گوگردزدایی از نمونهٔ زغال سنگ معدن مزینوی طبس با ترکیبی از فلوتاسیون و لیچینگ با پتاس/متانول

خرامان رامی
دانشجوی کارشناسی ارشد
گروه مهندسی شیمی، دانشکدهٔ فنّی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

عبدالصمد زرین قلم مقدم
دانشیار
گروه مهندسی شیمی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

محمود عبدالّهی
استادیار
گروه مهندسی فراوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

زغال‌سنگ مزینو دارای خاکستر بالا و دو نوع گوگرد آلی و غیرآلی است که می‌توان با روش های فیزیکی- شیمیایی و شیمیایی، گوگرد و خاکستر آن را کاهش داد. فلوتاسیون، روش فیزیکی- شیمیایی است که قادر به حذف گوگرد غیر آلی و خاکستر زغال در حد بالایی است. در این پروژه با استفاده روش فلوتاسیون، در pH های قلیایی و در حضور یون مس، حدود ۸۳ ٪ از خاکستر، ۷۲٪ از گوگرد غیر آلی و ۶۳٪ از گوگرد کل نمونه زغال‌سنگ مزینو کاهش یافت. بازیابی زغال در این مرحله حدود ۷۳٪ بود. سپس با مخلوط پتاس و متانول، نمونه، فلوته شده زغال‌سنگ مزینو لیچ گردید که حدود ۳۳ ٪ از گوگرد کل و ۸ ٪ از خاکستر نمونه فلوته شده در این مرحله حذف شد. با این دو روش مجموعاً ۸۲٫۵۰ ٪ گوگرد و ۸۲٫۳٤ ٪ خاکستر زغال حذف شده است که در مقایسه با تحقیقات صورت گرفته توسط سایرین نتایج به دست آمده، منحصر به فرد است.

کلمات کلیدی

گوگرد زدایی، لیچینگ، فلوتاسیون، زغال‌سنگ مزینو، پتاس، یون مس

Desulphurization of Mezino Coal Using Combination of 'Flotation' and 'Leaching with KOH/Methanol'

K. Rami
M.Sc Student
Chemical Engineering Department,
Tarbiat Modarres University

A. Zarringhalam Moghaddam
Associate Professor
Chemical Engineering Department,
Tarbiat Modarres University

M. Abdollahy
Assistant Professor
Mineral Processing Engineering Department,
Tarbiat Modarres University

Abstract

Mezino coal contains a high percentage of ash and both organic and inorganic sulfur. The ash and sulfur contents can be reduced using physical-chemical and chemical methods. 'Flotation' is a physical-chemical method which is quite capable of reducing inorganic sulfur and ash content of coal. In this research, reducing the ash content of Mezino coal by 83%, inorganic sulfur by 72% and its total sulfur content by 63% using flotation in an alkaline pH and in the presence of copper ion as an activator was successful. The coal recovery was 73%. The coal concentrate obtained from flotation was leached using KOH/Methanol mixture and its total sulfur and ash contents were reduced by approximately 33% and 8%, respectively. Hence, using combination of the two mentioned methods, the total sulfur and ash contents of coal were reduced by 82.50% and 82.34%, respectively. It is an unprecedented results compared to the previous work.

Key Words

Desulphurization, Leaching, Flotation, Mezino Coal, Potassium Hydroxide, Copper Ion

مقدمه

زغال سنگ به عنوان منبع انرژی بدون آلاینده و جای گزین نفت و گاز در بیشتر کشورها مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. این سوخت به دلیل دارا بودن ارزش حرارتی بالا می‌تواند به عنوان یک مولّد حرارتی در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. هم اکنون نیز در بیشتر کشورهای جهان که فاقد ذخایر گاز و نفت می‌باشند، از زغال‌سنگ در صنایع ذوب آهن و نیروگاه ها و نیز در سوخت خانگی به صورت بریکت استفاده می‌شود.

زغال سنگ حاوی مقادیر قابل توجّهی ناخالصی است که گاهی باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی و فرایندی در چرخه استفاده می شود. از این رو مطالعات مختلفی در بارهٔ کاهش این آلاینده‌ها(خاکستر، گوگرد، ترکیبات سیلیس و ...)به انجام رسیده است. از مهم ترین این آلاینده‌ها گوگرد است که می تواند در حین احتراق به صورت گاز SO_2 وH_2S آزاد شود و تولید باران های اسیدی کند. همچنین باعث صدمه زدن به محصولات کشاورزی، بر هم زدن تعادل لایه ازن، خوردگی تأسیسات و تجهیزات فلزی و نیز مسمومیّت‌های تنفّسی می‌شود.

گوگرد زغال سنگ به دو شکل آلی و غیرآلی وجود دارد که می‌توان با روش های مختلفی آنها را کاهش داد. گوگرد غیر ارگانیک معمولاً به صورت سولفات و سولفید است که با روش شناورسازی می‌توان آن را جدا نمود. گوگرد آلی در ساختمان زغال درگیر است که با روش های شیمیایی حداکثر تا ۵۰ درصد جدا می گردد.

با روش های فیزیکی ـ شیمیایی و شیمیایی می‌توان مقدار خاکستر و گوگرد زغال سنگ را تا حد قابل قبولی کاهش داد.

یکی از روشهای متداول گوگرد زدایی لیچینگ است. زغال را با اسید یا باز مخلوط و در حرارت یا اختلاط، گوگرد آن را حذف می‌کنند. نوع حلّال بستگی به نوع گوگرد درون زغال دارد. برای کاهش گوگرد پیریتی (سولفید آهن) معمولاً از روش لیچینگ مستقیم با اسید استفاده می‌کنند. این روش قوی‌ترین و موثّرترین روش در حذف ترکیبات فلزّی زغال است[۱] که از اسید نیتریک به عنوان حلال استفاده می‌شود. به این منظور زغال با اسید در غلظت های مختلف و در دمای‌های مختلف همزده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط اسید ۵٪ ، دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳۰ دقیقه، ۷۸٪ از گوگرد حذف می‌شود. در صورتی که اگر نمونه با اسید کلریدریک لیچ شود، حذف گوگرد در مدت ۵ دقیقه به ۸۸٪ نیز می‌رسد. افزون بر این با کاهش اندازهٔ ذرّات، مقدار حذف گوگرد نیز افزایش می‌یابد. در دمای ۹۰ درجه و شرایط بهینهٔ آزمایش، غلظت اسید نیتریک ۲۰٪ و مقدار حذف ۷۵٪ است. درعملیّات لیچینگ با اسید کلریدریک مقدار حذف در مدت ۵ دقیقه به ۷۷٪ می‌رسد[۲]. Semra Karaca [۳] فرایند لیچینگ با اسید نیتریک را برای نمونه زغال سنگ معدن Ashkal ترکیه انجام داد. در این آزمایش نمونه‌های زغال با اسید نیتریک مخلوط و در دماهای ۲۵ تا ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت صفر تا ۳ ساعت همزده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار حذف در دمای جوش اسید(۱۰۳ درجه سانتی‌گراد) و غلظت ۲۵٪ صورت می‌گیرد که تقریباً تمام گوگرد پیریتی و سولفاتی موجود در زغال را حذف می‌کند. R.Alvarez و همکارانش[۴] مشاهده کردند که اسید نیتریک باعث کاهش سریع گوگرد پیریتی و سولفاتی می‌شود اما نتایج FT-i.r در بارهٔ زغال‌های فراوری شده با این اسید نشان می‌دهد که در دماهای بالا ظرفیّت اکسیژن‌گیری زغال بالا می‌رود و اکسیژن گروه نیتراتی به

