سوزی در حضور گاز متان رخ دهد خطر انفجار افزایش می‌یابد. خودسوزی زغال‌سنگ یک فرآیند خود گرمایشی، گرمازا است که باعث اثرات مخرب زیست محیطی و اقتصادی می‌شود. پارامترهای ذاتی به عنوان اصلی‌ترین پارامترها نقش اساسی در خودسوزی زغال‌سنگ دارند. در این پژوهش ابتدا پدیده اکسیداسیون زغال‌سنگ تعریف شده و در ادامه مکانیزم خودسوزی و روش‌های تشخیص آن مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با توجه به مزیت‌های روش‌های آزمایشگاهی از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT) برای بررسی تأثیر پارامترهای ذاتی بر قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ در معادن زغال‌سنگ البرز مرکزی استفاده شد. به طور کلی تأثیر عوامل ذاتی بر خودسوزی بایستی به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد، زیرا هر یک از عوامل ذاتی تأثیر متفاوت بر خودسوزی زغال‌سنگ دارد. به طور کلی با افزایش درصد پیریت، رطوبت، ماسرال لیپتینیت و ویتترینیت خودسوزی افزایش یافته و با افزایش درصد کربن و اینترتینیت خودسوزی کاهش می‌یابد. بیش‌ترین تمایل به خودسوزی برای نمونه متعلق به معدن ماهان ثبت شد؛ همچنین کم‌ترین تمایل به خودسوزی در نمونه متعلق به معدن اروست شرقی ثبت شد. به طور کلی تمایل به خودسوزی زغال‌سنگ در معادن البرز مرکزی در سطح متوسط و کم است.

**واژه‌های کلیدی:** خودسوزی زغال‌سنگ، دمای نقطه تقاطعی (CPT)، عوامل ذاتی



مقالات مستخرج شده

مقالات کنفراسی چاپ شده

مرتضی نژاد ی، سرشکی ف، عطایی م، صفاری ا، (۱۳۹۷) "بررسی تأثیر پارامتر پیریت محتوی بر خودسوزی زغال سنگ با استفاده از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT)", اولین کنفرانس ملی معدنکاری و صنایع معدنی سبز ایران، دانشگاه زنجان





## فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات تحقیق.....
۲	۱-۱- مقدمه.....
۳	۲-۱- تعریف زغال سنگ.....
۳	۳-۱- منابع زغال سنگ جهان.....
۵	۴-۱- منابع و ذخایر زغال سنگ ایران.....
۷	۵-۱- بیان مسئله.....
۷	۶-۱- ضرورت تحقیق.....
۹	۷-۱- اهداف تحقیق.....
۹	۸-۱- روش انجام تحقیق.....
۹	۹-۱- سازماندهی پایان نامه.....
۱۱	فصل ۲: بررسی مکانیزم و پارامترهای موثر بر خودسوزی زغال سنگ.....
۱۲	۱-۲- مقدمه.....
۱۳	۲-۲- انواع آتش سوزی.....
۱۴	۳-۲- آتش سوزی داخلی یا خودسوزی.....
۱۴	۴-۲- مکانیزم خودسوزی زغال سنگ.....
۱۷	۵-۲- پارامترهای موثر بر خودسوزی زغال سنگ.....
۱۹	۲-۵-۱- عوامل ذاتی.....
۱۹	۲-۵-۱-۱- پیریت محتوی.....
۲۰	۲-۵-۱-۲- رطوبت محتوی.....
۲۱	۲-۵-۱-۳- خاکستر محتوی.....
۲۱	۲-۵-۱-۴- گاز خیزی.....
۲۲	۲-۵-۱-۵- ترکیب سنگ شناسی.....
۲۲	۲-۵-۱-۶- درجه زغال شدگی.....
۲۳	۲-۵-۱-۷- درصد مواد فرار.....



۲۴	..... عوامل زمین‌شناسی
۲۴	..... ۱-۲-۵-۲ ضخامت لایه
۲۴	..... ۲-۲-۵-۲ عمق لایه
۲۴	..... ۳-۲-۵-۲ شیب لایه
۲۴	..... ۴-۲-۵-۲ استخراج چند لایه‌ای
۲۵	..... ۵-۲-۵-۲ وجود دایک و گسل
۲۵	..... ۳-۵-۲ عوامل معدنکاری
۲۵	..... ۱-۳-۵-۲ روش استخراج
۲۶	..... ۲-۳-۵-۲ نرخ استخراج (سرعت استخراج)
۲۶	..... ۳-۳-۵-۲ جهت پیشروی
۲۷	..... ۴-۳-۵-۲ تهویه
۲۷	..... ۵-۳-۵-۲ ضریب استخراج
۲۷	..... ۶-۲ تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ
۲۹	..... ۷-۲ روش‌های پیش‌گیری از خودسوزی
۲۹	..... ۱-۷-۲ خنثی‌سازی با استفاده از نیتروژن
۳۰	..... ۲-۷-۲ فوم سه‌فازی
۳۲	..... ۸-۲ نتیجه‌گیری
۳۳	..... فصل ۳ پیشینه تحقیق و روش‌های بررسی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ
۳۴	..... ۱-۳ مقدمه
۳۴	..... ۲-۳ بررسی پیشینه تحقیق
۴۱	..... ۳-۳ روش‌های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ
۴۱	..... ۱-۳-۳ روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ
۴۳	..... ۱-۱-۳-۳ روش‌های آنالیز حرارتی
۴۳	..... الف- روش دمای نقطه تقاطعی (CPT)
۴۴	..... ب- آنالیز حرارت تفاضلی (DTA)
۴۵	..... پ- کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC)



۴۶	ت- آنالیز گرماسنجی ثقلی (TGA).....
۴۷	ج- روش نرخ گرمایش خودبه خودی R70 .....
۴۸	د- روش اولپینسکی .....
۵۰	ز- دمای پوف .....
۵۰	ن- روش سبد گرمایشی .....
۵۱	و- روش انفجار هوای بحرانی .....
۵۲	ی- روش دمای اشتعال .....
۵۲	۳-۳-۱-۲- روش های بیوشیمی .....
۵۲	الف- روش پتانسیل اکسیداسیون رطوبت (wop).....
۵۳	ب- روش روسی .....
۵۳	۳-۳-۱-۳- تعیین ترکیبات شیمیایی .....
۵۳	الف- آنالیز تقریبی و قطعی .....
۵۴	۳-۳-۲- روش های سیستمی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ .....
۵۵	۳-۳-۳- روش سنجش از دور .....
۵۸	۳-۴- جمع بندی .....
۵۹	<b>فصل ۴ : روش کار و نتایج آزمایش ها</b> .....
۶۰	۴-۱- مقدمه .....
۶۰	۴-۲- حوزه زغال سنگ البرز مرکزی .....
۶۱	۴-۲-۱- مطالعه موردی .....
۶۳	۴-۳- آماده سازی نمونه ها .....
۶۴	۴-۴- آنالیز تقریبی .....
۶۴	۴-۴-۱- تست رطوبت .....
۶۶	۴-۴-۲- تست خاکستر .....
۶۷	۴-۴-۳- تست مواد فرار .....
۶۹	۴-۵- تعیین نوع ماسرال ها .....
۷۲	۴-۶- تعیین درصد پیریت .....



۷۳.....	۴-۷- تست دمای نقطه تقاطعی .....
۷۵.....	۴-۷-۱- نتایج تست‌های دمای نقطه تقاطعی .....
۸۲.....	۴-۸- تاثیر ماسرال‌ها بر خودسوزی زغال‌سنگ .....
۸۴.....	۴-۹- تاثیر خاکستر، مواد فرار، کربن، رطوبت و پیریت بر خودسوزی .....
۹۲.....	۴-۱۱- جمع‌بندی .....
۹۱.....	<b>فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات .....</b>
۹۲.....	۵-۱- نتیجه‌گیری .....
۹۳.....	۵-۲- پیشنهادات .....
۹۵.....	منابع .....
۱۰۱.....	پیوست .....





## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نقشه پراکندگی زغال سنگ در مناطق مختلف جهان ..... ۴
- شکل ۱-۲: نمودار سهم زغال سنگ از انرژی‌های مصرفی در سال ۲۰۱۴ ..... ۵
- شکل ۱-۳: سهم ایران از تولید جهانی زغال سنگ در سال ۲۰۱۴ ..... ۶
- شکل ۱-۲: پراکندگی آتش‌سوزی‌های زغال سنگ در جهان ..... ۱۳
- شکل ۲-۲: انواع آتش‌سوزی ..... ۱۳
- شکل ۲-۳: فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ ..... ۱۵
- شکل ۲-۴: مراحل خودسوزی زغال سنگ ..... ۱۶
- شکل ۲-۵: عوامل موثر بر خودسوزی زغال سنگ ..... ۱۸
- شکل ۲-۶: ارتباط بین پیریت محتوی و زمان رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ..... ۲۰
- شکل ۲-۷: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و تمایل خودسوزی زغال سنگ ..... ۲۱
- شکل ۲-۸: روند تشکیل زغال سنگ ..... ۲۳
- شکل ۲-۹: نمونه‌ای از تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال سنگ ..... ۲۹
- شکل ۲-۱۰: تصویر فوم سه فازی تولید شده ..... ۳۱
- شکل ۲-۱۱: پروسه حمل و نقل و تزریق فوم سه فازی ..... ۳۱
- شکل ۳-۱: روش‌های آزمایشگاهی بررسی پتانسیل خودسوزی ..... ۴۲
- شکل ۳-۲: نمودار تعیین درجه حرارت در روش نقطه تقاطع ..... ۴۳
- شکل ۳-۳: مراحل مختلف DTA ..... ۴۵
- شکل ۳-۴: نمونه منحنی TGA ..... ۴۷
- شکل ۳-۵: نمودار نرخ گرمایش خودبه خودی R70 ..... ۴۸
- شکل ۳-۶: نمودار دما زمان روش اولپینسکی ..... ۴۹
- شکل ۳-۷: روش آشکار سازی اکسیداسیون زغالسنگ به کمک روش دورسنجی ..... ۵۶
- شکل ۳-۸: تصویر دوربین حرارتی که مناطق دارای دمای پس زمینه آبی رنگ است. رنگهای سفید، قرمز، زرد مناطقی را که گازهای CO<sub>2</sub> و CO تولید شده را نشان می‌دهند ..... ۵۷
- شکل ۴-۱: حوزه زغال سنگ البرز مرکزی ..... ۶۱
- شکل ۴-۲: جانمایی معادن نمونه‌برداری شده زغال سنگ البرز مرکزی ..... ۶۱



- شکل ۳-۴: سنگ شکن فکی آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود ..... ۶۳
- شکل ۴-۴: مرحله آسیاب گلوله‌ای ..... ۶۳
- شکل ۶-۴: سرند ذرات زغال سنگ با مش ۷۰ ..... ۶۴
- شکل ۷-۴: مرحله انجام تست خاکستر ..... ۶۶
- شکل ۸-۴: ماسرال ویتروپیت در نمونه زغال سنگ البرز مرکزی ..... ۷۰
- شکل ۹-۴: ماسرال اینرتینیت در نمونه زغال سنگ البرز مرکزی ..... ۷۰
- شکل ۱۰-۴: ماسرال لیپتینیت در نمونه زغال سنگ البرز مرکزی ..... ۷۱
- شکل ۱۱-۴: عکس تهیه شده از تست مقطع صیقلی حاوی پیریت یکی از نمونه‌ها ..... ۷۲
- شکل ۱۲-۴: نمای کلی از تجهیزات آزمایش ..... ۷۴
- شکل ۱۳-۴: نمونه تست دمای نقطه تقاطعی ..... ۷۵
- شکل ۱۴-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن کیاسر ..... ۷۶
- شکل ۱۵-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن کارسنگ ..... ۷۷
- شکل ۱۶-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن گلیران ..... ۷۷
- شکل ۱۷-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن دنبو ..... ۷۸
- شکل ۱۸-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن کارسنگ ..... ۷۸
- شکل ۱۹-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن اروست شرقی ..... ۷۹
- شکل ۲۰-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن ماهان ..... ۷۹
- شکل ۲۱-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن سنم ..... ۸۰
- شکل ۲۲-۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن بیگ‌سی ..... ۸۰
- شکل ۲۳-۴: نمودار رابطه بین اینرتینیت و CPT ..... ۸۲
- شکل ۲۴-۴: نمودار رابطه بین لیپتینیت و CPT ..... ۸۳
- شکل ۲۵-۴: نمودار رابطه بین ویتروپیت و CPT ..... ۸۳
- شکل ۲۶-۴: نمودار رابطه بین کربن و CPT ..... ۸۵
- شکل ۲۷-۴: نمودار رابطه بین خاکستر و CPT ..... ۸۶
- شکل ۲۸-۴: نمودار رابطه بین مواد فرار و CPT ..... ۸۹
- شکل ۲۹-۴: ارتباط بین میزان رطوبت محتوی و CPT ..... ۸۹



شکل ۴-۳۰: منحنی دما-زمان دو نمونه زغال سنگ با درصد مختلف میزان پیریت محتوی ..... ۸۹

شکل ۴-۳۱: ارتباط بین میزان پیریت محتوی و CPT ..... ۸۹



## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳: پیشینه تحقیقات خودسوزی زغال سنگ ..... ۳۶
- جدول ۲-۳: طبقه‌بندی قابلیت خودسوزی زغال سنگ بر اساس CPT ..... ۴۴
- جدول ۳-۳: رده بندی تمایل خودسوزی زغال سنگ ..... ۴۹
- جدول ۴-۳: رده بندی تمایل خودسوزی زغال سنگ ..... ۵۰
- جدول ۱-۴: شماره نمونه معادن مورد مطالعه ..... ۶۲
- جدول ۲-۴: نتایج اولیه تست رطوبت ..... ۶۵
- جدول ۳-۴: نتایج حاصل از تست خاکستر نمونه‌ها ..... ۶۷
- جدول ۴-۴: نتایج حاصل از تست مواد فرار نمونه‌ها ..... ۶۹
- جدول ۴-۴: درصد پیریت هر نمونه زغال سنگ ..... ۷۳
- جدول ۵-۴: نتایج حاصل از تست‌های دمای نقطع تقاطعی ..... ۷۶
- جدول ۶-۴: خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها ..... ۸۱





## فصل ١ : کلیات تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

زغال سنگ در بین مواد معدنی اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌توان آن را به عنوان منبع اصلی انرژی در بسیاری از نقاط جهان در نظر گرفت به طوری که بعد از نفت، بیشترین سهم را در سبد انرژی جهان دارد و نقش مهمی در اقتصاد کشورها ایفا می‌کند. افزایش روزافزون جمعیت و نیاز جهان صنعتی برای تأمین انرژی و خوراک صنایع به یکی از نگرانی‌های بشر در سال‌های اخیر تبدیل شده است. به همین دلیل، بیشتر کشورهای جهان به اهمیت زغال سنگ در تأمین نیازهای حاضر و آینده‌ی بشر پی برده و پژوهش‌های گسترده‌ای را در این زمینه برای برنامه‌ریزی بلند مدت و چگونگی سرمایه‌گذاری انجام می‌دهند. در سده‌ی حاضر سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گاز نقش مهمی در تأمین انرژی مورد نیاز بشر ایفا می‌کنند. تهی شدن ذخایر نفت و گاز، روند رو به رشد صنایع مختلف و افزایش جمعیت جهان، باعث شده است که بشر دنبال جایگزین مناسب برای نفت و گاز باشد. مزایای متعدد استفاده از زغال سنگ، آن را به عنوان یک حامل انرژی با پتانسیل بالا در کشور مطرح کرده است و عمده مصرف زغال سنگ، برای تولید برق، تأمین انرژی در صنایع و حمل و نقل می‌باشد.

خطرات ناشی از معدنکاری زغال یکی از عوامل محدودکننده طراحی در معادن زیرزمینی محسوب می‌شود از مهم ترین خطرات ناشی از معدنکاری زغال در معادن زیرزمینی می‌توان به نشست سطح زمین<sup>۱</sup>، انفجار خودبه خودی سنگ<sup>۲</sup>، خودسوزی زغال<sup>۳</sup>، گازدهی، آلودگی محیط زیست و غیره اشاره کرد. خودسوزی زغال سنگ یکی از مهم ترین مشکلات در فرآیند تولید زغال سنگ است (عطایی، ۱۳۹۴).

با توجه به مشکلاتی که در نتیجه وقوع خودسوزی ایجاد می‌شود، باید این خطرات به طور دقیق شناسایی و ارزیابی شوند و همچنین با شناخت مکانیزم خودسوزی زغال سنگ، تاثیر پارامترهای ذاتی بر روی خودسوزی

---

<sup>1</sup>-subsidence

<sup>2</sup>- rock burst

<sup>3</sup>-coal spontaneous combustion

زغال سنگ بررسی شود. در این فصل کلیاتی از منابع و ذخایر زغال سنگ، موضوع تحقیق، اهداف تحقیق و ضرورت انجام تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و در آخر به تشریح فعالیت‌های مختلف انجام گرفته در فصل های مختلف پرداخته شده است.

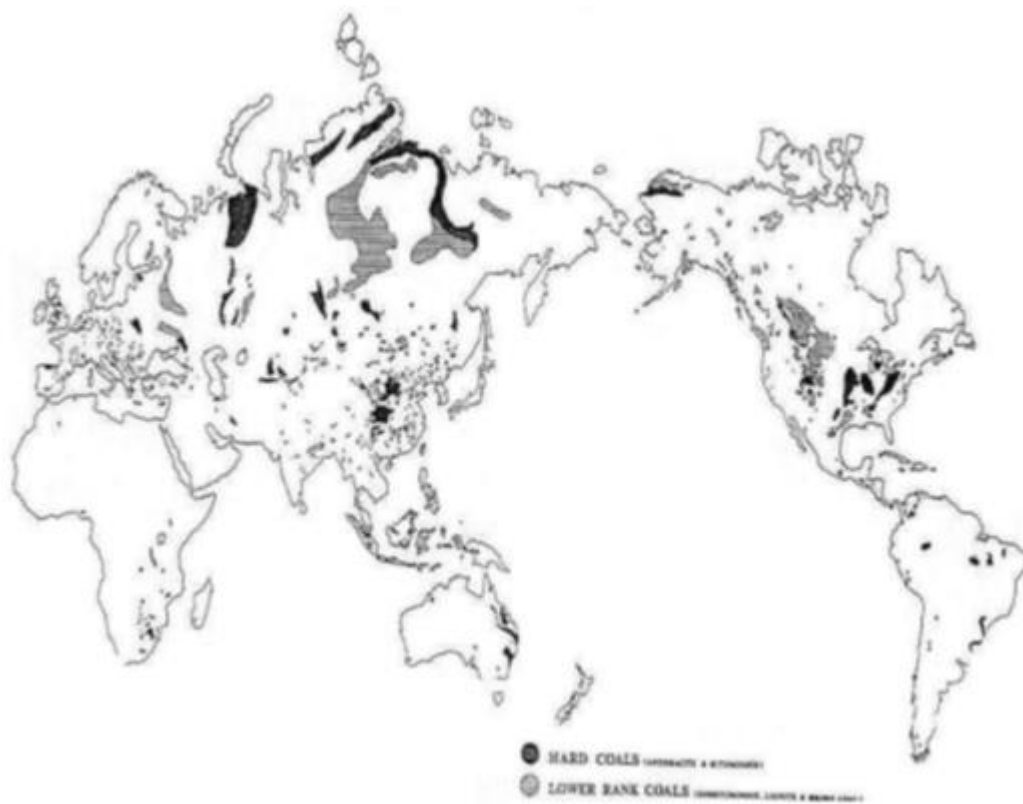
## ۱-۲- تعریف زغال سنگ

زغال سنگ از جمله سوخت‌های فسیلی و کانسارهای رسوبی بیوشیمیایی است که از تجمع و مدفون شدن باقی مانده گیاهان حاصل شده است. زغال سنگ از نظر سنگ‌شناسی، تشکیل شده از ماسرال‌ها و مینرال‌ها و یک ماده قابل احتراق است که رنگ آن از قهوه‌ای تا سیاه تغییر می‌کند. کیفیت زغال سنگ با افزایش درصد کربن و کاهش درصد خاکستر، افزایش می‌یابد.

## ۱-۳- منابع زغال سنگ جهان

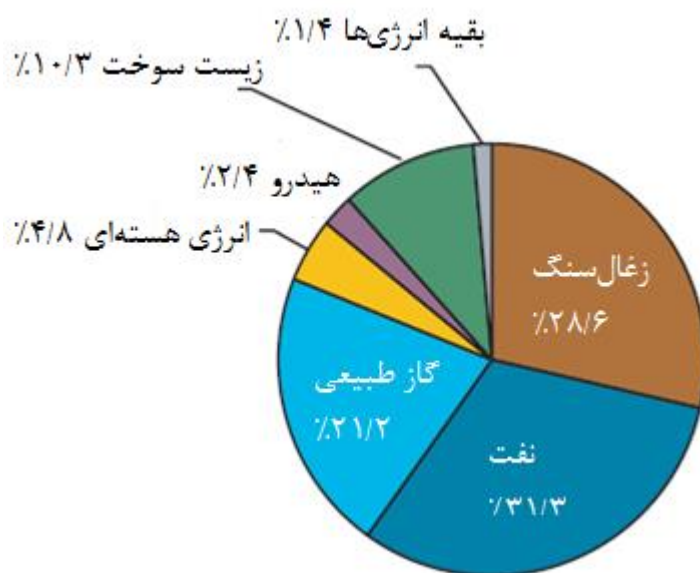
زغال سنگ که زمانی ماده ارزان و بدون جذابیتی شمرده می‌شد، در حال حاضر بزرگ‌ترین رشد مصرف را در بین انواع مواد سوختی جهان دارد. در حالی که زغال سنگ در نقاط مختلف دنیا به وفور یافت می‌شود، دو منبع اصلی دیگر انرژی یعنی نفت و گاز در خاورمیانه و روسیه متمرکز شده است ولی با این حال اگر چه ذخایر زغال سنگ به طور گسترده‌ای در سراسر جهان توزیع شده است، اما همان‌طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده ۶۰٪ از ذخایر زغال سنگ در ۳ کشور ایالات متحده آمریکا (۲۵٪)، روسیه (۲۳٪) و چین (۱۲٪) قرار گرفته و سایر کشورهای استرالیا، هند، آلمان و آفریقای جنوبی در مجموع (۲۹٪) از ذخایر زغال سنگ را در خود جای داده‌اند. براساس برآوردهای انجام شده، با احتساب میزان مصرف در سال ۲۰۰۸، ذخایر نفت جهان تا ۴۱ سال آینده و ذخایر گاز جهان تا ۶۳ سال آینده به اتمام می‌رسد در حالی که کل

ذخایر زغال سنگ در سراسر جهان در حدود ۱۰۸۳ میلیارد تن تخمین زده شده است، که با سطح مصرف فعلی تا ۲۱۰ سال دیگر به پایان می‌رسد (Gangopadhyay, 2008).



شکل ۱-۱: نقشه پراکندگی زغال سنگ در مناطق مختلف جهان (زاده کبیر، ۱۳۹۰)

با توجه به اهمیت موضوع تأمین انرژی برای صنایع مختلف در قرن بیست و یکم، زغال سنگ به عنوان یکی از حامل‌های مهم انرژی بعد از نفت مطرح است. در شکل (۱-۲) سهم زغال سنگ در سال ۲۰۱۴ میلادی در تأمین انرژی جهان نشان داده شده است؛ که نشان می‌دهد زغال سنگ دومین منبع انرژی مصرفی جهان بعد از نفت می‌باشد.



شکل ۱-۲: نمودار سهم زغال سنگ از انرژی‌های مصرفی در سال ۲۰۱۴ (www.iea.org)

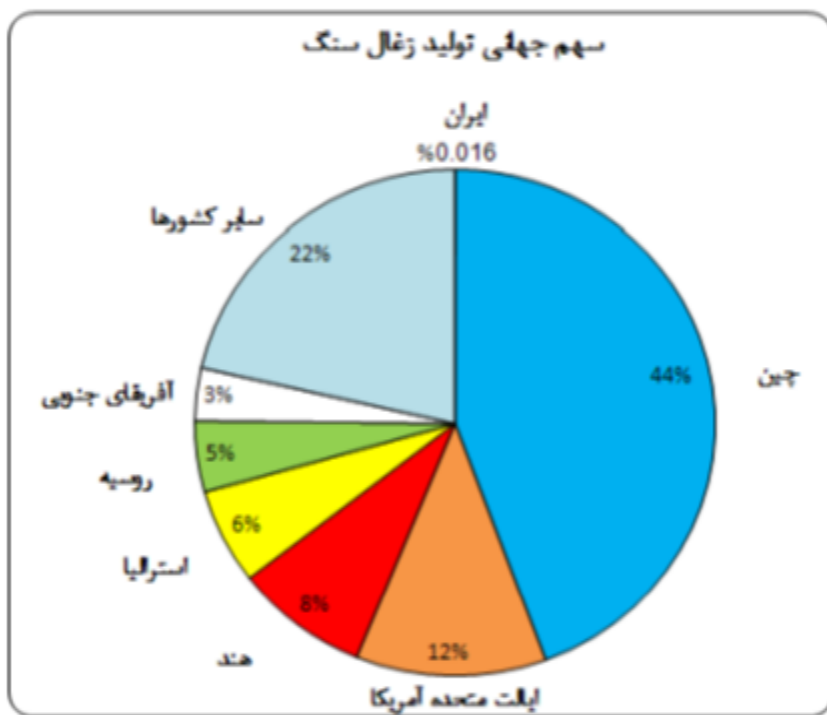
بر اساس آمار و ارقام جهانی کشورهای چین، ایالات متحده آمریکا، هند در صدر تولیدکنندگان و مصرف کنندگان زغال سنگ دنیا قرار دارند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد تا سال ۲۰۲۰ میلادی، سهم زغال سنگ در تولید برق جهان ۳۰ درصد، گاز ۲۰ درصد، هیدرو ۳۰ درصد، انرژی هسته‌ای ۹ درصد، سایر انرژی‌ها ۶ درصد و نفت خام ۴ درصد خواهد بود. بر این اساس زغال سنگ نقش کلیدی در سبد انرژی جهانی خواهد داشت (ملکی و آگاه، ۱۳۹۳).

#### ۱-۴- منابع و ذخایر زغال سنگ ایران

ایران دارای ذخایر قابل توجهی از زغال سنگ کک شو و حرارتی است و بیش‌ترین منابع زغال سنگ کشور در طبس واقع شده و رتبه‌های بعد از آن متعلق به کرمان، البرز شرقی، البرز مرکزی و البرز غربی است. ذخایر قطعی زغال سنگ ایران ۱/۱ میلیارد تن، ذخایر احتمالی ۳ میلیارد تن و میزان ذخایر زمین‌شناسی حدود

۱۴ میلیارد تن می‌باشد که چیزی حدود ۷۲ درصد این ذخایر از نوع کک شو و ۲۸ درصد از نوع زغال سنگ حرارتی است (ملکی و آگاه، ۱۳۹۳).

ایران از نظر میزان ذخایر زغال سنگ در رتبه ۱۲ جهان قرار دارد، اما از لحاظ میزان تولید در رتبه بعد از ۴۰ قرار دارد. همان‌طور که در شکل (۱-۳) مشخص است ایران از نظر حجم تولید نمی‌تواند یکی از کشورهای صادرکننده زغال سنگ باشد و بیشتر زغال سنگ تولیدی ایران در کارخانه ذوب آهن اصفهان مصرف می‌شود و مقداری از خوراک مصرفی کارخانه از خارج کشور تأمین می‌شود. در نتیجه ایران در زمره واردکنندگان زغال سنگ قرار دارد. از طرفی غنی بودن کشور از نظر منابع نفت و گاز سبب شده است که استفاده از سایر منابع انرژی نظیر زغال سنگ کمتر مورد توجه قرار گیرد (ملکی و آگاه، ۱۳۹۳).



شکل ۱-۳: سهم ایران از تولید جهانی زغال سنگ در سال ۲۰۱۴ (احمدی و کریمی، ۱۳۹۵)

## ۱-۵- بیان مسئله

زغال سنگ یک ماده سیاه رنگ و از منابع مهم تولید انرژی است. نیاز روز افزون به انرژی در قرن حاضر بیشتر شده و تقاضا برای زغال سنگ رو به افزایش است. با توجه به کاهش ذخایر سطحی زغال سنگ و افزایش تقاضا، نیاز به استخراج ذخایر زیرزمینی زغال سنگ امری ضروری است.

خودسوزی زغال سنگ یکی از مشکلات مهم در معادن زغال سنگ است. پدیده خودسوزی زغال سنگ یک خطر جدی با نتایج زیان بار اقتصادی و مشکلات ناخواسته در زمینه سلامتی کارکنان است. اکثر آتش سوزی های زغالی در یک ناحیه کوچک بر اثر گرمایش خودبه خودی شروع می شوند و به تدریج ناحیه وسیعی را در بر می گیرند که نتایج آن باعث از دست رفتن میلیون ها تن زغال سنگ، آلودگی های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای سمی، ایجاد نشست در سطح زمین و افزایش دمای معدن 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. به طور کلی عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ را می توان به سه دسته عوامل ذاتی زغال سنگ، عوامل زمین شناسی و عوامل معدنکاری تقسیم کرد. عوامل ذاتی زغال سنگ به دلیل ارتباط با نحوه تشکیل، نقشی اساسی در خودسوزی زغال سنگ ایفا می کنند. بنابراین با توجه به اهمیت مسئله خودسوزی در معادن زغال سنگ و خطرات و پیامدهای ناشی از آن، مطالعه روی خودسوزی در معادن زغال سنگ و تأثیر عوامل ذاتی بر آن امری مهم است.

## ۱-۶- ضرورت تحقیق

معادن زغال سنگ موجود در ایران از نوع معادن زیرزمینی هستند و مخاطرات معادن زیرزمینی زغال سنگ در قیاس با سایر معادن روباز و حتی معادن زیرزمینی فلزی بیشتر است اما با توجه به ارزش بالای ذخایر

معدنی و اهمیت آن‌ها در تأمین نیاز صنایع مختلف، استخراج و بهره برداری از این ذخایر ضروری به نظر می‌رسد.

