

## کاربرد سنجش از راه دور (Remote Sensing) در شناسایی آتش سوزی های زغالی

امیر صفاری<sup>۱\*</sup>، فرهنگ سرشکی<sup>۲</sup>، محمد عطائی<sup>۳</sup>، کرامت قنبری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

۳- استاد دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

۴- مدیر HSE شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی

amirsaffari5710@yahoo.com

### چکیده

آتش سوزی های زغالی یکی از رایج ترین خطرات زمین شناسی در کشورهای اصلی تولید کننده زغالسنگ مانند هند، چین، ایالات متحده آمریکا، استرالیا، اندونزی، روسیه، آفریقای جنوبی و غیره است. احتراق زغالسنگ می تواند به صورت خودبخودی یا بر اثر فعالیت های انسانی در لایه های زغال زیرزمینی یا در لایه های زغال روباز در سطح زمین ایجاد شود. سوختن میلیون ها تن زغالسنگ، تاثیرات منفی عظیمی در محیط زیست محلی و جهانی دارد. آتش سوزی های زغالی باعث تولید مقادیر زیادی از گازهای گلخانه ای مانند CO<sub>2</sub>، CO، CH<sub>4</sub>، SO<sub>x</sub> و NO<sub>x</sub> می شوند که این گازها دارای تاثیر مستقیم بر روی ترکیب اتمسفر محلی و جهانی دارند. از دوران قبل از انقلاب صنعتی تاکنون، غلظت گاز CO<sub>2</sub> که یکی از اصلی ترین گازهای گلخانه ای در گرمایش زمین محسوب می شود از 280ppm به 375ppm افزایش یافته است. نشست زمین یکی دیگر از مشکلات مرتبط به مناطقی است که تحت تاثیر آتش سوزی قرار گرفته است. آتش سوزی زغالی همچنین باعث ایجاد مشکلات در معادن فعال موجود و باعث به مخاطره افتادن ایمنی انسان ها می شود. بعد از اولین استفاده «سنجش از راه دور» برای مطالعه آتش سوزی زغالی در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی، این تکنولوژی، به عنوان یکی از ابزارهای مفید و مناسب برای کشف، آشکارسازی و نظارت بر آتش سوزی های زغالی شناخته شده است. در این روش شناسایی از چندین گیرنده و حسگر گرمایی هوایی- ماهواره ای استفاده می شود. تلاش های اندکی در زمینه برآورد نشت آتش سوزی های زغالی با استفاده از روش «سنجش از راه دور» صورت گرفته است به همین دلیل در این مقاله به معرفی و روش شناسایی و آشکارسازی آتش سوزی های زغالی توسط آن پرداخته شده است.

**کلمات کلیدی:** زغالسنگ، تاثیرات زیست محیطی، آتش سوزی های زغالی، خودسوزی زغال، سنجش از راه دور

### ۱- مقدمه

مواد معدنی ستون فقرات رشد اقتصادی هر کشوری را تشکیل می دهند و زغالسنگ یکی از مواد معدنی است که به راحتی و در مقدار زیاد در دسترس می باشد و به عنوان منبع اصلی انرژی در بسیاری از نقاط جهان مورد استفاده قرار می گیرد. کل ذخایر قابل استحصال زغالسنگ در سراسر جهان در حدود ۱۰۸۳ میلیارد تن تخمین زده شده است، که با سطح مصرف فعلی تا ۲۱۰ سال دیگر به پایان می رسد (Gangopadhyay, P.K, 2007).

اگر چه ذخایر زغالسنگ به طور گسترده ای در سراسر جهان توزیع شده است، اما ۶۰٪ از ذخایر قابل استخراج در ۳ کشور قرار گرفته است: ایالات متحده آمریکا (۲۵٪)، اتحاد جماهیر شوروی سابق (۲۳٪) و چین (۱۲٪). استرالیا، هند، آلمان و آفریقای جنوبی در مجموع ۲۹٪ از ذخایر قابل استخراج زغالسنگ را در خود جای داده اند (Gangopadhyay, P.K, 2007).