صورت گروه کربونیل در ساختمان زغال ظاهر می شود. نیتروژن نیز جانشین دو هیدروژن مجاور غیر پیوندی زغال می شود وبه صورت نیتروژن آروماتیکی باعث نیتراته شدن زغال می گردد. برای این در مواقعی که حفظ خواص مطلوب زغال و ساختمان ظاهری آن اهمیّت دارد؛ از لیچینگ با اسیدنیتریک احتراز می‌گردد. روش دیگری که توسط گروه Peter K.K.Louie [۵] اجرا شد جداسازی گوگرد سولفاتی زغال با اسید فرمیک است. در این فرایند چهار نوع زغال با اسید کلریدریک تحت فشار هوا و نیتروژن در دماهای محیط، $95^{\circ}C$ و دمای جوش لیچ شد. راندمان حذف گوگرد در این شرایط ۸۳٪ بود. همین آزمایش برای اسید فرمیک نیز اجرا شد. نتایج تقریباً برای هر دو اسید یکسان، ولی سرعت واکنش اسید فرمیک کمتر از اسید کلریدریک بود. افزون براین اسیدفرمیک در حذف گوگرد سولفاتی انتخابی‌تر عمل می‌کند. در فرایند لیچینگ زغال سنگ، علاوه بر اسید از بازها نیز به عنوان حلال استفاده می‌شود. نتایج مطالعات نشان داده است که می‌توان بوسیله NaOH ۱۰٪ و در دماهای $250^{\circ}C$ و فشارهای بالا(۰/۶ تا ۲/۵ مگاپاسکال)، خاکستر زغال را از ۹۸٪ تا ۰/۷ درصد کاهش داد. حالت دیگر پاک سازی زغال، استفاده از مخلوط سود با پتاس تحت فشار جو و دماهای بالا حدود $400^{\circ}C$ است. در دماهای بالای $150^{\circ}C$ گوگرد آلی شروع به خارج شدن از ساختمان زغال می‌کند. S.Mokhreji [۶] این کار را با سود ۱۶٪ و اسید ۱۰٪ دردمای $95^{\circ}C$ و مدت زمان ۸ ساعت اجرا کرد. نتیجهٔ کار حذف کامل گوگردهای سولفاتی و پیریتی و ۱۰ تا ۱۵٪ از گوگرد آلی بود. در ایران مزدا بیگلری [۷]کار مشابهی برای گوگرد زدایی زغال کرده است. در این کار، زغال با سود ۳۵٪ پالپ ۲۰٪ را تشکیل داده است و در دمای $120^{\circ}C$ به مدت ۳۰ دقیقه همزده شد. در نتیجه حدود ۱۵٪ از گوگرد کل و ۳۸٪ از خاکسترکاسته شد. با افزایش دما مقدار گوگرد زدایی افزایش می‌یابد. Saimir A. و Lolja [۸] از پتاس برای گوگرد زدایی زغال‌های کم ارزش استفاده کردند. دراین روش نمونه زغال را با پتاس ۱ مولار به مدت ۲ ساعت و در شرایط محیط مخلوط کردند. با استفاده از این روش در نهایت حدود ۵۰٪ از گوگرد از زغال خارج شد. چنانچه مشاهده می‌شودکه بازها قادر به حذف گوگرد آلی زغال نیز هستند. کار مشابهی در دماهای $95^{\circ}C$ تا $150^{\circ}C$ توسط Samit Mukherie و همکارانش [۹،۱۰] صورت گرفت که ۲۶ تا ۵۳٪ حذف گوگرد در این محدوده دمایی حاصل شد. حدود ۳۷٪ از گوگرد آلی در این روش حذف می‌شود. مخلوط پتاس و متانول نیز به عنوان حلال گوگرد در فرایند لیچینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

Charutawai Krittka [۱۱] نمونه‌های زغال سنگ را به یک راکتور انتقال می دهد و فرایند تحت گاز نیتروژن به انجام می رسد. گاز اتانول در شرایط دمای $350^{\circ}C$، فشار ۸/۲۷ مگاپاسکال و مقدار ۱۲۰ میلی لیتر به ازای هر کیلوگرم زغال و ۵ گرم پتاس به ازای هرلیترمحلول به راکتور تزریق می‌شود. زغال به مدت ۱ ساعت همزده می‌شود و سپس فیلتر و خشک می‌شود. با تغییر دما مقدار حذف گوگرد تغییر می کند؛ به‌گونه ای با افزایش دما از $350^{\circ}C$ به $400^{\circ}C$ مقدار حذف از ۳۰ تا ۵۹ درصد تغییر می‌کند.

روش دیگری نیز مشابه روش بالا وجود دارد؛ با این تفاوت که از متانول به جای اتانول استفاده می‌شود. در این حالت مقدار حذف گوگرد از ۳۳ تا ۵۳ درصد با تغییر دما از $400^{\circ}C$ تا $450^{\circ}C$ تغییر می‌کند. S.Ratanakandilok [۱۲] نیز روشی مشابه به کار گرفت که در آن از پتاس و متانول برای گوگرد زدایی زغال استفاده کرد. مقدار متانول ۲ درصد و مقدار پتاس ۰/۰۲۵ گرم به ازای هر گرم زغال است. مخلوط یک ساعت در دمای$150^{\circ}C$ همزده می‌شود و در نهایت پس از فیلتر کردن خشک می شود. مقدار حذف گوگرد در این روش ۵۸ درصد است. با اینکه مواد و روش کار مانند دو روش بالا است ولی به دلیل پایین بودن شرایط دما و فشار؛ از نظر اقتصادی قابل قبول‌تر است. همین آزمایش توسط مخلوط آب و متانول نیز اجرا می‌شود. زمانی که فرایند در دمای $150^{\circ}C$ و با مقدار متانول ۵٪ صورت می‌گیرد، در مدّت ۶۰ دقیقه مقدار حذف گوگرد به ۳۳٪ و در مدت ۹۰ دقیقه به ۴۵٪ می‌رسد. در صورتی که غلظت متانول ۱۰٪ باشد؛ در همین دما و زمان مقدار حذف به ۳۱ و ۲۷٪ کاهش می‌یابد. برای حذف گوگرد از مخلوط پراکسید هیدروژن و اسید سولفوریک نیز استفاده شده است [۱۳].

به دلیل گران بودن روش شیمیایی، در این تحقیق از ترکیب روش های فلوتاسیون و لیچینگ برای گوگرد زدایی زغال سنگ معدن مزینوی طبس استفاده شده است.

۱ـ موّاد، روش ها و تجهیزات مورد استفاده

۱-۱ـ موّاد اوّلیّهٔ مورد استفاده

۱-۱-۱ـ زغال سنگ: برای این آزمایش نمونه زغال سنگ از لایه کیلومتر ۱۱ معدن مزینوی طبس انتخاب شد.

۱-۱-۲ـ روغن کاج به عنوان کف ساز، گازوئیل به عنوان کمک کلکتور و بهبود دهندهٔ خواصّ سطحی زغال و سولفات مس($CuSO_4.5H_2O$) ساخت شرکت مرک آلمان به عنوان فعّال کننده پیریت در فلوتاسیون زغال استفاده شد.

۱-۱-۳ـ کلرید باریم، کربنات سدیم، هیدروکسید منیزیم، اسید کلریدریک، متیل اورنج، آمونیاک، برم، اتانول و اسیدنیتریک، ساخت شرکت مرک آلمان، برای اندازه گیری انواع گوگرد موجود در زغال با روش ASTM مورد استفاده قرار گرفتند.

۱-۱-۴ـ پتاس و متانول، ساخت شرکت مرک آلمان، در فرایند لیچینگ برای حذف گوگرد از این مواد استفاده شد.

