**وزارت علوم، تحقیقات و فناوری**

دانشکده فنی و مهندسی

# بررسی سولفورزدایی زغال‌سنگ پرورده طبس با استفاده از بیوفلوتاسیون

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی**

**الهام آبائی**

**استاد راهنما:**

**دکتر عزت‌اله مظفری**

**شهریور ۹۲**

**فهرست جداول**

جدول (۱-۱) ترکیب و دامنه‌های خصوصیات برای درجه‌های مختلف زغال‌سنگ (۱۵)

جدول (۱-۲) طبقه‌بندی انواع زغال کک بر اساس استاندارد سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، با توجه به میزان خاکستر و گوگرد (۱۵)

جدول (۱-۳) طبقه‌بندی انواع زغال کک بر اساس استانداردهای روسی ۷۲-۱۰۵۸۳ و ۷۵-۷۰۵۹ با توجه به میزان خاکستر و گوگرد (۱۶)

جدول (۱-٤) مقادیر میانگین شکل‌های مختلف گوگرد در زغال‌های ایالات متحده به تفکیک منطقه (۱۸)

جدول (۱-۵) شکل‌های شناخته شده سولفید آهن که پتانسیل حضور در زغال را دارند (۲۰)

جدول (۲-۱) انواع محیط‌های کشت و اجزای تشکیل دهنده آنها (۷۳)

جدول (٤-۱) آنالیز زغال‌سنگ پروده طبس از معدن مهرآذین (۸۸)

جدول (٤-۱) آنالیز نمونه زغال‌سنگ مورد استفاده در تست‌های زیستی تشخیصی (۹٦)

جدول (٤-۲) آنالیز خوراک آزمایش‌های فلوتاسیون زیستی مربوط به طراحی آزمایش (۱۰۲)

**فهرست اشکال**

شکل (۱-۱) نسبت گوگرد پیریتی به گوگرد آلی به صورت تابعی از محتوای گوگرد کلی (۱۹)

شکل (۱-۲) سازوکار روش آگلومراسیون کروی نفتی (۲٦)

شکل(۱-۳) رسوبات تریاسیک ژوراسیک ایران: حوزه زغالی پروده (پروده I و II: قرمز؛ پروده III: زرد؛ پروده IV: سبز؛ پروده V: آبی) (۳۵)

شکل (۳-۱) منحنی رشد باکتری‌ها در بازه زمانی ۱۰ روزه (۸۰)

شکل (۳-۲) تغییرات غلظت باکتری با افزایش میزان زغال‌سنگ (۸۲)

شکل (۳-۳) منحنی رشد باکتری در محیط کشت با ۱۷ درصد جامد (۸۳)

شکل (۳-٤) منحنی تغییرات pH محیط کشت باکتری با ۱۷ درصد جامد (۸۳)

شکل (۳-۵) منحنی رشد باکتری‌های بومی همراه با زغال‌سنگ (۸۵)

شکل (۳-٦) منحنی تغییرات pH محیط کشت باکتری بومی با ۱۷ درصد جامد(۸۵)

شکل (٤-۱) بازیابی مواد سوختی، خاکستر و گوگرد در فلوتاسیون معمولی زغال‌سنگ (۹۱)

شکل (٤-۲) مقایسه بازیابی ماده سوختی، گوگرد و خاکستر با افزایش میزان گازوئیل (۹۲)

شکل (٤-۳) مقایسه میان اندیس بازیابی، اندیس جدایش زغال‌سنگ و ضریب پرعیارکردن زغال‌سنگ در مقادیر مختلف گازوئیل (۹٤)

شکل (٤-٤) تاثیر زمان آماده‌سازی بر بازیابی گوگرد، خاکستر و ماده سوختی در فلوتاسیون مرسوم (۹۵)

شکل (٤-۵) تاثیر زمان آماده‌سازی را بر اندیس بازیابی، اندیس جدایش زغال‌سنگ و ضریب پرعیار-کردن (۹٦)

شکل (٤-٦) بازیابی ماده سوختی، خاکستر و گوگرد در فلوتاسیون زیستی (۹۸)

شکل (٤-٧) مقایسه بازیابی گوگرد، خاکستر و مواد سوختی در فلوتاسیون معمولی و زیستی زغال-سنگ (۹۹)