هر آتش‌سوزی برای وقوع به سه عنصر اصلی اکسیژن، گرما و سوخت نیاز دارد. در پدیده خودسوزی، اکسیژن از هوای تهویه تأمین می‌شود، انرژی گرمایی لازم برای انجام واکنش از طریق فرآیند جذب اکسیژن به زغال‌سنگ تأمین می‌شود و سوخت مورد نظر نیز خود زغال‌سنگ است. خودسوزی ناشی از گرمایش خودبه‌خودی زغال‌سنگ در معادن زغال‌سنگ یکی از مهم‌ترین مشکلات عمده در تمامی کشورهای تولیدکننده زغال‌سنگ و نیز مشکلی بزرگ برای محققین دست‌اندرکار در این زمینه است. احتراق زغال‌سنگ می‌تواند به صورت خودبه‌خودی یا بر اثر فعالیت‌های انسانی در لایه‌های زغال‌سنگ زیرزمینی یا در لایه‌های زغال‌سنگ روباز در سطح زمین ایجاد شود.

سوختن میلیون‌ها تن زغال‌سنگ، تأثیرات منفی عظیمی در محیط زیست محلی و جهانی دارد. آتش‌سوزی‌های زغالی باعث تولید مقادیر زیادی از گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن و غیره می‌شوند که این گازها دارای تأثیر مستقیم بر روی ترکیب اتمسفر محلی و جهانی دارند. نشست زمین یکی دیگر از مشکلات مرتبط به مناطقی است که تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار گرفته است. آتش‌سوزی زغالی همچنین باعث ایجاد مشکلات ایمنی در معادن فعال موجود و باعث به مخاطره افتادن سلامت انسان‌ها می‌شود.

با توجه با اهمیت مسائل زیست‌محیطی و ایمنی معادن زیرزمینی و تأثیر آن بر راندمان استخراج و همچنین افزایش عمق و احتمال خطر خودسوزی در معادن زغال‌سنگ، تحقیق در زمینه تأثیر عوامل ذاتی بر خودسوزی، در راستای شناخت این پدیده و پیش‌گیری از آن، امری مهم تلقی می‌شود.



## ۱-۷- اهداف تحقیق

هدف اصلی تحقیق، ارزیابی تأثیر پارامترهای ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ و تعیین پتانسیل خودسوزی زغال سنگ‌های منطقه البرز مرکزی 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 می‌باشد.

## ۱-۸- روش انجام تحقیق

روش کار به این صورت است که پس از انجام مطالعات اولیه و جمع آوری اطلاعات لازم درباره پیشینه‌ی موضوع و مکانیزم خودسوزی زغال سنگ، از معادن مختلف زغال سنگ البرز مرکزی نمونه برداری شده است، سپس این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و پس از خردایش مناسب و تعیین پارامترهای ذاتی مؤثر بر خودسوزی، با استفاده از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT) قابلیت خودسوزی هر نمونه و تأثیر عوامل ذاتی در معادن زغال سنگ البرز مرکزی تعیین شده است.

## ۱-۹- سازماندهی پایان نامه

به طور کلی مطالب این پایان نامه در ۵ فصل گردآوری شده است که به صورت زیر شرح داده می‌شود:  
فصل نخست به بررسی منابع زغال سنگ ایران و جهان و بیان کلیات تحقیق، ضرورت تحقیق، اهداف تحقیق، پرداخته شده است.

در فصل دوم به مطالعه مکانیزم وقوع پدیده خودسوزی زغال سنگ و پارامترهای موثر بر آن پرداخته شده است.

فصل سوم به مطالعه پیشینه تحقیق و کلیاتی در مورد روش های ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ می پردازد.

در فصل چهارم به معرفی منطقه مورد مطالعه و شرح روند کار و انجام تست های آزمایشگاهی روی نمونه ها و نتایج حاصل از آزمایش ها پرداخته شده است.

و در فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات حاصل از این تحقیق ارائه شده است.

**فصل ۲: بررسی مکانیزم و پارامترهای مؤثر بر**

**خودسوزی زغال سنگ**

## ۲-۱- مقدمه

زغال سنگ قدیمی ترین، فراوان ترین و یکی از مهم ترین سوختهای فسیلی در جهان محسوب می شود و با توجه به ذخایر فراوان، گستردگی بسیار در سطح دنیا و هزینه نسبتاً اندک هنوز هم کانون توجه در تولید انرژی جهان است. با توجه به اهمیت ذکر شده برای این ماده معدنی، در معدنکاری زغال سنگ تمرکز عمده بر روی سه هدف تولید بالا، هزینه تمام شده کمتر و استخراج ایمن است که این امر جز از طریق شناخت دقیق روش ها و فرآیندهای تولید و پیشرفت فناوری در این حوزه میسر نمی شود (اصانلو، ۱۳۷۸).

با اینکه استخراج زغال سنگ هم از روش های سطحی و هم زیرزمینی میسر است اما درصد بالایی از استخراج زغال سنگ در جهان از معادن زیرزمینی انجام می شود. از جمله ویژگی های معادن زیرزمینی، علاوه بر وجود پیچیدگی در طراحی و بالا بودن هزینه ها، حادثه خیزی این معادن است. معادن زیرزمینی زغال سنگ بیشترین سهم را در بد نام کردن این روش معدنکاری از منظر ایمنی دارند، خطرات ناشی از استخراج زغال سنگ یکی از عوامل محدودکننده طراحی در معادن زیرزمینی محسوب می شود (اصانلو، ۱۳۷۸).

آتش سوزی، از جمله حوادث زیان باری است که هم در معادن زیرزمینی و هم در معادن روباز اتفاق می افتد، اما آتش سوزی های معادن زیرزمینی، با توجه به محیط محصور معدن و افزایش خطر انفجار به مراتب خطرناک تر از آتش سوزی های سطحی هستند. همان طور که در شکل (۲-۱) مشاهده می شود خود سوزی زغال سنگ در بسیاری از کشورهای تولیدکننده زغال سنگ از قبیل چین، هند، اندونزی، ایالات متحده آمریکا، استرالیا، آفریقای جنوبی و روسیه رایج است. در این مکان ها، آتش سوزی ها به دلیل علل طبیعی یا فعالیت های انسان آغاز شده و برخی از آن ها صدها سال در حال سوختن هستند (stracher & taylor, 2004).



شکل ۱-۲: پراکندگی آتش سوزی های زغال سنگ در جهان (stracher & taylor, 2004)

## ۲-۲- انواع آتش سوزی

هر آتش سوزی نیاز به سه رکن اصلی دارد تا به وقوع بپیوندد که اصطلاحاً به مثلث آتش معروف است. سه ضلع تشکیل دهنده مثلث آتش عبارتند از: اکسیژن، گرما و سوخت که مثلث آتش در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: مثلث آتش (صفاری و همکاران، ۱۳۹۳)

در پدیده خودسوزی زغال سنگ نیز به همین سه رکن اصلی نیاز است، که اکسیژن مورد نیاز، از هوای محیط تأمین می‌شود، گرما از طریق جذب اکسیژن به زغال و افزایش دمای زغال تأمین می‌شود و سوخت مورد نظر زغال سنگ است. فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ یک فرآیند پیچیده است که مجموعه مراحل تشکیل آن هنوز به طور کامل شناسایی نشده است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۳).

به طور کلی آتش‌سوزی‌های ایجاد شده در معادن زیرزمینی بر حسب منشأ به دو دسته کلی آتش‌سوزی باز با منابع خارجی و آتش‌سوزی داخلی یا خودسوزی تقسیم می‌شوند که آتش‌سوزی باز از سوختن اشیا و لوازم موجود در معدن از طریق منابع خارجی اتفاق می‌افتد.

## ۲-۳- آتش‌سوزی داخلی یا خودسوزی

خودسوزی مواد معدنی، یکی از دلایل عمده آتش‌سوزی در معادن زغال سنگ است. در بعضی شرایط، تقریباً هر نوع زغال‌سنگی در اثر خودسوزی، آتش می‌گیرد. اثرات خودسوزی ماده معدنی از افزایش مختصر مونوکسید کربن موجود در هوا، تا حریق بزرگ که ممکن است کل معدن را در برگیرد متفاوت است. به منظور متمایز شدن خودسوزی از آتش‌سوزی آن را با عنوان «گرماپیش خودبه خودی» بیان می‌کنند (مدنی، ۱۳۷۳).

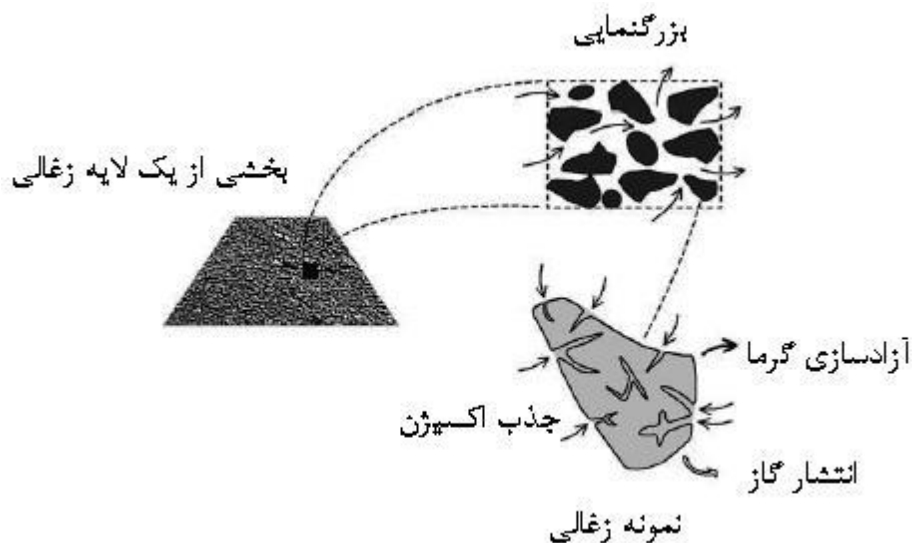
## ۲-۴- مکانیزم خودسوزی زغال سنگ

به طور کلی هرکجا که زغال سنگ در معرض هوا قرار گیرد، پدیده جذب سطحی اکسیژن اتفاق می‌افتد. حتی در دمای اتاق نیز اکسیژن و زغال سنگ باهم ترکیب می‌شوند که این واکنش، گرما تولید می‌کند. بخشی از گرمای تولیدشده توسط خود زغال سنگ جذب شده و باعث تسریع در واکنش خواهد شد. تحت

بعضی شرایط، ادامه این وضعیت ممکن است به اشتعال و سوختن زغال سنگ و یا خودسوزی کامل آن منجر شود. معمولاً سه نوع فرآیند تا رسیدن به مرحله سوختن زغال اتفاق می‌افتد (Grewer, 1994; Yuan and Smith, 2012):

- جذب سطحی یا فیزیکی یا برآشامی اکسیژن.
- جذب شیمیایی یا درآشامی اکسیژن.
- واکنش شیمیایی و اکسیداسیون زغال سنگ و تجزیه ترکیب‌های زغال سنگ و آزادسازی و تولید گازهایی از قبیل مونوکسید کربن

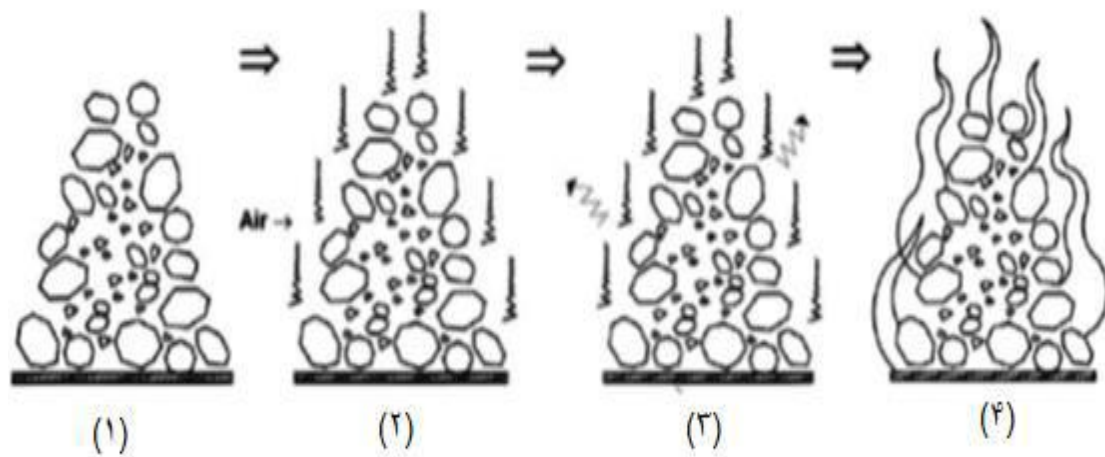
در شکل (۲-۳) چگونگی فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: فرآیند اکسیداسیون زغال سنگ (Wang et al., 2003)

در مرحله اول اکسایش زغال، واکنش بین زغال و اکسیژن در دمای بسیار کم اتفاق می‌افتد. در این مرحله جذب اکسیژن به صورت سطحی و فیزیکی اتفاق افتاده و افزایش دما بسیار آهسته و کم (تقریباً تا دمای حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد) بوده که نتیجه آن اکسیداسیون آرام زغال سنگ است. با شروع فرآیند

اکسیداسیون گرما تولید می شود که گرمای لازم برای ادامه فرآیند و تسریع آن فراهم خواهد شد. در صورتی که در این مرحله دسترسی به اکسیژن از بین برود یا میزان گرمای تولیدی توسط هوای تهویه از بین برود ادامه واکنش محدود خواهد شد. در غیر این صورت، دمای زغال افزایش یافته و واکنش اکسایش ادامه خواهد یافت. با ادامه واکنش اکسایش در مرحله بعد با جذب شیمیایی اکسیژن از طریق ترک‌های موجود در سطح زغال‌سنگ، نرخ اکسیداسیون شتاب بیشتری خواهد گرفت و سپس در دمای کمتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد ترکیبات پایداری از زغال و اکسیژن شکل گرفته و عمدتاً جدایش رطوبت در این مرحله صورت می‌گیرد که به این دما، دمای آستانه گویند. محدوده دمای آستانه بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد متفاوت است و سرانجام با ادامه واکنش در شروع دمای ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، اکسیدهای کربن تشکیل خواهند شد. با تولید بیشتر گرما توسط نمونه زغال در دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، واکنش با اکسیژن به حداکثر سرعت خود و دمای تقریبی بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و در نتیجه زغال‌سنگ به حالت اشتعال می‌رسد؛ که به این فرآیند، خودسوزی زغال‌سنگ گفته می‌شود (Grewer, 1994).



شکل ۲-۴: مراحل خودسوزی زغال‌سنگ (۱) زغال‌سنگ با ابعاد مختلف (۲) اکسایش اولیه با هوای محیط (۳) آزادسازی گرما (۴) شروع آتش‌سوزی (Sipila et al., 2012)



سوختن زغال سنگ را به طور ساده می توان با روابط ۱-۲ تا ۳-۲ نشان داد.



مجموعه فرآیند خودسوزی را می توان به صورت زیر در ۶ مرحله خلاصه کرد (Grewer, 1994):

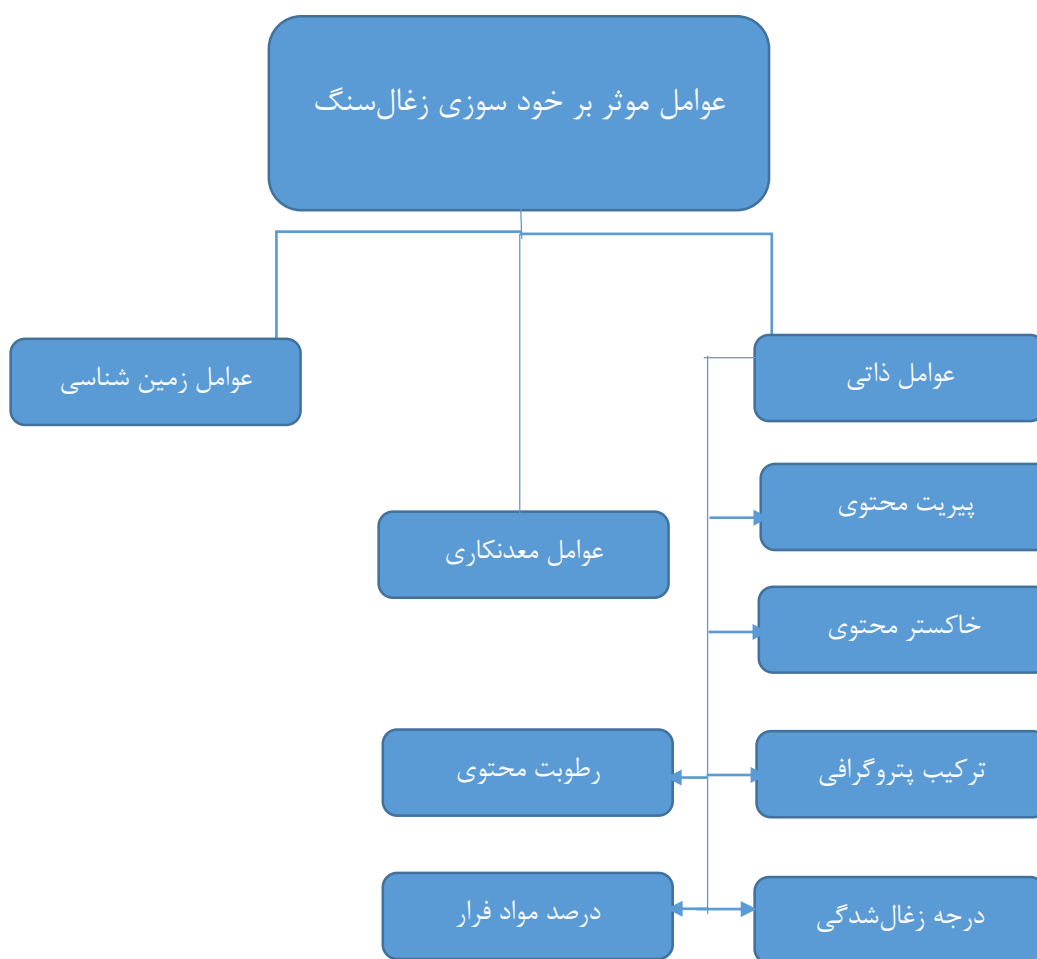
- ۱) واکنش اکسیژن با سوختی مانند زغال سنگ
- ۲) شروع فرآیند خودسوزی و تولید گرما و انرژی.
- ۳) اگر انرژی تولید شده به وسیله سنگ های اطراف جذب شود و یا توسط هوای تهویه پراکنده شود، دمای زغال سنگ افزایش نمی یابد و خودسوزی با دمای کم صورت می گیرد.
- ۴) اگر گرمای تولید شده پراکنده نشود، دمای زغال سنگ افزایش یافته و باعث می شود تا خودسوزی سریع تر اتفاق افتد.
- ۵) در دماهای بالاتر واکنش اکسایش سریع تر اتفاق می افتد.
- ۶) سرانجام در یک دمای بحرانی آتش سوزی و اشتعال زغال سنگ صورت می گیرد.

## ۲-۵- پارامترهای مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

در معادن زیرزمینی لایه های زغال سنگ، بسته به شرایط، قابلیت احتراق خودبه خودی و خودسوزی را دارند و بررسی این که این لایه ها در چه وضعیتی قرار دارند و چه عواملی بر خودسوزی لایه اثر می گذارند مهم

است و برای شناخت بهتر این پدیده بایستی پارامترهای تأثیرگذار بر خودسوزی زغال سنگ مورد بررسی قرار گیرد (Uludag, 2001).

احتراق خود به خودی یکی از مهم ترین خطرات معدنکاری از جنبه ایمنی و اقتصادی است. عوامل متعددی به تمایل زغال سنگ به خودسوزی کمک می کند. مطابق شکل (۲-۵) این عوامل به طور کلی به سه دسته عوامل ذاتی، عوامل معدنکاری و عوامل زمین شناسی تقسیم شده است (Kaymakci & Didari, 2002).



شکل ۲-۵: عوامل مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ

## ۲-۵-۱- عوامل ذاتی

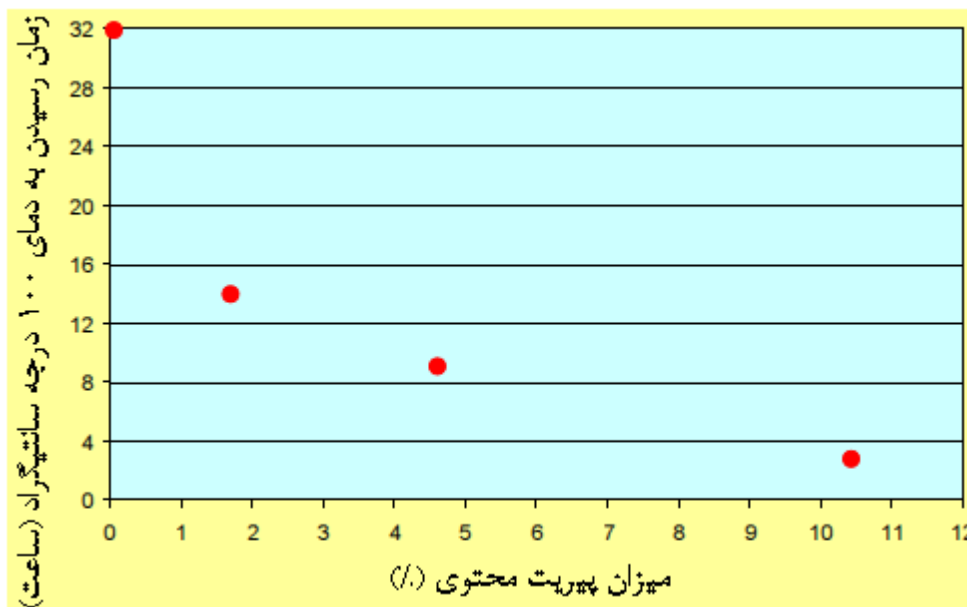
### ۲-۵-۱- پیریت محتوی

از اولین پژوهش صورت گرفته در رابطه با خودسوزی توسط پلات در سال ۱۶۸۶ تا اواسط قرن نوزدهم، فرض بر این بود که پیریت موجود در زغال سنگ عامل اصلی خودسوزی است. اما مشاهده شد که زغال سنگ حتی در غیاب پیریت نیز اکسیژن را جذب کرده و خودسوزی اتفاق می‌افتد. با انجام تحقیقات بیشتر و اصلاح این دیدگاه، نظریه فعلی حاکی بر این است که پیریت نقشی فرعی در پیشرفت خودسوزی را ایفا می‌کند (Morris & Atkinson, 1988).

پیریت ( $FeS_2$ ) موجود در زغال سنگ به عنوان یک عامل اصلی و شتاب دهنده و کاتالیزور در خودسوزی زغال سنگ مطرح است و توسط محققین مختلفی بر این موضوع تأکید شده است (Kaymakci & Didari, 2002).

پیریت از یک جهت دیگر نیز به افزایش خودسوزی زغال سنگ کمک می‌کند و با رطوبت موجود در هوا اکسید شده و منبع گرمایی دومی را برای تسریع در فرآیند گرمایش خودبه خودی فراهم می‌کند (Nelson & Chen, 2007).

همان‌طور که در شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود نتایج حاصل از کار Beamish و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی نشان می‌دهد که با افزایش درصد پیریت محتوی، سرعت خودسوزی زغال سنگ بیش‌تر می‌شود (Beamish et al., 2012).



شکل ۲-۶: ارتباط بین پیوریت محتوی و زمان رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد (Beamish et al., 2012)

## ۲-۱-۵-۲-۲ رطوبت محتوی

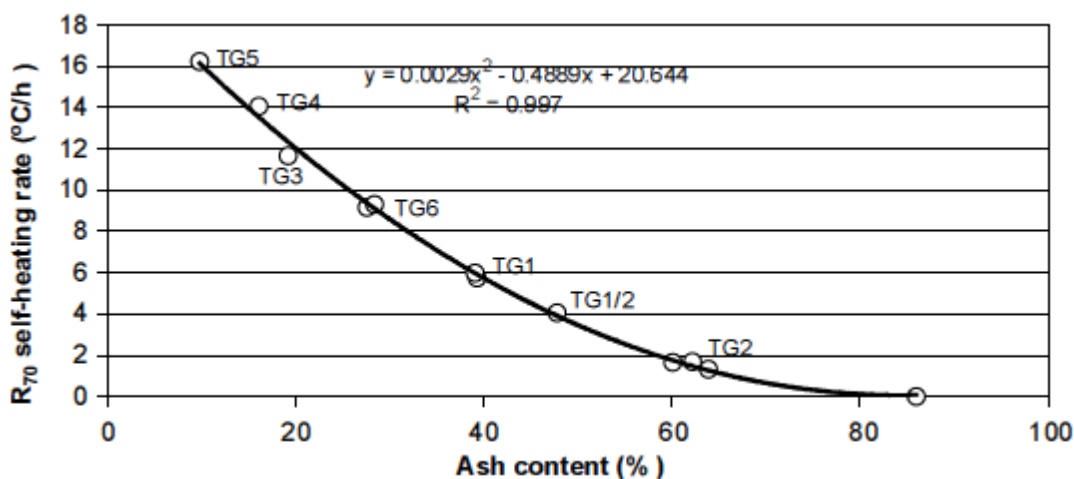
تمام زغال‌سنگ‌ها دارای رطوبت ذاتی هستند که مقدار آن به درجه زغال‌شدگی بستگی دارد. همچنین رطوبت محتوی لایه زغال‌سنگ با نفوذپذیری و درجه اشباع متفاوت است. اگر رطوبت از فضای خالی لایه زهکشی شود، آنگاه با گاز پر خواهد شد (MDG 1006, 2011).

به طور کلی بسته به شرایط معدن، رطوبت می‌تواند موجب کاهش یا افزایش گرما شود. تبخیر آب از سطح به حرارت نیاز دارد (گرمای نهان تبخیر) این حرارت گرفته شده از سطح باعث خنک شدن و افت درجه حرارت بر روی سطح زغال‌سنگ می‌شود. از سوی دیگر، اگر بخار آب بر روی سطح زغال‌سنگ متراکم شود، گرمای حاصل از تراکم در تقابل با تبخیر باعث افزایش دمای سطح زغال‌سنگ شده و نرخ خودسوزی افزایش می‌یابد (MDG 1006, 2011).

## ۲-۵-۱-۳- خاکستر محتوی

خاکستر یکی از عوامل اصلی تعیین کیفیت زغال سنگ است. زغال سنگ‌ها حاوی مواد غیر آلی و مواد زائدی مثل رس‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها و کربنات‌ها هستند که پس از سوزاندن زغال سنگ به صورت خاکستر برجا می‌مانند و به خاکستر زغال سنگ معروف هستند. علاوه بر کانی‌های فوق الذکر مواد معدنی کمر بالا و کمر پایین لایه زغال سنگ در خاکستر مشاهده می‌شوند (یزدی، ۱۳۸۸)

در تحقیقی که Beamish و Blazak در سال ۲۰۰۵ انجام دادند، دریافتند که تمایل زغال سنگ به خودسوزی و درصد خاکستر محتوی نسبت عکس دارد که این رابطه در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: ارتباط بین میزان خاکستر محتوی و تمایل خودسوزی زغال سنگ (beamish & bazalk, 2005)

## ۲-۵-۱-۴- گاز خیزی

خودسوزی زغال سنگ هم می‌تواند در معادن با لایه‌های گاز خیز که عمده‌ی ترکیب این گازها را متان تشکیل می‌دهد، رخ دهد. اگر خودسوزی در حضور اتمسفر قابل انفجار اتفاق بیفتد، منجر به انفجار معدن شده و نتایج آن ممکن است فاجعه‌بار باشد (MDG 1006, 2011).

یکی از عوامل اصلی در کاهش خطر خودسوزی، وجود مقدار متوسط تا بالای گاز در لایه زغال سنگ است. به طور کلی، گازخیزی منجر به کاهش سطح اثر اکسیژن بر روی زغال سنگ می شود و می تواند شانس اکسیداسیون در حال توسعه به آتش سوزی را کاهش دهد (MDG 1006, 2011).

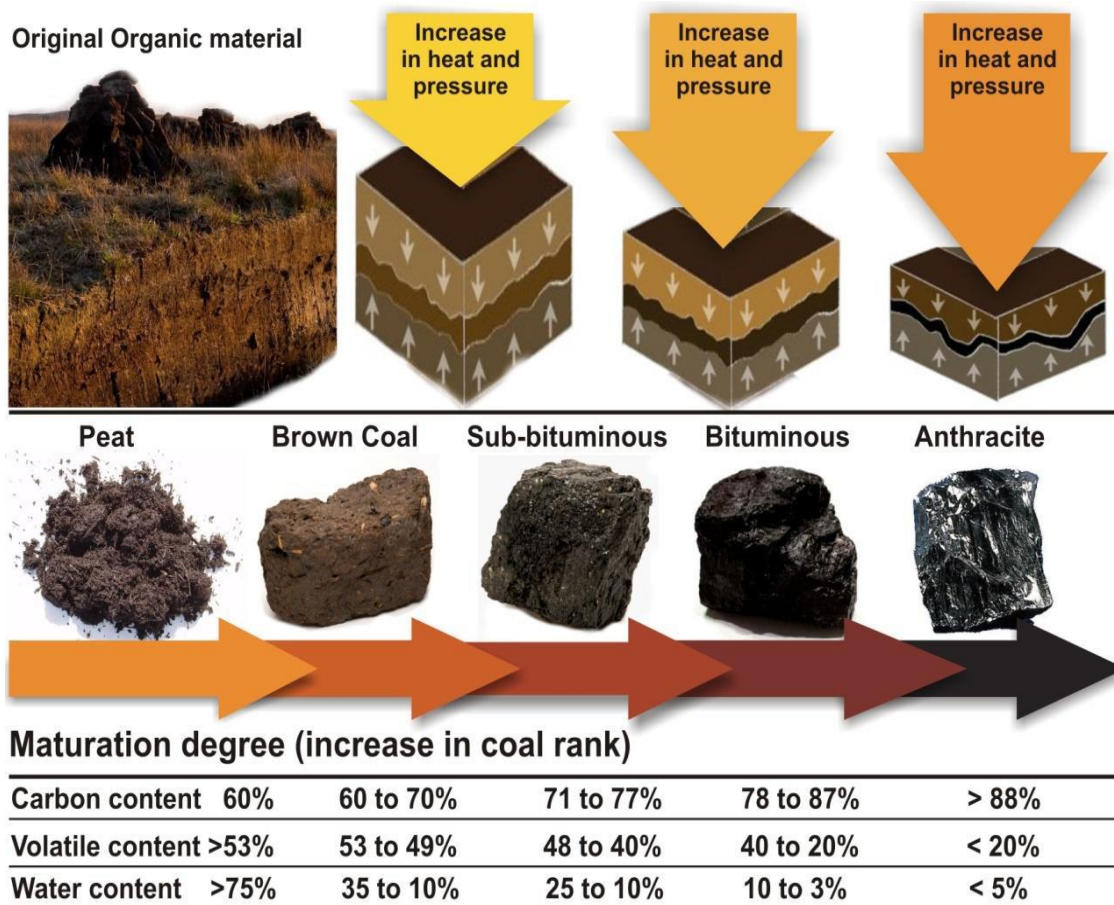
## ۲-۵-۱-۵- ترکیب سنگ شناسی

ترکیب سنگ شناسی زغال سنگ توسط طبیعت مواد گیاهی اصلی تشکیل دهنده زغال سنگ و محیطی که در آن شکل گرفته است تعیین می شود. ترکیبات سنگ شناسی زغال، ترکیباتی همگن و میکروسکوپی هستند که ماسرال نامیده می شوند؛ به طور کلی، ماسرال های زغال با توجه به منشأ اولیه گیاهی شان به ۳ گروه اصلی ویتربینیت، اکسینیت و اینرتینیت تقسیم می شوند (یزدی، ۱۳۸۲).