۱-۲ـ تجهیزات مورد استفاده

۱-۲-۱ـ سنگ شکن فکی

در این کار از سنگ شکن ساخت شرکت دانش فراوران استفاده شد که از جنس فولاد است. ظرفیّت این دستگاه ۳۰۰-۲۰۰ کیلوگرم بر ساعت است. اندازه ذرّات ورودی کمتر از ۹۰ میلی‌متر است و قابلیت خرد کردن ذرات را تا ۱۵ الی۲ میلی متر را دارد.

۱-۲-۲ـ آسیای گلوله‌ای ـ میله‌ای

دستگاه از جنس فولاد و به شکل استوانه است. اندازهٔ آسیای گلوله ای ۲۰۰ میلی متر قطر × ۲۱۰ میلی متر ارتفاع و آسیای میله ای به قطر۱۵۷ میلی متر × ۳۵۰ میلی متر ارتفاع هستند.

۱-۲-۳ـ سرند

برای این کار از سرندهای استاندارد ASTM استفاده شد.

۱-۲-۴ـ دستگاه فلوتاسیون

این دستگاه از جنس فولاد است و ظرفیّت آن ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ گرم است. دارای همزن فولادی در دو اندازه با سرعت ۳۰۰۰-۰ دور در دقیقه، کنترل سرعت الکترونیکی و سلول فلوتاسیون در ۴ حجم است.

۱-۲-۵ـ گرمکن مگنت دار

دستگاه قادر به گرمایش مواد تا $100^{\circ}C$ است. در آزمایشگاه از گرمکن ساخت شرکت شیمی‌فن استفاده شد.

۱-۲-۶ـ کوره الکتریکی

برای احتراق نمونه زغال تا دمای $950^{\circ}C$ (در آنالیزهای زغال) از این دستگاه استفاده شد. این دستگاه ساخت شرکت آذرکوره، با ظرفیت دو لیتر و ماکزیمم دمای $1200^{\circ}C$ است.

۱-۲-۷ـ گرمخانه (اون) الکتریکی

دستگاه مورد نظر ساخت شرکت Laboven و دارای تنظیم زمان ۱۲۰ دقیقه ای و ماکزیمم دمای $250^{\circ}C$ است. دستگاه قابلیّت تنظیم دما و زمان را دارد.

۱-۲-۸ـ راکتور COD

برای اجرای آزمایش های لیچینگ و تأمین درجهٔ حرارت بالای $100^{\circ}C$ برای محلولهای آبی به کار برده شد. این دستگاه ساخت شرکتHACH بوده و ماکزیمم دمای آن $150^{\circ}C$ است. قابلیّت تنظیم دما و زمان را نیز دارد.

۱-۲-۹ـ دستگاه جذب اتمی

برای تعیین پیریت موجود در زغال، مقدار آهن موجود در نمونه، از دستگاه جذب اتمی مدل PU1100X ساخت شرکت PHILIPS استفاده شد.

۱-۲-۱۰ـ دستگاه pH متر

برای نشان دادن pH مخلوط داخل سلول فلوتاسیون و تنظیم آن به مقدار دلخواه استفاده می‌شود.

۱-۲-۱۱ـ صافی تحت خلاء

با استفاده از این دستگاه بعد از عمل فلوتاسیون، محصولات، آب‌گیری و خشک می‌شود. حجم دستگاه مورد استفاده ۲۴/۶ لیتر، قطر آن ۳۰/۴ سانتی متر و سطح فیلتراسیون آن ۷۲۵/۸ سانتی‌متر مربع است. جنس آن از فولاد ضد زنگ است.

۱-۲-۱۲ـ تقسیم کننده مخروطی

از این دستگاه برای تقسیم تصادفی نمونه‌ها و تهیه نمونهٔ معرّف استفاده شد. به این صورت که در هر مرحله نمونه به دو قسمت یکسان و مساوی تقسیم می شود و با ادامه دادن این فرایند مقدار نمونه مورد نیاز به دست می‌آید.

۱-۳ـ آنالیزهای مورد نیاز

۱-۳-۱ـ اندازه گیری رطوبت

$$Sp = \frac{F*A*V*C*P*(T-B)}{W} = \frac{1.48*20*100*10^{-6}*100*(5-0)}{2} = 0.74\% \qquad (3)$$

S_p: درصد گوگرد پیریتی

F: ضریب بدون بعد ۱/۴۸. نسبت استوکیومتری گوگرد به آهن در FeS_2

A : ضریب بدون بعد ۲۰. ضریب رقیق کردن محلول لازم برای جذب اتمی

V : ۱۰۰ میلی لیتر. حجم محلول جذب اتمی

C: 10^{-6} تبدیل واحد گرم به میکروگرم

P: ضریب بدون بعد۱۰۰. برای تبدیل ارقام به درصد

T: غلظت آهن در نمونه زغال بر حسبµg/ml

B: غلظت آهن در نمونه بلنک بر حسبµg/ml

W: وزن نمونه اولیه زغال (گرم)

۲-۳-۷-گوگرد آلی

گوگرد آلی را از تفاضل گوگرد پیریتی وسولفاتی از گوگرد کل به دست می‌آورند. مقدار گوگرد آلی موجود در نمونه مزینو در جدول ۱ ارائه شده است.

$$So = St - (Ss + Sp) = 2.36 - (0.33 + 0.74) = 1.29\% \qquad (4)$$

۲ـ تهیّه و شناسایی نمونه

نمونهٔ مورد آزمایش از کیلومتر ۱۱ معدن زغال سنگ مزینوی طبس تهیه شد و پس از انتقال به آزمایشگاه به مدّت چند روز در دمای آزمایشگاه خشک شد. زغال سنگ خشک شده با دستگاه سنگ شکن فکی به اندازه‌های ریز خرد شد. پس از این مرحله در هر کدام از آزمایش‌ها و آنالیزها، ذرّات زغال در آسیای میله‌ای به اندازه‌های دلخواه آسیا و با تقسیم‌کنندهٔ مخروطی به مقادیر مورد نیاز تقسیم شدند. جدول ۱ و ۲ حاوی نتایج آنالیز نمونه زغال سنگ مزینو می‌باشد.

جدول (۱) آنالیز تقریبی نمونه زغال سنگ مزینو.

درصد(٪)	اجزای اصلی
۳۳/۵۷	خاکستر
۱۶/۲۰	موادفرار
۰/۹۱	رطوبت
۴۹/۳۲	کربن ثابت
۱۰۰	جمع

جدول (۲) آنالیز عنصری نمونه زغال سنگ مزینو.

اجزای اصلی		درصد وزنی
C		۵۳/۳
N		۱/۴
H		۳
S	آلی	۱/۲۹
	پیریتی	۰/۷۴
	سولفاتی	۰/۳۳
O		۶/۳۷
خاکستر		۳۳/۵۷
جمع		۱۰۰
ارزش حرارتی (kcal/kg)		۵۲۶۴

۳ـ آزمایش ها

برای حذف گوگرد از زغال سنگ معدن مزینوی طبس از ترکیب روشهای فلوتاسیون و لیچینگ استفاده شد. ابتدا گوگرد نمونه تا حدّ امکان با روش فلوتاسیون کاهش داده شد و سپس نمونهٔ بدست آمده از این مرحله، مورد لیچینگ قرار گرفت تا گوگرد بیشتری از نمونه‌ها حذف شود که ذیلاً به شرح این روش ها پرداخته می‌شود :

۳-۱ـ فلوتاسیون

T.K.Dichmann و J.A.Finch [۱۴] برای حذف پیریت موجود در کانه‌ها از یون سولفات مس استفاده کردند. در این تحقیق سعی شده است تا از روش جدیدی برای پیریت‌زدایی زغال استفاده شود. به همین دلیل هنگام فلوتاسیون، سولفات مس نیز به پالپ فلوتاسیون اضافه شد تا تأثیر آن بر حذف پیریت مورد بررسی شود.

