

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

مطالعات زیست محیطی روی انتشار آلودگی از مواد حاصل از شستشوی کارخانه زغالشویی

البرز شرقی با استفاده از مدل سازی دو بعدی ریاضی و مطالعات ژئوفیزیکی

ارائه دهنده:

مهدی زارع

اساتید راهنما:

دکتر فرامرز دولتی ارده جانی – دکتر علی مرادزاده

استاد مشاور:

دکتر اسماعیل سلیمانی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم بہ:

خانوادہ مہربان و عزیزم کہ با صبر، حوصلہ و تشویق ہائیشان
باعث دلگرمی می شدند.

مشکر و قدردانی

سپاس پروردگار کریم را که بر بنده حقیرش منت نهاد تا بتوانی مضاعف گام‌هایی هر چند کوتاه ولی استوار در جهت پیشبرد علوم که گذری است در راستای تعالی بشریت بردارم.

در ابتدا بر خود لازم می‌دارم از زحمات و مساعدت‌های بی‌دریغ اساتید بزرگوارم جناب آقایان دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی و دکتر علی مرادزاده که در طول اجرای این تحقیق با دانش و مینش خویش، بنده را یاری نمودند، مشکر و قدردانی نمایم.

همچنین جا دارد از جناب آقای دکتر اسماعیل سلیمانی کمال مشکر و قدردانی را به عمل آورم که به عنوان مشاور در تمام مراحل کار صمیمانه مرا یاری نمودند. از اساتید محترم جناب آقای دکتر ایرج پیروز و سرکار خانم دکتر آرزو جلدی که علی‌رغم مشغله‌های فراوان خویش، زحمت داوری پایان نامه را قبول کردند، کمال مشکر را دارم.

از جناب آقای مهندس کریم نژاد مدیر عامل محترم شرکت زغال سنگ البرز شرقی به خاطر حمایت‌های علمی بی‌دینشان، کمال سپاسگذاری می‌نمایم. از جناب آقای مهندس عباسی، رئیس کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی به خاطر همکاری‌های مفید و ارزنده‌شان مشکر و قدردانی می‌نمایم. در پایان از کلیه عزیزانی که بنده را در مراحل انجام عملیات صحرایی ژئوفیزیکی، آزمایشگاهی و کاژ آرای تکمیل و یاری نمودند، مراتب سپاسگذاری را ابراز می‌نمایم.

همدی زارع

تابستان ۱۳۸۷

چکیده

در نتیجه شستشوی زغال سنگ قسمتی از زغال به عنوان مواد باطله تولید که این نوع مواد اغلب حاوی مواد سولفیدی خصوصاً پیریت می‌باشند. حضور پیریت در مجاورت آب و هوا سبب اکسیداسیون مستقیم و در نهایت تولید پساب اسیدی (Acid mine drainage) در منطقه می‌گردد. نفوذ AMD به آب‌های سطحی و زیرزمینی به علت داشتن غلظت بالایی از آهن، سولفات و همچنین PH پایین، خطر مهمی برای آلودگی منطقه تلقی می‌شود. در نتیجه، انبار کردن حجم عظیمی از باطله‌های زغال امکان ایجاد اثرات نامطلوب بر محیط‌زیست را فراهم می‌کند. هدف از این بررسی، انجام مطالعات زیست‌محیطی بر روی آلودگی احتمالی ناشی از باطله‌های کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی ایران با استفاده از مدل‌سازی ریاضی مکانیزم حاکم بر اکسیداسیون پیریت و انتشار آلودگی و همچنین شناسایی مناطق آلوده شده و تعیین گسترش سطحی و عمقی آنها با برداشت و مدل‌سازی عددی داده‌های ژئوفیزیکی روش مقاومت ویژه و الکترومغناطیس با فرکانس بسیار پایین (VLF-EM) از دیگر اهداف مطالعه در محدوده انباشت دمپ باطله‌های زغال است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی و روش‌های ژئوفیزیکی حاکی بر تولید پساب اسیدی و نشت محصولات اکسیداسیون به مناطق پایین دست و علی‌الخصوص منابع آب زیرزمینی می‌باشد که به نوبه خود می‌تواند محیط‌زیست منطقه را تحدید نماید. اگر چه فرآیند اکسیداسیون پیریت و تولید آلودگی در ارتباط با دمپ باطله کارخانه زغال‌شویی امری اجتناب ناپذیر است ولی نتایج حاصل از چنین مطالعاتی می‌تواند در ارائه یک برنامه مدیریت زیست‌محیطی مناسب، جهت کنترل آلودگی مفید واقع گردد.

فهرست

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۱-۲- مشکلات زیست محیطی ناشی از انباشت باطله‌های زغال شویی ۳
- ۱-۳- سوابق مطالعات انجام شده ۴
- ۱-۳-۱- کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات زیست محیطی ۴
- ۱-۳-۲- بررسی مکانیزم تولید آلودگی توسط مدل‌سازی ریاضی ۶
- ۱-۴- اهداف ۸
- ۱-۵- روش تحقیق ۹
- ۱-۶- ساختار پایان‌نامه ۱۱

فصل دوم: مشکلات زیست محیطی زغال و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی

- ۲-۱- زغال سنگ ۱۳
- ۲-۲- اهمیت شستشوی زغال سنگ ۱۴
- ۲-۳- نقش پیریت در آلودگی‌های زیست محیطی ۱۴
- ۲-۴- نحوه اکسیداسیون پیریت و تشکیل پساب اسیدی ۱۶
- ۲-۵- اثرات زیست محیطی ناشی از پساب اسیدی ۱۸
- ۲-۶- منابع تشکیل پساب اسیدی ۱۹
- ۲-۷- عوامل مؤثر در تولید پساب اسیدی ۲۱
- ۲-۷-۱- عوامل اولیه ۲۲
- ۲-۷-۲- عوامل ثانویه ۲۲
- ۲-۷-۳- عوامل ثالثیه ۲۳
- ۲-۸- پیش‌بینی امکان تولید و تعیین پتانسیل پساب اسیدی ۲۵
- ۲-۸-۱- نمونه‌برداری ۲۵
- ۲-۸-۲- آزمایش‌های استاتیکی ۲۶

- ۲-۸-۳- آزمایش‌های سینتیکی ۲۶
- ۲-۸-۴- تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها ۲۷
- ۲-۹- موقعیت جغرافیایی محل مورد بررسی ۲۷
- ۲-۱۰- زمین‌شناسی منطقه ۲۹
- ۲-۱۱- منابع آب زیرزمینی ۲۹
- ۲-۱۲- هوا اقلیم ۳۱
- ۲-۱۳- بارندگی ۳۱
- ۲-۱۴- کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی ۳۲
- ۲-۱۵- موقعیت و نحوه انباشت باطله‌های زغال‌شویی ۳۲
- ۲-۱۵-۱- طرز انباشت باطله‌های دستگاه جیگ ۳۳
- ۲-۱۵-۲- طرز انباشت باطله‌های فلوتاسیون ۳۳
- ۲-۱۶- انتخاب محل مورد مطالعه ۳۴

فصل سوم: مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی

- ۳-۱- مقدمه ۳۶
- ۳-۲- نمونه‌برداری ۳۶
- ۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و تبدیل آنها به محلول ۳۷
- ۳-۴- آنالیز جذب اتمی و تعیین میزان پیریت ۴۱
- ۳-۵- تعیین میزان نفوذ اکسیژن در دمپ باطله ۴۴

فصل چهارم: مدلسازی ریاضی فرآیند اکسایش پیریت و تولید آلودگی

- ۴-۱- مقدمه ۴۷
- ۴-۲- تعریف مدل ۴۷
- ۴-۳- مدل‌های ریاضی ۴۸
- ۴-۳-۱- روش‌های عددی ۴۸

۴۹	۴-۴- مراحل مدل سازی با نرم افزار <i>PHOENICS</i>
۴۹	۵-۴- معادله اکسید شدن پیریت
۵۱	۶-۴- معادله نفوذ اکسیژن در دمپ باطله ها
۵۲	۷-۴- پارامترهای ورودی مدل
۵۳	۸-۴- شرایط مرزی
۵۴	۴-۸-۱- شرایط مرزی برای مدل اکسیژن و اکسایش پیریت
۵۵	۹-۴- مدل سازی یک بعدی نفوذ اکسیژن و اکسیداسیون پیریت در دمپ باطله
۵۵	۴-۹-۱- نتایج مدل سازی یک بعدی نمونه اول
۵۷	۴-۹-۲- نتایج مدل سازی یک بعدی نمونه دوم
۵۹	۴-۱۰-۱- آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در اکسیداسیون پیریت
۵۹	۴-۱۰-۱- آنالیز حساسیت مدل سازی برای نمونه دوم
۶۳	۴-۱۱-۱- مدل سازی دو بعدی ریاضی
۶۳	۴-۱۱-۱- تنظیمات مدل و پارامتر ورودی
۶۴	۴-۱۲- نتایج مدل سازی دو بعدی ریاضی
۶۸	۴-۱۳- نتایج

فصل پنجم: مطالعات ژئوفیزیکی زیست محیطی

۷۰	۵-۱- مقدمه
۷۱	۵-۲- مقدمه ای بر روش <i>VLF</i>
۷۲	۵-۳- فرستنده های <i>VLF</i>
۷۳	۵-۴- اصول اندازه گیری <i>VLF</i>
۷۳	۵-۴-۱- روابط فاز و دامنه
۷۴	۵-۴-۲- قطبش بیضی وار
۷۵	۵-۴-۳- متد زاویه شیب
۷۷	۵-۵- روش های تفسیر اندازه گیری های <i>VLF</i>

۷۹	۵-۶- محل و موقعیت پروفیل های برداشتی
۷۹	۵-۷- نحوه برداشت داده های <i>VLF</i>
۸۱	۵-۸- تعبیر و تفسیر یافته های <i>VLF</i>
۸۲	۵-۸-۱- پروفیل اول
۸۳	۵-۸-۱- پروفیل دوم
۸۳	۵-۸-۳- پروفیل سوم
۸۷	۵-۸-۴- پروفیل چهارم
۸۷	۵-۹- نتایج
۸۷	۵-۱۰- تعیین سطح آب زیرزمینی منطقه
۸۹	۵-۱۰-۱- دستگاهها و تجهیزات مورد استفاده
۹۰	۵-۱۰-۲- ارائه داده ها و تفسیر کیفی آنها
۹۱	۵-۱۰-۳- مدل سازی یک بعدی و تفسیر کمی داده ها
۹۵	۵-۱۱- مقدمه ای بر برداشت های سه بعدی
۹۶	۵-۱۲- اصول اندازه گیری در برداشت های سه بعدی
۹۷	۵-۱۳- انواع آرایه های مورد استفاده در برداشت های سه بعدی
۹۷	۵-۱۳-۱- مقایسه آرایه ها
۹۸	۵-۱۴- طراحی شبکه برداشت سه بعدی داده ها
۹۸	۵-۱۵- مطالعات ژئوالکتریکی بر روی آلودگی احتمالی باطله های زغال شویی البرز شرقی
۱۰۱	۵-۱۶- مدل سازی و تفسیر داده های سه بعدی

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۰۸	۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری مطالب
۱۱۰	۶-۲- پیشنهادات
۱۱۴	فهرست منابع

پیوست‌ها

- پیوست الف) فرآیند زغال‌شویی در کارخانه..... ۱۲۱
- پیوست ب) نرم افزار *PHOENICS*..... ۱۲۵
- پیوست ج) *VLF*..... ۱۲۸
- پیوست د) *RESIX-IP*..... ۱۳۴
- پیوست و) انواع آرایه‌های مورد استفاده و معرفی نرم افزار *RES3DINV*..... ۱۴۱
- پیوست ز) عکس‌هایی مربوط به عملیات صحرائی..... ۱۵۱

فهرست شکل‌ها

فصل اول

۱-۱- فلوجارت مراحل مختلف روش انجام کار..... ۱۰

فصل دوم

۱-۲- نمونه‌ای از پساب اسیدی تولید شده..... ۱۷

۲-۲- انواع باطله‌های معدنی..... ۲۱

۳-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی..... ۲۸

۴-۲- بخشی از نقشه زمین شناسی شاهرود با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰..... ۳۰

۵-۲- نمایی از باطله‌های انباشتی دستگاه جیگ..... ۳۳

۶-۲- نمایی از باطله‌های انباشتی در پشت سد باطله موجود..... ۳۴

فصل سوم

۱-۳- فلوجارت مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها..... ۴۰

۲-۳- نمودار خطی جذب محلول بر حسب غلظت آهن به مقیاس *ppm*..... ۴۲

۳-۳- درصد آهن و پیریت باقی‌مانده برای عمق‌های مختلف از دو محل نمونه‌برداری شده..... ۴۵

۴-۳- نمودار رگرسیون بر روی درصد مقادیر پیریت باقی‌مانده برای دو محل..... ۴۵

فصل چهارم

۱-۴- مکانیزم اکسید شدن پیریت از نوع سینتیک درجه اول..... ۵۰

۲-۴- مش حجم‌های محدود دمپ باطله..... ۵۴

۳-۴- مقایسه داده‌های صحرایی و پیش‌بینی مدل برای تعیین درصد پیریت باقیمانده نسبت به عمق

باطله در نمونه اول..... ۵۶

- ۴-۴- نتیجه مدل برای بخش مولی اکسیژن نسبت به عمق باطله..... ۵۷
- ۴-۵- مقایسه داده های صحرایی و پیش‌بینی مدل برای تعیین درصد پیریت باقیمانده نسبت به عمق باطله در نمونه دوم..... ۵۸
- ۴-۶- پیش‌بینی مدل عددی برای بخش مولی اکسیژن نسبت به عمق باطله..... ۵۹
- ۴-۷- مقایسه داده های صحرایی و پیش‌بینی‌های مدل برای تعیین درصد پیریت باقیمانده نسبت به عمق باطله‌ها به صورت تابعی از ضریب نفوذ مؤثر اکسیژن در باطله‌ها، مربوط به نمونه دوم..... ۶۰
- ۴-۸- تغییرات درصد اکسیژن در طول مدل با ضرایب نفوذ مؤثر مختلف..... ۶۱
- ۴-۹- تغییرات درصد پیریت باقی‌مانده در طول مدل به صورت تابعی از سطح واحد حجم باطله‌های حاوی پیریت..... ۶۲
- ۴-۱۰- تغییرات درصد پیریت باقی‌مانده در طول مدل با زمان‌های شبیه‌سازی مختلف..... ۶۲
- ۴-۱۱- مدل حجم‌های محدود دمپ باطله کارخانه زغال‌شویی..... ۶۴
- ۴-۱۲- پیش‌بینی دو بعدی برای مقدار اکسیژن نفوذی به داخل دمپ بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی..... ۶۵
- ۴-۱۳- پیش‌بینی مدل دو بعدی برای درصد پیریت باقیمانده در باطله‌ها بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی..... ۶۵
- ۴-۱۴- پیش‌بینی مدل برای pH بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی..... ۶۶
- ۴-۱۵- پیش‌بینی مدل عددی برای غلظت SO_4^{2-} بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی..... ۶۷
- ۴-۱۶- پیش‌بینی مدل عددی دو بعدی برای غلظت Fe^{2+} بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی..... ۶۷
- ۴-۱۷- پیش‌بینی مدل عددی دو بعدی برای غلظت Fe^{3+} بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی..... ۶۸

فصل پنجم

- ۵-۱- موقعیت مهمترین فرستنده های VLF ۷۲
- ۵-۲- موقعیت فرستنده و زون هادی و نحوه ایجاد میدان ثانویه (القایی) مغناطیسی..... ۷۳
- ۵-۳- روابط فاز و دامنه امواج اولیه و ثانویه به همراه مولفه‌های آنها..... ۷۵
- ۵-۴- پارامترهای بیضی پلاریزان..... ۷۵
- ۵-۵- نحوه ایجاد میدان‌های ثانویه با امواج VLF و تغییرات زاویه شیب..... ۷۶
- ۵-۶- محل زون رسانا حاصل از پاسخ زون به میدان VLF ۷۸

- ۷-۵- موقعیت پروفیل‌های برداشتی و نحوه اندازه‌گیری داده‌های VLF ۸۰
- ۸-۵- نمودار خام، فیلتر شده و شبه مقطع عرضی چگالی جریان داده‌های VLF پروفیل اول ۸۴
- ۹-۵- نمودار خام، فیلتر شده و شبه مقطع عرضی چگالی جریان داده‌های VLF پروفیل دوم ۸۵
- ۱۰-۵- نمودار خام، فیلتر شده و شبه مقطع عرضی چگالی جریان داده‌های VLF پروفیل سوم ۸۶
- ۱۱-۵- نمودار خام، فیلتر شده و شبه مقطع عرضی چگالی جریان داده‌های VLF پروفیل چهارم ۸۸
- ۱۲-۵- نمایی از گسترش زون آلوده و پروفیل‌های اندازه‌گیری شده نسب به دمپ باطله زغال ۸۹
- ۱۳-۵- نتایج سونداژ زنی بر روی سه محل (S_1 ، S_2 و S_3) ۹۰
- ۱۴-۵- نتایج مدل‌سازی هموار داده‌های سونداژ S_1 ۹۲
- ۱۵-۵- نتایج مدل‌سازی معکوس پارامتری داده‌های سونداژ S_1 ۹۳
- ۱۶-۵- مدل‌های هم ارز حاصل از مدل‌سازی معکوس پارامتری داده‌های سونداژ S_1 ۹۴
- ۱۷-۵- نحوه قرارگیری الکترودها برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در برداشت سه بعدی ۹۶
- ۱۸-۵- نحوه قرارگیری الکترودها جهت بررسی انتشار آلودگی در برداشت سه بعدی ۹۹
- ۱۹-۵- اندازه‌گیری مقاومت ویژه با آرایش قطبی - دوقطبی برای حالت رفت به ازای ۶ الکتروود ۱۰۰
- ۲۰-۵- اندازه‌گیری مقاومت ویژه با آرایش قطبی - دوقطبی برای حالت رفت و برگشت به ازای ۶ الکتروود ۱۰۰
- ۲۱-۵- مقاطع افقی مقاومت ویژه بدست آمده از مدل‌سازی معکوس توسط نرم افزار $RES3DINV$ ۱۰۲
- ۲۲-۵- مقاطع قائم مقاومت ویژه (در امتداد محور X) حاصل از مدل‌سازی سه بعدی با نرم افزار ۱۰۳
- ۲۳-۵- مقاطع قائم مقاومت ویژه (در امتداد محور Y) حاصل از مدل‌سازی سه بعدی با نرم افزار ۱۰۴
- ۲۴-۵- بلوک سه بعدی بدست آمده توسط نرم افزار $Slicer/Dicer$ ۱۰۵
- ۲۵-۵- موقعیت اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی نسبت به هم ۱۰۵
- ۲۶-۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی VLF و مقاومت ویژه در محدوده پروفیل سوم ۱۰۶

فهرست جداول

فصل دوم

- ۱-۲- تفاوت آب‌های اسیدی در معادن و باران‌های اسیدی..... ۱۵
- ۲-۲- کانی‌های سولفید فلزی مؤثر در تولید پساب..... ۱۸
- ۳-۲- مقادیر بعضی از پارامترهای شیمیایی در پساب اسیدی معدن در ایالات متحده و کانادا..... ۲۰
- ۴-۲- عوامل مؤثر در تولید اسید در باطله‌های معدنی و باطله‌های کانه‌آرایی..... ۲۴
- ۵-۲- مشخصات آماری بارندگی‌های سالانه ایستگاه‌های هواشناسی منطقه..... ۳۱
- ۶-۲- موقعیت و نحوه انباشت باطله‌های کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی..... ۳۲

فصل سوم

- ۱-۳- مشخصات نمونه‌های برداشت شده..... ۳۷
- ۲-۳- نتایج تجزیه سرندي نمونه برداشت شده از محل اول..... ۳۹
- ۳-۳- نتایج تجزیه سرندي نمونه برداشت شده از محل دوم..... ۳۹
- ۴-۳- مقادیر اندازه‌گیری شده آهن و پیریت موجود در نمونه‌ها (محل نمونه‌برداری اول)..... ۴۳
- ۵-۳- مقادیر اندازه‌گیری شده آهن و پیریت موجود در نمونه‌ها (محل نمونه‌برداری دوم)..... ۴۳

فصل چهارم

- ۱-۴- پارامترهای ورودی مدل..... ۵۳
- ۲-۴- گونه‌های شیمیایی مورد استفاده در مدل‌سازی دو بعدی ریاضی..... ۶۳

فصل پنجم

- ۱-۵- طول پروفیل‌ها و تعداد نقاط برداشتی..... ۸۱
- ۲-۵- نتایج مدل‌سازی یک بعدی داده‌های اندازه‌گیری شده سه سونداژ..... ۹۴

۱-۱- مقدمه

آلودگی‌های زیست‌محیطی نتیجه فعالیت‌های مختلف بشری است که از جمله مهمترین آنها می‌توان به فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، معدنی، دفن باطله‌ها و راه یافتن شیرابه‌ها و محلول‌های مضر به سفره‌های آب زیرزمینی اشاره کرد. امروزه، تقریباً در تمامی کشورهای دنیا، این موضوع باعث نگرانی و توجه عموم جامعه به ویژه سیاستمداران و کارشناسان شده است. سرمایه‌گذاری‌های عظیم و ارائه طرح‌های جدید و مدرن برای حل یا کاهش سریع این مشکل در کشورهای پیشرفته، خود گویای این توجه و نگرانی می‌باشد.

توسعه صنایع و رشد اقتصادی، منجر به تولید مقادیر عظیمی از باطله و محصولات جانبی بی‌ارزش شده است که می‌توانند منشأ پدید آمدن مشکلات زیست‌محیطی مختلفی شوند. باطله‌های مربوط به صنعت معدن کاری شامل سنگ‌هایی هستند که بعد از جدا کردن کانی‌های با ارزش از سنگ معدن باقی می‌مانند. در طی سال‌های بهره‌برداری از معدن، به تدریج کیفیت کانسنگ در اثر استخراج ذخایر پرعیار، کاهش یافته و در نتیجه میزان باطله تولید شده مرتباً افزایش می‌یابد. انباشت باطله‌های معدنی^۱ و خصوصاً باطله‌های حاصل از مراحل مختلف فرآوری^۲، اهمیت به سزایی در معدن کاری داشته و لازم است تا توجه ویژه‌ای به آنها مبذول گردد. خصوصاً با توجه به حجم بالای باطله‌های تولیدی و همچنین مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از آنها، اهمیت بررسی آنها به وضوح مشخص می‌گردد.

^۱ - Mine Waste or Gangues

^۲ - Tailing

۱-۲- مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انباشت باطله‌های زغال‌شویی

سوخت‌های فسیلی که از منابع اصلی و متداول تولید انرژی به شمار می‌روند عمدتاً، شامل نفت خام، گاز طبیعی و زغال سنگ می‌باشند. با توجه به محدود بودن ذخایر گاز طبیعی و عدم دسترسی اکثر کشورها به آن، عمده‌ترین سوخت‌های فسیلی رایج در جهان، نفت و زغال سنگ بوده که انتظار می‌رود به علل روند رو به کاهش تولید نفت، تولید زغال سنگ در آینده رشد تصاعدی داشته باشد. به دلیل حضور ناخالصی‌های مضر همراه زغال استخراجی، شستشوی آنها امری ضروری تلقی می‌شود. در نتیجه شستشوی زغال، قسمتی به عنوان باطله زغال ایجاد می‌شود. این مواد باطله اغلب حاوی مواد سولفیدی و اکسیدی می‌باشند و معمولاً آغشته به انواع مواد شیمیایی نیز هستند که طی فرآیندهای شستشو ممکن است به آنها اضافه شود و سازگار با محیط زیست نمی‌باشند. انبار کردن حجم عظیمی از باطله‌های تولیدی از کارخانه زغال‌شویی، امکان ایجاد اثرات نامطلوب بر محیط زیست را فراهم می‌سازد. از جمله مشکلات، می‌توان به آلودگی خاک و آبریز زمینی در اثر تشکیل پساب (زه‌اب) اسیدی^۱ و همچنین آلودگی هوا ناشی از حضور مواد معلق زغال اشاره کرد. گاهی اوقات خودسوزی در باطله‌های انباشته شده زغال سنگ، باعث تولید گازهای مضر و سمی می‌گردد.

یکی از مهمترین مشکلات در ارتباط با باطله‌های زغال‌شویی همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد، تشکیل پساب اسیدی می‌باشد. به طور کلی پساب اسیدی در نتیجه اکسیداسیون مستقیم مواد سولفیدی (خصوصاً پیریت) همراه باطله‌های حاصل از فرآیند زغال‌شویی در مجاورت آب و هوا ایجاد می‌شوند که در این میان حضور نوعی از باکتری‌ها به نام تیوباسیلوس فرواکسیدان می‌تواند به عنوان کاتالیزور عمل کرده و نرخ اکسیداسیون پیریت و تولید پساب اسیدی را تا یک میلیون بار افزایش دهد [سینگ و دولتی ارده‌جانی، ۲۰۰۳]. AMD به دلیل داشتن pH پایین موجب بروز خطرات جبران ناپذیری بر روی آب و خاک منطقه می‌گردد. این چنین آلودگی‌هایی نه تنها حیات جانداران و موجودات زنده را با خطر مواجه می‌سازد بلکه یک عامل تهدید کننده برای حیات بشر نیز محسوب می‌شود.