آزمایش های زیادی که در مورد سرعت واکنش ماسرال های ویتربیت، اینرتینیت و اکسینیت زغال سنگ صورت گرفته است. به طور کلی در بین ماسرال های زغال سنگ، اکسینیت نرخ خودسوزی بیشتری نسبت به ویتربینیت و اینرتینیت را داراست (Morris & Atkinson, 1988).

## ۲-۵-۱-۶- درجه زغال شدگی

درجه زغال شدگی مهم ترین عامل ذاتی مؤثر بر خودسوزی زغال سنگ است. مطابق شکل (۸-۲) با افزایش درجه زغال شدگی رطوبت محتوی، اکسیژن محتوی، مواد فرار، هیدروژن محتوی کاهش و مقدار کربن افزایش می یابد. هرچقدر درجه زغال شدگی پایین تر باشد، اکسایش در آن سریع تر رخ می دهد بنابراین لیگنیت و ساب بیتومینه نسبت به آنتراسیت تمایل بیشتری به خودسوزی دارند (Nelson & Chen, 2007).



شکل ۲-۸: روند تشکیل زغال سنگ (suarez and crelling, 2007)

## ۲-۵-۱-۷- درصد مواد فرار

عموما هرچه قدر درصد مواد فرار زغال سنگ زیادتر باشد سرعت خودسوزی آن بیشتر می شود. آزمایشها نشان می دهند که نسبت سرعت اکسید شدن زغال سنگ با ۳۸ درصد مواد فرار نسبت به زغال سنگ حاوی ۱۸ درصد مواد فرار، سه به یک است. این درحالی که زغال سنگی که مواد فرار آن ۲۸ درصد است سرعت اکسیداسیون آن به بیشترین مقدار می رسد (Berkowitz, 2012).

## ۲-۵-۲- عوامل زمین‌شناسی

### ۲-۵-۲-۱- ضخامت لایه

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

### ۲-۵-۲-۲- عمق لایه

به طور کلی تأثیر عمق لایه بر خودسوزی زغال‌سنگ مستقیم نیست و آن را از دو طریق می‌توان مورد ارزیابی قرار داد، به صورتی که با افزایش عمق دمای محیط و میزان بار و فشار وارد بر پایه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش فشار سبب ایجاد شکستگی در لایه شده و در نهایت احتمال خودسوزی در لایه افزایش می‌یابد همچنین زمانی که استخراج در اعماق نسبتاً کم صورت می‌گیرد، بین درز و شکاف‌های موجود در سطح و ترک‌ها و حفرات یه ارتباط به وجود آمده و سبب می‌شود که جریان هوا از سطح به منطقه استخراج شده وارد شود و خطر خودسوزی افزایش یابد (MDG 1006, 2011).

### ۲-۵-۲-۳- شیب لایه

لایه‌های با شیب زیادتر، بیشتر مستعد گرمایش خودبه‌خودی هستند؛ زیرا هرچه شیب لایه افزایش می‌یابد، میزان ضریب استخراج لایه کمتر شده و درصد بیشتری از زغال در سقف و کف کارگاه، باقی می‌ماند و خطر خود سوزی زغال افزایش می‌یابد (Kaymakci & Didari, 2002).



## ۲-۵-۲-۴- استخراج چند لایه‌ای

خودسوزی زغال یکی از مشکلات زغال در معادن چندلایه‌ای است که هم در استخراج لایه اول و هم در استخراج لایه های بالا و پایین (قابلیت استخراج را دارند یا به خاطر شرایط فیزیکی قابلیت استخراج را ندارند) به خاطر شرایط سقف ضعیف، نشت هوا و غیره، خطر گرمایش خودبه خودی وجود دارد ( Kaymakci & Didari, 2002).

## ۲-۵-۲-۵- وجود دایک و گسل

ساختارهایی مانند گسل، دایک باعث ایجاد درزه و شکاف شده و باعث ورود اکسیژن به داخل لایه زغال می‌شوند. از طرف دیگر این ساختارها مشکلات زیادی ایجاد کرده، ممکن است به کانون‌های افزایش تنش در زمین تبدیل شوند، که به نگهداری اضافی نیاز داشته و باعث کاهش نرخ استخراج می‌شوند. نرخ استخراج پایین‌تر سبب می‌شود که سطح بیشتری از زغال در معرض اکسیژن قرار گرفته و در نتیجه پتانسیل خودسوزی افزایش یابد ( MDG 1006, 2011).

## ۲-۵-۳- عوامل معدنکاری

### ۲-۵-۳-۱- روش استخراج

روش استخراج نقش مهمی در خودسوزی ایفا می‌کند و می‌بایست به‌صورتی انتخاب شود که زغال‌سنگ کمتری در کارگاه استخراج باقی بماند و همچنین با استخراج کامل لایه زغال‌سنگ در نزدیکی گسل‌ها و شکستگی‌ها، تسریع در عملیات پیشروی، به کارگیری سیستم استخراج پسرو، تهویه مناسب و پر کردن

محل استخراج شده می‌توان خطر خودسوزی را کاهش داد؛ به طور کلی هرچه روش استخراج کامل‌تر باشد و زغال‌سنگ کمتری به صورت برجا از دست رود و یا به صورت انباشت شده برای انتقال به بیرون بر اثر استخراج باقی بماند، در آن روش استخراج خطر، خودسوزی زغال‌سنگ کمتر است (MDG 1006, 2011; Kaymakci & Didari, 2002).

## ۲-۵-۳-۲- نرخ استخراج (سرعت استخراج)

نرخ استخراج یکی از عواملی است که بر پدیده خودسوزی زغال‌سنگ مؤثر است. نرخ استخراج به عواملی از قبیل عوامل زمین‌شناسی و تجهیزات استخراجی بستگی دارد. وجود عوامل زمین‌شناسی مانند دایک، گسل که در بخش‌های قبل به آن‌ها اشاره شد، باعث افزایش تنش و کاهش ایمنی و در نتیجه کاهش نرخ استخراج می‌شوند که کاهش سرعت پیشروی سبب افزایش نرخ خودسوزی می‌شود (MDG 1006, 2011).

## ۲-۵-۳-۳- جهت پیشروی

در روش استخراج جبهه کار طولانی، استخراج عمدتاً به دو طریقه پیشرو و یا پسرو صورت می‌گیرد. خطر خودسوزی در روش پیشرو در مقایسه با روش پسرو بیش‌تر است. در روش استخراج پیشرو در مقایسه با روش استخراج پسرو میزان هوای بیشتری به فضای استخراج شده نشت می‌کند که این نشت ناشی از اختلاف فشار هوای تهویه است که باعث اکسیداسیون و در نتیجه افزایش خطر خودسوزی زغال‌سنگ می‌شود (MDG 1006, 2011; Kaymakci & Didari, 2002).

## ۲-۵-۳-۴- تهویه

سیستم تهویه و سرعت جریان هوا یک عامل مهم در پدیده خودسوزی زغال سنگ است زیرا از یک طرف جریان هوا تأمین کننده اکسیژن است و اکسیژن یکی از سه عامل اصلی در مثلث آتش است و نقش کلیدی را در سرعت واکنش اکسیداسیون ایفا می کند و از طرف دیگر سیستم تهویه مناسب باعث پراکندگی و اتلاف گرمای تولید شده ناشی از اکسایش زغال سنگ می شود و مانع از تجمع گرما می شود (MDG 1006, 2002; Kaymakci & Didari, 2011).

## ۲-۵-۳-۵- ضریب استخراج

نسبت بین حجم زغال استخراج شده از لایه به کل زغال موجود در لایه، ضریب بازیابی نامیده می شود. هرچه این ضریب بیشتر باشد، خطر خودسوزی زغال سنگ کاهش می یابد. هرچه نسبت استخراج زغال سنگ بیشتر باشد، زغال کمتری بر جای مانده و میزان افت ماده معدنی کمتر خواهد بود. با کاهش میزان افت ماده معدنی میزان خطر خودسوزی زغال سنگ نیز کاهش می یابد زیرا سطح کمتری از زغال در معرض اکسیژن و جریان هوا قرار می گیرد (MDG 1006, 2011).

## ۲-۶- تاثیرات زیست محیطی خودسوزی زغال سنگ

محیط زیست از ارکان توسعه پایدار در هر کشوری است. در دو دهه اخیر توجه بشر به حفظ کیفیت محیط زیست افزایش یافته و این پدیده طراحی و فعالیت های معدنی را تحت تأثیر قرار داده است. بدون شک عملیات معدنی منافع اقتصادی قابل توجهی را به همراه دارد و مواد لازم برای حیات و پیشرفت بشر را فراهم می کند، اما در راستای این منافع، آسیب های زیست محیطی ناشی از فعالیت های معدنی اجتناب

ناپذیر است و با افزایش آلودگی‌ها، امکان حیات و استفاده از محیط‌زیست سالم را از بشر سلب می‌کند (احمدیان، ۱۳۹۵).

به طور کلی تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ شامل موارد زیر می‌شود: (ham, 2005)

- به غیر از تغییر چشم انداز، معادن زغال‌سنگ با افزایش ذرات گرد و غبار، انفجار، حمل و نقل و انتشار گازهای سمی و خطرناک باعث آلودگی هوا می‌شوند.
- انتشار گرما از طریق آتشسوزی‌های زغالی باعث افزایش دمای محلی نیز می‌شود.
- باران اسیدی
- آلودگی فوری محیط‌زیست توسط انتشار گازهای سمی، قابل اشتعال و قابل انفجار؛ مانند دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، اکسیدهای سولفور، اکسیدهای نیتروژن، هیدروژن سولفید، متان، هیدروژن و سایر گازها که مقادیر آنها کم، ولی از طریق خودسوزی زغال‌سنگ ایجاد می‌شوند که عبارتند از: اتان، اتیلن، استیلن و سایر هیدروکربنهای دیگر که مقادیر آنها بسیار کم است. در بین این گازهای سمی دی‌اکسید کربن و متان در گرم شدن کره زمین شرکت می‌کنند
- نشست سطح زمین و فرسایش خاک
- تغییر در الگوی زهکشی و سطح آب‌های محلی
- کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی
- تغییر کاربری و انقراض پوشش گیاهی و جانوری

در شکل (۲-۹) نمونه‌ای از تأثیرات خودسوزی زغال‌سنگ نشان داده شده است.



شکل ۲-۹: نمونه‌هایی از تأثیرات زیست‌محیطی خودسوزی زغال‌سنگ (Glenn et al., 2015)

## ۲-۷- روش‌های پیش‌گیری از خودسوزی

### ۲-۷-۱- 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 تبخیرکننده‌ها حرارت می‌دهند تا به گاز تبدیل شود. سپس گاز حاصله را به وسیله 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 هنگامی امکان پذیر است که ذخیره عظیمی از نیتروژن مایع در دسترس باشد (Wang-xing et al., 2011).

## ۲-۷-۲- فوم سه فازی

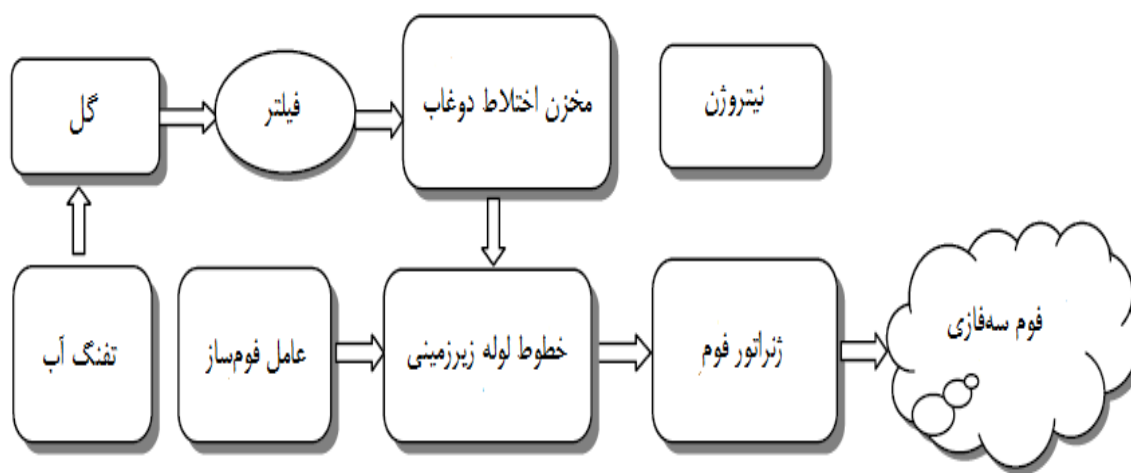
فوم سه فازی، که می‌تواند در پیش‌گیری از خودسوزی زغال‌سنگ به کار رود، از مواد غیر قابل احتراق (خاکستر بادی، گل زرد، و غیره)، گاز بی اثر (نیتروژن) و آب، که همگی مواد مؤثر برای کنترل آتش هستند، تشکیل شده است. ابتدا، عامل فوم‌ساز به خاکستر بادی یا گل زرد اضافه شده، و پس از آن گاز نیتروژن تزریق می‌شود. از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

در مقایسه با تکنولوژی و مواد موجود قبلی برای کنترل آتش‌سوزی، فوم سه فازی مزایای استفاده از هر دو روش گاز بی اثر و دوغاب در کنترل آتش را ارائه می‌دهد. مقدار زیادی از ترکیبات فوم سه فازی پس از نیتروژن به دوغاب حاوی عامل فوم‌ساز تزریق شده و حجم فوم به شدت افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده فوم می‌تواند بر روی خود انباشته شود و کمک کند تا منطقه آتش‌سوزی پر شده و جای زغال از دست رفته در فضای خالی را پوشش دهد. نیتروژن محصور شده در فوم می‌تواند زمان طولانی‌تری در منطقه آتش‌سوزی برای خاموش کردن آتش معدن باقی بماند (Wang-xing et al., 2011; Ren And wu, 2009).

شکل (۲-۱۱) پروسه حمل و نقل و تزریق فوم سه فازی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰: تصویر فوم سه فازی تولید شده (Wang-xing et al., 2011)



شکل ۲-۱۱: پروسه حمل و نقل و تزریق فوم سه فازی (Wang-xing et al., 2011)

## ۲-۸- جمع بندی

در این فصل به ارائه کلیاتی در مورد مکانیزم خودسوزی زغال سنگ و پارامترهای موثر بر این پدیده پرداخته شد. پدیده خودسوزی زغال سنگ یک فرآیند پیچیده است که پارامترهای مختلفی نیز در آن تأثیرگذار است؛ برای جلوگیری از پدیده خودسوزی زغال سنگ باید درک درستی از مکانیزم آن داشته باشیم تا مخاطرات این پدیده و تأثیرات زیان آور زیست محیطی، کاهش یابد. پارامترهای ذاتی، زمین شناسی و معدنکاری جزو عوامل تأثیرگذار بر روند احتراق خودبه خودی زغال سنگ هستند که در این میان پارامترهای ذاتی از اهمیت بالاتری برخوردار هستند و در ادامه روش های پیش گیری از خودسوزی مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل سوم به بررسی پیشینه تحقیق و روش های ارزیابی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ پرداخته خواهد شد.



## فصل ۳ :

پیشینه تحقیق و روش‌های بررسی قابلیت

خودسوزی زغال سنگ

### ۳-۱- مقدمه

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

برای درک درست و بهتر از موضوع خودسوزی زغال‌سنگ بایستی پیشینه موضوع تحقیق را مورد بررسی قرار داد. پژوهش در رابطه‌ی موضوع خودسوزی زغال‌سنگ در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران کشورهای مختلف قرار گرفته است. در این فصل ابتدا پیشینه‌ی تحقیق را مورد بررسی قرار داده و در ادامه به مطالعه‌ی روش‌های بررسی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ پرداخته خواهد شد.

### ۳-۲- بررسی پیشینه‌ی تحقیق

خودسوزی زغال‌سنگ در معادن جهان پیشینه طولانی دارد. کشور هند به دلیل قدمت فعالیت معدنکاری، دارای سابقه طولانی در خودسوزی زغال‌سنگ می‌باشد. اولین خودسوزی زغال‌سنگ در سال ۱۸۸۰ در معدن رانی‌گانی کشور هند رخ داد و پس از آن بر طبق آمار داده شده تا سال ۲۰۰۹، ۱۹۸ مورد خودسوزی در معادن زغال‌سنگ هند ثبت شده است. این موارد باعث از بین رفتن ذخیره زغالی در حدود ۱۸۸۱ میلیون تن و ۱۲ درصد از ذخایر زغال‌کک‌شو این کشور شده است (Singh And Singh, 2009).

کشور چین که با تولید ۲,۵ میلیارد تن زغال سنگ در سال از قطب‌های تولید زغال سنگ جهان محسوب می‌شود. آتش‌سوزی‌های زغالی در این کشور منجر به از دست رفتن ۲۵ میلیون تن زغال سنگ شده که این آتش‌سوزی‌ها علاوه بر از بین بردن زغال سنگ منجر به آلودگی هوا شده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد (Qian et al., 2003). در کشور آلمان در منطقه دادویلر یک لایه زغال از سال ۱۶۶۸ تاکنون در حال سوختن است (stracher & taylor, 2004). همچنین در کشور استرالیا منطقه‌ای به نام کوه سوزان در ۲۲۴ کیلومتری شمال سیدنی قرار دارد و لایه زغال سنگ در عمق ۳۰ متری به مدت ۶۰۰۰ سال در حال سوختن است ([https://en.wikipedia.org/wiki/Burning\\_Mountain](https://en.wikipedia.org/wiki/Burning_Mountain)) در بسیاری از معادن زغال سنگ آمریکا تمایل به خودسوزی وجود دارد. محققان به این نتیجه رسیده‌اند که در کلرادو آتش‌سوزی زغال سنگ در اثر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش درجه حرارت زغال سنگ تا ۳۵ درجه سانتیگراد و فراهم شدن زمینه‌ی خودسوزی، به وجود آمده است ([https://en.wikipedia.org/wiki/Coal\\_seam\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Coal_seam_fire)).

اهمیت خودسوزی در معادن زغال سنگ به طور کلی مستلزم تحقیقات زیادی است. سابقه مطالعاتی موضوع خودسوزی به سال ۱۹۰۱ برمی‌گردد. پژوهش‌گران از آن به بعد تحقیقات گسترده‌ای برای پیش‌بینی، پیش‌گیری و کنترل خودسوزی زغال سنگ انجام دادند و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی یا طبقه‌بندی و امتیاز دهی به پارمترهای مختلف، اثر عوامل ذاتی، زمین‌شناسی و معدنکاری بر خودسوزی زغال سنگ را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به منابع محدود در جدول (۳-۱) به خلاصه‌ای از سابقه موضوع خودسوزی و سایر پژوهش‌ها در این زمینه اشاره شده است.

جدول ۳-۱: پیشینه تحقیقات خودسوزی زغال سنگ

سال انتشار	مؤلف	توضیحات
۱۹۶۷	Banrjee and Chakravarty	به بررسی کاربرد روش آنالیز حرارت تفاضلی (DTA) پرداختند. آنها پیشنهاد کردند که از آلومینا به عنوان مواد مرجع استفاده شود و یک سیستم آزمایشگاهی استاندارد را برای روش DTA پیشنهاد دادند
۱۹۷۱	Bhattacharya	میزان انتشار حرارت از زغال سنگ‌های مختلف توسط یک گرماسنج <sup>۲</sup> هنگام جذب بخار آب در شرایط ایزوترمال <sup>۳</sup> بررسی شد. مشاهده شد که میزان تولید گرما در یک زغال سنگ خاص به نوع زغال، اندازه ذرات و هوازدگی نمونه بستگی دارد. او در نهایت بیان کرد که مکان‌های نگه‌داری زغال سنگ باید خشک و در صورت امکان عاری از رطوبت باشد تا احتمال وقوع خودسوزی کاهش یابد. نتایج حاصل از این تحقیق همچنین نشان داد که میزان خودسوزی وابسته به اندازه ذرات و هوازدگی زغال سنگ می‌باشد.
۱۹۸۲	Banerjee	به طبقه بندی خطر خودسوزی زغال سنگ با استفاده از ۲۲ پارامتر معدن کاری در هندوستان پرداخت. و یک سیستم جامع برای پیش‌بینی خطر خودسوزی در معادن هندوستان ارائه داد
۱۹۸۵	Banerjee	به بررسی جامع پارامترهای مختلف خودسوزی پرداخت. وی پس از قرار دادن زغال سنگ در معرض اکسیژن مشاهده کرد در صورتی که حرارت تولید شده از محیط انتقال یابد و از تجمع گرما جلوگیری شود نرخ مصرف اکسیژن در روزهای نخست فرآیند اکسیداسیون بسیار بالا رفته و سپس به آرامی و بدون ایجاد مشکل کاهش می‌یابد. وی بیان کرد که نرخ واکنش‌های شیمیایی و گرمازا با افزایش دمای محیط تغییر کرده و با رسیدن به دمای ۱۳۳ °C به دلیل از دست دادن رطوبت، تغییراتی خاص در فرآیند آن صورت می‌گیرد.
۱۹۸۶	Ghosh	در این مطالعه بیان شد که وجود پیریت در زغال سنگ باعث افزایش تمایل زغال به خودسوزی می‌شود، و در صورت حضور رطوبت در لایه زغال نیز دمای زغال افزایش پیدا می‌کند. بنابراین نتیجه‌گیری شد که اسپری آب و سیلاب به عنوان یک راه حل مؤثر جهت کنترل خودسوزی زغال نمی‌تواند مطرح گردد.

1- differential thermal analysis

2-calorimeter

3-isothermal

ادامه جدول ۳-۱: پیشینه تحقیقات خودسوزی زغال سنگ

و همچنین برای پیشگیری از خودسوزی زغال سنگ از تزریق نیتروژن می توان استفاده کرد. گاز نیتروژن با جایگزینی اکسیژن یکی از اضلاع مثلث آتش را از بین می برد و در نتیجه خودسوزی کنترل می شود		
دماهای نقطه تقاطعی (CPT) را برای نمونه های زغالی مختلف تعیین کرد و مشاهده نمود که نمونه هایی با دمای نقطه تقاطعی بین ۱۳۲ تا ۱۳۷ درجه سانتی گراد نسبت به خودسوزی زغال سنگ حساس تر هستند	Tarafdar et al.	۱۹۸۷
مکانیزم خودسوزی زغال سنگ را به صورت کامل و جامع مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت، عوامل زیادی در خودسوزی زغال سنگ موثر است که نمی توان آن را به صورت تک پارامتری بررسی کرد و بایستی همه عوامل ذاتی موثر بر خودسوزی را به صورت هم زمان مورد بررسی قرار داد	Grewer	۱۹۹۴
تأثیر گاز خیزی، نوع زغال و اندازه ذرات در پدیده گرمایش خودبه خودی زغال سنگ را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت با کاهش درجه زغال شدگی و کاهش ابعاد ذرات خودسوزی افزایش پیدا می کند.	Sujjanti et al	۱۹۹۹
وی میزان تمایل زغال سنگ قهوه ای منطقه آسکال ترکیه به خودسوزی را مورد آزمایش قرارداد. در این پژوهش تأثیرات میزان جریان گاز، رطوبت زغال، رطوبت هوا و اندازه ذرات در خودسوزی نمونه های زغالی با استفاده از روش نقطه تقاطعی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از رطوبت هوا، رطوبت ذاتی و اندازه ذرات زغال سنگ به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر خودسوزی و از CPT به عنوان شاخص ارزیابی خودسوزی استفاده شد. از این آزمایش ها نتیجه گیری شد که با کوچک تر شدن اندازه ذرات، افزایش مقدار رطوبت زغال سنگ و کاهش رطوبت هوا عدد مربوط به شاخص CPT کاهش می یابد.	Kucuk et al.	۲۰۰۳
تأثیر میزان پیریت بر روی خودسوزی نمونه های مختلف زغالی را مورد بررسی قرار داد و مشاهده کرد که با کاهش درجه زغال شدگی، میزان پیریت عموماً افزایش یافته و برای زغال سنگ های مختلف فرآیند اکسایش بسیار سریع تر اتفاق می افتد.	Nelson and Chen	۲۰۰۷

<sup>1</sup>-Crossing Point Temperature

ادامه جدول ۳-۱: پیشینه تحقیقات خودسوزی زغال سنگ

تأثیر رطوبت و پیریت بر اکسیداسیون زغال سنگ در معادن روباز را مورد مطالعه قرار داد. در این کار تحقیقاتی که در معادن زغالی روباز انجام گرفت مشاهده شد، زغال فوراً اکسیده شده و آتش می‌گیرد که ناشی از خواص ذاتی زغال سنگ مانند درجه زغال‌شدگی پایین، درصد رطوبت بالا و حضور پیریت است.	Singh et al.	۲۰۰۷
پتانسیل خودسوزی زغال سنگ با استفاده از دورسنجی مورد بررسی قرار داد و نتیجه‌گرفت در صورت حذف آنومالی‌های اشتباه با استفاده از دانش زمین‌شناسی، می‌تواند روشی مفید برای تشخیص خودسوزی های پنهان در لایه های زغال سنگ باشد	Gangopadhyay	۲۰۰۷
به ارائه مروری از کاربردهای روش های DTA و DSC و گرماسنج ثقلی (TG) در تشخیص خودسوزی زغال سنگ پرداخت.	Mohalik et al.	۲۰۰۹
به ارائه مروری روش‌های آنالیز حرارتی برای بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ پرداخت.	Nimaje et al.	۲۰۱۰
از سه روش TGA، USBM و نرخ گرمایش خودبه خودی برای مطالعه خودسوزی استفاده کرد. و نتیجه گرفت روش TGA نمونه‌های مورد مطالعه را بهتر پیش‌بینی می‌کند.	Wang and Lou	۲۰۱۱
به شبیه سازی فرآیند خودسوزی پرداختند و خودسوزی زغال سنگ را با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، پیش‌بینی کردند و با استفاده از روابط عددی مشخص شد که این روش دارای دقت ۸۴ درصد برای پیش‌بینی خودسوزی زغال سنگ است	Zhang Ying-Hua et al.	۲۰۱۱
در این تحقیق با استفاده از روش آزمایش R70 به بررسی تأثیر پیریت بر خودسوزی زغال سنگ پرداختند. نمونه‌های زغالی نواحی معدنی Bowen	Beamish et al.	۲۰۱۲

<sup>1</sup>- Thermogravimetry

ادامه جدول ۳-۱: پیشینه تحقیقات خودسوزی زغال سنگ

<p>Basin در Queensland مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه گیری کار آن ها این بود که با افزایش میزان پیریت محتوی نمونه های زغالی سرعت واکنش گرمایش خودبه خودی زغال افزایش مییابد</p>		
<p>به بررسی اثر تهویه بر روی خطر گرمایش خودبه خودی زغال سنگ پرداختند آنها دریافتند برای ایجاد حداکثر نرخ خودسوزی جریان یک تهویه بحرانی وجود دارد، که هرچقدر اندازه ذرات زغال سنگ بزرگ تر باشد دمای بحرانی افزایش می یابد</p>	Yuan And smith	۲۰۱۲
<p>به مطالعات آزمایشگاهی روی برخی عوامل ذاتی خودسوزی زغال پرداخت. ابتدا ۱۵۰۰ کلیوگرم نمونه های مختلف زغال سنگ را از مناطق مختلف چین جمع آوری کرد. وی مشاهده کرد که قبل از اینکه فرآیند خودسوزی زغال شروع شود نرخ گرمایش از ۰/۴ درجه سانتی گراد بر ساعت ۲/۵ درجه سانتی گراد بر ساعت افزایش یافت و مصرف اکسیژن نیز به همین نسبت افزایش می یابد و بعد از آن میزان گازهای دی اکسید کربن و مونوکسید کربن افزایش یافته و خودسوزی به وقوع می پیوندد.</p>	ZhanliMao et al.	۲۰۱۳
<p>با استفاده از روش DSC به بررسی تأثیر پیریت بر روی گرمایش خودبه خودی زغال سنگ پرداخت، و نمونه های مختلف حاوی ۰٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ پیریت را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان می دهد که پیریت می تواند فرآیند خودسوزی را به صورت تصاعدی تسریع کند. نمونه زغال با پنج درصد پیریت دارای بیشترین میزان انتشار CO و جذب اکسیژن است. و نمونه های حاوی پنج و هفت درصد پیریت بیشترین تاثیر را بر خودسوزی دارند.</p>	Jun Deng et al.	۲۰۱۵
<p>روش های کنترل خودسوزی زغال را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که روش های فوم سه فازی و مه پاشی<sup>۱</sup> برای کنترل خودسوزی موثر تر هستند</p>	Zhenlu et al.	۲۰۱۵

<sup>1</sup> -water mist

ادامه جدول ۳-۱: پیشینه تحقیقات خودسوزی زغال سنگ

به بررسی کلی روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین قابلیت خودسوزی زغال سنگ پرداختند. وی روش‌های آزمایشگاهی را به سه دسته روش‌های آنالیز حرارتی، روش‌های بیوشیمیایی و روش‌های آنالیز تقریبی و نهایی تقسیم کرد	Mohalik, and Lester	۲۰۱۶
بر روی فومی سه فازی با خاصیت کنترل احتراق خودبه خودی زغال سنگ تحقیق کرد؛ و نتیجه گرفته که این فوم اثر خنک کننده بر زغال سنگ دارد و سرعت واکنش اکسیداسیون را کاهش می‌دهد	Gang Wang et al.	۲۰۱۶
به ارائه روشی برای پیش‌گیری و کنترل خودسوزی زغال سنگ پرداخت. در این پژوهش نتیجه گرفته شد بهترین روش پیش‌گیری از خودسوزی و کنترل آتش‌سوزی به پنج مرحله شامل تشخیص، پیش‌گیری، آب بندی، تزریق و تنظیم فشار تقسیم می‌شود	Wei Lu et al.	۲۰۱۷
به بررسی مروری روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی قابلیت خودسوزی لایه‌های زغال سنگ پرداختند	Safari and et al.	۲۰۱۸

از مطالب جدول (۳-۱) این طور برمی‌آید که تاکنون مطالعات وسیعی در خصوص چگونگی پیدایش، پیش‌بینی، پیش‌گیری، کنترل و تأثیر پارامترهای مختلف در خودسوزی زغال سنگ انجام گرفته است. بیشتر پژوهش‌گران بر این موضوع تأکید دارند که عوامل ذاتی نقشی اساسی در تمایل به خودسوزی ایفا می‌کنند که در فصل دو به آن اشاره شد اما روش‌هایی 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 همان گونه که ملاحظه می‌شود، تعداد قابل توجهی از روش‌ها برای پیش‌بینی درجه خودسوزی زغال سنگ وجود دارد. بسیاری از پژوهشگرها جهت ارزیابی تمایل زغال سنگ به خودسوزی به انجام آزمایش‌های گوناگون در کشورهای مختلف پرداخته‌اند. برای مثال می‌توان به روش کاوش تفاضل گرماسنجی در آفریقای جنوبی،



روش تعیین دمای نقطه تقاطع در هند، شاخص U در روسیه، شاخص اولپینسکی در لهستان، شاخص کالریمتری در آمریکا اشاره کرد. این شاخص‌ها برای بررسی تمایل زغال‌سنگ به خودسوزی استفاده می‌شوند. در ادامه پر کاربردترین روش‌ها برای تعیین پتانسیل خودسوزی مورد بررسی قرار گرفته است.