برای اجرای فلوتاسیون نمونهٔ مورد نیاز با استفاده از استاندارد ASTM D-2234 تهیه شد و آرایهٔ L9 به کمک روش تاگوچی تعریف شد . تاثیر متغیرهای pH و غلظت یون مس در این آزمایش بررسی شد.

جدول (۳) تعریف و تغییرات پارامترها در روش تاگوچی برای فلوتاسیون زغال‌سنگ مزینوی ۲.

متغیر		Level 1	Level 2	Level 3
pH	A	۷	۸	۹
غلظت یون مس(گرم بر کیلوگرم زغال)	B	۰	۶/۴	۱۵/۸

جدول (٤) طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای فلوتاسیون زغال‌سنگ مزینوی ۲.

شماره آزمایش	A =pH	B= غلظت یون مس(گرم بر کیلوگرم زغال)
۱	۷	۰
۲	۷	۶/۴
۳	۷	۱۵/۸
۴	۸	۰
۵	۸	۶/۴
۶	۸	۱۵/۸
۷	۹	۰
۸	۹	۶/۴
۹	۹	۱۵/۸

طبق جداول ۳ و ۴، تعداد ۹ آزمایش با جایگشت های مختلف متغیرهای pH و غلظت یون مس صورت گرفت. در هر مرحله با ۱۰۰ گرم از نمونه زغال‌سنگ، پالپ ۱۰٪ آماده شد و پس از تنظیم pH برای هر مرحله، به مدت ۱۰ دقیقه آماده‌سازی شد. یون مس مورد نظر در هر مرحله اضافه شده و مجدداً به مدت ۱۰ دقیقه آماده‌سازی شد. در طول مدّت آزمایش، pH توسط دستگاه pH متر کنترل می‌شد. گازوئیل به مقدار ۰٫۸ گرم بر تن و کف ساز(روغن کاج) به میزان ۱۴۰ گرم بر تن [۱۰] به پالپ اضافه شد که این دو پارامتر در کلیه آزمایش ها ثابت بودند. پس از هوادهی و جمع آوری کف حاصله، کنسانتره بدست آمده آب‌گیری و خشک شد. گوگرد و خاکستر هر کنسانتره اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است.

برای محاسبهٔ مقدار بازیابی زغال و گوگرد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\text{Recovery}(\%) = \frac{cC}{fF} * 100 \qquad (5)$$

که در آن:

c= درصد گوگرد یا خاکستر موجود در کنسانتره

C= وزن کنسانتره(گرم)

f = درصد گوگرد یا خاکستر در خوراک

F= وزن خوراک(گرم)

مقدار حذف با استفاده از رابطه زیر قابل دست یابی است:

$$\text{Removal}(\%) = 100 - \text{Recovery}$$

با توجه به اینکه هدف، رسیدن به بیشترین مقدار کاهش گوگرد است و در فرایند فلوتاسیون، بالا بودن مقدار کنسانتره نیز از نظر اقتصادی اهمّیّت به سزایی دارد؛ برای این شرایط آزمایش۷= pH و غلظت یون مس ۱٫۵۸ به عنوان حالت بهینه برای بقیّهٔ آزمایش‌ها انتخاب شد. زیرا هم دارای کمترین مقدار گوگرد کل (۱٫۴۳٪) و هم دارای بالاترین مقدار کنسانتره (۵۵٫۴۴ گرم) است. علاوه بر این کاهش گوگرد غیرآلی نیز بیشترین مقدار موجود بود.

۳-۲- لیچینگ

در عملیّات لیچینگ از حلال پتاس و متانول استفاده و سعی شد تا تأثیر غلظت پتاس، متانول، دما و زمان در حذف گوگرد آلی وپیریتی بررسی شود. به این منظور آرایه L9 با استفاده از روش تاگوچی با متغیّرهای غلظت متانول، غلظت پتاس، دما و زمان تهیه شد. جداول ۵ و ۶ متغیرها و طرّاحی آزمایش تاگوچی را برای عملیات لیچینگ نشان می‌دهد.

جدول (۵) عوامل و سطوح آنها در روش تاگوچی برای لیچینگ زغال‌سنگ مزینوی۲.

	متغیر	Level 1	Level 2	Level 3
A	غلظت متانول٪	۰	۱۰	۲۰
B	میزان پتاس (گرم بر گرم زغال)	۰/۰۲	۰/۱	۰/۲
C	دما (درجه سانتیگراد)	۱۰۰	۱۲۰	۱۵۰
D	زمان (دقیقه)	۳۰	۶۰	۹۰

جدول (۶) طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای لیچینگ زغال‌سنگ مزینوی ۲.

شماره آزمایش	A= غلظت پتاس (گرم بر گرم زغال)	B= غلظت متانول٪	C=دما(سانتیگراد)	D= زمان (دقیقه)
۱	۰/۰۲	۰	۱۰۰	۳۰
۲	۰/۰۲	۱۰	۱۲۰	۶۰
۳	۰/۰۲	۲۰	۱۵۰	۹۰
۴	۰/۱	۰	۱۲۰	۹۰
۵	۰/۱	۱۰	۱۵۰	۳۰
۶	۰/۱	۲۰	۱۰۰	۶۰
۷	۰/۲	۰	۱۵۰	۶۰
۸	۰/۲	۱۰	۱۰۰	۹۰
۹	۰/۲	۲۰	۱۲۰	۳۰

در هر آزمایش با ۲ گرم از نمونه زغال فلوته شده و مقادیر تعیین شدهٔ متانول، پالپ ۲۰٪ تهیه شد. پتاس مورد نظر برای هر مرحله، به آن اضافه و راکتور COD قرار داده شد. در سه مرحله راکتور در دماهای ۱۰۰ °C، ۱۲۰ °C و ۱۵۰ °C درجه تنظیم شد. نمونه‌ها درون لوله‌های آزمایش تفلونی ۱۰ میلی‌لیتری ریخته شد ودرزمانهای تعیین شده تحت حرارت‌دهی قرار گرفت. واکنش‌های انجام گرفته در این آزمایش به صورت زیر هستند:

$$8FeS_2 + 30KOH \rightarrow 4Fe_2O_3 + 14K_2S + K_2S_2O_3 + 15H_2O \quad (7)$$

$$R\text{-}SH + 2KOH \rightarrow K_2S + 2H_2O + R'CH{=}CH_2 \quad (8)$$

$$RCH_2CH_2SCH_2CH_2R' + 2KOH \rightarrow RCH{=}CH_2 + R'CH{=}CH_2 + K_2S + 2H_2O \quad (9)$$

(۱۰)

متانول/ پتاس حلال قطبی است که به دلیل داشتن پیوندهای هیدروژن و نیروهای جاذبه دو قطبی، حلالیّت بالایی برای مولکولهای آلی قطبی موجود در زغال دارد. پتاس در شکستن پیوندها و زنجیرهای جانبی زغال بهتر عمل می‌کند و قادر به شکستن پیوند C- S است. پس از خارج کردن لوله‌ها، محتویات با یک کاغذ صافی، فیلتر و زغال روی کاغذ صافی، چندین بار با آب شستشو داده شد. سولفیدهای پتاس و اکسیدهای آهن کاملاً شسته و از زغال خارج می‌شود. در نهایت زغال باقی مانده در دمای آزمایشگاه خشک و سپس توزین شدند. مقدار گوگرد و خاکستر باقیماندهٔ نمونه‌ها پس از عملیّات لیچینگ اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۸ ارائه شده است. مقدار کاهش گوگرد و خاکستر از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است[۳]:

$$\%\ \text{Sulfur reduction} = 100[x_1 - x_2(m_2/m_1)]/x_1, \quad (11)$$

$$\%\ \text{Ash reduction} = 100[y_1 - y_2(m_2/m_1)]/y_1, \quad (12)$$

که:

m_1 :وزن نمونه خشک اوّلیّه

m_2 : وزن نمونه خشک پس از لیچینگ

x_1 : درصد گوگرد در نمونه اوّلیّه

x_2 : درصد گوگرد در زغال باقیمانده از لیچینگ

y_1 : درصد خاکستر در نمونه اولیه

y_2 : درصد خاکستر در زغال باقیمانده از لیچینگ

برای محاسبه حذف کلی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

(13) درصد حذف در فرایند لیچینگ× (درصد حذف در فرایند فلوتاسیون-۱)+ درصد حذف در فرایند فلوتاسیون= درصد حذف کلی