^۱ - Acid Mine Drainage (AMD)

از این رو بررسی مکانیزم تولید و انتشار آلودگی، مدل سازی فرآیندهای درگیر، شناسایی مناطق آلوده و تعیین محدوده آنها برای به کنترل در آوردن و یا اجرای طرح های زیست محیطی مربوطه از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. این نتایج نیز می تواند بر طریقه انباشت و همچنین محلی که برای انباشت انتخاب می شود، کمک مؤثری کند.

۳-۱- سوابق مطالعات انجام شده

۳-۱-۱- کاربرد روش های ژئوفیزیکی در مطالعات زیست محیطی

در سال های اخیر، روش های ژئوفیزیکی خصوصاً روش های الکتریکی به طور چشم گیری به عنوان یک روش غیر مستقیم برای کنترل و بررسی آلودگی های زیست محیطی به کار گرفته شده اند. اگر چه قسمت اعظم این کارها را می توان با استفاده از چاه های مشاهده ای^۱ انجام داد، ولی هزینه عملیاتی مربوط به آنها بسیار بالاست. مزایای روش های الکتریکی نسبت به این روش ها سبب شده تا روش های ژئوفیزیکی الکتریکی، یک فن آوری جدید و پیشرفته و در ضمن غیر تهاجمی به طبیعت محسوب شوند، چرا که برای تعیین خصوصیات مذکور با استفاده از روش های حفاری و ترانشه زنی، تخریب طبیعت هر چند جزئی، اجتناب ناپذیر است.

الدنبرگ^۲ در سال ۱۹۹۶ با تلفیق مدل های حاصل از اندازه گیری مقاومت ویژه و قطبش القایی و مقایسه آنها با اطلاعات کیفی آب مانند میزان ذرات جامد معلق (TDS)^۳ آلودگی ناشی از دمپ های باطله مس را در شمال آمریکا به خوبی نشان دادند [الدنبرگ، ۱۹۹۶]. بنسون^۴ و همکاران، با بکارگیری و تلفیق نتایج به دست آمده از روش های مقاومت ویژه و VLF ، آلودگی ناشی از نشت فرآورده های نفتی را در شمال آمریکا مورد بررسی قرار دادند [بنسون و همکاران، ۱۹۹۷]. در سال ۲۰۰۱ کامکار روحانی، آلودگی های ناشی از باطله های تر کارخانه بوکسیت را با استفاده از روش های پروفیل زنی دوقطبی - دوقطبی با فواصل مختلف در ایالت استرالیای غربی مورد بررسی قرار داده است [کامکار

^۱ - Monitoring

^۲ - Oldenburg

^۳ - Total dissolved solids

^۴ - Benson

روحانی، ۲۰۰۱]. فارینگر^۱ در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش الکترومغناطیس کم عمق^۲، آلودگی ناشی از تشکیل پساب‌های اسیدی معدن (AMD) در لایه‌های زیرین معدن زغال زیرزمینی در ایالت ویرجینیا را مورد بررسی قرار داد [فارینگر، ۲۰۰۲]. هامک^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۳، اثرات زیست‌محیطی ناشی از دیو ایجاد شده از معدن گوگرد مرکوری^۴ در ایالات کالیفرنیا را با روش‌های ژئوفیزیکی مورد بررسی قرار دادند [هامک و همکاران، ۲۰۰۳].

مینالی^۵ در سال ۲۰۰۶ توسط روش‌های ژئوفیزیکی، بررسی‌های زیست‌محیطی و پایش را بر روی دو سد باطله آهن کیرونا^۶ و کریستنبرگ^۷ در بخش شمالی سوئد انجام داد [مینالی، ۲۰۰۶]. سوپیوز^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۶ [سوپیوز و همکاران، ۲۰۰۶] و فرید^۹ و همکاران در سال ۲۰۰۷ [فرید و همکاران، ۲۰۰۷]، محل دفع باطله و لندفیل‌ها را توسط روش‌های ژئوفیزیکی مورد ارزیابی قرار دادند. مرادزاده و همکاران در سال ۱۳۸۷، آلودگی ناشی از معدن کاری سرب و روی منطقه تاش را با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی *IP*، *VLF* و مقاومت ویژه مورد بررسی قرار دادند [مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۷].

در میان روش‌های ژئوفیزیکی مختلف، برداشت‌های سه بعدی ژئوفیزیکی به‌طور موفقیت آمیزی در بررسی‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کارهای کم و بیشی با استفاده از روش برداشت سه بعدی در دنیا انجام شده است. برای مثال، داهلین^{۱۰} و برنستون^{۱۱} در سال ۱۹۹۷ با استفاده از تکنیک برداشت سه بعدی، مطالعات ژئوفیزیکی را بر روی رسوبات لجن مدفون شده در یک منطقه وسیعی به نام لرناکن^{۱۲} در جنوب سوئد انجام دادند. با مروری بر منابع منتشر شده می‌توان گفت که استفاده از برداشت‌های سه بعدی ژئوفیزیکی در تعیین مناطق آلوده در ارتباط با

1- *Fahringer*

2 - *Shallow EM*

3 - *Hammack*

4 - *Mercury*

5 - *Mainiali*

6 - *Kiruna*

7 - *Kristineberg*

8 - *Soupios*

9 - *Frid*

10 - *Dahlin*

11 - *Bernstone*

12 - *Lernacken*

دمپ‌های باطله حاصل از فرآیند زغال‌شویی در هیچ نقطه‌ای از دنیا گزارش نشده است یا در صورت موجود بسیار محدود می‌باشد. هر چند برداشت‌های دو بعدی ژئوفیزیکی الکتریکی جهت تعیین آلودگی ناشی از محل دپوی باطله ایجاد شده از کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی انجام گرفته است [جدیری ۱۳۸۵] ولی با بررسی‌های سه بعدی در محل انباشت باطله‌های زغال‌شویی، می‌توان شدت، وسعت و گسترش آلودگی را در زیر سطح زمین با دقت بهتری مشخص نمود. در ایران نیز تاکنون برداشت‌هایی سه بعدی ژئوفیزیکی جهت بررسی انتشار آلودگی ناشی از باطله‌های معدنی صورت نگرفته است.

۱-۳-۲- بررسی مکانیزم تولید آلودگی توسط مدل‌سازی ریاضی

همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، مهمترین دلیل آلودگی ناشی از پساب‌های اسیدی، اکسیداسیون مستقیم پیریت در مجاورت هوا و رطوبت و حمل و نقل آلاینده‌های ناشی از آنها به محیط اطراف دپو باطله‌های حاوی پیریت می‌باشد. مدل‌سازی ریاضی مکانیزم‌های مؤثر در اکسیداسیون پیریت و تولید آلودگی می‌تواند، اطلاعات مطلوبی در راستای طراحی راه‌کارهای مؤثر در مقابله با چنین آلودگی‌هایی را فراهم نماید.

بررسی‌های زیادی در ارائه مدل مناسب برای نحوه تغییرات اکسیداسیون پیریت و کانی‌های سولفیدی دیگر توسط اشخاصی نظیر روگونسکی^۱ و همکاران در سال ۱۹۷۷، جینز^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۴ صورت گرفته است. در این مدل‌ها اکسیداسیون پیریت و لیچینگ اسید در دمپ‌های باطله مورد بررسی قرار گرفته است. از نقایص این مدل‌ها، می‌توان به این نکته اشاره کرد که به فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حمل آلاینده‌های ناشی از اکسیداسیون پیریت کمتر پرداخته شده است. بعلاوه اینکه این مدل‌ها تنها در ارتباط با باطله‌های پرکننده معادن روباز نواری می‌باشند. باید توجه کرد که کارهای بسیار کمی به منظور کنترل مکانیزم‌های نرخ اکسیداسیون پیریت و نشت فرآورده‌های واکنشی حاصل از معادن زغال انجام شده است.

1- Rogowski

2- Jaynes

کاتلس^۱ و اپس^۲ در سال ۱۹۷۵ مدل یک بعدی از فرآیندهای اکسیداسیون و لیچینگ را با در نظر گرفتن دما، توازن اکسیژن و انتقال هوا ارائه نمودند [کاتلس و اپس، ۱۹۷۵]. در این مدل پدیده همرفت هوا به عنوان مهمترین مکانیزم حمل و نقل اکسیژن در باطله‌ها جهت اکسید کردن آهن دو ظرفیتی در حضور باکتری‌های تیوباسیلوس فرو اکسیدان در دمپ‌ها به شمار می‌رود. جینز در سال ۱۹۸۳ مدلی برای اکسیداسیون پیریت و لیچینگ یک بعدی فرآورده‌های اکسیداسیون آن در معادن زغال روباز نواری ارائه نموده است [جینز، ۱۹۸۳]. در این مدل عامل‌های اکسید کننده، اکسیژن و آهن سه ظرفیتی می‌باشند. مدل با این فرض ارائه شده است که اکسیداسیون پیریت توسط میزان پخش^۳ (نفوذ) عامل اکسید کننده در ذرات واکنشی کنترل می‌گردد. یون آهن سه ظرفیتی (فریک) نیز با فرض اینکه حاصل از اکسیداسیون شیمیایی و فعالیت باکتری‌ها بر روی یون آهن دو ظرفیتی می‌باشد، در مدل وارد شده است. دیویس و ریچی^۴ در سال ۱۹۸۶ مدل یک بعدی اکسیداسیون پیریت در دمپ‌های سنگ باطله درشت دانه^۵ مس را با در نظر گرفتن نفوذ اکسیژن ارائه نموده‌اند [دیویس و ریچی، ۱۹۸۶]. مدل ارائه شده از دو بخش اصلی تشکیل شده است:

۱- نفوذ اکسیژن در فضاهای خالی دمپ

۲- مدل مغزه منقبض شونده^۶ برای توصیف نفوذ اکسیژن در ذرات جدا حاوی پیریت که در آن زون اکسید شده به صورت پوشش یا کیک در اطراف مغزه ذرات واکنش نداده، قرار گرفته‌اند. این مدل که اولین بار توسط لونشپیل^۷ ارائه شده بسیار مورد توجه قرار گرفته شده و دارای کارایی بالایی می‌باشد. در این مدل، نقش باکتری‌ها در اکسیداسیون پیریت و حمل بعدی فرآورده‌های اکسیژن در نظر گرفته نشده است. در سال‌های اخیر استفاده از نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی^۸ (CFD)، تبدیل به ابزار مهمی در مطالعات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های معدنی شده است. اخیراً با استفاده از نرم افزار تجاری PHOENICS که در زمره نرم افزارهای CFD مهم

1- Cathles

2- Apps

3- Diffusion

4- Ritchie

5- Waste Rock

6- Shrinking Core

7- Levenspiel

8- Computational Fluid Dynamic

می‌باشد، پیش‌بینی فرآیندهای اکسیداسیون و تولید آلودگی معادن امکان‌پذیر شده است و حساسیت تعدادی از پارامترهای اصلی بر روی میزان آلودگی مورد آنالیز قرار گرفته‌اند [دولتی و سینگ^۱، ۲۰۰۴، سینگ و دولتی، ۲۰۰۴، دولتی و همکاران، ۲۰۰۲، دولتی و همکاران، ۲۰۰۴ و سینگ و دولتی ۲۰۰۳]. در ایران روش‌های مدل‌سازی یک بعدی ریاضی جهت تشریح فرآیندهای اکسیداسیون پیریت در ارتباط با باطله‌های زغال کم و بیش انجام شده است [جدیری، ۱۳۸۵ و باقری، ۱۳۸۶] ولی مطالعات دقیق‌تر در خصوص بررسی و نحوه انتشار آلودگی در ارتباط با این باطله‌ها هنوز انجام نشده است. در این پایان‌نامه سعی شده است که علاوه بر مدل‌سازی یک بعدی با استفاده از نرم افزار PHOENICS [چم^۲، ۲۰۰۸]، نحوه انتشار آلودگی ناشی از دپو باطله جیگ ماشین کارخانه زغالشویی البرزشرقی برای اولین بار در ایران با استفاده از مدل‌سازی ریاضی دو بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۱- اهداف

به دلیل حضور ناخالصی‌های مضر همراه زغال استخراجی، شستشوی آنها امری ضروری می‌باشد. در فرآیند زغال‌شویی، مقداری از مواد معدنی باعیار و کیفیت پایین‌تر که حاوی مواد سولفیدی خصوصاً پیریت می‌باشند به صورت باطله جدا می‌گردند. قرار گرفتن باطله‌های انباشت شده در مجاورت آب و هوا باعث تغییر ترکیبات آنها و راه پیدا کردن مواد سمی و خطرناک موجود در باطله‌ها به محیط پیرامون خود می‌گردند. همان‌طور که اشاره گردید، یکی از مهمترین مشکلات زیست‌محیطی ناشی از محل انباشت باطله‌های زغال، تولید پساب‌های اسیدی می‌باشد، از این رو بررسی مکانیزم تولید و انتشار آلودگی، مدل‌سازی فرآیندهای درگیر، شناسایی مناطق آلوده و تعیین محدوده آنها برای به کنترل در آوردن و یا اجرای طرح‌های زیست‌محیطی مربوطه از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است.

هدف از مطالعه حاضر، بررسی مکانیزم تولید و انتشار آلودگی و مدل‌سازی فرآیندهای درگیر با شبیه‌سازی‌های ریاضی و همچنین شناسایی مناطق آلوده شده و تعیین گسترش سطحی و عمقی آنها

1- Singh
2- CHAM

با برداشت و مدل‌سازی عددی داده‌های ژئوفیزیکی روش مقاومت ویژه و الکترومغناطیس با فرکانس بسیار پایین ($^{1}VLF-EM$) از دیگر اهداف مطالعه در محدوده انباشت دمپ باطله‌های کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی است.

۱-۵- روش تحقیق

در مطالعه حاضر ابتدا با گرفتن نمونه‌های لازم و آنالیز آنها از دمپ باطله، آب، خاک و انجام مدل‌سازی یک و دو بعدی اکسیداسیون پیریت و تولید آلودگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در مرحله بعد با برداشت و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و الکترومغناطیسی، چگونگی گسترش زون‌های آلوده در مناطق پایین دست انباشت باطله‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به موارد فوق سوال‌های اصلی تحقیق بشرح زیر می‌باشند:

✓ آیا ارتباط معنی‌داری بین مواد موجود در زغال و آلودگی‌های زیست‌محیطی مورد نظر وجود دارد؟

✓ رابطه بین آلاینده‌ها با مقاومت یا هدایت ویژه مواد تشکیل دهنده زمین‌های اطراف دپو باطله چگونه است؟

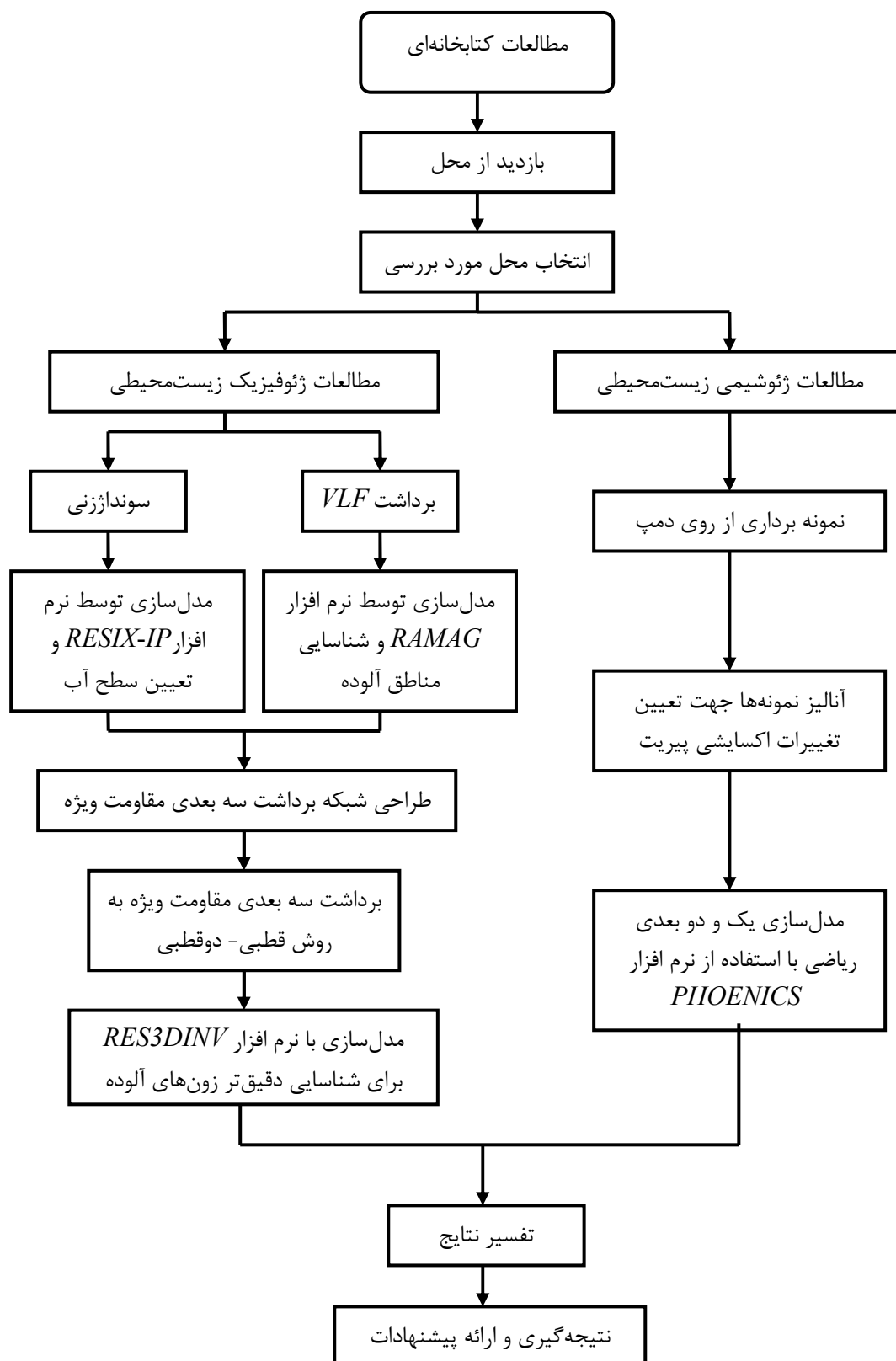
✓ آیا از روش‌های ژئوفیزیکی الکتریکی و الکترومغناطیس می‌توان برای شناسایی زون‌های آلوده و محدوده گسترش آنها استفاده کرد؟

✓ مدل‌های ریاضی تا چه حد ما را در پیش‌بینی پتانسیل آلودگی و گسترش آلاینده‌ها یاری نموده و عواملی که نقش مهم در کنترل آلودگی زیست‌محیطی دارند کدامند؟

✓ نتایج مدل‌سازی ریاضی چه اطلاعاتی را در جهت کنترل و جلوگیری از نشت آلاینده‌ها فراهم می‌سازد؟

روش تحقیق و مراحل مختلف آن به صورت فلوجارتی در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

¹ - Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM)



شکل ۱-۱- فلوچارت مراحل مختلف روش انجام کار

۱-۶- ساختار پایان نامه

پایان نامه مورد مطالعه، شامل شش فصل مجزا می‌باشد. فصل اول شامل مقدمه، سوابق مطالعات انجام شده، اهداف و ساختار پایان نامه می‌باشد. در فصل دوم مطالبی در مورد زغال و ترکیبات آن، مشکلات زیست محیطی ناشی از زغال، واکنش‌های اکسیداسیون پیریت و آثار مخرب پساب‌های اسیدی، تشریح موقعیت جغرافیایی منطقه، راه‌های دسترسی، مشاهدات صحرائی، زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه می‌پردازد. فصل سوم کاربرد مطالعات ژئوشیمیایی در بررسی‌های زیست محیطی با نمونه برداری عمقی از روی دپو باطله‌ها و آنالیز آنها توسط روش جذب اتمی جهت تغییرات اکسایشی پیریت را تشریح می‌کند. در فصل چهارم با توجه به نمونه‌های آنالیز شده، مدل ریاضی یک و دو بعدی جهت تشریح فرآیندهای اکسیداسیون پیریت، نفوذ اکسیژن و تولید آلودگی در محل دمپ باطله ارائه می‌شود. در فصل پنجم برای شناسایی زون‌های آلوده و نحوه گسترش آنها در مناطق پایین دست دپوی باطله از روش ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی VLF ، روش سونداژزنی ژئوالکتریک و همچنین روش سه بعدی مقاومت ویژه جهت شناسایی دقیق تر منطقه آلوده استفاده شده است و در ادامه نتایج مربوط به مدل سازی داده‌های VLF ، سونداژزنی و همچنین مدل سازی سه بعدی داده‌های اندازه گیری شده در برداشت سه بعدی به همراه تفسیر آنها آورده شده است. در فصل ششم نتایج بدست آمده مرور شده و پیشنهاداتی برای جلوگیری از تشکیل آلودگی از محل انباشت باطله و مواردی برای انجام مطالعه و بررسی بیشتر ارائه شده است.

۲-۱- زغال سنگ

زغال سنگ^۱، نفت، گاز و شیل نفتی از جمله سوخت‌های فسیلی و کانسارهای رسوبی بیوشیمیایی می‌باشند که از تجمع و مدفون شدن بقایای گیاهان و جانوران در زیر رسوبات قدیمی و در حوضه‌های رسوبی کم‌عمق بوجود آمده‌اند. هر چند که زغال سنگ یک سنگ آواری یا ته نشستی نیست ولی در مطالعات جزء سنگ‌های رسوبی در نظر گرفته می‌شود [یزدی، ۱۳۸۲].

زغال سنگ ماده‌ای سیاه و یا سیاه متمایل به قهوه‌ای و سوخت فسیلی غیرمتجانسی است که تحت شرایط مختلف رطوبت، دما، فشار و زمان در بین لایه‌های رسوبی و سنگ‌ها، طی دوران‌های گذشته زمین‌شناسی تشکیل شده‌اند. در این صورت بسته به شرایط محیط، نوع گیاه و میزان تغییر شکل حاصله، محصولات بوجود آمده دارای طیف وسیعی هستند و ممکن است شامل موادی مانند اسیدهیومیک، پیت، لیگنیت (زغال قهوه‌ای)، ساب بیتومینه، بیتومینه، نیمه آنتراسیت، آنتراسیت و فوق آنتراسیت نیز باشد. شایان ذکر است مرحله تشکیل پیت تا آنتراسیت را مرحله تشکیل زغال و یا زغال‌شدگی^۲ می‌گویند.

زغال سنگ، مانند گرافیت و الماس شکل دیگری از کربن نیست، بلکه، ترکیب پیچیده‌ای از مواد شیمیایی آلی محتوی کربن، هیدروژن، اکسیژن به همراه نیتروژن، گوگرد و بعضی از عناصر دیگر (به میزان کم) می‌باشد. درجه زغال‌شدگی از لیگنیت به آنتراسیت افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر میزان کربن افزایش ولی اکسیژن، هیدروژن و واکنش‌دهی محصولات بوجود آمده کاهش می‌یابد [رضایی، ۱۳۸۲].

^۱ - Coal

^۲ - Coalification

۲-۲- اهمیت شستشوی زغال سنگ

یکی از اهداف مهم در شستشوی زغال سنگ، بهبود کیفیت زغال در تهیه کک متالورژی به منظور تولید فولاد می‌باشد. به عنوان مثال، افزایش خاکستر در زغال سنگ باعث کاهش در تولید فولاد و یا حضور عناصر مزاحم، باعث تردی و شکنندگی آهن می‌شود و خوردگی فولاد را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین روش‌های شستشو زغال سنگ جایگاه ویژه‌ای در تهیه کک متالورژی دارند.

گوگرد یکی از مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در زغال سنگ می‌باشد. با توجه به وجود گوگرد در انواع زغال سنگ‌ها، گوگرد را باید با روش‌های مختلفی از زغال سنگ جدا نمود که این امر ضرورت شستشوی زغال سنگ را ایجاب می‌کند. مهم‌ترین مسئله قبل از جداسازی گوگرد از زغال سنگ آن است که مشخص شود ترکیبات گوگرد در زغال سنگ به چه شکلی است و سپس به عملیات جداسازی آن اقدام شود.

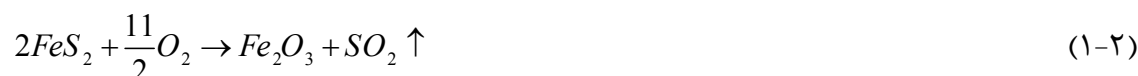
به طور کلی گوگرد را در زغال می‌توان به سه شکل آلی، پیریتی یا مارکاسیتی، و سولفاتی یافت. بلورهای پیریت با فرمول شیمیایی FeS_2 مکعبی است ولی مارکاسیت بلورهای ارتورمبیک دارد. معمولاً تشخیص و تفکیک پیریت و مارکاسیت از یکدیگر مشکل می‌باشد و غالباً هر دو را به عنوان پیریت می‌شناسند. پیریت از سایر مواد دیگر در زغال بیشتر یافت می‌شود و در مقیاس ماکروسکوپی به اشکال رگه‌ای، عدسی، دانه کروی و رشته گیاهی دیده می‌شود [اصانلو، ۱۳۷۸].

۲-۳- نقش پیریت در آلودگی‌های زیست‌محیطی

گوگرد در شکل کانی پیریت بیش از هر حالت دیگری در زغال سنگ‌ها یافت می‌شود که علاوه بر کاهش مرغوبیت زغال سنگ، باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. مهم‌ترین مشکل زیست‌محیطی در ارتباط با پیریت موجود در زغال سنگ ایجاد پساب اسیدی (AMD) می‌باشد. اکسید شدن پیریت و تولید اسید سولفوریک به عنوان یک اثر منفی و نامطلوب فعالیت‌های معدنی به حساب می‌آید [تیواری^۱، ۲۰۰۱]. یکی دیگر از آلودگی‌های ایجاد شده توسط پیریت، باران‌های اسیدی می‌باشد. بدین ترتیب که در هنگام سوختن زغال سنگ، کانی‌های سولفیدی خصوصاً پیریت طبق واکنش

¹ - Tiwary

زیر به صورت گاز SO_2 در می‌آیند. گاز SO_2 با رطوبت هوا ترکیب شده و باعث تولید اسید سولفوریک و در نهایت باران‌های اسیدی می‌شود.