آتش سوزی های زغالی در معادن روباز و زیرزمینی یکی از مسائل جدی در کشورهای تولیدکننده زغالسنگ است. سوختن زغال می تواند در لایه های زغال (در معادن زیرزمینی و روباز)، در محل انباشتگاه های زغال یا در محل انباشتگاه های باطله آن در سطح زمین اتفاق بیفتد. آتش سوزی در لایه های زغال می تواند به طور خودبخود تحت شرایط معینی رخ دهد. در پاره ای دیگر از آتش سوزی ها، جرقه و سهل انگاری نیروهای کاری باعث ایجاد آتش سوزی می شود (Sinha, P.R, 1986). همان طور که در شکل شماره ۱ مشاهده می شود آتش سوزی های زغالی در بسیاری از کشورهای تولیدکننده زغال، مانند چین، هند، اندونزی، ایالات متحده آمریکا، استرالیا، آفریقای جنوبی و روسیه رایج است.



● مناطقی که در آنها آتش سوزی های زغالی رخ داده است.

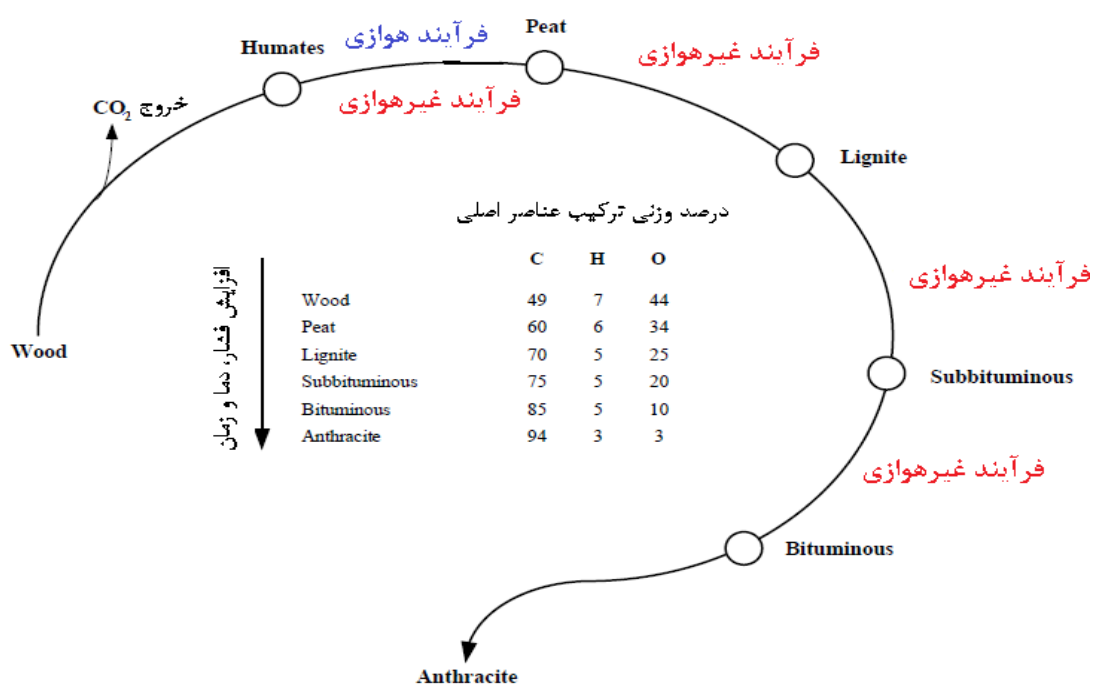
شکل ۱- آتش سوزی های زغالی در کشورهای تولیدکننده زغالسنگ (Gervet, B, 2007)

## ۲- شکل گیری زغالسنگ

زغالسنگ، به عنوان یکی از پر استفاده ترین سوخت های فسیلی، که به سهولت می سوزد و بیش از ۵۰٪ از وزنش را مواد کربن دار تشکیل داده است بر اثر دگرگونی بقایای گیاهی، تحت فشار، حرارت و با گذشت زمان در طی میلیون ها سال به وجود می آید. در ابتدا بقایای گیاهی در حوزه های باتلاقی رسوب کرده و تشکیل زغالسنگ نارس یا تورب (Peat) را می دهند.

