



دانشکده معدن و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف

سمینار کارشناسی ارشد

عنوان:

مشکلات زیست محیطی پساب های اسیدی معدن و
روش پیش بینی پتانسیل آلودگی در ارتباط با آنها

دانشجو:

بهشاد جدیری شکری

استاد راهنما:

دکتر فرامرز دولتی

بهار ۱۳۸۵



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به :

پدر عزیز

مادر دلسوز

و

خواهر مهربانہ

تشکر و قدردانی:

برخود لازم می دانم که از زحمات و حمایت‌های بی دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فرامرز دولتی ارده جانی کمال سپاسگزاری را نمایم. از دوست گرانقدرم آقای مهندس مهرداد سلیمانی قدردانی می نمایم. همچنین از دوستان عزیز و گرامیم آقایان مهندس آرش امیدپور، مهندس سیامک ارواحی، مهندس مجید لطفی، مهندس صادق حسینی، مهندس روح الله احمدی و مهندس مسعود زارع نیز تشکر و قدردانی می نمایم.

بهشاد جدیری شکری

فصل اول: پساب اسیدی

- ۱-۱- بررسی مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید پساب اسیدی در معادن..... ۲
- ۱-۱-۱- مهاجرت ۴
- ۱-۲- تأثیر پساب اسیدی بر حیات آبریان..... ۵
- ۱-۳- تأثیر پساب اسیدی بر روی آب زیر زمینی و سطحی..... ۶
- ۱-۴- چگونگی تولید پساب اسیدی معدن..... ۸
- ۱-۵- تشکیل پساب و نقش کانیهای سولفیدی آهن و بررسی کانی های
خنثی کننده ۱۰
- ۱-۶- نقش خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کانی در فرآیند تولید اسید..... ۱۹
- ۱-۷- بررسی اکسیداسیون کانی های سولفیدی فلزی و فرآیند های
شیمیایی تولید کننده پساب اسیدی..... ۱۹

فصل دوم: استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

- ۲-۱- پیش بینی امکان تولید پساب اسیدی در معدن ۲۶
- ۲-۲- نمونه برداری..... ۳۰

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۳-۲- انجام آزمایشات پیش بینی کننده امکان تولید پساب اسیدی	۳۲
۴-۲- آزمایشات استاتیکی.....	۳۴
۴-۲-۱- آزمایش محاسبه اسید - باز (ABA)	۴۰
۴-۲-۲- آزمایش محاسبه اسید باز اصلاح شده (Modified ABA).....	۴۱
۴-۲-۳- آزمایش تحقیق مقدماتی بریتیش کلمبیا.....	۴۲
۴-۲-۴- آزمایش نسبت پتانسیل تولید قلیائیت به سولفور (APP : S).....	۴۲
۴-۲-۵- آزمایش تولید خالص اسید	۴۳
۴-۲-۵- آزمایشهای سینتیکی.....	۴۴
۴-۲-۵-۱- آزمایش سلول مرطوب.....	۴۹
۴-۲-۵-۲- آزمایش استخراج سوکسله.....	۵۱
۴-۲-۵-۳- آزمایشهای ستونی.....	۵۳
۴-۲-۵-۴- آزمایش راکتور ناپیوسته.....	۵۵
۴-۲-۵-۵- آزمایش در مقیاس واقعی (سرزمین).....	۵۷
۴-۲-۵-۶- آزمایش تایید تحقیقات بریتیش کلمبیا.....	۵۹
۴-۲-۵-۷- تفسیر نتایج حاصل از انجام آزمایشات استاتیکی.....	۶۰
۴-۲-۵-۸- تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایشهای سینتیکی.....	۶۴

فصل سوم: شناسایی آلودگی ناشی از پساب های اسیدی با استفاده از روش های

ژئوفیزیکی

۶۶	۱-۳- مقدمه.....
۶۷	۲-۳- تعیین روش ژئوفیزیکی مناسب.....
۶۸	۳-۳- انواع روش های ژئوفیزیکی در تعیین محدوده آلودگی.....
	۳-۴- تعیین و شناسایی آلودگی آب زیر زمینی با استفاده از روش های
۶۹	مقاومت ویژه و VLF (مطالعه موردی).....
۶۹	۳-۴-۱- مشخصات منطقه مورد مطالعه.....
۷۰	۳-۴-۲- شیمی آب.....
۷۱	۳-۴-۳- نتایج برداشت های ژئوالکتریک.....
۷۵	۳-۴-۴- برداشت ژئوفیزیکی با استفاده از روش VLF.....

فصل چهارم: پیش بینی آلودگی ناشی از پساب های اسیدی با استفاده از

مدلسازی ریاضی

۷۹	۴-۱- مقدمه.....
۷۹	۴-۲- انواع مدل ها.....
۸۰	۴-۲-۱- مدل های مفهومی.....

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۴-۲-۲- مدل های فیزیکی.....	۸۱
۴-۲-۳- مدل های ریاضی.....	۸۱
۴-۲-۴- مدل های عددی.....	۸۱
۴-۳- مدل مغزۀ منقبض شونده اکسیداسیون پیریت.....	۸۲
۴-۴- مطالعه موردی پیش بینی پتانسیل آلودگی معدن زغال نواری بکفیل استرالیا با استفاده از مدل سازی عددی (المان حجمی محدود).....	۸۳
۴-۴-۱- معادله مدل اکسیداسیون پیریت.....	۸۳
۴-۴-۲- معادله ریاضی مدل نفوذ اکسیژن در باطله ها.....	۸۴
۴-۴-۳- مدل حمل آلودگی های ناشی از اکسیداسیون پیریت.....	۸۵
۴-۴-۴- پارامترهای ورودی مدل.....	۸۵
۴-۴-۵- شرایط مرزی مدل اکسیژن.....	۸۷
۴-۴-۶- شرایط مرزی آلاینده ها.....	۸۷
۴-۴-۷- نتایج مدلسازی.....	۸۸
۴-۴-۸- نتیجه گیری.....	۹۲

منابع و مراجع

منابع و مراجع.....	۹۳
--------------------	----

فصل اول

پساب اسیدی

۱-۱- بررسی مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید پساب اسیدی در معادن

عملیات معدنکاری محیط اطراف خود را دچار یکسری تغییرات می کند که در نوع خود آلودگی محسوب می شود. جابجایی افقی لایه بالایی خاک و یا دفع باطله ها در رودخانه ها و دریاچه ها و ایجاد سر و صدا توسط تجهیزات و ماشین آلات معدنی و پدیده نشست زمین، انواع مختلف آلودگی می باشند. آلودگی هوا، حاصل از عملیات معدنی و آلودگی آب ناشی از خروج پسابهای معدنی و راهیابی آن به آبهای جاری منطقه و یا نفوذ آن به درون زمین و راه یافتن آن به چشمه ها و سفره های آبی زیرزمینی می باشد.

چهار نوع آلودگی معدنکاری که تاثیر زیادی بر روی کیفیت آب منطقه معدن دارند، عبارتند از :

۱- پساب اسیدی معدن^۱ (AMD) و پساب اسیدی سنگ^۲ (ARD)

این پساب ها باعث اسیدی بودن باعث پایین رفتن pH آب می شوند و در عین حال فلزات را در خود حل کرده و با انتقال فلزات بصورت محلول باعث تجمعات غیر طبیعی آنها در محیط زیست می گردند.

۲- آلودگی ناشی از فلزات سنگین

در این حالت سنگ محتوی فلزات آرسنیک، کبالت، مس، کادمیوم، سرب، نقره و روی می باشد که پس از استخراج و در تماس با آب و با انجام لیچینگ توسط آب و انحلال فلزات سنگین به منابع آبی منطقه راه می یابند.

۳- آلودگی حاصل از فرآیندهای شیمیایی

این نوع آلودگی زمانی رخ می دهد که مواد شیمیایی مانند سیانید یا اسید سولفوریک برای شستشو و لیچینگ ماده معدنی بکار رود .

۴- فرسایش و رسوبگذاری.

1 Acid Mine Drainage

2 Acid Rock Drainage

در این حالت بعلت نبودن کنترل کافی، جاده ها و معادن روباز تحت عمل فرسایش قرار می گیرند و مقداری مواد را به دریاچه ها و رودخانه ها و جریان آبی اطراف وارد می کنند [۱].

ایجاد پساب و تخلیه آن به اطراف معدن باعث آلودگی شدید زیست محیطی می گردد. با توجه به اینکه تعداد معادن متروک و بسته شده در حال افزایش می باشد و پرهزینه بودن خنثی سازی پساب اسیدی (با استفاده از مواد کربناته و ساخت تالاب ها)، تولید پساب اسیدی معدن بصورت یک معضل در آمده است [۲].

مشخصات عمده پساب عبارتست از :

- ۱- پایین بودن میزان pH آن.
- ۲- بالا بودن غلظت یونهای فلزی.
- ۳- افزایش میزان سولفاتها.
- ۴- ایجاد لجن بصورت غیر طبیعی.

پساب اسیدی پس از وارد شدن به رودخانه ها باعث اسیدی شدن آنها می شود که منجر به مرگ جانوران آبی می گردد. از طرف دیگر با توجه به اسیدی بودن پساب ها، فلزات موجود در سنگها حل می گردد و در جریانهای آبی سطحی یا زیر زمینی جاری می گردد. که در غلظتهای بالا این یونهای فلزی می تواند در چرخه زندگی جانداران قرار گرفته و موجبات مسمومیت و یا حتی مرگ آنها را فراهم آورد [۳].

غیر از پساب و ARD، اسیدی شدن آبهای سطحی و زیر زمینی توسط باران اسیدی و خاکهای سولفاتی اسیدی^۱ (ASS) هم انجام می شود که آلودگی های مذکور ناشی از فعالیتهای صنعتی و کشاورزی می باشد [۴]. در آمریکا پساب و دیگر مواد سمی حاصل از معادن متروک ۱۸۰۰۰ جریب زمین و دریاچه و ۱۲۰۰۰ مایل از رودخانه ها و جریانهای آبی را آلوده کرده است. در کشور کانادا بطور تقریبی ۳۵۱ میلیون تن سنگ باطله و ۵۱۰ میلیون تن باطله های سولفیدی و بیش از ۵۵

1- Acid Sulfate Soil

میلیون تن از دیگر منابع معدنکاری وجود دارد که دارای پتانسیل تولید اسید هستند. برای مثال خنثی کردن پساب اسیدی در کشور آمریکا هزینه ای بین ۳۲ تا ۷۲ بلیون دلار و در کانادا هزینه ای بین ۲ تا ۵ بلیون دلار داشته است [۵].

۱-۱-۱- مهاجرت^۱

مهاجرت و جابجایی یونهای فلزی نیز مشکل دیگر ایجاد پساب اسیدی می باشد. با توجه به پایین بودن میزان pH پساب (معمولاً کمتر از ۳ می باشد)، حلالیت فلزاتی مثل مس، سرب، جیوه، آرسنیک، نیکل و کادمیوم افزایش می یابد همه این فلزات برای زندگی گیاهان و حیوانات مضر می باشند. عوامل موثر در رسوب گونه های آهن شامل غلظت آهن، پتانسیل Eh-pH، غلظت آنیونهای کمپلکس کننده (مانند کربنات، سولفات و سولفید) و فشار جزیبی CO₂ و O₂ می باشد. برای مثال، Fe³⁺ حتی در یک pH نسبتاً پایین بسرعت هیدرولیز می شوند و باعث تشکیل هیدروکسید آهن می گردد. بطور مشابه هیدروکسید آلومینیوم، در جذب و رسوبگذاری دیگر فلزات نقش مهمی را بازی می کند. در محیطهای نسبتاً خشک، سولفاتهای آهن، سولفاتهای فلزات پایه و هیدروکسیدها، تشکیل می شود. در محیطهایی با غلظت سولفات بالا و pH پایین، جاروسیت (KFe₃(SO₄)₂(OH)₆) تشکیل می شود، در حالیکه در pH های بالاتر و غلظتهای پایین تر سولفات، ترکیباتی مثل گو تیت، اکسیدهای آهن وهیدرو اکسیدها، رسوب می کنند [۶]. البته در مسئله مهاجرت نقش کانی های خنثی ساز مانند کربناتها، سیلیکاتها و گاهی اوقات اکسیدها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. نرخ خنثی سازی کانی های خنثی کننده از pH، فشار جزیبی CO₂، دما، ترکیب و ساختمان کانی شرایط اکسیداسیون احیاء و وجود یونهای ناخالصی در شبکه کانی خنثی ساز تاثیر می پذیرد [۷].

فلزاتی که در باطله معدن کاری موجود هستند با توجه به فاکتورهای زمین شناسی شامل موارد زیر می باشند:

¹ Migration

آرسنیک، کبالت، مس، کادمیوم، کرومیوم، طلا، آهن، سرب، نقره و روی .

البته غلظت فلزات در مقادیر خیلی کم برای زندگی مهم است و در غلظت های بالا می تواند حالت سمی پیدا کند. بنا بر این انحلال بعضی از آنها در پساب و سپس تجمع پیدا کردن آنها در نقطه ای دیگر از جنبه زیست محیطی بسیار با اهمیت می باشد [۱].

۱-۲- تأثیر پساب اسیدی بر حیات آبزیان

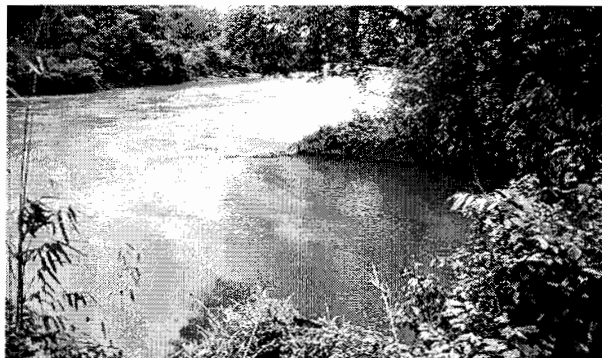
پساب اسیدی دارای اجزای مختلفی است که اثرات متفاوتی بر زندگی آبزیان می گذارد و تفکیک جداگانه این اثرات مشکل می باشد. میزان سمی بودن پساب اسیدی به نرخ جریان، pH، خاصیت اسیدی و تمرکز عناصر غیر محلول بستگی دارد. مهمترین عامل مؤثر pH می باشد. هرچه pH کمتر باشد، تاثیرات خطرناکتری در زندگی آبزیان دارد. البته تاثیرات عمومی پساب اسیدی علاوه بر موارد بالا به نرخ جریان و میزان قلیایی بودن رودخانه دریافت کننده نیز وابسته است. هرچه میزان یونهای کربنات و بی کربنات در رودخانه دریافت کننده بیشتر باشد، ظرفیت خنثی سازی رودخانه بیشتر بوده و محافظت بیشتری از زندگی آبزیان در مقابل اثرات مخرب پساب اسیدی به عمل می آید. پسابهایی که دارای غلظت بالای فلزات هستند و به آنها و رودخانه هایی با قابلیت خنثی سازی کم وارد می شوند، به احتمال زیاد آبزیان را از بین خواهند برد. بیشتر آبزیان در محدوده ای خاص از pH زنده هستند و خارج از این محدوده جان خود را از دست خواهند داد. pH کم باعث اختلال در موازنه یونهای کلر و سدیم در خون موجودات آبی می گردد. در pH های کم یونهای هیدروژن درون سلول قرار می گیرند و یونهای سدیم به خارج سلول رانده می شوند و باعث مرگ آبزیان می شوند.

فلزات سنگین خاصیت سمی پساب اسیدی را افزایش می دهند و به عنوان سم متابولیک عمل می کنند. آهن، آلومینیم و منگنز مهمترین فلزاتی هستند که ترکیبات آنها اثرات مخربی را بوجود می آورد. همچنین فلزات دیگری مثل روی، کادمیم و مس که در پساب اسیدی وجود دارند، در مقادیر بسیار کم نیز سمی هستند. آهن در pH های بیشتر از ۳/۵ رسوب می کند. بنابراین تأثیر مخرب آهن بیشتر در pH های پایین بوده که در این حالت زندگی موجودات آبی به خطر افتاده و نابود می شود.

۱-۳- تأثیر پساب اسیدی بر روی آب زیر زمینی و سطحی

پساب های معدنی شامل یک سیستم آبی ناپایدار هستند که پیوسته تغییر می کنند. ترکیب پساب اسیدی فقط بواسطه منشاء نیست، بلکه مسیری که پساب اسیدی از آن عبور می کند یا سیستمهای خنثی سازی که بر آن اثر می کنند نیز در ترکیب آن مؤثر هستند. در مناطقی که آبهای سطحی و زیرزمینی بوسیله پساب اسیدی آلوده شده باشد، خنثی سازی آب جهت مصارف آشامیدنی و صنعتی بسیار مشکل و پرهزینه است. در اثر پساب اسیدی عوامل زیر در آبهای زیرزمینی تغییر می کنند: آهن، pH، سولفات، ذرات ریز معلق و منگنز. اگر مقدار آهن از ۰/۱ میلیگرم بر لیتر (با منشاء سولفات) و ۰/۲ میلی گرم (با منشاء کلرید) بیشتر شود، مزه آب را تغییر می دهد. آهن فرو با غلظت ۰/۱ میلیگرم بر لیتر و آهن فریک با غلظت ۰/۲ میلیگرم بر لیتر مزه آب را تغییر می دهد. pH نیز می تواند مزه آب را تغییر دهد. اگر pH آب پایین بیاید، آب ترش مزه می شود. اگر pH خیلی پایین باشد، باکتریهای موثر در خنثی سازی پساب اسیدی از بین خواهند رفت. آبهایی که pH زیر ۷ دارند دارای خاصیت خوردگی بوده و می توانند بخشهایی از لوله ها و شیرها را که از جنس مس، روی،

کادمیم و سرب هستند، سرعت در خود حل کنند. غلظت بالای سولفات مزه و بوی آب را تغییر می دهد. ذرات جامد معلق در آب آشامیدنی نیز ناخوشایند بوده و مزه آب را تغییر می دهد. در تصویر ۱-۱ اثر پساب اسیدی بر روی آبهای سطحی آورده شده است. همانطور که دیده می شود، تغییر رنگ در آب وجود آلودگی را تأیید می نماید. تصویر ۲-۱ نیز تاثیر پساب های اسیدی بر گیاهان را نشان می دهد. بطوریکه به مرور زمان درختان موجود در ناحیه بطور کلی از بین رفته اند.



شکل ۱-۱- اثر پساب اسیدی بر روی آبهای سطحی



شکل ۲-۱- تاثیر مخرب پساب اسیدی بر روی گیاهان

۴-۱- چگونگی تولید پساب اسیدی معدن

با توجه به آلودگی های زیست محیطی ناشی از ایجاد پساب اسیدی در معادن و هزینه های زیاد جهت خنثی سازی آن، بررسی شرایط و چگونگی تولید آن اهمیت ویژه ای می یابد که در موارد بعدی به آن پرداخته می شود.

۴-۱-۱- منابع و محل های تولید پساب اسیدی

این منابع و محل ها شامل موارد زیر در معادن می باشد:

- ۱- سولفیدهای موجود در گانگ یا کانسنگ های ناشی از عملیات معدنکاری و یا سایر عملیات غیر معدنی مانند راه سازی و سد سازی، که از حالت برجا و طبیعی خارج می گردند در معرض هوازدگی و اکسیداسیون قرار می گیرند. در مورد فعالیتهای زیر زمینی در معادن، در این حالت متروک شدن معادن زیر زمینی منجر به رها شدن مقادیر زیادی از نمکهای فلزی و سولفیدها می شود که در معرض اکسیژن و رطوبت قرار می گیرند و چون در زیر زمین قرار دارد آب به راحتی به درون آنها جریان پیدا می کند. در مورد معدن کاری رو باز نواحی خیلی وسیعی از سنگهای محتوی سولفید در معرض هوا و آب قرار می گیرد که همزمان با اکسیداسیون سولفیدها، خرد شدن رخساره سنگ، سولفیدهای جدیدی را در معرض آب و هوا قرار می دهد که تولید پساب اسیدی را ادامه می دهد.
- ۲- در محل آسیا کردن و کارخانه فرآوری، با توجه به کاهش ابعاد ذرات در این محل و بالا رفتن فعالیت کانی ها (بعلت افزایش سطح) و همچنین استفاده از مواد شیمیایی مختلف (مانند مواد مورد استفاده در فلوتاسیون) که باعث اکسیداسیون مواد می گردد، این نواحی هم از جهت تولید پساب اسیدی اهمیت می یابد.

۳- محل دمپ های باطله حاصل از فرآوری^۱ یا باطله حاصل از عملیات استخراج و معدنکاری^۲، که این محل بیشترین امکان را جهت تولید پساب دارد و مسئله مدیریت باطله^۳ در این مورد اهمیت بسیار دارد. در مورد دمپهای Waste چون سنگهای باطله درشت هستند (از ۱۰ تا بیش از ۲۰ سانتیمتر) ، کپه های سنگ باطله اغلب خیلی نفوذپذیر هستند و اکسیداسیون سولفیدها بسرعت رخ می دهد. دمپ های Tailing، اغلب میزان کانه های سولفیدی آنها زیاد می باشد (بشکل پیریت، مارکازیت و پیروتیت) و بسیار ریزتر از سنگ باطله می باشند (برای مثال کوچکتر از ۰/۲ میلیمتر) و دارای سطوح ویژه خیلی زیادی است، اما بعلت یک شکل بودن ذرات و اندازه ریز آنها (نسبت به سنگهای باطله) نفوذپذیری (در ارتباط با نفوذ آب و اکسیژن) آن خیلی کم می باشد. بنابراین میزان تولید پساب در Tailing نسبت به Waste عموماً آرام تر می باشد.

1 Tailing
2 Waste
3 Waste Management

جدول ۱-۱- مقایسه فاکتورهای ARD در کپه های سنگ باطله حاصل از معدنکاری و حوضچه های باطله فرآوری [۶]

فاکتورهای موثر در تولید اسید	کپه های سنگ باطله معدنکاری (Waste)	سد های باطله فرآوری (Tailing)
منبع سولفید	غلظت های متفاوت از کانی سولفیدی	محتوی سولفید آنها بالا است
اندازه قطعات	بطور متوسط بزرگتر از ۲۰ سانتی متر	۱۰۰ درصد کمتر از ۲۰ سانتی متر
تغییرات pH	با توجه به فاصله، فرق می کند	در سطوح افقی بصورت یکنواخت تغییر می کند
آغاز اکسیداسیون	معمولاً بلافاصله بعد از جابجایی سنگ رخ می دهد	معمولاً بعد از جابجایی باطله ها و در انتهای عمر معدن شروع می شود
نفوذ اکسیژن	بعلت وجود خلل و فرج نفوذ اکسیژن زیاد است	چون بین ذرات خلل و فرج نیست، نفوذ اکسیژن اندک است
آزاد شدن پساب اسیدی سنگ	میزان نفوذ ARD به آبهای زیرزمینی یا مکانهای اطراف زیاد است	میزان نفوذ ARD به محیطهای اطراف، کم است

۱-۵- تشکیل پساب و نقش کانیهای سولفیدی آهن و بررسی کانی های خنثی کننده

پساب در مورد معدنی مطرح می باشد که بنحوی با کانیهای سولفیدی آهن و بالاخص پیریت (FeS_2) در ارتباط هستند و فرقی ندارد که معدن ذغالی باشد و یا فلزی. مساله این است که تولید پساب بوجود کانیهای سولفیدی آهن بستگی دارد. زمانیکه کانی های سولفیدی بعلت انجام عملیات معدنکاری در معرض آب و اکسیژن قرار می گیرند، سولفیدها توسط اکسیژن هوا اکسید می شوند و در تماس با آب باعث ایجاد پساب اسیدی می شوند. در این میان باکتریها نقش تسریع کنندگی را ایفا می کنند و نرخ واکنش اکسیداسیون را تا چندین ده برابر تسریع می نمایند. رنگ

پساب معمولاً قرمز و یا نارنجی رنگ می باشد که علت آن وجود $Fe(OH)_3$ می باشد. در واقع رنگ پساب اسیدی ناشی از رسوبات تشکیل شده، می باشد [۲].