در صورتی که کانی پیریت در یک محیط فاقد اکسیژن (مثل تهیه کک) سوزانده شود، گوگرد به صورت ترکیب سولفید آهن (FeS) طبق فرمول (۲-۲) در محیط کک باقی می‌ماند.



گوگرد آزاد تولید شده در نهایت به صورت گاز S_2C_3 متصاعد می‌شود.

معمولاً گوگرد موجود در پیریت‌ها در حرارت بیش از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تجزیه می‌کند ولی در دمای بیش از ۶۰۰ درجه در مجاورت بخار آب کاملاً به سولفید هیدروژن و اکسید آهن تبدیل می‌شود. به خصوص به هنگام سوزاندن زغال سنگ در دمای بیش از ۱۲۰۰ درجه حتی کانی‌های پیریت و پیروتیت مطابق واکنش (۳-۲) به گاز SO_2 و اکسید آهن (مگنتیت) تبدیل می‌شوند:



در هر حالت تولید این مواد باعث کاهش کیفیت فلزات تولید شده، آسیب‌رسانی به دستگاه‌های مختلف کارخانه‌های ذوب آهن و نیروگاه می‌شود. همچنین تصاعد گازهای سولفیدی موجب آلودگی هوا و آسیب‌رسانی به محیط زیست می‌شود [یزدی، ۱۳۸۲].

تفاوت آب‌های اسیدی معدن با باران اسیدی در جدول (۱-۲) ارائه شده است.

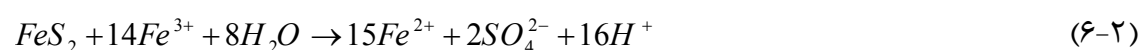
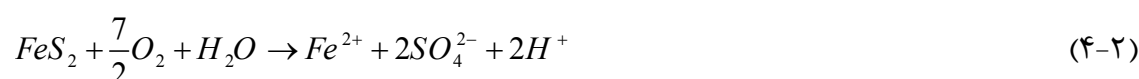
جدول ۱-۲- تفاوت آب‌های اسیدی در معادن و باران‌های اسیدی [قادری، ۱۳۸۲]

نوع آب	آب اسیدی معدن	باران اسیدی
منشأ اسید	اکسیداسیون پیریت	اکسیدهای گوگرد و نیتروژن هوا
نوع اسید تولید شده	اسید سولفوریک	اسید سولفوریک + اسید نیتریک
اسیدیته	۱۱۰-۶۴۰۰	۲-۴/۲۱
pH	۱/۵-۳	۴-۵/۷

۴-۲- نحوه اکسیداسیون پیریت و تشکیل پساب اسیدی

پساب اسیدی از اکسیداسیون مستقیم پیریت با اکسیژن و آب مطابق واکنش (۴-۲)، حاصل شده که نتیجه آن تولید Fe^{2+} ، SO_4^{2-} و H^+ می‌باشد. در نتیجه اکسیداسیون پیریت، Fe^{2+} آزاد شده در مجاورت اکسیژن اکسید می‌شود و مطابق با واکنش (۵-۲) به آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) تبدیل می‌شود [سینگ و دولتی ارده‌جانی، ۲۰۰۳].

در شرایط اسیدی ایجاد شده امکان رشد گونه‌ای از باکتری‌ها بنام تیوباسیلوس فرواکسیدان افزایش می‌یابد، که این باکتری به عنوان کاتالیزور عمل کرده و سرعت واکنش را می‌تواند تا یک میلیون بار افزایش دهد. در نتیجه، در حضور این باکتری، یون فریک ایجاد شده مثل اکسیژن به عنوان عامل اکسید کننده برای پیریت عمل کرده و مطابق با واکنش (۶-۲) تحت شرایط غیر اکسیدان با پیریت واکنش داده و AMD بیشتری تولید خواهد شد. بررسی‌ها نشان داده که تولید Fe^{3+} و اکسیداسیون پیریت وقتی اهمیت دارد که باکتری‌های ذکر شده حضور داشته باشند [ناوازیگ^۱ و دامکا^۲، ۲۰۰۰].



آهن سه ظرفیتی ممکن است هیدرولیز شده و تشکیل رسوب آمورف هیدروکسید آهن را دهد. در حضور باکتری‌های احیا کننده سولفات، سولفات به سولفید کاهش پیدا می‌کند که نتیجه آن خنثی شدن pH و مصرف یون‌های سولفات محلول می‌باشد [EPA، ۲۰۰۶].

پساب اسیدی تولید شده حاوی کانی‌های محلول و فلزات مختلفی می‌باشد که با راه‌یابی آن به آب‌های سطحی و زیرزمینی باعث آلودگی شدید زیست‌محیطی منطقه می‌گردد. شکل (۱-۲) نمونه‌ای از پساب اسیدی تولید شده از باطله‌های زغال را نشان می‌دهد.

^۱ - Nowaczyk

^۲ - Domka



شکل ۲-۱- نمونه‌ای از پساب اسیدی تولید شده [EPA, ۲۰۰۶]

پساب اسیدی معمولاً رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای دارد و مشخصات عمده آن عبارتست از [دولتی و همکاران، ۱۳۸۳]:

- پایین بودن میزان pH آن
- بالا بودن غلظت یونهای فلزی
- افزایش میزان سولفاتها
- ایجاد لجن بصورت غیر طبیعی

در حالی که پیریت به عنوان اصلی‌ترین عامل تولید AMD گزارش شده است، دیگر انواع کانی‌ها از قبیل کانی‌های سولفیدی مثل مارکاسیت (FeS_2) و کانی‌های سولفات‌ه هم‌چون جاروسیت و آلونیت، قابلیت تولید پساب‌های اسیدی در معادن روباز و زیرزمینی و همچنین در باطله‌ها را دارا می‌باشند. جدول (۲-۲) لیستی از کانی‌های سولفیدی فلزی را که توانایی تولید پساب اسیدی را دارند، نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲- کانی‌های سولفید فلزی مؤثر در تولید پساب [EPA، ۱۹۹۴]

ترکیب	کانی
FeS_2	پیریت
FeS_2	مارکازیت
$CuFeS_2$	کالکوپیریت
Cu_2S	کالکوسیت
ZnS	اسفالریت
PbS	گالن
NiS	میلریت
$Fe_{1-x}S$	پیروتیت
$FeAsS$	آرسنوپیریت
HgS	سینابر

۲-۵- اثرات زیست‌محیطی ناشی از پساب اسیدی

در محیط اسیدی غلظت برخی از فلزات سنگین افزایش می‌یابد. آلودگی خاک، آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط فلزات سنگین در ارتباط با این پساب‌ها یک مشکل بزرگ زیست‌محیطی می‌باشد. بعضی از این عناصر که حضور آنها موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی و مسمومیت می‌شود و به عنوان اثرات غیر مستقیم پساب اسیدی در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: روی، مس، سرب، کادمیوم، جیوه. برخی از فلزات حتی در مقادیر کم اگر به طور منظم مصرف شوند کشنده هستند. فلزات سنگین برای آبزیان سمی بوده و زندگی آنها را به خطر می‌اندازد. بسیاری از فلزات سنگین با غلظت‌های بالا اثرات کشنده مهمی روی ماهی‌ها و سایر آبزیان دارد و اکولوژی رودخانه‌ها را ویران می‌سازد. فلزات سنگین می‌توانند در لابلای ذرات تشکیل دهنده خاک‌ها قرار گیرند و اثرات دراز مدتی را به بار آورند. بسیاری از فلزات سنگین با غلظت‌های بالا بر رشد گیاهان اثرات نامطلوبی دارند. در شرایط معدنی خاص ممکن است تنها تعدادی از فلزات در غلظت‌های بالا و خطرناک یافت شوند که در صورت تولید پساب‌های اسیدی معدن این فلزات به محیط‌زیست اطراف حمل می‌شوند.

در محیط‌های اسیدی معدن، قابلیت حل شدن و جابجایی فلزات تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون pH ، غلظت عناصر آهن و منگنز، پتانسیل اکسیداسیون- احیا و مواد آلی می‌باشد. تغییرات به وجود آمده توسط فعالیت‌های میکروبی در پتانسیل اکسیداسیون و احیاء و شرایط pH نقش اساسی در قابلیت تحرک فلزات در محیط‌های اسیدی معدن دارد. برخی از کاتیون‌های فلزی مهم که از نظر زیست‌محیطی حائز اهمیت هستند به قرار زیرند [دولتی و همکاران، ۱۳۸۳]:

✓ آرسنیک، کادمیوم، جیوه، سرب، نیکل، منگنز، مولیبدنیوم و سلنیوم از کاتیون‌هایی هستند که برای انسان و حیات وحش خطرناک می‌باشند.

✓ کاتیون‌های مس، کروم و تمام کاتیون‌هایی که در مورد اول نام برده شدند برای حیات آبریان خطرناک می‌باشد.

✓ کاتیون‌های آهن، آلومینیوم و روی سبب مسمومیت گیاهی می‌گردند.

در جدول (۲-۳) مقادیر بعضی از پارامترهای شیمیایی موجود در پساب اسیدی معادن مختلف آورده شده است.

۲-۶- منابع تشکیل پساب اسیدی

پساب اسیدی ممکن است در اثر فعالیت‌های مختلف معدن‌کاری، فرآوری، معادن متروکه و یا سایر عملیات غیر معدنی مانند راه‌سازی، سدسازی، تونل‌سازی و غیره تشکیل شود. شکل (۲-۲) فلوجارتی از مواد باطله حاصل از فرآیند معدن‌کاری و فرآوری را که در تولید *AMD* نقش مؤثری دارند نشان می‌دهد و به طور کلی این مواد عبارتند از:

۱- کپه‌های باطله که در طی بهره‌برداری از معادن روباز و یا زیرزمینی حاصل می‌شود، بسته به مقدار سولفید، پساب اسیدی تولید می‌نماید.

۲- کانی‌های انباشته شده، منشأ دیگری برای تولید *AMD* است.

۳- پسماندهای کارخانه فرآوری که حجم بالایی از سولفید را دارند یکی دیگر از منابع تولید *AMD* می‌باشد. با وجود اینکه، بسیاری از این پسماندها دارای نفوذپذیری پایینی هستند، سبب می‌گردد تا نرخ تولید *AMD* پایین باشد. در نتیجه تولید *AMD* می‌تواند به مدت طولانی بعد از اینکه ذخیره باطله متروکه شد نیز ادامه یابد.

۴- فرآیند شستشوی توده‌های کانه‌های سولفیدی کم عیار هم می‌توانند منبع مناسبی برای تولید AMD باشند [میشل^۱، ۲۰۰۰].

جدول ۲-۳- مقادیر بعضی از پارامترهای شیمیایی (برحسب میلی‌گرم در لیتر) در پساب اسیدی معدن در ایالات

متحده و کانادا [عباس نژاد، ۱۳۸۰]

نام پارامتر	پساب معادن زغال در ایالات متحده	پساب اسیدی معدن در ونکوور کانادا	پساب حاصل از باطله‌های معدنی در ساسکاتون کانادا	پساب معدن فلزی در کلرادوی آمریکا	غلظت مجاز در آب آشامیدنی آمریکا
<i>Fe</i>	۰/۶-۲۰۰	۲۳۰۰	۰/۱-۹/۶	۵۰	۰/۳
<i>Mn</i>	۰/۳-۱۲	۳۱۳	۷-۹۲	۳۲	۰/۰۵
<i>Cu</i>	۰/۰۱-۰/۱۷	۱۹۰	-	۱/۶	۱
<i>Zn</i>	۰/۰۳-۲/۲	۲۷۳	-	۱۰	۵
<i>Cd</i>	۰/۰۱-۰/۱	۲	-	۰/۰۳	۰/۰۱
<i>Pb</i>	۰/۰۱-۰/۴	-	-	۰/۰۱	۰/۰۵
<i>As</i>	۰/۰۰۲-۰/۲	۱۲	۵/۴-۹/۷	۰/۰۲	۰/۰۵
<i>pH</i>	۳/۲-۷/۹	-	۳/۹۴-۵/۲۰	۲/۶	۶/۵-۸/۵
SO_4^{2-}	-	۲۰۰۰۰	۸۶-۱۰۶۰	۲۱۰۰	۲۵۰

^۱ - Mitchell



شکل ۲-۲- انواع باطله‌های معدنی

۲-۷- عوامل مؤثر در تولید پساب اسیدی

طیف خاصی از عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در تولید پساب اسیدی می‌تواند مؤثر واقع شود و به نوعی این فاکتورها در بعضی مناطق تغییر می‌کنند. فاکتورهای مؤثر در تولید پساب اسیدی به فاکتورهای اولیه، ثانویه و ثالثیه تقسیم‌بندی شده است. این تقسیم‌بندی ساختار مناسبی را برای سازمان دادن به بحث تولید اسید در محیط معادن و باطله‌ها فراهم می‌کند.

فاکتور اولیه مستقیماً در ارتباط با تولید اسید ناشی از اکسیداسیون سولفیدها می‌باشد. فاکتور ثانویه میزان محصولات تولید شده از واکنش‌های اکسیداسیون را کنترل می‌کنند، مثل واکنش اسید با کانی‌هایی که اسید را مصرف می‌کنند. فاکتور ثالثیه بر جنبه‌های فیزیکی واحدهای باطله و مواد معدنی اشاره دارد (توپوگرافی منطقه، شرایط آب و هوایی، مکان‌های انباشت باطله و غیره) که در نرخ اکسیداسیون، جابجایی اسید و مصرف آن تأثیر گذار هستند. در ادامه به توضیح هر یک از این فاکتورها پرداخته می‌شود.

۲-۷-۱- عوامل اولیه^۱

عوامل اولیه مؤثر در اکسیداسیون مواد سولفیدی به صورت زیر خلاصه می‌شود.

- حضور آب برای فرآیند اکسیداسیون و حمل و نقل
- حضور اکسیژن
- خواص فیزیکی ماده

و در درجه کمتر:

- دما
- pH
- تعادل در نسبت Fe^{2+} به Fe^{3+}
- فعالیت میکروبیولوژیکی^۲

برای تولید پساب اسیدی، وجود آب و اکسیژن به همراه هم لازم است. آب هم به عنوان ماده‌ای که در واکنش شرکت می‌کند و هم به عنوان ماده‌ای که واسطه‌ای برای شرکت باکتری‌ها در فرآیند اکسیداسیون است، عمل می‌کند. نسبت اکسیداسیون پیریت توسط حضور باکتری‌های تیوباسیلوس فرو اکسیدان (اکسایش آهن) و تیوباسیلوس تیواکسیدان (اکسایش سولفور) افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ اکسید شدن پیریت زمانی رخ می‌دهد که pH محیط بین ۲/۴ تا ۳/۶ باشد [هربر^۳، ۱۹۹۴].

۲-۷-۲- عوامل ثانویه^۴

مهمترین فاکتور مؤثر در تولید اسید از نظر pH ، حضور مواد دیگری می‌باشد که می‌توانند خاصیت اسیدی را خنثی کنند. کربنات‌ها تنها مواد قلیایی می‌باشند که می‌توانند در کنترل و جلوگیری از پساب اسیدی مؤثر واقع شوند. سیلیکات‌ها، آلومینو سیلیکات‌ها و همچنین میکا و رس توانایی کاهش حالت اسیدی را دارند اما نسبت به کربنات‌ها دارای اهمیت کمتری می‌باشند. مواد خنثی کننده ممکن است خواص پساب خروجی را با افزایش pH و تشکیل رسوبات فلزی تغییر دهند.

¹ - Primary factors

² - Microbiological Activity

³ - Herber

⁴ - Secondary Factors

همچنین ممکن است محصولات واکنش اکسیداسیون (یون‌های هیدروژن، یون‌های فلزات و ...) با دیگر اجزای غیرخنثی کننده واکنش دهند. واکنش‌های احتمالی شامل تبادل یون با ذرات رس‌ها، تشکیل رسوب ژپس و انحلال دیگر کانی‌ها می‌باشد. انحلال کانی‌های دیگر در افزایش بار آلوده کننده پساب اسیدی مشارکت می‌کند. مهمترین فلزاتی که در بار حل شده دیده می‌شوند شامل آهن، آلومینیوم، منگنز، مس، سرب، روی و غیره می‌باشند [نورس^۱، ۲۰۰۵].

۲-۷-۳- عوامل ثالثیه

تعدادی از عوامل ثالثیه که در کنترل پساب اسیدی مؤثرند شامل مشخصات فیزیکی مواد، نحوه قرارگیری کانی‌های تولید کننده و خنثی کننده اسید در توده، نوع باطله و رژیم هیدرولوژیکی مناطق مجاور می‌باشد. ماهیت فیزیکی مواد شامل اندازه ذرات، نفوذپذیری و مشخصات هوازدگی فیزیکی در پتانسیل تولید اسید می‌باشد. هیدرولوژی مناطق اطراف معدن و واحدهای باطله نیز در تجزیه و تحلیل پتانسیل تولید اسید مهم است. زمانی که مواد تولید کننده اسید زیر سطح آب‌زیرزمینی قرار می‌گیرند نفوذ ناچیز اکسیژن در آب، سبب کاهش تولید اسید می‌شود. دوره‌های مرطوب و خشک در فعالیت‌های معدنی و یا واحدهای باطله بر مشخصات اسید تولید شده اثر خواهد گذاشت. مرطوب شدن متناوب، تولید حجم بیشتری از اسید را سبب خواهد شد. آلاینده‌های دیگر مثل محصولات اکسیداسیون در حین دوره مرطوب به وسیله حرکت آب از باطله به خارج از سیستم منتقل می‌گردد [پوگ^۲ و همکاران، ۱۹۸۴].

بالا رفتن میزان آلودگی در سیستم متناسب با فاصله‌های زمانی بین دوره‌های مرطوب می‌باشد. هر چه طول دوره خشک در باطله‌ها زیاد باشد محصولات اکسیداسیون بیشتری در سیستم تجمع پیدا می‌کند و بدین ترتیب یک رویداد بزرگ مرطوب شدن، آلاینده‌های تجمع یافته در سیستم را به خارج انتقال می‌دهد. در واقعیت این اتفاق با افزایش بار آلوده کننده در خلال بارش‌های شدید در مناطقی که دارای فصل‌های خشک و مرطوب می‌باشند مشاهده می‌شود [پوگ و همکاران، ۱۹۸۴].

¹ - Norris

² - Pugh

جدول (۲-۴) عوامل مؤثر در تولید اسید در باطله‌های معدنی و باطله‌های کانه‌آرایی را مقایسه

می نماید.

جدول ۲-۴- عوامل مؤثر در تولید اسید در باطله‌های معدنی و باطله‌های کانه‌آرایی [EPA، ۱۹۹۴]

تولید اسید	توده باطله معدنی	باطله‌های فرآوری
منبع سولفید	مقدار سولفید در این باطله‌ها در مکان‌های مختلف متغیر است و در فواصل نزدیک به هم کیفیت پساب تغییر می‌کند	توده باطله یکنواخت است و دارای مقادیر زیادی سولفید می‌باشد
اندازه ذرات	بطور متوسط بزرگتر از ۱۰ سانتی متر است ولی در مجموع متغیر است	در باطله‌های کانه‌آرایی اغلب اندازه ذرات زیر ۰/۲ میلی‌متر است
تغییرات pH	در فاصله‌های کم به شدت تغییر می‌کند	در سطوح افقی بصورت یکنواخت تغییر می‌کند
آغاز اکسیداسیون	معمولاً بلافاصله بعد از انباشت شروع می‌شود	معمولاً بعد از جابجایی باطله‌ها و در پایان معدنکاری شروع می‌شود
نفوذ اکسیژن	مسیرهای نفوذ با هم فرق می‌کند و بعلت وجود خلل و فرج نفوذ اکسیژن زیاد است	نفوذ اکسیژن به دلیل کوچکتر بودن اندازه ذرات اندک است
پساب آزاد شده	به دلیل نفوذپذیری بالای باطله‌ها، پساب از زیر توده‌های باطله به آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کند	پساب بیشتر ناشی از اکسیداسیون سطح باطله‌هاست

۸-۲- پیش‌بینی امکان تولید و تعیین پتانسیل پساب اسیدی

در ارزیابی و محاسبه قابلیت و پتانسیل تولید اسید، دو مطلب مد نظر قرار می‌گیرد، یکی نحوه جمع‌آوری نمونه‌ها و دیگری انتخاب نوع آزمایش و روش انجام آزمایش جهت پیش‌بینی امکان تولید اسید می‌باشد. آزمایشات به دو صورت استاتیکی و سینتیکی انجام می‌گیرد. در ادامه به توضیح هر یک پرداخته می‌شود [کلایمن^۱، ۲۰۰۱].

۸-۲-۱- نمونه‌برداری

انتخاب نمونه‌ها و انجام عملیات نمونه‌برداری نقش مهمی در آزمایشات استاتیکی و سینتیکی و تفسیر آنها ایفا می‌کند. نمونه‌ها بر اساس حجم باطله یا سنگ‌ها و مشخصات آنها انتخاب می‌گردد. در انتخاب نمونه‌ها، عوامل زمین‌شناسی و زیست‌محیطی با هم در نظر گرفته می‌شوند. عوامل زمین‌شناسی در ارتباط با درک صحیح از زمین‌شناسی منطقه می‌باشد، که شامل اطلاعات معدن، لاگ‌های حفاری و دیگر منابع می‌باشد. این اطلاعات هم در برنامه نمونه‌برداری و هم در نتایج آزمایشات مهم هستند. عوامل زیست‌محیطی شامل ملاحظات زیست‌محیطی آلوده‌کننده‌ها و تغییرات آب و هوا می‌باشد. تعیین تعداد نمونه‌ها به تغییرات زمین‌شناسی معدن و توسعه آتی آن بستگی دارد. عواملی که در برنامه نمونه‌برداری باید مورد توجه قرار بگیرند عبارتند از:

۱. روش جمع‌آوری نمونه‌ها

۲. مدت زمان انبار شدن نمونه‌ها

۳. مسائل زیست‌محیطی مربوط به انبار کردن نمونه‌ها

هر کدام از این‌ها می‌تواند بر مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه اثر بگذارد. در مورد باطله‌های فرآوری، نمونه باید از عمق‌های مختلف گرفته شود تا تغییرات اکسیداسیون پیریت مورد بررسی قرار بگیرد. بهترین روش جمع‌آوری نمونه از باطله، حفاری از نقاط مختلف دمپ‌های باطله می‌باشد. در نمونه‌برداری باید به مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها از جهت دگرسان شدن دقت نمود. روش

¹ - Kleinmann

نمونه برداری ترکیبی^۱، در مورد مواد با حجم زیاد مانند زون‌های زمین‌شناسی، معمول می‌باشد [کلاینمن، ۲۰۰۱].

۲-۸-۲- آزمایش‌های استاتیکی^۲

آزمایش‌های استاتیکی در ابتدا برای تعیین پتانسیل تولید اسید در معادن زغال به کار می‌رفت و سپس در معادن فلزی هم مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌های استاتیکی تعادل را بین کانی‌های خنثی ساز اسید و کانی‌های تولید کننده اسید موجود در نمونه مورد بررسی قرار می‌دهد. این آزمایشات سریع و ارزان قیمت هستند و برای تعیین پتانسیل و قابلیت تولید اسید در واحدها یا زون‌های زمین‌شناسی به کار می‌روند ولی برای پیش‌بینی کیفیت پساب و نرخ تولید اسید استفاده نمی‌شوند. در کنار اطلاعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی، این آزمایش‌ها نرخ خنثی‌سازی اسید را بررسی می‌نمایند [کلاینمن، ۲۰۰۱].

۲-۸-۳- آزمایش‌های سینتیکی^۳

آزمایش‌های سینتیکی برای توسعه اطلاعات حاصل از آزمایش‌های استاتیکی به کار می‌روند و سعی در شبیه‌سازی شرایط اکسیداسیون محیط طبیعی دارند. معمولاً برای تعیین وضعیت نمونه‌هایی که در آزمایش‌های استاتیکی وضعیت نامشخصی دارند از آزمایش‌های سینتیکی استفاده می‌شود. آزمایش‌های استاتیکی پتانسیل نهایی تولید اسید را مورد بررسی قرار می‌دهند در حالی که آزمایش‌های سینتیکی امکان تحقق این پتانسیل را مطالعه می‌کنند. آزمایش‌های سینتیکی، نرخ‌های نسبی واکنش‌های تولید اسید را بیان می‌کند و قادر نیستند که عددهای مطلق بدهند و در مقایسه با آزمایش‌های استاتیکی حجم بیشتری از نمونه را به کار می‌برند و احتیاج به زمان بیشتری برای انجام آزمایش و کامل شدن فرآیند دارند و همچنین گران‌قیمت می‌باشند. اگر آزمایش‌های استاتیکی نتوانند پتانسیل تولید اسید را پیش‌بینی کنند و یا رفتار خنثی‌سازی اسید را در نمونه بررسی کند از این آزمایش‌ها استفاده می‌گردد [کلاینمن، ۲۰۰۱].