زمان، گرما و فشار ۳ عامل تعیین کننده در درجه زغال شدگی هستند که با افزایش میزان کربن، زغال ها به انواع Lignite (زغال قهوه ای- نارس) و Sub-Bituminous (زغال نیمه قیری)، Bituminous (زغال قیری) و Anthracite (زغال سخت) تقسیم بندی می شوند که در شکل شماره ۲ مجموعه فرآیند زغال شدگی مشاهده می شود.

خواص فیزیکی زغال مانند رنگ، وزن مخصوص، سختی و غیره به طور قابل ملاحظه ای در انواع مختلف زغال ها متفاوت است. این اختلاف ها به ترکیب، نوع مواد گیاهی و میزان فشار و حرارتی که در شکل گیری زغال نقش داشته اند بستگی دارد. مقدار ناخالصی ها در زغال به خاک و سیلت (لای سنگ) که با مواد اصلی ترکیب شده اند و مقدار زمان، گرما و فشاری که در شکل گیری زغال نقش داشته اند بستگی دارد (اصانلو م، ۱۳۷۸؛ یزدی م، ۱۳۸۲).



شکل ۲ - نمای کلی از مجموعه مراحل زغال شدگی

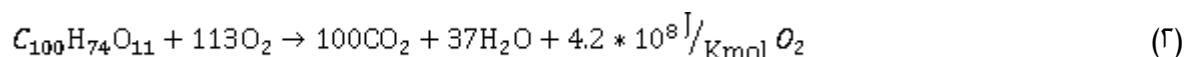
### ۳- احتراق خودبخودی یا خودسوزی زغال (Spontaneous Combustion of Coal)

Self-heating یا به عبارتی دیگر Spontaneous Combustion مهم ترین علت آتش سوزی و یکی از خطرات اجتناب ناپذیر در معادن زغالی و در صنایع وابسته به زغالسنگ در سراسر جهان است. خودسوزی زغالسنگ در معادن زیرزمینی، معادن روباز، انباشتگاه های زغال (در معادن، نیروگاه ها و بنادر ساحلی)، در هنگام حمل و نقل های دریایی و در مکان های دفع باطله های حاصل از معدنکاری و صنایع مرتبط می تواند به وجود آید (Gangopadhyay, P.K, 2007).

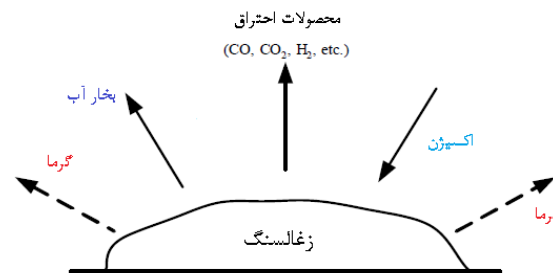
سوختن زغال یک فرآیند شیمیایی است که به طور ساده با معادله شماره ۱ نشان داده می شود.



عملاً، سوختن زغال پیچیده تر است و ممکن است شامل مراحل مختلفی باشد که در معادله شماره ۲ نشان داده شده است، همچنین سوختن زغال وابسته به حضور فاکتورهای دیگری مانند بخار آب، پیریت، سطح تاثیر، میزان اکسیژن موجود در هوا، دما، ترکیب زغال و غیره است.



این واکنش با جذب سطحی اکسیژن یا برآشامی (Adsorption) در سطح زغال شروع می شود و یک واکنش گرمازا است و باعث افزایش دمای زغال می شود که به این دما، «دمای آستانه یا Threshold Temperature» گفته می شود. محدوده این دما بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد است و باعث تولید گازهایی مانند  $\text{CO}$ ،  $\text{CO}_2$ ،  $\text{H}_2$  و غیره می شود. در شکل شماره ۳ نمایی از جذب سطحی اکسیژن نشان داده شده است (Gangopadhyay, P.K, 2007).