شکل (٤-٨) مقایسه اندیس بازیابی، اندیس جدایش زغال‌سنگ و ضریب پرعیارکردن روش همزنی با شیکر و همزنی مکانیکی(۱۰۰)

شکل (٤-٩) مقایسه بازیابی مواد سوختی، خاکستر و گوگرد روش همزنی با شیکر و همزنی مکانیکی (۱۰۰)

شکل (٤-١٠) اثر استفاده از مخمر در فلوتاسیون زیستی(۱۰۱)

شکل (٤-١١) اثر استفاده از مخمر در اندیس بازیابی، اندیس جدایش زغال‌سنگ و ضریب پرعیار-کردن(۱۰۲)

شکل (٤-١٢) صفحه مربوط داده‌های نرم‌افزار طراحی آزمایش در نرم افزار Dx.7.0.0 (۱۰۳)

شکل (٤-١٣) مقادیر محاسبه‌شده F- Value و P- Value در جدول ANOVA برای بازیابی زغال‌سنگ در نرم‌افزار DX. 7.0.0(١٠٤)

شکل (٤-١٤) اثر غلظت کلکتور در بازیابی ماده سوختی در فلوتاسیون زیستی زغال‌سنگ (۱۰۵)

شکل (٤-١٥) اثر متقابل غلظت کلکتور و زمان کف‌گیری روی بازیابی ماده سوختی (١٠٦)

شکل (٤-١٦) مدل سه بعدی اثر غلظت کلکتور و زمان کف‌گیری روی بازیابی ماده سوختی (١٠٦)

شکل (٤-١٧) نمودار سه‌بعدی اثر غلظت کلکتور و زمان آماده‌سازی روی بازیابی زغال‌سنگ (۱۰۷)

شکل (٤-١٨) محاسبه مقادیر F- Value و P- Value در جدول ANOVA برای بازیابی گوگرد در نرم‌افزار DX.7.0.0 (۱۰۸)

شکل (٤-١٩) اثر غلظت کلکتور روی بازیابی گوگرد در فلوتاسیون زیستی زغال‌سنگ(۱۰۹)

شکل (٤-٢٠) اثر متقابل غلظت کلکتور و زمان کف‌گیری روی بازیابی گوگرد(۱۱۰)

شکل (٤-٢١) نمای سه‌بعدی اثر متقابل غلظت کلکتور و زمان کف‌گیری روی بازیابی گوگرد (١١٠)

شکل (٤-٢٢) اثر مدت زمان کف‌گیری روی بازیابی گوگرد (١١١)

شکل (٤-٢٣) اثر مدت زمان آماده‌سازی روی بازیابی گوگرد (١١١)

شکل (٤-٢٤) اثر غلظت کلکتور روی بازیابی خاکستر در فلوتاسیون زیستی زغال‌سنگ (١١٢)

شکل (٤-٢٥) اثر زمان آماده‌سازی روی بازیابی خاکستر در فلوتاسیون زیستی زغال‌سنگ (١١٣)

شکل (٤-٢٦) اثر زمان کف‌گیری روی بازیابی خاکستر در فلوتاسیون زیستی زغال‌سنگ (١١٣)

شکل (٤-٢٧) محاسبه مقادیر F- Value و P- Value در جدول ANOVA برای عیار گوگرد در نرم-افزار DX.7.0.0 (١١٥)

شکل (٤-٢٨) اثر غلظت کلکتور روی عیار گوگرد در کنسانتره فلوتاسیون زیستی(١١٦)

شکل (٤-٢٩) اثر متقابل غلظت کلکتور و زمان کف‌گیری روی عیار گوگرد در کنسانتره فلوتاسیون زیستی(١١٦)

شکل (٤-٣٠) اثر متقابل زمان کف‌گیری و غلظت کلکتور روی عیار گوگرد در کنسانتره فلوتاسیون زیستی(١١٧)

شکل (٤-٣١) اثر زمان آماده‌سازی روی عیار گوگرد در کنسانتره فلوتاسیون زیستی(١١٧)