¹ - Composite Sampling

² - Static Tests

³ - Kinetic Tests

۲-۸-۴- تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها

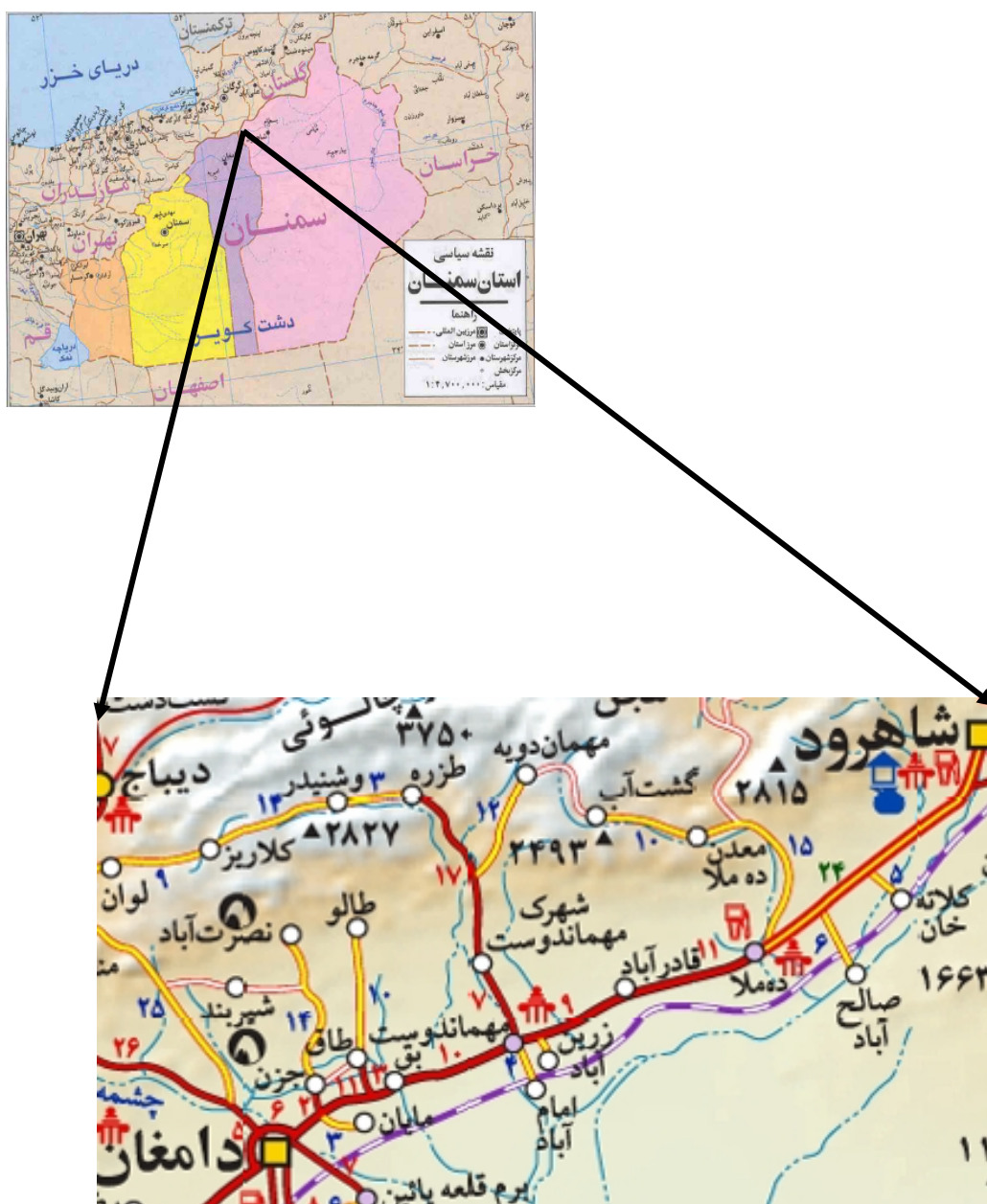
آزمایش‌های استاتیکی اولین بررسی از امکان تولید پساب اسیدی در معدن می‌باشد. با توجه به این که بیشتر این آزمایش‌ها با نمونه پودر شده انجام می‌گیرد، بنابراین در تفسیر این نوع آزمایش‌ها باید اطلاعات مربوط به کانی‌شناسی نمونه هم مورد توجه قرار گیرد. اعدادی که در آزمایش‌های استاتیکی با آنها مواجه می‌شویم عموماً به دو صورت می‌باشد، یکی پتانسیل تولید اسید و دیگری پتانسیل خنثی‌سازی اسید که تفاسیر معمولاً با توجه به مقایسه بین این دو مقدار انجام می‌گیرد و بر پایه اختلاف این دو مقدار می‌باشد.

تفسیر نتایج به دست آمده از آزمایش‌های سینتیکی بر پایه اطلاعات کانی‌شناسی نمونه، اطلاعات مربوط به آزمایش‌های استاتیکی، خصوصیات اندازه ذرات و ویژگی‌های پساب می‌باشد. بیشتر تحقیقات بر روی کیفیت نمونه شسته شده (شامل pH ، سولفات، اسیدیته، قلیائیت و انحلال فلزات) برای تعیین فرآیند پساب اسیدی، صورت می‌گیرد. آزمایش‌های سینتیکی در مقیاس آزمایشگاهی، برای سرعت بخشیدن به فرآیند هوازدهی طراحی شده‌اند، بنابراین وقتی که مواد در محیط اسید تولید می‌کنند، این آزمایش‌ها مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. برای بیشتر آزمایش‌های سینتیکی اگر pH ماده شسته شده کمتر از ۳ باشد، نمونه دارای قابلیت تولید اسید به میزان قابل توجه می‌باشد و اگر pH بیشتر از ۵ باشد، اسید تولید نمی‌کند و برای مقادیر بین ۳ تا ۵، تولید اسید با مقدار خنثی‌سازی همراه است [کلایمن، ۲۰۰۱].

۲-۹- محل و موقعیت جغرافیایی محل مورد مطالعه

منطقه زغالی البرز شرقی در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی دامغان و با فاصله تقریبی ۷۵ کیلومتری از شاهرود در استان سمنان واقع شده است. زغال سنگ حاصل از گستره زغالی البرز شرقی با ظرفیت ۶۵۰ هزار تن در سال از معادن طزره (۲۷۰ هزار تن در سال)، معادن اولنگ (۷۰ هزار تن در سال)، معادن قشلاق (۱۱۰ هزار تن در سال)، معدن تخت (۴۰ هزار تن در سال)، زغال سنگ طبس ۸۰ هزار تن در سال و سایر معادن جمعاً ۸۰ هزار تن در سال به کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی ارسال می‌گردد [آرشیو شرکت زغالسنگ البرز شرقی، ۱۳۸۶]. این کارخانه در شمال شرقی دامغان و در ۵۷ کیلومتر شاهرود، بین مناطق مهماندوست و طزره و در حدود ۱۱ کیلومتری منطقه رزمجا قرار

گرفته است. مهماندوست و طزره نزدیکترین روستاها به کارخانه می‌باشند. مهماندوست پایگاه صنعتی البرزشرقی بوده و تعمیرگاه، انبار و نیروگاه اصلی برق مجتمع البرزشرقی در آن قرار دارد. شکل (۳-۲) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی [مؤسسه جغرافیایی ایران، ۱۳۸۰]

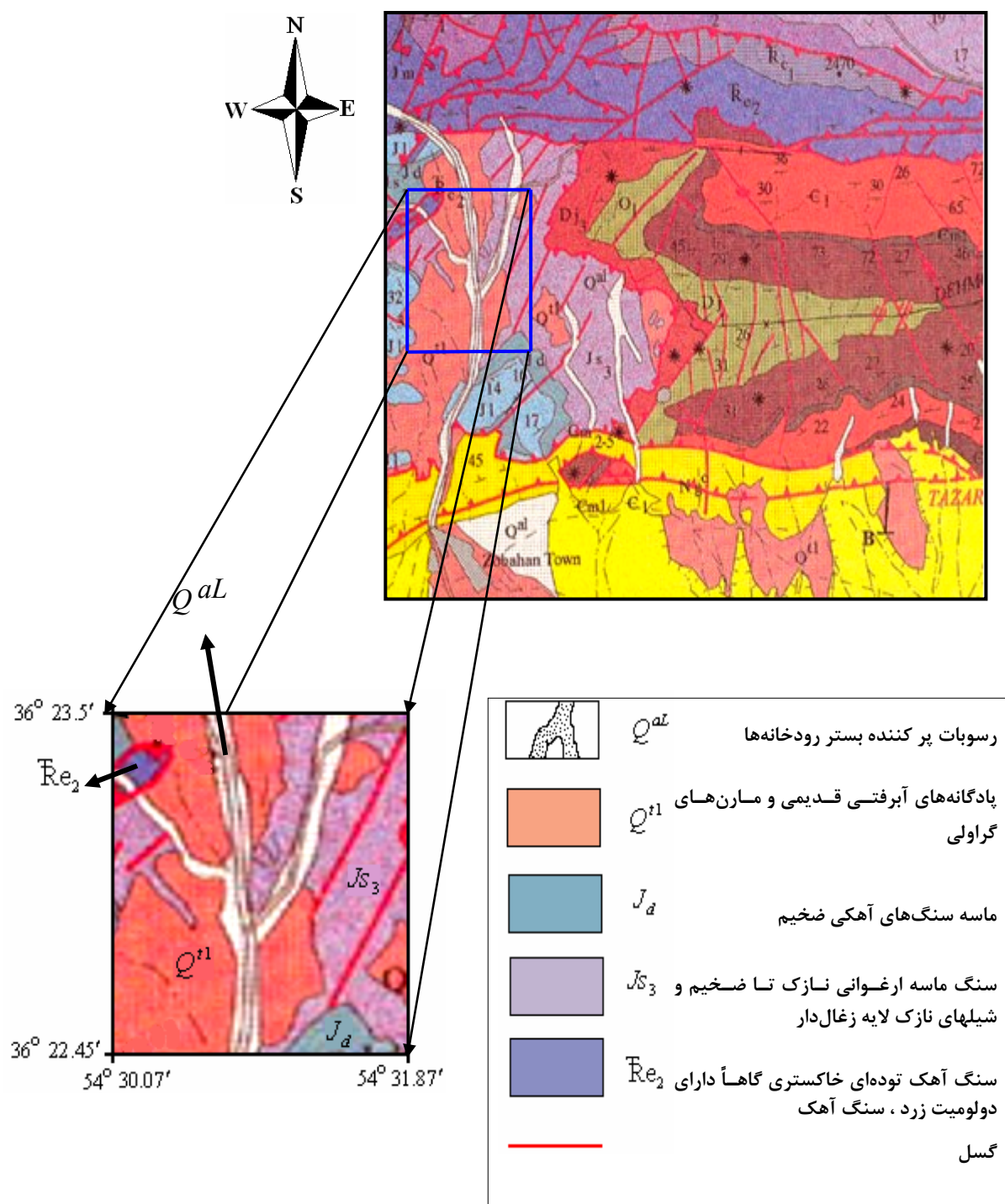
۲-۱۰- زمین‌شناسی منطقه

در منطقه مورد مطالعه از نظر چینه‌شناسی، سنگ‌های پرکامبرین تا عهد حاضر به وفور دیده می‌شوند. سنگ‌های دوران سوم زمین‌شناسی در این منطقه بیشتر شامل آهک، کنگلومرا، ماسه و سنگ و توف می‌باشند. نهشته‌های دوران چهارم زمین‌شناسی شامل کنگلومرا، ماسه، رس و سیلت به صورت پادگانه‌های آبرفتی و انواع تراس‌ها می‌باشند. در این منطقه، پدیده‌های تکتونیکی عمدتاً دارای روند شرقی- غربی می‌باشد. مهمترین و فراوان‌ترین ماده معدنی منطقه زغال‌سنگ می‌باشد که در تناوب‌های شیلی سازند شمشک (مربوط به ژوراسیک) در سرتاسر منطقه به صورت رگه‌ها و عدسی‌هایی گسترش دارد. این زغال‌سنگ‌ها از انواع چرب و کک شو بوده که توسط شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. شکل (۲-۴) نقشه زمین‌شناسی منطقه را که بخشی از نقشه زمین‌شناسی شاهرود با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ می‌باشد، نشان می‌دهد.

۲-۱۱- منابع آب زیرزمینی

محدوده مورد مطالعه از نظر آب زیرزمینی در حوزه آب‌خیز دشت کویر در دشت دامغان واقع شده است. دشت دامغان در شمال و شمال‌غرب از سفره آزاد تشکیل شده و در بخش جنوبی در مناطق راه آهن حاجی آباد- زرگر آباد، نشانه‌هایی از سفره آزاد تحت فشار توأمآ مشاهده شده است. عمق سطح آب در نقاط مختلف دشت بین ۵ تا ۱۱۵ متر متفاوت است. جنس آبرفت دشت عمدتاً به صورت تراس‌های قدیمی و از عناصر درشت دانه که کمی سیمانی است، تشکیل شده است. سنگ کف در شمال و شمال‌شرق از رسوبات نئوژن و در حواشی کویر تا جنوب مهماندوست از مارن‌های میوسن و پلیوسن و در جنوب سیاه‌کوه از سازندهای ائوسن تشکیل شده است.

بیشترین ذخیره آبی دشت دامغان در سفره اصلی و آزاد مرکزی آن قرار داشته و تمامی چاه‌های عمیق حفر شده از این سفره تغذیه می‌شوند. بر اساس حفاری‌های انجام شده، قابلیت انتقال در قسمت ورودی دشت ۲۵۰۰ متر مربع در روز و میزان حداقل آن در شرق، حدود ۱۰۰ متر مربع برآورد شده است. بیشترین عمق سطح آب در مخروط افکنه چشمه علی حدود ۹۵ متر می‌باشد که بلافاصله به سمت روستای بق عمق سطح آب تا کمتر از ۳۰ متر کاهش یافته و در امتداد آن در غرب



شکل ۲-۴- نقشه زمین‌شناسی شاهرود/سازمان زمین‌شناسی، ۱۳۸۰.

مهماندوست در مخروط افکنه مهماندوست به بیش از ۸۰ متر می‌رسد و به سمت جنوب در حاشیه کویر، عمق سطح آب به کمتر از ۵ متر کاهش می‌یابد. به طور کلی، جهت جریان آب سفره زیرزمینی

دشت از شمال و غرب به سوی حاشیه کویر حاج علیقلی می‌باشد. وضعیت خطوط جریان در مخروط افکنه مهماندوست نشان از تغییر ناگهانی جریان به سمت شمال می‌باشد که دلیل عمده آن، عملکرد گسل دامغان و نیز تراکم چاه‌هایی با دبی زیاد در این منطقه می‌باشد [اداره آب زیرزمینی دامغان، ۱۳۸۶].

۲-۱۲- هوا اقلیم

عنوان اقلیم بیان حالت متوسط اتمسفر در یک منطقه است و آن را می‌توان ناشی از تأثیر توأم توده‌های هوا، نزدیکی یا دوری از دریاها و اقیانوس‌ها، عرض جغرافیایی و ارتفاعات در یک منطقه دانست. منطقه، تحت جریان‌های عمومی شامل جبهه‌های مدیترانه‌ای است که از سمت غرب و بعضاً جبهه‌های سیبری که از ناحیه شمال نفوذ می‌نماید، قرار دارد و ندرتاً تحت پوشش دامنه تغییرات جریان‌ات عربستان و اقیانوس هند قرار می‌گیرد. اقلیم محدوده مورد بررسی در سیستم طبقه‌بندی سیلیانیوف در منطقه خشک و سرد قرار گرفته است [سالنامه آماری هواشناسی، ۱۳۸۶].

۲-۱۳- بارندگی

به منظور تجزیه و تحلیل وضعیت ریزش‌های جوی در منطقه مورد بررسی، ایستگاه‌های موجود در مسیر مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات نشان می‌دهد که در این ناحیه، رژیم بارندگی منطقه مدیترانه‌ای بوده و بدین لحاظ قسمت اعظم ریزش‌های جوی در فصول پاییز و زمستان متمرکز می‌باشد و اواسط اردیبهشت تا اواسط مهر ماه، دوره خشک سال می‌باشد. اطلاعات مربوط به بارندگی در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۲-۵) آورده شده است [سالنامه آماری هواشناسی، ۱۳۸۶].

جدول ۲-۵- مشخصات آماری بارندگی‌های سالانه ایستگاه‌های هواشناسی منطقه (بر حسب میلی‌متر)

ایستگاه	حداکثر	حداقل	بارندگی	انحراف معیار	ضریب تغییرات
شاهرود	۳۴۳/۲	۷۲/۹	۱۶۶/۹	۶۰/۳	۳۶/۲
دامغان	۳۰۸	۳۴	۱۱۶/۶	۶۴	۵۴/۹
بسطام	۲۶۱	۸۴/۵	۱۷۸/۲	۴۲/۲	۲۳/۷

۲-۱۴- کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی

کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی از سال ۱۳۵۳ در منطقه مهماندوست واقع در ۲۰ کیلومتری جنوب معادن طزره به بهره‌برداری رسید. زغال تولیدی از معادن به کارخانه زغال‌شویی توسط کامیون حمل می‌شود و پس از شستشو به زغال کنسانتره تبدیل شده و در نهایت برای تأمین سوخت به کارخانه ذوب آهن انتقال می‌یابد. ظرفیت کارخانه ۵۰۰ هزار تن در سال زغال‌سنگ خام می‌باشد و راندمان تبدیل زغال‌سنگ خام به کنسانتره نیز ۵۵ درصد پیش‌بینی شده است. بنابراین ظرفیت تولید کنسانتره حدود ۲۷۵ هزار تن در سال خواهد بود [آرشیو زغال‌شویی البرز شرقی، ۱۳۸۶]. فرآیند زغال‌شویی در کارخانه به طور مختصر در پیوست (الف) توضیح داده شده است.

۲-۱۵- موقعیت و نحوه انباشت باطله‌های زغال‌شویی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، راندمان تبدیل زغال‌سنگ خام به کنسانتره ۵۵ درصد می‌باشد، در نتیجه حدود نیمی از خوراک ورودی تبدیل به باطله می‌شود. از باطله‌های ایجاد شده در نتیجه شستشوی زغال، در حدود ۸۰ درصد مربوط به دستگاه جیگ و ۲۰ درصد باقی‌مانده متعلق به فرآیند فلوتاسیون می‌باشد که این باطله‌ها در اطراف کارخانه زغال‌شویی انباشته می‌شوند. جدول (۲-۶) موقعیت باطله‌های کارخانه زغال‌شویی را نسبت به کارخانه نشان می‌دهد.

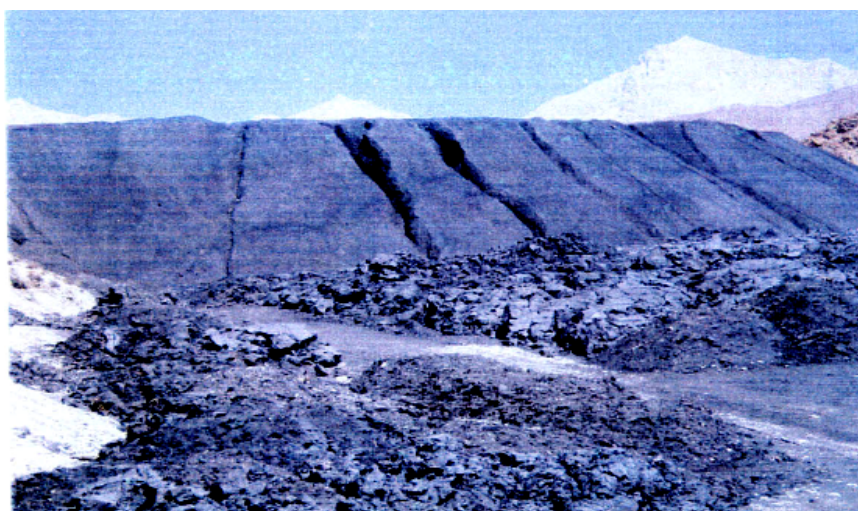
جدول ۲-۶- موقعیت و نحوه انباشت باطله‌های کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی [قادری، ۱۳۸۲].

ملاحظات	موقعیت باطله نسبت به کارخانه	باطله
انباشت بصورت کپه‌ای	شمال شرقی	جیگ جدید
به صورت دمپ بزرگ با ارتفاع تقریبی ۲۰ متر، بیشترین مقدار باطله انباشته شده را شامل می‌شود.	شمال شرقی	جیگ قدیمی
-	در محل سد باطله فلوتاسیون	فلوتاسیون جدید
انباشت به صورت کپه‌ای	جنوب شرقی	فلوتاسیون با عمر متوسط
انباشت به صورت دره‌ای	جنوب غربی	فلوتاسیون قدیمی

به طور کلی روش انباشت باطله‌های کارخانه زغال‌شویی البرزشرقی که حاوی دو نوع باطله (دستگاه جیگ و فلوتاسیون) می‌باشد، به صورت زیر می‌باشد.

۲-۱۵-۱- طرز انباشت باطله‌های دستگاه جیگ

باطله‌های تولید شده از دستگاه جیگ پس از خروج از کارخانه توسط کامیون‌ها به محل دپو حمل و انباشته می‌شوند. برای کاهش رطوبت و جلوگیری از تجمع بیش از حد باطله در منطقه، باطله‌ها را به وسیله بلدوزر پخش و سپس به کمک گریدر مسطح می‌کنند و دوباره باطله‌های جدید با همان شیوه قبلی روی آنها انباشت می‌شود. شکل (۲-۵) نمایی از قرارگیری باطله‌های قدیمی دستگاه جیگ را در محل نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵- نمایی از باطله‌های انباشتی دستگاه جیگ

۲-۱۵-۲- طرز انباشت باطله‌های فلوتاسیون

باطله‌های فرآیند فلوتاسیون به وسیله کانال‌هایی در پشت دو سد باطله قدیمی‌ساز با حجم تقریبی ۳۰۰ هزار تن، انباشته می‌شود که همواره یکی فعال و دیگری در حال خشک اندازی و سپس تخلیه است، پس از پر شدن سد باطله، مواد انباشته شده که تا حدودی رطوبت و آب خود را در اثر دمای محیط از دست داده است، توسط کامیون‌ها، به منطقه انباشت و در دره‌های اطراف سایت، دپو می‌گردد. هر چند باطله‌های زغال‌شویی عمدتاً به دلیل پروسه فیزیکی و عدم افزودن مواد سمی،

سمی و مضر نمی‌باشند ولی تخلیه و برداشت این مواد از پشت سد باطله و رها کردن این مواد در دره‌های اطراف از دیدگاه زیست‌محیطی، به هیچ‌وجه قابل تأیید نخواهد بود. شکل (۲-۶) نمایی از سد باطله کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶- نمایی از باطله‌های انباشتی در پشت سد باطله موجود

۲-۱۶- انتخاب محل مورد مطالعه

جیگ یک روش ثقلی می‌باشد، بنابراین باطله‌های تولیدی با چگالی بیشتر به بخش باطله‌های دستگاه جیگ راه پیدا می‌کند و از طرفی پیریت همراه زغال به دلیل داشتن چگالی بالا (در حدود ۵/۲)، بیشتر به بخش باطله‌های جیگ منتقل می‌شود. نفوذ اکسیژن و آب در باطله دستگاه جیگ به علت درشت بودن ذرات آن نسبت به باطله‌های فلوتاسیون بیشتر به نظر می‌آید. بنابراین حضور کانی‌های سولفیدی پیریت تحت چنین شرایطی، مهمترین عامل در تولید زهاب اسیدی می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از قابلیت تولید پساب اسیدی دپوی باطله‌های قدیمی دستگاه جیگ، بر این تصمیم شد که مطالعات بیشتری برای شناسایی مناطق آلوده و همچنین گسترش آلودگی در منطقه پایین دست دپوی باطله‌های قدیمی دستگاه جیگ صورت گیرد. به همین لحاظ مطالعات به صورت نمونه‌گیری عمقی بر روی دپوی باطله زغال و برداشت‌های ژئوفیزیکی شامل برداشت *VLF*، سونداژزنی مقاومت ویژه و متعاقب آن برداشت سه‌بعدی ژئوالکتریک انجام گرفت، که در فصول بعدی به آنها اشاره می‌شود.

۳-۱- مقدمه

امروزه از مهمترین کاربردهای علم ژئوشیمی معدن، پایش آلودگی ناشی از عملیات معدن کاری شامل اکتشاف، استخراج، بهره‌برداری و کانه‌آرایی را می‌توان اشاره نمود. پتانسیل تولید آلودگی ناشی از دمپ باطله‌های حاوی مواد سولفیدی، اهمیت بررسی بر روی این چنین آلودگی‌هایی را دو چندان می‌کند. در این فصل پایش آلودگی ناشی از اکسیداسیون پیریت همراه باطله‌های کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی با نمونه‌برداری از روی دمپ باطله و آنالیز آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲- نمونه برداری

مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی به طور کلی شامل سه مرحله اساسی نمونه‌برداری، تجزیه نمونه‌ها و پردازش، ارائه و تفسیر داده‌هاست. با توجه به اینکه هر ناحیه مورد مطالعه با ناحیه دیگر متفاوت است، بنابراین نحوه مطالعه آنها نیز ممکن است با هم متفاوت باشد. انتخاب صحیح در نوع روش نمونه‌برداری، تعداد نمونه‌ها (فواصل نمونه‌برداری) و حجم (وزن) نمونه، باعث نزدیک شدن به واقعیت می‌گردد [یزدی، ۱۳۸۱].