شکل ۳ - چگونگی شکل گیری پدیده گرمایش خودبه خودی زغالسنگ (Grewer, 1994)

دمای زغال افزایش می یابد تا اینکه به دمایی در محدوده ۲۳۰ تا ۲۸۰ درجه سانتیگراد برسد که در این حالت واکنش به شدت گرمایزا است به عبارت دیگر زغال به حالت اشتعال با شعله (Ignition) یا نقطه درخشش (Flash Point) رسیده است و آتش سوزی اصلی در این مرحله شروع می شود (Gangopadhyay, P.K., 2007).  
شکل شماره ۴ نشان دهنده مثلث آتش برای تشکیل هر گونه آتش سوزی است.

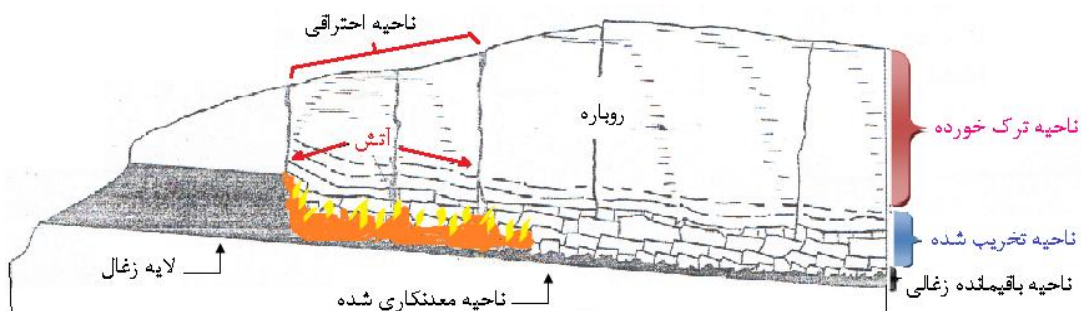


شکل ۴ - مثلث آتش (Huw et al., 2002)

مجموعه فرآیند خودسوزی را می توان بر اساس ۶ مرحله زیر بیان کرد:

- ۱- ایجاد فرآیند اکسیداسیون زمانی که اکسیژن با سوختی مانند زغالسنگ واکنش نشان می دهد.
- ۲- شروع فرآیند اکسیداسیون و تولید گرمای
- ۳- اگر گرمای تولید شده از فرآیند اکسایش زغالسنگ توسط سنگ های اطراف جذب شود و یا توسط هوای تهویه پراکنده گردد، دمای زغال افزایش نمی یابد و اکسایش با دمای کم صورت می گیرد.
- ۴- اگر گرمای تولید شده پراکنده نشود، دمای زغال افزایش یافته و باعث می شود تا اکسایش 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 صورت می گیرد.

- فاکتورهای بیرونی زیادی در واکنش اکسیداسیون زغال دخیل هستند که در زیر به چند مورد از آن‌ها اشاره شده است.
- حجم هوای تهویه در یک معدن، که اگر شدت جریان هوا زیاد باشد باعث خروج گرما می‌شود و زغال به دمای احتراق نمی‌رسد اما اگر این حجم از هوا ناکافی باشد و نتواند گرما را به بیرون منتقل کند عاملی منفی تلقی شده و باعث رسیدن دمای زغال به دمای احتراق می‌شود.
- شکاف‌ها، شکستگی‌ها و تخلخل خاک و سنگ‌های روباره لایه زغال در یک معدن زیرزمینی، که باعث رسیدن اکسیژن به لایه زغال شده و باعث گرمایش زغال می‌شود (شکل شماره ۵).
- وجود بخار آب در گرمایش خودبخودی زغالسنگ تاثیرگذار است و باعث افزایش تمایل به خودسوزی زغال می‌شود.