جدول ۱-۲- تاثیر عوامل موجود در پساب اسیدی بر خواص پساب [۸]

تاثیر	دامنه تغییرات	ترکیبات شیمیایی همراه	عامل
متحرک کردن یون های فلزی	pH ۲ تا ۴	$H_2SO_4, Fe^{+2}, Fe^{+3}$ اکسیدها	اسیدیته
ایجاد تغییر رنگ و دادن حالت گل آلودی به آب	۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی گرم در لیتر	هیدروکسید فریک، جاروسیت	آهن
سمی شدن اکوسیستم و کاهش دادن کیفیت آب	۱ تا ۲۰۰ میلی گرم در لیتر	Pb, Hg, Cu, Cd, Mg, Zn, As	فلزات سنگین
کاهش دادن کیفیت آب	۱۰۰ تا ۳۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر	Mg, Al, SO_4^{-2} , Ca^{+2}	نمک های محلول

پتانسیل معدن برای تولید اسید و رهاسازی آلوده کننده هابه عوامل زیادی بستگی دارد. فرگوسن و اریکسون^۱ عوامل اولیه، ثانویه و ثالثیه را معرفی کردند که معتقد بودند در کنترل پساب اسیدی، نقش مهمی دارد. عوامل اولیه شامل فرآیندهای تولید اسید می باشد، مانند واکنشهای اکسیداسیون. عوامل ثانویه، بعنوان کنترل کننده های محصولات واکنشهای اکسیداسیون عمل می کند مانند واکنشهای دیگر کانی با پساب که باعث خنثی سازی پساب اسیدی می شود. عوامل ثالثیه به جنبه های فیزیکی مدیریت باطله بر می گردد (مانند دیواره های پیت، کپه های سنگ باطله، حوضچه های باطله فرآوری) که بر واکنش اکسیداسیون، مهاجرت اسید و خنثی سازی اسید

¹ Ferguson and Erickson

اثر می گذارد. عوامل اولیه تولید اسید شامل کانیهای سولفیدی آهن، آب، اکسیژن برای تولید پساب و یون فریک (Fe^{3+}) و باکتری جهت تسریع واکنش اکسیداسیون و گرمای تولید شده می باشد. بعضی کانیهای سولفیدی براحتی اکسیده می شوند (برای مثال پیریت فرامبوئیدال، مارکازیت و پیروتیت) و بنابراین نسبت به دیگر سولفیدهای فلزی اثر بیشتری بر روی زمان و دامنه آزمایشهای پیش بینی کننده تولید اسید، دارند. کانی های ائوهیدرال ناحیه سطحی کوچکتری دارند که در معرض هوا و آب قرار دهند و در نتیجه اکسیداسیون آنها آرام تر می باشد. از سوی دیگر آب و اکسیژن برای تولید اسید لازم هستند. آب هم یک واکنشگر و هم یک واسطه برای فرآیند اکسیداسیون (توسط باکتری) است. در ضمن محصولات اکسیداسیون توسط آن منتقل می شوند. اکسیژن برای انجام اکسیداسیون لازم است، مخصوصا برای واکنشهایی که در pH زیر ۳/۵ توسط باکتری تسریع می شوند. باکتریهای مختلف با توجه به میزان pH و شرایط دمایی مختلف در فرآینداکسیداسیون نقش دارند. جدول صفحه بعد بعضی از باکتریهای تسریع کننده واکنش اکسیداسیون و شرایط رشد آنها را نشان می دهد [۸].

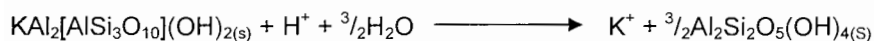
جدول ۱-۳- بعضی از باکتری های تسریع کننده فرآیند اکسیداسیون و شرایط مورد نیاز برای رشد آنها [۶]

نحوه تغذیه	هوازی	دما(درجه سانتیگراد)	pH	میکروارگانیسم
Autotrophic	+	۱۰-۳۷	۴/۵-۱۰	Thiobacillus thioparus
"	+	۱۵-۲۵	۰/۵-۶	T.ferrooxidans
"	+	۱۰-۳۷	۰/۵-۶	T.thiooxidans
"	+	۸-۳۷	۳-۸/۵	T.neapolitanus
"	-/+	۱۰-۳۷	۴-۹/۵	T.denitrificant
"	+	۲۵-۳۵	۵-۹/۲	T.novellus
"	+	۲۵-۳۵	۱/۹-۷	T.intermedius
"	+	۲۵-۳۵	۲,۸-۶,۸	T.perometabolis
"	+	۵۵-۸۵	۲-۵	Sulfolobus acidocalderius
Heterotrophic	-	۱۰-۴۵	۵-۹	Desulfovibrio desulfuricans

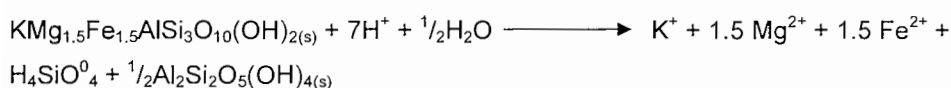
عوامل ثانویه به دو صورت عمل می نمایند : یا خنثی کننده اسید هستند و یا با اضافه کردن یونهای فلزی محلول، مشخصه پساب خروجی را تغییر می دهند. مهم ترین کانیهای خنثی کننده اسید، کلسیت، دولومیت، آنکرایت $(Ca(Fe,Mg)(CO_3)_2)$ ، سیدریت منگنزدار $(Fe,Mn)CO_3$ و سیدریت کلسیت $(FeCO_3)$ می باشد. کلسیت بیشترین قابلیت خنثی سازی را دارد. این کانی ها در واکنش با اسید حاصل از هوازدگی سولفیدها، باعث خنثی شدن حالت اسیدی پساب و ایجاد رسوبات مختلف و حتی تغییر رنگ پساب می گردند. محصولات واکنش اکسیداسیون (یونهای هیدروژن، یونهای فلزی و غیره) می توانند با دیگر کانیها که خنثی کننده نیستند، هم واکنش دهند. این واکنش ها شامل

تبادل یونی در ذرات رس، رسوب گذاری ژئوپس و انحلال دیگر کانی ها می باشد [۹ و ۶].
در زیر واکنشهای کانی های مختلف خنثی کننده اعم از کانی های کربناته و کانی های سیلیکاته با اسید آمده است.

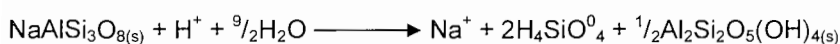
۱- واکنش موسکویت با اسید



۲- واکنش بیوتیت با اسید



۳- واکنش آلبیت با اسید



۴- واکنش آنورتیت با اسید



۵- واکنش فلدسپات پتاسیم با اسید



۶- واکنش هیدروکسید آهن با اسید



۷- واکنش کلسیت با اسید



۸- واکنش دولومیت با اسید



انحلال کانی ها باعث آلوده شدن پساب اسیدی به فلزاتی مانند آلومینیوم، منگنز، مس، سرب و روی

می گردد [۹].

جدول ۱-۴- تقسیم بندی کانی های مختلف بر پایه فعالیت هوازدگی آنها [۹]

فعالیت نسبی در pH= ۵	کانی های تیپیک	گروه کانی
۱	کلسیت، دولومیت، آراگونیت، بروسیت، منیزیت	محلول
۰/۶	الیوین، نفلین، آنورتیت، گارنت، اسپودومن، ولاستونیت، دیو پسید، لیوسیت	هوازدگی سریع
۰/۴	اپیدوت، هیپرستن، هورن بلند، هیپرستن، ترمولیت، تالک، کلریت، بیوتیت، سرپنتیت	هوازدگی متوسط
۰/۰۲	آلبیت، الیگوکولاز، لابرادوریت، ورمیکولیت، کائولینیت	هوازدگی کم
۰/۰۱	فلدسپار پتاسیم، موسکویت	هوازدگی خیلی کم
۰/۰۰۴	کوارتز، زیرکن، روتیل	بی اثر

عوامل ثالثیه که بر روی پساب اسیدی اثر می گذارد، مشخصات فیزیکی مواد، چگونگی تولید اسید و مشخصات باطله ورژیم هیدرولوژی منطقه می باشد. مشخصات فیزیکی مواد مثل اندازه ذرات، نفوذ پذیری و مشخصات فیزیکی هوازدگی، در پتانسیل تولید اسید با اهمیت هستند. اندازه ذرات بدین جهت خیلی مهم است که بر میزان سطحی که در معرض هوازدگی و اکسیداسیون قرار می گیرد، اثر می گذارند. در جدول زیر کانی های موجود در باطله دو معدن تیپیک مس در انگلستان

از نظر تولید اسید، تقسیم بندی شده اند [۱۰ و ۶].

جدول ۱-۵- تقسیم بندی کانی های باطله (waste) بر اساس تولید یا خنثی کنندگی اسید در معادن تیپیک مس Ely و Elizabeth واقع در انگلستان [۱۱، ۱۲]

کانیهای سیلیکاته	فرمول شیمیایی	تولید کننده اسید	بی اثر	خنثی کننده اسید
کوارتز	SiO_2		×	
پلاژیوکلاز	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$		×	
موسکویت	$\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		×	
بیوتیت	$\text{K}(\text{Fe}_{2,1}\text{Mg}_{1,9})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$			×
ورمیکولیت	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$			×
کلریت	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$			×
ترمولیت	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$			×

ادامه جدول ۱-۵- تقسیم بندی کانی های باطله (waste) بر اساس تولید یا خنثی کنندگی اسید در معادن تیپیک مس Elizabeth و Ely واقع در انگلستان [۱۱،۱۲]

کانیهای سیلیکاته	فرمول شیمیایی	تولید کننده اسید	بی اثر	خنثی کننده اسید
تالک	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$			×
آلیت	$NaAlSi_3O_8$		×	
آنورتیت	$CaAl_2Si_2O_8$			×
لابرادوریت	$(Ca,Na)Al_{1-2}Si_{2-3}O_8$			×
کائولن	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$		×	
هورنبلند	$(Ca,Na)_2-3(Mg,Fe,Al)_5Si_6(Si,Al)O_{22}(OH)_2$			×
فایالیت	Fe_2SiO_4			×

ادامه جدول ۱-۵- تقسیم بندی کانی های باطله (waste) بر اساس تولید یا خنثی کنندگی اسید در معادن تیپیک مس Elizabeth و Ely واقع در انگلستان [۱۱،۱۲]

کانیهای سولفات و سولفوسالتها	فرمول شیمیایی	تولید کننده اسید	بی اثر	خنثی کننده اسید
ملانتریت	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	×		
روزنیت	$\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	×		
کوپاپیت	$\text{Fe}^{+2}\text{Fe}^{+3}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	×		
آلونژن	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17 \text{H}_2\text{O}$		×	
جاروسیت	$\text{K}_2\text{Fe}_6^{+3}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$	×		
ژپس	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$		×	

ادامه جدول ۱-۵- تقسیم بندی کانی های باطله (waste) بر اساس تولید یا خنثی کنندگی اسید در معادن تیپیک مس

Elizabeth و Ely واقع در انگلستان [۱۱،۱۲]

کانیهای سولفیدی	فرمول شیمیایی	تولید کننده اسید	بی اثر	خنثی کننده اسید
پیریت	FeS ₂	×		
کالکوپیریت	CuFeS ₂	×	×	
اسفالریت	ZnS		×	
پیروتیت	Fe _{1-x} S	×		

ادامه جدول ۱-۵- تقسیم بندی کانی های باطله (waste) بر اساس تولید یا خنثی کنندگی اسید در معادن تیپیک مس

Elizabeth و Ely واقع در انگلستان [۱۱،۱۲]

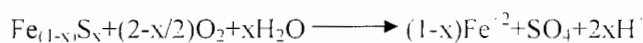
کانیهای دیگر	فرمول شیمیایی	تولید کننده اسید	بی اثر	خنثی کننده اسید
کلسیت	CaCO ₃			×
هماتیت	Fe ₂ O ₃			×
گوتیت	FeO(OH)			×
منیتیت	Fe ⁻² Fe ₂ ⁺³ O ₄			×

اکسید می گردد، در حالی که پیریت کریستالی به آرامی اکسید می شود. در جدول زیر لیستی از کانیهای سولفیدی فلزی ارائه شده است [۶].

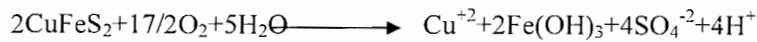
جدول ۱-۶- بعضی کانی های سولفیدی فلزی و فرمول شیمیایی آنها [۶]

ترکیب	کانی
FeS ₂	پیریت
FeS ₂	مارکازیت
CuFeS ₂	کالکوپیریت
Cu ₂ S	کالکوسیت
ZnS	اسفالریت
PbS	گالن
NiS	میلریت
Fe _{1-x} S	پیروتیت
FeAsS	آرسنوپیریت
HgS	سینابر

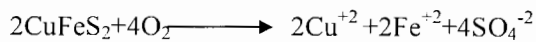
کانی های سولفیدی مهم در امر تولید پساب اسیدی، پیریت (FeS₂) ، مارکازیت (FeS₂) و پیروتیت (FeS_{1-x}) می باشند. مارکازیت شکل اورتورومبیک پیریت می باشد که فرمولی مشابه با پیریت دارد ولی نرخ تولید اسید و اکسیداسیون آن نسبت به پیریت سریع تر است که این امر مربوط به مورفولوژی گرد شده این کانی و اندازه ابعادی کوچک آن می باشد، نرخ اکسیداسیون اولیه پیروتیت ۲۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر از پیریت است و استوکیومتری پیروتیت تاثیر نسبی بر تولید اسید دارد. در فرمول پیروتیت مقدار x بین صفر تا ۰/۲۵ می باشد، زمانی که مقدار x، صفر است یعنی فرمول پیروتیت، FeS می باشد، اسید تولید نمی شود [۲۵].



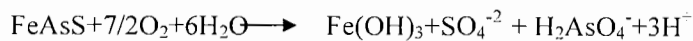
کانی های کالکوپیریت و مولیبدنیت، مقاوم ترین کانیهای سولفیدی در مقابل اکسیداسیون می باشند. البته اکسیداسیون کالکوپیریت، اسیدتولید نمی کند و اکسیداسیون آهن دو ظرفیتی و هیدرولیز هیدراتهای آهن سه ظرفیتی در ادامه منجر به تولید اسید خواهد شد.



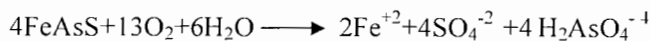
اکسیداسیون کالکوپیریت



در فرآیند اکسیداسیون آرسنوپیریت اگر آهن سه ظرفیتی اکسید کننده باشد، نرخ اکسیداسیون مانند نرخ اکسیداسیون پیریت می شود و اگر اکسیژن اکسید کننده باشد، نرخ اکسیداسیون آرسنوپیریت تا اندازه ای کمتر از پیریت است [۲۶].



اکسیداسیون آرسنوپیریت



جدول ۱-۷- لیست کانی های سولفیدی و تعداد مولهای H^+ حاصل از اکسیداسیون آنها [۲۴]

تعداد مولهای H^+ بر مول کانی	ترکیب	کانی
۴	FeS_2	پیریت
۴	FeS_2	مارکازیت
۲	$CuFeS_2$	کالکوپیریت
-	ZnS	اسفالریت
-	PbS	گالن
-	NiS	میلریت
۲ تا ۰	$Fe_{1-x}S$	پیروتیت
۲	$FeAsS$	آرسنوپیریت

اکسیداسیون پیریت و مارکاسیت شامل واکنش‌ها و فرآیندهایی می‌باشند که در ذیل مورد

بررسی قرار می‌گیرند.



در واکنش بالا که اکسیداسیون پیریت می‌باشد، به ازاء هر مول پیریت، دو مول اسید تولید

می‌شود. یون S_2^{2-} به یونهای هیدروژن و سولفات اکسید می‌شود. برای ادامه واکنش اکسیژن مصرف

شده باید جایگزین شود که گاهی این اکسیژن از آبهای سطحی یا زیرزمینی تامین می‌شود. البته

گاهی یون فریک Fe^{3+} نقش اکسید کننده را بازی می‌کند و کانی پیریت را طبق واکنش زیر اکسید

می‌کند:



این واکنش نسبت به واکنش اکسید شدن پیریت توسط اکسیژن، اسید بیشتری تولید

می‌کند.

یون فریک Fe^{3+} از واکنش زیر حاصل شده است:



در اینجا یون فرو Fe^{2+} حاصل از اکسیداسیون پیریت توسط اکسیژن، بوسیله اکسیداسیون

مجدد به Fe^{3+} تبدیل می شود. این واکنش بوسیله باکتری تسریع می شود [۷].

اکسیداسیون پیریت توسط یون Fe^{3+} در شرایط عادی به آرامی انجام می گیرد، اما در حضور

باکتریهای اکسید کننده یون Fe^{2+} ، بویژه باکتری تیوباسیلیوس فرواکسیدان^۱ (T.F) (که یون Fe^{2+} را

به Fe^{3+} اکسید می کند)، نرخ واکنش اکسیداسیون ۵ تا ۲۰ برابر افزایش می یابد. بهترین دما و pH

برای فعالیت باکتری T.F، دمای حدود ۳۰ درجه سانتیگراد و pH حدود ۳/۲ می باشد. مشخصات

باکتری T.F به قرار زیر است :

۱- هوازی است .

۲- لیتوتروپیک است (یعنی انرژی مورد نیاز خود را با اکسیداسیون یک ماده غیر ارگانیکی که در این

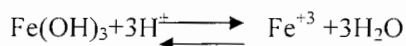
حالت Fe^{2+} می باشد، به دست می آورد) .

۳- اتوتروپیک است (یعنی CO_2 را به عنوان منبع کربن استفاده میکند) .

۴- در pH کمتر از ۳/۵ رشد می نماید .

فرآیند شیمیایی بعدی رسوب گذاری هیدروکسید فریک $Fe(OH)_3(s)$ موسوم به پسر زرد^۲ طبق

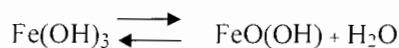
واکنش زیر میباشد:



در اینجا به ازاء رسوب یک مول هیدروکسید، سه مول اسید تولید می شود. $Fe(OH)_3$ آمورفی شکل

و به رنگ زرد، نارنجی و قرمز می باشد.

آخرین فرآیند، بی آب شدن هیدروکسید فریک می باشد .



1 Thiobacillus Ferrooxidans

2 Yellow boy

مشخصات انجام این واکنش ایجاد شدن پوشش اکسید آهن نارنجی رنگ یا لجن نارنجی رنگ می باشد [۱۳].

نرخ انجام واکنش اکسیداسیون پیریت توسط اکسیژن به صورت زیر می باشد :

$$\text{Rate} \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right) = \frac{K(T)m [O_2(aq)]^{0.5} [H^+]^{0.11}}{A_{s,pyr}}$$

m: جرم سنگ باطله یا ماده مورد نظر به گرم

K(T): ثابت نرخ واکنش

T: دما

$A_{s,pyr}$: ناحیه سطحی پیریت (m^2/g^2)

همانطوریکه این رابطه نشان می دهد. نرخ واکنش با غلظت اکسیژن رابطه مستقیم و با سطح مواد رابطه عکس دارد.

O_2 و Fe^{3+} در اکسیداسیون پیریت نقش واسطه را دارند. واکنشهای انجام شده در سطح پیریت، با توجه به سطح ذرات کنترل می شوند. طبق قانون Herin، رابطه بین نرخ اکسیداسیون پیریت و غلظت اکسیژن بصورت زیر می باشد :

$$\text{Rate} = 10^{-6.77} [O_2]^{0.5}$$

نرخ اکسیداسیون پیریت در غیاب اکسیژن و توسط یون فریک بصورت زیر می باشد :

$$\text{Rate} = 10^{-9.74} \frac{[Fe^{3+}]^{0.5}}{[H^+]^{0.5}}$$

که $[Fe^{3+}]$ و $[H^+]$ بصورت غلظت مولی می باشند. نرخ اکسیداسیون بسیار زیاد به غلظت $[Fe^{3+}]$ بستگی دارد. Fe^{3+} نسبت به O_2 ، پیریت را سریعتر اکسید می کند، زیرا بطور شیمیایی به سطح پیریت می پیوندد. در غیاب باکتری نرخ اکسیداسیون پیریت با افزایش غلظت CO_3^{2-} ، افزایش می یابد.

مساله مهم در مدیریت باطله جلوگیری از انجام واکنشهای اکسیداسیون مجدد می باشد. واکنش مجدد پیریت به کانی شناسی کانسنگ وابسته می باشد که آنهم به اثرات ناشی از وجود ناخالصیهای سولفیدی همراه پیریت، برمی گردد. وجود سولفیدهای دیگر در تماس با پیریت، در شروع فرآیند هوازدگی، مهمترین پارامتری است که بر فعالیت مجدد پیریت اثر می گذارد. ناخالصی های همراه با پیریت معمولاً شامل اسفالریت (ZnS)، گالن (PbS)، کالکوپیریت (CuFeS_2) و آرسنوپیریت (FeAsS) می باشند. آزمایشهای الکترو شیمیایی نشان می دهد که کم بودن ناخالصیها، باعث افزایش فعالیت مجدد پیریت می شود. پیریت به این علت که بیشترین میزان ناخالصی را دارد، کمترین فعالیت مجدد را دارا می باشد [۱۴].

فصل دوم

استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سینتیکی
در پیش‌بینی پتانسیل پساب‌های اسیدی

۲-۱- پیش بینی امکان تولید پساب اسیدی در معدن

موضوعات مورد بررسی در آزمایشهای پیشگو شامل دو مورد است :

۱- تعیین حجم مشخص از مواد معدن کاری شده که اسید تولید خواهد کرد .

۲- پیش بینی کیفیت پساب بر پایه نرخ تشکیل اسید

در ارزیابی و محاسبه قابلیت و پتانسیل تولید اسید در سنگ ، دو مطلب مد نظر قرار

می گیرد :

۱- چگونگی جمع آوری نمونه ها از زون های زمین شناسی جهت انجام آزمایشات.

۲- انتخاب نوع آزمایش و روش انجام آزمایش جهت پیش بینی امکان تولید اسید .

بمحض اینکه یک استراتژی و روش نمونه برداری انتخاب گردید و نمونه ها برداشته شدند، آنگاه

روش انجام و نوع آزمایشات انتخاب می شود. عواملی که بر روش انجام آزمایشات و نحوه

نمونه برداری اثر می گذارند عبارتند از:

۱- زمین شناسی معدن.

۲- هزینه ها.

۳- طول مدت زمان مورد نیاز برای آزمایشات .

۴- امکانات معدن.