با توجه به مشکلات ناشی از تولید پساب در اثر نفوذ اکسیژن در باطله‌های حاوی پیریت، مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی در مورد باطله‌های فرآوری حاوی مواد سولفیدی به صورت نمونه‌برداری از اعماق مختلف جهت بررسی تغییرات اکسایشی پیریت همراه باطله در عمق‌های مختلف می‌تواند مفید واقع شود [EPA، ۱۹۹۴]. بنابراین با توجه به اینکه حدود ۸۰ درصد باطله‌های ایجاد شده از کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی مربوط به دستگاه جیگ و مابقی مربوط به دستگاه فلوتاسیون می‌باشد و باطله‌های دستگاه جیگ به علت ابعاد درشت‌تر نسبت به باطله‌های فلوتاسیون،

احتمال نفوذ اکسیژن و آب در میان این باطله‌ها بیشتر به نظر می‌آید، به همین دلیل نمونه‌برداری و بررسی فرآیند اکسایش پیریت و تولید پساب اسیدی در باطله‌های جیگ ماشین صورت پذیرفت. بدین ترتیب نمونه‌های معرف به صورت عمقی و تا عمق ۲/۲۵ متری و به فواصل عمقی ۰/۲۵ متری در دو محل متفاوت بر روی دیپوی باطله قدیمی دستگاه جیگ، به صورت دستی و به وزن تقریبی یک کیلوگرم برداشته شد. به منظور جلوگیری از اختلاط و هوازدگی، نمونه‌های برداشته شده، شماره‌گذاری و داخل کیسه‌های دربسته قرار گرفتند. مشخصات مربوط به تعداد نمونه‌ها و عمق نمونه‌گیری در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول ۱-۳- مشخصات نمونه‌های برداشت شده

محل دوم ($X=0.277881, Y=40.26015, Z=1645$)		محل اول ($X=0.277904, Y=40.26035, Z=1648$)	
تعداد	عمق نمونه (m)	تعداد	عمق نمونه (m)
۱	سطحی	۱	سطحی
۱	۰/۲۵	۱	۰/۲۵
۱	۰/۵۰	۱	۰/۵۰
۱	۰/۷۵	۱	۰/۷۵
۱	۱	۱	۱
۱	۱/۲۵	۱	۱/۲۵
۱	۱/۵	۱	۱/۵
۱	۱/۷۵	۱	۱/۷۵
۱	۲	۱	۲
۱	۲/۲۵	۱	۲/۲۵

۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و تبدیل آنها به محلول

فرآیندهای اصلی تهیه نمونه مناسب برای تجزیه شیمیایی که باید در اینجا بررسی شوند عبارتند از خشک کردن، خرد کردن، الک کردن، تقسیم همگن نمونه. هر اندازه هم که نمونه با دقت

برداشت شود اگر به طور صحیحی آماده آزمایش نشود داده‌های حاصل از تجزیه آن بی ارزش خواهد بود.

نمونه‌های برداشته شده به منظور آماده‌سازی، به آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشکده معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل گردید. با توجه به درصد رطوبت موجود در نمونه‌ها، اغلب بهتر است تا نمونه‌ها خشک شوند، زیرا نمونه‌های مرطوب را نمی‌شود به طور مقتضی الک کرد. بنابراین برای خشک کردن مستقیم ابتدا تمامی نمونه‌ها را روی « ظروف تبخیر » گذاشته و سپس به مدت ۴۸ ساعت در داخل دستگاه دسیکاتور با دمای $105^{\circ}C$ قرار گرفت. خردایش نمونه‌ها تابعی از روش تجزیه می‌باشد. در مورد این نوع نمونه‌ها، برای به دست آوردن نمونه واقعاً همگن و معرف باید آنها را طوری پودر نمود که از میان الک با مقیاس ۲۰۰ مش بگذرند. بدین منظور، نمونه‌ها با استفاده از سنگ شکن فکی و غلطکی طوری خرد شدند تا همگی ذرات نمونه از سرند ۲۰ مش عبور کنند. در خردایش نمونه‌ها سعی شد که حداقل نرمه تولید گردد.

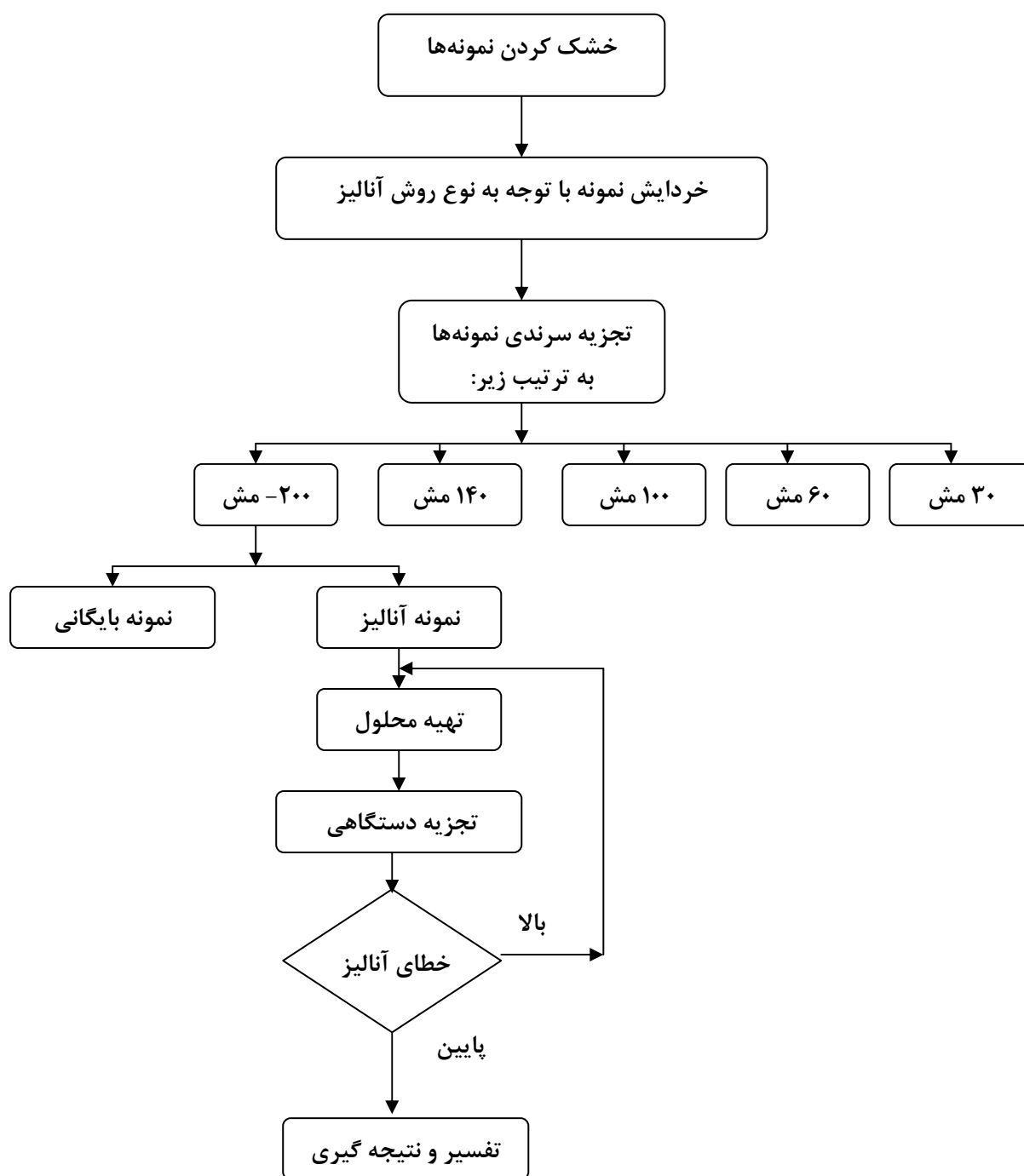
سپس جهت انتخاب نمونه آنالیز، نمونه‌های خرد شده از مرحله قبل با استفاده از دستگاه لرزاننده (شیکر) و به مدت ۱۵ دقیقه توسط سرندهای ۳۰، ۶۰، ۱۰۰، ۱۴۰ و ۲۰۰ مش تجزیه گردید. نمونه‌های قرار گرفته در روی هر سرند توزین گردید. جدول (۲-۳) و (۳-۳) نتایج تجزیه سرندی نمونه‌های برداشت شده از دمپ باطله را برای دو محل نشان می‌دهند. شکل (۱-۳) فلوچارت مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آنالیز را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲- نتایج تجزیه سرندي نمونه برداشت شده از محل اول

مقدار قرارگیری نمونه‌ها بر روی سرندي برای مش‌های مختلف (میلی گرم)						
عمق نمونه (m)	+۳۰	+۶۰	+۱۰۰	+۱۴۰	+۲۰۰	-۲۰۰
سطحي	۳۹۶/۳	۱۵۳/۳	۸۹/۵	۵۴/۸	۳۶/۳	۷۷/۲
۰/۲۵	۳۸۹/۷	۹۶/۲	۴۶/۴	۲۶/۷	۲۰/۵	۴۰
۰/۵۰	۴۵۴/۸	۹۷	۴۷/۵	۳۵/۵	۲۲/۵	۲۷/۶
۰/۷۵	۳۲۳/۹	۶۹/۸	۳۳/۲	۲۴/۵	۱۵/۳	۱۹/۶
۱	۴۹۴/۱	۹۶/۴	۴۸/۳	۳۵/۷	۲۳/۷	۳۳
۱/۲۵	۳۷۷/۷	۷۲/۹	۳۹/۳	۲۸/۲	۱۳	۶۰
۱/۵	۴۰۶/۹	۹۹/۶	۵۷/۷	۴۳/۷	۲۸/۸	۳۵/۲
۱/۷۵	۴۴۸/۸	۱۰۹/۱	۵۳/۶	۲۹/۲	۲۰/۲	۵۲/۵
۲	۳۶۲/۱	۸۲/۴	۴۵/۶	۳۶/۵	۲۳/۴	۳۲
۲/۲۵	۳۶۸	۶۹/۳	۳۶	۳۰/۵	۲۱/۷	۲۵/۸

جدول ۳-۳- نتایج تجزیه سرندي نمونه برداشت شده از محل دوم

مقدار قرارگیری نمونه‌ها بر روی سرندي برای مش‌های مختلف (میلی گرم)						
عمق نمونه (m)	+۳۰	+۶۰	+۱۰۰	+۱۴۰	+۲۰۰	-۲۰۰
سطحي	۳۸۲/۸	۱۲۹/۱	۷۸/۳	۵۸/۷	۳۸/۱	۵۲
۰/۲۵	۳۷۳	۸۱/۹	۳۹/۴	۲۰/۷	۹/۷	۴۲/۶
۰/۵۰	۴۶۲/۳	۸۴/۵	۴۷/۶	۳۲/۵	۱۳/۳	۵۱/۷
۰/۷۵	۴۵۲/۱	۷۳/۶	۲۹/۳	۲۴/۵	۱۸	۱۸/۷
۱	۳۷۳	۶۹/۶	۳۶/۶	۲۳/۲	۱۱/۳	۴۷/۴
۱/۲۵	۵۰۶/۵	۹۱/۶	۴۶/۷	۳۴/۲	۲۷/۱	۴۷/۲
۱/۵	۳۱۹	۶۷/۷	۳۲/۳	۲۱/۸	۱۵/۵	۲۶/۲
۱/۷۵	۳۴۸/۴	۷۰/۷	۳۵/۲	۲۶/۶	۱۴/۶	۲۸/۷
۲	۳۵۶/۷	۷۲/۹	۳۴/۷	۱۷/۸	۱۰/۵	۳۸/۴
۲/۲۵	۲۶۴/۵	۵۸/۴	۲۹/۷	۱۸/۸	۹/۱	۲۱/۹



شکل ۳-۱- فلوچارت مراحل آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌ها

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، گوگرد به عنوان عنصر مزاحم به سه شکل در زغال سنگ یافت می‌شود: الف- گوگرد آلی که منشاء ترکیبات آلی مانند مرکاپتان‌ها، تیول‌ها و ... دارد. ب- گوگرد غیرآلی که به صورت سولفات در زغال وجود دارد. پ- گوگرد به فرم پیریتی که به صورت

یک کانی شناخته شده در زغال وجود دارد. برای تعیین پیریت زغال سنگ، لازم است که گوگرد آلی و گوگرد غیرآلی موجود در زغال حذف گردد. با حل کردن نمونه زغال سنگ در اسید کلریدریک رقیق، گوگرد غیرآلی به صورت سولفات و همچنین برخی ترکیبات آلی گوگردار نیز از محلول جدا می‌شوند. در مرحله بعد با حل کردن باقیمانده زغال از مرحله قبل در اسید نیتریک رقیق، پیریت به فاز اسید منتقل می‌شود. به این ترتیب محلول اسیدی فقط حاوی گوگرد پیریتی است که به کمک دستگاه جذب اتمی مقدار آهن پیریت اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت درصد پیریت در نمونه‌های زغال تعیین می‌گردد.

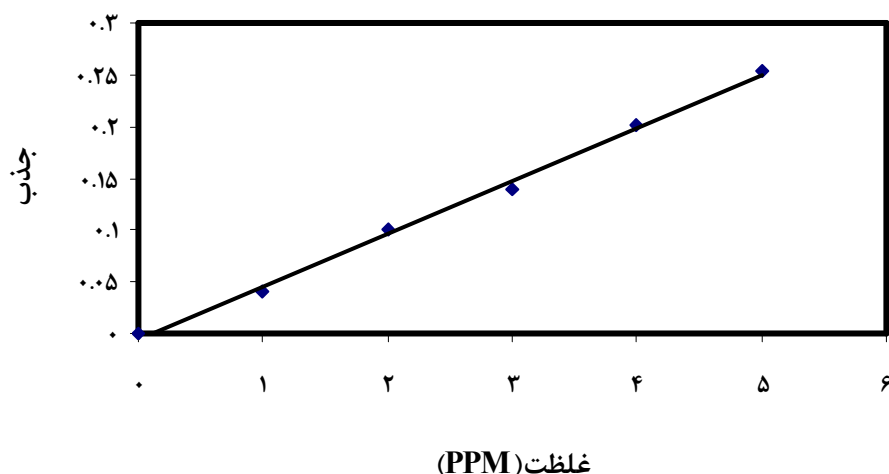
به طور کلی روش تهیه محلول‌ها بدین صورت می‌باشد که هر یک از $0/2$ گرم نمونه‌های زغال انتخابی از زیر سرند 200 مش در محلولی شامل 10 mL اسید کلریدریک غلیظ (37 درصد حجمی) و 15 mL آب مقطر افزوده می‌شود. مخلوط حاصل را تا زمان رسیدن به حجم 10 mL حرارت می‌دهند. این کار به خاطر اینکه تمام نمونه در اسید کلریدریک حل شود، انجام می‌گیرد. رسوب‌های حل نشده را از محلول جدا نموده و آنها را با 20 mL آب شستشو می‌دهند. رسوب حاصل را در محلولی از 7 mL اسید نیتریک غلیظ (65 درصد وزنی) و 50 mL آب قرار می‌دهند. مخلوط حاصل را مجدداً طی 50 دقیقه حرارت می‌دهند تا تمامی پیریت موجود در زغال حل شود. ناخالصی‌های حل نشده به کمک کاغذ صافی از محلول جدا می‌گردد. محلول موجود در زیر کاغذ صافی که حاوی آهن می‌باشد را در بالن ژوژه به حجم 100 mL می‌رسانند تا با استفاده از دستگاه جذب اتمی مقدار آهن آن اندازه‌گیری شود. باید توجه داشت که این کار برای تمامی نمونه‌های برداشته شده از اعماق مختلف در نقاط ۱ و ۲ انجام شده است.

۳-۴- آنالیز جذب اتمی و تعیین میزان پیریت

برای تعیین میزان پیریت باقی‌مانده در باطله زغال شویی، ابتدا بایستی میزان آهن موجود در آن را با استفاد از روش جذب اتمی بدست آورد. برای این کار ابتدا محلول‌هایی با غلظت معین از آهن شامل 1 ppm ، 2 ppm ، 3 ppm ، 4 ppm و 5 ppm از نمک مور با فرمول شیمیایی $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot \text{KH}_2\text{O}$ تهیه گردید و سپس مقدار جذب هر یک از آنها جداگانه توسط دستگاه

جذب اتمی موجود در دانشکده شیمی دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه‌گیری شد، حاصل آن یک نمودار خطی از ترسیم جذب بر حسب غلظت می‌باشد (شکل ۳-۲).

سپس جذب هر یک از محلول‌های آماده شده از نمونه‌ها در مرحله قبل به طور جداگانه به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. با استفاده از نمودار خطی شکل (۳-۲) و جذب نمونه‌ها، می‌توان غلظت آهن آنها را به راحتی محاسبه کرد. بدین طریق که مقدار جذب آهن را بر روی محور قائم شکل (۳-۲) پیدا کرده و سپس خطی افقی رسم کرده تا نمودار خطی را قطع کند. از محل تلاقی خطی قائم به طرف پایین کشیده و مقدار غلظت یادداشت می‌گردد. نتایج مربوط به آنالیز مقدار آهن نمونه‌های تهیه شده در دو محل از نمونه‌برداری در جداول (۳-۴) و (۳-۵) آورده شده است.



شکل ۳-۲- نمودار خطی جذب محلول بر حسب غلظت آهن به مقیاس ppm

با توجه به مقدار آهن به دست آمده در فاز پیریتی باطله زغال سنگ از دستگاه جذب اتمی، از طریق رابطه زیر می‌توان مقدار پیریت نمونه‌ها را محاسبه کرد.

$$x (mgFe) \times \left(\frac{1 \text{ mol } Fe}{55.85 \text{ gr } Fe}\right) \times \left(\frac{1 \text{ mol } FeS_2}{1 \text{ mol } Fe}\right) \times \left(\frac{119.85 \text{ gr } FeS_2}{1 \text{ mol } FeS_2}\right) = y (mgFeS_2)$$

که در رابطه بالا:

x = مقدار آهن بر حسب میلی‌گرم

y = مقدار پیریت بر حسب میلی‌گرم

جدول ۳-۴- مقادیر اندازه‌گیری شده آهن و پیریت موجود در نمونه‌ها (محل نمونه‌برداری اول)

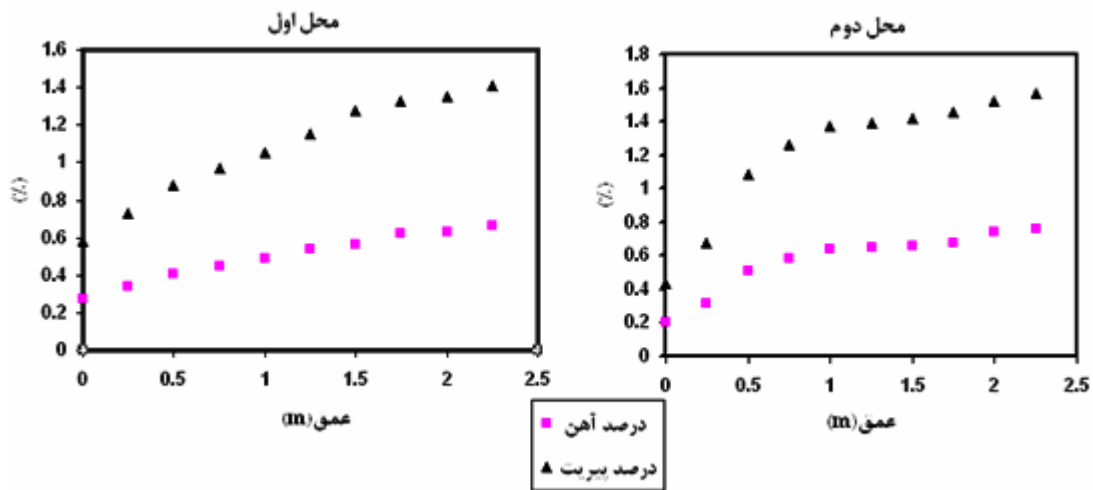
عمق نمونه (m)	درصد آهن	آهن (میلی‌گرم)	درصد پیریت	پیریت (میلی‌گرم)
۰	۰/۲۷	۰/۵۴	۰/۵۸	۱/۱۶
۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۷۳	۱/۴۸
۰/۵	۰/۴۱	۰/۸۳	۰/۸۸	۱/۷۸
۰/۷۵	۰/۴۵	۰/۹۱	۰/۹۷	۱/۹۵
۱	۰/۴۹	۰/۹۸	۱/۰۵	۲/۱
۱/۲۵	۰/۵۴	۱/۰۸	۱/۱۵	۲/۳۲
۱/۵	۰/۵۶	۱/۱۳	۱/۲۸	۲/۴۲
۱/۷۵	۰/۶۲	۱/۲۴	۱/۳۳	۲/۶۶
۲	۰/۶۳	۱/۲۶	۱/۳۵	۲/۷
۲/۲۵	۰/۶۶	۱/۳۱	۱/۴۱	۲/۸۱

جدول ۳-۵- مقادیر اندازه‌گیری شده آهن و پیریت موجود در نمونه‌ها (محل نمونه‌برداری دوم)

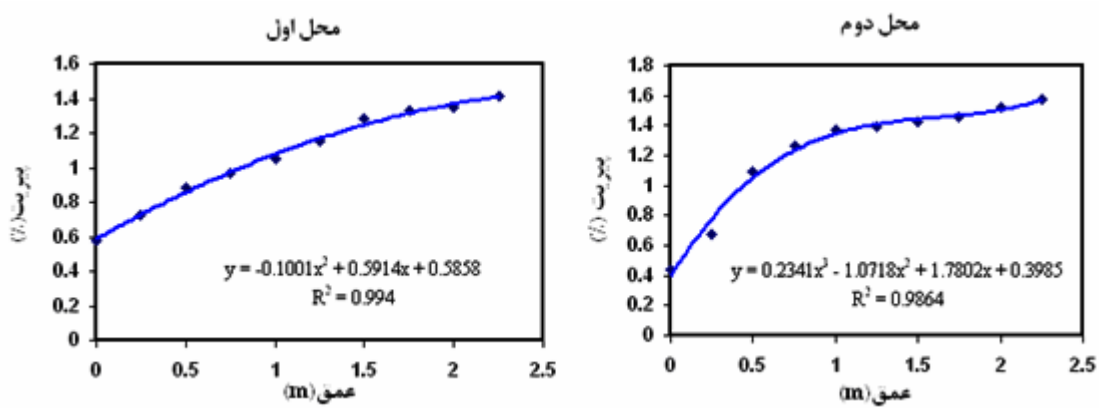
عمق نمونه (m)	درصد آهن	آهن (میلی‌گرم)	درصد پیریت	پیریت (میلی‌گرم)
۰	۰/۲	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۸۸
۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۶۳	۰/۶۸	۱/۳۵
۰/۵	۰/۵۱	۱/۰۲	۱/۰۹	۲/۱۹
۰/۷۵	۰/۵۸	۱/۱۷	۱/۲۶	۲/۵۱
۱	۰/۶۴	۱/۲۸	۱/۳۷	۲/۷۵
۱/۲۵	۰/۶۵	۱/۳۱	۱/۳۹	۲/۸۱
۱/۵	۰/۶۶	۱/۳۲	۱/۴۲	۲/۸۳
۱/۷۵	۰/۶۸	۱/۳۶	۱/۴۶	۲/۹۲
۲	۰/۷۴	۱/۴۸	۱/۵۹	۳/۱۸
۲/۲۵	۰/۷۶	۱/۵۲	۱/۶۳	۳/۲۶

۳-۵- تعیین میزان نفوذ اکسیژن در دمپ باطله

نفوذ اکسیژن در دمپ باطله یکی از فاکتورهای مؤثر و مهم در تولید پساب اسیدی می‌باشد. آگاهی از این فاکتور در مدیریت صحیح بر روی دمپ باطله‌های زغال خیلی مؤثر می‌باشد. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله قبل، نمودار مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده آهن و پیریت بدست آمد (شکل ۳-۳). همان‌طور که در شکل (۳-۳) ملاحظه می‌شود به دلیل حضور اکسیژن در اعماق کم دمپ باطله و انجام فرآیندهای اکسیداسیون، درصد پیریت کمتری در سطح باطله برای دو محل نمونه برداری شده، باقی‌مانده است و در جهت عمق به دلیل کمتر شدن درصد اکسیژن، میزان پیریت موجود در باطله‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه‌های برداشت شده مربوط به محل اول، میزان پیریت در سطح برابر ۰/۵۸ درصد و مقدار ماکزیمم آن برابر ۱/۴۱ درصد در عمق ۲/۲۵ متری تعیین شده است. همان‌طور که از شکل (۳-۳) مشاهده می‌شود، در این محل درصد پیریت باقی‌مانده از سطح تا عمق تقریبی ۱/۵ متری، روند صعودی داشته و پس از آن شیب منحنی پیریت باقی‌مانده کاهش می‌یابد، که این می‌تواند دلیلی بر نفوذ اکسیژن تا عمق تقریبی ۱/۵ متری باشد و از این عمق به بعد، نفوذ اکسیژن کمتر شده است. پیرت باقی‌مانده در سطح برای محل دوم از نمونه‌برداری برابر ۰/۴۴ درصد و مقدار ماکزیمم آن در عمق ۲/۲۵ متری برابر ۱/۶۳ درصد می‌باشد. با توجه به شکل (۳-۳) مربوط به محل نمونه‌برداری دوم، به خوبی مشاهده می‌شود که در این محل درصد پیریت باقی‌مانده تا عمق تقریبی ۱/۲۵ متری روند صعودی دارد و از این عمق به بعد همانند حالت قبل شیب منحنی پیریت باقی‌مانده کاهش می‌یابد که دلیل آن، کاهش قابل توجه اکسایش پیریت از عمق ۱/۲۵ متری به بعد به دلیل کاهش قابل توجه نفوذ اکسیژن می‌باشد. شکل (۳-۴) نمودار رگرسیون برای دو محل را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از روند اکسایش پیریت با استفاده از آنالیز شیمیایی نمونه‌ها به روش جذب اتمی در عمق‌های مختلف از دپوی باطله زغال، چنین به نظر می‌رسد که دپوی باطله مورد بررسی، پتانسیل تولید پساب اسیدی را دارد و می‌تواند باعث بروز مشکلات زیست‌محیطی در منطقه گردد. به این ترتیب که نفوذ اکسیژن در دمپ باطله سبب اکسایش پیریت شده که نتیجه آن تولید آلودگی ناشی از تشکیل پساب اسیدی و شسته شدن محصولات اکسایشی و انتقال آنها به آبخوان منطقه و مناطق آبی و خاکی پایین دست منطقه باشد.