٤ـ نتایج و بحث

٤-۱ـ فلوتاسیون

نتایج مربوط به حذف گوگرد و خاکستر به روش فلوتاسیون در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول (۷) نتایج فلوتاسیون زغال‌سنگ مزینوی ۲ با استفاده از فعال کننده یون مس.

	coal(gr)	Cu^{++} اضافه شده (گرم)	S_t(%)	ash(%)	$Sulfur_t$ removal (%)	$Sulfur_{io}$ removal (%)	Ash removal (%)
feed	۱۰۰		۲/۳۶	۳۳/۵۷			
pH=7							
Conc.	۵۰/۵۰	۰	۲/۰۴	۱۵/۲۴	۵۶/۳۵	۵۹/۸	۷۷/۰۷
Conc.	۴۷/۴۳	۰/۶۴	۱/۸۲	۱۰/۲۶	۶۳/۴۲	۷۴/۷۴	۸۵/۵۰
Conc.	۵۵/۴۴	۱/۵۸	۱/۴۳	۱۲/۴۰	۶۶/۴۱	۹۷/۷۱	۷۹/۵۲
pH=8							
Conc.	۴۸/۱۱	۰	۱/۷۱	۱۰/۷۶	۶۵/۱۴	۷۹/۵۴	۸۴/۵۸
Conc.	۴۷/۹۰	۰/۶۴	۲/۱۱	۱۱/۰۸	۵۷/۱۷	۶۱/۰۵	۸۴/۱۹
Conc.	۴۸/۷۶	۱/۵۸	۱/۸۵	۱۱/۳۷	۶۱/۷۸	۷۲/۹۱	۸۳/۴۹
pH=9							
Conc.	۴۷/۸۲	۰	۱/۷۱	۱۱/۲۶	۶۵/۳۵	۷۸/۶۵	۸۳/۹۶
Conc.	۴۳/۷۶	۰/۶۴	۱/۶۹	۱۰/۹۵	۶۸/۶۶	۷۶/۴۹	۸۵/۷۳
Conc.	۵۵/۲۶	۱/۵۸	۱/۶۵	۱۲/۷۵	۶۱/۳۶	۸۵/۶۱	۷۹/۰۱

در جدول ۷ مقادیر حذف گوگردکلی، غیر آلی و خاکستر در هر مرحله از فلوتاسیون ارائه شده است.

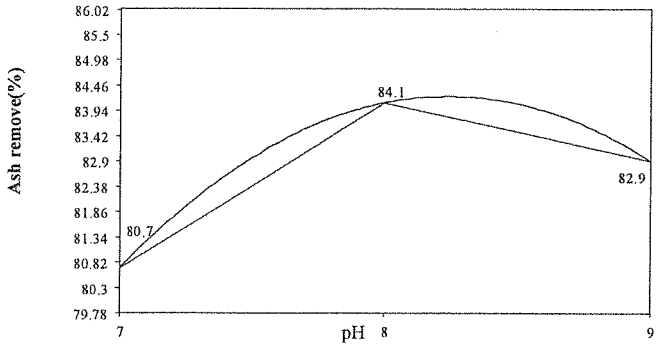
بررسی نتایج آرایهL9 با نرم افزار Qualitek انجام شد که مقادیر تأثیر هریک از این متغیّرها و نیز مقادیر پارامترها برای حذف حداکثر خاکستر و گوگرد در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است.

٤-۱-۱ـ حذف خاکستر

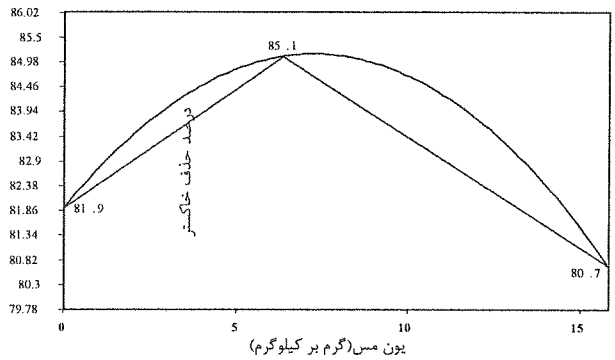
جدول (۸) شرایط بهینه فلوتاسیون در کاهش حداکثر خاکستر زغال‌سنگ مزینوی۲.

متغیر	مقادیر بهینه	درصد تاثیر
pH	۸	۳۵/۶۳
Cu^{++}	۰/۶۴	۶۴/۳۷
۸۲/۵۶ =میانگین مقدار حذف خاکستر برای ۹ آزمایش		

نمودارهای ۱ و ۲ تاثیر pH و غلظت یون مس را بر حذف خاکستر نشان می‌دهند.



نمودار ۱- تاثیر pH بر حذف خاکستر در شرایط مختلف



نمودار (۲) تاثیر غلظت یون مس بر حذف خاکستر در شرایط مختلف.

در بررسی نمودار ۱ مشاهده می‌شود که با بالا رفتن pH تا مقدار ۸، حذف خاکستر افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار حذف در همین pH به دست می‌آید. اما پس از آن روند حذف، نزولی می‌شود. در pH های قلیایی، مقدار بازیابی زغال کاهش و میزان خاکستر آن افزایش می‌یابد.

نمودار ۲ نشان می‌دهد که در مقادیر اندک یون مس با افزایش یون مس، خاکستر، کمتر ولی با زیاد شدن غلظت یون مس مقدار حذف خاکستر کمتر می‌شود. سولفات مس به عنوان فعّال کننده نیز در فرایندهای فلوتاسیون معکوس به کار می‌رود[۱۰].

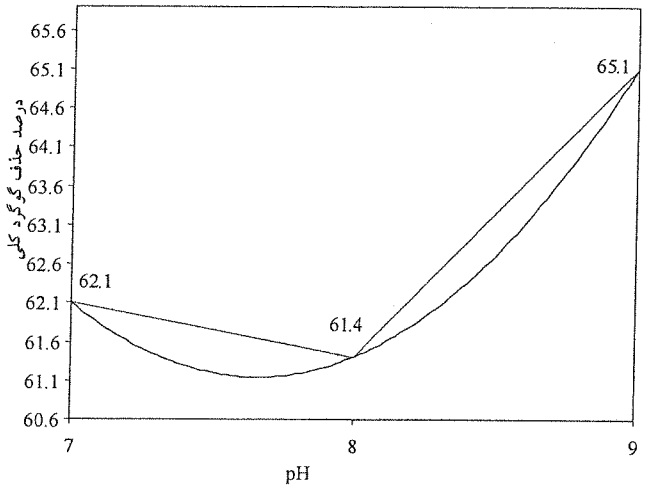
٤-۱-۲ـ حذف گوگرد:

جدول (۹) شرایط بهینه فلوتاسیون در کاهش گوگرد کلی زغال‌سنگ مزینوی ۲.