شکل (٤-٣٢) مقایسه اندیس بازیابی، اندیس جدایش زغال‌سنگ و ضریب پرعیارکردن در فلوتاسیون معمولی و زیستی در شرایط یکسان (١١٨)

## فهرست مطالب

## فصل اول: کلیات


۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تشکیل ذخایر زغال‌سنگ ۳

۱-۳- سن زمین‌شناسی ذخایر زغال‌سنگ ۳

۱-٤- حجم مواد اولیه مورد نیاز برای تشکیل زغال‌سنگ ۳

۱-۵- منشأ و طرز تشکیل زغال‌سنگ ٤

۱-۵-۱- تجمع گیاهان به حد وفور ٤

۱-۵-۲- تغییرات فیزیکی و شیمیایی گیاهان جمع‌آوری شده ٤

۱-۵-۳- مرحله متامورفیزم ۵

۱-٦- شرایط محیطی لازم برای تشکیل ذخایر زغال‌سنگ ۵

۱-۷- خواص انواع زغال‌سنگ ٦

۱-۸- کاربردهای زغال‌سنگ ٦

۱-۸-۱- صنعت تولید فولاد ۷

۱-۸-۱-۱- دلایل تهیه کک ۷

۱-۸-۱-۲- اهداف کاربرد کک در کوره بلند ۸

۱-۹- منابع و ذخایر زغال‌سنگ ۹

۱-۱۰- طبقه‌بندی زغال‌سنگ ۱۰
۱-۱۰-۱- عوامل موثر در طبقه‌بندی زغال سنگ ۱۰
۱-۱۰-۱-۱- درجه زغال‌شدگی ۱۰
۱-۱۰-۱-۲- رطوبت ۱۰
۱-۱۰-۱-۳- مواد فرار ۱۰
۱-۱۰-۱-٤- خاکستر ۱۱
۱-۱۰-۱-۵- میزان کک‌شوندگی ۱۱
۱-۱۰-۱-٦- قابلیت بازتاب نور ۱۱
۱-۱۰-۱-۷- ارزش حرارتی ۱۱
۱-۱۱- طبقه‌بندی زغال‌سنگ براساس درجه کک‌شوندگی ۱۲
۱-۱۱-۱- زغال‌سنگ شعله‌خیز ۱۲
۱-۱۱-۲- زغال‌سنگ شعله‌خیز گازدار ۱۲
۱-۱۱-۳- زغال‌سنگ گازدار ۱۲
۱-۱۱-٤- زغال‌سنگ چرب ۱۳
۱-۱۱-۵- زغال کک‌شو ۱۳
۱-۱۱-٦- زغال لاغر ۱۳
۱-۱۱-۷- زغال‌سنگ آنتراسیت ۱۳
۱-۱۲- مواد معدنی موجود در زغال‌سنگ ۱٤

۱-۱۲-۱- ترکیب زغال‌سنگ ۱٤
۱-۱۳- گوگرد در زغال‌سنگ ۱۷
۱-۱۳-۱-انواع گوگرد در زغال‌سنگ ۱۷
۱-۱۳-۱-۱- گوگرد آلی ۱۹
۱-۱۳-۱-۲- گوگرد پیریتی ۱۹
۱-۱۳-۱-۲ – ۱- ریخت‌شناسی و پیدایش پیریت ۲۱
۱-۱۳-۱- ۲-۲- تفاوت پیریت زغالی و پیریت معدنی ۲۲
۱-۱٤- حذف گوگرد معدنی از زغال‌سنگ ۲۲
۱-۱٤-۱- روش‌های شیمیایی و زیستی ۲۳
۱-۱٤-۲- روش‌های ثقلی ۲٤
۱-۱٤-۳- جدایش مغناطیسی و الکتروستاتیکی ۲٤
۱-۱٤-٤- آگلومراسیون کروی نفتی ۲۵
۱-۱٤-۵- فلوتاسیون ۲۷
۱-۱۵- روش‌های استاندارد آزمایشگاهی جهت آنالیز کمی و کیفی زغال‌سنگ ۲۹
۱-۱۵-۱- آنالیز رطوبت کلیD3173 ۲۹
۱-۱۵-۲- آنالیز خاکستر ۳۰
۱-۱۵-۳- آنالیز مواد فرار ۳۰
۱-۱۵-٤- آنالیزگوگرد کلی روش اسچکا ۳۱