فصل دوم استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

آزمایشات پیشگو از دو جنبه سنگ را مورد بررسی قرار می دهند، یکی ظرفیت و قابلیت

تولید اسید در سنگ و دیگری ظرفیت و پتانسیل خنثی سازی اسید توسط سنگ. موارد زیر بر

ظرفیت تولید اسید اثر می گذارند:

۱- میزان کانیهای تولید کننده اسید.

۲- میزان کانیهای خنثی کننده اسید.

۳- میزان و نوع پتانسیل آلوده کننده های فلزی موجود.

موارد زیر بر نرخ تولید اسید موثر هستند:

۱- نوع کانیهای سولفیدی موجود.

۲- نوع کانی کربناته موجود.

۳- سطح در دسترس کانی برای انجام واکنش (با توجه به اندازه قطعات).

۴- آب و اکسیژن در دسترس.

۵- باکتری.

آزمایشات استاتیکی هم میزان تولید اسید و هم میزان خنثی سازی اسید را در نمونه ها

محاسبه می کنند و ظرفیت تولیدخالص اسید در نمونه با کم کردن این دو مقدار از هم حاصل

می شود. این آزمایشات نرخ تولید اسید را نمی دهند و فقط در مورد تولید آن نظر می دهند.

در جدول زیر منابع اطلاعاتی در مورد تولید پساب اسیدی در مورد معادن در حال کار و جدید با هم

مقایسه شده است [۶]

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

جدول ۱-۲- منابع جمع آوری اطلاعات در مورد پتانسیل تولید اسید برای معادن جدید و در حال کار [۶]

نوع اطلاعات	معادن جدید	معادن در حال کار
تقسیم بندی سنگهای معدن	۵- بررسی رخنمون ها ۶- لاگ ها و نمونه های کر های اکتشافی ۷- مقاطع زمین شناسی ۸- عیارسنجی کر	۱- رخنمون ها و محل های استخراج شده ۲- کرهای حفاری ۳- عیارسنجی کر ۴- نمونه برداری از کپه ها و نواحی در حال کار
توزیع سنگ معدن	طراحی معدن	۱- طراحی معدن ۲- ثبت جابجایی سنگها در معدن ۳- پلان های زیرزمینی و پیت ۴- نمونه برداری و حفاری کپه ها ۵- طراحی کپه ها ۶- پرسنل سایت
تولید اسید و لیچینگ	۴- آزمایشهای استاتیکی ۵- کانی شناسی ۶- مقلیسات زمین شناس در سایت معدن ۷- بررسی لیچینگ در سایت	۱- بررسی کرهای قدیمی ۲- نمونه برداری از محل ۳- انجام آزمایشات استاتیکی
کیفیت پساب	۴- آزمایشات سینتیکی ۵- بررسی کیفی آب در محل معدن	۱- آزمایشات سینتیکی ۲- بررسی لیچینگ ۳- بررسی کیفی آب در محل معدن

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

مراحل تیپیک در پیش بینی تولید اسید به قرار زیر است :

- ۱- توصیف کانی شناسی و زمین شناسی محل مورد نظر.
- ۲- نمونه برداری، جمع آوری نمونه ها و با توجه به شرایط زمین شناسی محل، امکانات معدن و هزینه ها.
- ۳- انتخاب روش استاتیکی و یا سینتیکی برای ارزیابی پتانسیل تولید اسید.
- ۴- انجام آزمایشات سینتیکی در صورت نیاز.
- ۵- ارائه یک مدل جهت پیش بینی پساب.
- ۶- تقسیم بندی و دسته بندی زمین شناسی به قسمتهای تولید کننده اسید، نامعین و خنثی کننده اسید. [۶]

پیش بینی تولید اسید فوایدی دارد که اگر آزمایشات پیشگو به درستی انجام شود، این مزایا حاصل می گردد. این مزیت ها عبارتند از :

- ۱- دادن راهکارهای مناسب برای طراحی درست جهت خروج اسید تولید شده در باطله.
- ۲- هزینه های اقتصادی مربوط به جلوگیری از تولید اسید و خنثی سازی پساب اسیدی بطور کامل بررسی می شود.
- ۳- حجمی از سنگها را که پتانسیل تولید اسید را دارند تخمین زده می شود [۷].

انتخاب نمونه ها و انجام عملیات نمونه برداری نقش مهمی در آزمایشهای پیشگو و تفسیر این آزمایشات بازی می کند. نمونه ها براساس حجم سنگها و مشخصات آنها و با توجه به قسمتهای قابل معدنکاری و زمین شناسی محل معدن، انتخاب می گردد. در انتخاب نمونه چه در معادن جدید و چه در معادن در حال کار، عوامل زمین شناسی و زیست محیطی با هم در نظر گرفته می شوند. اولین عوامل زمین شناسی برای انتخاب نمونه، در ابتدا درک خوب از زمین شناسی محل می باشد، که شامل اطلاعات معدن لاگهای حفاری و دیگر منابع است. زمین شناس اکتشافی یا زمین شناس معدن، یک منبع نسبتاً خوب برای درک درست و دقیق از زمین شناسی معدن می باشد. این اطلاعات هم در برنامه نمونه برداری و هم در نتایج آزمایشات مهم هستند. عوامل زیست محیطی شامل ملاحظات زیست محیطی آلوده کنندهها و تغییرات آب و هوا می باشد. نظرات متعددی در مورد تعداد نمونه های انتخاب شده وجود دارد. یکی از این نظریات، انتخاب یک نمونه به ازاء یک میلیون تن و یا هشت تا دوازده نمونه به ازاء هر زون زمین شناسی (Schafer 1993)، یک نمونه ۱۵۰۰ گرمی به ازاء ۲۰ هزار تن سنگ باطله و یا حدود ۵۰ نمونه برای یک میلیون تن سنگ (USDA Forest Service) می باشد. طبق نظر British Columbia، تعداد ۲۵ نمونه برای یک میلیون تن واحد زمین شناسی، یا یک نمونه برای ۴۰ هزار تن سنگ، البته در مورد مواد باطله (Waste) طبق نظر British Columbia تعداد نمونه ها افزایش پیدا می کند و به ازاء ده میلیون تن سنگ، هشتاد نمونه و یا یک نمونه به ازاء هر ۱۲۵ هزار تن (B.C. پساب 1989 Task Force) می باشد. تعیین تعداد نمونه ها به تغییرات زمین شناسی معدن و توسعه آتی آن بستگی دارد. عواملی که در برنامه نمونه برداری باید مورد توجه قرار بگیرند عبارتند از:

۱- روش جمع آوری نمونه ها .

۲- مدت زمان انبار شدن نمونه ها .

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

۳- مسائل زیست محیطی انبار کردن نمونه ها .

هر کدام از اینها می تواند بر مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه اثر بگذارد. در مورد باطله های فرآوری، نمونه باید از عمق های مختلف گرفته شود تا مشخص گردد آیا اکسیداسیون کانیهای سولفیدی رخ داده است یا نه؟ بهترین روش جمع آوری نمونه ها از باطله (Waste) حفاری از نقاط مختلف کپه های باطله می باشد. در نمونه برداری باید به مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه ها از جهت آلتزه شدن و اکسید شدن و هوازدگی هم دقت نمود. روش نمونه برداری ترکیبی^۱، در مورد مواد با حجم زیادمانند زون های زمین شناسی، معمول می باشد. بطور تیپیک، نمونه های ترکیبی از کرهای حفاری جمع می شوند و با توجه به زمین شناسی محل و لایه بندی و آلتراسیون های منطقه انتخاب گردند [۶].

Composite Sampling^۱

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

۲-۳- انجام آزمایشات پیش بینی کننده امکان تولید پساب اسیدی

مواد محتوی کانیهای سولفیدی و حتی بعضی کانیهای سولفاتمانند جاروسیت، اگر در معرض رطوبت و یک اکسید کننده قرار بگیرند، می توانند که محلول اسیدی ایجاد کنند. نرخ تولید اسید به ترکیب کانی سولفیدی بستگی دارد. البته نوع و شکل کریستال کانی، وجود پوششها که سطح کانی سولفیدی را می پوشانند و شرایط زیست محیطی (برای مثال pH، رطوبت، فوگاسیته اکسیژن و دما) محل اکسیداسیون، هم در نرخ تولید اسید موثر است. در کل تولید اسید شامل یکسری واکنشهای شیمیایی نسبتاً پیچیده است که در طول زمان تغییر می کند. پتانسیل تولید اسید، توسط مواد خنثی کننده از بین می رود. این مواد شامل کربناتهای منیزیم یا کلسیم، اکسیدها و هیدروکسیدهای کلسیم، منیزیم، آلومینیوم، بعضی کانیهای سیلیکاته و بعضی کانیهای فسفات می باشد. نرخ انحلال و در نتیجه خنثی سازی کانیهای کربناته از دیگر مواد خنثی ساز بیشتر است. عواملی که در نرخ انحلال کانیها اثر می گذارند عبارتند از :

۱- pH.

۲- دی اکسید کربن حل شده.

۳- دما.

۴- ترکیب کانیها.

۵- نوع و اندازه کریستال.

۶- شرایط اکسیداسیون و احیاء.

۷- غلظت یونهای خارجی (برای مثال فلزات ردیاب).

برای محاسبه پتانسیل تولید اسید و یا قابلیت خنثی سازی اسید در نونه مورد نظر و سپس بررسی نرخ تولید اسید، آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی انجام می شود.

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

آزمایشهای استاتیکی تعادل را بین کانیهای خنثی ساز اسید و کانیهای تولید کننده اسید موجود در نمونه مورد بررسی قرار می دهد. این آزمایشات سریع و ارزان قیمت هستند و برای تعیین پتانسیل و قابلیت تولید اسید در واحدها یا زونهای زمین شناسی بکار می روند ولی برای پیش بینی کیفیت پساب و نرخ تولید اسید با استفاده نمی شوند. در کنار اطلاعات کانی شناسی و سنگ شناسی، این آزمایشها در مورد نرخ خنثی سازی هم نظر می دهند. آزمایشهای سینتیکی برای تعیین نرخ تولید اسید بکار میروند ولی گران قیمت هستند و گاهی ماهها و یا سالها طول می کشد تا آزمایش کامل شود. در کل آزمایش های پیش گویی پساب اسیدی در دو مرحله مورد استفاده قرار می گیرند:

- ۱- آزمایش های استاتیکی برای تعیین پتانسیل اسید در زون های زمین شناسی و تعیین تغییراتی که در پتانسیل تولید اسید آن زون ها رخ می دهد.
- ۲- آزمایش های سینتیکی برای تعیین نرخ تولید اسید و بررسی کیفیت پساب [۱۰].

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

۲-۴-آزمایشات استاتیکی^۱

آزمایشهای استاتیکی در ابتدا برای تعیین پتانسیل تولید اسید در معادن ذغال بکار می رفت و سپس در معادن فلزی هم مورد استفاده قرار گرفت. روشهای مختلف آزمایشهای استاتیکی توسط Skousen (۱۹۹۶), Mills (۱۹۹۸), Lawrence and wany (۱۹۹۶), Lapakko (۱۹۹۱, ۱۹۹۲) مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایشات مجموعاً به دو نوع تقسیم می شوند. آنهایی که پتانسیل تولید اسید^۲ (APP یا AP) را تخمین می زنند و آنهایی که پتانسیل خنثی سازی اسید^۳ (NP یا NNPI) را بیان می کنند نتایج را به صورت تن کربنات (CaCO₃) بر ۱۰۰۰ تن سنگ بیان می شود و اغلب به صورت^۴ NNPI=NP-AP و یا $NPR = \frac{NP}{AP}$ بیان می شوند که NNP پتانسیل خالص خنثی سازی اسید می باشد [۱۵].

جدول ۲-۲- خلاصه ای از روشهای آزمایش استاتیکی که هزینه ها، مزایا و معایب [۶]

نوع آزمایش	تعیین پتانسیل تولید اسید (AP)	اندازه قطعات	تعیین پتانسیل خنثی سازی	هزینه (دلار آمریکا ۱۹۹۴)
ABA ^۵ استاندارد (سابک و همکاران ۱۹۷۸)	۳۱٫۲۵ درصد سولفور کل	زیر ۶۰ مش	اضافه کردن اسید هیدروکلریک طبق جدول فیز به نمونه آماده سازی شده و جوشاندن به مدت یک دقیقه، پس از	۳۴ تا ۱۱۰

^۱ Static Tests

^۲ Acid Product Potential

^۳ Acid Neutral Potential

^۴ Net Neutral Potential

^۵ Acid Base Accounting

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

			خنک شدن تا دمای اطاق تا نقطه انتهایی ۷ تیترا می شود.	
--	--	--	------------------------------------------------------------	--

ادامه جدول ۲-۲ خلاصه ای از روشهای آزمایش استاتیکی که هزینه ها، مزایا و معایب [۶]

اضافه کردن اسید هیدروکلریک طبق جدول فیز به نمونه آماده سازی شده و هم زدن برای ۲۴ ساعت در دمای اطاق pH نهایی محلول بین ۱,۵ تا ۲ باشد. تیتراسیون تا نقطه پایانی ۸,۳ انجام می گیرد.	زیر ۶۰ مش	۳۱,۲۵ درصد سولفور سولفیدی	ABA تصحیح شده (کاستیج، ۱۹۸۹)	۳۴ تا ۱۱۰
نمونه تا نقطه ۳,۴ توسط اسید سولفوریک ۱ نرمال تیترا می شود.	زیر ۳۰ مش	۳۱,۲۵ درصد سولفور کل	تحقیقات ابتدایی بریتیش کلمبیا (دانکن و برانستن، ۱۹۷۹)	۶۵ تا ۱۷۰
۲۰ میلی لیتر اسید هیدروکلریک ۰,۱ نرمال در دمای اطاق به ۰,۴ گرم نمونه اضافه شده و تا نقطه انتهایی ۴ تیترا می شود.	زیر ۰,۰۲۳ میلیمتر	سولفور کل	نسبت پتانسیل تولید قلیائیت به سولفور (کاروچیو و همکاران، ۱۹۸۱)	۳۴ تا ۱۱۰
اسید ناشی از سولفید آهن اکسید شده، کانی های	اندازه قطعات ارائه نشده	برای اینکه سولفید ها مستقیماً "اکسید شود به ۵ گرم	پتانسیل خالص تولید اسید (کاستیج،	۲۵ تا ۶۸

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

۱۹۸۹)	سنگ، ۳۰۰ میلی لیتر آب اکسیژنه اضافه می شود	است	خنثی کننده را حل می کند و تیتراسیون تا نقطه پایانی ۷ انجام می شود.
-------	--------------------------------------------------	-----	-----------------------------------------------------------------------------

ادامه جدول ۲-۲-خلاصه ای از روشهای آزمایش استاتیکی که هزینه ها، مزایا و معایب [۶]

معایب	مزایا	نوع آزمایش
اگر مقادیر NP و AP به هم نزدیک باشد تفسیر مشکل می شود.	آسان، سریع، بدون احتیاج به تجهیزات ویژه، آسان برای تفسیر، تعداد زیادی نمونه را میتوان آزمایش کرد	ABA استاندارد (سابق و همکاران، ۱۹۷۸)
اگر مقادیر NP و AP به هم نزدیک باشد تفسیر مشکل می شود	آسان، سریع، بدون احتیاج به تجهیزات ویژه، آسان برای تفسیر	ABA تصحیح شده (کاستیج، ۱۹۸۹)
اگر مقادیر NP و AP به هم نزدیک باشد تفسیر مشکل می شود	آسان، سریع، بدون احتیاج به تجهیزات ویژه، آسان برای تفسیر، تعداد زیادی نمونه را میتوان آزمایش کرد و کوتاه مدت است	تحقیقات مقدماتی بریتیش کلمبیا (دانکن و برانستن، ۱۹۷۹)
تفسیر آن تقریبی می باشد	آسان، سریع، بدون احتیاج به تجهیزات ویژه	نسبت پتانسیل تولید قلیائیت به سولفور (کاروچیو و همکاران، ۱۹۸۱)
امکان تولید مجدد اسید محدود است. اگر برای شبیه سازی فیلد بکار رود قابل اتکا نمی باشد.	آسان، سریع، بدون احتیاج به تجهیزات ویژه، آسان برای تفسیر	پتانسیل خالص تولید اسید (کاستیج، ۱۹۸۹)

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

جدول ۳-۳- ارزیابی آزمایشهای متنوع استاتیکی [۱۶]

هزینه آزمایش برای یک نمونه (دلار)	مقایسه نتایج آزمایش با مشاهدات میدانی	نحوه تفسیر آزمایش	تجهیزات ویژه مورد نیاز	مدت زمان انجام آزمایش	آسان بودن آزمایش	آزمایش استاتیکی
۷۵-۲۰۰	دو خطای ملاحظه کارانه ^۱ در ارزیابی باطله فرآوری	آسان	نمی خواهد	دو روز	بله	روش مقدماتی بریتیش کلمبیا
۵۰-۱۳۰	سه خطای ملاحظه کارانه در ارزیابی باطله فرآوری	آسان	نمی خواهد	چهار ساعت	بله	ABA استاندار د
۵۰-۱۳۰	یک اشتباه در ارزیابی باطله فرآوری و یک خطای غیر ملاحظه کارانه در ارزیابی باطله معدنکاری	آسان	نمی خواهد	یک روز	بله	ABA تصحیح شده
۴۰-۸۰	یک خطای ملاحظه کارانه در ارزیابی باطله فرآوری	آسان	نمی خواهد	چهار ساعت	بله	تولید خالص اسید

^۱ conservative

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

آزمایش پراکسید هیدروژن ن	بله	چهار ساعت	نمی خواهد	متوسط	مقایسه انجام نمی شود	۸۰-۱۲۰
-----------------------------------	-----	-----------	-----------	-------	-------------------------	--------

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

در مورد جدول ۲-۳ موارد زیر را در نظر میگیریم:

۱- آزمایشها توسط یک تکنسین ماهر وزیده انجام می شود.

۲- آزمایشها در یک آزمایشگاه مجهز شیمی برای آزمایشات محیط زیستی، انجام می گیرد.

۳- هزینه های موجود در جدول، به آزمایشگاه مورد استفاده و تعداد و هزینه های عیار یابی سولفور بستگی دارد. هزینه های این جدول مربوط به مارس ۱۹۸۹ می باشد.

۴- خطای ملاحظه کارانه، یعنی آزمایش پتانسیل تولید اسید را پیش بینی میکند در حالیکه بصورت واقعی رخ نمی دهد.

۵- خطای غیر ملاحظه کارانه، یعنی آزمایش پتانسیل تولید اسید را پیش بینی نمی کند در صورتیکه باید تولید کننده اسید باشد [۱۶].

در آزمایشهای استاتیکی تعیین دو مورد بسیار مهم می باشد و جزء پایه های این روشها می باشد، که یکی تعیین APP یا پتانسیل تولید اسید و NP پتانسیل خنثی سازی، کانیهای موجود در نمونه می باشد. APP از روی میزان سولفور موجود در نمونه تعیین می گردد. میزان سولفور بصورت درصد وزنی جهت تعیین APP بکار می رود که در مورد آزمایش ABA تصحیح شده درصد سولفور - سولفیدی و در مورد آزمایش ABA، درصد سولفور کل مورد نظر می باشد.

میزان APP طبق رابطه زیر بدست می آید :

$$APP \left[\frac{Kg_{CaCO_3}}{tonne} \right] = \%S \times 31.25$$

که عدد ۳۱/۲۵ از رابطه استوکیومتری و واکنش اکسیداسیون پیریت و خنثی سازی اسید، طبق واکنش زیر بدست آمده است :



طبق این واکنش یک مول FeS_2 (۶۴ گرم سولفور) با دو مول $CaCO_3$ (۲۰۰ گرم کلسیت) خنثی

می شود که $\frac{200}{64} = 3.125$ و زمانی که برای تن کانسنگ در نظر گرفته می شود، فاکتور تبدیل به

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

عدد ۳۱/۲۵ مبدل می شود. در بدست آوردن عامل تبدیل فرض می شود که تمامی سولفور گزارش شده، به صورت پیریتی می باشد که پیریت بطور کامل به سولفات و هیدروکسید فریک، اکسید می شود و یونهای هیدروژن تولید شده در واکنش اکسیداسیون توسط کلسیت خنثی می شود. واحد APP کیلوگرم CaCO_3 در تن کانسنگ می باشد. میزان درصد سولفور محتوی نمونه توسط کوره لکو^۱ اندازه گیری می شود. میزان درصد سولفور بصورت سولفور - سولفات توسط روش شیمی تر (استخراج توسط HCl) اندازه گیری می شود و میزان درصد سولفور سولفیدی از کم کردن این دو مقدار از یکدیگر حاصل می شود .

برای تعیین میزان NP یا پتانسیل خنثی سازی با توجه به نوع واکنش، روند کار فرق می کند ولی روش مشترک در تمامی آزمایشات بدین صورت می باشد که مقداری اسید به نمونه اضافه کرده تا با کانیهای خنثی دهنده واکنش دهد. سپس توسط تیتراژ کردن محلول توسط بازی با نرمالیتته معین تا نقطه پایانی مشخص، میزان اسید خنثی شده توسط کانیهای موجود در نمونه محاسبه می شود که در نهایت میزان NP نمونه محاسبه می گردد. [۱۰]

جدول ۲-۴- کانی هایی که در آزمایشهای مختلف استاتیکی در اثر واکنش با اسید حل می شوند [۹]

آزمایش استاتیکی	کانی هائی که در این آزمایش حل می شوند
تحقیق مقدماتی بریتیش کلمبیا	کربناتهای کلسیم و منیزیوم، کلریت و لیمونیت
ABA استاندارد	کانی های کربناته، فلدسپار کلسیم، پیروکسن، آلپیت، اورتوکلاز، هورن بلند، بیوتیت، آمفیبول، سورو سیلیکاتها، فیلو سیلیکاتها، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، کوارتز
ABA تصحیح شده	کربناتهای کلسیم و منیزیوم، بیوتیت، کلریت، آمفیبول، الیون، فلدسپار کلسیم، سورو سیلیکاتها، فیلو سیلیکاتها، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، کوارتز

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

۲-۴-۱- آزمایش محاسبه اسید - باز (ABA)

این آزمایش معمول ترین آزمایش استاتیکی جهت محاسبه NP یا قابلیت خنثی سازی نمونه می باشد. در این آزمایش فرض شده است که به ازای هر مول سولفید، دو مول اسید تولید خواهد شد. در ابتدا بر طبق آزمایش فیز و جدول مربوطه به دو گرم از نمونه که تا زیر ۶۰ مش خردایش شده است، اسید هیدروکلریک با نرمالیتیه و حجم مشخص اضافه می شود و به آن گرما می دهیم تا به مرحله قبل از جوشیدن برسد و سپس به آن کمی آب اضافه می کنیم تا حجم آن در ارلن به ۲۵۰ میلی لیتر برسد. سپس به آن حرارت می دهیم تا بمدت یک دقیقه بجوشد و سپس به آرامی سرد می گردد. سپس محلول مورد نظر را بوسیله باز هیدروکسید سدیم با نرمالیتیه مشخص تا نقطه انتهایی pH=7 تیترو می کنیم و حجم باز را یادداشت می کنیم. NP طبق رابطه زیر بدست می آید:

$$NP = \frac{[N_{ACID} \cdot V_{ACID} - N_{base} \cdot V_{base}]}{W_{Sample}} \times 50$$

که N نرمالیتیه، V حجم بر حسب میلی لیتر، W وزن نمونه بر حسب گرم و واحد NP، کیلوگرم $CaCO_3$ بر تن کانسنگ می باشد.