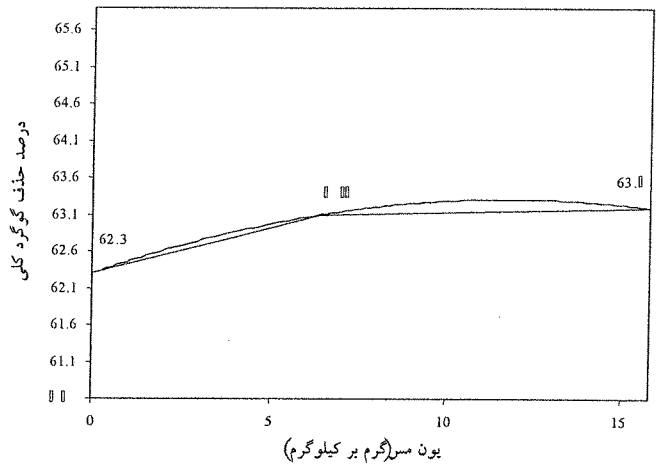
متغیر	مقادیر بهینه	درصد تاثیر
pH	۹	۹۳/۲۳
Cu^{++}	۱/۵۸	۶/۷۷
۶۲/۸۵= میانگین مقدار حذف گوگرد کلی		
۷۲/۲۸= میانگین مقدار حذف گوگرد غیر آلی		

نمودارهای ۳ و ۴ تاثیر متغیّرهای pH و یون مس را در کاهش گوگرد کلی نشان می‌دهد.

چنانچه مشاهده می‌شود طبق جداول Qualitek نتایج بهینه برای حذف گوگرد در pH=۹ با غلظت یون ۱/۵۸ گرم حاصل می شود. این فرایند قادر به حذف مقدار بالایی از گوگرد غیر آلی زغال است.



نمودار (۳) تاثیر pH بر حذف گوگرد کلی.



نمودار (۴) تاثیر غلظت یون مس در حذف گوگرد کلی.

بررسی نمودارهای ۳ و ۴ نشان می‌دهد که افزایش pH تاثیر مطلوبی بر حذف گوگرد زغال سنگ دارد. تا pH=۸ حذف گوگرد کاهش ناچیزی دارد و پس از آن با افزایش pH مقدار حذف گوگرد نیز در فرایند افزایش پیدا می کند. در pH های قلیایی حذف گوگرد افزایش پیدا می‌کند ولی مقدار حذف خاکستر کاهش پیدا می‌کند و بازیابی زغال پایین می‌آید. مشاهده می‌شود که یون مس در این فرایند تأثیر ناچیز و مثبت در حذف گوگرد دارد. در مقادیر بالای یون مس حذف گوگرد نیز افزایش می‌یابد[۱۴].

٤-۲ـ لیچینگ

نتایج فرایند لیچینگ با مقادیر مختلف متغیرها در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول (۱۰) میزان حذف گوگرد و خاکستر ناشی از لیچینگ نمونه فلوته شده زغال‌سنگ مزینو با متانول و پتاس.

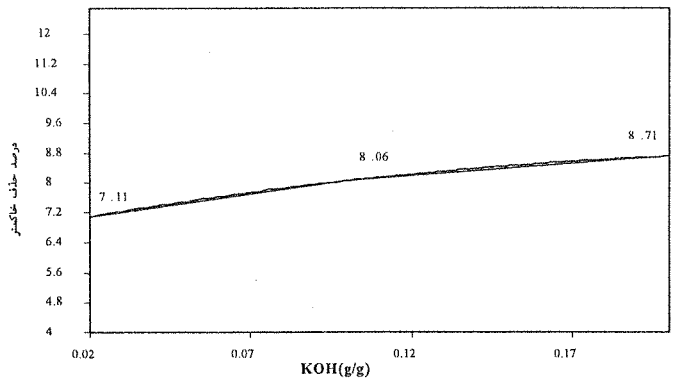
شماره آزمایش	Feed(g)	$Sulfur_t$(%)	Ash(%)	Sulfur reduction (%)	Ash reduction (%)	Weight of residue(g)
۱	۲٫۰۹	۰٫۹۲	۱۱٫۰۱	۳۷٫۵۱	۱۳٫۷۶	۲٫۰۳
۲	۲	۰٫۸۹	۱۱٫۷۲	۳۸٫۳۸	۶٫۴۳	۱٫۹۸
۳	۲	۱٫۱۷	۱۲٫۳۲	۱۸٫۵۹	۱٫۱۴	۱٫۹۹
۴	۲٫۳۷	۱٫۰۳	۱۱٫۳۹	۲۹٫۱۹	۹٫۷۰	۲٫۳۳
۵	۲	۱٫۰۹	۱۱٫۳۰	۲۴٫۹۲	۱۰٫۲۴	۱٫۹۷
۶	۲٫۰۵	۱٫۰۰	۱۱٫۹۹	۳۰٫۷۵	۴٫۲۵	۲٫۰۳
۷	۲	۰٫۹۹	۱۱٫۳۳	۳۱٫۱۲	۹٫۰۹	۱٫۹۹
۸	۲٫۴۵	۰٫۹۱	۱۱٫۸۱	۳۷٫۶۶	۶٫۷۰	۲٫۴۰
۹	۲	۰٫۷۸	۱۱٫۶۴	۴۷٫۹۱	۱۰٫۳۵	۱٫۹۱

٤-۲-۱ـ خاکستر

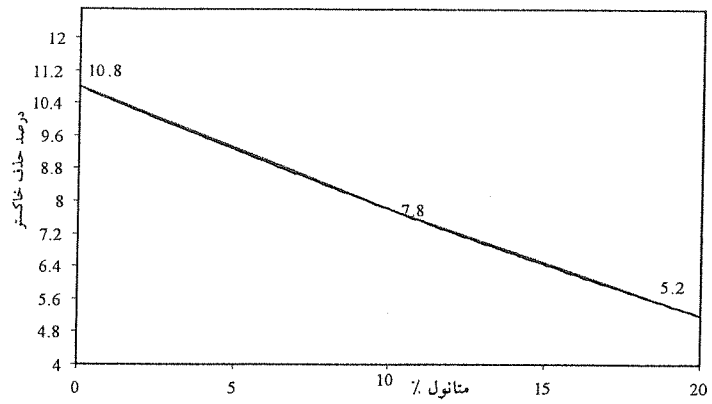
جدول ۱۱ که از نتایج آرایه‌L9 توسط نرم افزار Qualitek به دست آمده است، نشان می‌دهد که در حذف خاکستر بیشترین تأثیر را زمان و متانول و کمترین اثر را پتاس دارد. نمودارهای ۵، ۶، ۷ و ۸ تأثیر این متغیّرها را بر کاهش خاکستر نشان می‌دهد.

جدول (۱۱) شرایط بهینه لیچینگ در کاهش خاکستر زغال‌سنگ مزینو.

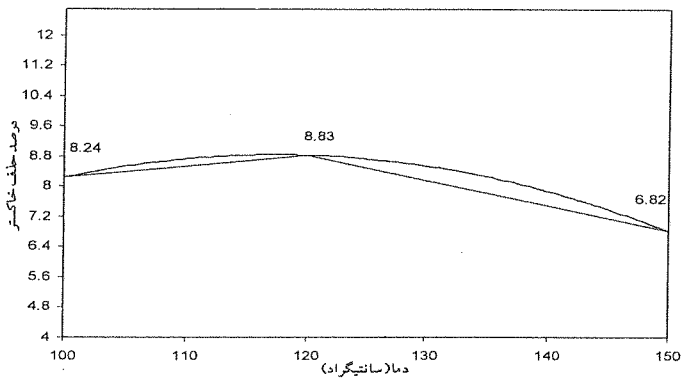
متغیر	مقادیر بهینه	درصد تاثیر
پتاس	۰/۲	۳/۴۵
متانول	۰	۴۱/۷۷
دما	۱۲۰	۵/۶۲
زمان	۳۰	۴۹/۱۵
۷/۹۶= میانگین مقدار حذف خاکستر		



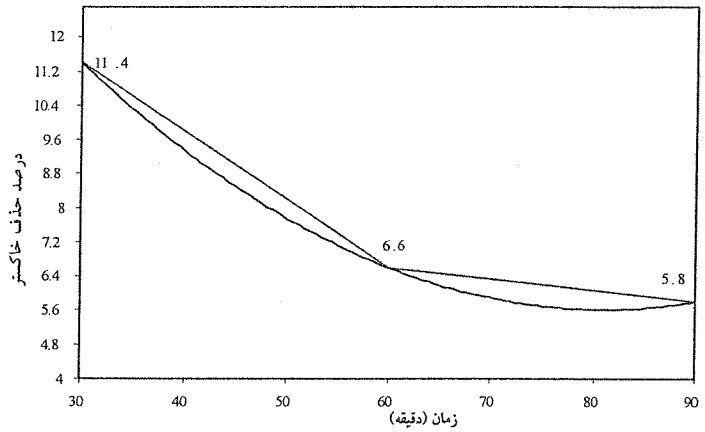
نمودار (۵) تأثیر پتاس بر حذف خاکستر.