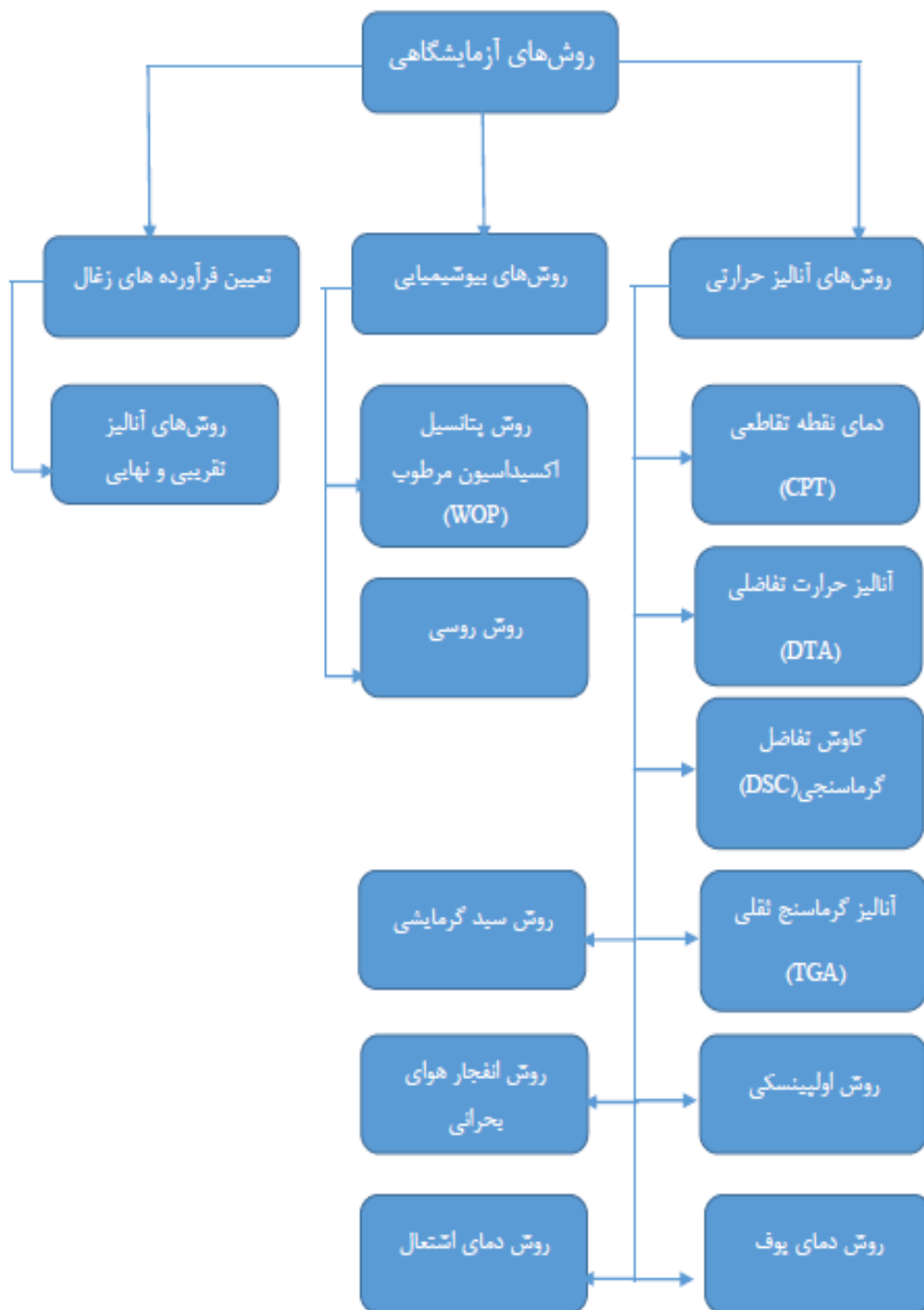
### ۳-۳- روش‌های بررسی پتانسیل خودسوزی زغال‌سنگ

یکی از مشکلات اصلی در معدنکاری زغال‌سنگ آتش‌سوزی در نتیجه گسترش پدیده خودسوزی است، بنابراین با توجه به خطرات ناشی از این پدیده؛ بررسی مسائل فنی، اقتصادی و ایمنی در حین انجام فرآیند معدنکاری امری ضروری است. برای جلوگیری از وقوع این مشکلات باید درک صحیحی از مکانیزم پدیده خودسوزی، پارامترهای مؤثر و راه‌های پیش‌بینی و بررسی قابلیت خودسوزی در اختیار داشت تا بتوان از وقوع بسیاری از این آتش‌سوزی‌ها با اقدامات پیش‌گیرانه‌ی مناسب جلوگیری کرد. روش‌های مختلفی برای بررسی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ وجود دارد. این روش‌ها به طور کلی به سه دسته روش‌های سیستمی، روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های سنجش از دور تقسیم می‌شود.

### ۳-۳-۱- روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ

در روش‌های آزمایشگاهی به بررسی موضوع از طریق ارزیابی نتایج تست‌های انجام شده بر روی نمونه‌های زغالی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳-۱) مشاهده می‌شود، روش‌های آزمایشگاهی شامل سه دسته کلی بررسی پارامترهای مؤثر بر خودسوزی در ترکیبات شیمیایی، روش‌های بیوشیمی و روش‌های آنالیز حرارتی است. از مزایای روش‌های آزمایشگاهی می‌توان 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.

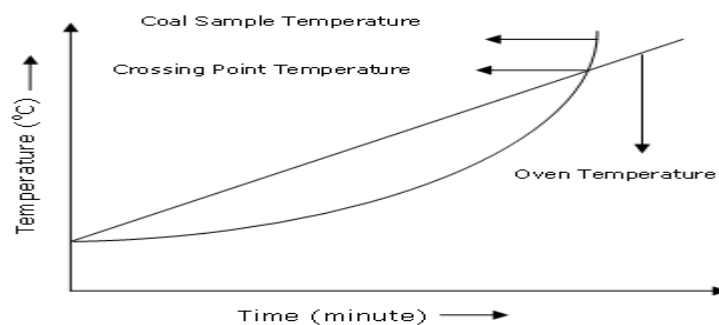


شکل ۳-۱: روش‌های آزمایشگاهی بررسی پتانسیل خودسوزی

### ۳-۱-۱-۱- روش های آنالیز حرارتی

#### الف- روش دمای نقطه تقاطعی (CPT)<sup>۱</sup>

روش دمای نقطه تقاطعی یکی از روش‌هایی است که به طور گسترده برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ استفاده می‌شود. در این روش ابتدا حدود (۶۰ گرم) نمونه زغال سنگ را پودر کرده و در یک لوله آزمایش قرار داده و سپس در محفظه آون قرار می‌گیرد. سپس نمونه زغال درون لوله، در معرض حرارت و اکسیژن با نرخ ثابت فزاینده قرار داده می‌شود. این نرخ افزایش دما و اکسیژن و از پیش تعیین شده است و میانگین افزایش دما  $1 \frac{C}{min}$  و جریان هوا  $80 \frac{ml}{min}$  است. از آنجا که فرایند اکسیداسیون زغال سنگ یک واکنش گرماده است، گرما بوجود آمده باعث افزایش دمای زغال سنگ می‌شود، بنابراین با گذشت زمان اختلاف دمای زغال سنگ و کوره کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۲-۳) درجه حرارت کوره و نمونه زغال سنگ در هر دقیقه ثبت می‌شود تا درجه حرارت زغال سنگ از درجه حرارت آون عبور کند. این دمای برابر سازی به عنوان دمای نقطه تقاطع (CPT) نامیده می‌شود و مطابق جدول (۲-۳) هر چه نقطه برخورد دو نمودار به مبدأ نزدیک تر باشد قابلیت زغال سنگ برای خودسوزی بیشتر است (mohalik & lester, 2016; Mahadevan & ramlu, 1985).



شکل ۳-۲: نمودار تعیین درجه حرارت در روش نقطه تقاطع (mohalik & lester, 2016)

<sup>1</sup>-Crossing Point Temperature

جدول ۳-۲: طبقه‌بندی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ بر اساس CPT (Mahadevan & ramlu, 1985)

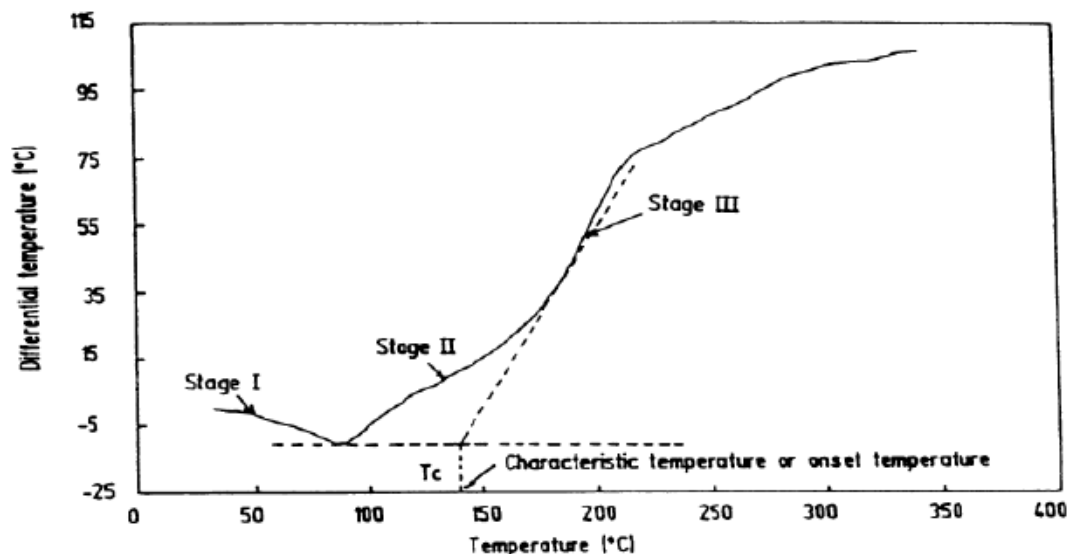
قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ	مقدار CPT
زیاد	۱۲۰ تا ۱۴۰
متوسط	۱۴۰ تا ۱۶۰
کم	بیشتر از ۱۶۰

### ب- آنالیز حرارت تفاضلی (DTA)<sup>۱</sup>

این روش برای اندازه‌گیری تغییرات دمایی در نمونه‌های زغال‌سنگ، مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش DTA، با استفاده از مقدار کمی نمونه (کمتر از ۲۰ میلی‌گرم) زغال‌سنگ 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 (۳-۳) 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 زغال برای خودسوزی مرتبط است. از مرحله سوم به بعد واکنش‌های

<sup>1</sup>-differential thermal analysis

گرماده رخ داده کامل می شود و دما به شدت افزایش می یابد ( Nimaje et al, 2010; Banerjee & Chakravart, 1967).



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

### پ- کاوش تفاضل گرماسنجی (DSC)<sup>۱</sup>

روش DSC برای ارزیابی قابلیت اکسیداسیون زغال سنگ استفاده می شود؛ در این روش نمونه زغال سنگ و ظرف با حرارتی یکسان برای مدتی گرم می شوند، که باعث عدم تفاوت در انرژی ناشی از هر نوع بوته می شود. در این روش، تفاوت بین مقدار گرما مورد نیاز برای افزایش دمای نمونه و مقدار گرمای لازم برای بالا بردن دمای مواد مرجع، به عنوان تابعی از دما اندازه گیری می شود و فرآیندهای گرماگیر و گرمازا در نمونه زغال سنگ اتفاق می افتد که بیانگر فرآیند گرمایش خود به خودی است (mohalik & lester, 2016).

<sup>1</sup>-Differential Scanning Calorimetr

## ت- آنالیز گرماسنجی ثقلی (TGA)<sup>۱</sup>

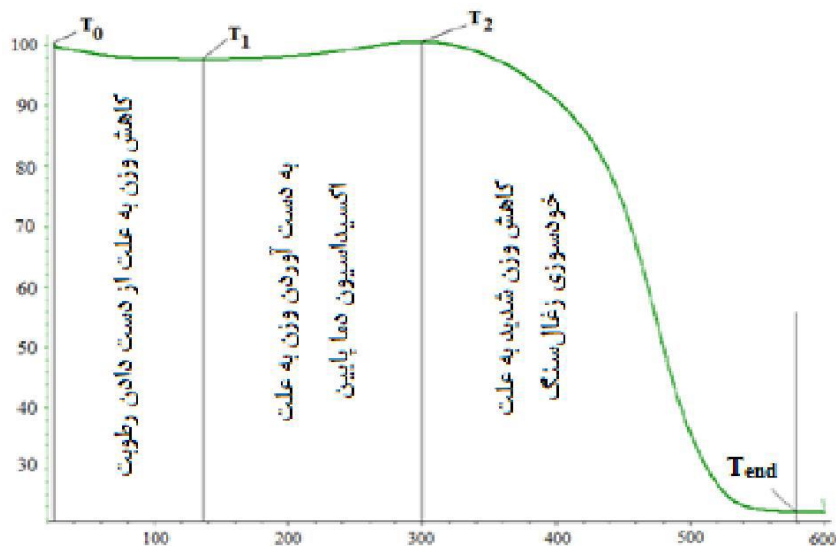
در این روش بعد از تهیه و خرد کردن نمونه‌های زغال‌سنگ به اندازه کمتر از ۵۰ مش (کمتر از ۲۹۷ میکرومتر) برای جلوگیری از اکسیداسیون، درکیسه‌های پلاستیکی آب‌بند<sup>۲</sup> فریزر نگهداری می‌شوند. در این روش ۱۳ تا ۱۴ میلی‌گرم از نمونه زغال‌سنگ خرد شده در یک ظرف پلاتینیوم قرار داده شده و داخل دستگاه TGA نگهداری می‌شود. در این آزمایش، جریان اکسیژن با نرخ ده میلی‌لیتر بر دقیقه و جریان نیتروژن با نرخ ۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه از نمونه زغال‌سنگ گذر می‌کند. دمای آون برای رسیدن به نرخ افزایش دمای ده درجه سانتی‌گراد بر دقیقه با دمای اولیه ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد کنترل می‌شود. آزمایش تا زمانی که وزن نمونه از دست نرود ادامه پیدا می‌کند. زمان تقریبی انجام آزمایش در حدود یک ساعت است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷).

دما و وزن نمونه به دقت توسط یک آنالیزور در طی فرآیند اندازه‌گیری می‌شود و منحنی‌های مربوطه ترسیم می‌شوند که نمونه‌ای از منحنی‌های TGA در شکل (۲-۴) آورده شده است. به طور ایده‌آل، یک فرآیند کامل اکسیداسیون می‌تواند به سه بخش الگوی تغییراتی از منحنی TGA تبدیل 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  $T_p$  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).

<sup>1</sup>-Thermal Gravimetry Analyzer

<sup>2</sup>- Sealed Plastic Bags

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).

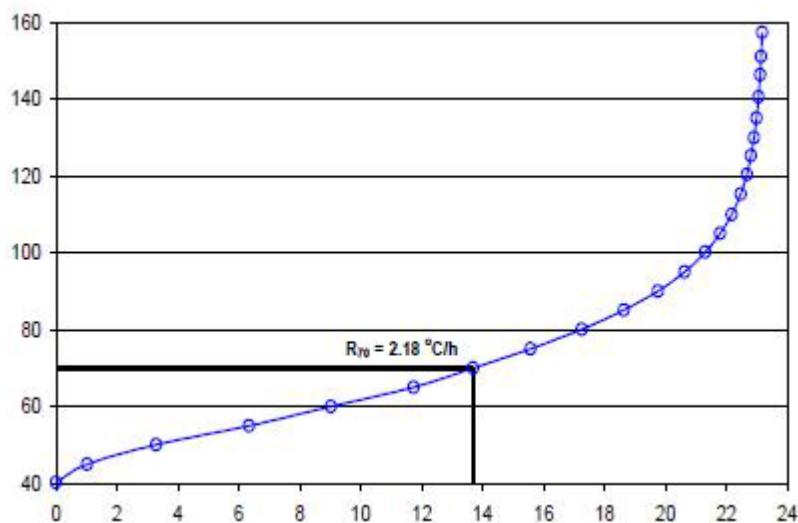


شکل ۳-۴: نمونه منحنی TGA (Wang. and Luo, 2011)

### ج- روش نرخ گرمایش خودبه خودی R<sub>70</sub>

روش R<sub>70</sub> یک روش آدیباتیک است که معمولاً برای رده‌بندی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ استفاده می‌شود. در این روش ابتدا یک نمونه ۱۵۰ گرمی از زغال‌سنگ که بعد از خردایش و آسیاب ابعاد آن به کمتر از ۲۱۲ میکرومتر رسیده را به مدت ۱۶ ساعت درون یک آون قرار داده تا در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد توسط نیتروژن خشک شود. پس از آن، نمونه زغال‌سنگ که همچنان تحت جریان نیتروژن قرار دارد را تا دمای ۴۰ درجه خنک می‌شود. زمانی که دمای زغال‌سنگ در ۴۰ درجه سانتی‌گراد تثبیت شد، جریان اکسیژن به مقدار ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه از نمونه گذر می‌کند و مطابق شکل (۳-۵) افزایش دمای ناشی از

گرمایش خودبه خودی زغال در فاصله ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد ثبت می‌شود. میانگین افزایش دما بین این دو مقدار شاخص گرمایش خودبه خودی  $R_{70}$  نامیده می‌شود و واحد آن  $\frac{C}{h}$  است. هر چه مقادیر  $R_{70}$  بیشتر باشد، گرایش زغال‌سنگ به خودسوزی بیشتر است (Beamish et al, 2005).



شکل ۳-۵: نمودار نرخ گرمایش خودبه خودی  $R_{70}$  (Wang, and Luo, 2011)

#### د- روش اولپینسکی<sup>۱</sup>

در این روش، مایع کینولین در یک کوره الکتریکی حرارت داده می‌شود تا در دمای ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بخار کینولین تولید کند. نمونه های زغال‌سنگ پس از خردایش و آسیاب و عبور از مش ۷۲ به صورت گلوله‌های ۱ گرمی در می‌آیند. کینولین با نرخ از پیش تعیین شده در جو اکسیژن جریان می‌یابد و گلوله‌های زغال‌سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطابق شکل (۳-۶) در زمان گرم شدن گلوله های زغالی، منحنی دما-زمان پیوسته توسط یک ترموکوپل ثبت شده، تا دما به ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد برسد و نرخ افزایش دمای نمونه در این نقطه، میزان گرایش زغال‌سنگ به خودسوزی را نشان می‌دهد. این شاخص به عنوان شاخص اولپینسکی شناخته شده و توسط  $SZ_a$  نشان داده شده می‌شود. همچنین اصلاح شدهی شاخص  $SZ_a$  برای

<sup>۱</sup>-olpinski index

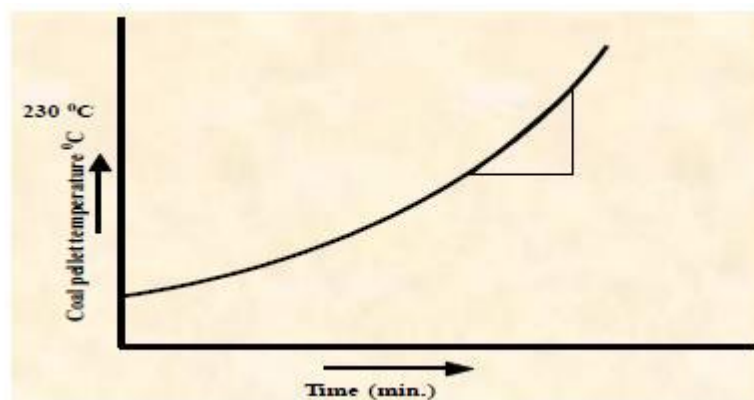


مقدار خاکستر را با  $SZ_b$  نشان می‌دهند. مطابق جدول (۳-۳) و رابطه (۱-۳) هر چه شاخص  $SZ_b$  بیشتر باشد گرایش نمونه به خودسوزی بیشتر است (Karmakar & Banerjee, 1989).

$$SZ_b = SZ_a \frac{100}{100 - Aa} \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

$SZ_b$  شاخص گرمایش خودبه خودی بدون خاکستر

$Aa$  درصد خاکستر



شکل ۳-۶: نمودار دما زمان روش اولپینسکی (Karmakar & Banerjee, 1989)

جدول ۳-۳: رده بندی تمایل خودسوزی زغال سنگ (Nimaje & Tripathy, 2016)

وضعیت خودسوزی زغال سنگ	$SZ_b \left( \frac{C}{Min} \right)$
ضعیف	کمتر از ۸۰
متوسط	۸۰ تا ۱۲۰
شدید	بیشتر از ۱۲۰

## ز- دمای پوف<sup>۱</sup>

این روش در اواسط قرن بیستم در روسیه پیشگام بود. در این روش نمونه زغال سنگ با برخی از مواد افزودنی مانند ( $\text{NaNO}_2$ ) با نسبت مشخص (معمولا ۱:۲) مخلوط شده و درون راکتور واکنش قرار می‌گیرد. سنجش و ثبت دمای نمونه نسبت به زمان، تا زمانی که نمونه مشتعل شود ادامه می‌یابد که به آن دمای پوف می‌گویند. این آزمایش را می‌توان با تغییر مواد شیمیایی (جایگزینی  $\text{NaNO}_2$  با  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) اصلاح کرد که دمای پوف را برای نمونه کاهش می‌دهد. از این روش اغلب برای ارائه یک شاخص حمایتی برای مقایسه‌ی گرایش نمونه به احتراق خودبه خودی استفاده می‌شود (Banerjee, 2000).

جدول ۳-۴: رده بندی تمایل خودسوزی زغال سنگ (Vaselovski et al, 1951)

$T_R$	تمایل خودسوزی زغال سنگ
کمتر از ۱۰	بدون خطر
۱۰ تا ۲۵	تمایل کم
بیشتر از ۲۵	تمایل زیاد

## ن- روش سبد گرمایشی<sup>۲</sup>

اصول عملیاتی این روش بسیار شبیه به روش CPT است، به عنوان مثال، حداکثر دمای نمونه از پیش تعیین شده و نرخ افزایش دما برای نمونه تا زمانی که نقطه اشتعال مشخص شود، اعمال می‌شود. نمونه زغال آماده شده در داخل یک سبد با اندازه و شکل خاص قرار می‌گیرد تا مانند یک جسم جامد رفتار کند و دمای کوره به تدریج افزایش می‌یابد تا به سطح درجه حرارت از پیش تعیین شده برسد. اگر سبد زغال

<sup>۱</sup>-puff temperature

<sup>۲</sup>-basket heating testing method

سنگ آتش نگیرد، فرآیند با افزایش سطح دمای از پیش تعیین شده تکرار می‌شود ( mohalik & lester, 2016).

### و- روش انفجار هوای بحرانی (CAB)<sup>1</sup>

واکنش زغال‌سنگ‌های مختلف به ترکیب با اکسیژن متفاوت است. اغلب واکنش‌های زغال‌های اکسیده سریع‌تر اتفاق می‌افتد. میزان واکنش‌پذیری زغال‌سنگ با اکسیژن توسط پارامتر انفجار هوای بحرانی مشخص می‌شود. این حداقل میزان هوا لازم است که آتش پنهان زغال‌سنگ را در یک فضا با ابعاد مشخص شده حفظ کند. هر چه زغال‌سنگ نسبت به هوا واکنش‌پذیرتر باشد، مقدار CAB از رابطه (۲-۳) محاسبه شده و هر چه پایین‌تر باشد، خطر خودسوزی زغال‌سنگ بیشتر است (Sahu et al, 2005).

$$\text{CAB} = ((1549 * f * V * (P + a - h)) / ((273.15 + T_w) * d)) \quad \text{رابطه (۲-۳)}$$

P- فشار اتمسفر (میلیمتر جیوه) ، V- نرخ انفجار هوا ( k / min ) ، d- قطر اتاق احتراق (میلی متر)

f- ضریب اصلاح گاز متر (۰/۱) ، a- فشار سنج (میلیمتر جیوه) ، h- فشار بخار آب (میلیمتر جیوه)

T<sub>w</sub>- دمای آب

---

<sup>1</sup>-Critical Air Blast

## ی- روش دمای اشتعال<sup>۱</sup>

این روش حداقل درجه حرارتی که زغال سنگ مشتعل می‌شود را حساب می‌کند. ابتدا باید دستگاه را برای تعیین دمای اشتعال، که شامل لوله عمودی دو سر باز با قطر داخلی ۵۰ میلیمتر و طول ۳۰۰ میلیمتر، سیستم پراکنده کردن غبار، یک دریچه ماریپیچ، یک مخزن برای هوا، یک فشارسنج جیوه، یک برج خشک کن و یک لامپ آسپیراتور است را تنظیم کنیم. سپس ۲۰۰ میلی‌گرم از نمونه آسیاب شده که از مش ۲۰۰ عبور کرده، در لوله ریخته می‌شود. سپس هوا از مخزن عبور کرده و یک مخلوط از گرد زغال و هوا در آن ایجاد می‌کند. برای از بین بردن خطاهای ناشی از رطوبت باید، قبل از پخش شدن، هوا خشک شود. حداقل دمایی که این مخلوط گرد زغال و هوا آتش می‌گیرد، دمای اشتعال می‌نامند (Nimaje et al, 2010).

## ۳-۱-۳-۲- روش‌های بیوشیمی<sup>۲</sup>

### الف- روش پتانسیل اکسیداسیون مرطوب (wop)<sup>۳</sup>

یک روش الکتروشیمیایی، برای تعیین گرایش زغال سنگ به اکسیداسیون با استفاده از اکسیدان‌هایی مانند  $H_2O_2$ ،  $KMnO_4$ ،  $Br_2$  و غیره است. در این روش ابتدا حدود ۰,۵ گرم از نمونه زغال سنگ آسیاب شده با ابعاد کمتر از ۲۱۲ میکرون را در دمای محیط به یک ظرف حاوی پرمنگنات پتاسیم در محلول هیدروکسید پتاسیم ریخته و با یک الکتروود مرجع کالومل و الکتروود کربن در آن هم زده می‌شود. در این هنگام اختلاف پتانسیل (EMF)، با استفاده از یک میلی‌ولت‌متر اندازه‌گیری می‌شود، سپس نمودار  $\Delta E$  نسبت به زمان رسم شده که بیانگر گرایش نمونه زغال سنگ به اکسیداسیون است (Panigrahi, 2015; mohalik & lester, 2016).

<sup>1</sup>-flammiability temperature

<sup>2</sup>-oxygen adivity

<sup>3</sup>-wet oxidation potential

## ب- روش روسی<sup>۱</sup>

این روش مقدار اکسیژن جذب شده توسط یک نمونه زغال سنگ در طول یک روز را اندازه گیری می کند؛ که مقدار اکسیژن جذب شده، به صورت غیر مستقیم با اندازه گیری گاز تولید شده در طول روز محاسبه می شود. ۱۰۰ گرم از یک نمونه زغال سنگی که تازه خردایش شده است برای جذب اکسیژن، در یک ظرف شیشه ای به مدت ۱ روز نگهداری می شود. پس از یک روز هوای مخزن آنالیز شده و میزان اکسیژن جذب شده تعیین می شود. میزان جذب اکسیژن با قابلیت زغال سنگ برای خودسوزی نسبت مستقیم دارد. از جمله محدودیت های این روش این است که پیش بینی دقیقی برای زغال سنگ حاوی رطوبت بالا ارائه نمی دهد (Banerjee, 2000).

## ۳-۱-۳-۳- تعیین فرآورده های زغال سنگ

### الف- آنالیز تقریبی و قطعی<sup>۲</sup>

آنالیز تقریبی به عنوان یک روش ساده برای تعیین توزیع محصولات موجود در زغال کاربرد دارد. ترکیبات اصلی زغال سنگ با روش آنالیز تقریبی تعیین می شود. زمانی که نمونه زغال سنگ تحت شرایط خاصی گرم می شود، محصولات آن به چهار گروه رطوبت، ماده فرار، کربن، و خاکستر تقسیم می شوند. هدف از آنالیز تقریبی زغال سنگ، تعیین مواد فرآورده های موجود در زغال سنگ است. روش آنالیز نهایی مقدار کربن، هیدروژن، اکسیژن، گوگرد و سایر عناصر را در بین نمونه زغال سنگ تعیین می کند. نتایج این آزمایش ها در بررسی پتانسیل خودسوزی زغال سنگ استفاده می شود ( mohalik & lester, 2016 ).