شکل ۳-۳- درصد آهن و پیریت باقی مانده برای عمق‌های مختلف از دو محل نمونه برداری شده



شکل ۳-۴- نمودار رگرسیون بر روی درصد مقادیر پیریت باقی مانده برای دو محل

۴-۱- مقدمه

مدل‌ها به عنوان یک ابزار مناسب در پیش‌بینی پتانسیل آلودگی و گسترش آلاینده‌ها نقش مهمی دارند. در این فصل مکانیزم‌های حاکم بر فرآیندهای اکسایش پیریت و تولید آلودگی در دمپ باطله زغال‌شویی البرز شرقی مورد مدل‌سازی ریاضی یک و دو بعدی قرار گرفته است. ابتدا به اختصار انواع مدل‌های زیست‌محیطی معرفی می‌گردند. سپس معادلات ریاضی حاکم بر اکسایش پیریت و نفوذ اکسیژن در دمپ باطله ارائه می‌شوند. در ادامه نتایج مدل‌سازی عددی یک و دو بعدی با استفاده از نرم افزار چند منظوره *PHOENICS* [چم، ۲۰۰۸] با نتایج آنالیز نمونه‌های صحرایی مقایسه و مورد تفسیر قرار خواهند گرفت.

۴-۲- تعریف مدل

مدل عبارتست از یک نماینده یا الگو از آنچه که در یک سیستم واقعی در حال اتفاق است. هدف از مدل‌سازی این است که فهم، بینش و دانش ما نسبت به فرآیندهایی که در داخل یک سیستم واقعی اتفاق می‌افتد، بیشتر شود و همچنین پیش‌بینی کند که یک سیستم تحت مطالعه در آینده به چه نحوه عمل می‌کند. در واقع به کمک مدل‌ها می‌توان مکانیزم‌های انتقال جرم، نحوه اجرای روش‌های تصفیه و کم کردن اثرات آلودگی را طراحی، بهینه و دقیقاً پیش‌بینی کرد. انواع مدل‌ها به شرح زیر می‌باشند [دولتی ارده‌جانی و همکاران، ۲۰۰۴]:

- مدل‌های مفهومی^۱
- مدل‌های فیزیکی^۲
- مدل‌های ریاضی^۳

^۱ - Conceptual models

^۲ - Physical models

^۳ - Mathematical models

۴-۳- مدل های ریاضی

برای اینکه به صورت کمی رفتار فیزیکی یک سیستم، مورد ارزیابی قرار بگیرد از مدل های ریاضی استفاده می شود. یک مدل ریاضی در واقع یک معادله ریاضی است. معادلات ریاضی در صورت امکان به صورت تحلیلی یا عددی با استفاده از یک الگوریتم مناسب یا با بهره گیری از یک برنامه کامپیوتری برای یک متغیر انتخابی که سیستم مورد مطالعه را تعریف می کند، حل می شوند. در سال های اخیر به علت پیشرفت و کاربرد وسیع کامپیوترهای شخصی، مدل های عددی به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت و پیش بینی مشکلات آب های زیرزمینی مطرح شده و این کارایی نسبت به مدل های فیزیکی، آنها را کاربردی تر کرده است. مدل های ریاضی نیاز به کنترل تجهیزات آزمایشگاهی ندارند، کاربرد آنها آسان و نسبت به مدل های فیزیکی هزینه کمتری دارند در حالی که می توانند مسائل گسترده و پیچیده ای را حل نمایند [تاد^۱، ۱۹۸۰].

۴-۳-۱- مدل های عددی

مدل های عددی کاربرد گسترده ای در پیش بینی بسیاری از مسائل زیست محیطی و هیدروژئولوژیکی دارند. متداول ترین روش های عددی، روش تفاوت های محدود^۲، روش اجزاء محدود^۳ و روش حجم های محدود^۴ می باشند.

نرم افزارهای *CFD*^۵ (دینامیک سیالات محاسباتی) همچون *FLUENT*، *PHOENICS* و *FLOW3D* با استفاده از تکنیک های محاسباتی مختلفی که مورد استفاده قرار می دهند، می توانند فرآیندهای تولید آلودگی را در باطله های معادن با دقت خوبی مورد بررسی و مطالعه قرار دهند. در این پایان نامه سعی شده تا با بکارگیری یک مدل ریاضی، فرآیندهای اکسایش پیریت، نفوذ اکسیژن در باطله ها و تولید آلودگی در محل دمپ باطله کارخانه زغال شویی البرز شرقی با استفاده از نرم افزار *PHOENICS* [چم، ۲۰۰۸]، تشریح گردد.

به طور کلی روش سیستماتیک برای انجام مدل سازی ریاضی شامل مراحل است که به طور

¹ - Todd

² - Finite difference method

³ - Finite element method

⁴ - Finite volume method

⁵ - Computational fluid dynamics

خلاصه در زیر به آن اشاره می گردد.

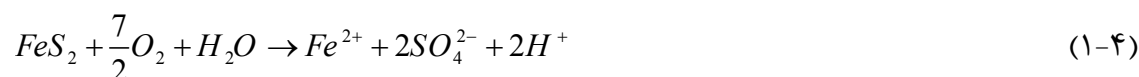
- ۱- طرح مسئله و تعیین هدف: در این مرحله مسئله مورد بحث مشخص و هدف از طرح مدل روشن می گردد.
- ۲- آماده سازی داده های مورد نیاز برای مدل.
- ۳- ارائه یک مدل مفهومی: مدل مفهومی در واقع تعریف تصویری از یک سیستم تحت مطالعه است.
- ۴- انتخاب یک مدل ریاضی: پس از اینکه یک مدل مفهومی توسعه پیدا کرد، گام بعدی انتخاب یک مدل ریاضی است که مدل مفهومی را به طور کمی مورد بررسی قرار دهد.
- ۵- تصمیم گیری در حل معادله یا مدل ریاضی: وقتی یک مدل ریاضی برای بررسی مشکل سیستم مورد مطالعه انتخاب شد، باید تصمیم گرفت که آن مدل به روش تحلیلی و با استفاده از معادلات ساده ریاضی حل شود و یا با استفاده از روش های عددی و به کمک برنامه های کامپیوتری تخمین زده شوند.

۴-۴- مراحل مدل سازی با نرم افزار *PHOENICS*

به منظور ایجاد تصویر دقیقی از جزئیات حل مشکلات با نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی همچون *PHOENICS* لازم است تا مراحل اصلی در مدل سازی بیان گردند. فلوچارت مراحل مدل سازی و پردازش با نرم افزار *PHOENICS* در شکل (ب-۱) و (ب-۲) از پیوست (ب) ارائه شده است.

۴-۵- معادله اکسید شدن پیریت

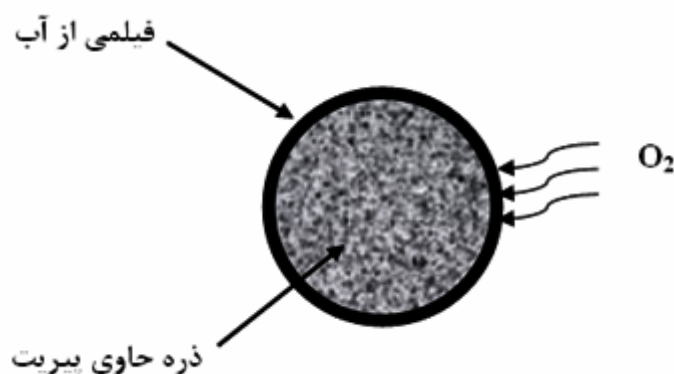
فرآیند اکسایش پیریت را در باطله های معدنی در رده واکنش های هتروژن طبقه بندی می نمایند [لونسپیل، ۱۹۷۲]. مطابق واکنش (۴-۱)، پساب اسیدی از اکسایش مستقیم پیریت با اکسیژن و آب تشکیل شده که نتیجه آن تولید Fe^{2+} ، SO_4^{2-} و H^+ می باشد.



کمی کردن فرآیند اکسایش پیریت و تولید آلودگی می تواند در تهیه برنامه مدیریت زیست محیطی به منظور کنترل آلودگی مهم واقع شود. معروف ترین مدلی که قادر است فرآیند اکسید

شدن پیریت یا نرخ لیچینگ آن را در باطله‌های حاوی پیریت تشریح کند، مدل مغزه انقباضی^۱ می‌باشد که اولین مرتبه توسط شخصی به نام لونسپیل^۲ ارائه گردید [لونسپیل، ۱۹۷۲ - دیویس و ریچی، ۱۹۸۶]. مدل مورد نظر فرضیات زیر را در نظر می‌گیرد:

- ذرات باطله حاوی پیریت عموماً کروی شکل هستند
 - پیریت به صورت یکنواخت در ذرات باطله حاوی آن پخش شده است
 - مکانیزم اکسایش پیریت در ذرات باطله توسط سینتیک واکنش سطحی^۳ و نفوذ ماده اکسید کننده به داخل ذرات^۴ کنترل می‌گردد.
 - ذرات باطله حاوی پیریت توسط لایه بسیار نازکی از آب احاطه شده است.
- طبق واکنش (۱-۴) فرض بر این است که اکسیژن تنها عامل اکسید کننده است و اکسایش پیریت تنها ناشی از مصرف اکسیژن می‌باشد. بنابراین، نرخ اکسید شدن ذره حاوی پیریت که اطراف این ذره را فیلمی از آب فرا گرفته، از نوع سینتیک درجه اول نسبت به سطح ذره و غلظت ماده اکسید کننده می‌باشد (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴- مکانیزم اکسید شدن پیریت از نوع سینتیک درجه اول

با استفاده از واکنش اکسایش پیریت (رابطه ۱-۴)، ضریب استوکیومتری اکسیژن مصرفی در فرآیند اکسیداسیون پیریت حاصل می‌شود. واکنش سینتیکی مرتبه اول اکسایش پیریت با معادله ریاضی ارائه شده در رابطه (۲-۴)، بیان می‌گردد [البرلینگ^۵ و همکاران، ۱۹۹۴]:

¹ - Shrinkage core model

² - Levenspiel

³ - Surface Reaction Kinetics

⁴ - Diffusion Oxidant

⁵ - Elberling

$$-\frac{d[FeS_2]}{dt} = -\frac{4.15d[O_2]}{dt} = KSC^n \quad (2-4)$$

که در رابطه بالا:

K : ثابت سینتیک مرتبه اول

S : مساحت سطح در واحد حجم

C : غلظت اکسیژن

در رابطه (۲-۴)، n معمولاً دارای مقداری بین صفر تا یک می باشد. برای بیان مناسب سینتیک مرتبه اول باید مقدار n را در غلظت‌های پایین اکسیژن یک در نظر گرفت. اکسیژن نفوذی از طریق ناحیه اکسید شده متخلخل در سطح ذره به سمت مغزه غیر اکسید شده حرکت می کند. پس از اکسید شدن ذرات، اندازه سطح آنها برای هر ذره به دلیل پدیده انقباض کاهش می یابد و در نهایت به دلیل افزایش ضخامت ناحیه اکسید شده، حجم اکسیژن مصرفی با گذشت زمان کاهش می یابد.

۴-۶- معادله نفوذ اکسیژن در دمپ باطله‌ها

در مدل سازی نفوذ اکسیژن فرض شده که تنها فرآیند مؤثر در انتقال اکسیژن در باطله‌ها، نفوذ به حالت گازی است. البته آب نیز از عوامل مهم و تأثیر گذار در انتقال اکسیژن می باشد که در این مدل از آن صرف نظر شده است. نفوذ اکسیژن در باطله، در شرایط پایا^۱ بر اساس قانون اول فیک^۲ به صورت رابطه (۳-۴) بیان می گردد [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴].

$$J_D = -D_e \frac{dC}{dz} \quad (3-4)$$

که در رابطه بالا:

J_D = جریان^۳ نفوذ اکسیژن در فاز گازی

D_e = ضریب نفوذ مؤثر^۴ بر حسب متر مربع بر ثانیه (m^2/s)

C = غلظت اکسیژن در عمق Z ، فقط در فاز گازی (kg/m^3)

^۱ - Steady- State

^۲ - Fick's first law

^۳ - Flux

^۴ - Effective diffusion coefficient

$$= \frac{dC}{dz} = \text{گرادیان غلظت که در جهت نفوذ منفی می باشد}$$

علامت منفی در معادله (۳-۴) نشان دهنده نفوذ اکسیژن از غلظت‌های بیشتر به غلظت‌های کمتر می‌باشد. در این مدل باطله‌ها به صورت همگن فرض شده‌اند و پیریت داخل باطله‌ها به صورت یکنواخت توزیع شده است. بعلاوه فرض شده که ضریب نفوذ در زمان‌ها و عمق‌های مختلف ثابت باشد و همچنین از اکسایش سایر سولفیدها نسبت به اکسایش پیریت صرف نظر شده است.

معادله انتقال اکسیژن در شرایط ناپایا هنگامی که غلظت اکسیژن با زمان تغییر می‌کند از مفهوم پیوستگی نتیجه می‌شود، بنابراین طبق معادله (۴-۴) داریم [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{dJ_D}{dz} - S_1 \quad (4-4)$$

که در رابطه بالا:

$$S_1 = \text{ترم مصرف حجمی اکسیژن در واکنش پیریت-اکسیژن (mol/m}^3 \cdot \text{s)}$$

در این معادله فرض شده است که ترم مصرف اکسیژن، فقط مربوط به واکنش اکسیداسیون مستقیم با پیریت می‌باشد و از سایر ترم‌های مصرف مثل ترم مصرف اکسیژن در واکنش اکسیداسیون آهن دو ظرفیتی و همچنین ترم مصرف در اثر فعالیت باکتری‌ها طی واکنش اکسیداسیون بیولوژیکی آهن دو ظرفیتی، صرف‌نظر شده است. با فرض ثابت بودن D_e در معادله (۳-۴) و قرار دادن آن در معادله (۴-۴) رابطه زیر به دست می‌آید [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]:

$$\frac{dC}{dt} = D_e \frac{d^2C}{dz^2} - S_1 \quad (5-4)$$

۴-۷- پارامترهای ورودی مدل

تحت فشار اتمسفری و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت اکسیژن تقریباً ۹ مول بر متر مکعب (معادل ۲۱٪ درصد، به عنوان بخش مولی اکسیژن در هوا) است و ضریب K یا ثابت سینتیک مرتبه اول دارای مقدار $2/21 \times 10^{-9} \text{ mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ و یا $5/9 \pm 2/1 \times 10^{-10} \text{ mol FeS}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ می‌باشد پارامترهای ورودی مدل در جدول (۴-۱) ارائه شده است [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴].

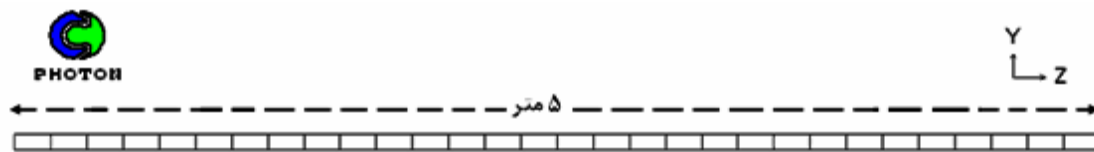
به منظور بررسی فرآیند اکسایش پیریت، مدل سازی یک بعدی و همچنین برای تشخیص دقیق تر از نحوه گسترش آلودگی، مدل سازی دو بعدی انجام پذیرفت.

جدول ۴-۱- پارامترهای ورودی مدل [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]

طول مدل	۵ متر (در امتداد Z)
مدت زمان شبیه سازی	۱-۳ سال
تعداد گام های زمانی	۲۴
بستگی زمانی مدل	ناپایا
تعداد المانهای حجمی	۳۰ (طول یکسان ۰/۱۶۶ متر)
ضریب نفوذ مؤثر اکسیژن	متغیر $(\frac{m^2}{s})$ $(1 \times 10^{-8} - 6 \times 10^{-7})$ [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]
درصد اولیه پیریت در باطله های زغال	(۱/۴-۱/۶ %)
دانسیته باطله	۲۳۰۰ kg/m ³ [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]
دانسیته پیریت	۵۹۰۰ kg/m ³ [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]
ضریب نفوذپذیری باطله	متغیر 2×10^{-6} [جدیری، ۱۳۸۵]
سطح پیریت به واحد حجم باطله	۹۰ (۱/ m)
ثابت سینتیک درجه اول برای O ₂	$2/21 \times 10^{-9}$ (mol O ₂ /m ² s) [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]
ثابت سینتیک درجه اول برای FeS ₂	$5/9 \times 10^{-10}$ (mol FeS ₂ /m ² s) [البرلینگ و همکاران، ۱۹۹۴]
بارندگی متوسط سالیانه	۰/۲۵ (m/yr) [نشریه آمار سالیانه هواشناسی، ۱۳۸۵]
تعداد تکرارها	۵۰۰

۴-۸- شرایط مرزی

مدل یک بعدی جهت بررسی تغییرات اکسایشی پیریت به طول ۵ متر در امتداد محور Z مختصات دکارتی در نظر گرفته شد. مدل انتخابی به ۳۰ المان هم اندازه با طول ۰/۱۶۶ متر تقسیم شد و سپس شرایط مرزی و اولیه جهت شبیه سازی، بر روی مدل اعمال گردید. شکل (۴-۲) مدل یک بعدی انتخابی را نشان می دهد.



شکل ۴-۲- مش حجم های محدود دمپ باطله

۴-۸-۱- شرایط مرزی برای مدل اکسیژن و اکسایش پیریت

برای حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر نفوذ اکسیژن به داخل دپو باطله زغال و اکسایش پیریت بایستی یک سری شرایط مرزی در سیستم تحت مدل سازی تعریف نمود تا تحت چنین شرایطی اثرات خارجی سیستم و قیود لازم در مدل اعمال گردد و در نهایت جواب واحدی برای مسئله مورد بررسی و متغیرهای مورد نظر حاصل شود. این شرایط به قرار زیر می باشند:

• شرط مرزی نوع اول:

در شرط مرزی نوع اول مقدار اکسیژن در مرز ورودی مدل معادل با مقدار اکسیژن در اتمسفر که برابر ۹ مول بر متر مکعب و به عبارتی معادل ۰/۲۱ درصد در نظر گرفته می شود.

$$C(z=0, t) = C_0 = 0.21 \quad (۴-۶)$$

• شرط اولیه:

این شرط توزیع اکسیژن در طول مدل را، قبل از فرآیند مدل سازی بیان می دارد. این مقدار در طول مدل معمولاً صفر در نظر گرفته شده و به صورت رابطه (۴-۷) خواهد بود:

$$C(z, 0) = C_{init} = 0 \quad , \quad z \geq 0 \quad ; \quad t = 0 \quad (۴-۷)$$

• شرط مرزی نوع اول در مرز خروجی مدل:

مفهوم این شرط مرزی این است که در انتهای مدل، غلظت اکسیژن را معادل مقدار اولیه اش در مدل قرار می دهند و از دیدگاه ریاضی به صورت رابطه (۴-۸) خواهد بود:

$$C(\infty, t) = 0 \quad , \quad t \geq 0 \quad (۴-۸)$$

• شرط اولیه برای اکسایش پیریت:

برای حل مدل اکسایش پیریت تنها یک شرط اولیه کافی است که بیانگر درصد پیریت اولیه

موجود در باطله‌ها می‌باشد که درصد اولیه پیریت در باطله‌های دستگاه جیگ برابر $1/4 - 1/6$ بدست آمد. باید توجه داشت که این شرط را بایستی در سراسر طول مدل اعمال نمود:

$$C(z,0) = 1/4 - 1/6 \quad (9-4)$$

پس از اعمال شرایط مرزی و اولیه مناسب، مدل‌های نفوذ اکسیژن و اکسایش پیریت به روش عددی حجم‌های محدود توسط نرم افزار *PHOENICS* حل شدند.

۹-۴- مدل سازی یک بعدی نفوذ اکسیژن و اکسیداسیون پیریت در دمپ باطله

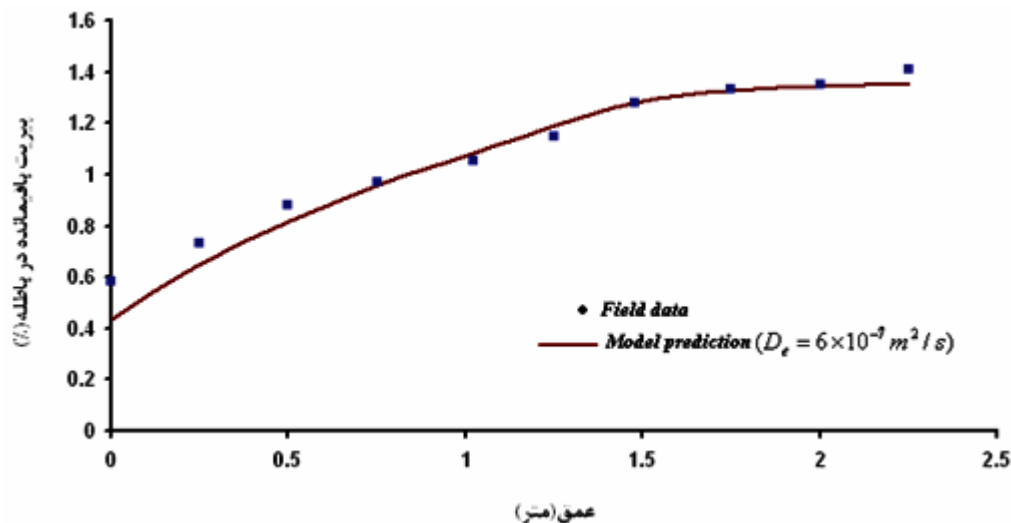
مدل سازی معادلات نفوذ اکسیژن و اکسایش پیریت با در نظر گرفتن عبارت مصرف حجمی اکسیژن در واکنش پیریت - اکسیژن انجام گردید. مدل‌های مذکور با اعمال شرایط مرزی و اولیه مناسب به روش عددی حجم‌های محدود توسط نرم افزار *PHOENICS* حل شدند. با توجه به اینکه مقدار اکسیژن در طول مدل با توجه به ضریب نفوذ مؤثر آن تغییر می‌کند در نتیجه میزان اکسایش پیریت بسته به مقدار اکسیژن موجود در طول مدل متفاوت خواهد بود. در فرآیند مدل سازی، تغییرات بخش مولی اکسیژن^۱ و اکسایش پیریت بر حسب درصد با توجه به ضرایب نفوذ مؤثر مختلف برای مدت شبیه سازی یک سال و همچنین با در نظر گرفتن اندازه سطح پیریت برابر $\alpha_{py} = 90 (m^{-1})$ برای دو محل نمونه برداری مورد بررسی قرار گرفت و بهترین حالت به عنوان مدل یک بعدی انتخاب گردید. بهترین ضریب نفوذ مؤثر در مدل 6×10^{-7} متر مربع بر ثانیه انتخاب شد. این انتخاب بر اساس تحقیقات انجام شده روی دمپ‌های باطله در نقاط مختلف دنیا که در آن ذرات باطله ابعاد مشابهی با ابعاد باطله‌های دمپ مورد مطالعه دارند، صورت پذیرفته است. بعلاوه اینکه با این ضریب نفوذ مؤثر انطباق مناسب بین داده‌های صحرایی و نتایج مدل سازی برای مدل اکسایش پیریت به دست آمد.

۹-۴-۱- نتایج مدل سازی یک بعدی نمونه اول

همان گونه که در بالا ذکر شد، با استفاده از نرم افزار *PHOENICS*، مدل مغزه انقباضی اکسایش پیریت بطور همزمان با مدل نفوذ اکسیژن حل شد و نتایج مدل سازی عددی با داده‌های صحرایی برای تعیین پیریت باقیمانده در محل‌های نمونه برداری روی دمپ باطله زغال مقایسه گردید.

^۱ - Model fraction of oxygen

شکل (۳-۴) نتیجه مدل سازی یک بعدی برای مقدار پیریت باقیمانده در دمپ باطله نسبت به عمق برای مدت شبیه سازی یک سال از آغاز اکسایش پیریت را نشان می دهد. در این شکل نتایج مدل سازی عددی با داده های صحرایی مقایسه شده است. تطابق مناسب بین داده های صحرایی و نتایج مدل دلالت بر انتخاب صحیح پارامترهای مؤثر در اکسایش پیریت در انجام مدل سازی می باشد.