برای اندازه گیری APP یا پتانسیل تولید اسید، درصد سولفور کل محتوی نمونه را که توسط کوره لکو، اندازه گیری شده است در فاکتور تبدیل ۳۱/۲۵ ضرب می کنیم. در این آزمایش فرض شده است که همه سولفورهای موجود در نمونه فعال است و در واکنش شرکت می کند:

$$APP = \%S \times 31.25$$

در نهایت میزان NNP یا پتانسیل خالص خنثی سازی نمونه از کم کردن این دو مقدار از هم حاصل

$$NNP = NP - APP \quad \text{می گردد} :$$

برخی از شرایطی که در انجام این آزمایش ممکن است سبب تخمین نادرست خنثی سازی شود عبارتند از:

فصل دوم استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

۱- استفاده از اسید قوی ممکن است سبب حل شدن کانی هایی شود که در محدوده pH های محیط طبیعی واکنش نمی دهند.

۲- جوشاندن نمونه همراه با اسید، ممکن است باعث واکنش دادن کربناتهای آهن و منگنز با اسید شود که در پتانسیل خنثی سازی در شرایط طبیعی موثر نیستند.

۳- با توجه به اینکه هیدروکسیدهای فلزی ممکن است در خلال تیتراسیون با هیدروکسید سدیم رسوب کنند این احتمال وجود دارد که NP کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شود. [۶،۱۷]

۲-۴-۲- آزمایش محاسبه اسید باز اصلاح شده (Modified ABA)^۱

روش انجام این واکنش مانند آزمایش قبل است با وجود چند تفاوت. اول اینکه نقطه انتهایی تیتراسیون بجای pH=7، pH=8.3 می باشد (زیرا pH=7 که در آزمایش ABA استاندارد بکار می رود نقطه بی ثباتی است) و بعد بجای حرارت دادن و جوشاندن محلول، پس از اضافه کردن اسید هیدروکلریک به دو گرم نمونه خرد شده (طبق جدول فیز) نمونه هم زده می شود و بعد از ۶ ساعت pH محلول چک می شود که اگر pH بالای دو بود به آن اسید اضافه می شود تا به زیر دو برسد. مقدار اسید اضافه شده با همان نرمالیتته قبل یادداشت می شود و بعد از اینکه نمونه بعد از ۲۴ ساعت هم زده شد، pH آن چک می شود. اگر در رنج ۲ تا ۲/۵ بود با هیدروکسید سدیم تیتراسیون می شود و اگر خارج از این رنج بود (اگر کمتر از ۲ بود یعنی اسید زیاد اضافه شده و اگر بیشتر از ۲/۵ بود به این معناست که اسید کم اضافه شده است)، آزمایش دوباره تکرار می شود زیرا در میزان و نرمالیتته اسید اضافه شده اشتباه رخ داده است. در این آزمایش در فرمول محاسبه S، APP، درصد سولفوری می باشد که بصورت سولفید می باشد. یعنی در این آزمایش فرض می شود، سولفاتها نقشی در تولید اسید ندارند و فقط سولفیدها باعث تولید اسید می شوند. [۶،۱۷]

^۱ Modified Acid Base Accounting

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

۲-۴-۳- آزمایش تحقیق مقدماتی بریتیش کلمبیا^۱

این آزمایش توسط Duncan و Braynesteyn در سال ۱۹۷۹ توسعه پیدا کرد. مشابه آزمایش ABA میزان APP نمونه براساس سولفور کل محاسبه می شود. میزان NP بوسیله مخلوط کردن ۱۰ گرم نمونه با ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر و تیتراسیون نمونه با اسید سولفوریک ده نرمال تا pH برابر ۳,۵ تعیین می شود و بعد از یک دوره چهار ساعته کمتر از ۰,۱ میلی لیتر اسید اضافه می گردد. باید توجه کرد که بعلت طولانی بودن زمان تیتراسیون نیاز به یک تیتراواتوماتیک می باشد. نمونه ها به اندازه زیر ۴۰۰ مش خردایش می شوند. با محاسبه نسبت و یا تفاوت این دو مقدار NP و APP در مورد پتانسیل تولید اسید اظهار نظر می شود. اگر نمونه قابلیت تولید اسید داشته باشد، آزمایش سینتیکی B.C.confrmtion انجام می شود. [۶،۱۸]

۲-۴-۴- آزمایش نسبت پتانسیل تولید قلیائیت به سولفور (APP : S)^۲

این آزمایش برای اندازه گیری پتانسیل تشکیل اسید در باطله های زغال سنگ توسط کاروچیو و همکاران در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. همانند آزمایش ABA ، آزمایش APP:S از سولفور کلی نمونه برای تعیین پتانسیل تولید اسید استفاده می شود. تغییراتی در اسامی اصطلاحات این آزمایش نسبت به آزمایشهای قبلی وجود دارد که در این بخش به آنها اشاره می گردد. پتانسیل مصرف اسید (NP در آزمایشهای قبل) ، پتانسیل تولید خاصیت قلیایی خوانده می شود. در این روش برای بدست آوردن مقدار پتانسیل تولید خاصیت قلیایی خوانده می شود. در این روش برای بدست آوردن مقدار پتانسیل تولید خاصیت قلیایی به ۵۰۰ میلی گرم نمونه که تا زیر ۲۳ میکرون خرد شده است، ۲۰ میلی لیتر اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال افزوده می شود و بعد از گذشت ۲ ساعت، نمونه و محلول تا pH برابر ۴ تیترا می شود و پتانسیل تولید قلیا بدست می آید.

^۱ British Columbia Reasearch Initial

^۲ Alkalin Production Potential

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل تولید قلیا با نتایج مقدار سولفور کلی بصورت نمودار رسم می شود. نمونه ها با نسبتهای APP:S گوناگون (مجزا و مختلف) برای آزمایش های سینتیکی انتخاب می شوند تا مشخص شود که آیا تولید کنند اسید هستند یا خیر. بدلیل اینکه این آزمایش مثل آزمایش ABA از سولفور کلی برای تعیین تولید استفاده می کند، ممکن است برای نمونه هایی که دارای کانیهای سولفاته باشند، پتانسیل تولید اسید را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند. [۶،۱۹]

۲-۴-۵- آزمایش تولید خالص اسید^۱

در این آزمایش از پراکسید هیدروژن برای تسریع اکسیداسیون سولفیدها به سولفات استفاده می شود. ۵ گرم از ماده مورد نظر بوسیله ۱۰۰ میلی لیتر پراکسید هیدروژن ۱۵ درصد اکسید می شود بدلیل اینکه کانیهای سولفیدی آهن اکسید می گردد واکنش باعث تولید اسید می شود که با کانیهای خنثی ساز موجود در نمونه واکنش می دهد. pH محلول تعیین می شود و سپس تا pH برابر هفت توسط NaOH با غلظت ۰,۱ یا ۰,۵ مولار تیترا می شود. این آزمایش فقط یک مقدار برای پتانسیل تولید خالص اسید یا پتانسیل خنثی سازی می دهد و NP و AP بصورت مجزا اندازه گیری نمی شود. اگر شدت اکسیداسیون بیشتر از محیط آزمایش باشد این امکان وجود دارد که تولید اسید کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شود و نمونه ای که تولید اسید می کند بصورت نادرست به عنوان غیر مولد اسید طبقه بندی شود. در این آزمایش برای آماده سازی نمونه ابتدا نمونه ها تا حدود ۴ میلی متر خرد شده و سپس تا زیر ۲۰۰ مش پودر می شوند.

$$NAP = 49 \times V \times \frac{M}{W}$$

(پتانسیل تولید اسید خالص)

واحد NAP، $\frac{Kg H_2SO_4}{t}$ می باشد.

V: حجم NaOH تیترا شده (ml)

W: وزن نمونه (gr)

Net Acid Production^۱

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

M: مولاریته NaOH (mol/lit). [۶،۲]

۲-۵- آزمایشهای سینتیکی^۱

آزمایشهای سینتیکی برای توسعه اطلاعات حاصل از آزمایشهای استاتیکی بکار می روند و سعی در شبیه سازی شرایط اکسیداسیون محیط طبیعی دارند. معمولاً برای تعیین وضعیت نمونه هائی که در آزمایشهای استاتیکی وضعیت نامشخص دارند از آزمایشهای سینتیکی استفاده می شود. آزمایشهای استاتیکی پتانسیل نهایی تولید اسید در یک سنگ را مورد بررسی قرار می دهند در حالیکه آزمایشهای سینتیکی امکان تحقق این پتانسیل را مطالعه می کنند. فرمت بیشتر آزمایشهای سینتیکی بدین صورت است که نرخ هوازگی و بویژه نرخ اکسیداسیون کانی های سولفیدی و بالاخص پیریت را تسریع می کنند که برای این کار سنگ خرد شده را در معرض جریانهای هوا با رطوبت بالا یا پایین قرار می دهند و در انتهای پرپود زمانی محصولات واکنش انحلال دور ریخته میشود و چرخه زمانی تکرار می گردد. البته اندازه ذرات و شکل محفظه انجام واکنش در آزمایشهای مختلف فرق می کند.

آزمایشهای سینتیکی، نرخهای نسبی واکنش های تولید اسید را بیان می کند و قادر نیستند که عددهای مطلق بدهند و در مقایسه با آزمایشهای استاتیکی حجم بیشتری از نمونه را بکار می برند و احتیاج به زمان بیشتری برای انجام آزمایش و کامل شدن فرآیند، دارند و گران قیمت می باشند. اگر آزمایشهای استاتیکی نتواند پتانسیل تولید اسید را پیش بینی کند و یا رفتار خنثی سازی اسید را در سنگ بررسی کند از این آزمایشها استفاده می گردد. [۱۵] این آزمایشات عوامل فیزیکی، شیمیائی، دینامیکی و سیستم های بیولوژیکی و فرآیندهای کنترل کننده پساب اسیدی را با یکدیگر ترکیب می کنند. برای بهتر کردن شبیه سازی سیستم های بیولوژیکی، شیمیائی و فیزیکی معمولاً آزمایشها، سرزمین انجام می شود. یک مزیت اصلی آزمایشهای سینتیکی برای پیش

¹ Kinetic Tests

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

بینی کیفیت پساب معدنی، اینست که این نوع آزمایشها یک خروجی پساب معدنی تولید می کنند که مثل پساب معدنی واقعی ناشی از عملیات معدنکاری می باشد. پارامترهای کیفی آب که بطور تپیک در ماده لیچ شده آزمایش می شود شامل pH، اسیدیته، قلیائیت، سولفاتها، آهن، منیزیم، آلومینیوم و TDS می باشد. گاهی برای بررسی نقش باکتری ها در اکسیداسیون سولفیدها و تولید اسید، نمونه های مورد بررسی در آزمایشهای سینتیکی بوسیله باکتری تلقیح می شوند. معمولاً در آزمایشهای سینتیکی شرایط خاصی در نظر گرفته می شود برای مثال اندازه ابعاد نمونه باید کوچکتر از یک محدوده ابعادی خاص باشد ولی در بیشتر این آزمایشات، این شرایط و مقادیر بصورت استاندارد در نیامده است و آزمایش سلول مرطوب تنها آزمایشی است که بصورت استاندارد در آمده است. اطلاعات و مشخصات نمونه مانند آنالیز سطح مخصوص، کانی شناسی و فلزات موجود در نمونه در تکمیل آزمایشها و تفسیر آنها بسیار موثر است. در میان آزمایشهای سینتیکی مختلف آزمایشی نیست که نسبت به بقیه ارجهیت داشته باشد ولی در حال حاضر سلول مرطوب در بین محققین عمومی تر می باشد و بیشتر بکار می رود.

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

جدول ۲-۵- خلاصه ای از روش انجام، هزینه ها، مزایا و معایب در آزمایشهای معمول سینتیکی [۶]

نوع آزمایش	روش انجام آزمایش	اندازه قطعات	هزینه (دلار آمریکا)
سلول مرطوب	۲۰۰ گرم نمونه بمدت سه روز در معرض هوای خشک و برای سه روز دیگر در معرض هوای مرطوب قرار گرفته و در روز هفتم با ۲۰۰ میلی لیتر آب لیچ می شود و برای ده هفته این کار ادامه می یابد.	زیر ۲,۳۸ میلیمتر	۴۲۵ تا ۸۵۰
استخراج سوکسله	آبی که از درون نمونه عبور داده می شود، تقطیر می گردد.	داده نشده است	۲۱۲ تا ۴۲۵
آزمایشهای ستونی	سلولهای محتوی نمونه توسط محلولها لیچ می شوند.	متفاوت می باشد	بستگی به مقیاس دارد
تایید تحقیقات مقدماتی بریتیش کلمبیا	۱۵ تا ۳۰ گرم نمونه به محلول فعال شده توسط باکتری در pH ۲,۲ تا ۲,۵ و در دمای ۳۵ یا ۷۰ درجه سانی گراد اضافه می شود. اگر pH نمونه افزایش پیدا کند، نمونه اسید تولید نمی کند و اگر pH نمونه کاهش یابد، به اندازه نصف جرم نمونه به محلول اضافه می شود.	زیر ۴۰۰ مش	۱۰ تا ۳۴۰
راکتور ناپیوسته	دوغاب نمونه - آب (۲۰۰ گرم نمونه و ۵۰۰ میلی لیتر آب) هم زده می شود.	زیر ۲۰۰ مش	۴۲۵ تا ۸۵۰
آزمایش در مقیاس واقعی (سرزمین)	کپه های ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ تن متریک بر روی آسترهای سیال ساخته شده و اطلاعات مربوط به کیفیت آب، جمع آوری می شود.	قطعات در مقیاس و اندازه سرزمین هستند	هزینه ساخت کپه ها زیاد است

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

ادامه جدول ۲-۵- خلاصه ای از روش انجام، هزینه ها، مزایا و معایب در آزمایشهای معمول سینتیکی [۶]

معایب	مزایا	نوع آزمایش
طولانی مدت است و نیاز به تجهیزات ویژه ای دارد. برای تعداد زیاد نمونه عملی نیست. برای تفسیر و گردآوری با اطلاعات زیادی مواجه می شویم. تعدیل کردن هزینه ها مشکل است. زمانی که اندازه ذرات متنوع می باشد، آزمایش محدودیت پیدا می کند.	AP و NP و شرایط خشک و مرطوب بودن محیط به خوبی مدل می شوند. نرخ اسیدی شدن نمونه با تقریب خوب اندازه گیری می شود.	سلول مرطوب
نیاز به تجهیزات ویژه ای دارد. هنوز در مراحل توسعه قرار دارد. تفسیر نتایج مشکل است.	آزمایش آسان انجام می شود و کوتاه مدت است. اثر متقابل تولید و خنثی شدن اسید بررسی می شود.	استخراج سوکسله
طولانی مدت است و برای تعداد زیاد نمونه تفسیر آن غیر عملی می باشد در کل تفسیر آن مشکل است. هزینه ها نسبتاً بالا است. برای تفسیر و گردآوری با اطلاعات زیادی مواجه می شویم.	AP و NP و شرایط خشک و مرطوب بودن محیط به خوبی مدل می شوند. انواع مختلف سنگ با اندازه های متنوع در ستون بررسی می شود.	آزمایشهای ستونی

فصل دوم استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

ادامه جدول ۲-۵- خلاصه ای از روش انجام، هزینه ها، مزایا و معایب در آزمایش‌های معمول سینتیکی [۶]

<p>تایید تحقیقات ابتدایی بریتیش کلمبیا</p>	<p>آسان و راحت برای اجرا و با هزینه کم. از لیچینگ میکروبی هم می توان استفاده کرد.</p>	<p>طولانی مدت است و نیاز به تجهیزات ویژه ای دارد، اگر تغییرات pH کم باشد، تفسیر آن مشکل میشود و زمان زیادی برای پایدار شدن pH نیاز است. باکتری ممکن است خود را با شرایط سازگار کند. تولید پساب اسیدی سنگ را نمی تواند شبیه سازی کند.</p>
<p>راکتور ناپیوسته</p>	<p>تعداد زیادی نمونه را بطور همزمان آزمایش می کند و تجهیزات ساده ای مورد استفاده قرار می گیرد. تاثیر همزمان چند ین کنترل کننده بر روی تولید اسید بررسی می گردد.</p>	<p>نمونه های بزرگ که آزمایش می شوند در نتایج ایجاد اشکال می کنند. طولانی مدت است. برای تفسیر و گردآوری با اطلاعات زیادی مواجه می شویم. تفسیر نتایج و تعدیل هزینه ها مشکل است. زمانی که اندازه ذرات متنوع می باشد، آزمایش محدودیت پیدا می کند.</p>
<p>آزمایش در مقیاس واقعی (سرزمین)</p>	<p>نمونه واقعی و در شرایط محیطی سرزمین، مورد آزمایش قرار می گیرند. فقط یک آزمایش را بطور مجزا بررسی می کند.</p>	<p>ساخت کپه ها، گران قیمت می باشد. و این آزمایش بسیار وقت گیر می باشد (حتی تا سالها). برای تفسیر و گردآوری با اطلاعات زیادی مواجه می شویم. برای تعداد زیاد نمونه عملی نیست. آزمایش طولانی مدت است.</p>

۲-۵-۱- آزمایش سلول مرطوب^۱

آزمایش سلول مرطوب در مقیاس پایه و جهت تعیین نرخ تولید اسید بکار می رود. این آزمایش در یک ظرف مخصوص که دارای دریچه های ورود و خروج هواست انجام می گیرد، محفظه آن شبیه یک ستون می باشد و نمونه بصورت خرد شده بکار می رود. در آزمایش سلول مرطوب که بوسیله سابک^۲ در سال ۱۹۷۸ ارائه شده است مقدار ۲۰۰ تا ۳۰۰ گرم نمونه با ابعاد کمتر از میلیمتر ۲،۳۸ (۸مش) در یک محفظه پلاستیکی ریخته شده و برای لیچینگ آماده می شود. مدت زمان انجام آزمایش ۱۰ هفته می باشد. دوره های انجام آزمایش هفت روزه است که در هر دوره در ابتدا سه روز هوای خشک و سپس برای سه روز هوای مرطوب از نمونه عبور داده می شود و در روز هفتم با مقدار مشخصی آب مقطر (برای مثال ۲۰۰ میلی لیتر) لیچ میشود. در خلال آزمایش ممکن است نمونه بوسیله باکتری تلقیح شود تا تاثیر باکتریها در اکسیداسیون سولفیدها بررسی شود. محلول بدست آمده از لیچینگ جهت تعیین pH ، Eh ، سولفات و فلزات حل شده، اسیدیت، قلیائیت ، هدایت مخصوص و TDS مورد آنالیز قرار می گیرد. تفسیر بعضی از آزمایشها مشکل بوده و بعضی هم در پیش بینی تولید اسید دچار مشکل می شوند. پیشنهاد شده است که زمان این آزمایشها طولانی تر شود، تا اینکه مطمئن شویم ظرفیت خنثی سازی تمام شده است. بررسی بار سولفات و فلزات حل شده جهت مطالعه واکنشهای اکسیداسیون و تحرک فلزات بسیار مهم می باشد. زمانی که این آزمایش یا دیگر آزمایشهای سینتیکی بکار می روند، در نظر گرفتن دو نکته بسیار با اهمیت است:

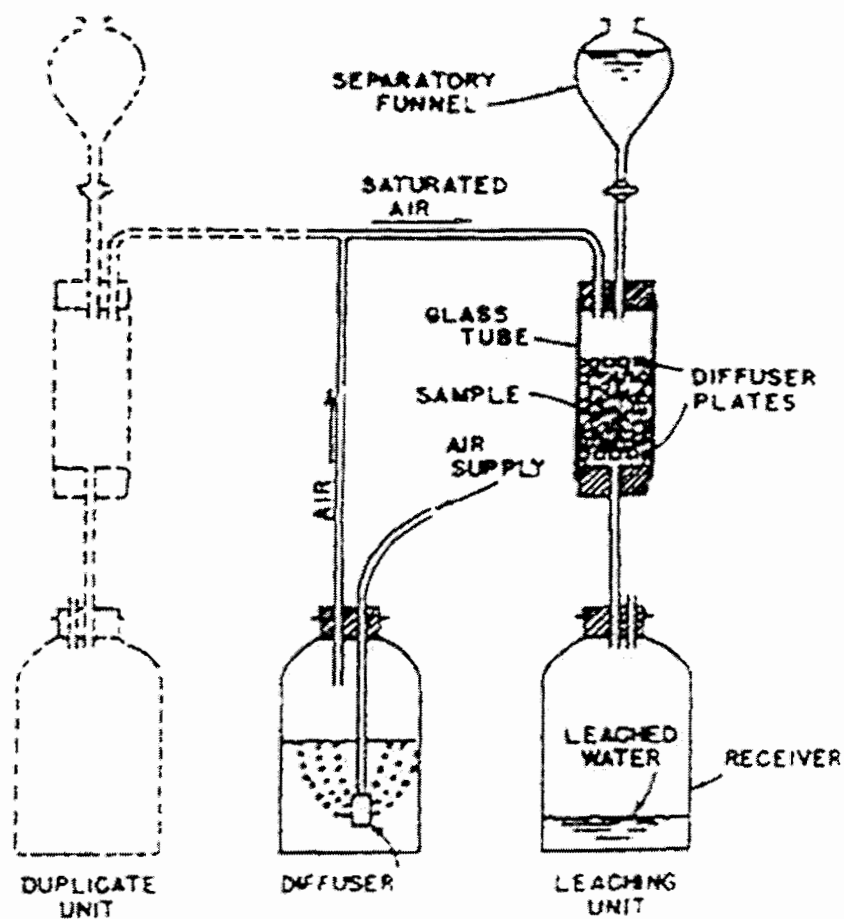
۱- اگر نمونه قبل از انجام آزمایش (در هنگام ذخیره سازی) تحت واکنشهای مربوط به هوازدگی قرار گرفته باشد، ممکن است میزان محصولات حاصل از اکسیداسیون در نمونه افزایش یافته و بیش از حد برآورد شود. بنابراین باید ابتدا نمونه با آب شسته شود تا اینکه مطمئن شویم محصولات اکسیداسیون تولید شده قبل از انجام آزمایش، از محیط عمل خارج شده است.