---

<sup>1</sup>-Russian u index

<sup>2</sup>-peroximate and ultimate analysis

### ۳-۲-۳- روش های سیستمی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ

رخداد مکرر پدیده خودسوزی 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 که با توجه به اقتضای تحقیق حاضر و دسترسی محدود به این منابع، بخشی از این سیستم‌های ارزیابی جمع بندی شده است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷)

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،<sup>۱</sup> نسبت گراهام،<sup>۲</sup> نسبت  $\frac{CO_2}{CO}$  و نسبت  $\frac{N_2}{CO+CO_2}$  و از جمله سیستم‌های طبقه‌بندی می‌توان به سیستم لهستانی،<sup>۳</sup> سیستم هندی، سیستم ارزیابی<sup>۴</sup> SES، سیستم ارائه شده توسط Singh و همکاران و سیستم ارزیابی شاخص پتانسیل خودسوزی زغال سنگ<sup>۵</sup> 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.

---

1- Jones- Trickett Ratio

2- Graham's Ratio

3- Polish System

4- Sponcom Expert System

5- Coal Spontaneous Combustion Potential index

### ۳-۳-۳- روش سنجش از دور<sup>۱</sup>

دورسنجی یا سنجش از راه دور یک ابزار مفید که با استفاده از آن می‌توان محدوده وسیعی را مورد بررسی قرار داد. دور سنجی بیشتر در مواردی که آتش‌سوزی‌ها در نزدیکی سطح زمین اتفاق افتاده است کاربرد دارد. این روش با ثبت تغییرات حرارتی سطح زمین، تغییر فرونشست زمین که ناشی از آتش‌سوزی می‌باشد، بررسی‌های لازم را صورت می‌گیرد. تجزیه و تحلیل تصاویر حرارتی بر اساس انرژی گرمایی قابل توجهی است که در هنگام آتش‌سوزی‌های زغالی آزاد می‌شود (Voigta et al, 2004).

تصویر برداری هوایی بر پایه سنجش از دور در اواخر قرن نوزدهم میلادی معرفی شد و ماهواره‌های بر پایه سنجش از دور در سال ۱۹۶۰ میلادی شروع به کار کردند اما تا سال ۱۹۷۲ به جزء برای مقاصد نظامی استفاده نمی‌شدند که با گذشت زمان، استفاده از آن‌ها افزایش یافت (Gangopadhyay, 2008).

فرآیند کار و اجزای مختلف این روش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (Gangopadhyay, 2008):

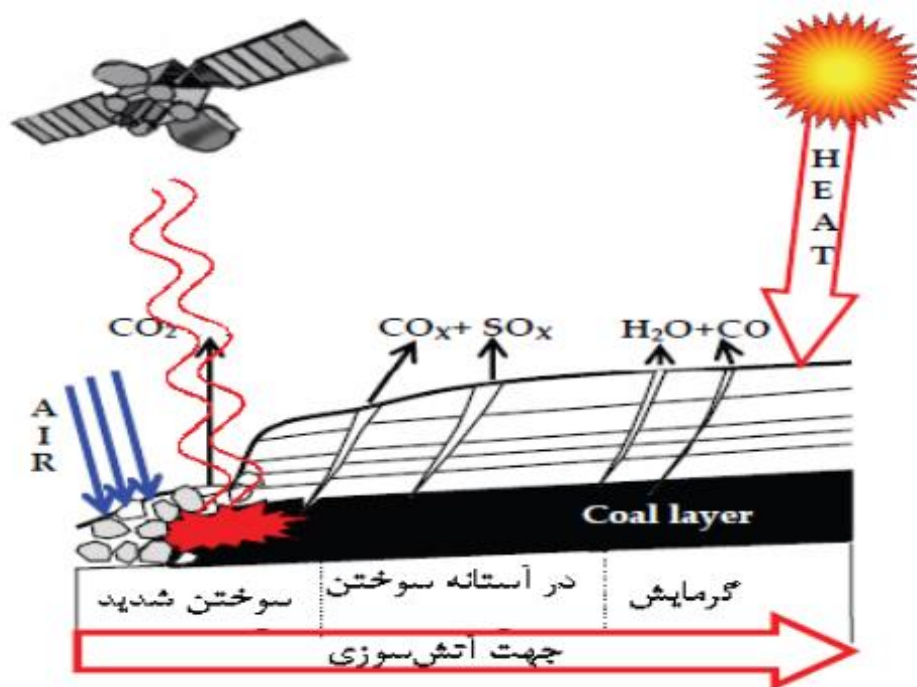
- ✓ یک منبع انرژی برای پرتو افکنی به هدف مورد نظر
- ✓ پرتو افکنی به منظور انتقال انرژی به هدف مورد نظر
- ✓ فعل و انفعالات با هدف که وابسته به خصوصیات هدف و پرتو افکن است.
- ✓ فعل و انفعالات با اتمسفر جو، که تابش و بازتابش انرژی از هدف از طریق اتمسفر جو انجام می‌شود.
- ✓ ثبت انرژی در گیرنده که تشعشعات بازگشتی را ثبت می‌کند.
- ✓ پردازش و تبدیل اطلاعات ثبت شده توسط گیرنده‌ها به عکس.
- ✓ تجزیه و تحلیل عکس‌های پردازش شده.

---

<sup>1</sup>- Remote Sensing

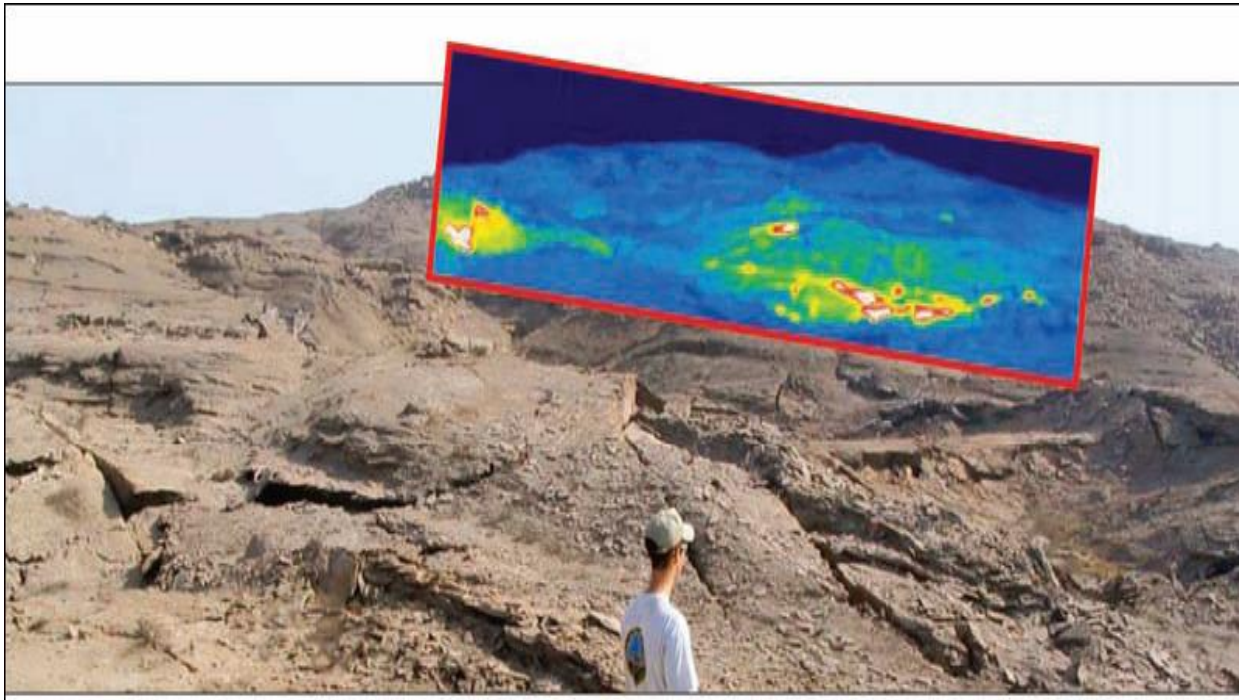
در هنگام وقوع آتش‌سوزی‌های زغالی در سطح زمین، انرژی گرمایی قابل توجهی ساطع می‌شود (شکل ۳-۷) که این انرژی به راحتی توسط پردازشگر گرمایی سنجش از راه دور قابل شناسایی است. ذکر این نکته ضروری است که برای استفاده از روش دورسنجی به منظور شناسایی آتش‌سوزی‌های زغالی باید برخی نکات را در نظر گرفت که در زیر به آن اشاره شده است (Gangopadhyay, 2008).

- ✓ برای تفکیک حرارت ناشی از آتش‌سوزی‌ها از انرژی گرمایی خورشید، بایستی داده‌های سنجش از راه دور در شب ثبت شوند تا اشتباهی رخ ندهد و به راحتی بتوان آنومالی‌های دمایی را تعیین کرد.
- ✓ استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی منطقه
- ✓ استفاده از دانش زمین‌شناسی به منظور حذف آنومالی‌های اشتباه



شکل ۳-۷: روش آشکار سازی اکسیداسیون زغال سنگ به کمک روش دورسنجی (Gangopadhyay, 2008)





شکل ۳-۸: تصویر دوربین حرارتی که مناطق دارای دمای پس‌زمینه، آبی رنگ است. رنگ‌های سفید، قرمز و زرد مناطقی را که گازهای CO و CO<sub>2</sub> تولید شده را نشان می‌دهند (Claudia Kunzer et al, 2005)

بعضی پارامترها در برآورد دمای سطحی ناشی از آتش‌سوزی مؤثر هستند و در بررسی تصاویر حرارتی باید به این عوامل توجه کرد. از جمله این موارد می‌توان به شرایط جوّ بین آتش‌سوزی و دریافت‌کننده‌های سنجش از راه دور، خواص ذاتی آتش شامل (قابلیت تابندگی و دمای آتش)، شرایط نواحی اطراف شامل (نوع خاک، توپوگرافی، دمای محلی، شکاف‌ها و شکستگی‌های سطحی و عمق آتش)، رطوبت خاک و مشخصات گرمایی سنگ‌ها اشاره کرد. برای مثال برخی از سنگ‌ها که ظرفیت گرمایی بالایی دارند در عکس‌های شبانه به عنوان آنومالی آتش‌سوزی زغالی در نظر گرفته شده و باعث بروز خطا می‌شوند (Gangopadhyay, 2008).

### ۳-۴- جمع‌بندی

خودسوزی زغال‌سنگ یکی از دلایل ایجاد آتش‌سوزی در معادن زغال‌سنگ محسوب می‌شود که دارای تأثیرات زیان‌آور اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی است. بنابراین مطالعه و بررسی خطر خودسوزی در معادن زغال‌سنگ منجر به توسعه و پیشرفت طرح مدیریت خودسوزی می‌شود. به همین خاطر در این فصل با توجه به موضوع مورد مطالعه، منابع و پیشینه‌ی خودسوزی زغال‌سنگ مورد بررسی قرار گرفت. با مطالعه سابقه تحقیق 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 با 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

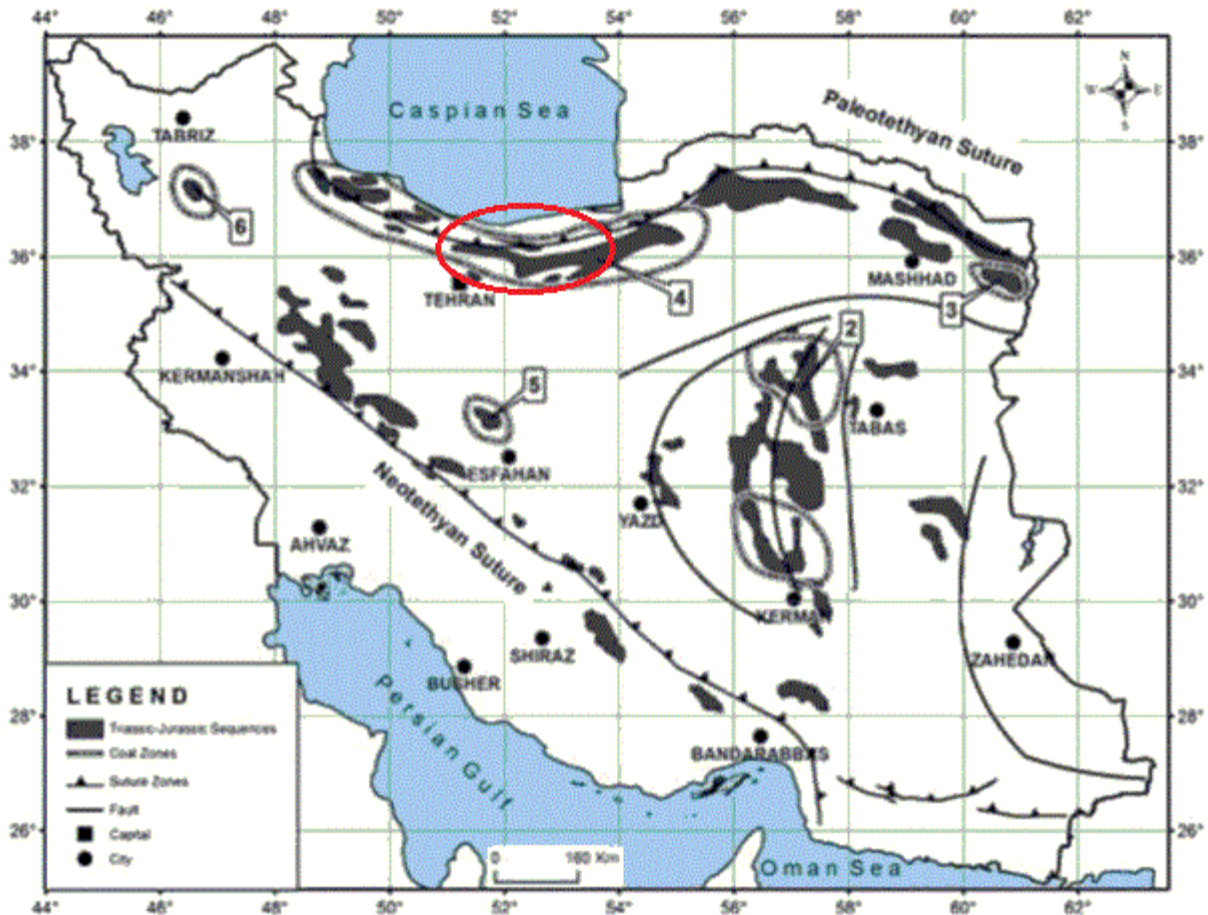
## ۴-۱- مقدمه

خودسوزی زغال سنگ یک فرآیند خود گرمایشی، گرمازا است که می‌تواند در لایه‌های زغال زیرزمینی یا در لایه‌های زغال روباز در سطح زمین ایجاد شود. خودسوزی زغال سنگ باعث اثرات مخرب زیست محیطی، نشست سطح زمین و از بین رفتن میلیون‌ها تن زغال سنگ می‌شود. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوزه زغالی البرز مرکزی است. تاریخچه اکتشاف در حوزه زغال سنگ البرز مرکزی به حدود سال ۱۳۱۴ برمی‌گردد که به هنگام احداث خطوط راه‌آهن سراسری در زیراب صورت گرفت از این رو مجموعه معادن البرز مرکزی را می‌توان از قدیمی‌ترین معادن زغال سنگ ایران دانست. پیریت از جمله پارامترهای ذاتی موثر بر خودسوزی زغال سنگ است. در این فصل به بررسی پارامترهای ذاتی مثل پیریت، مواد فرار، رطوبت، خاکستر و ماسرال‌های نمونه‌های مختلف و در نهایت با توجه به مزیت‌های روش‌های آزمایشگاهی از روش دمای نقطه تقاطعی (CPT) برای بررسی تأثیر پیریت بر قابلیت خودسوزی زغال سنگ استفاده شده است. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها پرداخته شده است.

## ۴-۲- حوزه زغال سنگ البرز مرکزی

مجموعه معادن زغال سنگ البرز مرکزی یکی از معادن زغال کشور است که به صورت زیرزمینی استخراج می‌شود. این مجموعه شامل کارخانه‌ی زغال شویی انجیرتنگه است که در کنار خط آهن تهران قائمشهر قرار دارد. تاریخچه عملیات اکتشافی در حوزه‌ی البرز مرکزی که بیش از ۳۱،۱۱۱ کیلومترمربع از استان مازندران را در بر می‌گیرد به حدود سال ۱۳۱۴ برمی‌گردد که به هنگام احداث خطوط راه‌آهن سراسری در زیراب صورت گرفت که در نهایت در سال ۱۳۵۱ به بهره‌برداری قسمتی از معدن کارمزد در این حوالی انجامید. به همین جهت مجموعه معادن البرز مرکزی را می‌توان از قدیمی‌ترین معادن زغال سنگ ایران دانست. مناطق زغال دار در ناحیه البرز مرکزی به ترتیب

از شرق به غرب شامل حوضه زغال‌دار چهاردشت (معدن کیاسر)، حوضه بزرگ زغال‌دار آلاشت، حوضه بزرگ زغال‌دار گلندرود و حوضه زغالی نورود است. در شکل (۴-۱) حوضه زغالی البرز مرکزی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: حوضه زغال سنگ البرز مرکزی (شجاعی، ۱۳۸۷)

#### ۴-۲-۱- مطالعه موردی

ابتدا تعداد ۹ نمونه زغال‌سنگ از معادن مختلف البرز مرکزی شامل معادن کارمزد، کارسنگ، کیاسر، ماهان، بیگ‌سی، گلیران، اروست شرقی، سنم و دنبو جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های معادن بیگ‌سی، گلیران از کارخانه زغال‌شویی واقع در شهر زیراب جمع‌آوری شده و نمونه‌های معادن کارسنگ، کامزد، کیاسر، اروست شرقی، دنبو و سنم از خود معدن جمع‌آوری شد. همچنین نمونه معدن کارسنگ از لایه A5، معدن کارمزد از لایه A12، معدن کیاسر از لایه K18، و معدن سنم از لایه K7 برداشته شد.

در جدول (۱-۴) نام معادن و علامت اختصاری هر معدن آورده شده و همچنین در شکل (۲-۴) موقعیت معادن مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۱-۴: شماره نمونه معادن مورد مطالعه

معادن	علامت اختصاری
کیاسر	KIA
کارسنگ	KAR
گلیران	GLI
دنبو	DON
کارمزد	KAM
اروست شرقی	ORS
ماهان	MAH
سنام	SAN
بیگ سی	BIG



شکل ۲-۴: جانمایی معادن نمونه برداری شده زغال سنگ البرز مرکزی



### ۴-۳- آماده سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه

در ابتدا نمونه‌های تهیه شده مطابق شکل (۴-۳) در آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود با دستگاه سنگ‌شکن فکی خردایش شده و به ابعاد کوچک‌تر تبدیل شد.



شکل ۴-۳: سنگ‌شکن فکی آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود

سپس برای خردایش بهتر نمونه‌های زغال سنگ مطابق شکل (۴-۴) از آسیا گلوله‌ای استفاده شد تا ابعاد زغال سنگ به ۷۵ میکرون برسند.



شکل ۴-۴: مرحله آسیا گلوله‌ای

سپس مطابق شکل (۴-۵) ذرات زغال سنگ با اندازه کم‌تر از ۰/۲۱۰ میلی‌متر با استفاده از سرند مش ۷۰ و الک لرزان جدا شده و نمونه‌ها در بسته‌های پلاستیکی با برچسب مشخص آماده آزمایش شدند.



شکل ۴-۵: سرند ذرات زغال سنگ با مش ۷۰

#### ۴-۴- آنالیز تقریبی

##### ۴-۴-۱- تست رطوبت

برای تعیین میزان رطوبت محتوی زغال سنگ، نمونه زغال سنگ پس از خردایش و آسیا به وسیله سرند شماره ۷۰ الک شده و نمونه‌هایی به وزن تقریباً ۱۲۰ گرم تهیه شد. این نمونه به مدت ۱۳ ساعت در داخل فر قرار داده شده است. با داشتن وزن ظرف و نمونه قبل و بعد از قرار دادن در فر با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، می‌توان میزان رطوبت محتوی زغال سنگ را با استفاده از رابطه (۴-۱) محاسبه کرد.

$$W = \frac{M_t - M_s}{M_t} \times 100 \quad (4-1)$$



W: درصد رطوبت نمونه

$M_t$ : وزن نمونه و ظرف قبل از خشک شدن

$M_s$ : وزن نمونه و ظرف بعد از خشک شدن

در جدول (۲-۴) نتایج حاصل از تست رطوبت نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۲-۴: نتایج اولیه تست رطوبت

علامت اختصاری	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 (%)
KIA	۱۰۶/۴۲	۱۱۸/۴۲	۲۲۴/۸۴	۲۲۳/۳۸	۱/۲۳
KAR	۱۰۲/۱۶	۱۱۵/۴۷	۲۱۷/۶۳	۲۱۶/۵۷	۰/۹۱۸
GLA	۱۰۲/۸۰	۱۲۲/۸۴	۲۲۵/۶۴	۲۲۱/۵۹	۳/۲۹۷
DON	۳۰۸/۲۶	۱۱۲/۰۲	۴۲۰/۲۸	۴۱۸/۲۳	۱/۸۳۰
KAM	۳۰۵/۵۴	۱۴۰/۰۳	۴۴۵/۵۷	۴۴۴/۰۳	۱/۱۰۰
ORS	۱۰۵/۹۱	۱۱۶/۱۹	۲۳۲/۱۰	۲۲۰/۹۵	۰/۹۹۰
MAH	۱۰۷/۹۷	۱۱۳/۲۳	۲۲۱/۲۰	۲۱۷/۰۱	۳/۷۰۰
SAN	۱۰۲/۰۶	۱۱۸/۳۶	۲۲۰/۴۲	۲۱۸/۸۶	۱/۳۱۸
BIG	۹۸/۹۱	۱۲۸/۱۷	۲۲۷/۰۸	۲۲۴/۵۱	۲/۰۰۵

#### ۴-۴-۲- تست خاکستر

برای به دست آوردن درصد خاکستر زغال سنگ، همان طور که در شکل (۴-۶) آمده است، یک گرم نمونه زغال سنگ خشک شده در بوتله سفالی که وزن آن از پیش تعیین شده است قرار داده شد. سپس نمونه زغال سنگ به مدت زمان ۹۰ دقیقه در داخل کوره با دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد حرارت داده می شود. بعد از خارج کردن بوتله از کوره، به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق آن را ننگه داشته و سپس دوباره بوتله وزن شده، و با استفاده از رابطه شماره (۴-۲)، درصد خاکستر هر نمونه تعیین شده است.

$$A = \left( \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \right) * 100 \quad (۴-۲)$$

A-درصد خاکستر

M<sub>1</sub>-جرم بوتله (گرم)

M<sub>2</sub>-جرم بوتله و نمونه (گرم)

M<sub>3</sub>-جرم بوتله و خاکستر (گرم)



شکل ۴-۶: مرحله انجام تست خاکستر

در جدول (۳-۴) نتایج حاصل از تست خاکستر نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۳-۴: نتایج حاصل از تست خاکستر نمونه‌ها

علامت اختصاری	وزن بوته (گرم)	وزن نمونه زغال اولیه (گرم)	وزن بوته و خاکستر بعد از کوره (گرم)	درصد خاکستر (%)
KIA	۳۶/۰۷۱۹	۱/۰۵۳۳	۳۶/۲۱۳۸	۱۳/۴۷۲
KAR	۱۰/۰۹۹۷	۱/۰۲۱۷	۱۰/۲۵۱۳	۱۴/۸۳۸
GLI	۳۵/۶۸۴۱	۱/۰۲۴۰	۳۶/۱۰۶۹	۴۱/۲۸۹
DON	۹/۳۱۹۱	۱/۰۲۸۰	۹/۶۰۴۷	۲۷/۷۸۲
KAM	۱۸/۳۷۲۴	۱/۰۴۶۷	۱۸/۵۷۲۶	۱۹/۱۲۷
ORS	۳۶/۱۳۰۵	۱/۰۱۴۱	۳۶/۱۴۸۱	۱/۷۳۶
MAH	۱۲/۲۵۵۷	۱/۰۱۱۱	۱۲/۲۹۹۸	۴/۳۶۲
SAN	۹/۰۶۷۴	۱/۰۰۰۳	۹/۱۸۷۵	۱۲/۰۰۶
BIG	۸/۵۲۲۴	۱/۰۳۸۷	۸/۶۷۴۰	۱۴/۵۹۵

#### ۳-۴-۴- تست مواد فرار

برای تعیین درصد مواد فرار نمونه‌های زغال‌سنگ، ابتدا ۵ گرم نمونه زغال‌سنگ خشک شده را درون بوته درب

دار قرار داده و سپس مطابق شکل (۴-۷) به مدت ۷ دقیقه داخل کوره با دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت

داده می‌شود. پس از آن بوته را از کوره خارج و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق نگه داشته و پس از خنک شدن

ظرف محتوی نمونه زغال سنگ، وزن آن را به دست آورده و درصد مواد فرار نمونه زغال سنگ با رابطه شماره (۳-۳) را اندازه گیری می شود.

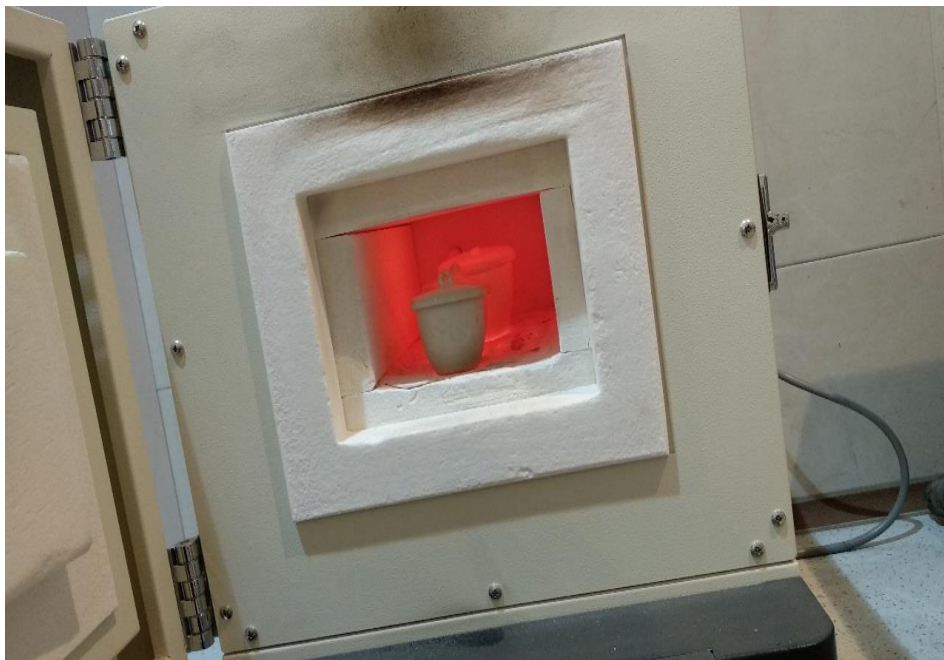
$$V = \left( \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \right) * 100 \quad (3-4)$$

V- درصد مواد فرار

M<sub>1</sub>- جرم بوتله و درب (گرم)

M<sub>2</sub>- جرم نمونه و بوتله به همراه درب قبل از حرارت دادن

M<sub>3</sub>- جرم نمونه و بوتله به همراه درب پس از حرارت دادن



شکل ۴-۷: بوتله حاوی زغال سنگ در کوره

در جدول (۴-۴) نتایج حاصل از تست مواد فرار نمونه‌ها آورده شده است.