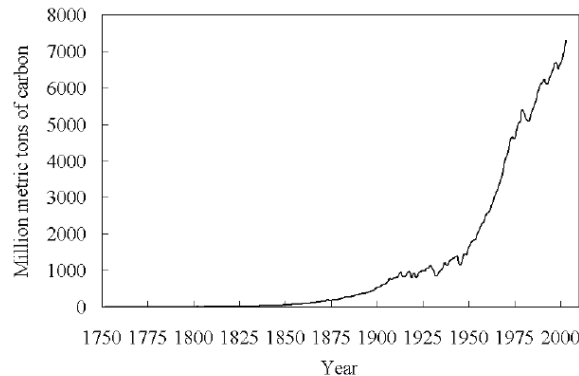
شکل ۵ - نمایی از مناطق مستعد احتراق خودبخودی در نواحی معدنکاری شده (Cao, D, 2007)

#### ۴- تاثیرات زیست محیطی آتش‌سوزی‌های زغالی

آتش‌سوزی‌های زغالی یکی از مسایل مهم در صنعت معدنکاری است که به طور مستقیم و غیرمستقیم بر مسائل زیست محیطی و اقتصادی تاثیرگذار است که به بعضی از آن‌ها در زیر اشاره شده است:

- آلودگی فوری محیط زیست توسط انتشار گازهای سمی، مانند  $CO$ ،  $CO_2$ ،  $NO_x$ ،  $SO_x$  و  $CH_4$ . در بین این گازهای سمی  $CO_2$  و  $CH_4$  در گرم شدن کره زمین شرکت می‌کنند.
- نشست زمین یکی دیگر از رخدادهای رایج در نواحی ای است که تحت تاثیر آتش‌سوزی زیرسطحی قرار گرفته است.
- انتشار گرما از آتش‌سوزی‌های زغالی باعث افزایش دمای محلی می‌شود.
- آتش‌سوزی‌های زغالی باعث افزایش هزینه‌های تولید، به دلیل ایجاد مشکل در بهره‌برداری و استخراج معدن می‌شوند.
- آتش‌سوزی زغالی باعث هدر رفت منابع انرژی با ارزش می‌شود.

محققین بسیاری افزایش غلظت گاز  $CO_2$  در اتمسفر را از زمان انقلاب صنعتی به بعد تایید کرده‌اند به نحوی که غلظت این گاز در اتمسفر جهانی در مرحله هشدار قرار دارد. شکل شماره ۶ نشان‌دهنده میزان انتشار گاز  $CO_2$  ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ میلادی به بعد است (Gangopadhyay, P.K, 2007).



شکل ۶ - میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ میلادی تا سال ۲۰۰۰ (Gangopadhyay, P.K, 2007)

سایر محققان نیز تایید کرده‌اند که غلظت گاز CO<sub>2</sub> تا میزان 375ppm افزایش داشته است. از سال ۱۷۵۰ میلادی تا سال ۲۰۰۰ میلادی غلظت گاز متان (CH<sub>4</sub>)، در اتمسفر تا حدود ۱۵۰٪ (1060ppb) و غلظت گاز NO<sub>2</sub> تا حدود ۱۶٪ (46ppb) افزایش یافته است (Gangopadhyay, P.K, 2007).

## ۵- آشکارسازی و پایش آتش‌سوزی‌های زغالی

### ۵-۱- گمانه‌های اندازه‌گیری

بدیهی است که آتش‌سوزی‌های زغالی سطحی به آسانی شناسایی و پایش می‌شوند؛ درحالی‌که یک آتش‌سوزی زیرزمینی می‌تواند برای مدت زمان زیادی به فعالیت خود ادامه بدهد بدون اینکه هیچ‌گونه نشانه‌ای از خود در سطح زمین داشته باشد. قبل از ابداع روش «سنجش از راه دور» یکی از روش‌های شناسایی آتش‌سوزی‌های زغالی در زیر سطح زمین استفاده از «گمانه‌های اندازه‌گیری» بود که از روش‌های مشهور در این زمینه محسوب می‌شد (شکل شماره ۷).