^۱ Humidity Cell

^۲ Sobek

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

۲- اگر دوره آزمایش به اندازه کافی طولانی نباشد، ممکن است سبب پیش بینی نادرست پتانسیل
تولید اسید شود. [۱۰،۱۹]



شکل ۲-۱- نمایی از وسیله مورد استفاده در آزمایش سلول مرطوب [۲۱]

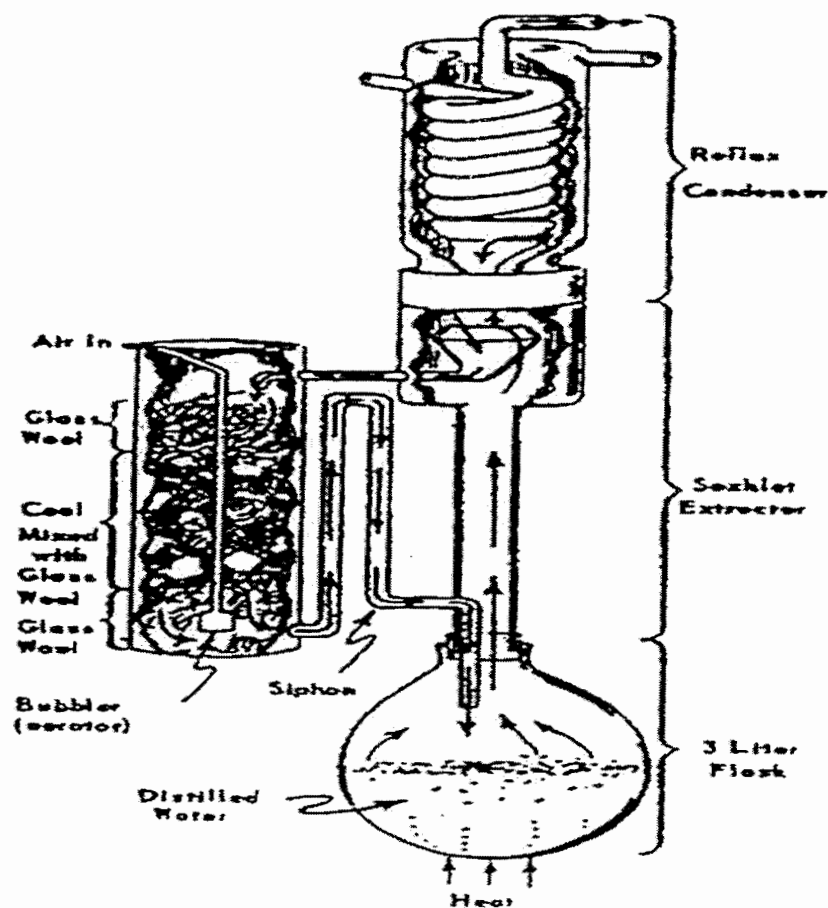
۲-۵-۲- آزمایش استخراج سوکسله^۱

در این آزمایش هوازدگی ژئوشیمیایی با گردش محلول از میان نمونه شبیه سازی می گردد. نمونه در یک لوله قرار گرفته و محلول از یک مخزن به گردش در می آید. برای انجام این آزمایش دو روش وجود دارد. یکی روش استاندارد است که توسط سینگلتون و لاکولیچ^۲ در سال ۱۹۷۸ ارائه شده است و دیگری روش اصلاح شده است که بوسیله سابک و همکاران در سال ۱۹۷۸ مطرح شده است. در حالت استاندارد، نمونه با استفاده از محلول اسید استیک یا آب مقطر که دمائی حدود ۷۰ درجه سانتی گراد دارد طی دوره ۶ هفته ای یا بیشتر لیچ می شود. در نوع اصلاح شده آزمایش فقط از آب مقطر با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد استفاده می شود. پس از لیچینگ، محلول حاصل شده برای بررسی پارامترهای کیفی آب آنالیز می شود. پارامترهایی که برای انجام آزمایش نیاز است خیلی بیشتر از سایر آزمایش‌های سینتیکی می باشد، ولی زمان انجام آزمایش کوتاهتر است و برای شبیه سازی روند هوازدگی در یک آزمایش با زمان نسبتاً کوتاه بکار می رود. از اشکالات این آزمایش، نیاز به وسایل مخصوص و پیچیده بودن ماهیت آن است. [۱۹]

^۱ Tests Soxhetele Extraction

^۲ Singleton and Lavkulich

فصل دوم استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

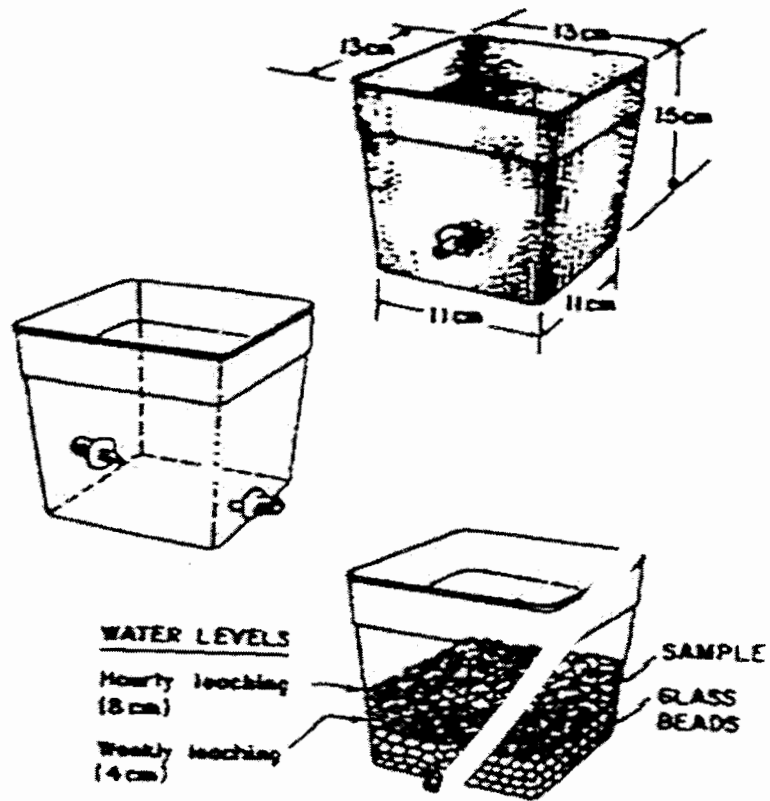


شکل ۲-۲- نمایی از وسیله مورد استفاده در آزمایش استخراج سوکسله [۲۱]

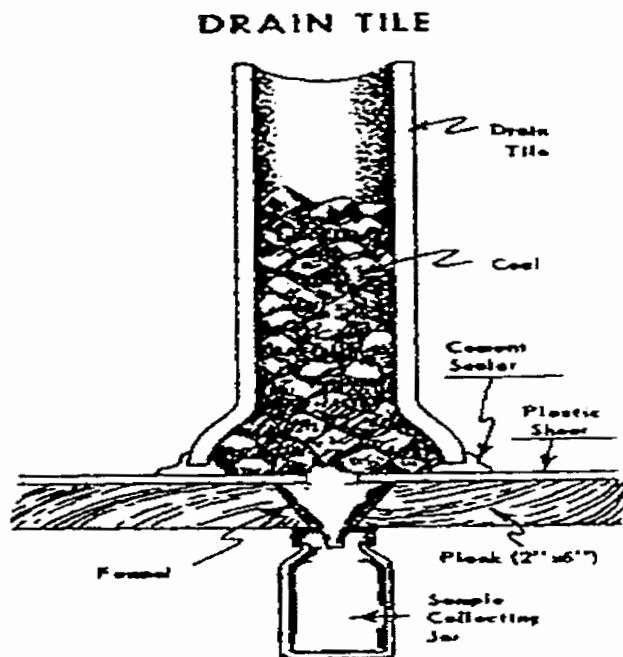
۲-۵-۳- آزمایشهای ستونی^۱

روشهای آزمایش ستونی دارای استاندارد مشخصی نیستند. در نتیجه این آزمایشها قابل تغییر بوده و به همین دلیل باعث بوجود آمدن ستونهای مختلف با طرحهای متفاوت، خصوصیات مختلف مواد آزمایش شده و نرخهای متنوع می باشد. آزمایشهای ستونی با انباشتن مواد مورد آزمایش در یک ستون یا وسیله مشابه انجام میشود و سپس دوره های زمانی مرطوب سازی و خشک کردن نمونه انجام می گیرد. هر یک از دوره ها ممکن است در یک دوره چند روزه تا یک هفته ای و بیشتر بطول انجامد. آب اضافه شده به ستون در زیر آن جمع آوری شده و برای تعیین نرخ اکسیداسیون، سولفات تولید شده، فلزات آزاد شده و دیگر پارامترها آنالیز می شود. تجهیزات آزمایشهای ستونی، شبیه تجهیزات آزمایش سلول مرطوب می باشد و در مقایسه با وسیله استخراج سوکسله خیلی ساده تر است. اضافه کردن آهک، بررسی تاثیر باکتریها و اشباع کردن با آب از جمله پارامترهای کنترل کننده آزمایش می باشد. ستونها بطور تیپیک قطر ۱۵ سانتی متر و طول بیش از ۲ متر دارند، که می توان آنها را با طولها و قطرهای بزرگتر، جهت سازگاری با ابعاد نمونه ها ساخت. زمان طولانی آزمایش و هزینه زیاد جهت انجام آزمایشهای ستونی از اشکالات این روش می باشد [۲۱].

^۱ Coulmn Tests



شکل ۲-۲- نمایی از یک ستون ساده شستشو [۲۱]



شکل ۲-۴- نمایی از یک ستون شستشوی صحرایی [۲۱]

۲-۵-۴- آزمایش راکتور ناپیوسته^۱

در آزمایش راکتور ناپیوسته، آب مقطر و نمونه پودر شده بصورت پالپی درآمده و برای یک دوره زمانی چند روزه تا چند هفته ای تکان داده می شود. کاستیج در سال ۱۹۸۹ این آزمایش را با استفاده از ۲۰۰ گرم نمونه و ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر انجام داد. ظرف حاوی آب مقطر و نمونه در خلال آزمایش باید بطور پیوسته تکان داده شود. گاهی اوقات علاوه بر آب مقطر، مواد خنثی کننده هم به آن اضافه می گردد. اندازه و حجم نمونه بوسیله آزمایش کننده مشخص می گردد. در خلال آزمایش، از محلول در فاصله های زمانی منظم نمونه می گیرند تا پارامترهای کیفی آب مانند سولفات، pH و فلزات موجود در محلول مشخص شوند. نمونه گیری باعث کاهش آب نمونه می شود، به همین دلیل برای آنکه حجم آب نمونه ثابت نگه داشته شود به آن آب مقطر اضافه می شود که این مورد باعث پیچیده تر شدن تفسیر نتایج می شود. اطلاعات حاصل از این آزمایش برای تخمین نرخ

^۱ Batch Reactor

فصل دوم استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

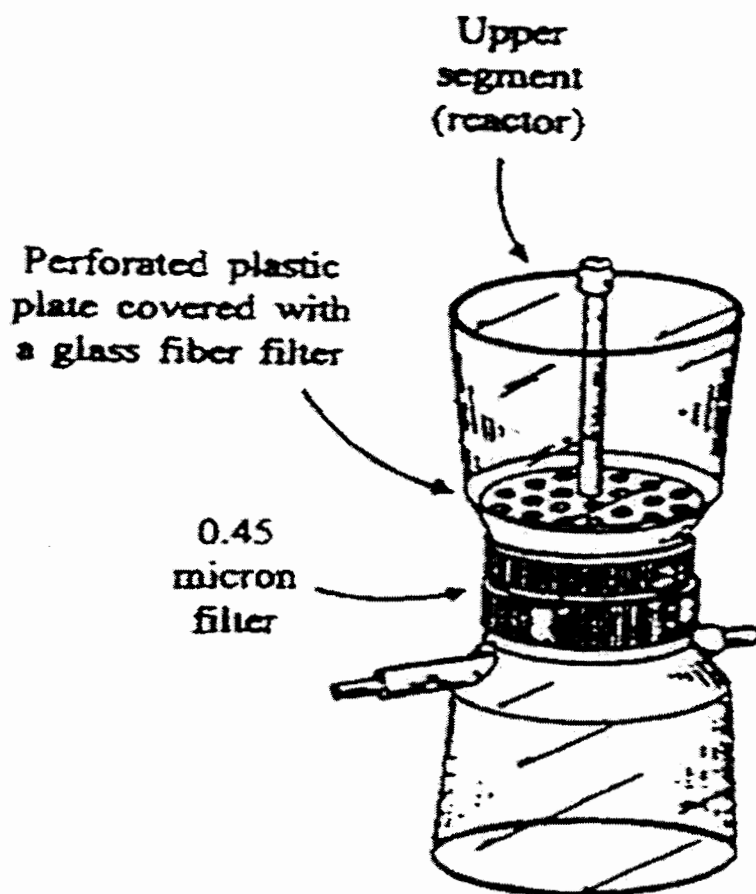
اکسیداسیون سولفیدها و فلزات محلول بکار می رود. آزمایش راکتور ناپیوسته نسبتاً ساده است و در آن واحد چندین فاکتور را مورد بررسی قرار می دهد. تاثیر باکتری ها و کنترل آنها از پارامترهای آزمایش می باشد. مشکلات این روش عبارتند از:

۱- با توجه به طولانی بودن زمان آزمایش و در نتیجه کاهش پیدا کردن حجم آب، برای ثابت نگه داشتن حجم آب به آن مقداری آب اضافه می کنند.

۲- حجم آب داخل ظرف ممکن است باعث متوقف شدن اکسیداسیون سولفیدها شده و در نتیجه از تشکیل اسید، ممانعت بعمل آورد.

۳- مدت زمان انجام آزمایش ممکن است از زمان لازم برای تشکیل اسید کمتر باشد.

۴- اگر در خلال آزمایش آب اضافه شود، تفسیر نتایج مشکل می شود. [۱۹،۲۲]



شکل ۲-۵- نمای از وسیله مورد استفاده در آزمایش راکتور ناپیوسته [۲۱]

۲-۵-۵- آزمایش در مقیاس واقعی (سرزمین)^۱

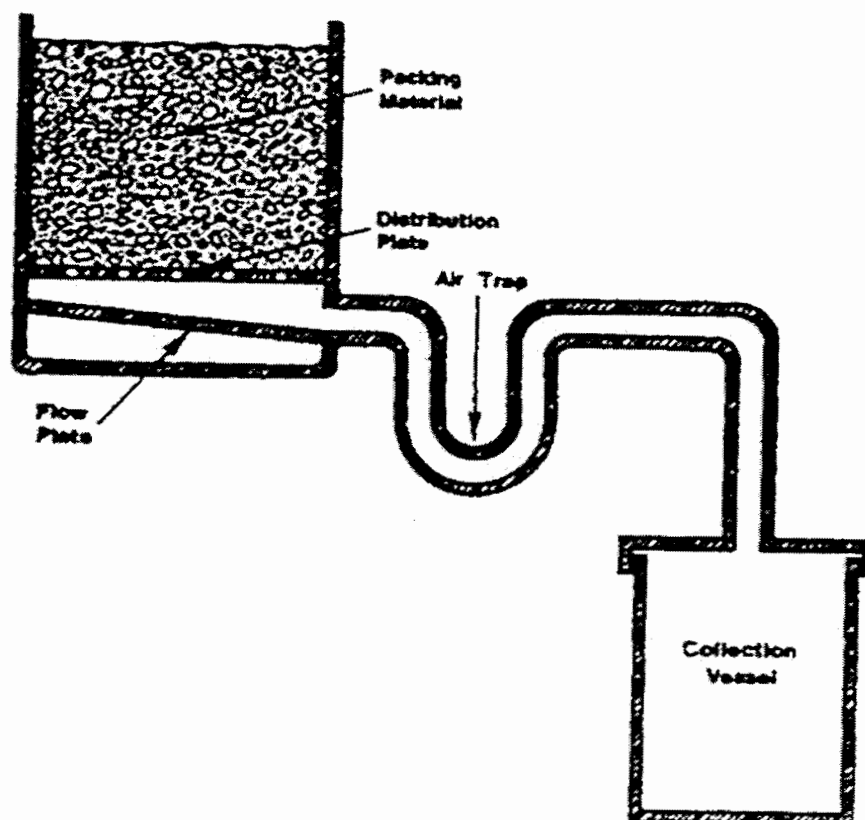
در این آزمایش حجم زیادی از مواد جهت ایجاد سلولهای آزمایش در یک شرایط محیطی محدود که عموماً محیط معدن است، بکار می رود. این آزمایش نسبت به سایر آزمایشها بسیار متفاوت می باشد. زیرا در این حالت بجای شرایط آزمایشگاهی، محیط شرایط را القاء می نماید. مقدار نمونه ای که در این آزمایش بکار می رود متغیر است و ممکن است ۱۰۰۰ تن متریک یا حتی بیشتر باشد که این مورد وابسته به سطح در دسترس می باشد. در این روش اندازه ذرات کاهش داده نمی شود تا شرایط محیطی واقعی تقریباً برقرار گردد. نمونه داخل یک ظرف پلاستیکی بزرگ

^۱ Field Scale Tests

^۱ ریخته میشود و از پایین به یک صفحه مشبک سوراخ دار برای عبور محلول، محدود می شود. محلول پس از عبور از نمونه و گذشتن از صفحه سوراخ دار، در داخل یک مجرای نفوذ ناپذیر جریان یافته و به داخل ظرف دیگری برای جمع آوری^۲ ریخته میشود. سپس محلول حاصل برای pH، سولفات، فلزات حل شده و دیگر پارامترها، آنالیز می شود. زمانی که نتایج حاصل از آزمایش مورد ارزیابی قرار می گیرد، توجه به شرایط آب و هوایی بسیار مهم است. تاثیرات آب و هوایی باید از نرخ اکسیداسیون سولفیدها، میزان تولید اسید، خنثی سازی اسید و فلزات حل شده که بوسیله آنالیز بدست می آید، متمایز گردد. زیرا. تاثیرات آب و هوایی خصوصا " بارش باران، میزان شستشو را مشخص می کند ولی تاثیری بر نرخ واکنش و ترکیب شیمیائی محصول واکنش ندارد. یکی از اشکالات این روش زمان زیاد انجام آن میباشد. بر خلاف دیگر آزمایشهای سینتیکی، این آزمایش شرایط محیطی را تسریع نمی کند. بنابراین اطلاعات راجع به پتانسیل تولید اسید تا زمانی که فعالیت ادامه دارد، فراهم می شود و برای بسیاری از فعالیت ها ممکن است ۱۰ سال یا بیشتر طول بکشد. مزیت این آزمایش این است که شرایطی را همانند شرایط طبیعی شبیه سازی می کند و تاثیر باکتریها و کنترل آنها بررسی می گردد. [۱۹]

^۱ Plastic Barrel

^۲ Collection Vessel



شکل ۲-۶- نمای از وسیله مورد استفاده در آزمایش در مقیاس واقعی (سر زمین) [۲۱]

۲-۵-۶- آزمایش تایید تحقیقات بریتیش کلمبیا^۱

این آزمایش برای تایید نتایج حاصل از آزمایش استاتیکی B.C.Initial بکار می رود. این آزمایش خصوصاً برای بررسی تاثیر باکتریها در تسریع واکنش تولید اسید کاربرد دارد. اسید سولفوریک به نمونه ۱۵ تا ۳۰ گرمی که تا زیر ۴۰۰ مش خرد شده در $pH=2.5$ اضافه می شود. نمونه برای چهار ساعت توسط شیکر تکان داده می شود و برای اینکه pH محلول بین ۲,۵ تا ۲,۸ قرار گیرد، اسید اضافه می شود. نمونه سپس با باکتری تیو باسیلوس فرو اکسیدان تلقیح شده و فلاسک

^۱ British Columbia Research Confirmation Test

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

وزن می شود. در فلاسک با پارچه کتانی بسته شده و در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد بطور پیوسته تکان داده می شود. پس از سه روز pH و فلزات وارد شده به محلول بررسی می شود و pH زیر ۲/۸ نگه داشته می شود. برای ثابت نگه داشتن وزن، آب مقطر به ظرف اضافه می شود. زمانی که pH زیر ۲/۸ ثابت شد، بررسی pH و فلزات هر دو روز یکبار صورت می گیرد تا اینکه فعالیت باکتریها متوقف شود و این امر زمانی رخ می دهد که مقدار pH و فلزات در محلول ثابت بماند. سپس مقدار نمونه دیگری به فلاسک اضافه شده و برای ۲۴ ساعت تکان داده می شود. اگر pH ، بالای ۳/۵ بود، آزمایش پایان پذیرفته است. در غیر اینصورت مقدار بیشتری نمونه اضافه شده و سپس برای ۲۴ ساعت تکان داده می شود و pH دوباره اندازه گیری میشود، اگر بزرگتر از ۴ و یا کمتر از ۳/۵ بود، آزمایش به پایان رسیده و اگر کمتری مساوی ۴ و بزرگتر یا برابر ۳/۵ بود نمونه برای ۴۸ ساعت تکان داده میشود و pH نهائی خوانده می شود. اگر pH بالای ۳٫۵ بود، نمونه تولید کننده اسید نمی باشد و اگر کمتر از ۳/۵ بود، نمونه اسید تولید خواهد کرد. در این آزمایش نرخ اکسیداسیون سولفیدها و پتانسیل خنثی سازی اندازه گیری نمی شود و در pH بالای ۲/۵ واکنش بین باکتری و کانی راتعیین نمی کند، در حالیکه اگر نمونه تولید کننده اسید باشد، این واکنشها تاثیر زیادی بر تولید اسید دارد. [۶]

۲-۵-۷-تفسیر نتایج حاصل از انجام آزمایشات استاتیکی

آزمایشهای استاتیکی اولین بررسی از امکان تولید پساب اسیدی در معدن می باشد. با توجه به این که بیشتر این آزمایشها با نمونه پودر شده انجام می گیرد(که این مسئله بر فعالیت شیمیائی کانی ها اثر می گذارد) بنابراین در تفسیر این نوع آزمایشها باید اطلاعات مربوط به کانی شناسی نمونه هم مورد توجه قرار گیرد.

اعداد بدست آمده از آزمایشات در مورد pH Paste و NAG یک عدد و در مورد ABA استاندارد و ABA تصحیح شده، دو عدد می باشد. اعدادی که در آزمایشات استاتیکی با آنها مواجه می شویم عموماً به دو صورت می باشد یکی پتانسیل تولید اسید (AP) و دیگری پتانسیل خنثی سازی اسید

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل

پساب های اسیدی

(NP)، تفاسیر معمولاً با توجه به مقایسه بین این دو مقدار انجام میگیرد که برپایه اختلاف این دو مقدار (NNP) و یا نسبت آنها (NPR) می باشد. چون مقدار سولفور کلی مطمئن تر است لذا در تفسیر آزمایشها بیشتر از مقدار سولفور کلی برای محاسبه پتانسیل تولید اسید استفاده میشود، در عوض استفاده از سولفور سولفیدی مقدار واقعی تری از AP بدست می دهد اما با اطمینان کمتر چون مقدار سولفور در شکلهائی که اسید تولید نمی کنند (مانند ژپیس) ، محاسبه نمی گردد. [۲۶]

[تعیین AP براساس سولفور محتوی در نمونه بصورت فعال یا تخمینی، محدودیتهای خاص خود را دارد. وقتی سولفور کل برای تعیین سولفور محتوی در نمونه انتخاب میشود باعث ایجاد خطاهائی می گردد که در زیر آمده است:

۱- خطای موجود در محاسبه مقدار واقعی اسید دیته و خنثی سازی در نمونه

۲- خطا در محاسبه اسید دیته بر پایه مقدار ضریب تبدیل سولفور کل به میزان تولید اسید

۳- خطای محاسباتی

خطاهائی مانند قبل هم برای سولفور سولفیدی جهت محاسبه پتانسیل تولید اسید، وجود دارد. سولفید هائی که پس از مدت طولانی از خود فعالیت نشان می دهند، در آزمایشهای کوتاه مدت استاتیکی باعث می شوند که نرخ تولید اسید به سختی یا با اشکال پیش بینی گردد. [۶]

جداول زیر تعدادی از روشهای موجود جهت تفسیر آزمایشهای استاتیکی می باشد

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل
پساب های اسیدی

جدول ۲-۶- راهنمای تفسیر آزمایشهای استاتیکی، پیشنهاد شده توسط پرایس و همکاران^۱ (۱۹۹۷) [۱۰]

پتانسیل تولید اسید	NPR	Paste pH	درصد سولفور- سولفیدی
تولید نمی کند	-	بیشتر از ۵,۵	کمتر از ۰,۳
تولید می کند	کمتر از یک	کمتر از ۵,۵	بیشتر از ۰,۳
امکان تولید دارد	۲-۱	"	"
احتمال تولید اسید کم است	۴-۲	"	"
اسید تولید نمی کند	بیشتر از ۴	"	"

جدول ۳-۷- راهنمای تفسیر آزمایشهای استاتیکی، پیشنهاد شده توسط رابرتسون و براگتون^۲ (۱۹۹۲) [۱۰]

پتانسیل تولید اسید ندارد	وضعیت نامشخص ^۳	پتانسیل تولید اسید دارد	ملاک تفسیر
بیشتر از ۲۰	بین ۲۰ و -۲۰	کمتر از -۲۰	NNP(NP-AP)
بیشتر از ۳	بین ۱ و ۳	کمتر از ۱	NPR(NP/AP)

Price et al¹

Robertson and Broughton²

³ نمونه هایی که وضعیت نامشخص دارند، باید آزمایشهای سینتیکی بر روی آنها انجام شود

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

معمولاً برای تفسیر آزمایشهای استاتیکی از جدول ۲-۷ استفاده می شود که عموماً مقدار NNP برای معادن زغالی و NPR برای معادن فلزی بکار می رود. موارد دیگری هم بطور متفرقه برای تفسیر آزمایشها وجود دارد که در زیر به آنها اشاره می شود:

۱- طبق نظر سابک و همکاران در سال ۱۹۷۸ مقدار NNP کمتر از ۵- نشاندهنده شرایط تولید اسید می باشد.