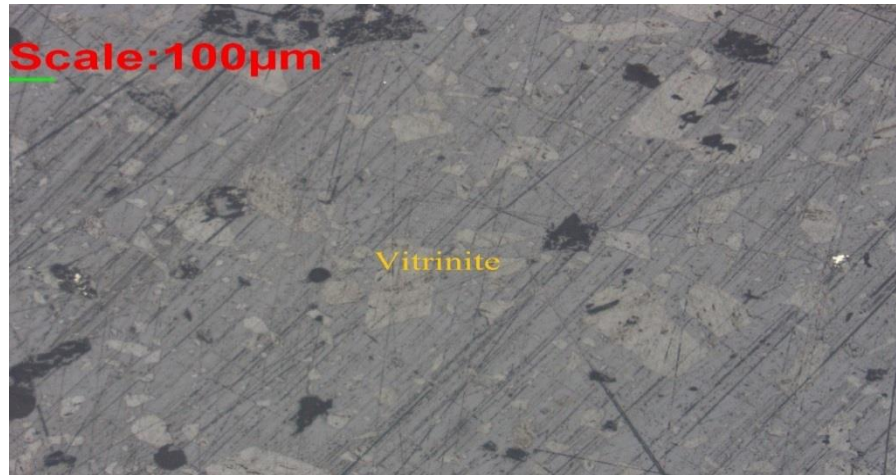
جدول ۴-۴: نتایج حاصل از تست مواد فرار نمونه‌ها

علامت اختصاری	وزن درب (گرم)	وزن بوتله (گرم)	وزن و بوتله (گرم)	وزن نمونه زغال اولیه (گرم)	وزن بعد از کوره (گرم)	درصد مواد فرار (%)
KIA	۱۷/۳۹۷۳	۳۴/۱۲۷۰	۵۱/۵۲۴۳	۵/۰۰۶۲	۵۴/۹۰۴۰	۳۲/۴۹۰
KAR	۱۷/۶۵۰۵	۳۴/۶۴۴۹	۵۲/۲۹۵۴	۵/۰۰۲۰	۵۵/۹۱۹۳	۲۷/۵۵۱
GLI	۱۷/۳۹۶۷	۳۴/۶۴۴۹	۵۲/۰۴۱۶	۵/۰۶۷۸	۵۶/۱۸۱۹	۱۸/۳۰۲
DON	۱۷/۳۹۵۵	۳۴/۶۳۹۲	۵۲/۰۳۴۷	۵/۰۱۳۸	۵۵/۸۱۰۷	۲۴/۶۸۸
KAM	۱۷/۳۹۶۶	۳۴/۶۴۰۸	۵۲/۰۳۴۷	۵/۰۵۸۷	۵۵/۴۲۹۷	۳۲/۹۴۱
ORS	۱۷/۶۵۰۸	۳۴/۱۲۳۹	۵۱/۷۷۴۷	۵/۰۲۰۰	۵۵/۲۰۶۸	۳۱/۶۳۱
MAH	۱۷/۶۴۹۳	۳۴/۹۳۸۸	۵۲/۳۳۴۵	۵/۰۵۰۰	۵۵/۸۸۷۳	۳۴/۶۶۹
SAN	۱۷/۳۹۵۷	۳۴/۱۲۲۹	۵۱/۵۱۸۶	۵/۰۱۷۷	۵۴/۸۱۱۲	۳۴/۳۸۰
BIG	۳۶/۹۱۱۹	۷۱/۱۳۲۹	۱۰۸/۰۴۴۸	۵/۰۰۵۹	۱۱۱/۵۴۶۷	۳۰/۰۴۵

#### ۴-۵- تعیین نوع ماسرال‌ها

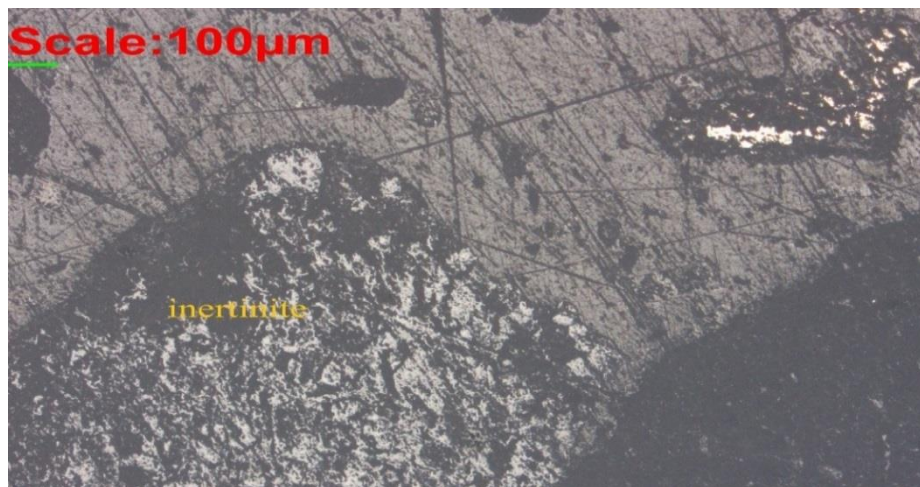
اجزای گیاهی مواد آلی تشکیل دهنده زغال سنگ که ساختمان مشخصی نشان می‌دهد را ماسرال و مواد معدنی آن را مینرال گویند. ماسرال‌ها با پسوندinite شناخته می‌شوند. برای تشخیص نوع ماسرال نیاز به انجام تست مقطع صیقلی و بررسی نتایج تست‌ها در زیر میکروسکوپ می‌باشد که این تست‌ها در کارگاه تهیه مقاطع میکروسکوپی انجام گرفت. به طور کلی ماسرال‌های نمونه‌های زغال‌سنگ البرز مرکزی به سه گروه ویتیرینیت،

اینرتینیت، لیپتینیت تقسیم می‌شود. مطابق شکل (۴-۸) ویتربینیت مهم‌ترین گروه ماسرال زغال‌سنگ است که بخش‌های شفاف و براق را تشکیل می‌دهد، این اجزا که قابلیت ذوب هم دارند در نور انعکاسی خاکستری روشن به نظر می‌رسند.



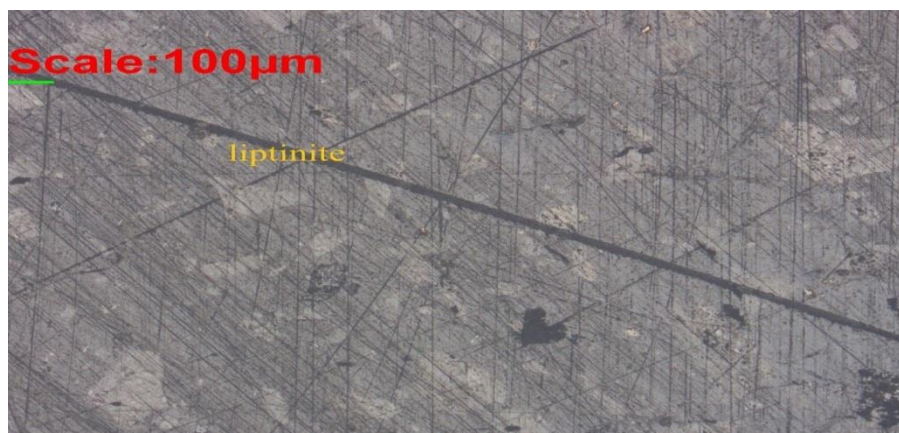
شکل ۴-۸: ماسرال ویتربینیت در نمونه زغال‌سنگ معدن دنبو

گروه اینرتینیت یکی از ماسرال‌های زغال‌سنگ است که در اثر اکسایش بافت‌ها و اجزای کمابیش خرد شده به وجود می‌آیند. همان‌طور که در شکل (۴-۹) آمده اینرتینیت‌ها برخلاف ویتربینیت‌ها مات و کدر هستند و قابلیت ذوب شدن ندارند، این ماسرال‌ها در مقاطع صیقلی انعکاس نوری بالایی دارند.



شکل ۴-۹: ماسرال اینرتینیت در نمونه زغال‌سنگ معدن ماهان

گروه لیپتینیت یا اکسینیت یکی دیگر از ماسرال های زغال سنگ است که شامل اجزایی است که مطابق شکل (۴-۱۰) انعکاس نوری پایینی دارد این نوع بیشتر از تجزیه گیاهان چرب به وجود می آید اکسینیتها در مراحل اولیه دگرگونی در اثر حرارت می سوزند.



شکل ۴-۱۰: ماسرال لیپتینیت در نمونه زغال سنگ معدن اروست شرقی

محاسبه درصد نسبی هر یک از ماسرالها در گذشته با استفاده از حرکت تار رتیکول در امتداد یک خط و شمارش هر یک از ماسرالها صورت می گرفت که به این روش آنالیز خطی گفته می شود. اما امروزه برای تعیین درصد ماسرالهای نمونه زغال سنگ از نرم افزار و روشهای پردازش تصویر استفاده می شود. پس از شناسایی ماسرالها، به منظور تعیین درصد هر ماسرال از ۹ نمونه زغال سنگ البرز مرکزی، برای هر نمونه تستهای مقطع صیقلی آماده شده و ادامه کار به این صورت است که ابتدا تعداد ۱۰ عکس توسط میکروسکوپ Olympus BX51، با بزرگنمایی ۴۰ برابر گرفته شد و مقطع مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر گرفته شده با استفاده از نرم افزار اتوکد پردازش شد، به این صورت که نسبت مساحت هر ماسرال به مساحت کل را برای هر ۱۰ عکس میکروسکوپی حساب کرده و با گرفتن میانگین، درصد ماسرال هر نمونه تعیین شد. نتایج حاصل از تست مقاطع صیقلی در جدول (۴-۵) آورده شده است؛ مطابق نتایج دو ماسرال اینرتینیت و ویتیرینیت درصد بیشتری از ماسرالها را در بر می گیرند.



جدول ۴-۵: نتایج حاصل از تست مقاطع صیقلی

علامت اختصاری	اینترتینیت (%)	لیپتینیت (%)	ویترینیت (%)
KIA	۴۹/۶۷	۵/۱	۴۵/۲۳
KAR	۱۳/۱۵	۷/۹۳	۶۸/۷۲
GLI	۴/۲۹	۱۰/۸۶	۸۳/۳۵
DON	۳۸/۸۱	۲/۱۲	۵۸/۷۷
KAM	۴۸/۹۷	۵/۸	۴۴/۷۳
ORS	۷۵/۶۹	۱/۱۸	۲۳/۱۳
MAH	۲۸/۱۲	۱۰/۰۹	۵۹/۶۴
SAN	۴۸/۶۹	۷,۳	۴۷/۳۱
BIG	۴۸/۹۴	۵/۸۸	۴۴/۷۳

#### ۴-۶- تعیین درصد پیریت

برای تعیین میزان پیریت محتوی هر نمونه زغال سنگ برای هر نمونه تست‌های مقطع صیقلی آماده شده و ابتدا مطابق شکل (۴-۱۱) تعداد ۱۰ عکس توسط میکروسکوپ Olympus BX51، با بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر گرفته شد و مقطع مورد مطالعه قرار گرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار اتوکد، تصاویر به دست آمده پردازش شد و نسبت مساحت پیریت موجود به مساحت کل را برای هر ۱۰ عکس میکروسکوپی حساب کرده و با گرفتن میانگین، درصد پیریت هر نمونه تعیین شد.



شکل ۴-۱۱: عکس تهیه شده از تست مقطع صیقلی حاوی پیریت برای معدن ماهان



در جدول (۴-۶) درصد پیریت به دست آمده برای هر نمونه زغال سنگ آورده شده است که بیشترین مقدار پیریت برای معدن ماهان و کمترین میزان آن برای معدن کیاسر و اروست شرقی است.

جدول ۴-۶: درصد پیریت هر نمونه زغال سنگ

علامت اختصاری	درصد پیریت (%)
KIA	۰/۰۰
KAR	۰/۲۰
GLI	۱/۵۰
DON	۰/۳۰
KAM	۰/۵۰
ORS	۰/۰۰
MAH	۲/۵۰
SAN	۰/۳۰
BIG	۰/۴۵

#### ۴-۷- تست دمای نقطه تقاطعی

مطابق شکل (۴-۱۲) تجهیزات مورد نیاز برای شبیه‌سازی فرآیند خودسوزی زغال سنگ که در آزمایشگاه فرآوری دانشگاه صنعتی شاهرود موجود است شامل یک محفظه کنترل دمای برنامه‌ریزی شده، لوله گاز و یک آون است. محفظه دمایی برنامه‌ریزی شده با استفاده از یک حمام گاز یک دمای یکنواخت برای محیط اطراف ایجاد می‌کند. هوای خشک قبل از رسیدن به رآکتور با عبور از یک لوله مسی به طول ۵۰ میلی‌متر که درون آون قرار دارد، گرم شده است. راکتور واکنش که زغال سنگ در آن قرار می‌گیرد از جنس مس است که رسانای بسیار خوب گرما است. در زیر این بخش یک فضای ۲۰ میلی‌متری مش‌بندی شده از جنس استیل ضد زنگ قرار دارد. این فضای

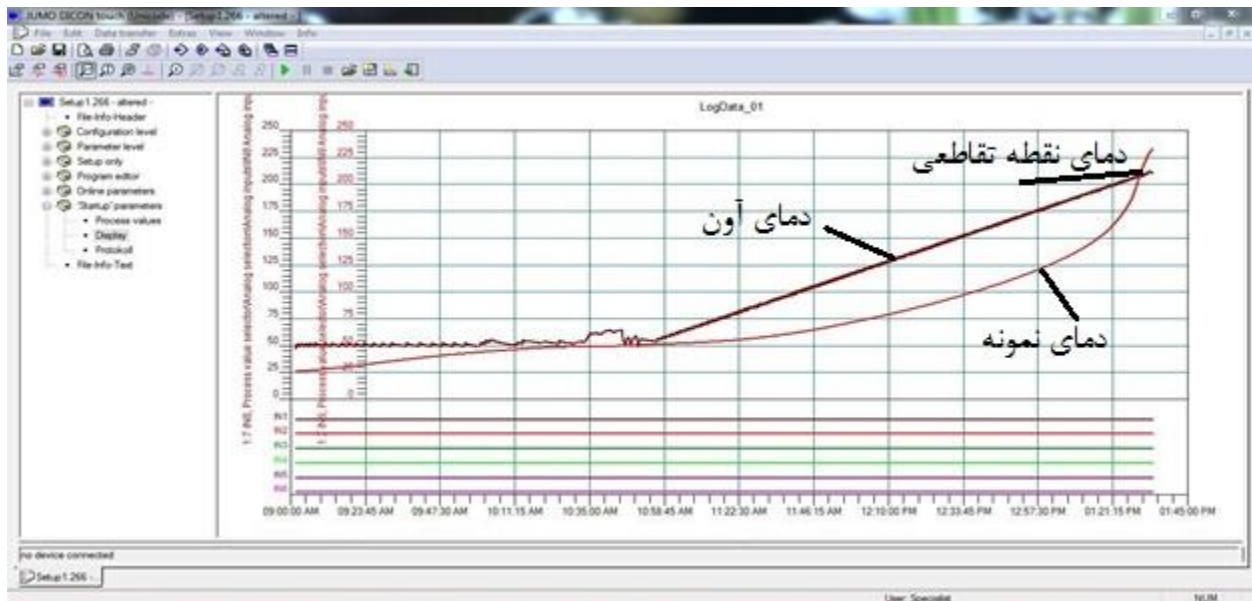
بافر یک جریان هوای پایدار و خشک را به نمونه زغال سنگ منتقل می‌کند. ترموکوپل ۱، در آون برای بررسی و کنترل دمای پیرامونی استفاده می‌شود در حالی که ترموکوپل ۲ در رآکتور برای بررسی و ثبت دمای زغال سنگ استفاده می‌شود.



شکل ۴-۱۲: نمای کلی از تجهیزات آزمایش

پس از انجام موارد فوق، نمونه‌های ۶۰ گرمی زغال سنگ را درون رآکتور قرار داده و با استفاده از نرم افزار jumo dicon touch برنامه‌ای برای روش دمای نقطه تقاطعی تعریف می‌شود. این برنامه باید به این صورت باشد که آون از دمای محیط در مدت زمان ۳۰ دقیقه به ۵۰ درجه برسد، سپس به مدت یک ساعت روی ۵۰ درجه 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. سپس هوای خشک با اکسیژن ۲۰/۹۶ درصد با دبی ۸۰ میلی‌لیتر بر دقیقه از درون محفظه واکنش عبور داده می‌شود. در این حین دمای زغال سنگ و محیط با ترموکنترلر ثبت می‌شود. زمانی که دمای زغال سنگ به ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رسید، دما را با نرخ ۱ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش داده در حالی که نرخ عبور هوا همان ۸۰ میلی‌لیتر بر دقیقه ثابت باقی می‌ماند. زمانی که دمای نمونه زغال سنگ برابر با دمای آون شود و منحنی دمایی آون را قطع کند، آن دما همان دمای نقطه‌ی تقاطعی یا CPT است.

در شکل (۴-۱۳) نمونه تست انجام شده برای معدن اروست شرقی آورده شده است.



شکل ۴-۱۳: تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن اروست شرقی

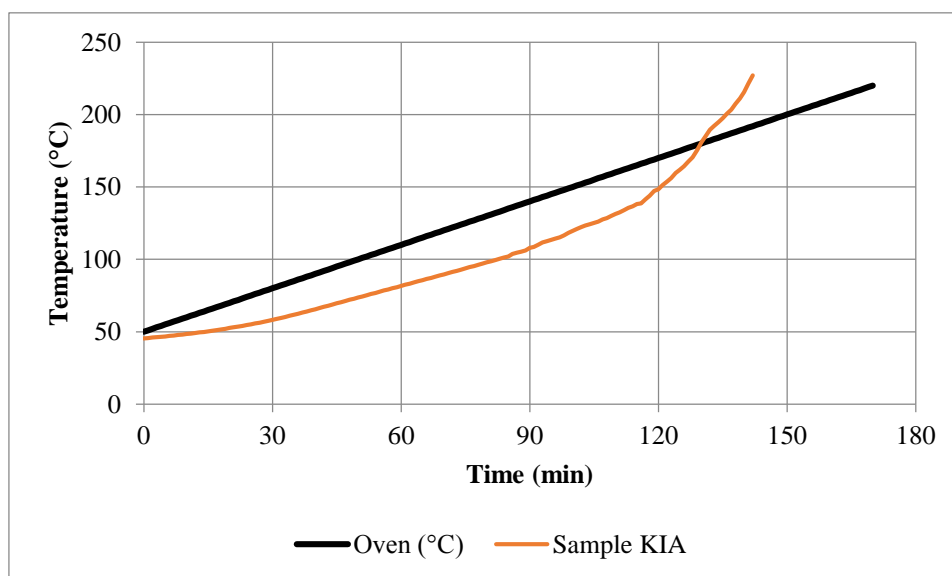
#### ۴-۷-۱- نتایج تست‌های دمای نقطه تقاطعی

روش دمای نقطه تقاطعی یکی از روش‌هایی است که به طور گسترده برای ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال سنگ استفاده می‌شود. نتایج حاصل از تست‌های CPT برای نمونه‌ها زغال سنگ معادن مختلف البرز مرکزی نشان می‌دهد که کم‌ترین دمای عبور و بیش‌ترین تمایل به خودسوزی برای نمونه شماره ۷ متعلق به معدن ماهان واقع در منطقه معدنی انگتارود ثبت شد؛ همچنین کم‌ترین تمایل به خودسوزی در نمونه شماره ۶ متعلق به معدن اروست شرقی واقع در منطقه معدنی اروست ثبت شد. نتایج حاصل از تست‌های دمای نقطه تقاطعی با توجه به جدول پیوست در جدول (۴-۷) و شکل‌های (۴-۱۴) تا (۴-۲۲) برای نمونه‌های مختلف آورده شده است. با توجه به شکل (۲-۴) می‌توان این‌طور نتیجه گرفته که از غرب به شرق حوزه زغالی البرز مرکزی مقدار CPT کاهش می‌یابد و به طور کلی با توجه به جدول (۳-۲) برای مقادیر CPT بین ۱۴۰ تا ۱۶۰ خودسوزی در حد متوسط و برای بالاتر از ۱۶۰ در حد کم است. بنابراین خودسوزی در معادن مورد مطالعه در سطح متوسط و کم قرار دارد.

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

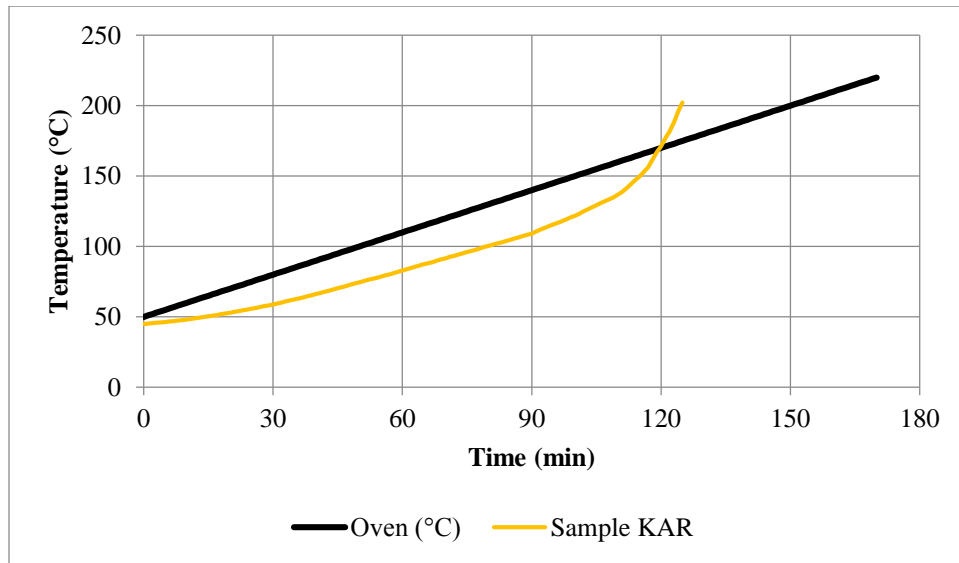
CPT (°C)	علامت اختصاری
۱۸۰	KIA
۱۷۰	KAR
۱۵۰	GLI
۱۸۰	DON
۱۶۰	KAM
۲۱۰	ORS
۱۴۰	MAH
۱۹۵	SAN
۱۶۵	BIG

شکل (۴-۱۴) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن کیاسر را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۸۰ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن کیاسر در حد پایین قرار دارد.



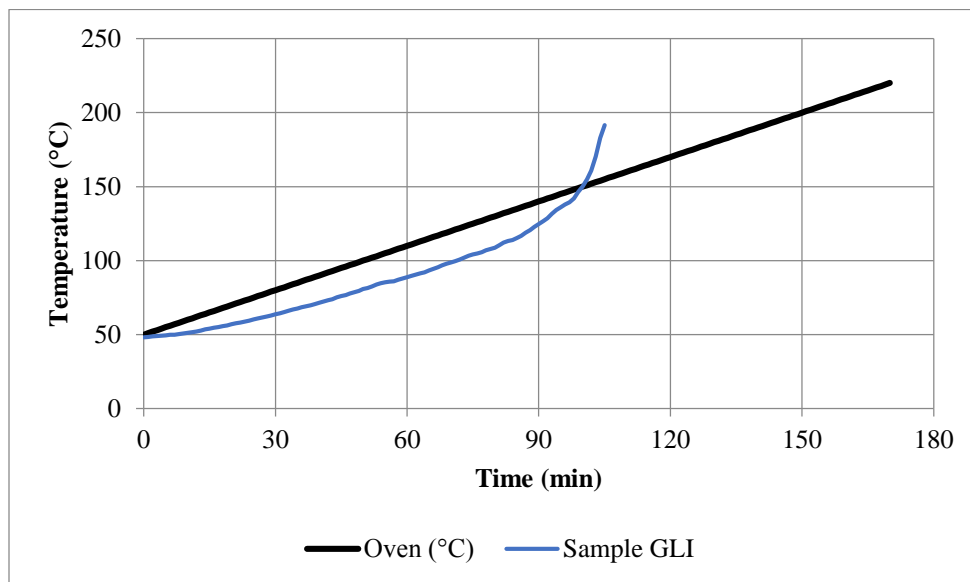
شکل ۴-۱۴: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن کیاسر

شکل (۴-۱۵) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن کارسنگ را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۷۰ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن کارسنگ در حد پایین قرار دارد.



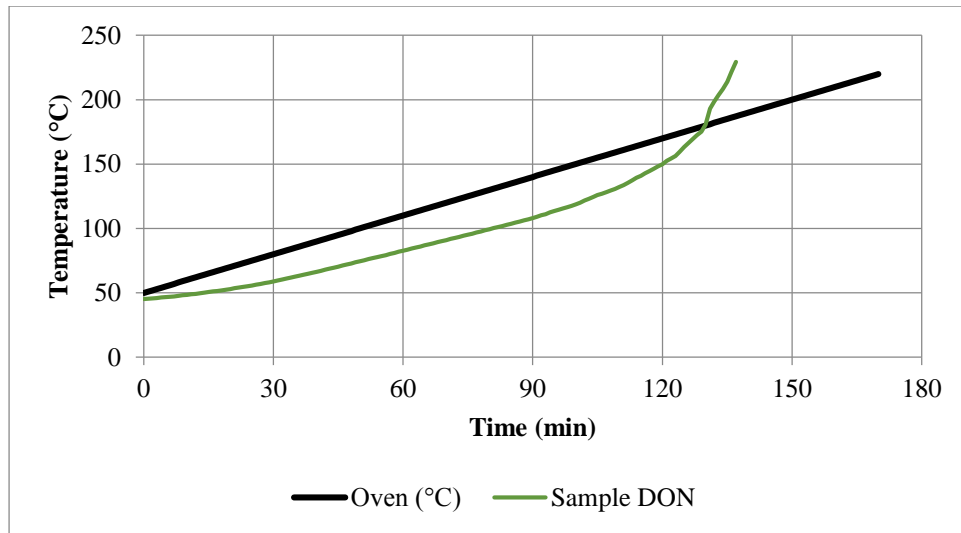
شکل ۴-۱۵: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن کارسنگ

شکل (۴-۱۶) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن گلیران را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۵۰ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن گلیران در حد متوسط قرار دارد.



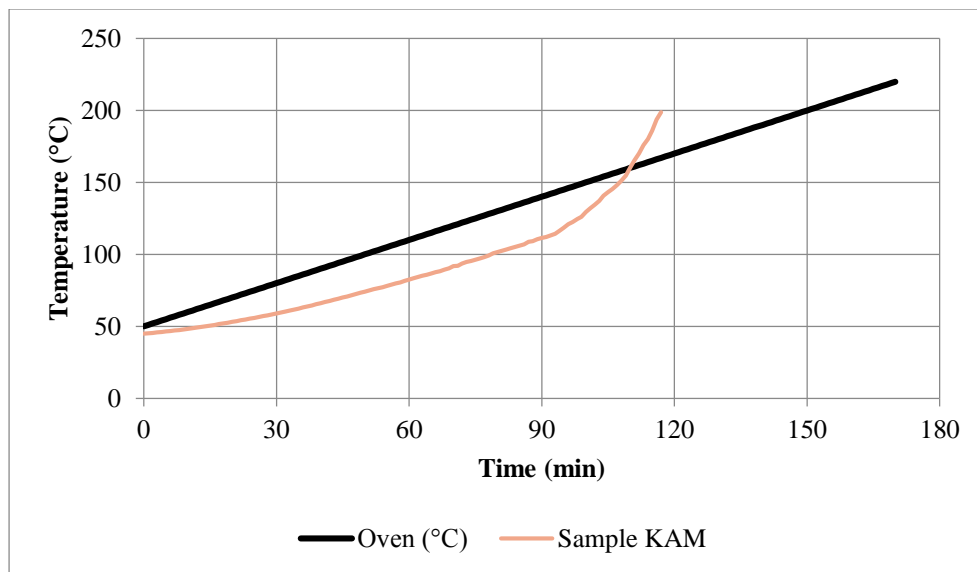
شکل ۴-۱۶: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن گلیران

شکل (۴-۱۷) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن دنبو را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۸۰ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن دنبو در حد پایین قرار دارد.



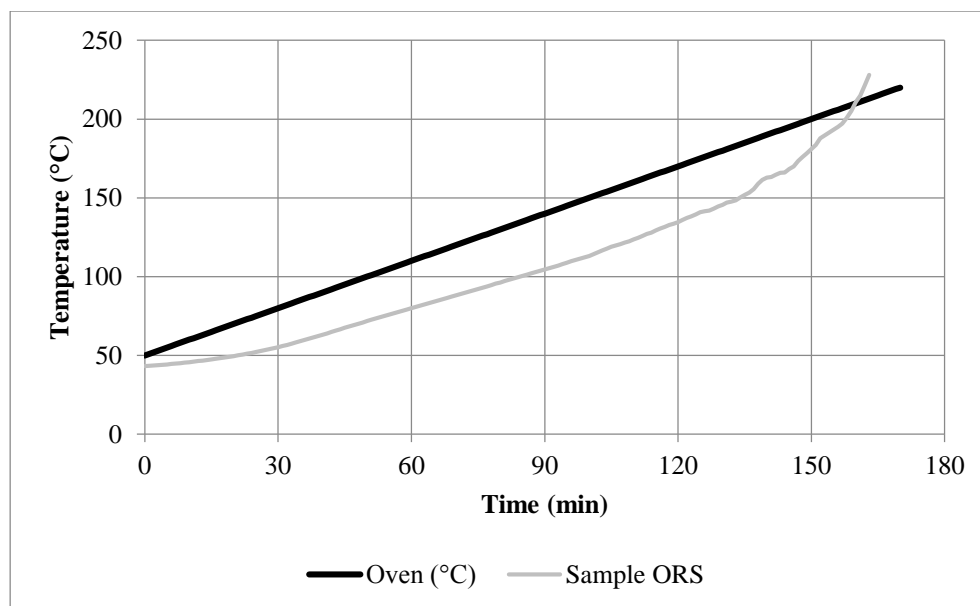
شکل ۴-۱۷: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن دنبو

شکل (۴-۱۸) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن کارمزد را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۶۰ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن کارمزد در حد متوسط قرار دارد.



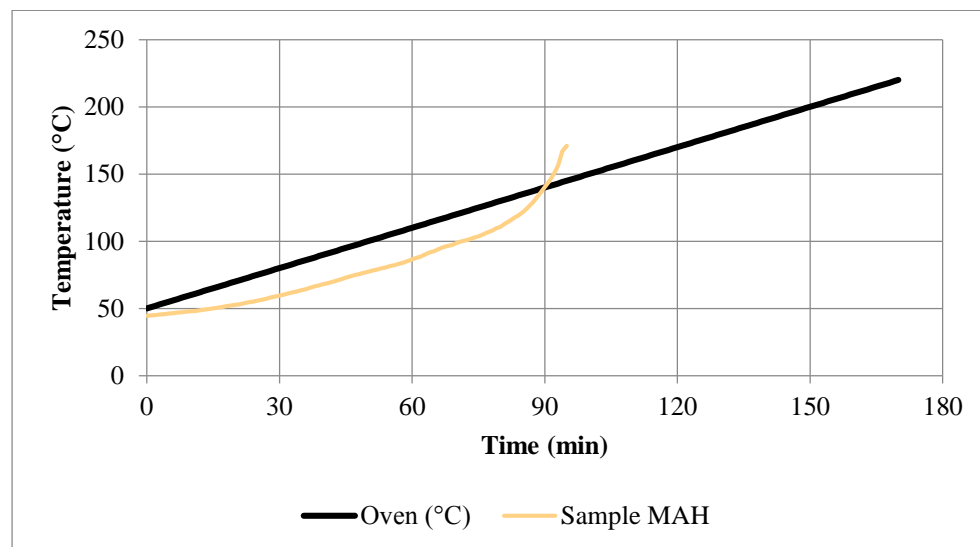
شکل ۴-۱۸: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن کارمزد

شکل (۴-۱۹) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن اروست شرقی را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۲۱۰ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن اروست شرقی در حد پایین قرار دارد.