نمودار (۶) تأثیر متانول بر حذف خاکستر.



نمودار (۷) تأثیر دما بر حذف خاکستر.



نمودار (۸) تأثیر زمان بر حذف خاکستر.

٤-۲-۱-۱ـ بررسی اثر پتاس

نمودار ۵ نشان می‌دهد که با بالا رفتن غلظت پتاس موجود در حلّال فرایند در عملیات لیچینگ، حذف خاکستر به طور خطّی و به آرامی‌افزایش می‌یابد. اما به نظر می‌رسد که مقادیر بالای پتاس به دلیل تولید نمک های پتاس در حین واکنش می‌تواند خاکستر را در محصول لیچینگ افزایش بدهد و میزان خاکستر را بیشتر کند[۱۲].

٤-٢-١-٢ـ اثر متانول

نتایج به دست آمده از نرم افزار Qualitek در نمودار ۶ نشان می‌دهد که متانول در حذف خاکستر، نقش منفی ایفا می‌کند و مقدار حذف خاکستر با افزایش درصد متانول به طور خطی کاهش می‌یابد. به همین دلیل در صورت لیچینگ با آب به جای متانول، خاکستر بیشتری حذف خواهد شد. این تأثیر در جدول ۶ کاملاً مشهود است. مشاهده می‌شود کاهش غلظت متانول در حلال باعث افزایش حذف خاکستر می شود.

٤-٢-١-٣ـ اثر دما

در عملیات لیچینگ، دما، تأثیر مثبت بر حذف خاکستر دارد. همانگونه که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود، با بالا رفتن دما خاکستر کاهش می‌یابد و ماکزیمم حذف در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. اما در دماهای بالاتر، حذف خاکستر کاهش می‌یابد. می‌توان انتظار داشت که دماهای بالاتر باعث تجزیه متانول شود و نیز واکنش بین زغال و ناخالصی‌ها را افزایش دهد که همین امر مانع از جداسازی آنها می شود[۱۲].

٤-٢-١-٤ـ بررسی اثر زمان

تاثیر زمان بر مقدار حذف خاکستر در عملیات لیچینگ نیز بررسی شد. در این فرایند، با افزایش مدت زمان لیچینگ مقدار حذف خاکستر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. بعد از ۶۰ دقیقه، کاهش، عملاً ناچیز و بدون تغییر است. به گونه ای که افزایش مدّت زمان لیچینگ تأثیری بر حذف خاکستر ندارد. طبق نمودار ۸ بیشترین حذف در نیم ساعت اوّل صورت می‌گیرد.

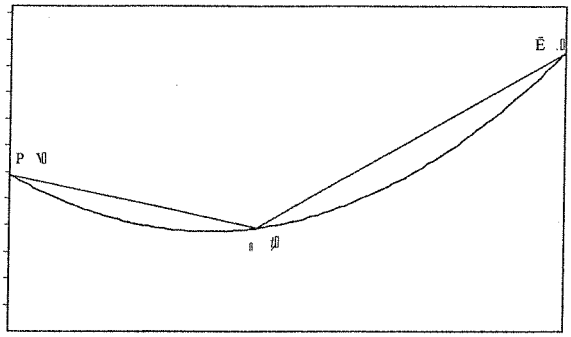
٤-٢-٢ـ گوگرد

جدول ۱۲ میزان تاثیر پارامترهای مختلف را بر حذف گوگرد در فرایند لیچینگ نشان می‌دهد.

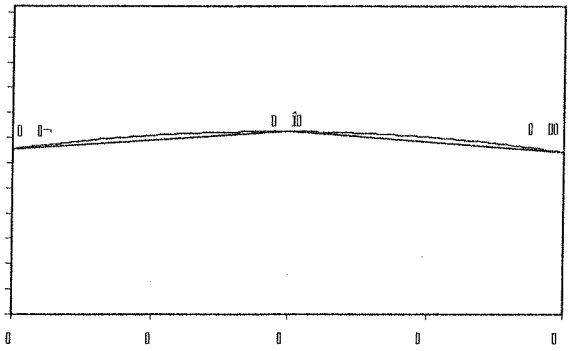
جدول (۱۲) شرایط بهینه لیچینگ در کاهش گوگرد کلی زغال‌سنگ مزینو.

متغیر	مقادیر بهینه	درصد تاثیر
پتاس	۰/۲	۳۰/۱۵
متانول	۱۰	۰/۴۵۱
دما	۱۲۰	۵۱/۶۵
زمان	۳۰	۱۷/۷۵
۳۲/۸۹= میانگین مقدار حذف گوگرد		

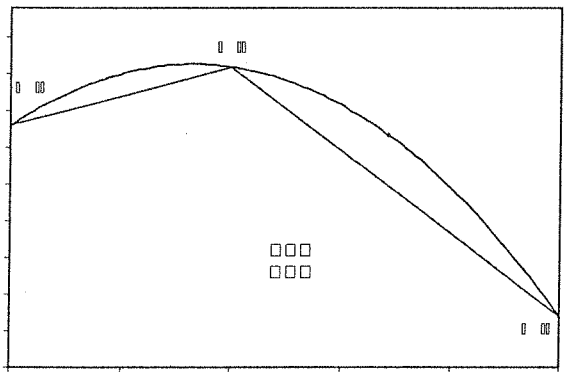
طبق جدول۱۲ مشاهده می‌شود که کمترین تأثیر را در حذف گوگرد متانول و بیشترین تاثیر را دمای فرایند دارد. با بالا رفتن دما تا ۱۲۰ درجه سانتی گراد میزان حذف گوگرد نیز افزایش می‌یابد. نمودارهای۹، ۱۰،۱۱ و۱۲ تأثیر متغیرهای پتاس، متانول، دما و زمان را در کاهش گوگرد نشان می‌دهد.



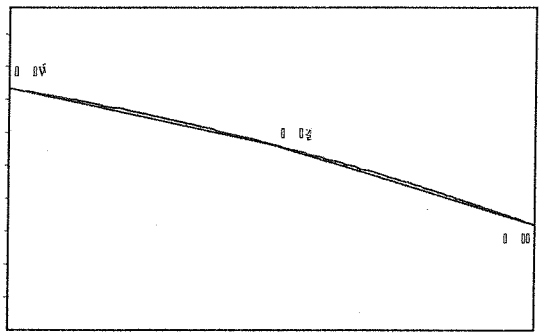
نمودار (۹) تأثیر پتاس بر حذف گوگرد کلّی.



نمودار (۱۰) تأثیر متانول بر حذف گوگرد کلّی.



نمودار (۱۱) تأثیر دما بر حذف گوگرد کلّی.