۲- فرگوسن و مورین پیشنهاد داده اند که مقدار NNP منفی نشان دهنده شرایط تولید اسید می باشد و مقدار بین ۲۰ و ۲۰- در محدوده نامعین می باشد.

۳- دی^۱ (۱۹۸۹) مقدار NNP کمتر از ۱۰ را تولید کننده اسید می داند.

۴- برادی و همکاران^۲ معتقدند که NPR بزرگتر از ۳ اسید تولید نمی کند و NPR کوچکتر از ۱ تولید کننده اسید است و مقادیر بین ۱ و ۳ در محدوده نامعین قرار می گیرد.

۵- مورین و هوت^۳ (۱۹۹۴) نظر دادند که NPR بزرگتر از ۱/۳ اسید تولید نمی کند و NPR کوچکتر از ۱ تولید کننده اسید است و مقادیر بین ۱ و ۱/۳ در محدوده نامعین قرار می گیرد.

طبق جدول ۲-۷ نمونه هایی که میزان NNP آنها بین ۲۰ و ۲۰- و یا مقدار NPR آنها بین ۱ و ۳ قرار دارد، در محدودهای موسوم به ناحیه خاکستری قرار می گیرند و برای تعیین وضعیت آنها و بررسی پتانسیل تولید اسید و یا خنثی کنندگی آنها، انجام آزمایشهای سینتیکی ضروری می باشد. [۱۲،۱۰]

¹ Day

² Brodie et al

³ Morin and Hutt

فصل دوم استفاده از آزمایشهای استاتیکی و سینتیکی در پیش بینی پتانسیل پساب های اسیدی

۲-۵-۸- تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایشهای سینتیکی

تفسیر نتایج آزمایشهای سینتیکی بر پایه اطلاعات کانی شناسی نمونه، اطلاعات مربوط به آزمایشهای استاتیکی، خصوصیات اندازه ذرات و ویژگیهای پساب است. بیشتر تحقیقات بر روی کیفیت نمونه لیچ شده (شامل pH، سولفات، اسیدیته، قلیائیت و انحلال فلزات) برای تعیین فرآیند پساب اسیدی معدن، انجام می گیرد. آزمایشهای سینتیکی در مقیاس آزمایشگاهی، برای سرعت بخشیدن به فرآیند هوازدگی طراحی شده اند، بنابراین وقتی که مواد در محیط تولید اسید می کنند، این آزمایشها مورد استفاده قرار نمی گیرد. برای بیشتر آزمایشهای سینتیکی اگر pH ماده لیچ شده کمتر از ۳ باشد، نمونه دارای قابلیت تولید اسید به میزان قابل توجه می باشد. و اگر pH بیشتر از ۵ باشد، تولید اسید نمی کند و برای مقادیر بین ۳ و ۵ تولید اسید با مقداری خنثی سازی همراه است. کانی شناسی نمونه نقش مهمی را در کنترل کیفیت ماده لیچ شده بازی می کند. سولفات محصول جانبی ناشی از اکسیداسیون سولفیدها می باشد و می تواند جهت اندازه گیری نرخ اکسیداسیون و تولید اسید بکار رود. آنالیز و اندازه گیری فلزات در نمونه محلول، میزان آلودگی را نشان می دهد و بیانگر میزان تولید اسید نمی باشد. اگر نمونه محتوی ژپس باشد، سولفات محلول تولید شده در اثر انحلال ژپس (CaSO_4) باعث به تاخیر افتادن اکسیداسیون سولفیدها در آزمایشهای سینتیکی می گردد. ابعاد ذرات تاثیر زیادی بر روی نتایج دارد، کاهش ابعاد ذرات در بیشتر آزمایشها موجب آزاد شدن سولفیدهای محصور در کانی های سیلیکاته شده و فعالیت نمونه را افزایش می دهد بعلاوه سطح کانی های تولید و خنثی کننده اسید افزایش یافته و بر نرخ واکنشهایی که در نمونه و پساب رخ می دهند اثر می گذارد. در نهایت این مطلب را باید مد نظر داشت که اختلاف بین شرایط آزمایشگاهی و شرایط سر زمین باعث می شود که پیش بینی نتایج آزمایشهای سینتیکی مشکل و پیچیده گردد. [۶،۲۱]

فصل سوم

شناسایی آلودگی ناشی از پساب های اسیدی
با استفاده از روش های ژئوفیزیکی

۳-۱- مقدمه

همانطور که در فصل اول اشاره گردید، پساب های اسیدی آثار مخرب و زیان آوری بر روی محیط پیرامون خود می گذارند به منظور شناسایی زون های آلوده روش های مختلفی وجود دارد که از جمله آنها می توان به روش های ژئوفیزیکی اشاره نمود. کاربرد روش ژئوالکتریک در کسب اطلاعاتی دقیق از وضعیت محیط در زمانی کوتاه و هزینه کم مطالعات به این سبک، موجب گرایش روز افزون محققان به استفاده از این روش در تعیین گستره آلودگی زیرزمینی شده است. انتخاب روش مناسب در تعیین گستره آلودگی آبهای زیرزمینی ارتباطی تنگاتنگ با نوع آلودگی و تاثیر آن بر خواص الکتریکی مورد مطالعه و هدف مورد مطالعه دارد. انواع آلودگی ها شامل موارد زیر است:

- آلودگی های صنعتی مثل تولیدات نفتی و مواد روغنی
- ضایعات معادن (زغال سنگ، فلزی ، اورانیوم، فسفات)
- ترکیبات سمی

- اسیدهای معدنی و آلی
- فاضلابها، لجن و شیرابه فضولات جامد مدفون در گودالهای دفن زباله
- ضایعات صنایع چوب
- نشت از رودخانه های آلوده
- اِپسماندهای رادیو اکتیو صنایع هسته ای و ضایعات نیروگاههای اتمی
- آلودگی های حرارتی
- هجوم آب شور از سمت دریا
- آلودگیهای زراعی ناشی از مصرف انواع کودها و سموم دفن آفات نباتی

۳-۲- تعیین روش ژئوفیزیکی مناسب

چنانچه گفته شد در ابتدا بایستی نوع آلاینده ها مشخص گردد تا نحوه تاثیر گذاری آلودگی بر خواص الکتریکی مشخص شود. در چنین مطالعاتی از روش ژئوالکتریک جهت تعیین خصوصیات آبشناختی محیط استفاده می گردد تا مناطق امن جهت حفر چاهها مشخص گردد و نقشه پراکندگی آلودگی و گستره آن تهیه گردد.

مساله دیگر قابلیت نفوذ حاکم بر محیط مورد مطالعه است که بویژه در هنگام ارائه الگوهای تفسیری مناسب وبا توجه به مقادیر بدست آمده از اندازه گیریهای ژئوفیزیکی خودنمایی می کند.

عامل مهم دیگر درجه اشباع محیط است زیرا تعیین روابط ریاضی مابین خصوصیات هیدروژئولوژیکی و ژئوفیزیکی در محیطهای غیر اشباع (منطقه تهویه) در مقایسه بامحیطهای غیر اشباع بسیار پیچیده است و این در حالی است که تهیه نقشه و تعیین گستره آلودگی در محیطهای غیر اشباع در بسیاری از موارد جهت آشکارسازی آلودگی و حفاظت آبخوان قبل از رسیدن آلاینده ها به آن ضروری است.

علاوه بر موارد فوق الذکر گاهی لازم است راه حلهایی جهت نگهداری و حفظ کیفیت مقدار آبخوان ارائه گردد. در ارزیابی وضعیت یک ساختگاه، موقعیت منبع آلاینده و پدیده های مغشوش کننده اندازه گیری ها که اجرای عملیات ژئوفیزیکی را دچار مشکل و گاهی غیرممکن می نمایند، در نظر گرفته می شوند زیرا طرح و اجرای یک برنامه جامع پاکسازی و یا حفاظتی منوط به وجود اطلاعاتی دقیق راجع به ابعاد و درجه آلودگی است.

۳-۳- انواع روش های ژئوفیزیکی در تعیین محدوده آلودگی

روش های مقاومت سنجی الکتریکی

قطبش القائی

روش پتانسیل خودزا

روش های الکترومغناطیس

بررسی های الکترومغناطیسی با فرکانس پایین VLF.

۳-۴- تعیین و شناسایی آلودگی آب زیر زمینی با استفاده از روش های مقاومت ویژه و VLF

(مطالعه موردی)

در این منطقه آلودگی های زیست محیطی ناشی از نشت مواد هیدروکربنی در محدوده قرار گیری مخازن مورد بررسی قرار گرفته است برای این منظور ابتدا وضعیت شیمیایی آب در منطقه با استفاده از نمونه برداری از آب در محدوده مورد نظر انجام شده، سپس به منظور شناسایی زونهای آلودگی و تاثیر آن بر روی آب زیر زمینی از روش اندازه گیری مقاومت ویژه و روش VLF استفاده شده است.

۳-۴-۱- مشخصات منطقه مورد مطالعه

- ایالت یوتا آمریکا

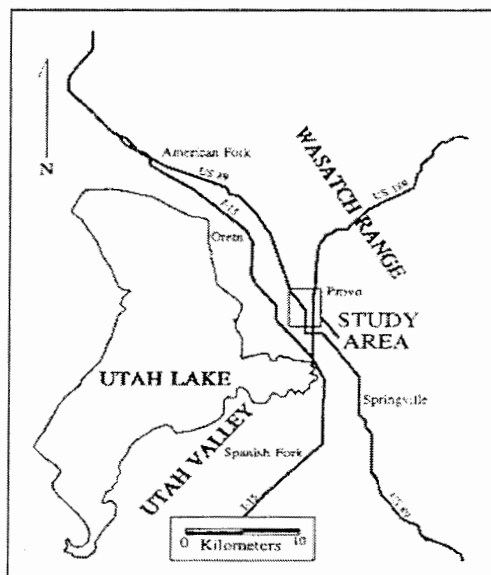
- محل انباشت فرآورده های نفتی

- جنس خاک:

آبرفتهای رسوبی تجمع نیافته از جنس شن، ماسه، گراول

- نفوذ پذیری: متوسط

- نوع آب و هوا: خشک



شکل ۲-۱- محدوده منطقه مورد مطالعه

۳-۴-۲- شیمی آب

در تاریخ ۱۵ اکتبر ۱۹۹۳ نمونه برداری از نقاط MW-1، MW-3، و MW-4 در تاریخ ۲۲ اکتبر از نقطه MW-2 انجام گرفته است. اطلاعات مربوط به سطح آب زیر زمینی و نیز تاریخ انجام نمونه برداری در جدول ۱-۳ آورده شده است. نمونه های اخذ شده در دانشگاه بریگهام مورد آنالیز قرار گرفته است. میزان ذرات جامد باقیمانده معمولاً نشان دهنده وجود مواد آلی در آب منطقه است در برای اندازه گیری میزان غلظت کاتیونها از روش جذب اتمی و غلظت آنیونها نیز با استفاده از کروماتوگراف اندازه گیری شده است. نتایج آنالیزها به صورت خلاصه در جدول ۲-۳ آورده شده اند. همانطور که از نتایج آنالیزها دیده می شود، نقاط MW-3 و MW-4 نشان دهنده آلودگی احتمالی است در حالی که در نقطه MW-1 هیچگونه اثری از TPH و BTEX دیده نمی شود. همچنین با توجه به نتایج آنالیزها به نظر

می رسد که در پروفیل MW-2 نیز از آلودگی چیزی مشاهده نمی شود.

جدول ۳-۱- اطلاعات مربوط به سطح آب زیر زمینی و تاریخ نمونه برداری

Monitoring well	Date	Depth to water (m)
MW-1	05-06-93	1.90
	10-15-93	1.59
MW-2	05-06-93	1.73
	10-22-93	1.58
MW-3	05-06-93	1.47
	10-15-93	1.58

جدول ۳-۲- مقادیر TDS (ذرات جامد محلول شده) بر حسب میلی گرم بر لیتر در نقاط نمونه برداری

Monitoring well	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	TDS
MW-1	0.1	49	1.9	69	375	34	4.4	116	25	675
MW-2	0.3	40	1.0	68	384	26	3.8	119	26	668
MW-3	0.4	44	0.4	45	743	36	16.5	119	46	1121
MW-4	0.7	46	0.5	54	889	49	16.0	199	53	1307

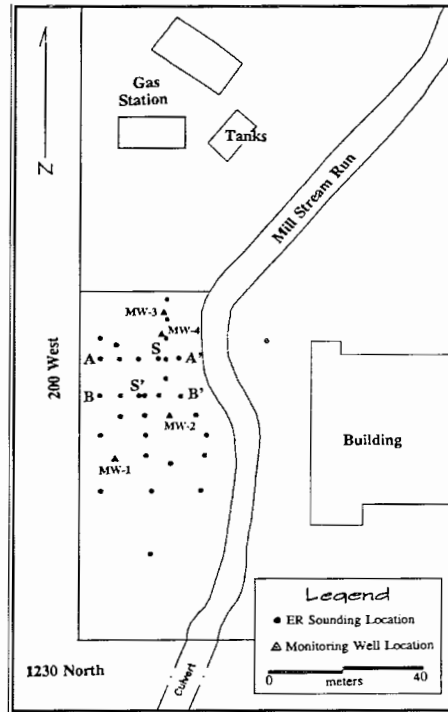
۳-۴-۳- نتایج برداشت های ژئوالکتریک

در حد فاصل ۶ تا ۱۳ اکتبر ۱۹۹۳، ۳۲ سونداژ با استفاده از آرایش BOSS و با فاصله الکترودی ۰/۵ تا ۱۶ متر در محدوده آلودگی احتمالی انجام شده است. محل سونداژها در شکل ۳-۲ مشخص شده است. به منظور پوشش کامل منطقه با استفاده از آرایش الکترودی ونر در دو جهت شمالی- جنوبی و شرقی - غربی انجام شده است باید توجه داشت که در برخی از نقاط از جریان آب عبور نموده است. به منظور صحت بررسی انجام شده در تاریخ ۳ دسامبر در برخی از نقاط اندازه گیری مقاومت ویژه دوباره صورت گرفته است. سونداژهای S و S' به ترتیب از محدوده آلودگی و فاقد آلودگی عبور نموده اند. به

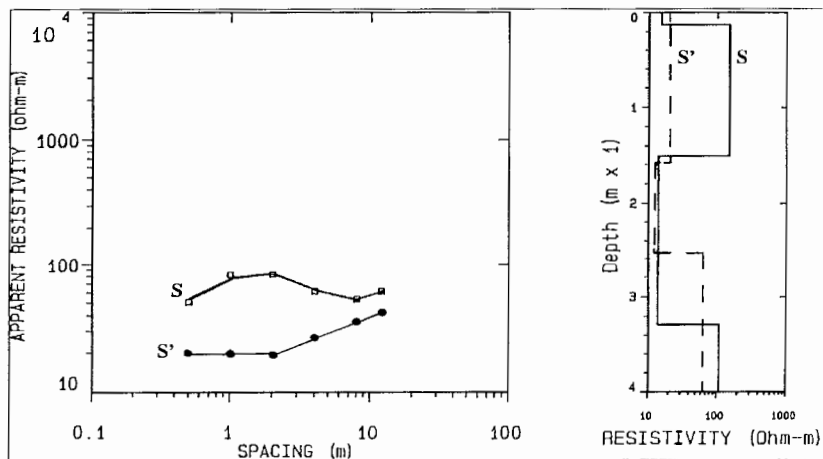
منظور تعبیر و تفسیر داده ها مدلسازی داده ها با استفاده از نرم افزار BOSSIX صورت گرفته است. نتایج بررسی مقادیر مقاومت ویژه به صورت نمودار در راستای A-A' (شکل ۳-۲) بر روی S و همچنین در راستای B-B' بر روی S' (شکل ۳-۲) در شکل ۳-۲ آورده شده است. تغییرات عمقی مقاومت ویژه نیز در جهت A-A' و B-B' در شکل های ۳-۴ و ۳-۵ آورده شده اند. مقطع (شکل ۳-۴) بیانگر یک زون آلوده است که لایه های با مقاومت ویژه زیاد و مقاومت ویژه کم با استفاده از سطح ایستابی آب زیر زمینی از یکدیگر جدا شده اند. در زون غیر اشباع آغشتگی آنها به مواد نفتی همراه با مقادیر بالای مقاومت ویژه است نشان دهنده آلودگی ناشی از هیدروکربن می باشد و مواد نفتی که به صورت شناور بر روی سطح آب قرار دارد همراه با مقادیر بالای TDS می باشد. با توجه به شکل ۳-۵ در مقطع در فاصله ۱۰ متری از جنوب مقطع A-A' یعنی B-B' یک زون فاقد آلودگی مشاهده می شود که مقادیر مقاومت ویژه پایین در زون غیر اشباع بالای سطح ایستابی و زون رسوبی اشباع بیانگر این موضوع می باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده از مدلسازی BOSSIX با آنالیز منحنی های مونی، گرانت در لایه سوم نشان می دهد که بالاترین میزان حساسیت در لایه های میانی زمانی اتفاق می افتد که فاصله الکترودی a به میزان یک چهارم عمق در بالای لایه میانی باشد. عمق نفوذ جریان نیز با توجه با مقادیر میانگین این دو عدد در حدود ۰/۴ فاصله الکترودی می باشد. همانطور که در شکل ۳-۶ نیز دیده می شود مقادیر مقاومت ویژه در شمال محدوده مورد بررسی که در واقع زون آلودگی است، بسیار بالا می باشد. هرچقدر به سمت

جنوب محدوده مورد بررسی حرکت می کنیم میزان مقاومت ویژه کمتر می گردد. مقادیر مقاومت ویژه

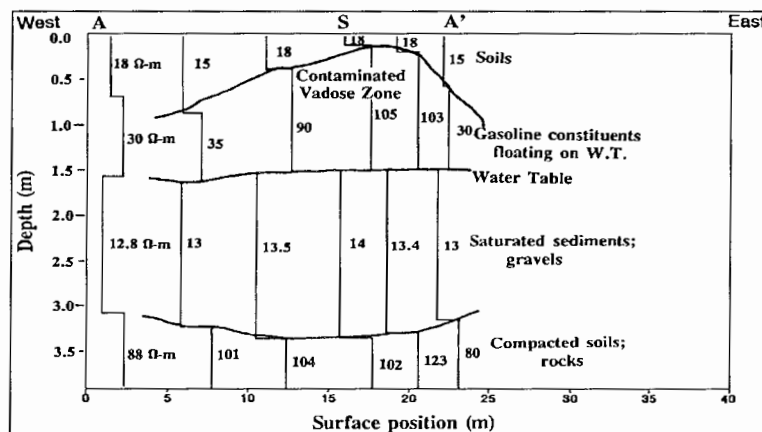
نزدیک MW-3 به میزان ۳۶ اهم متر و در نزدیکی MW-1 به میزان ۱۱ اهم متر تغییر می کند.