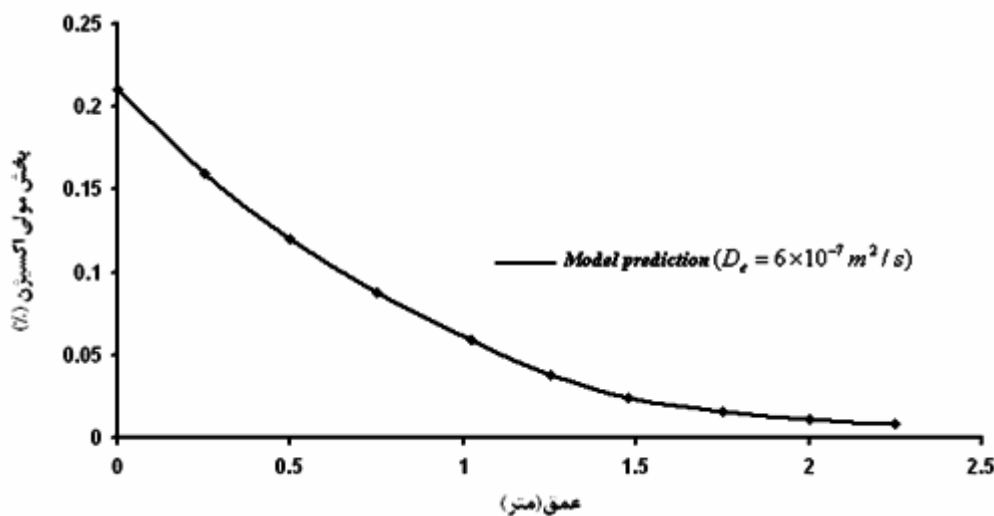


شکل ۳-۴- مقایسه داده های صحرایی و پیش بینی مدل برای تعیین درصد پیریت باقیمانده نسبت به عمق باطله در نمونه اول

داده های آنالیز شده به روش جذب اتمی نشان می دهد که مقدار پیریت باقیمانده در نمونه های سطحی حدود ۰/۵۸ درصد است و تا اعماق ۱/۵ متری به علت نفوذ اکسیژن، مقدار پیریت موجود در باطله ها تدریجاً کاهش می یابد و از این عمق به بعد به دلیل عدم نفوذ اکسیژن، اکسیداسیون پیریت تقریباً متوقف می گردد. با توجه به اینکه مقدار ضریب نفوذ مؤثر $D_e = 6 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه برای مدل سازی انتخاب گردید، مشاهده می شود که مدل نیز روند مشابهی را برای تغییرات پیریت باقیمانده از سطح دمپ تا عمق تقریبی ۱/۵ متری نشان می دهد و از این عمق به بعد فرآیند اکسایش پیریت متوقف شده و پیریت باقیمانده در اعماق بیشتر از ۱/۵ متر به مقدار اولیه خود در باطله ها یعنی ۱/۴۱ درصد با یک روند ثابتی می رسد.

شکل (۴-۴) پیش بینی مدل یک بعدی برای بخش مولی اکسیژن نسبت به عمق باطله در نمونه اول با ضریب نفوذ مؤثر 6×10^{-9} متر مربع بر ثانیه، برای مدت شبیه سازی یک سال را نشان

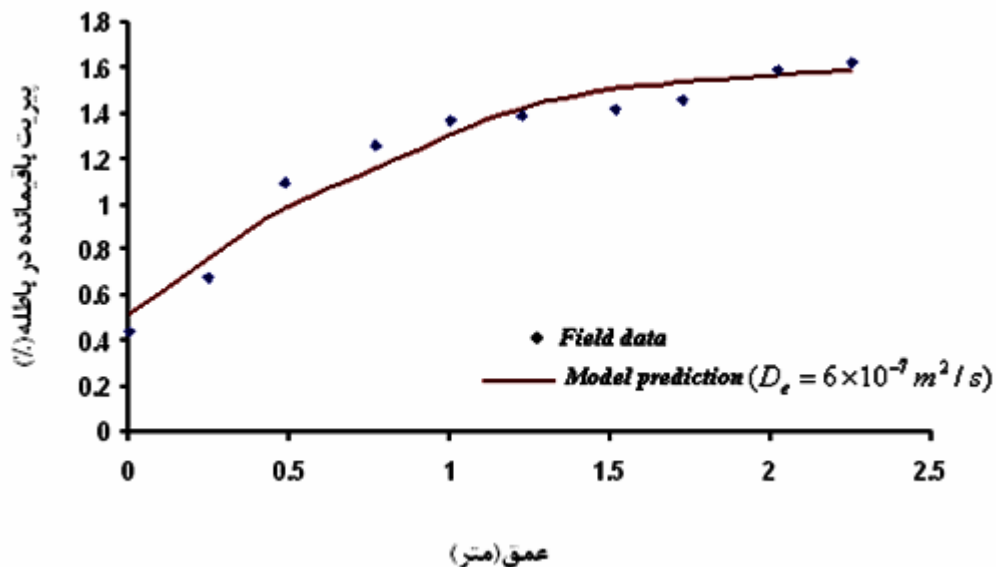
می دهد. مقدار بخش مولی اکسیژن در سطح دمپ همان طور که قبلاً گفته شد، برابر با مقدار آن در اتمسفر یعنی ۰/۲۱ درصد در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۴-۴) مشاهده می شود که مقدار اکسیژن با شیب نسبتاً زیاد از سطح دمپ به داخل باطله ها به دلیل مصرف آن توسط پیریت کاهش می یابد و از عمق تقریبی ۱/۵ متری به بعد، نفوذ اکسیژن در باطله ها تدریجاً انجام می گیرد و در عمق تقریبی ۲ متر به حدود ۰/۰۱ درصد می رسد.



شکل ۴-۴- نتیجه مدل برای بخش مولی اکسیژن نسبت به عمق باطله

۴-۹-۲- نتایج مدل سازی یک بعدی نمونه دوم

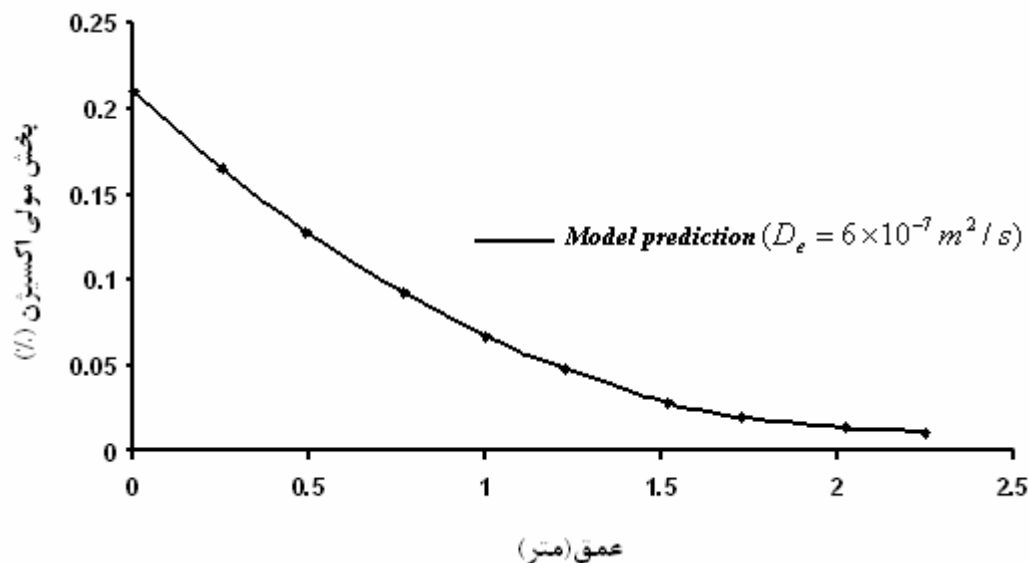
مقایسه نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی یک بعدی برای درصد پیریت باقیمانده در باطله ها نسبت به عمق در محل نمونه برداری دوم، با داده های صحرائی برای مدت زمان یک سال تطابق خوبی را نشان می دهند (شکل ۴-۵). همان طور که در شکل مشاهده می شود، هر دو داده های صحرائی و پیش بینی مدل نشان می دهند که با افزایش عمق نمونه برداری، درصد پیریت باقیمانده موجود در باطله ها با یک روند صعودی از مقدار ۰/۴۴ درصد در سطح دمپ باطله به ۱/۴۵ درصد در عمق تقریبی ۱/۵ متری می رسد و از این عمق به بعد مانند حالت قبل یک روند ثابتی را طی می کند که حاکی از متوقف شدن فرآیندهای اکسایش پیریت می باشد که به دلیل عدم نفوذ اکسیژن کافی در اعماق بیش از ۱/۵ متری صورت می گیرد.



شکل ۴-۵- مقایسه داده های صحرایی و پیش بینی مدل برای تعیین درصد پیریت باقیمانده نسبت به عمق باطله در نمونه دوم

شکل (۴-۶) نتیجه مدل برای بخش مولی اکسیژن نسبت به عمق باطله با ضریب نفوذ موثر 6×10^{-7} متر مربع بر ثانیه، برای مدت شبیه سازی یک سال را نشان می دهد. با توجه به مدل بدست آمده به خوبی روند تغییرات بخش مولی اکسیژن مشاهده می شود، به طوری که مقدار اکسیژن در سطح برابر ۰/۲۱ درصد می باشد و تا عمق ۱/۵ متری به دلیل مصرف اکسیژن توسط پیریت موجود در باطله ها، مقدار آن به ۰/۰۲۴ درصد می رسد که تقریباً یک روند خطی را طی می نماید و در اعماق بیشتر از ۱/۵ متری، روند نزولی تدریجی در مدل مشاهده می شود.

با توجه به اینکه در نقاط نمونه برداری اول و دوم میزان نفوذ پذیری باطله تقریباً مشابه می باشد، بنابراین پیش بینی مدل برای نفوذ اکسیژن در دو نقطه نمونه برداری تقریباً مشابه می باشد.



شکل ۴-۶- پیش‌بینی مدل عددی برای بخش مولی اکسیژن نسبت به عمق باطله

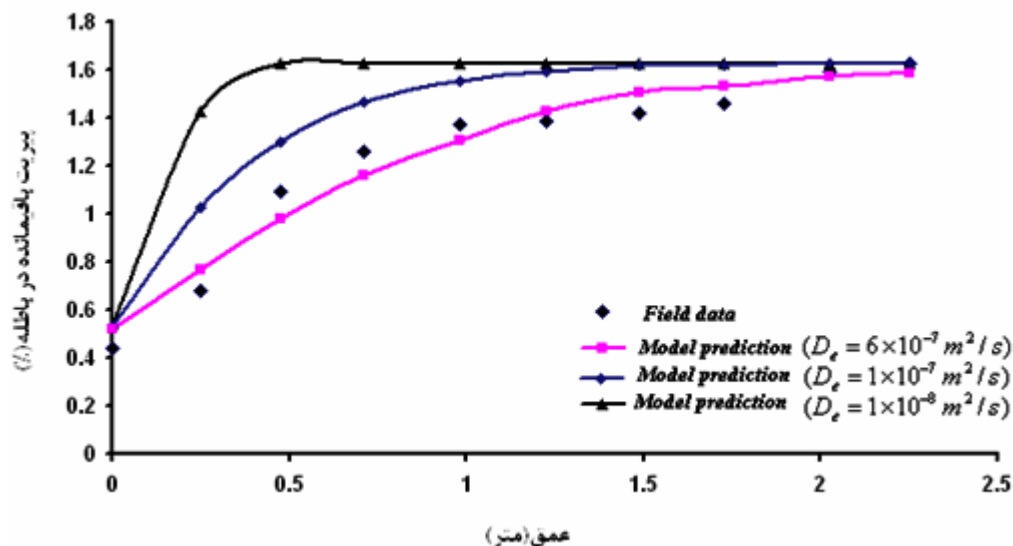
۱۰-۴- آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در اکسیداسیون پیریت

هدف از آنالیز حساسیت، بررسی پارامترهای مؤثر در نحوه اکسیداسیون پیریت می‌باشد. بدین ترتیب با تغییر دادن پارامترهای مؤثر، اثرات آن را بر روی مدل مشخص می‌کنیم. به طور خلاصه "آنالیز حساسیت عبارتست از تکرار محاسبات یک فرآیند مدل‌سازی با تغییر دادن پارامترهای اصلی و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از اطلاعات اولیه". بدین منظور با تغییر دادن پارامترهایی نظیر، ضریب نفوذ مؤثر، سطح پیریت بر واحد حجم باطله و مدت زمان اکسیداسیون، اثرات آنها بر روی مدل یک بعدی حاصل از اکسیداسیون پیریت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه نتایج دو مدل یکسان بود، آنالیز حساسیت تنها برای نمونه دوم در این قسمت ارائه شده است.

۱۰-۴-۱- آنالیز حساسیت مدل‌سازی برای نمونه دوم

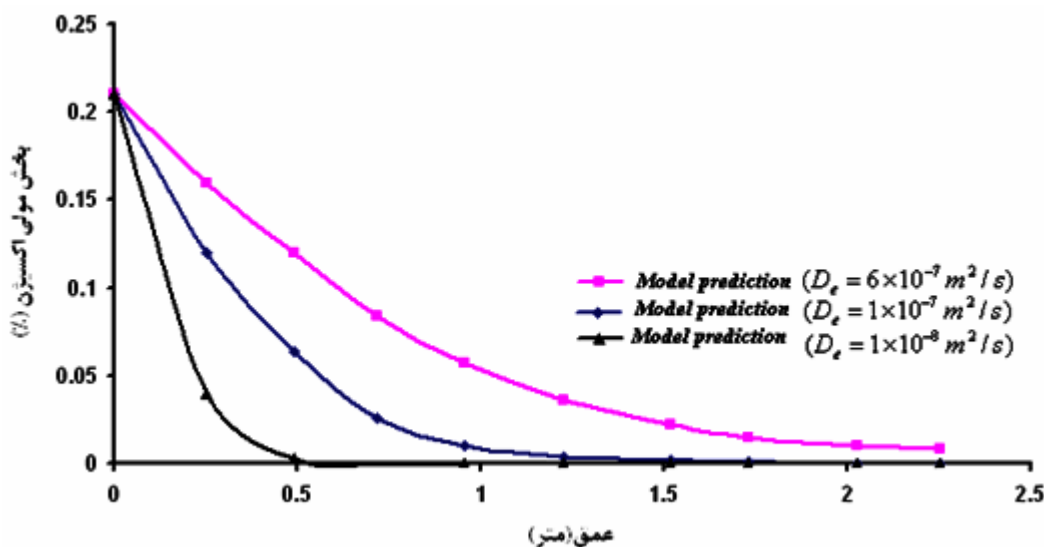
شکل (۴-۷) مقدار پیریت باقی‌مانده در باطله‌ها نسبت به عمق را با توجه به ضرایب نفوذ مؤثر مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، میزان اکسیداسیون پیریت بسته به مقدار اکسیژن موجود در طول مدل متفاوت خواهد بود و سرعت اکسیداسیون با ضریب نفوذ مؤثر از سطح تا عمق باطله‌ها کنترل می‌شود. با افزایش ضریب نفوذ مؤثر، اکسیژن تا اعماق بیشتری نفوذ می‌کند و باعث

اکسیداسیون پیریت تا عمق بیشتری می‌شود و به علاوه نرخ اکسیداسیون پیریت را افزایش می‌دهد. با طبع با کاهش ضریب نفوذ، اکسیژن کمتر در دمپ نفوذ می‌کند و پیریت باقی‌مانده در عمق کمتری به مقدار اولیه‌اش می‌رسد. همان‌طور که در شکل (۴-۷) مشاهده می‌شود، با ضریب نفوذ 6×10^{-7} متر مربع بر ثانیه، اکسیژن تا عمق ۱/۵ متری نفوذ می‌کند و از این عمق به بعد درصد پیریت باقی‌مانده با روند ثابتی به مقدار اولیه‌اش می‌رسد. در صورتی که اگر ضریب نفوذ به مقدار 1×10^{-8} متر مربع بر ثانیه کاهش یابد، مشاهده می‌شود که اکسیژن تا عمق کمتر از ۰/۵ متر نفوذ کرده و از این عمق به بعد درصد پیریت باقی‌مانده برابر مقدار اولیه خود یعنی ۱/۶۳ رسیده است.



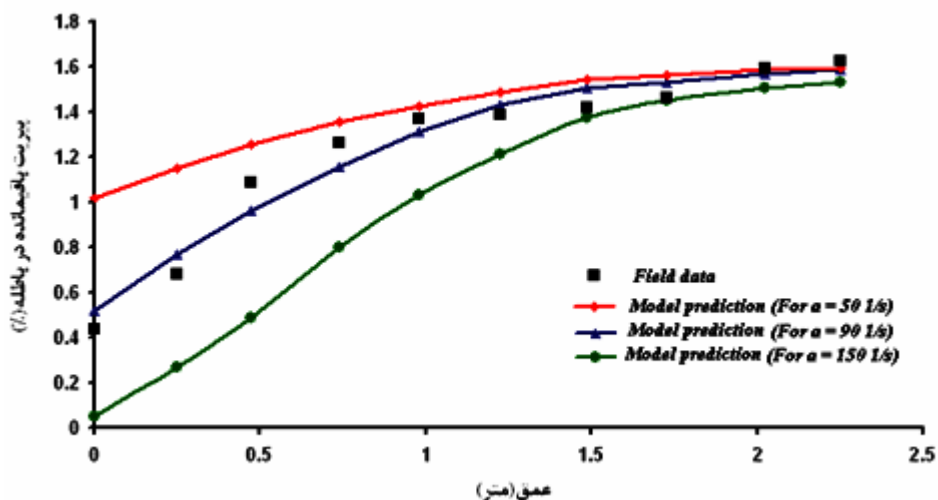
شکل ۴-۷- مقایسه داده‌های صحرایی و پیش‌بینی‌های مدل برای تعیین درصد پیریت باقیمانده نسبت به عمق باطله‌ها به صورت تابعی از ضریب نفوذ مؤثر اکسیژن در باطله‌ها، مربوط به نمونه دوم

تغییرات بخش مولی اکسیژن بر حسب درصد نسبت به عمق با توجه به ضرایب نفوذ مؤثر مختلف مدل‌سازی گردید. نتایج مربوط به این مدل‌سازی در شکل (۴-۸) آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که درصد مولی اکسیژن با کاهش ضریب نفوذ به مقدار 1×10^{-8} متر مربع بر ثانیه، از مقدار ۰/۲۱ درصد در اتمسفر و سطح دمپ به مقدار صفر در عمق ۰/۵ متری می‌رسد و با افزایش ضریب نفوذ مؤثر، اکسیژن تا عمق بیشتری در دمپ باطله نفوذ می‌نماید و میزان اکسیژن بیشتری جهت انجام فرآیندهای اکسیداسیون پیریت فراهم می‌گردد.



شکل ۴-۸- تغییرات درصد اکسیژن در طول مدل با ضرایب نفوذ مؤثر مختلف

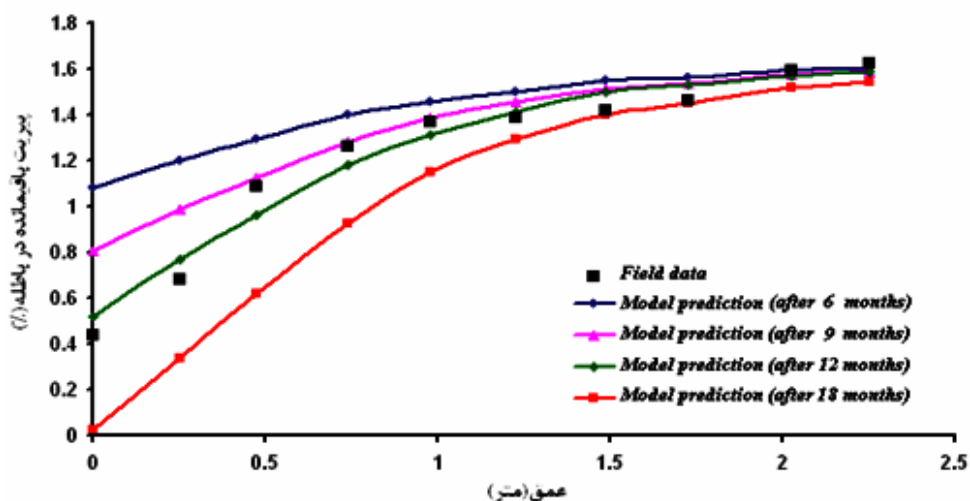
فرآیند اکسیداسیون پیریت منجر به کاهش سطح ذرات حاوی پیریت می‌گردد. به منظور سادگی، اندازه ذرات پیریت در ابتدا یکسان فرض شده است. پس از اینکه ذرات اکسید شدند، اندازه سطح آنها برای هر ذره به دلیل پدیده انقباض کمتر شده و در نهایت حجم اکسیژن مصرفی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۴-۹) مشاهده می‌شود با کاهش سطح اولیه پیریت از (m^{-1}) ۹۰ به (m^{-1}) ۵۰، نرخ اکسیداسیون پیریت کمتر می‌شود و به عبارت دیگر تغییرات اکسایشی پیریت نسبت به عمق با شیب ملایم‌تری ظاهر می‌گردد. با افزایش سطح پیریت به مقدار (m^{-1}) ۱۵۰، مشاهده می‌شود که نرخ اکسیداسیون پیریت در اعماقی که اکسیژن حضور دارد به دلیل سطح تماس بیشتر ذره حاوی پیریت با اکسیژن، شدیداً افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۹- تغییرات درصد پیریت باقی‌مانده در طول مدل به صورت تابعی از سطح واحد حجم باطله‌های حاوی

پیریت

شکل (۴-۱۰) نتایج مدل را برای درصد پیریت باقی‌مانده نسبت به عمق باطله با یک ضریب نفوذ موثر ثابت، برابر 6×10^{-7} متر مربع بر ثانیه و برای چهار زمان شبیه‌سازی ۶، ۹، ۱۲ و ۱۸ ماه نشان می‌دهد. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، برای یک مدت زمان شبیه‌سازی ۶ ماهه، زمان برای تماس اکسیژن و پیریت کافی نبوده و همچنین اکسیژن تا عمق ناچیزی در دمپ باطله نفوذ می‌نماید، بنابراین پیریت کمتری اکسید می‌گردد. حال آنکه وقتی زمان از ۶ ماه به ۱۸ ماه افزایش می‌یابد، مدت زمان تماس افزایش یافته و عمق نفوذ اکسیژن نیز افزایش می‌یابد، بنابراین افزایش زمان می‌تواند عاملی برای اکسیداسیون بیشتر پیریت باشد.



شکل ۴-۱۰- تغییرات درصد پیریت باقی‌مانده در طول مدل با زمان‌های شبیه‌سازی مختلف

۱۱-۴- مدل سازی دو بعدی ریاضی^۱

۱-۱۱-۴- تنظیمات مدل و پارامتر ورودی

مدل سازی دو بعدی نیز در پیش بینی فرآیند اکسیداسیون پیریت و همچنین نحوه انتقال محصولات اکسید شده ناشی از دمپ باطله زغال شویی البرز شرقی انجام شد. پارامترهای ورودی در مدل سازی دو بعدی شامل گونه های شیمیایی آنالیز شده از دمپ باطله زغال [دولتی ارده جانی و همکاران، ۲۰۰۸] و همچنین پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی یک بعدی می باشد (جدول ۴-۲).

جدول ۴-۲- گونه های شیمیایی مورد استفاده در مدل سازی دو بعدی ریاضی

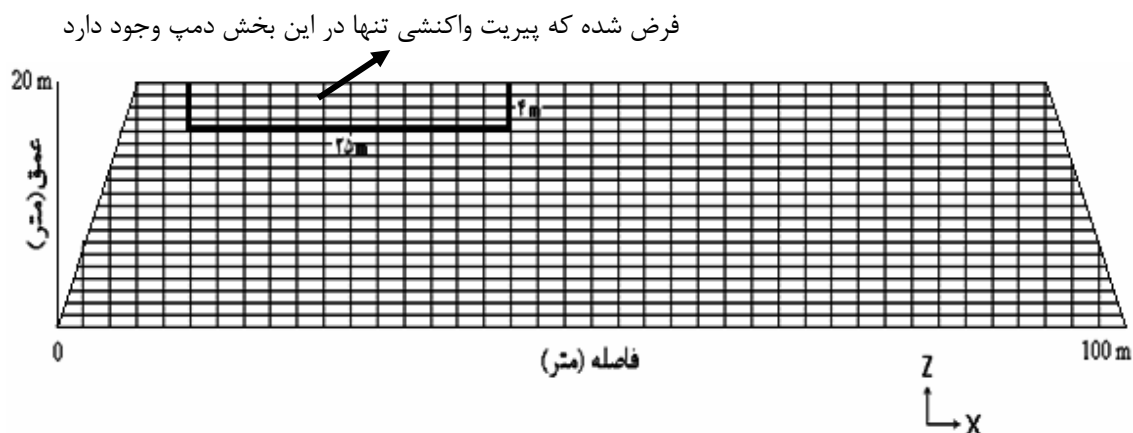
گونه های شیمیایی	غلظت منبع <i>m.e/L</i>	غلظت زمینه <i>m.e/L</i>
Fe^{2+}	۱۰	۱۰
Fe^{3+}	۰	۰
SO_4^{-2}	۵۰	۵۰
<i>pH</i>	۶	۷

شکل اولیه مدل دو بعدی به صورت دوزنقه با ابعاد ۱۰۰ متر در جهت افقی و ۲۰ متر در جهت قائم (ارتفاع دمپ) در نظر گرفته شد. ابعاد این مدل توسط سلول های کوچک تری به اندازه ۲ متر در ۱ متر و به تعداد ۲۰ × ۴۰ تقسیم بندی گردید. شبکه المان حجمی محدود مورد استفاده در مدل سازی حاضر در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.