شکل ۷- نمونه‌ای از گمانه پایش و اندازه‌گیری گرمایش خودبخودی لایه زغال (Huw et al., 2002)

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

## ۵-۲- روش سنجش از راه دور

عکس برداری هوایی بر پایه سنجش از راه دور در اواخر قرن نوزدهم میلادی معرفی شد و بیشتر برای مقاصد شناسایی و اکتشافی مورد استفاده قرار می گرفت. ماهواره های بر پایه سنجش از راه دور در سال ۱۹۶۰ میلادی شروع به کار کردند اما تا سال ۱۹۷۲ بجز برای مقاصد نظامی استفاده نمی شدند. با گذشت زمان استفاده از آنها چشمگیر شد (Gangopadhyay, P.K, 2007).

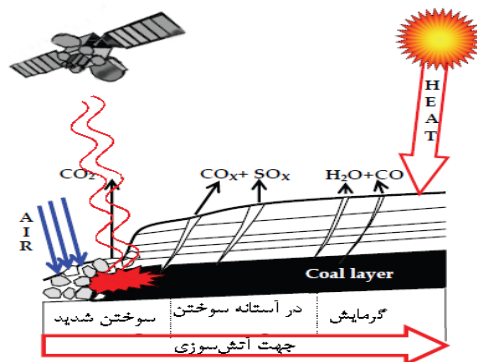
سنجش از دور شامل اجزای زیر است:

- منبع انرژی - برای پرتو افکندن یا ارسال انرژی الکترومغناطیسی به هدف مورد نظر
- پرتو افکنی - انتقال انرژی از منبع به هدف مورد نظر
- فعل و انفعال با هدف - وابسته به خصوصیات هدف و پرتو افکن
- فعل و انفعال با اتمسفر جو - انعکاس و تابش انرژی از هدف از طریق اتمسفر جو انجام می شود.
- ثبت انرژی در گیرنده ها - یک گیرنده، تشعشعات الکترومغناطیسی منعکس شده را ثبت می کند.
- پردازش - داده های ثبت شده توسط گیرنده ها در ایستگاه های زمینی دریافت و پس از پردازش تبدیل به عکس می شوند.
- تجزیه و تحلیل - عکس های پردازش شده به صورت دیداری و یا دیجیتالی مورد تفسیر قرار می گیرند.

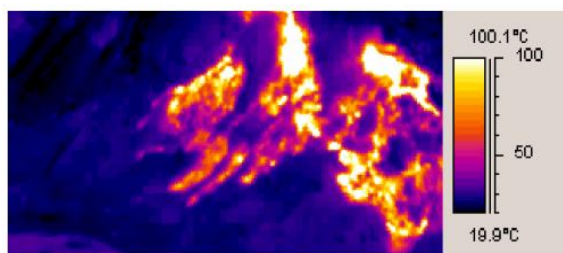
زمانی که یک احتراق شعله دار زغالی در سطح زمین به وجود می آید، انرژی گرمایی قابل توجهی را از خود ساطع می کند (شکل شماره ۸) که به آسانی توسط پردازشگر گرمایی سنجش از راه دور شناسایی می شود. برای تفکیک حرارت ناشی از آتش-سوزی زغالی از انرژی گرمایی خورشید، لازم است تا داده های سنجش از راه دور در شب ثبت شود تا اشتباهی رخ ندهد.

۳ مرحله پیش نیاز برای استفاده از سنجش از راه دور برای شناسایی آتش سوزی های زغالی وجود دارد که در زیر به آنها اشاره شده است (Gangopadhyay, P.K, 2007).

- ۱- گرفتن عکس های حرارتی (ترجیحا در شب) از ناحیه تحت بررسی با استفاده از سنجش از راه دور و پردازش دیجیتالی برای ایجاد نقشه دمای سطح به منظور آشکارسازی آنومالی های دمایی (شکل شماره ۹).
- ۲- بدست آوردن اطلاعات زمین شناسی منطقه.
- ۳- استفاده از دانش زمین شناسی برای حذف آنومالی هایی بجز آنومالی های آتش سوزی ناشی از زغال برای تهیه نقشه گرمایی درجه بندی شده با استفاده از دماهای بدست آمده از ناحیه مورد.