نمودار (۱۲) تأثیر زمان بر حذف گوگرد کلّی.

٤-٢-٢-١ـ بررسی اثر پتاس

پتاس قادر به حذف گوگرد آلی زغال است. پتاس در غلظت های ناچیز، تأثیر عکس بر حذف گوگرد دارد. طبق نمودار۹ تا غلظت ۰/۱، مقدار حذف کاهش می‌یابد و پس از آن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. پتاس در غلظت های بالا عملیّات گوگرد زدایی را تسریع می‌کند. می‌توان فرض کرد که هیدروژن موجود در پتاس نقش مثبتی در شکستن پیوندهای C-S و کاهش گوگرد ایفا می‌کند[۱۱]. واکنش های صورت گرفته بین پتاس و زغال نشان دهنده این موضوع است.

٤-٢-٢-٢ـ اثر متانول

نتایج به دست آمده از نرم افزار Qualitek نشان می‌دهد متانول، تأثیر چندانی بر حذف گوگرد نیز ندارد. نمودار۱۰ نیز بیانگر آن است که تغییرات گوگرد در غلظت های مختلف متانول بسیار ناچیز است. می توان فرض کرد که چون متانول، یک حلال آلی است نمی تواند گوگرد غیرآلی را در خود حل و از زغال جدا کند.

٤-٢-٢-٣ـ اثر دما

در عملیات لیچینگ، دما تاثیر مثبت در گوگردزدایی دارد. با بالا رفتن دما گوگرد غیرآلی کاهش می‌یابد و ماکزیمم حذف در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. طبق نمودار ۱۱ افزایش دما، حذف گوگرد را کاهش می‌دهد. می‌توان انتظار داشت که دماهای بالاتر فعالیت زغال و گوگرد را افزایش داده و مانع از جداشدن گوگرد می‌شود[۱۲].

٤-٢-٢-٤ـ بررسی اثر زمان

تاثیر زمان بر روی مقدار حذف گوگرد در عملیات لیچینگ در نمودار ۱۲ مورد بررسی قرارگرفت. در این فرایند، با افزایش مدت زمان لیچینگ مقدار حذف گوگرد به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.به نظر می رسد که در ۳۰ دقیقه اول واکنش به مقدار بهینه خود رسیده است و پس از آن وجود پتاس و متانول در دمای بالا و واکنش گوگرد با زغال سبب می شود که حذف گوکرد کاهش یابد.

وضعیت حذف کلی گوگرد و خاکستر در مجموع دو فرایند در شرایط مختلف برای زغال سنگ با مقادیر اولیه گوگرد ۲/۳۶ ٪ و خاکستر۳۳/۵۷٪ در جدول ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۱۳- حذف و بازیابی کلی گوگرد و خاکستر نمونه زغال‌سنگ مزینو

شماره آزمایش	total S reduction (%)	total Ash reduction(%)
۱	۷۹/۰۱	۸۲/۳۴
۲	۷۹/۳۰	۸۰/۸۴
۳	۷۲/۶۵	۷۹/۷۵
۴	۷۶/۲۱	۸۱/۵۱
۵	۷۴/۷۸	۸۱/۶۲
۶	۷۶/۷۴	۸۰/۳۹
۷	۷۶/۸۶	۸۱/۳۸
۸	۷۹/۰۶	۸۰/۸۹
۹	۸۲/۵۰	۸۱/۶۴

نتایج جدول ۱۳ نشان می‌دهد که این فرایند قادر به حذف ۸۲/۵ ٪ گوگرد کلی و ۸۲/۳۴ ٪ خاکستر نمونه زغال می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

فرایند لیچینگ بر روی کنسانتره بدست آمده از فلوتاسیون انجام گرفت که در pH=۷ و غلظت یون مس ۱۵٫۸ گرم بر کیلوگرم زغال فلوته شده‌بود و ۶۶٫۴۱٪ گوگرد کلی، ۹۷٫۷۱٪ گوگرد غیر آلی و ۷۹٫۵۲٪ خاکستر آن حذف شده بود. در مرحله لیچینگ، حذف بهینه گوگرد در غلظت پتاس ۰٫۲ گرم بر گرم زغال، متانول ۱۰٪، دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد و مدت زمان گرمایش ۳۰ دقیقه حاصل شد که مقدار آن در این شرایط ۳۲٫۸۹٪ می‌باشد. افزایش غلظت پتاس، مقدار حذف گوگرد و خاکستر را بالاتر خواهد برد. در این فرایند، حذف بهینه خاکستر در غلظت پتاس ۰٫۲ گرم بر گرم زغال، بدون حضور متانول، دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد و مدت زمان گرمایش و همزدگی ۳۰ دقیقه حاصل شد. مقدار حذف خاکستر در این شرایط، ۷٫۹۶ ٪ بود که افزایش متانول تاثیر منفی در کاهش آن خواهد داشت. بیشترین کاهش گوگرد و خاکستر زغال با استفاده از هر دو فرایند، به ترتیب ۸۲٫۵۰ ٪ و ۸۲٫۳۴ ٪ است.

۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از دانشگاه تربیت مدرس، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و پژوهشگاه صنعت نفت بعلت فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می شود.

۸- منابع

[1] Meryam Seferinoglu, Mehtap Paul, Selami Toprak, Acid leaching of coal and coal – ashes, Fuel, vol 82, 2003

[2] S.Mokhreji, P. C. Borthakur, Chemical demineralization/desulfurization of high sulphur coal using sodium hydroxide and acid solutions, Fuel, vol 80, 2001,2037-2040

[3] Semra Karaca, Muammer Akyurek, Samih Bayrakcheken, The removal of pyritic sulfur from Aşkal lignite in aqueous suspension by nitric acid, Fuel Processing Technology, vol 80, 2003,1-8

[4] R. Alvarez, C. Clemente, D. Go´mez-Limo´n, The influence of nitric acid oxidation of low rank coal and its impact on coal structure, Fuel, vol 82, 2003, 2007–2015

[5] Peter K.K.Louie, Simon H.Bottrell, Ronald C.Timpe, An improved method for extracting sulfate from bituminous coals using formic acid, Fuel, vol 74,1995, 1480-1484

[6] Samit Mukheriee, Prakash Chandra Borthakur, Effect of leaching high sulfur sub bituminous coal by potassium hydroxide and acid on removal of mineral matter and sulfur, Fuel, vol 82, 2003, 783-788

[۷] مزدا بیگلری، محمد رضا احسانی، گوگرد زدایی زغال‌سنگ، پایان نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران، ۱۳۷۶

[8] Saimir A. Lolja, A model for alkaline removal of sulfur from low-rank coal, Fuel Processing Technology, vol 60, 1999, 185-194

[9] Samit Mukherjee, P.C. Borthakur, Effects of alkali treatment on ash and sulphur removal from Assam coal ,Fuel Processing Technology, 2003

[۱۰] رضایی. بهرام، تکنولوژی زغال شویی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول ۱۳۸۰

[11] Krittka Charutawai, Somkiat Ngamprasertsith, Supercritical desulfurization of low rank coal with ethanol/KOH, Fuel Processing Technology, 1667, 2003, 1-10

[12] S.Ratanakandilok, S.Ngamprasertisith, P.Prasassarakich, Coal desulfurization with methanol/ water and methanol/KOH, Fuel, vol 80, 2001, 1937-1942

[13] Hüseyin Karaca and Kadim Ceylan ,Chemical cleaning of Turkish lignites by leaching with aqueous hydrogen peroxide, Fuel Processing Technology, Volume 50, Issue 1, January 1997, Pages 19-33

[14] T.K.Dichmann, J.A.Finch, The role of copper ions in sphalerite-pyrite flotation selectivity, Mineral Engineering, 2001, vol 14, No.2, 217-225