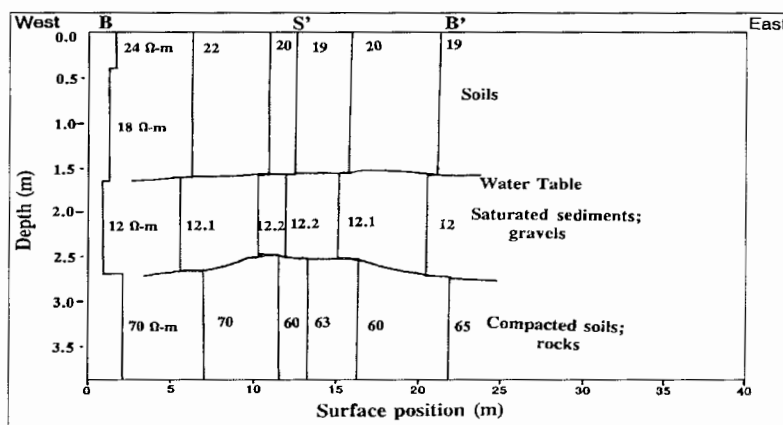
شکل ۳-۲- محل سونداژها در محدوده مورد مطالعه



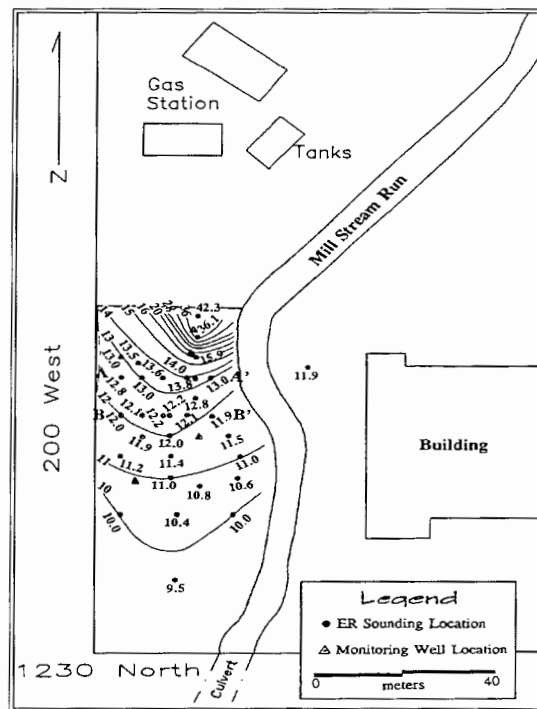
شکل ۳-۳- سونداژهای S در راستای A-A' و سونداژ S' در راستای B-B'



شکل ۳-۴- مقطع قائم تغییرات مقاومت ویژه در راستای A-A'



شکل ۳-۵- مقطع قائم تغییرات مقاومت ویژه در راستای B-B'

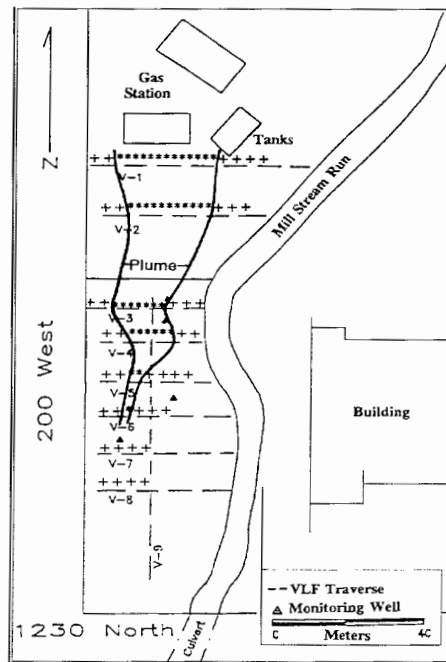


شکل ۳-۶- مقادیر مقاومت ویژه که به صورت کنتور آورده شده است

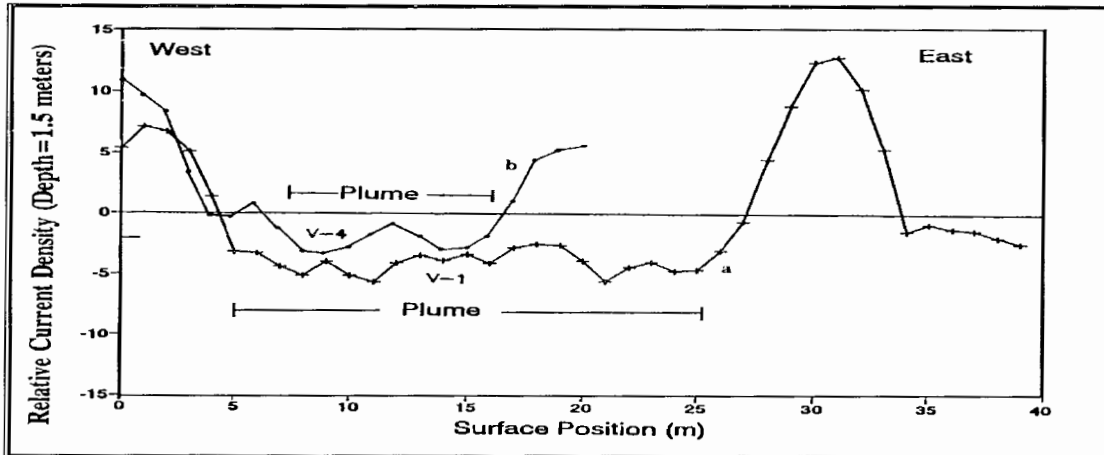
۳-۴-۴- برداشت ژئوفیزیکی با استفاده از روش VLF

برداشت های VLF با استفاده از دستگاه WADI ساخت شرکت ABEM در تاریخ ۲۹ نوامبر و ۳ دسامبر ۱۹۹۳ در منطقه مورد نظر انجام شده است. در شکل ۳-۷ پروفیل های VLF پیمایش شده آورده شده است. داده های اندازه گیری شده با استفاده از روش کاروس اچ جلت فیلتر شده اند و عمق فیلتر داده ها با توجه به سطح آب زیر زمینی انتخاب شده است. در واقع با استفاده از فیلتر کاروس اچ جلت میزان چگالی جریان مناسب در پروفیل های برداشت شده محاسبه می گردد. مقادیر مقاومت ویژه بالا در واقع نشان دهنده میزان پایین چگالی جریان می باشد. نتایج حاصل از تفسیر داده های VLF با نتایج بدست آمده از روش اندازه گیری مقاومت ویژه از هماهنگی مطلوبی برخوردار می باشند. به عبارت

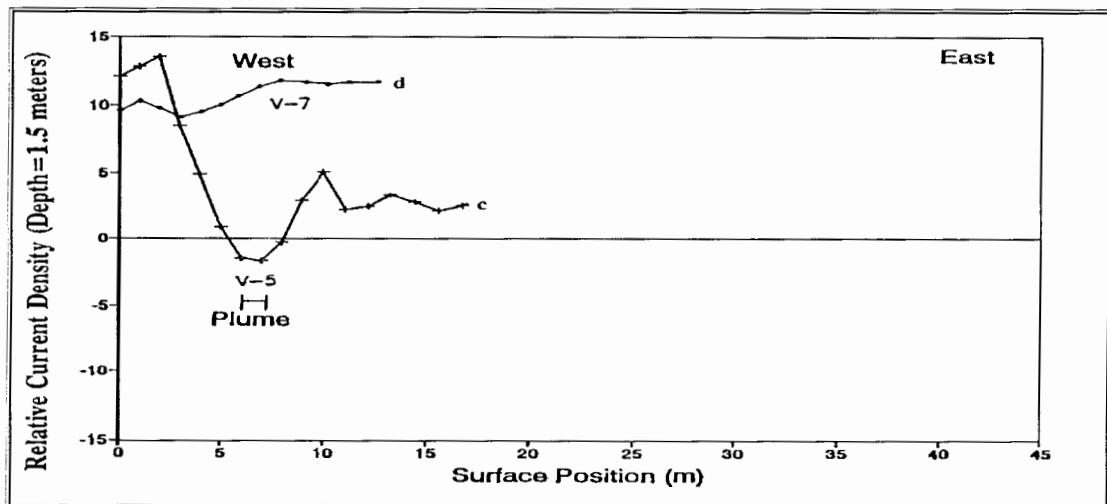
دیگر همانطور که در شکل ۳-۸-الف دیده می شود، پروفیل های ۱ و ۴ VLF که در زون آلوده قرار دارند مقادیر چگالی جریان به میزان بسیار پایینی هستند که در واقع نشان دهنده میزان مقاومت ویژه بالا و بیانگر وجود یک زون آلوده در محدوده مورد نظر هستند و نتایج آن با مقادیر مقاومت ویژه در مقطع A-A' بخوبی منطبق می باشد. همانطور که در شکل ۳-۸-ب نیز دیده می شود پروفیل ۵ که در مقطع B-B' قرار گرفته است زون آلوده بسیار کوچکی را در حد فاصل ۵/۵ تا ۶/۵ متری بر روی پروفیل نشان می دهد که این موضوع بخوبی با مقادیر مقاومت ویژه بالا که در شکل ۲-۵ در مقطع B-B' و در حد فاصل ۷ متری از آن دیده می شود، منطبق است. پروفیل ۷ نیز در شکل ۳-۸-ب نشان دهنده زون فاقد آلودگی در محدوده مورد بررسی می باشد.



شکل ۳-۷- پروفیل های پیمایش شده با استفاده از روش VLF



شکل ۳-۸- نمودارهای فیلتر شده در پروفیل های ۱ و ۴



شکل ۳-۹- نمودارهای فیلتر شده پروفیل های ۵ و ۷

فصل چهارم

پیش بینی آلودگی حاصل از پساب های اسیدی
با استفاده از روش مدل سازی ریاضی

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به اختصار به معرفی انواع مدل های زیست محیطی اشاره شده است. در ادامه نیز مطالعه موردی پیش بینی پتانسیل آلودگی معدن زغال نواری بکفیل استرالیا با استفاده از مدل سازی عددی (المان حجمی محدود) همراه با نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- انواع مدل ها^۱

مدل ها به عنوان یک ابزار مناسب در پیش بینی بسیاری از پیامد های زیست محیطی نقش اساسی دارند. هدف اصلی مدل سازی افزایش درک و بینش بین پارامتر های مؤثر در فرآیندهایی است که در داخل سیستم واقعی در حال وقوع می باشد. در واقع مدل الگو و نشان دهنده روابط بین متغیرها و پاسخ در یک سیستم واقعی است [۳۷]. انواع مدل ها به شرح زیر می باشند:

۱- مدل های مفهومی^۲

۲- مدل های فیزیکی^۳

1- Types of models
2- Conceptual models
3- Physical models

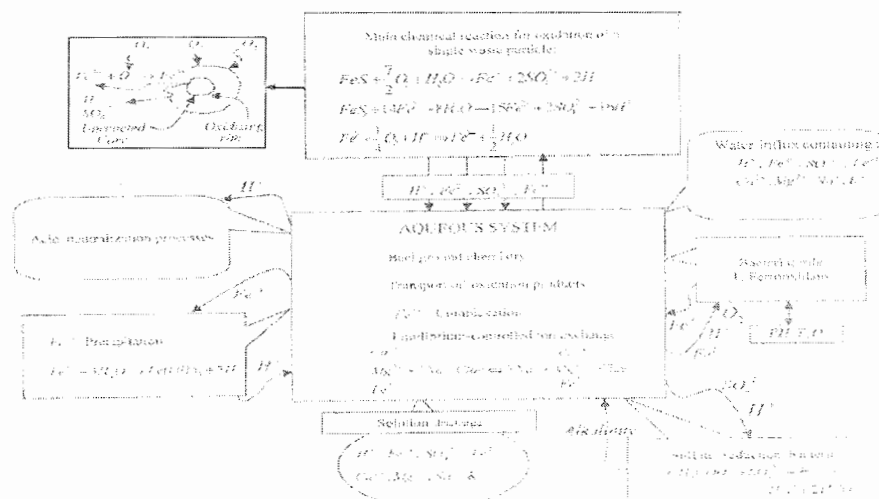
۳- مدل های ریاضی^۴ (تحلیلی)

۴- مدل عددی^۵

۴-۲-۱- مدل های مفهومی

این مدل ها به صورت کیفی فرآیندهایی که داخل یک سیستم واقعی اتفاق می افتند را تشریح می نمایند. به عنوان مثال شکل ۴-۱ نمونه ای از مدل مفهومی ارائه شده برای تشریح کیفی فرآیندهایی که در باطله های معادن نواری بکفیل شده^۶ اتفاق می افتند را بیان می دارد. در این مدل مفهومی واکنش های اکسیداسیون پیریت و تولید آلودگی در سیستم جریان آب زیرزمینی تشریح شده اند. مدل های مفهومی می توانند در مرحله بعد در ارائه مدل های ریاضی برای فرآیند مورد بررسی مورد استفاده قرار

گیرند [۳۸].



شکل ۴-۱- مدل مفهومی برای فرآیند اکسیداسیون پیریت و تولید پساب اسیدی معدن و انتقال آلودگی در معادن نواری بکفیل شده استرالیا [۳۸].

- 4- Mathematical models
- 5- Numerical methods
- 6 - Backfilled strip mines

۴-۲-۲- مدل های فیزیکی

این مدل ها نیز جهت درک صحیح و شبیه سازی مشکلات زیست محیطی به کار گرفته شده اند. مدل های فیزیکی ممکن است دامنه و محدوده ای^۷ را برای تغییر دادن سیستماتیک هر پارامتر انتخابی فراهم نماید تا فرآیند مورد مطالعه را به صورت کیفی شبیه سازی نماید. مشکلات اساسی مدل های فیزیکی هزینه بالا در زمان بکارگیری مدل و ناتوانی مدل در شبیه سازی مشکلات زیست محیطی و هیدروژئولوژیکی پیچیده می باشند [۳۷].

۴-۲-۳- مدل های ریاضی

برای حل کردن یک مشکل زیست محیطی، در مرحله اول باید مدل مفهومی آن مشخص گردد سپس با استفاده از مدل های ریاضی رفتار سیستم به صورت کمی مورد بررسی قرار می گیرد. در این روش یک معادله ریاضی که تشریح کننده مکانیزم رفتار فرآیند است بیان می گردد. معادلات مناسب نیز در صورت امکان به صورت تحلیلی یا عددی با استفاده از یک الگوریتم مناسب و یا به کمک نرم افزار کامپیوتری، برای یک متغیر انتخابی که سیستم مورد مطالعه را تعریف می کند، حل می شوند.

۴-۲-۴- مدل های عددی

روش های عددی دارای کاربرد گسترده ای در پیش بینی بسیاری از مسائل زیست محیطی و هیدروژئولوژیکی دارد. متداول ترین روش های عددی عبارتند از: روش های تفاوت های محدود^۸، اجزاء

7 - Scope

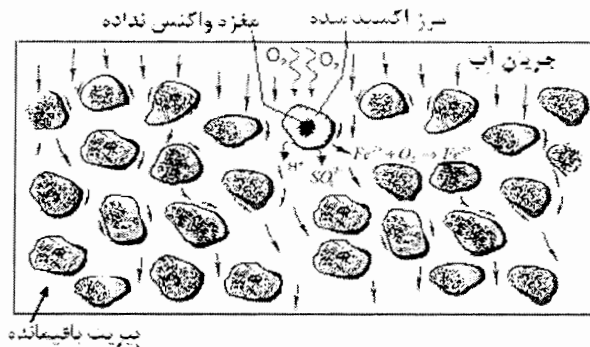
8 - Finite difference method

محدود^۹ و المان های حجمی محدود.

نرم افزار های CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) همچون FLOW3D, FLUENT, PHOENICS با استفاده از تکنیک های محاسباتی مختلفی که مورد استفاده قرار می دهند می توانند فرآیند های آلودگی که سبب تولید معدن می شوند را به صورت دقیق مورد بررسی و مطالعه قرار دهند [۳۹].

۳-۴- مدل مغزه منقبض شونده اکسیداسیون پیریت

پیریت از جمله کانی های سولفیدی است که اکسید شدن آن سبب تولید اسید و ایجاد پساب اسیدی می گردد. غالباً اکسیداسیون پیریت از مدل مغزه منقبض شونده پیروی می کند. در شکل ۲-۴ به صورت شماتیک اکسیداسیون پیریت و تولید آلودگی و انتقال آلاینده ها در باطله های معادن روباز نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- تصویر شماتیک از اکسیداسیون پیریت و نشت آلاینده در باطله های معادن روباز [دولتی و همکاران، ۲۰۰۴].

9 - Finite element method

فصل چهارم پیش بینی آلودگی حاصل از پساب های اسیدی با استفاده از روش مدل سازی ریاضی

۴-۴- مطالعه موردی پیش بینی پتانسیل آلودگی معدن زغال نواری بکفیل استرالیا با استفاده

از مدل سازی عددی (المان حجمی محدود)

در این معدن که اکسیداسیون کانی های سولفیدی خاص، مخصوصاً پیریت موجب تشکیل پساب اسیدی می گردد. واکنشهای اکسیداسیون پیریت در فصل ۱ آورده شده است.

۴-۴-۱- معادله مدل اکسیداسیون پیریت

اکسیداسیون پیریت از مدل مغزه منقبض شده پیروی می کند. در این مدل ذرات به صورت کروی فرض شده است و تنها نقش اکسیژن و آهن سه ظرفیتی (Fe^{+3}) در فرآیند اکسیداسیون پیریت در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده به صورت رابطه ۴-۱ می باشد:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{-3X^2}{6\tau_{[O_2]}X^{\frac{1}{3}}\left(1-X^{\frac{1}{3}}\right) + \tau_{C(O_2)}} + \frac{-3X^2}{6\tau_{D(Fe^{+3})}X^{\frac{1}{3}}\left(1-X^{\frac{1}{3}}\right) + \tau_{C(Fe^{+3})}} \quad (1-4)$$

مقادیر τ_D و τ_C با استفاده از معادلات زیر محاسبه می شوند (Levenspiel, 1972):

$$\tau_D = \frac{\rho_{py} R^2}{6bD_{e(OX)}C_{(OX)}}, \tau_C = \frac{\rho_{py} R}{bK_{(OX)}\alpha_{py}^{rock} \lambda C_{(OX)}} \quad (4-6)$$

که در رابطه بالا:

X: میزان درصد پیریت باقیمانده (Kg/Kg)

τ_D : زمان لازم برای انجام اکسیداسیون که در فرآیند پخش شدگی کنترل شده است (s)

ρ_{py} : دانسیته ذرات پیریت (mol/mol)

b: ضریب استیکیومتری در پیریت و عامل اکسیداسیون می باشد.

τ_C : زمان اکسیداسیون کامل در واکنش سطحی می باشد. (s).

$D_{e(OX)}$: ضریب پخش عامل اکسیداسیون در آب می باشد. (m^{-1})

α_{py}^{rock} : مساحت سطح پیریت در حجم واحد ذرات جزئی می باشد. (mol/m^3)

$C_{(OX)}$: غلظت عامل اکسیداسیون در آب در برگیرنده ذرات می باشد. (mol/m^3)

λ : ضخامت پوسته واکنش

فصل چهارم پیش بینی آلودگی حاصل از پساب های اسیدی با استفاده از روش مدل سازی ریاضی

R : شعاع ذرات جزئی (m)

$K_{(ox)}$: ثابت سرعت واکنش سطحی است (m/s)

t : زمان (S)

باید توجه کرد که میزان غلظت اکسیژن موجود در فضاهای خالی ذرات باطله از قانون کامل گاز ها و قانون هنری پیروی می کند.

۴-۲-۴- معادله ریاضی مدل نفوذ اکسیژن در باطله ها

همانگونه که اشاره شد اکسیژن یکی از مهمترین عوامل اکسیداسیون پیریت است. مکانیزم اصلی نفوذ اکسیژن در باطله ها عامل نفوذ گازی است. با در نظر گرفتن حجم اکسیژن مصرفی در فرایند نفوذ در ذرات باطله، اکسیداسیون شیمیایی آهن دوظرفیتی و اکسیژن مصرفی توسط باکتریها و همچنین ثابت فرض نمودن تخلخل حفرات پر شونده از هوا در واحد زمان معادله ریاضی نفوذ اکسیژن به صورت ۴-۲ ارائه می گردد:

$$\phi_a \frac{\partial u}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) - \frac{3(1-\phi)b^{-1}\rho_s X^2}{6\tau_{\lambda_2} X^3 (1-X^3) + \tau_{\lambda_2}} - \phi_b b^{-1} [Fe^{+2}] \frac{u}{u+33857} \left[K_1 \left(\frac{1}{H^*} \right)^2 + K_2 \right] - \phi_b b^{-1} K_B [Fe^{+2}] \frac{u}{u+33857} \quad (2-4)$$

که میزان ضریب نفوذ مؤثر D_e در رابطه بالا به صورت زیر می باشد:

$$D_e = \frac{P}{RT\sigma_a} \left(\frac{\phi_a}{\tau} \right) D_O \quad (3-4)$$

که در روابط بالا:

- ϕ_a : تخلخل فضاهای خالی پر شونده از هوا (m^3/m^3)
- σ_a : دانسیته مولی هوا (mol/m^3)
- u : اکسیژن موجود در فضای خالی باطله (mol/m^3)
- P : فشار اتمسفر (101 KPa)
- b' : ضریب استیکیومتری اکسیژن و Fe^{+2}
- K_1, K_2 : ثابت اکسیداسیون شیمیایی Fe^{+2}
- D_O : ضریب نفوذ مؤثر اکسیژن در نیتروژن، دی اکسید کربن، اکسیژن اتمسفر مدل (m^2/s)
- τ : پیچش نفوذ در مسیر عبوری (m/m)
- ρ_s : دانسیته مولی ذرات پیریت
- T : دما (K)
- R : ثابت گازها ($8.314 \times 10^{-3} KPa \cdot m^3 \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)

فصل چهارم پیش بینی آلودگی حاصل از پساب های اسیدی با استفاده از روش مدل سازی ریاضی

ϕ_{1r} : تخلخل پر شده از آب
 ϕ : تخلخل باطله
 در این مدل، مقدار ضریب نفوذ مؤثر (D_O) $2.25 \times 10^{-5} m^2/s$ فرض شده است.

۴-۴-۳- مدل حمل آلودگی های ناشی از اکسیداسیون پیریت

معادله ارائه شده به صورت مشتقات جزئی ذرات حل شده می باشد که با استفاده از انجام

آزمایشات توسط افرادی نظیر فریز و کری در سال ۱۹۷۹ و جیمز در سال ۱۹۷۳ ارائه شده است. در هر

بخش آبی مولفه i ($i=1,2,\dots$)، مدل به صورت رابطه (۴-۴) می باشد:

$$\frac{\partial(\phi C_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b C_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{jk} \frac{\partial C_i}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (q_j C_i) + q_{re} C_i \pm S \quad (4-4)$$

که در رابطه بالا:

C_i : غلظت ذرات محلول (mol/m)

ρ_b : متوسط حجم توده (kg/m^3)

q_i : مولفه برداری حجمی فضاهای خالی پر شده از مایعات (m/s)

D_{jk} : تانسور پخش شدگی هیدرو دینامیکی (m^2/s)

X_j : مختصات کارتیزین (m)

q_{re} : سطح شارژ شده (m/s)

S : روابط و معادلات نفوذ

۴-۴-۴- پارامترهای ورودی مدل

به منظور بررسی فرآیند اکسیداسیون پیریت، مدل سازی یک بعدی با حجم محدود با

استفاده از نرم افزار (CHAM, 2000) PHOENICS version 3.6.1 انجام پذیرفت. پارامترهای ورودی

مدل سازی در جدول ۴-۱ آورده شده است.

فصل چهارم پیش بینی آلودگی حاصل از پساب های اسیدی با استفاده از روش مدل سازی ریاضی

جدول ۴-۱- پارامترهای ورودی مدل

طول مدل	۱۰ متر (در امتداد Z)
بستگی زمانی مدل	ناپایا
تعداد المانهای حجمی	۲۰ (طول یکسان ۰/۵ متر)
ضریب نفوذ مؤثر عامل اکسایش در آب	$(\frac{m^2}{s}) \times 10^{-11}$ [کاتلس و آپس، ۱۹۹۵]
بخش مولی پیریت	۲۵ / ۱۰۰ Kg pyrite/kg
دانسیته توده باطله	۱۶۵۰ kg/m ³
درصد پیریت باقیمانده	۷۵ درصد
شعاع ذرات پیریت	۲ سانتیمتر
تخلخل فضاهای پر شده از آب	۰/۲۲۵
سطح پیریت به واحد حجم باطله	۸۰ cm ⁻¹
ثابت درجه اول برای O ₂	$(\frac{m}{s}) \times 10^{-10}$ / ۸/۳
ثابت درجه اول برای Fe ⁺³	$(\frac{m}{s}) \times 10^{-8}$ / ۴/۴
بارندگی متوسط سالیانه	۰/۵ (m/yr)
ثابت اکسیداسیون شیمیایی Fe ⁺²	$(mol^2/(m^3)^2(s)) \times 10^{-10}$ / ۱/۳ و $K_2 = 1/7 \times 10^{-9} s^{-1}$

باید توجه نمود که جریان آب ورودی حاوی ۵۰ مول بر متر مکعب سولفات، و 10^{-2} مول بر متر مکعب یون H⁺ و فاقد یون آهن دو ظرفیتی و سه ظرفیتی است. آب موجود در ستون باطله در ابتدا حاوی ۰/۵ مول بر متر مکعب یون آهن دو ظرفیتی، ۵۰ مول بر متر مکعب سولفات، فاقد یون آهن سه ظرفیتی و 10^{-2} مول بر متر مکعب یون H⁺ است.