شکل ۸- پدیده خودسوزی زغال و آشکارسازی آن با استفاده از روش سنجش از راه دور (Gangopadhyay, P.K, 2008)



شکل ۹- نمونه‌ای از یک تصویر مادون قرمز حرارتی از یک توده زغال در حال خودسوزی (Huw et al., 2002)

اتمسفر بین آتش‌سوزی زغال و دریافت کننده‌های سنجش از راه دور نقش مهمی را در دقت برآورد دمای سطحی مخصوصا در مطالعات کمی ایفا می‌کنند. دمای سطح بالای یک آتش‌سوزی زغالی به چندین عامل مانند خواص ذاتی (قابلیت تابندگی و دمای آتش) و شرایط نواحی اطراف (نوع خاک، توپوگرافی، دمای محلی، شکاف‌ها و شکستگی‌های سطحی و عمق آتش) بستگی دارد. رطوبت خاک و باد همچنین بر روی دمای سطح تاثیر گذارند. مشخصات گرمایی سنگ نیز فاکتور مهمی در سنجش از راه دورهای گرمایی است. برای مثال، برخی از سنگ‌ها با ظرفیت بالای گرمایی می‌توانند در عکس‌های شبانه به عنوان آتش‌سوزی‌های زغالی ظاهر شوند چون آنها گرمای زیادی را در مقایسه با سایر سنگ‌ها در خود ذخیره می‌کنند. به هر حال عکس‌های گرفته شده پیش از طلوع آفتاب همراه با اطلاعات خوب در زمینه شرایط زمین‌شناسی منطقه مانع از ایجاد آنومالی‌های نادرست می‌شوند (Gangopadhyay, P.K, 2007).

## ۶- نتیجه گیری

در کشورهای توسعه یافته، زغال یکی از اقتصادی‌ترین و فراوان‌ترین منابع انرژی است. یقینا استفاده صحیح از این منبع انرژی مهم و تجدید ناپذیر، نیاز به یک برنامه ریزی صحیح و مدیریت همه جانبه دارد. آتش‌سوزی‌های زغالی یکی از شایع‌ترین مشکلات در اکثر کشورهای تولیدکننده زغالسنگ است. سنجش از راه دور می‌تواند نقش مهمی را در شناسایی و پایش این مشکل محیط زیستی که باعث اتلاف ذخایر اقتصادی و فجایع زیست محیطی می‌شود ایفا نماید. امید است که بتوان از این فناوری در ایران اسلامی نیز استفاده کرد.

## منابع

- اصانلو م.، (۱۳۷۸). مهندسی زغالسنگ، انتشارات ناقوس.
- یزدی م.، (۱۳۸۲). زغال‌سنگ (از منشا تا اثرات زیست محیطی)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- Cao, D. and Guan, H. and Wu, C. and Jia, Y. (2007). "Geological models of spontaneous combustion in the Wuda coalfield, Inner Mongolia, China", The Geological Society of America, Vol. 18, pp. 23-30.
- Gangopadhyay, P.K. (2007). "Application of remote sensing in coal-fire studies and coal-fire-related emissions", The Geological Society of America, Vol. 18, pp. 239-248.
- Gangopadhyay, P.K. (2008). "Coalfire related CO<sub>2</sub> emissions and remote sensing" [Ph.D. thesis] : The Netherlands, University of Utrecht, 176 p.
- Gervet, B. (2007). "Coal fire emission contributes to global warming", Department of Civil and Environmental Engineering Lulea University of Technology Lulea, Sweden.
- Grever, Th. (1994). "Thermal hazards of chemical reaction", Elsevier, Vol 4, pp. 444.
- Huw, P. and Sezer, U. and Kelello C. (2003). "Prevention and control of spontaneous combustion", Best Practice Guidelines for Surface Coal Mines in South Africa, 134 p.
- Sinha, P.R. (1986). "Mine fires in indian coalfields", Energy, Vol. 11-12, pp. 1147-1154.
- USGS, Central region energy resources team, September (2009). "Emissions from Coal Fires and Their Impact on the Environment", Fact Sheet 2009-3084.