۱-۱۵-۵- آنالیزگوگرد سولفاتی و پیریتی (Iso 157) ۳۳

۱-۱٦- منطقه زغالی طبس ۳٤

## فصل دوم: تاریخچه روش‌های زیستی حذف گوگرد

۲-۱- مقدمه ۳۷

۲-۲- سازوکار بازداشت پیریت توسط باکتری ۳۸

۲-۲-۱- سازوکار اکسیداسیون پیریت ۳۹

۲-۳- تشکیل جاروسیت ٤۲

۲-٤- تاریخچه گوگردزدایی باکتریایی ٤۳

۲-۵- تاریخچه زیست فلوتاسیون زغال‌سنگ ۵۲

۲-٦- تجارب به دست آمده از آزمایشات گوگردزدایی میکروبی زغال‌سنگ ۵٤

۲-۷- تاریخچه استفاده از باکتری‌ها در فرآوری مواد معدنی ٦۳

۲-۸- باکتری‌های اعتدال‌دوست ٦۵

۲-۸-۱- اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس ٦۵

۲-۸-۲- اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانس ٦٦

۲-۸-۳- لپتوسفریلیوم فرواکسیدانس ٦۷

۲-۹- عوامل موثر در اکسایش باکتریایی و استخراج فلزات ٦۸

۲-۹-۱- دما ٦۸

۲-۹-۲- اسیدیته محیط ٦۹
۲-۹-۳- پتانسیل اکسایش کاهش ٦۹
۲-۹-٤- دی‌اکسید کربن ٦۹
۲-۹-٥- عناصر غذایی ۷۰
۲-۹-٦- محیط کشت 9k ۷۱
۲-۹-۷- کشت ترکیبی ۷۱

## فصل سوم: کشت و سازگارسازی باکتری‌ها

۳-۱- مقدمه ۷٥
۳-۲- کشت و آماده‌سازی باکتری‌ها ۷۸
۳-۲-۱- شمارش باکتری‌ها ۷۹
۳-۲-۲- سازگارسازی باکتری‌ها با زغال‌سنگ پرورده طبس ۸۰
۳-۲-۳- باکتری‌های بومی همرا ه با زغال‌سنگ ۸۳
۳-۳- نتیجه گیری ۸٥

## فصل چهارم: آزمایش‌های فلوتاسیون زیستی و نتایج آنها

٤-۱- گوگردزدایی زغال‌سنگ طبس با استفاده از روش فلوتاسیون مرسوم ۸۷
٤-۱-۱- هدف از انجام آزمایش‌ها ۸۷

٤-١-٢- مواد و لوازم ٨٨
٤-١-٣- نحوه انجام آزمایش‌ها ٨٩
٤-١- ٤- ارایه نتایج ٨٩
٤-١-٤- ١- بررسی اثر کلکتور ٩١
٤-١-٤- ٢- بررسی اثر مدت زمان آماده‌سازی ٩٣
٤-٢- گوگردزدایی زغال‌سنگ طبس با استفاده از روش فلوتاسیون زیستی ٩٥
٤-٢- ١- نحوه انجام آزمایش‌ها ٩٥
٤-٢- ٢- بررسی اثر نوع همزن آماده‌ساز ٩٨
٤-٢-٣- بررسی اثر استفاده از مخمر در فلوتاسیون زیستی ٩٩
٤-٣- طراحی آزمایش به منظور بررسی پارامترهای موثر در فلوتاسیون زیستی ١٠١
٤-٣-١- بررسی اثر پارامترهای مختلف روی بازیابی ماده سوختی ١٠٢
٤-٣-٢- بررسی اثر پارامترهای مختلف روی بازیابی گوگرد ١٠٦
٤-٣-٣- بررسی اثر پارامترهای مختلف روی بازیابی خاکستر ١١١
٤-٣-٤- بررسی اثر پارامترهای مختلف روی عیار گوگرد ١١٣
٤-٤- بحث و مقایسه نتایج به دست آمده ١١٧