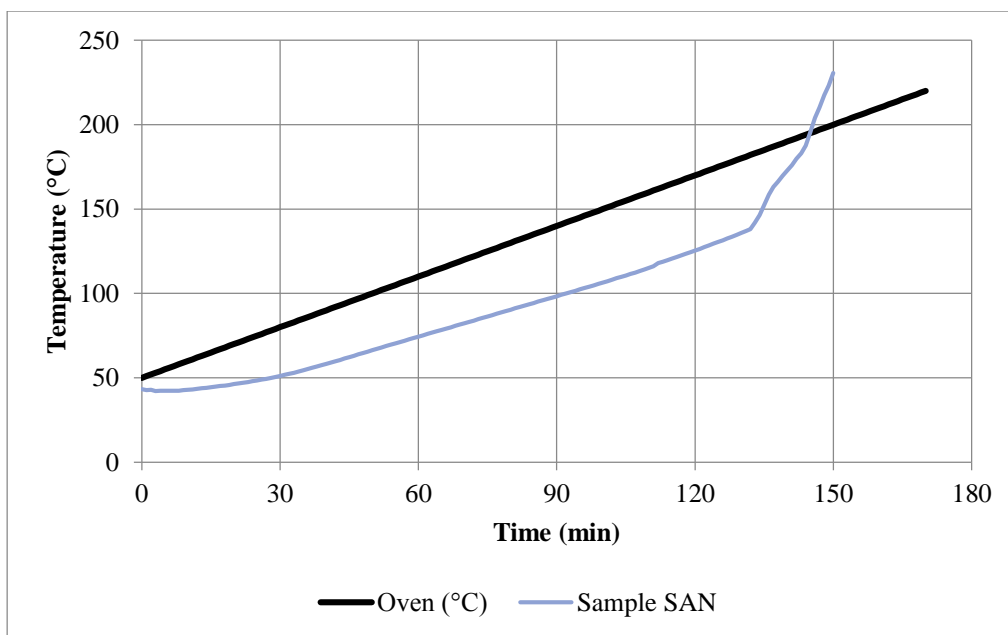
شکل ۴-۱۹: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن اروست شرقی

شکل (۴-۲۰) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن ماهان را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۴۰ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن ماهان در حد متوسط و بالا قرار دارد.



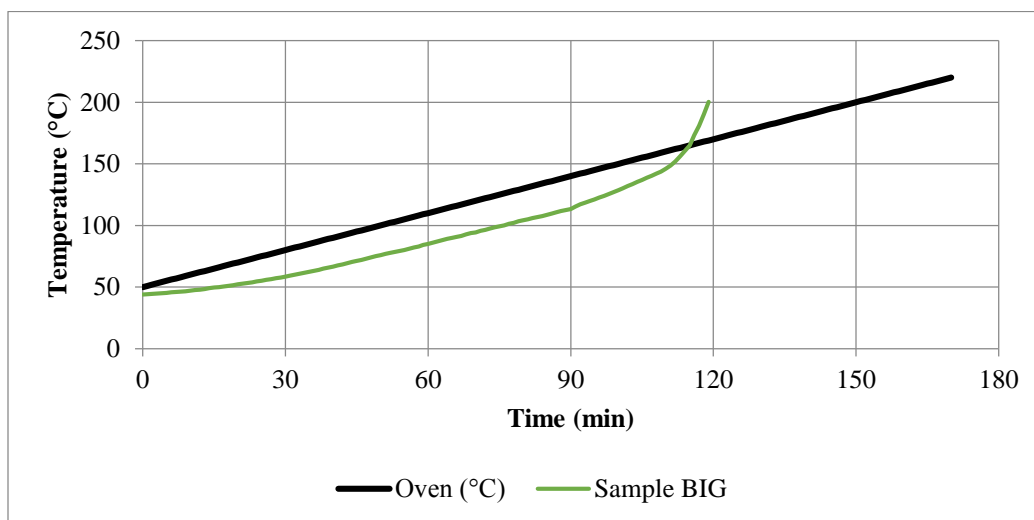
شکل ۴-۲۰: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن ماهان

شکل (۴-۲۱) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن سنام را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۹۵ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن سنام در حد پایین قرار دارد.



شکل ۴-۲۱: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن سنام

شکل (۴-۲۲) تست دمای نقطه تقاطعی برای معدن بیگ‌سی را نشان می‌دهد، نقطه تقاطع برابر ۱۶۵ است که بیان‌گر این است که خودسوزی زغال‌سنگ در معدن بیگ‌سی در حد متوسط و پایین قرار دارد.



شکل ۴-۲۲: نتیجه تست دمای نقطه تقاطعی برای نمونه معدن بیگ‌سی



همچنین در جدول (۴-۸) خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داده شده است. از این جدول این طور برآورد می‌شود مقدار CPT از بعضی عوامل بیشتر تأثیر می‌پذیرد که پارامترهای رطوبت و پیریت و ماسرال ویتروینیت از جمله 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. مقدار CPT برای نمونه‌های معادن KIA و DON برابر ۱۸۰ است که اثر پارامترهای مختلف باعث برابر شدن این دو شده است. در نمونه معدن GLI با توجه به خاکستر زیاد این نمونه انتظار می‌رود CPT افزایش یابد ولی با توجه به سایر پارامترها نظیر پیریت و رطوبت بالا باعث کاهش مقدار CPT شده است. همچنین برای نمونه معدن ORS با توجه به درصد کم خاکستر انتظار می‌رود CPT کاهش یابد ولی با توجه به سایر عوامل مثل پیریت و رطوبت کم مقدار آن افزایش پیدا کرده است. پس می‌توان این طور 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.

جدول ۴-۸: خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها

CPT (°C)	ویتروینیت (%)	لیپتینیت (%)	اینرتینیت (%)	خاکستر (%)	کربن ثابت (%)	مواد فرار (%)	رطوبت (%)	پیریت (%)	علامت اختصاری
۱۸۰	۴۵/۲۳	۵/۱	۴۹/۶۷	۱۳/۴۷۲	۵۲/۸۰۵	۳۲/۴۹۰	۱/۲۳	۰/۰۰	KIA
۱۷۰	۶۸/۷۲	۷/۹۳	۲۳/۱۵	۱۴/۸۳۸	۵۶/۶۹۳	۲۷/۵۵۱	۰/۹۱۸	۰/۲۰	KAR
۱۵۰	۸۳/۳۵	۱۰/۸۶	۴/۲۹	۴۱/۲۸۹	۳۷/۱۱۲	۱۸/۳۰۲	۳/۲۹۷	۱/۵۰	GLI
۱۸۰	۵۸/۷۷	۲/۱۲	۳۸/۸۱	۲۷/۷۸۲	۴۵/۷۰۰	۲۴/۶۶۸	۱/۸۳۰	۰/۳۰	DON
۱۶۰	۴۴/۷۳	۵/۸	۴۸/۹۷	۱۹/۱۲۷	۴۶/۸۳۲	۳۲/۴۹۱	۱/۱۰۰	۰/۵۰	KAM

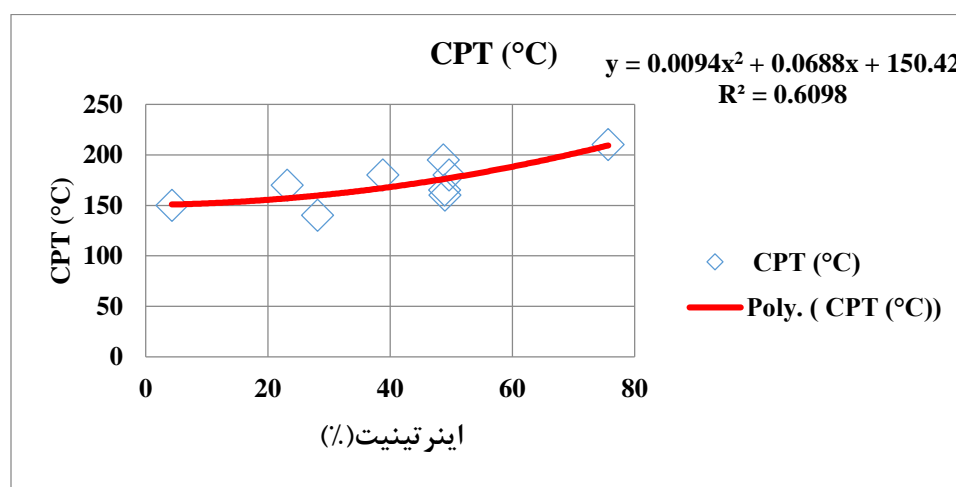
ادامه جدول ۴-۸: خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها

۲۱۰	۲۳/۱۳	۱/۱۸	۷۵/۶۹	۱/۷۳۶	۶۵/۶۴۳	۳۱/۶۳۱	۰/۹۹۰	۰/۰۰	ORS
۱۴۰	۵۹/۶۴	۱۰/۰۹	۲۸/۱۲	۴/۳۶۲	۵۷/۲۶۹	۳۴/۶۹۹	۳/۷۰۰	۲/۵۰	MAH
۱۹۵	۴۷/۳۱	۳/۷	۴۸/۶۹	۱۲/۰۰۶	۵۲/۲۹۵	۳۴/۳۸۰	۱/۳۱۸	۰/۳۰	SAN
۱۶۵	۴۴/۷۳	۵/۸۸	۴۸/۹۴	۱۴/۵۹۵	۵۳/۳۵۵	۳۰/۰۴۵	۲/۰۰۵	۰/۴۵	BIG

#### ۴-۸- تأثیر ماسرال‌ها بر خودسوزی زغال‌سنگ

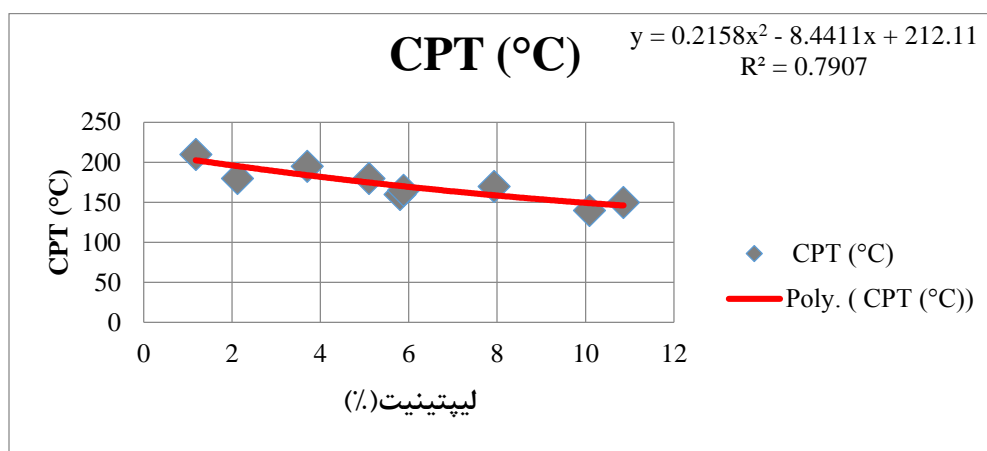
برای بررسی تأثیر ماسرال‌ها بر خودسوزی نمونه‌های زغال‌سنگ البرز مرکزی درصد ماسرال و CPT هر نمونه را به دست آورده شد که در جدول (۴-۸) نشان داده شده است. در ادامه در شکل‌های (۴-۲۳) تا (۴-۲۵) نمودار رابطه بین اینرتینیت، لیپتینیت و ویتترینیت و CPT نشان داده شده است.

مطابق شکل (۴-۲۳) با افزایش درصد ماسرال اینرتینیت در زغال‌سنگ، مقدار CPT افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ماسرال اینرتینیت در بازه ۰ تا ۸۰ درصد مقدار CPT، ۳۰ درصد افزایش می‌یابد و در نتیجه تمایل به خودسوزی کاهش می‌یابد.



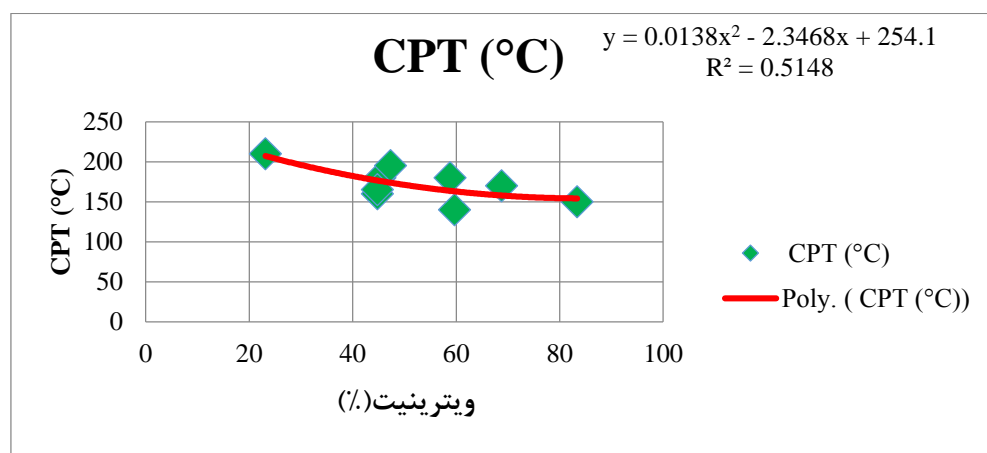
شکل ۴-۲۳: نمودار رابطه بین اینرتینیت و CPT

شکل (۴-۲۴) با افزایش درصد ماسرال لیپتینیت در زغال سنگ CPT کاهش می‌یابد. ضریب  $R^2$  برای این نمودار ۰/۷۹۰۷ است که بیان‌گر ارتباط قوی بین نوع ماسرال و CPT نمونه‌ها است. همچنین با افزایش ماسرال اینترتینیت در بازه ۰ تا ۱۲ درصد مقدار CPT، ۳۰ درصد کاهش می‌یابد و در نتیجه تمایل به خودسوزی افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۴: نمودار رابطه بین لیپتینیت و CPT

شکل (۴-۲۵) با افزایش درصد ماسرال لیپتینیت در زغال سنگ CPT کاهش یافته و در نتیجه تمایل به خودسوزی افزایش می‌یابد. ضریب  $R^2$  برای این نمودار ۰/۵۱۴۸ است که بیان‌گر ارتباط قوی بین دو پارامتر است ولی نسبت به دو نوع دیگر بیان‌گر ارتباط به نسبت پایین‌تر بین نوع ماسرال و CPT نمونه‌ها است.



شکل ۴-۲۵: نمودار رابطه بین ویترینیت و CPT

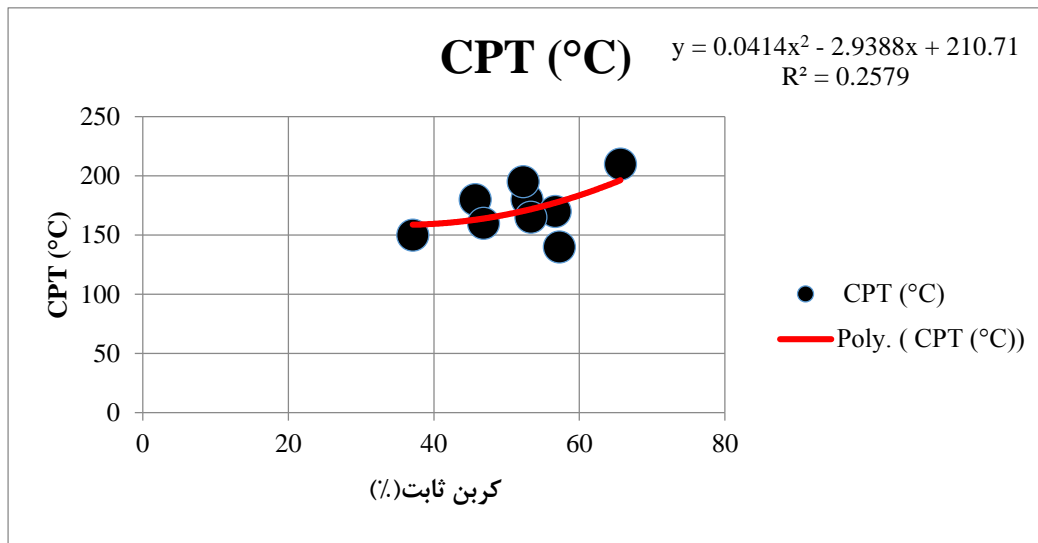
از نمودارهای به دست آمده این طور برآورد می‌شود که با افزایش درصد ماسرال اینرتینیت در زغال سنگ، مقدار CPT افزایش یافته و در نتیجه تمایل به خودسوزی کاهش می‌یابد همچنین با افزایش درصد لیپتینیت و ویتیرینیت، مقدار CPT کاهش یافته تمایل به خودسوزی افزایش می‌یابد. علت این که ماسرال لیپتینیت و ویتیرینیت باعث افزایش تمایل به خودسوزی می‌شود این است. این ماسرال‌ها با توجه به نحوه تشکیل آن‌ها در مراحل اولیه خودسوزی در اثر حرارت می‌سوزند و مقاومت کمتری در برابر حرارت دارند همچنین ویتیرینیت و لیپتینیت حاوی نسبت‌های بزرگ‌تری از اکسیژن و نیتروژن هستند. در صورتی که ماسرال اینرتینیت قابلیت ذوب شدن ندارند و در برابر حرارت مقاومت بیشتری نشان می‌دهند و همچنین دارای درجه زغال‌شدگی بالاتری نسبت به ویتیرینیت و لیپتینیت است به همین دلیل باعث کاهش تمایل به خودسوزی می‌شود.

#### ۴-۹- تأثیر خاکستر، مواد فرار، کربن، رطوبت و پیریت بر خودسوزی

برای بررسی تأثیر پارمترهای ذاتی شامل مواد فرار، خاکستر، کربن و رطوبت بر خودسوزی نمونه‌های زغال سنگ البرز مرکزی، نتایج حاصل از تست‌های پارامترهای یاد شده و CPT هر نمونه به دست آورده شد و در ادامه در شکل‌های (۴-۲۶) تا (۴-۲۸) نمودار رابطه بین مواد فرار، خاکستر، کربن و رطوبت و مقدار CPT نشان داده شده است.

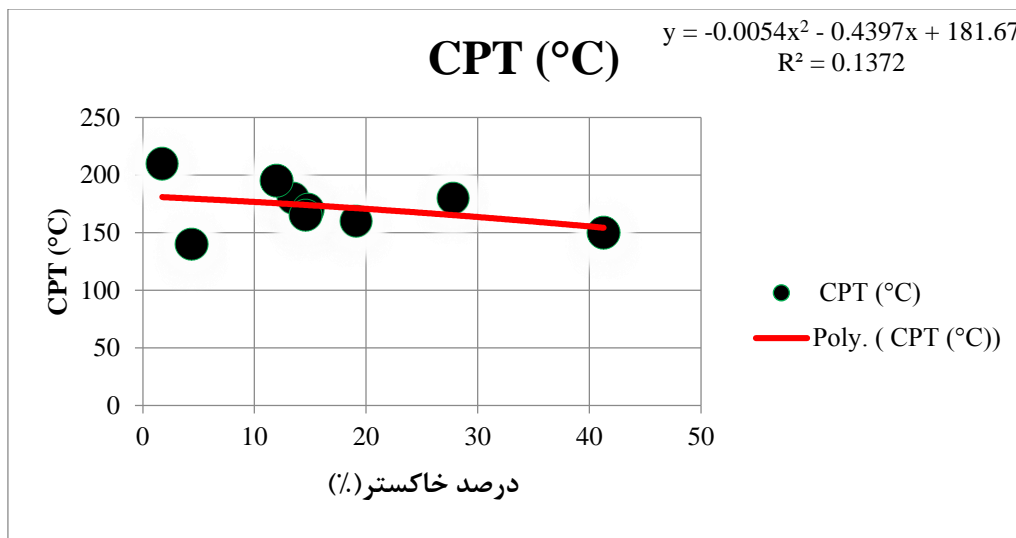
زغال سنگ با درجه پایین زغال‌شدگی تحت فشار و حرارت کم‌تری قرار گرفته و سطح تأثیر بیشتری دارد لذا این قبیل زغال سنگ‌ها در مقایسه با زغال سنگ با درجه بالای زغال‌شدگی مستعدتر برای خودسوزی هستند؛ علت آن است که با کاهش درجه زغال‌شدگی، رطوبت محتوی، اکسیژن محتوی و سطح تأثیر زغال سنگ همگی افزایش می‌یابند. افزایش هر یک از عامل باعث افزایش سرعت اکسیداسیون شده و تمایل به خودسوزی را افزایش می‌دهد. بنابراین زغال سنگ از نوع لیگنیت و بیتومینه (۴۰ تا ۶۰ درصد کربن) نسبت به زغال‌های ساب‌بیتومینه و آنتراسیت تمایل بیشتری به خودسوزی دارند و داری فرآیند اکسایش سریع‌تری هستند.

شکل (۴-۲۶) با افزایش درصد کربن در زغال سنگ CPT افزایش یافته و در نتیجه تمایل به خودسوزی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد کربن در بازه ۳۵ تا ۶۵ درصد مقدار CPT، ۳۲ درصد افزایش می‌یابد و در نتیجه تمایل به خودسوزی کاهش می‌یابد. ضریب  $R^2$  برای این نمودار ۰/۲۵۷۹ است که بیان‌گر تأثیر پذیری کم‌تر CPT نمونه‌ها از مقدار کربن است و نشان می‌دهد که مقدار CPT به عوامل دیگری نیز وابسته است.



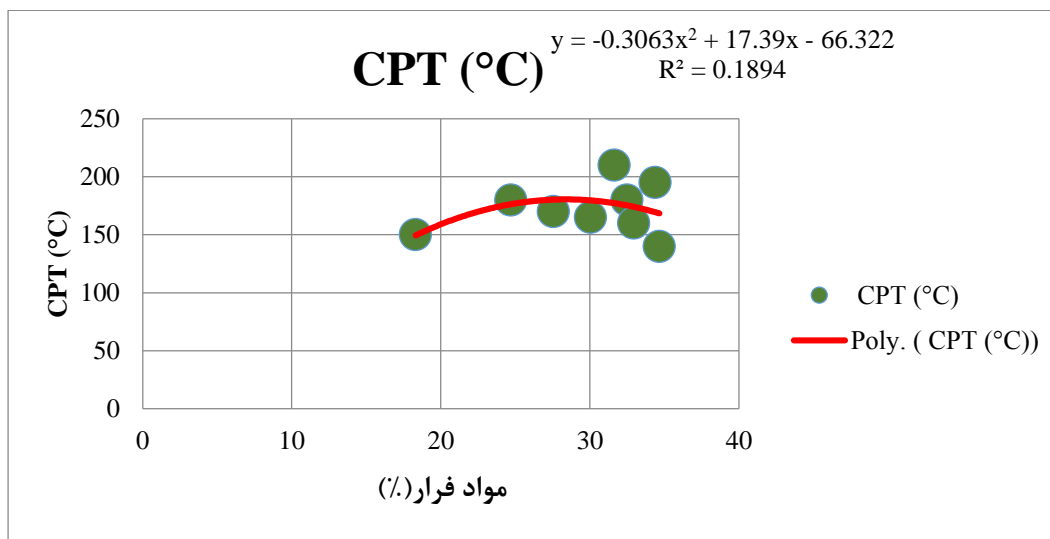
شکل ۴-۲۶: نمودار رابطه بین کربن و CPT

هرچه میزان خاکستر محتوی نمونه زغال سنگ بیشتر باشد، خاکستر موجود گرمای بیشتر جذب کرده و اجازه نمی‌دهد دمای زغال سنگ افزایش یابد. اما از آنجا که خودسوزی زغال سنگ امری است که به عوامل متعدد بستگی دارد، سایر پارامترها باعث شده که در این پژوهش مطابق شکل (۴-۲۷) به طور کلی با افزایش درصد خاکستر در زغال سنگ CPT کاهش یافته و در نتیجه تمایل به خودسوزی افزایش می‌یابد که به این دلیل است که برای نمونه معدن گلیران با توجه به درصد خاکستر بالایی که دارد و همچنین این نمونه حاوی درصد پیریت و رطوبت بالایی نیز است و به همین دلیل باعث شده است نمودار به صورت نزولی درآید. ضریب  $R^2$  برای این نمودار ۰/۱۳۷۲ است که بیان‌گر تأثیر پذیری کم‌تر CPT نمونه‌ها از مقدار خاکستر است و همچنین عوامل دیگری تأثیر گذارند؛ بنابراین باید در بررسی تأثیر میزان خاکستر بر خودسوزی به سایر پارامترها نیز توجه داشت.



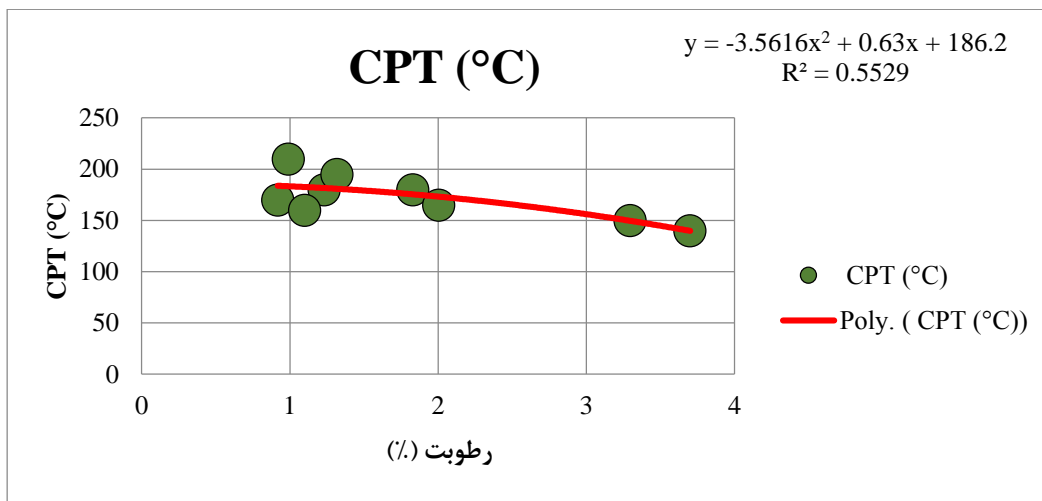
شکل ۴-۲۷: نمودار رابطه بین خاکستر و CPT

مواد فرار می‌تواند به عنوان یک منبع سوخت ثانویه عمل کرده و تمایل زغال به خودسوزی افزایش می‌یابد مطابق اما مطابق شکل (۴-۲۸) از آنجا که خودسوزی زغال سنگ امری است که به عوامل متعدد بستگی دارد، سایر پارامترها باعث شده که خودسوزی کاهش یابد. ضریب  $R^2$  برای این نمودار ۰/۱۸۹۴ است که بیانگر ارتباط ضعیف بین درصد مواد فرار و CPT نمونه‌ها و تأثیر پذیری کم‌تر دمای نقطه تقاطعی از مواد فرار است؛ که می‌تواند ناشی از کم بودن تعداد نمونه‌های جامعه آماری باشد.



شکل ۴-۲۸: نمودار رابطه بین مواد فرار و CPT

مطابق شکل (۴-۲۹) وجود رطوبت در زغال سنگ باعث افزایش تمایل به گرمایش خودبه خودی می شود. با تبخیر رطوبت در زغال سنگ با توجه به درجه زغال شدگی پایین که حاوی مقادیر بیشتری رطوبت است، خلل و فرج زغال سنگ از رطوبت خالی شده و بیشتر در معرض اکسایش با اکسیژن هوا قرار می گیرد و برای خودسوزی مستعدتر می شود. به طوری که با افزایش میزان رطوبت محتوی دمای زغال نیز افزایش می یابد و تمایل به خودسوزی افزایش می یابد. ضریب  $R^2$  برای این نمودار ۰/۵۵۲۹ است که بیان گر ارتباط به نسبت قوی بین درصد رطوبت و CPT نمونه ها و تأثیر پذیری بالای دمای نقطه تقاطعی از مقدار رطوبت است.



شکل ۴-۲۹: نمودار رابطه بین رطوبت محتوی و CPT

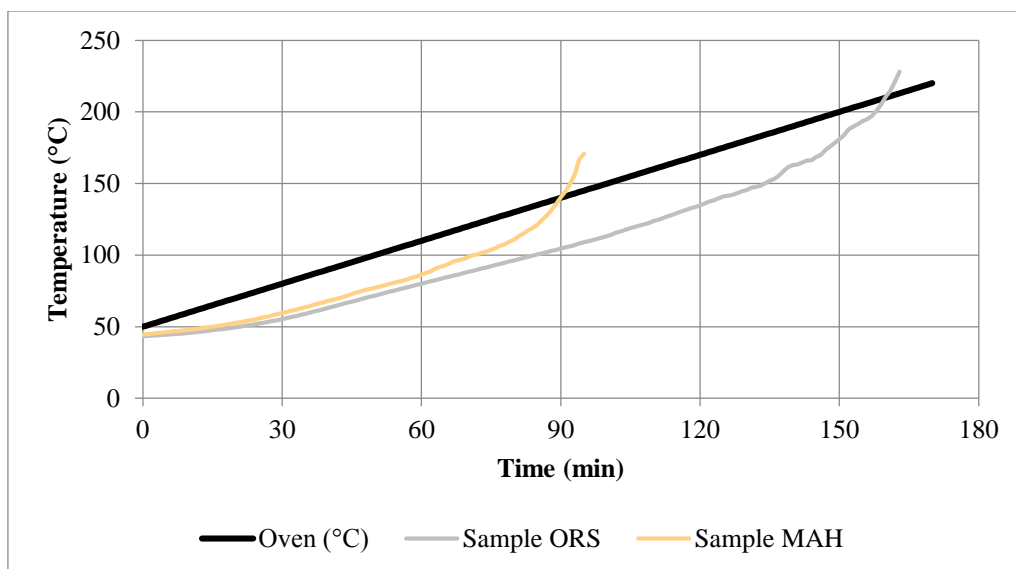
یکی از مهم ترین ناخالصی های موجود در زغال سنگ، گوگرد است که به شکل های مختلف، از جمله به صورت پیریت در زغال سنگ یافت می شود. از جمله معایب وجود پیریت در زغال می توان به کاهش ارزش حرارتی زغال و افزایش آلودگی محیط زیست و تأثیر مخرب بر فرآیند خودسوزی زغال سنگ اشاره کرد.

پیریت، ممکن است در لایه های زغال به صورت رگه هایی کریستاله و بلورین یا به صورت مواد دانه ریز حضور داشته باشد. زمانی که پیریت به صورت یک رگه در لایه زغال قرار دارد سطح کمی از زغال سنگ در معرض واکنش با اکسیژن قرار می گیرد و خودسوزی زغال سنگ کم است. اما زمانی که پیریت به صورت مواد دانه ریز در زغال

وجود دارد سطح بیشتری از زغال سنگ در معرض واکنش با اکسیژن قرار می‌گیرد که باعث تولید گرمای زیادی می‌شود.