در سال ۱۹۸۴ جینز منظور بررسی اکسیداسیون پیریت و فرآیند های شستشو در معادن نواری بازسازی شده از مدلی به نام POLS که برنامه ای کامپیوتری بر اساس روش تفاوت های محدود است استفاده نموده است. در واقع او این مدل را در موارد مشابه و با داده های ورودی مشابه با مورد استفاده شده در این

مقاله را استفاده نموده است. نتایج بدست آمده از این مقاله با نتایج مدل POLS مقایسه شده است. در آزمایش ۱ و ۲ میزان تخلخل فضاهاى پر شده از هوا ۰/۰۹ و میزان پیچش ۱۰ در حالیکه در آزمایش سوم میزان تخلخل ۰/۱۸ و میزان پیچش ۵ در نظر گرفته شده است. میزان ضریب نفوذ مؤثر در آزمایش سوم ۴ برابر بزرگتر نسبت به ضریب استفاده شده در آزمایش اول است. فعالیت باکتریها تنها در مورد دوم مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۴-۵- شرایط مرزی مدل اکسیژن

در شرط مرزی نوع اول مقدار اکسیژن در ورودی مدل معادل با مقدار اکسیژن در اتمسفر در نظر گرفته می شود یعنی ۰/۲۱ بخش مولی (معادل با ۹ مول بر متر مکعب) در نظر گرفته شده است. شرط اولیه:

مقدار اکسیژن قبل از فرآیند مدلسازی در طول مدل صفر در نظر گرفته شده

شرط مرزی نوع اول در مرز خروجی مدل:

در انتهای مدل غلظت اکسیژن را معادل مقدار اولیه اش در پروفیل قرار می دهند که برابر صفر خواهد بود.

۴-۵-۶- شرایط مرزی آلاینده ها

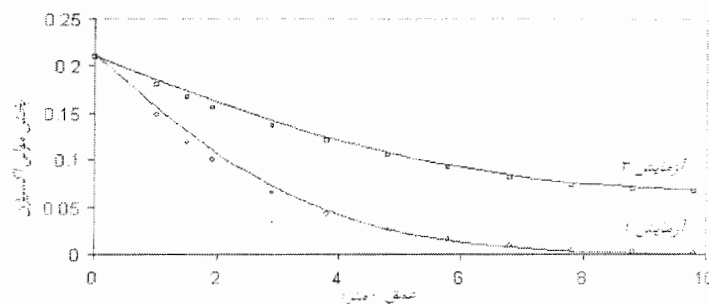
در ورودی مدل شرط مرزی نوع اول برای غلظت آلاینده ها در ابتدای ستون باطله در نظر گرفته

شده است که این مقدار معادل یونهای محلول موجود در آب ستون باطله است. در انتهای خروجی مدل

نیز شرط مرزی با غلظت صفر در نظر گرفته شده است.

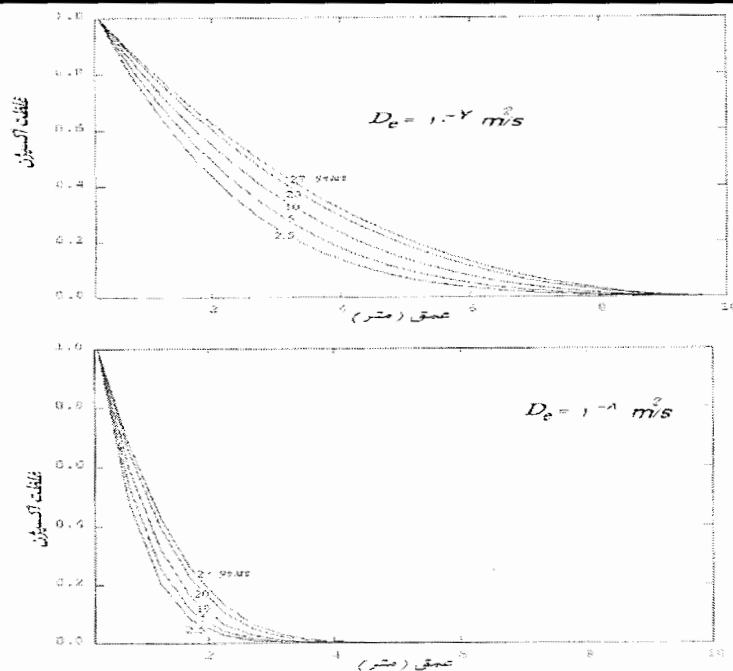
۷-۴-۴- نتایج مدل سازی

در این مورد تنها عامل اکسیداسیون شیمیایی، آهن دو ظرفیتی است که به عنوان تنها منبع تولید آهن سه ظرفیتی بکار رفته است. نتایج مربوط به مدل سازی آزمایش اول تغییرات میزان اکسیژن در عمق ستون باطله در شکل ۳-۴ آورده شده است. همانطوریکه هر چقدر میزان عمق ستون باطله افزایش یابد میزان اکسیژن نفوذی کمتر خواهد شد.



شکل ۳-۴ مقایسه نتایج مدل سازی با نرم افزار POLS (نقاط موجود در نمودار) با نتایج مدل سازی PHOENICS (خطوط پر در نمودار). مدت زمان شبیه سازی ۵ سال می باشد.

میزان ضریب نفوذ مؤثر در آزمایش سوم ۴ برابر بزرگتر است که این باعث می شود که اکسیژن با سرعت بیشتری در اعماق کم مصرف شده و در نهایت سبب افزایش سرعت اکسیداسیون پیریت گردد. نتایج حاصل از مدل سازی نرم افزار POLS انطباق و شباهت خوبی نسبت به نتایج حاصل از نرم افزار PHOENICS دارد. میزان حساسیت میزان اکسیژن با توجه به ضریب نفوذ مؤثر در شکل ۳-۴ مورد بررسی قرار گرفته شده است.



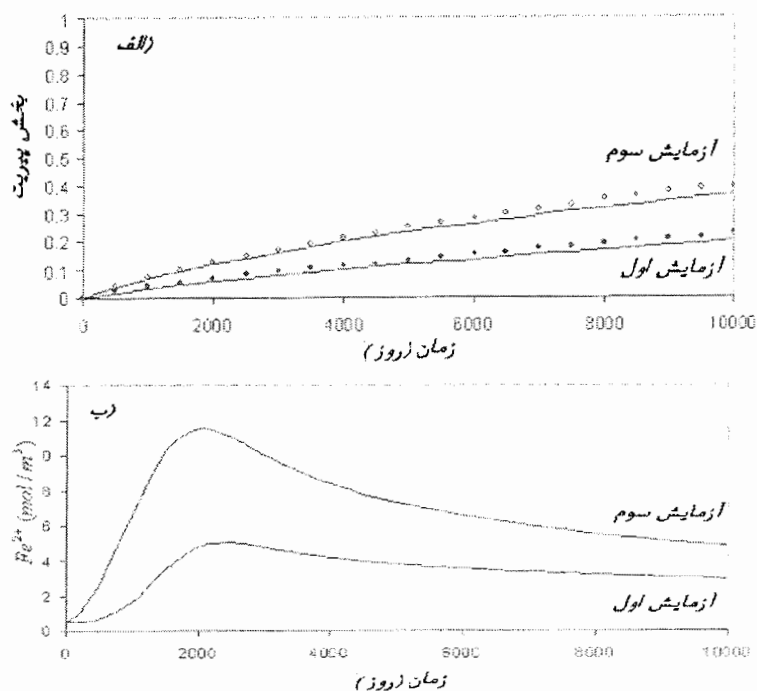
شکل ۴-۴- تغییرات غلظت اکسیژن نسبت به عمق با ضرایب نفوذ مؤثر متفاوت (مدت زمان شبیه سازی ۲۷ سال)

همانطوریکه در شکل ۴-۴ نیز دیده می شود، مقادیر ضریب نفوذ مؤثر کمتر باعث افزایش شیب نمودار و کاهش عمق نفوذ اکسیژن در ستون باطله ها می گردد.

میزان پیریت مصرفی در آزمایش اول در حدود ۲۰ درصد می باشد. مدت زمان در شبیه سازی بیشتر از ۲۷ سال در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل به نظر می رسد که در این آزمایش تنها عامل مؤثر انجام واکنش اکسیداسیون میزان اکسیژن می باشد. جینز نیز با انجام مدل سازی میزان مصرف پیریت را در همین مدت زمان چیزی در حدود ۲۲ درصد محاسبه نموده است. این تفاوت جزئی به دست آمده در نتایج مدل ها به خاطر نوع شکل ذرات می باشد. جینز در مدل POLS شکل ذرات را به صورت صفحه کم ضخامت فرض نموده است ولی در مدل سازی انجام شده با استفاده از نرم افزار

فصل چهارم پیش بینی آلودگی حاصل از پساب های اسیدی با استفاده از روش مدل سازی ریاضی

PHOENICS ذرات، کروی فرض شده اند. باید توجه نمود که ذرات در حالت اول مساحت سطح بیشتری نسبت به حالت کروی دارد. همانطوریکه در شکل ۴-۵-الف نیز مشاهده می شود میزان اکسیداسیون پیریت در آزمایش سوم به سبب ضریب نفوذ بیشتر، مقدار بیشتر نسبت به آزمایش اول دارد.

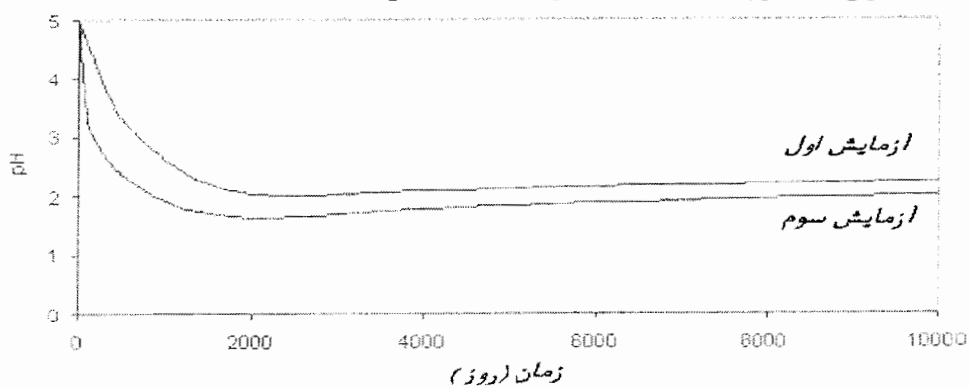


شکل ۴-۵-الف- مقادیر پیریت مصرفی با گذشت زمان در طول ستون باطله مربوط به آزمایش اول و سوم و مقایسه نتایج مدل سازی با نرم افزار POLS (نقاط موجود در نمودار) با نتایج مدل سازی PHOENICS (خطوط پر در نمودار). و همچنین تغییرات میزان آهن دو ظرفیتی با گذشت زمان در خروجی مدل.

در شکل ۴-۵- ب و ۴-۶ نیز به ترتیب عوامل غلظت آهن دو ظرفیتی و pH مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایش اول با گذشت زمان ۲۱۰۰ از فرآیند اکسیداسیون روز میزان غلظت آهن دو ظرفیتی تا ۵ مول بر متر مکعب افزایش یافته است و در مقابل میزان pH تا ۲/۰۲ کاهش می یابد. با گذشت ۲۷

فصل چهارم پیش بینی آلودگی حاصل از پساب های اسیدی با استفاده از روش مدل سازی ریاضی

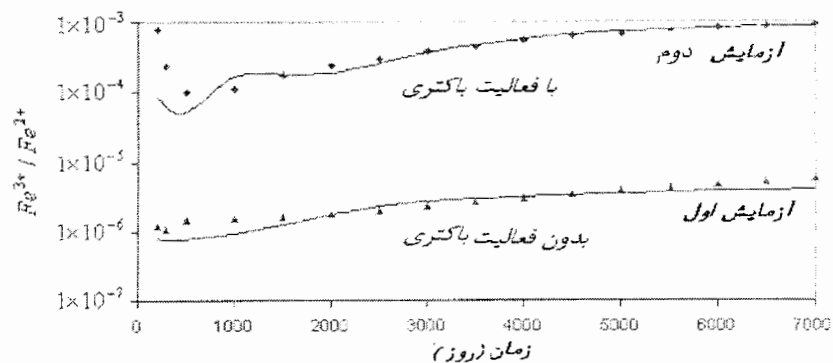
سال از زمان شبیه سازی به نظر می رسد که میزان غلظت آهن دو ظرفیتی تا ۲/۹۸ مول بر متر مکعب کاهش و در مقابل میزان pH تا ۲/۲۲ افزایش یافته است. در هر دو حالت نتایج مدل سازی با نتایج بدست آمده از مدل POLS انطباق و هماهنگی مطلوبی برخوردار است. در آزمایش سوم، با گذشت زمان ۲۱۰۰ و ۱۰۰۰۰ روز از فرآیند اکسیداسیون به ترتیب میزان غلظت آهن دو ظرفیتی تا ۱۱/۲ و ۴/۸۱ مول بر متر مکعب افزایش یافته است و در مقابل میزان pH تا ۱/۶۵ و ۲ در همین مدت زمان کاهش یافته است. در مورد آزمایش دوم باید توجه کرد که ضریب نفوذ مؤثر مسابه با آزمایش اول انتخاب شده است. در آزمایش دوم باکتریها نیز در فرآیند اکسیداسیون نقش داشته اند. باید توجه کرد که با وجود فعالیت باکتریها تغییر زیادی در میزان پیریت مصرفی وجود ندارد. دلیل این امر به سبب کاهش سریع pH است و میزان آن به زیر حد کمترین pH لازم برای انجام فعالیت باکتریها در اکسیداسیون می رسد. جینز نشان داده است که میزان pH لازم برای فعالیت باکتریها ۲/۵ تا ۴ می باشد.



شکل ۴-۶- تغییرات pH با گذشت زمان در خروجی مدل با استفاده از نتایج حاصل نرم افزار PHOENICS

در شکل ۴-۷ نسبت آهن سه ظرفیتی به آهن دو ظرفیتی در برابر گذشت زمان مربوط به آزمایش اول و دوم را نشان می دهد. نتایج به دست آمده از مدل سازی POLS از انطباق خوبی با نتایج بدست آمده از نرم

افزار PHOENICS برخوردار است



شکل ۴-۷- مقایسه مقادیر بدست آمده تغییرات نسبت آهن سه ظرفیتی به آهن دو ظرفیتی در خروجی مدل با توجه به حضور یا عدم حضور باکتری با استفاده از نتایج نرم افزار POLS (نقاط موجود در نمودار) و نرم افزار PHOENICS (خطوط پر در نمودار).

۴-۵-۸- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت پساب های اسیدی و نقش پیریت در تولید آن به نظر می رسد که بررسی فرایند اکسیداسیون امری اجتناب ناپذیر است. اکسیداسیون پیریت غالب موارد از مدل مغزّه منقبض شونده پیروی می کند. نفوذ گازی مهمترین منبع تولید اکسیژن در باطله می باشد. همانطور که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت اکسیژن در غیاب باکتری مهمترین عامل اکسیداسیون پیریت می باشد و مقادیر ضریب نفوذ مؤثر بر روی میزان نفوذ اکسیژن در باطله و همچنین فرآیند اکسیداسیون پیریت نقش مهمی را ایفا می نمایند.

- 1- "**Acid Mine Drainage. Mining & Pollution Issues In BC**". [www.utoronto.ca /env /libhold /db1/files/9706.htm](http://www.utoronto.ca/env/libhold/db1/files/9706.htm).
- 2- **McGinnes. S. 1999. "Treatment of Acid Mine Drainage "**. Science and Environment Section, House of Commons Library, [www. Pardiament. uk/commons/lib/research/rp99](http://www.Pardiament.uk/commons/lib/research/rp99).
- 3- **Seinmaus.M. "AcidMineDrainage"**, MondayCreekResorationProject , www.mondaycreek.org.
- 4- "**Clear Solution**". 2002.[www.earthsystems. com.au/ downloads /clearsolution](http://www.earthsystems.com.au/downloads/clearsolution).
- 5- **Diz.H.R. 1998. "Chemical and Biological Treatment of Acid Mine Drainage for The Removal of Heavy Metals and Acidity"** . [www.scholar. lib.vt.edu /theses /available/etd-81697-135443/unrestricted/etd](http://www.scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-81697-135443/unrestricted/etd).
- 6- "**Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction**". 1994.U.S.Environmental Protection Agency Office of Solid Waste ,EPA 530-94-036.
- 7- **Mitchell.P."Prediction,Prevention Control, and Treatment of Acid Rock Drainage In :Enviromental Policy in Mining Corporate Strategy and Planning for Clousure"**.2000.Edited by :Warhurst.A,Noronha.L , Chapter 7 , p.p.117-144.Lewies publishers.
- 8- **Salmone . S-Phd student . 2001."Case Study: Modelling of Acid Mine Drainage (AMD)"**. Land and Water Resources Engineering Environmental Dynamics:Chemical Processes.
- 9- **Mills.C. 2002. " Acid Rock Drainage Prediction"**.www.edumine.com.
- 10- **DRAFT"Appendix C:Characterization of Ore , WasteRock ,and Tailing"** Report Posted on the Website, [http://www.yosemite. epa.gov/r10 /water.nsf](http://www.yosemite.epa.gov/r10/water.nsf).
- 11- **Hammarstrom.J.M, Piatak .N.M., Seal.R.R., Briggs.P.H., Meier.A.L., Muzik.T.L. 2003. " Geochemical Characteristics of TP3 Mine Wastes at the Elizabeth Copper Mine Superfund Site,Orang Co., Vermont"**.Open-File Report,USGS.
- 12- **Hammarstrom.J.M., Piatak.N.M.,Seal.R.R, Briggs.P.H.,Meier.A.L., Muzik.T.L.,Jacson.J.C. 2004." Geochemical Characteristics of TP3 Mine Wastes at the Ely Copper Mine Superfund Site,Orang Co., Vermont"**.Open- File Report, USGS.
- 13- "**Submarine Tailing Disposal, Toolkit Introduction**". 2003.[www.moles.org/projectunderground/reports/stdtoolkit 0702](http://www.moles.org/projectunderground/reports/stdtoolkit0702)

- 14- Cruz.R.,Bertrand.V.,Monroy.M.,Gonzalez.I. 2000. "**Effect of Sulfide Impurities on the Reactivity of Pyrite and Pyritic Concentrates:a Multi-tool approach**".
- 15- Ron L.S. 2003."**Strategies for Minimization and Management of Acid Rock Drainage and other Mining-influenced Waters In:Mineral Processing Plant Design,Practice,andProceedings**". Edited by Mular.A,Derekj. B,doug.N. Halbecontrol-volume 2-SME-Chapter15,p.p.1886-1901.
- 16- Lowrie R.L. 2002."**SME Mining References Handbook ,Chapter 22**".p.p. 401-403.
- 17- Sobek.A.,Schuller.W.j.,Smith.R. 1978."**Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoil**".EPA600/2-78-054.
- 18-Bruynesteyn.A.,Hackl.R.P. 1984. "**Evaluation of Acid Production Potential of Mining Waste Materials, Mineral and the Enviroment**". volume 4, p.p.5-8.
- ۱۹-قادرى.م. ۱۳۸۲."مرورى بر روشهاى آزمايشهاى استاتيكي و ديناميكي قابليت توليد و خنثى سازى زهاب اسيدى معادن ذغال".سینار کارشناسی ارشد. دانشکده معدن،متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- 20- Miller.S.,Robertson.A.,Donahue.T. 1997."**Advances in Acid Drainage Prediction Using the Net Acid Generation Test**".Proceeding of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage , Vancouver, BC,p.p.533-549.
- 21- Ridge.T.,Governor.J. 1998."**Coal Mine Drainage Predicton and Pollution Prevention in Pensylvania**". www.wvu.edu/~agexten/landrec/PBrady.
- 22-"**DRAFT Acid Rock Drainage Technical Guide**".1989.British Columbia Acid Mine DrainageTask Force Report,volume 1.
- 23- Mills.C. 1998. "**Kinetic Testwork Procedures**".Reported on the Website <http://www.enviromine.com/ard/Kinetic/Test/>.
- 24- Berhard.D. 2000."**Basic Concepts in Enviromental Geochemistry of Sulfide Mine Waste**".UNESKO Society of Economic Geologists(SEG).
- 25- "**Abandoned Minesite Characterization and Clean up Handbook**". 2001. EPA.www.epa.gov/superfund/resources/remedy/pdf/amsccch.
- 26-Kleinmann.R.L.P. 2001. "**Prediction of Water Quality at Surface Coal Mines**".The National Mine Land Reclamation Center.

- 27- Brady.K.B.,Smith.M.W. 1990."Effectiveness of the Addition of Alkaline Materials at Surface Coal Mine in Preventing or Abating Acid Mine Drainage ".1 and 2 Proceeding of the 1990 Mining and Reclamation Conference and Exhibition volume 1.
- 28- Hezarkhani.A. 2002. "Mass Change During Hydrothermal Alteration /Mineralization in a Porphyry Copper Deposit , Eastern Sungun, Northwestern Iran". Department of Mining,Metallurgy and Petroleum Engineering,AmirkabirUniversity.
- 29- Hezarkhani.A.,Williams-Jones .A.E. 1998. " Control of Alteration and Mineralization in the Sungun Porphyry Copper Deposit ,Iran:Evidence from Fluid Inclusions and Stable Isotopes". Department of Mining,Metallurgy and Petroleum Engineering,AmirkabirUniversity.
- 30- Calagari.A.A. 2002. "Stable Isotope (S,O,HandC)Studies of the Phyllic and Potassic-Phyllic Alteration Zone of the Porphyry Copper Deposit at Sungun ,East Azarbaijan,Iran". Department of Geology , Natural Science Faculty,Tabriz University. Tabriz 51664 . Iran.
- 31- Price.W.A. 1997.DRAFT"Guidelines and Recommended Methods for the Prediction of Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Mine Site in British Columbia".Smithers .BC,143pp.

۳۲- باباخانی. ا. ۱۳۷۰."مطالعات زمین شناسی،پترولوژی و لیتوژئولوژی کانسار مس مولیبدنسونگون"، شرکت ملی خدمات اکتشافی کشور(گزارش داخلی).

۳۳- قادری.م. ۱۳۷۰."بررسی زمین شناسی اقتصادی کانسار مس سونگون اهر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی.

۳۴- صفری. ا. ۱۳۷۴."منشاء کانی شناسی و آلتراسیون در کانسار پرفیری مس- مولیبدن سونگون (اهر)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی.

۳۵- "مطالعه امکان پذیری نهایی کانسار مس پرفیری سونگون ،جلد اول : گزارش زمین شناسی و اکتشاف".۱۳۷۴. ایتوک(مشاوران مهندسی و تکنولوژی در صنایع و معادن).

- 36-Benson A. K., Payne K. L., and Stubben M. A. 1997, **Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods—A case study** GEOPHYSICS, VOL. 62, NO. 1; pp. 80–86
- ۳۷- دولتی ارده جانی، ف؛ شفائی تنکابنی، سیدض؛ میر حبیبی، ع و بدیعی، خ (۱۳۸۳). بیوتکنولوژی، ژئوشیمی زیست محیطی و مدیریت پساب ها: جلد اول- پساب های معدنی، پژوهشکده صنایع رنگ ایران، چاپ دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۴۸-۱ ص.
- 38-Doulati Ardejani F., Singh R.N. and Baafi E.Y. 2002. **A numerical finite volume model for prediction of pollution potential of open cut mine backfill**. 6th Annual Environmental Engineering Research Event 2002 conference, Blackheath NSW, Australia, ISBN: 0-9580158-1-3.
- 39- Doulati Ardejani, F., Singh, R.N. and Baafi, E.Y. 2004. **Use of PHOENICS for solving one dimensional mine pollution problems**. The PHOENICS Journal: Computational Fluid Dynamics & its applications, Volume 16, CHAM, UK, p 23.