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

٥-١- نتیجه‌گیری ١٢٠

۵-۲- پیشنهادات ۱۲۱

فهرست منابع ۱۲۳

## چکیده

کک به عنوان سوخت جهانی برای تهیه فولاد در کوره بلند استفاده می شود. وجود گوگرد در زغال-سنگ یکی از مشکلات عمده استفاده از زغال‌سنگ در کاربردهای کک‌سازی و سوختی است چراکه باعث شکنندگی فولاد می‌شود. علاوه برا این، دی‌اکسید گوگرد متصاعد شده ناشی از سوخت کک، آسیب‌های زیست محیطی فراوانی را به دنبال دارد. از اینرو حذف گوگرد قبل از سوختن زغال‌سنگ امری ضروری است. در این مطالعه ترکیبی از باکتری‌های تیوباسیلوس فرواکسیدانس، تیوباسیلوس تیواکسیدانس و لپتوسفیریلیوم فرواکسیدانس به عنوان بازداشت‌کننده پیریت در فلوتاسیون زغال‌سنگ مورد استفاده قرار گرفت. رفتار فلوتاسیون پیریت و زغال سنگ با استفاده از روش فلوتاسیون مستقیم در دو حالت فلوتاسیون مرسوم و در حضور باکتری‌ها با هم مقایسه شد. همچنین اثر غلظت کلکتور، زمان آماده‌سازی و زمان کف‌گیری مورد بررسی قرار گرفت.

بازیابی گوگرد در فلوتاسیون زیستی زغال‌سنگ نسبت به فلوتاسیون مرسوم کاهش یافت و همچنین نتایج نشان داد فلوتاسیون زیستی حساسیت بالایی نسبت به غلظت گازوئیل دارد. زمان آماده‌سازی تاثیر چندانی روی بازیابی ماده سوختی و گوگرد نداشت که تاییدکننده این مطلب است که سازوکار عملکرد باکتری‌ها از نوع جذب است.



کلمات کلیدی: تیوباسیلوس تیواکسیدانس، تیوباسیلوس فرواکسیدانس، لپتوسفریلیوم فرواکسیدانس، فلوتاسیون زیستی، بازیابی گوگرد، غلظت گازوئیل، زمان کف‌گیری، زغال‌سنگ پرورده.

# فصل اول

# کلیات

## ۱-۱- مقدمه

زغال‌سنگ چند قرن قبل از میلاد مسیح شناخته شده بود، ولی برای اولین بار چینی‌ها از آن به عنوان مواد سوخت استفاده کردند. مارکوپولو در سال ۱۲۸۰ میلادی از زغال‌سنگ به عنوان یکی از عجایب یاد کرده‌است. نام آنتراکس که به زبان یونانی جسم سوزنده و شعله‌ور معنی می‌دهد، توسط یکی از شاگردان ارسطو مطرح و بعدها نام آنتراسیت از آن مشتق شد.

زغال‌سنگ مانند گرافیت و الماس شکل دیگری از کربن نیست بلکه ترکیب پیچیده‌ای از مواد شیمیایی آلی محتوای کربن، هیدروژن، اکسیژن به همراه نیتروژن، گوگرد (به میزان کم ) و بعضی از عناصر دیگر(به میزان بسیارکم) است. در حقیقت زغال‌سنگ ماده‌ای سیاه و قهوه‌ای و سوخت فسیلی غیر متجانسی است که از تغییر شکل بقایای گیاهی تحت شرایط مختلف رطوبت، دما، فشار و زمان در بین لایه‌های رسوبی سنگ‌ها، طی دوران‌های مختلف زمین‌شناسی به وجود آمده‌است. بنابراین بسته به شرایط محیط، نوع گیاه و میزان تغییر شکل حاصله، محصولات تولید شده طیف وسیعی دارند و ممکن است شامل موادی مانند اسید هیومیک، پیت، لیگنیتیک (لیگنیت و یا زغال قهوه‌ای)، نیمه بیتومینه، بیتومینه، نیمه‌آنتراسیت، آنتراسیت و فوق‌آنتراسیت نیز باشد. شایان ذکر است مرحله تشکیل پیت تا آنتراسیت را مرحله زغال و یا زغال‌شدگی می‌نامند. درجه زغال‌شدگی از لیگنیت به آنتراسیت افزایش می‌یابد و به عبارتی میزان کربن افزایش ولی اکسیژن و هیدروژن و واکنش‌دهی محصولات تولید شده کاهش می‌یابد. معمولا تبدیل گیاه به زغال‌سنگ، طی دو مرحله بیوشیمیایی (تشکیل پیت) و ژئوشیمیایی به شرح زیر صورت می‌گیرد:

- در مرحله بیوشیمیایی، گیاهان و مواد آلی در محیط هایی رسوبی برای مدت زمان بسیار طولانی انباشته می‌شوند و با گذشت زمان دستخوش تغییراتی قرار می‌گیرند، بدین ترتیب که میزان اکسیژن به حداقل ممکن می‌رسد ولی میزان کربن افزایش می‌یابد. محصول حاصل‌شده در این مرحله به پیت معروف است.
- در مرحله دوم، پیت تحت شرایط متفاوت دما، رطوبت، فشار و دیگر پارامترهای تغییر ماهیت می‌دهد وانواع زغال‌سنگ‌های امروزی تشکیل می‌شود[۱]. زغال‌سنگ، سنگی است رسوبی، قابل احتراق و آلی(عمدتا از کربن، هیدروژن، نیتروژن، و اکسیژن تشکیل شده

است) که از بقای گیاهان اولیه به وجود آمده است[۱و۲].

## ۱-۲- تشکیل ذخایر زغال‌سنگ

گیاهان اولیه که در باتلاق و مرداب‌ها جمع شده و گل ولای و سایر رسوبات بر روی آنها انباشته شده است و در اثر حرکت پوسته زمین به اعماق زیاد منتقل شده و تحت درجه حرارت، فشار و طی زمان طولانی(۱۰۰تا ٤۰۰ میلیون سال ) قرار می‌گیرند، ابتدا به پیت و سپس به لیگنیت، نیمه‌بیتومینی، بیتومینی و در نهایت به آنتراسیت تبدیل شده است[۱و۲].

## ۱-۳- سن زمین‌شناسی ذخایر زغال‌سنگ

تشکیل ذخایر زغال‌سنگ به دوره دونین و نزدیک به ٤۰۰ میلیون سال قبل می‌رسد و عموما در طول دوره کربونیفر(۲۸۰تا۳۵۰ میلیون سال قبل )، دوره پرمین کربونیفر(۲۲۵ تا ۳۵۰ میلیون سال قبل) و در دوره ترشری (۱۵تا ۱۰۰ میلیون سال قبل) صورت گرفته است[۱و۲].

## ۱-٤- حجم مواد اولیه مورد نیاز برای تشکیل زغال‌سنگ

مطالعات نشان داده می‌دهد که برای تشکیل ۳۰ سانتی‌متر زغال‌سنگ بیتومینی به ۹۰ سانتی‌متر تا ۱/۲ متر گیاه نیاز است. این مسئله نشان می‌دهد که برای تشکیل ذخیره‌ای بزرگ از زغال‌سنگ علاوه بر شرایط دما و فشار، چه حجمی از گیاهان مورد نیاز است[۱و۲].

## ۱-۵- منشأ و طرز تشکیل زغال‌سنگ

به طور کلی زغال‌سنگ‌ها، سنگ‌های رسوبی و سوختنی هستند که از بقایای گیاهان، تحت شرایط خاصی تشکیل شده‌اند و همواره حاوی مقادیری از کانی‌های مختلف هستند. جهت تشکیل زغال‌سنگ سه مرحله تشخیص داده شده است:

### ۱-۵-۱- تجمع گیاهان به حد وفور

تنوع و فراوانی گیاهان در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی متفاوت است و تشکیل زغال‌سنگ در هر دوره بستگی به تنوع و فراوانی گیاهان آن دوره دارد. به طوری که از دوره پرکامبرین بقایای گیاهان اولیه و آلگال‌ها[1] به صورت لایه‌های بسیار نازک زغال‌سنگ در منطقه هورن[2] میشیگان به صورت آنتراسیت[3] باقیمانده است و در آلمان در منطقه راین قطعات زغال‌سنگ در لابلای ورقه‌های شیست مربوط به دونین زیرین مشاهده شده است. در دوره کربونیفر گیاهان به حد وفور وجود داشته و جنگل‌ها قسمت اعظم کره زمین را می‌پوشانید، بنابراین مهم‌ترین ذخایر زغال‌سنگ دنیا در این دوره تشکیل شده است. در دوران دوم خصوصاً دوره ژوراسیک گیاهان فراوان‌تر شده و شرایط جهت تشکیل زغال‌سنگ مساعد شده است. به طوری که بسیاری از ذخایر زغال‌سنگ ایران در این دوره تشکیل شده‌اند. در دوره کرتاسه شرایط برای تشکیل زغال‌سنگ نامساعد بود ولی در دوران سوم مجدداً برای تشکیل این ماده معدنی مساعد شده است.

### ۱-۵-۲- تغییرات فیزیکی و شیمیایی گیاهان جمع آوری شده

قسمت‌های مختلف گیاهان انباشته شده در گودال‌ها و مرداب‌ها به کمک قارچ‌ها و باکتری‌ها در شرایط غیرهوازی تجزیه می‌شوند و پس از مدفون شدن به وسیله رسوبات ثانوی تحت تأثیر فشار و

[1] Algal Coal
[2] Horn
[3] Anthracite

حرارت قرار می‌گیرند و بر اثر تجزیه و تخمیر بقایای گیاهان آلی، زغال‌سنگ‌های هوموسی[1] و از بقایای اَلگال‌ها، باکتری‌ها و اسپرها، زغال‌های ساپروپلی به وجود می‌آید. ماده اولیه هوموسی، هیدروکربورها و ماده اولیه ساپروپل‌ها، بیتومین‌ها، چربی‌ها و پروتئین‌ها هستند. تغییرات شیمیایی و فیزیکی، تکتونیکی را که منجر به تشکیل زغال‌سنگ از تورب[2] می‌شود درجه زغالی‌شدن[3] می‌نامند و با رده[4] مشخص می‌کنند. رده[5]، درجه دگرگونی[6] است که در مورد زغال‌سنگ به کاربرده می‌شود.

### ۱-۵-۳- مرحله دگرگونی

از تشکیل تورب تا مرحله تشکیل زغال‌سنگ‌ها، مراحلی طی می‌شود که مراحل دگرگونی زغال‌سنگ نامیده می‌شود. این مرحله با قرارگرفتن تدریجی رسوبات روی تورب و افزایش فشار و حرارت و تغییرات فیزیکی و شیمیایی حاصل می‌شود و زغال‌سنگ قهوه‌ای از تورب در عمق‌های کم و حرارت معمولی به دست می‌آید.

با فرو نشستن قابل ملاحظه سطح زمین و قرار گرفتن رسوبات به اندازه ۱۰ الی ۲۰ هزار متر روی هم سنگ‌های رسوبی، رگه‌های زغال نارس تحت شرایط ترمودینامیکی یعنی حرارت و فشار زیاد قرار می‌گیرند و زغال قهوه‌ای[7] را دگرگون کرده به زغال بیتومینه[8] یا قیردار و با ادامه آن و با حرارت زیادتر به آنتراسیت تبدیل می‌کنند[۱و۲].

## ۱-۶- شرایط محیطی لازم برای تشکیل ذخایر زغال‌سنگ

- محیط باتلاقی یا مردابی و شرایط آب و هوایی مناسب جهت رشد گیاهان
- توپوگرافی مناسب جهت جای گرفتن حجم عظیمی از گیاهان

[1] Humus
[2] Peat
[3] Degree Of Calcification
[4] Rank
[5] Rank
[6] Metamorphism
[7] Lignite
[8] Bituminous Coal

- نزدیک بودن منطقه تشکیل به سطح دریا تا به هنگام بالا آمدن سطح دریا، مواد رسوبی و گیاهان به قعر دریا منتقل شده و تحت فشار ودما قرارگیرند.
- محیطی مناسب جهت فعالیت ریزموجودات زنده و تشکیل پیت[۲].