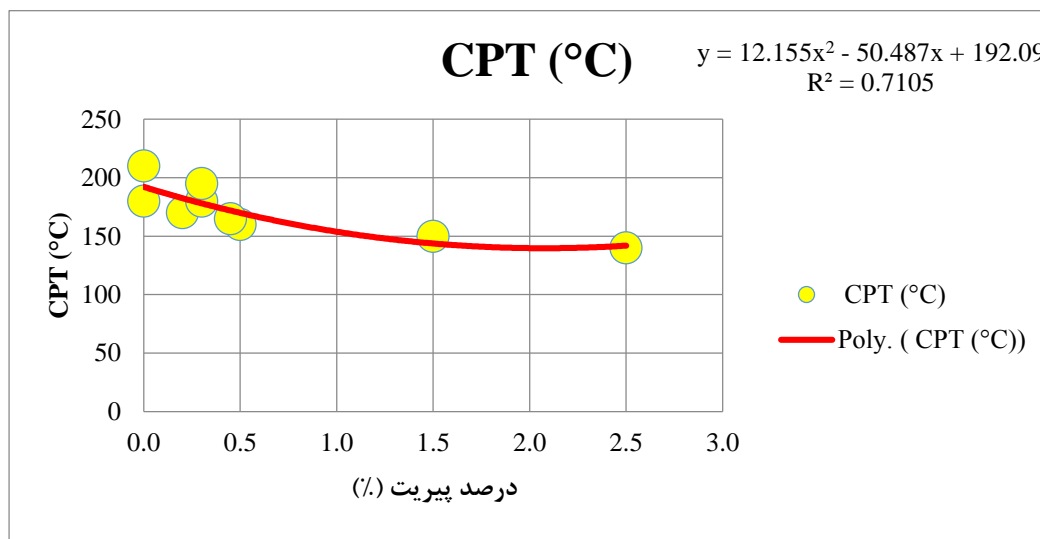
نتایج آزمایش دمای نقطه تقاطعی برای نمونه‌های مختلف حاوی درصد پیریت متفاوت نشان می‌دهد که به طور کلی مطابق شکل (۴-۳۰) هر چه درصد پیریت بیشتر باشد منحنی دمایی مربوط به نمونه سریع‌تر منحنی دمایی آن را قطع می‌کند. به این صورت که در ابتدا رطوبت با افزایش دما تبخیر می‌شود، که میزانی از گرما را مصرف می‌کند و تجمع گرما در زغال را کاهش می‌دهد از آنجایی که بعد از تبخیر رطوبت منافذ و سوراخ‌های زیادی در زغال سنگ ایجاد می‌شود، دمای زغال سنگ به سرعت افزایش می‌یابد و همین عاملی محرک برای پیریت موجود در زغال سنگ می‌شود، پیریت در حالت کلی به مانند یک کاتالیزور عمل کرده و سرعت اکسایش زغال سنگ را افزایش می‌دهد ولی اگر این واکنش در حضور رطوبت انجام شود، باعث تصاعد بیشتر و تسریع در خودسوزی زغال سنگ می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴-۳۱) مشاهده می‌شود برای نمونه معدن اروست شرقی 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 اروست شرقی سریع‌تر منحنی دمایی آن را قطع کند. در صورتی که برای نمونه معدن ماهان که حاوی ۲/۵ درصد پیریت است، در دقیقه شصتم که رطوبت از زغال سنگ خارج شده و با پیریت اکسید می‌شود. 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 ۳۰-۴: منحنی دما-زمان دو نمونه زغال سنگ با درصد مختلف میزان پیریت محتوی

در شکل (۳۱-۴) رابطه بین درصد پیریت محتوی و دمای نقطه تقاطعی مشاهده می‌شود. همان طور که نشان داده شده با افزایش درصد پیریت محتوی، سرعت واکنش گرمایش خودبه خودی افزایش می‌یابد.



شکل ۳۱-۴: ارتباط بین میزان پیریت محتوی و CPT

در بازه صفر تا ۰/۵ درصد پیریت CPT نمونه‌ها بین ۲۱۵ تا ۱۶۵ متغیر است که در این بازه تمایل به خودسوزی در حد پایین است، با افزایش درصد پیریت از ۱ تا ۲/۵ درصد CPT نمونه‌ها بین ۱۶۰ تا ۱۴۰ متغیر است که در

حد متوسط خودسوزی قرار دارد. همچنین برای نمونه‌هایی که علاوه بر درصد پیریت بالاتر درصد رطوبت بالایی نیز دارند، مقدار CPT کاهش پیدا کرده و در نتیجه تمایل به خودسوزی افزایش می‌یابد. ضریب  $R^2$  برای درصد پیریت ۰/۷۱۰۵ است که بیان‌گر تأثیر پذیری زیاد CPT از پیریت محتوی نمونه‌های زغال سنگ است.

#### ۴-۱۱- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی منطقه مورد مطالعه البرز مرکزی و معرفی معادن نمونه برداری شده پرداخته شد و در ادامه بعد از انجام مراحل سنگ‌شکنی، آسیا و سرند با تشریح شیوه انجام کار با استفاده از روش آنالیز تقریبی پارامترهای درصد رطوبت، خاکستر، مواد فرار و کربن هر نمونه تعیین شد. سپس با انجام تست‌های مقطع صیقلی و تهیه عکس‌های میکروسکوپی و با استفاده از نرم‌افزار اتوکد درصد پیریت و ماسرال هر نمونه تعیین شد. سپس به معرفی روش کار انجام تست‌های دمای نقطه تقاطعی پرداخته شد. در ادامه نتایج تست‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. کم‌ترین دمای عبور و بیش‌ترین تمایل به خودسوزی برای نمونه متعلق به معدن ماهان واقع در منطقه معدنی انگتارود ثبت شد؛ همچنین کم‌ترین تمایل به خودسوزی در نمونه متعلق به معدن اروست شرقی واقع در منطقه معدنی اروست ثبت شد. در ادامه به بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف با CPT پرداخته شد که در فصل پنجم نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادات آورده شده است.

## فصل ۵ : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی تأثیر عوامل ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ به عنوان یکی از مهم ترین خطرات معدنکاری پرداخته شد. در ابتدا، مکانیزم خودسوزی و پارامترهای مؤثر در قابلیت خودسوزی زغال سنگ بررسی شدند. در سپس با استفاده از روش آزمایشگاهی دمای نقطه تقاطعی (CPT) تأثیر پارامترهای ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ در تعدادی از معادن البرز مرکزی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مباحث انجام گرفته بررسی تأثیر عوامل ذاتی بر خودسوزی زغال سنگ انجام گرفته و نتایج زیر برای منطقه مورد مطالعه حاصل شد:

- با افزایش درصد ماسرال اینرتینیت در زغال سنگ CPT افزایش یافته و در نتیجه تمایل به خودسوزی کاهش می یابد همچنین با افزایش درصد لیپتینیت و ویتیرینیت تمایل به خودسوزی افزایش می یابد.
- از نمودارهای به دست آمده این طور برآورد می شود که درصد رطوبت در زغال سنگ با CPT نسبت عکس دارند. و با افزایش مقدار رطوبت، خودسوزی افزایش می یابد. برای معادن بررسی شده با افزایش درصد کربن خودسوزی کاهش یافته، همچنین در بازه ۴۰ تا ۶۰ درصد کربن خودسوزی افزایش می یابد. همچنین هر چه درصد پیریت بیشتر باشد منحنی دمایی مربوط به نمونه سریع تر منحنی دمایی آن را قطع می کند و CPT کاهش یافته و در نتیجه تمایل به خودسوزی افزایش می یابد.
- بیش ترین تمایل به خودسوزی برای نمونه متعلق به معدن ماهان واقع در منطقه معدنی انگتارود ثبت شد؛ همچنین کم ترین تمایل به خودسوزی در نمونه متعلق به معدن اروست شرقی واقع در منطقه معدنی اروست ثبت شد. به طور کلی تمایل به خودسوزی زغال سنگ در معادن البرز مرکزی در سطح متوسط و کم قرار دارد.
- به طور کلی از جهت غرب به سمت شرق حوزه زغال سنگ البرز مرکزی خودسوزی کاهش می یابد.

## ۵-۲- پیشنهادات

- پیشنهاد می‌شود نتایج خودسوزی زغال سنگ علاوه بر گاز اکسیژن از ترکیب گازهای دیگر نظیر ترکیب اکسیژن و متان برآورد شود.
- با توجه به تأثیر پذیری متفاوت خودسوزی از عوامل ذاتی، پیشنهاد می‌شود با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی به بررسی تأثیر مهم‌ترین پارامترهای ذاتی موثر بر خودسوزی زغال پرداخته شود.



## منابع

- اصانلو م، (۱۳۷۸)، "مهندسی زغال سنگ"، انتشارات ناقوس.
- 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.
- 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 پد/فند زیستی، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه ترویجی دستداران محیط زیست.
- زاده کبیرا، مجموعه کتاب ۴ جلدی زغال سنگ، انتشارات سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)، سال ۱۳۹۰، جلد ۱
- صفاری ا؛ سرشکی ف؛ عطایی م و قنبری ک، (۱۳۹۳)، "ارزیابی اثرات زیست محیطی خودسوزی زغال سنگ و پیشگیری از وقوع آن با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی"، اولین همایش ملی محیط‌زیست دانشگاه پیام نور، گروه ترویجی دستداران محیط‌زیست.
- 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 عطائی م، (۱۳۹۷)، "روش‌های سیستمی ارزیابی قابلیت خودسوزی زغال‌سنگ، چهارمین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران"، طبس، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عطایی م، (۱۳۹۴)، "مباحث ویژه در معدنکاری زیرزمینی"، چاپ اول، شاهرود، انتشارات 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.
- مدنی ح، ۱۳۷۳، "بازرسی در معادن"، گروه مترجمان، انتشارات بصیر.
- یزدی، م. (۱۳۸۸)، "زغال‌سنگ معدن و معدنکاری زغال‌سنگ، زغال‌سنگ تاثیر بر محیط زیست" انتشارات جهاد دانشگاهی واحد امیرکبیر، ص ۲۸۱
- یزدی م، (۱۳۸۲)، "زغال‌سنگ از منشأ تا اثرات زیست محیطی"، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Burning\\_Mountain](https://en.wikipedia.org/wiki/Burning_Mountain)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Coal\\_seam\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Coal_seam_fire)
- <https://www.iea.org>
- Berkowitz, N. (2012), An introduction to coal technology. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 5, p.98.
- Singh A.K., Singh R.V.K., Singh M.,(2007), Chandra H. and Shukla N.K., "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.
- Banerjee S.C., Spontaneous Heating of coal and Mine Fires, Oxford and IBH
- 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. pp. 399-406.



- Banerjee, S. C. (2000), Prevention and combating mine fires. Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., 33.
- Banerjee, S. C. and Chakravarty, R. N.,(1967), Use of D.T.A. in the Study of Spontaneous Combustion of Coal, **Journal of Mines, Metals and Fuels**, Jan., pp.1-5.
- Banerjee S.C., (1985), “Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fire”, Dhanbad-India: Central Mining Research Station. , Oxford & IBH Publishing Co, pp. 168.
- Beamish B.B., Blazak D.G., Hogarth L.C. and Jabouri I., (2005), “R70 Relationships and Their Interpretation at a Mine Site”, **Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, Australia, pp. 183-185.
- Beamish B.B., 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, Blazak D G, Hogarth L C S, and Jabouri I, (2005). R70 relationships and their interpretation at a mine site, in Proceedings of 2005 Coal Operators Conference (Ed: N Aziz), pp 103-186 (University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy).
- Beamish, B., Barakat, M.A. and George, J.D.S., 2000. “Adiabatic testing procedures for determining the selfheating propensity
- Bhattacharya K.K., (1971), “The role of absorption of water vapour in the spontaneous heating of coal”, **Journal of Fuel**, Volume 50, Issue 4, pp. 367-380.
- Cassedy, E. and Grossman, P.,(1993) Introduction to energy: resources, technology and Coal for development.
- World Coal Institute,1 edition.coal utilization. Oxford 2007.
- D.S.NimajeD.P.Tripathy.,(2016). Characterization of some Indian coals to assess their liability to spontaneous combustion, Fuel Volume 163, Pages 139-147doi:10.1007/s10973-009-0305-z.
- Gangopadhyay P.K., (2008), Ph.D. thesis, “Coalfire related CO2 emissions and remote sensing”, The Netherlands, University of Utrecht, pp. 176,
- 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.
- Grewer, T., (1994). “Thermal hazards of chemical reaction”, Industrial Safety Series, Elsevier Press, Amsterdam, Vol. 4, pp.444, ISBN 978-906164-267-1.
- Ham B., A Review of Spontaneous Combustion Incidents, Coal Operators' Conference, University of Wollongong, Australia, pp. 237-242, 2005.
- Karmakar,N.C and Banerjee, S.P.,(2002). “A comparative study of crossing point
- Kaymakci E. and Didari V., “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.
- Liming Yuan, Alex C. SmithWang. (2012). "The effect of ventilation on spontaneous heating of coal". Office of Mine Safety and Health Research, National Institute for Occupational Safety and Health, P.O. Box 18070, Cochrans Mill Road, Pittsburgh, PA 15236, USA
- 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, “Technical Reference for Spontaneous Combustion Management Guideline”, Produced by Mine Safety Operations Branch Industry and Investment NSW, 2011.
- Mohalik N.K., Panigrahi D.C. and Singh V.K., (2009- a), “Application of thermal analysis techniques to assess proneness of coal to spontaneous heating”, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Vol. 98, Issue 2, pp. 507-519,
- 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., (1986), “Geological and Mining Factors Affecting Spontaneous Heating of Coal”, Mining Science and Technology, Vol. 3, pp. 217-231.

- Nandy D.K, Banerjee D.D and Chakravorty R.N.,(1972), Application of crossing point temperature for determining the spontaneous heating characteristics of coal, **J. Mines Met. Fuels** 20 (2), pp. 41–48.
- Nelson M.I. and Chen X.D., (2007), “Survey of experimental work on the self-heating and spontaneous combustion of coal”, **The Geological Society of America Reviews in Engineering Geology**, Vol. 18, pp. 31-83, doi: 1130/2007.4118(04).
- Nimaje D.S, Tripathy D.P,(2010), Thermal studies on spontaneous heating of coal, **The Indian Mining & Engineering Journal**, pp. 10 – 21.
- 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.
- Qian, Minggao.,Shi, Pingwu.,(2003), “MinePressure And Strata Control. Xuzhou”: ChinaUniversity of Mining and Technology Press.
- Ren,W.X, Wu, B.W, 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, 2009.
- Sahu H.B., Panigrahi D.C. and Mishra N.M., (2004), “Assessment of spontaneous heating susceptibility of coal seams by differential scanning calorimetry”, **journal of mines, metal and fuels**, Vol. 52, Issues 7-8, pp. 117-121.
- Sahu H.B., Panigrahi D.C. and Mishra N.M., (2005), “Assessment of spontaneous heating susceptibility of coal seams by experimental techniques- a comparative study”, **International Symposium on Advances in Mining Technology and Management**, pp. 459-465.
- Singh A.K., Singh R.V.K., Singh M.P., (1998),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 society. Cambridge University Press, Cambridge,.
- Stracher, G. and Taylor, T., (2004), Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe. *International Journal of CoalGeology*, 59 7-17.
- Suarez-Ruiz, I. and Crelling, J.(1989), Applied coal petrology, the role of petrology in

temperature Index, Polish SZb index and Russian U- Index of susceptibility of coal to spontaneous combustion”, MGMI, vol-86, , pp. 113-121.

- Uludag S., (2001), M.Sc Dissertation, “Assessing Spontaneous Combustion Risk in South African Coal Mines Using a GIS Tool”, University of Witwatersrand, South Africa, pp. 154.
- Voigta S, Tetzlaff A, Zhang JZ, et al. "Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China," **International Journal of Coal Geology**, 59 (2004) 121– 136.
- Wang H., Dlugogorski B.Z. and Kennedy E.M., (2003), “Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling”, **Journal of Progress in Energy and Combustion Science**, Vol. 29, Issue 6, pp. 487-513.
- Wang, X.Y. and Luo, Y., (2011). “Experimental Studies of Spontaneous Combustion Propensity of Coal”. **International Pittsburgh Coal Conference**. Pittsburgh. PA.
- 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.
- ZHANG Ying-hua, LAI Yi-kun, HUANG Zhi-an, GAO Yu-ku. (2011). " Study on small simulation device of coal spontaneous combustion process". *Procedia Engineering* 26 922 – 927. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.225.
- Zhanli Mao, Hongya Zhu, Xuejuan Zhao, Jinhua Sun, Qingsong Wang. (2013). " Experimental study on characteristic parameters of coal spontaneous combustion". , **The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology**. *Procedia Engineering* 62 , 1081 – 1086. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.164.

Time (min)	Oven (°C)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9
0	50	45.405	45.003	48.190	45.200	44.900	43.222	44.459	43.369	44.006
1	51	45.660	45.257	48.459	45.465	45.182	43.428	44.751	42.796	44.244
2	52	45.927	45.543	48.787	45.750	45.496	43.643	45.079	42.951	44.523
3	53	46.190	45.818	49.015	46.033	45.794	43.861	45.533	42.231	44.776
4	54	46.463	46.092	49.252	46.324	46.095	44.081	45.825	42.369	45.028
5	55	46.753	46.395	49.538	46.639	46.425	44.322	46.136	42.309	45.319
6	56	47.056	46.707	49.804	46.968	46.760	44.576	46.528	42.268	45.611
7	57	47.364	47.007	49.969	47.299	47.086	44.840	46.833	42.417	45.879
8	58	47.703	47.381	50.361	47.680	47.470	45.139	47.199	42.434	46.253
9	59	48.028	47.753	50.791	48.058	47.862	45.417	47.602	42.662	46.636
10	60	48.380	48.142	51.166	48.431	48.260	45.734	47.897	42.929	47.030
11	61	48.745	48.545	51.562	48.817	48.678	46.060	48.198	43.204	47.436
12	62	49.116	48.963	52.006	49.245	49.110	46.391	48.647	43.473	47.868
13	63	49.505	49.429	52.615	49.674	49.572	46.755	49.017	43.780	48.374
14	64	49.898	49.994	53.646	50.149	50.123	47.119	49.534	44.088	49.042
15	65	50.324	50.451	54.120	50.596	50.588	47.515	50.105	44.422	49.516
16	66	50.741	50.918	54.607	51.043	51.060	47.905	50.485	44.760	50.005
17	67	51.175	51.401	55.123	51.509	51.548	48.315	50.927	45.107	50.507
18	68	51.632	51.905	55.687	51.998	52.056	48.742	51.642	45.471	51.030
19	69	52.083	52.405	56.219	52.481	52.556	49.171	52.123	45.853	51.549
20	70	52.554	52.983	57.002	53.012	53.122	49.625	52.668	46.249	52.196
21	71	53.049	53.529	57.637	53.541	53.671	50.103	53.228	46.659	52.779
22	72	53.545	54.068	58.232	54.072	54.207	50.583	53.890	47.077	53.341
23	73	54.054	54.610	58.798	54.609	54.750	51.075	54.534	47.507	53.898
24	74	54.582	55.198	59.516	55.181	55.332	51.592	55.030	47.959	54.523
25	75	55.128	55.778	60.211	55.756	55.899	52.138	55.748	48.443	55.130
26	76	55.689	56.367	60.866	56.344	56.486	52.696	56.402	48.935	55.748
27	77	56.287	56.992	61.584	56.968	57.104	53.305	57.259	49.463	56.422
28	78	56.900	57.599	62.169	57.593	57.699	53.941	58.025	50.011	57.057
29	79	57.516	58.179	62.956	58.211	58.250	54.572	58.779	50.571	57.707
30	80	58.170	58.829	63.645	58.874	58.895	55.253	59.567	51.160	58.411
31	81	58.842	59.506	64.396	59.560	59.555	55.954	60.375	51.770	59.140
32	82	59.541	60.229	65.306	60.280	60.257	56.705	61.118	52.426	59.959
33	83	60.229	60.960	66.147	60.997	60.965	57.430	61.844	53.061	60.774
34	84	60.987	61.696	66.936	61.752	61.689	58.241	62.725	53.764	61.586
35	85	61.700	62.407	67.663	62.473	62.375	59.006	63.568	54.456	62.360
36	86	62.449	63.159	68.473	63.231	63.102	59.813	64.411	55.175	63.190
37	87	63.229	63.902	69.151	63.998	63.836	60.656	65.436	55.923	64.013
38	88	64.001	64.654	69.859	64.766	64.567	61.486	66.353	56.675	64.831
39	89	64.788	65.441	70.676	65.556	65.328	62.341	67.170	57.445	65.712
40	90	65.579	66.257	71.592	66.359	66.123	63.193	68.016	58.223	66.642
41	91	66.368	67.038	72.322	67.147	66.882	64.048	68.788	59.007	67.513
42	92	67.179	67.873	73.232	67.969	67.690	64.920	69.726	59.822	68.456
43	93	67.986	68.677	74.006	68.776	68.474	65.790	70.650	60.624	69.360

44	94	68.784	69.554	75.236	69.611	69.310	66.657	71.763	61.440	70.366
45	95	69.602	70.335	75.993	70.412	70.085	67.524	72.838	62.264	71.214
46	96	70.406	71.110	76.834	71.204	70.845	68.384	73.928	63.082	72.053
47	97	71.207	71.985	77.783	72.037	71.684	69.241	74.814	63.907	73.046
48	98	72.009	72.847	78.691	72.866	72.519	70.088	75.616	64.721	74.014
49	99	72.810	73.697	79.526	73.689	73.345	70.935	76.454	65.536	74.967
50	100	73.606	74.560	80.732	74.514	74.185	71.767	77.192	66.346	75.932
51	101	74.401	75.408	81.506	75.333	75.015	72.607	78.024	67.161	76.896
52	102	75.215	76.250	82.558	76.159	75.849	73.448	78.856	67.979	77.819
53	103	76.021	76.966	83.773	76.926	76.556	74.296	79.688	68.806	78.518
54	104	76.828	77.617	84.820	77.665	77.225	75.136	80.553	69.618	79.122
55	105	77.625	78.461	85.443	78.484	78.049	75.960	81.399	70.426	80.044
56	106	78.423	79.387	85.851	79.336	78.950	76.774	82.185	71.221	81.097
57	107	79.218	80.256	86.076	80.164	79.801	77.597	83.191	72.024	82.066
58	108	80.021	81.106	87.168	80.986	80.637	78.417	84.186	72.823	82.983
59	109	80.826	82.061	87.912	81.856	81.564	79.242	85.185	73.622	84.083
60	110	81.615	82.949	88.884	82.689	82.437	80.041	86.368	74.414	85.068
61	111	82.425	83.884	89.604	83.553	83.345	80.875	87.561	75.228	86.132
62	112	83.238	84.777	90.530	84.399	84.234	81.705	88.709	76.039	87.131
63	113	84.028	85.715	91.324	85.251	85.158	82.505	90.376	76.820	88.212
64	114	84.832	86.511	92.169	86.053	85.965	83.312	91.736	77.605	89.045
65	115	85.638	87.330	93.458	86.863	86.785	84.133	92.686	78.404	89.904
66	116	86.439	88.124	94.558	87.662	87.599	84.927	94.068	79.178	90.721
67	117	87.244	88.907	95.485	88.458	88.385	85.746	95.523	79.985	91.519
68	118	88.037	89.917	96.779	89.344	89.374	86.534	96.412	80.761	92.705
69	119	88.860	90.875	97.897	90.225	90.322	87.365	97.075	81.567	93.797
70	120	89.671	91.499	98.802	90.954	91.982	88.178	98.600	82.378	94.320
71	121	90.491	92.633	99.593	91.909	92.079	88.998	99.857	83.178	95.711
72	122	91.300	93.379	100.830	92.691	93.678	89.810	100.528	83.971	96.447
73	123	92.088	94.205	102.088	93.495	94.714	90.593	101.520	84.763	97.322
74	124	92.928	95.260	103.349	94.424	95.482	91.438	102.558	85.584	98.578
75	125	93.737	95.996	104.110	95.201	96.262	92.231	103.722	86.370	99.294
76	126	94.569	96.745	104.833	95.996	97.269	93.058	104.949	87.168	100.035
77	127	95.397	97.768	105.675	96.905	98.156	93.883	106.500	87.985	101.238
78	128	96.204	98.651	106.993	97.744	99.129	94.688	107.756	88.784	102.211
79	129	97.052	99.617	107.881	98.640	100.816	95.529	109.475	89.594	103.315
80	130	97.867	100.408	108.676	99.445	101.686	96.334	110.758	90.389	104.116
81	131	98.707	101.272	110.421	100.292	102.521	97.164	113.220	91.184	105.040
82	132	99.552	102.125	112.106	101.138	103.362	97.999	115.010	92.000	105.945
83	133	100.362	102.944	113.191	101.952	104.305	98.792	117.196	92.779	106.792
84	134	101.182	103.777	113.946	102.795	105.255	99.603	119.008	93.573	107.647
85	135	102.019	104.721	115.172	103.678	106.188	100.422	121.399	94.366	108.690
86	136	103.673	105.677	116.781	104.566	107.017	101.246	124.604	95.166	109.753
87	137	104.515	106.615	118.805	105.436	108.697	102.050	127.819	95.967	110.797
88	138	105.357	107.428	120.654	106.266	109.125	102.873	131.404	96.761	111.608
89	139	106.197	108.289	122.735	107.118	110.450	103.698	135.803	97.557	112.482
90	140	107.829	109.099	124.745	107.946	111.512	104.525	140.322	98.360	113.275
91	141	108.679	110.660	126.680	109.085	112.034	105.331	144.655	99.162	115.363

92	142	110.043	112.066	128.692	110.202	113.133	106.153	149.786	99.960	117.160
93	143	111.775	113.166	131.665	111.174	114.272	106.988	156.395	100.764	118.434
94	144	112.628	114.457	134.275	112.483	116.409	108.092	166.954	101.584	119.864
95	145	113.500	115.607	136.060	113.482	118.611	108.929	170.985	102.382	121.199
96	146	114.373	116.795	137.990	114.495	120.946	109.779		103.189	122.586
97	147	115.237	117.996	139.525	115.502	122.524	110.613		104.002	124.004
98	148	116.553	119.290	142.115	116.560	124.524	111.477		104.824	125.547
99	149	118.353	120.535	146.369	117.598	126.138	112.333		105.644	126.998
100	150	119.670	121.806	150.024	118.660	129.438	113.187		106.460	128.489
101	151	121.032	123.235	155.081	119.996	131.994	114.269		107.284	130.104
102	152	122.392	124.831	160.852	121.659	134.505	115.605		108.198	131.875
103	153	123.301	126.314	170.258	123.039	137.306	116.680		109.016	133.557
104	154	124.207	127.829	182.856	124.438	140.832	117.792		109.855	135.271
105	155	125.135	129.341	191.528	125.854	143.266	118.907		110.687	136.987
106	156	126.048	130.753		127.004	145.524	119.807		111.542	138.647
107	157	127.506	132.173		128.146	148.155	120.700		112.387	140.316
108	158	128.460	133.603		129.362	151.324	121.617		113.247	141.999
109	159	129.930	134.979		130.577	154.861	122.517		114.165	143.645
110	160	131.440	136.845		132.199	160.119	123.703		115.138	145.919
111	161	132.440	138.867		133.610	165.478	124.630		116.052	148.597
112	162	133.985	141.359		135.506	170.170	125.825		117.927	151.928
113	163	135.495	144.317		137.321	175.862	127.050		118.814	156.030
114	164	136.630	147.100		139.264	180.179	128.015		119.708	160.537
115	165	138.150	149.786		140.971	185.974	129.268		120.597	165.001
116	166	138.705	152.972		142.902	193.558	130.483		121.523	173.270
117	167	141.525	156.395		144.578	198.842	131.550		122.486	180.810
118	168	143.875	161.627		146.447		132.780		123.413	190.180
119	169	147.185	166.954		148.325		133.558		124.418	200.350
120	170	148.370	170.985		149.908		134.625		125.445	
121	171	151.275	177.040		152.429		135.983		126.392	
122	172	153.775	181.794		154.393		137.328		127.435	
123	173	156.125	188.319		156.329		138.188		128.464	
124	174	159.562	196.196		159.616		139.518		129.490	
125	175	161.895	202.149		163.197		140.903		130.535	
126	176	164.357			166.152		141.523		131.492	
127	177	167.693			169.416		142.025		132.521	
128	178	170.489			172.552		143.165		133.646	
129	179	175.234			175.175		144.563		134.779	
130	180	180.615			180.600		145.500		135.812	
131	181	184.775			193.091		146.953		136.962	
132	182	189.575			198.640		147.625		138.156	
133	183	192.055			203.820		148.435		141.951	
134	184	194.680			208.280		150.178		146.493	
135	185	197.515			213.980		151.965		152.406	
136	186	200.545			221.530		153.260		158.647	
137	187	203.310			229.270		155.468		163.149	
138	188	207.350					158.893		166.143	
139	189	211.140					161.445		169.787	

140	190	215.650					162.923		172.876	
141	191	221.210					163.263		176.097	
142	192	227.000					164.603		179.905	
143	193						165.903		182.985	
144	194						166.193		187.592	
145	195						168.383		195.441	
146	196						170.033		204.124	
147	197						173.345		210.103	
148	198						175.903		217.529	
149	199						178.183		223.240	
150	200						180.975		230.705	
151	201						183.585			
152	202						187.875			
153	203						189.698			
154	204						191.541			
155	205						193.396			
156	206						195.138			
157	207						197.134			
158	208						200.806			
159	209						205.126			
160	210						210.710			
161	211						214.815			
162	212						221.370			
163	213						228.135			
164	214									
165	215									
166	216									
167	217									
168	218									
169	219									
170	220									





## **Abstract**

Fire is one of the most harmful accidents that occurs in underground and open pit mines. But if the fire occurs in the presence of methane gas, the explosion risk increases. Self-burning coal is a spontaneous combustion process that causes environmental and economic harm. The inherent parameters as the main parameters play a major role in coal spontaneous combustion. In this study, the phenomenon oxidation of coal is first defined and the mechanism of coal spontaneous combustion and its diagnostic method have been investigated. Finally, due to the advantages of laboratory methods, CPT method has been used to investigate the effect of inherent parameters on coal-burning phenomenon power in central Alborz coal mines. In general, the effects of inherent factors on coal spontaneous combustion should be considered simultaneously, because each of the intrinsic factors has a different effect on coal spontaneous combustion of coal. In general, with increasing the percentage of pyrite, moisture, massal lipitinitis and self-burning vitrites, increased coal spontaneous combustion with increasing carbon content and invertinitis. The highest inclination to self-immolation has been recorded for the sample of the Mahan mine; the least tendency to self-immolation has been recorded in the specimen belonging to the Erosharghi mine. In general, the tendency to coal spontaneous combustion in the central Alborz mines is moderate and low.

Key words: coal spontaneous combustion, crossing point temperature, intrinsic factors





Shahrood university of technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

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

**Yasin Mortezaejad**

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

Janury 2019