## ۱-۷- خواص انواع زغال‌سنگ

- زغال‌های با درجه زغال شدگی پایین (لیگنیت و نیمه بیتومینی) عموما نرم خردشونده، دارای ظاهری کدر، رطوبتی بالا و انرژی بالا هستند.
- زغال‌های با درجه زغال شدگی بالا (بیتومینی و آنتراسیت) سخت‌تر و دارای جلای شیشه ای، درصد رطوبت پایین و انرژی بالا هستند.
- افزایش درجه زغال‌شدگی با افزایش در میزان کربن و انرژی و کاهش درمیزان رطوبت همراه است و آنتراسیت با بیشترین میزان کربن و انرژی وکمترین درصد رطوبت به عنوان بهترین نوع زغال مطرح هستند [۱ و۲ ].

## ۱-۸- کاربردهای زغال‌سنگ

زغال‌سنگ را می‌توان در صنایع مختلف استفاده کرد. امروزه ۳۷ در صد الکتریسیته تولیدی در دنیا وابسته به زغال‌سنگ است. تعدادی از کشورهای دنیا وابستگی شدیدی به زغال‌سنگ در تولید الکتریسیته دارند. طبق آمار منتشر شده در سال ۱۹۹۸ میلادی، در لهستان (۹۶٪ )، آفریقای جنوبی (۹۰ ٪)، استرالیا (۸۶٪ )، چین (۸۱٪)، هند (۷۵٪)، جمهوری چک (۷۴٪)، یونان (۷۰٪ در صد)، دانمارک (۵۹٪ ) و آمریکا (۵۶٪ ) الکتریسیته تولیدی از زغال‌سنگ بوده است [۱ و ۲]. بخشی از کاربردهای زغال‌سنگ در صنایع گوناگون به شرح زیر است:

### ۱-۸-۱- صنعت تولید فولاد

از سال ۱۸٤۱ میلادی کک به عنوان سوخت جهانی برای تهیه چدن در کوره بلند مورد استفاده قرار گرفت. امروزه حدود ۷۰ درصد فولاد تولیدی در دنیا وابسته به زغال‌سنگ است و ۱۷ درصد زغال سخت تولیدی در دنیا به مصرف فولادسازی رسیده است. در سال ۱۹۹۸ میلادی کل فولاد تولیدی در دنیا معادل ۷۷۰ میلیون تن بود که برای تولید آن ٦۰۰ میلیون تن زغال مصرف شده است. تقریباً به ازای تولید هر ۱۰۰۰ کیلوگرم فولاد، ٦۳۰ کیلوگرم زغال‌سنگ مصرف می‌شود.
کک از حرارت دادن زغال‌سنگ در غیاب هوا به دست می‌آید که به صورت کلوخه‌های متخلخل و سخت است. زغال کک¬شو باید حاوی درصد پایینی از گوگرد و فسفر باشد. این گونه زغال ها عموماً گران‌تر از زغال حرارتی هستند[۱و۲].

### ۱-۸-۱-۱- دلایل تهیه کک

از آنجایی که زغال‌ها دارای خواص و ارزش حرارتی متفاوت هستند، بنابراین باید سوختی داشت تا مشخصات آن نسبتاً ثابت باشد.
اکثر زغال‌ها مقاومت کافی در مقابل فشار و اصطکاک ندارند و در کوره بلند نرم می‌شوند. زغال‌سنگ دارای مواد آلی باارزشی است که می توان طی کک‌سازی مقداری از آنها را استحصال کرد و سوزاندن آن باعث اتلاف این مواد می‌شود.
در فرآیند کک‌سازی، زغال به ابعاد حداکثر ۳ میلی متر خرد شده و به بالای کوره کک‌سازی تغذیه و در غیاب هوا تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۸ تا ۲۰ ساعت حرارت داده می‌شود. مواد فرار زغال طی این فرآیند از آن خارج شده و از آن قطران بنزول تهیه می‌شود. مقداری از این قطران و بنزول مجدداً به عنوان سوخت جهت حرارت‌دهی به کوره کک‌سازی و همچنین در کوره بلند استفاده می‌شود. قطران ماده سیاه رنگی با چگالی ۱/۱٦ تا ۱/۲ است که متجاوز از ۱۰ هزار ماده شیمیایی از جمله دارو، رنگ، چسب، پلاستیک، مواد آرایشی و عایق را می‌توان از آن تهیه کرد و در واقع خوراک صنایع پتروشیمی است.