در این شبیه سازی فرض بر این است که پیریت واکنشی فقط به پهنای ۲۵ متر از دمپ باطله را شامل می گردد. فرض بر این است که محصولات اکسایش توسط بارش جوی به اعماق بیشتر نفوذ می نماید، به طوری که متوسط بارش سالیانه در مدل سازی ۰/۲۵ متر بر سال فرض شده است. نفوذ پذیری دمپ حدود 10^{-6} × ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. ضریب نفوذ مولکولی برای محصولات

^۱ - Two-dimensional simulation

اکسیداسیون 2×10^{-9} متر مربع بر ثانیه و ضریب پراکندگی طولی^۱ و عرضی^۲، ۲ متر منظور شده است [دولتی ارده جانی و همکاران، ۱۳۸۳]. فرض بر این است که تغییرات دمایی در اثر فرآیندهای اکسایش پیریت ناچیز می باشد.



شکل ۴-۱۱- مدل حجم های محدود دمپ باطله کارخانه زغال شویی

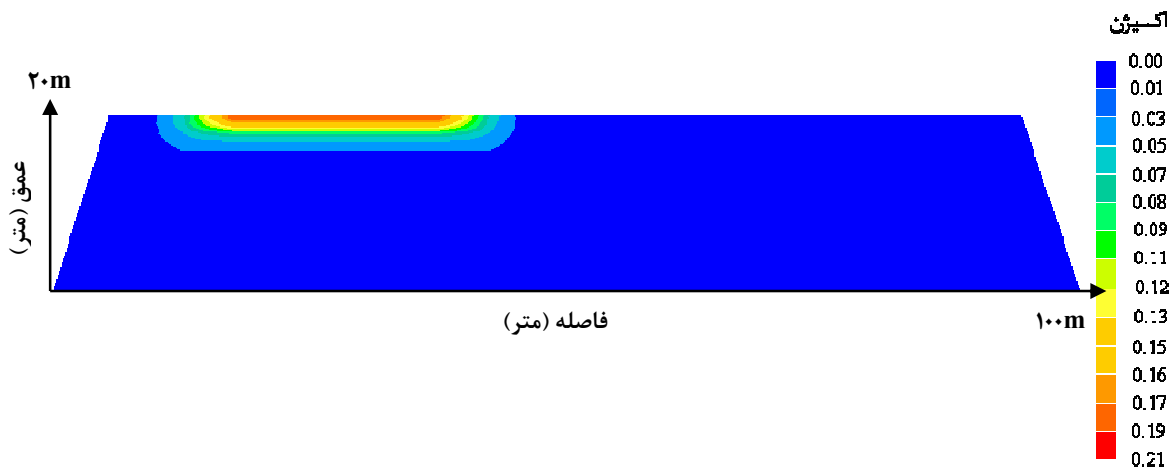
مقدار اکسیژن در قسمت فوقانی دمپ معادل با مقدار اکسیژن در اتمسفر که برابر ۹ مول بر متر مکعب و به عبارتی معادل ۰/۲۱ درصد می باشد، در نظر گرفته شد و فرض گردید که درصد اولیه اکسیژن در دمپ باطله صفر می باشد.

۴-۱۲- نتایج مدل سازی دو بعدی ریاضی

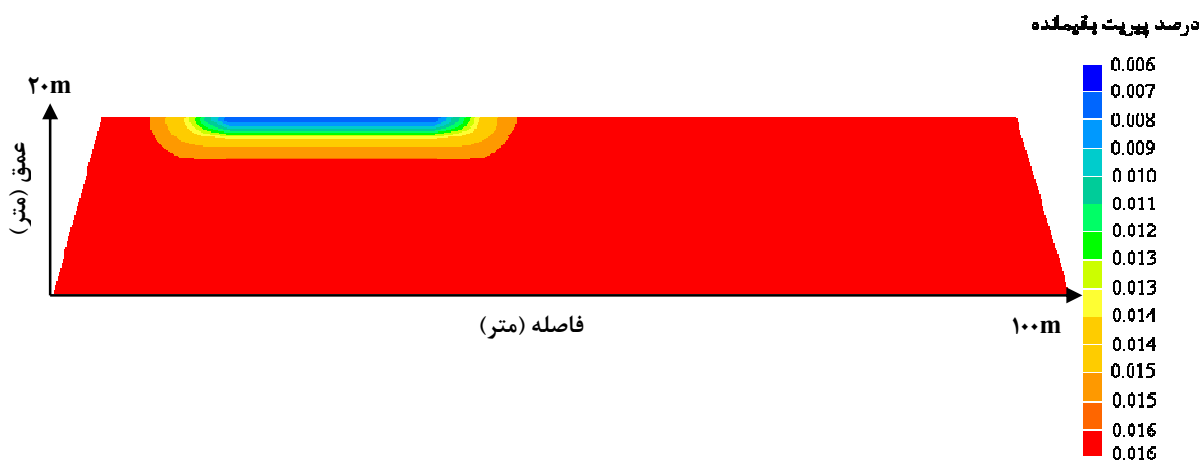
شکل (۴-۱۲) پیش بینی مدل دو بعدی جهت نفوذ اکسیژن به داخل دمپ باطله را نشان می دهد. در این مدل فرض شده که انتقال اکسیژن از طریق فضاهای خالی دمپ باطله توسط ضریب نفوذ مؤثر اکسیژن صورت می گیرد. همان طور که از شکل مشاهده می شود، اکسیژن از مقدار اولیه خود یعنی ۹ مول بر متر مکعب (۰/۲۱ درصد) در اتمسفر به مقدار کمتر از ۳ مول بر متر مکعب (۰/۰۷ درصد) در عمق تقریبی ۲ متری می رسد. علت عدم نفوذ اکسیژن به اعماق بیشتر، دانه ریز بودن باطله های حاوی پیریت می باشد.

^۱ - Longitudinal Dispersivity

^۲ - Transverse Dispersivity



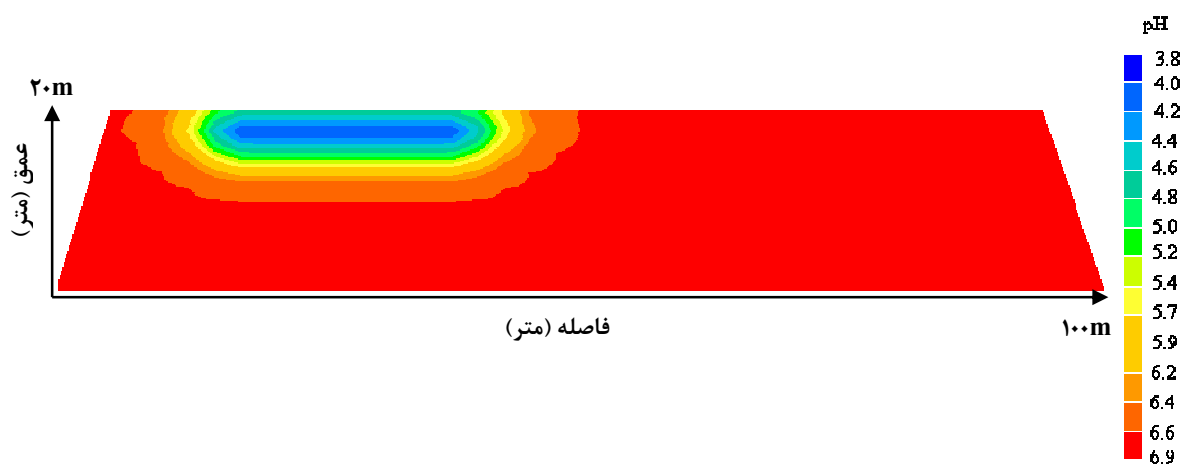
شکل ۴-۱۲- پیش بینی دو بعدی برای مقدار اکسیژن نفوذی به داخل دمپ بعد از یک سال از آغاز شبیه سازی شکل (۴-۱۳) نتیجه مدل سازی دو بعدی مربوط به درصد پیریت باقیمانده در باطله های زغال شویی برای مدت زمان شبیه سازی یک سال را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، اکسیداسیون پیریت در اعماقی صورت می گیرد که اکسیژن نفوذ نموده است، به طوری که پیریت در سطح دمپ به مقدار برابر $0/006$ (با رنگ آبی در مدل نشان داده شده است) رسیده است و در جهت عمق مقدارش افزایش پیدا می کند، به طوری که به مقدار ثابت $0/016$ (با رنگ قرمز در مدل دیده می شود)، تا عمق تقریبی ۲ متری می رسد. این موضوع با نتایج مدل سازی یک بعدی و داده های صحرایی مطابقت خوبی دارد.



شکل ۴-۱۳- پیش بینی مدل دو بعدی برای درصد پیریت باقیمانده در باطله ها بعد از یک سال از آغاز شبیه سازی

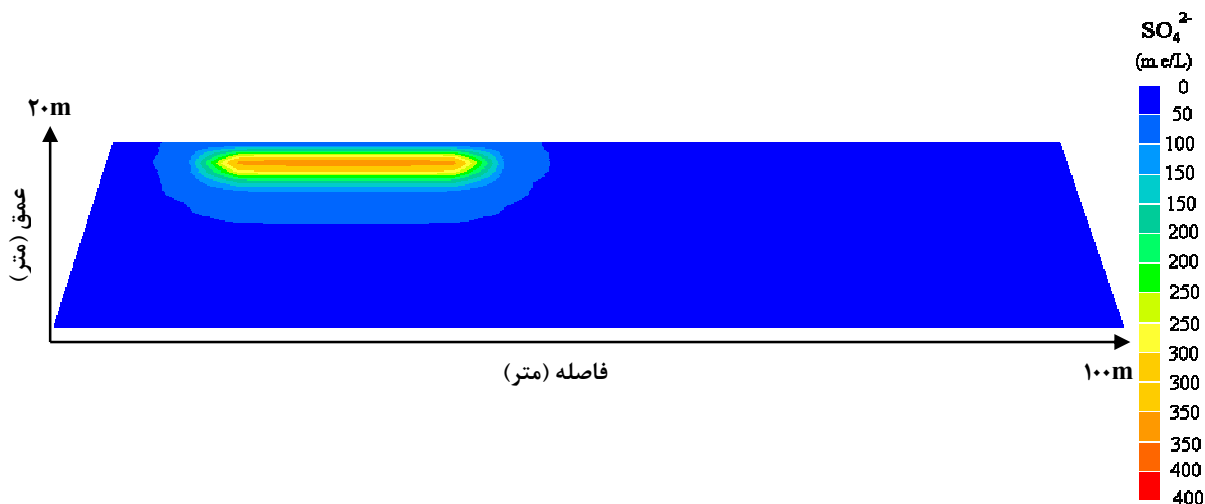
pH فاکتور مهمی در کنترل کیفیت پساب خارج شده از باطله‌های زغال می‌باشد. شکل (۴-۱۴) تغییرات pH را پس از مدت زمان یک‌سال از آغاز شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به طوری که در شکل نشان داده شده است، pH در اعماق کم به مقدار $3/8$ می‌رسد که این ناشی از واکنش اکسیژن با پیریت و تشکیل زهاب اسیدی می‌باشد. مقدار pH در جهت عمق افزایش می‌یابد و به مقدار زمینه‌اش برابر مقدار تقریبی 7 می‌رسد.

این نتیجه با pH اندازه‌گیری شده در دمپ باطله و در اعماق مختلف آن تطابق مناسب دارد [دولتی ارده‌جانی و همکاران، ۲۰۰۸].



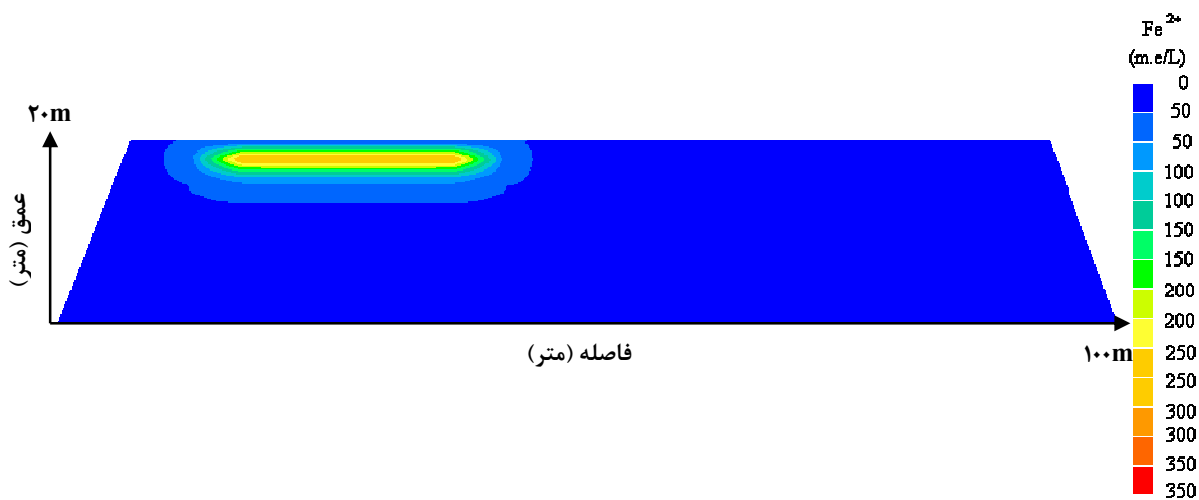
شکل ۴-۱۴- پیش‌بینی مدل برای pH بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی

شکل (۴-۱۵) غلظت سولفات را در مدل برای مدت زمان شبیه‌سازی یک سال نشان می‌دهد. بیشترین مقدار SO_4^{2-} در جایی می‌باشد که اکسیژن در آنجا حضور دارد. به طوری که در شکل نشان داده شده است، بیشترین مقدار SO_4^{2-} برابر 400 مول بر متر مکعب می‌باشد که در مدل با رنگ قرمز قابل مشاهده است. مقدار سولفات تولیدی توسط فرآیندهای فیزیکی همچون پراکندگی، نفوذ مولکولی و پهنرفت و توسط بارش جوی به اعماق بیشتر نفوذ کرده و عمل رقیق‌سازی صورت می‌گیرد.



شکل ۴-۱۵- پیش‌بینی مدل عددی برای غلظت SO_4^{2-} بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی

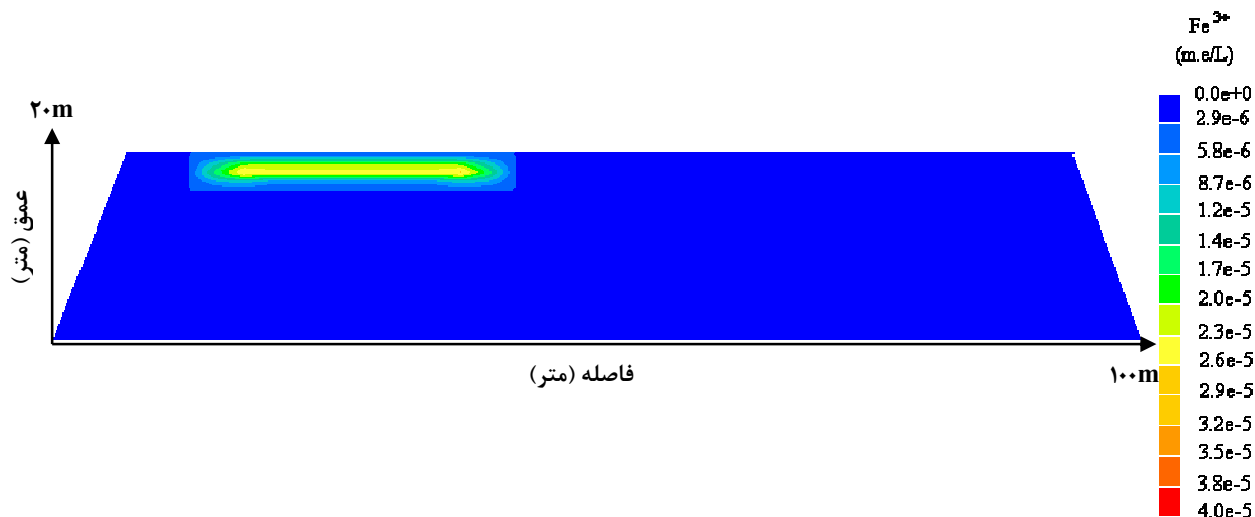
شکل (۴-۱۶) غلظت آهن دو ظرفیتی (Fe^{2+}) برای مدت زمان شبیه‌سازی یک سال را نشان می‌دهد. یک غلظت بیشینه برای Fe^{2+} (حدود 300 me/L) در جایی که اکسیژن حضور دارد، رخ داده است و در جهت عمق به دلیل نفوذ کم اکسیژن، مقدار آن کم و به صفر می‌رسد.



شکل ۴-۱۶- پیش‌بینی مدل عددی برای غلظت Fe^{2+} بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی

پیش‌بینی مدل دو بعدی برای غلظت آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) برای مدت زمان شبیه‌سازی یک سال در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. در این مدل‌سازی فرض شده که، اکسایش شیمیایی آهن دو ظرفیتی عامل اصلی در تولید آهن سه ظرفیتی می‌باشد. بنابراین آهن سه ظرفیتی کمتری تولید شده

است، با توجه به اینکه در غیاب باکتری‌های تیوباسیلوس فرو اکسیدان، تولید آهن سه ظرفیتی به کندی رخ می‌دهد. بنابراین نقش آهن سه ظرفیتی در اکسیداسیون پیریت ناچیز می‌باشد. غلظت آهن سه ظرفیتی اساساً محدود شده به جایی که اکسیژن در میان خلل و فرج نفوذ کرده باشد.



شکل ۴-۱۷- پیش‌بینی مدل عددی دو بعدی برای غلظت Fe^{3+} بعد از یک سال از آغاز شبیه‌سازی

۴-۱۳- نتایج

نتایج مدل‌سازی یک بعدی و دو بعدی و مقایسه آنها با نتایج صحرائی برای تعیین پیریت باقی‌مانده در باطله‌های زغال‌شویی البرز شرقی و همچنین با نتایج آنالیز عمقی به دست آمده برای عناصر مختلف در یک نقطه روی دمپ باطله، حاکی از اکسایش پیریت و تولید پساب اسیدی و نشت محصولات اکسیداسیون به مناطق پایین دست می‌باشد.

۵-۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای بررسی‌های زیست‌محیطی مربوط به آلودگی ناشی از دمپ باطله‌های زغال وجود دارد. روش‌های ژئوفیزیکی مخصوصاً روش‌های الکتریکی، از جمله روش‌های مناسب و مفید برای مطالعات زیست‌محیطی مربوط به خاک و آب‌های زیرزمینی می‌باشد. اخیراً وظیفه کنترل انباشته‌های عظیم مواد باطله نیز بر عهده بررسی‌های ژئوفیزیکی قرار گرفته است. از این روش‌ها می‌توان برای مشخص کردن محدوده و گسترش آلودگی‌های زیرزمینی و همچنین تعیین محل بهینه در حفر گمانه برای نمونه‌گیری مستقیم از خاک و آب‌های زیرزمینی در یک منطقه آلوده، استفاده نمود.

به طور کلی روش‌های الکتریکی مورد بررسی در مطالعات زیست‌محیطی عبارتند از [پلرین، ۲۰۰۲]:

- روش‌های مقاومت ویژه با جریان مستقیم (DC)^۱
- روش‌های الکترومغناطیس در قلمرو فرکانس (FEM یا FDEM)^۲
- روش‌های الکترومغناطیس زودگذر یا در قلمرو زمان (TEM یا TDEM)^۳
- روش‌های رادار نفوذ کننده به زمین (GPR)^۴
- روش پتانسیل خودزا (SP)^۵
- روش قطبش القایی (IP)^۶
- روش مگنتوتلوریک با فرکانس شناویی و منبع کنترل شده
- روش تشدید مغناطیس هسته‌ای (NMR)^۷

^۱ - Direct-Current (DC) resistivity

^۲ - Frequency Domain Electromagnetic

^۳ - Transient Electromagnetic- Time Domain Electromagnetic

^۴ - Ground Penetrating Radar

5- Self Potential

6- Induced Polarization

7- Nuclear Magnetic Resonance

برای تشخیص محدوده آلودگی آب‌های زیرزمینی، روش‌های مقاومت ویژه و روش الکترومغناطیس، نسبت به روش‌های دیگر از کارایی بهتری برخوردار می‌باشند [پلرین^۱، ۲۰۰۲]. در بیشتر موارد روش پلاریزاسیون القایی (IP) برای تشخیص آلودگی‌های جزئی مناسب‌تر است. نواحی آلوده ناشی از مواد هیدروکربوری توسط روش رادار نفوذ کننده به زمین (GPR) از روی اختلاف ثابت دی‌الکتریک و تفاوت سرعت رادار در دو محیط و کاهش دامنه سیگنال گیرنده در مجاورت هیدروکربورهای شناور در سطح آب، تشخیص داده می‌شود. همچنین تجربه نشان داده است که روش پتانسل خودزا (SP) می‌تواند جهت تشخیص و بررسی آلودگی ایجاد شده درون حوضچه‌ها مناسب‌ترین روش باشد [اولدنبرگ، ۱۹۹۶].

در این فصل ابتدا با استفاده از روش الکترومغناطیسی *VLF* به علت سهولت و سرعت بالا، موقعیت زون‌های آلوده ناشی از باطله‌های زغالشویی طزره را شناسایی و همچنین با استفاده از روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی سطح آب‌زیرزمینی منطقه را تعیین کرده و به دنبال آن برای بررسی‌های دقیق‌تر و تعیین نحوه گسترش آلودگی ناشی از دمپ باطله زغال‌شویی با توجه به نتایج بدست آمده از مرحله قبل، شبکه برداشت سه بعدی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی طراحی گردید.

۵-۲- مقدمه ای بر روش *VLF*

روش *VLF*^۲ از جمله روش‌های الکترومغناطیسی (EM^۳) است که در آن از فرستنده صحرائی استفاده نمی‌شود. بلکه فرستنده آنتن‌هایی هستند که امواج الکترومغناطیسی را در دامنه فرکانس ۵ تا ۳۰ کیلوهرتز برای مقاصد نظامی منتشر می‌کنند. فرکانس بکار برده شده در مقایسه با سایر روش‌های الکترومغناطیسی ژئوفیزیکی بالاست. اما از آنجا که بسامد امواج *VLF* در مقایسه با دیگر امواج رادیویی که بسامدی در محدوده ۵۴۰ کیلوهرتز تا ۳۰ مگاهرتز دارند، خیلی کم است، به روش الکترومغناطیسی فرکانس خیلی کم یا *VLF* معروف شده است.

^۱ - Pellerin

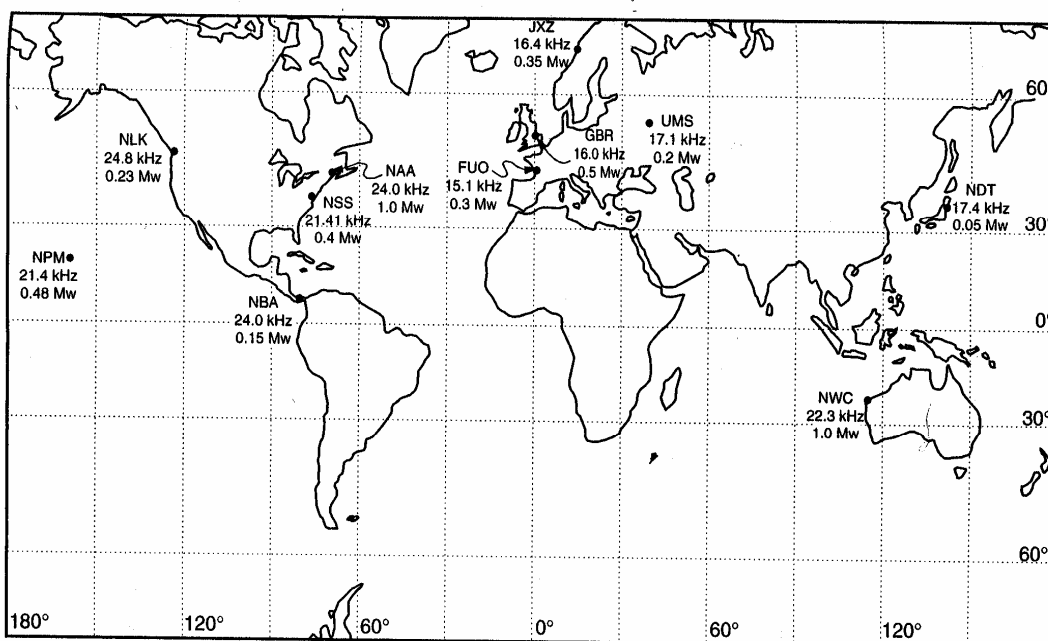
^۲ - Very Low Frequency

^۳ - Electromagnetic (EM)

این روش که هم به صورت زمینی و هم به صورت هوایی قابل انجام می‌باشد برای اکتشاف کانسارهای فلزی، زون‌های خرد شده و بررسی آلودگی آبهای زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد [سیناترا^۱ و همکاران، ۱۹۷۸].

۵-۳- فرستنده‌های VLF

آنتن فرستنده VLF از یک دکل بسیار بلند که اغلب به حدود صد متر می‌رسد، ساخته شده است و به وسیله یک سیگنال قوی تغذیه می‌گردد. قدرت فرستنده به طور مشخص بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلو وات است. چنین فرستنده‌هایی در تعدادی از کشورها در حال نشر امواج رادیویی می‌باشند و تقریباً سراسر جهان را پوشش می‌دهند. بعضی از مفیدترین فرستنده‌ها در جدول (ج-۱) از پیوست (ج) آورده شده است. همچنین موقعیت مهم‌ترین ایستگاه‌های فرستنده VLF در سراسر جهان در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. این ایستگاه‌ها طوری قرار گرفته‌اند که در بیشتر کشورها می‌توان موج چندین فرستنده را دریافت کرد.



شکل ۵-۱- موقعیت مهم‌ترین فرستنده‌های VLF^۲ [میلسون^۳، ۲۰۰۲]

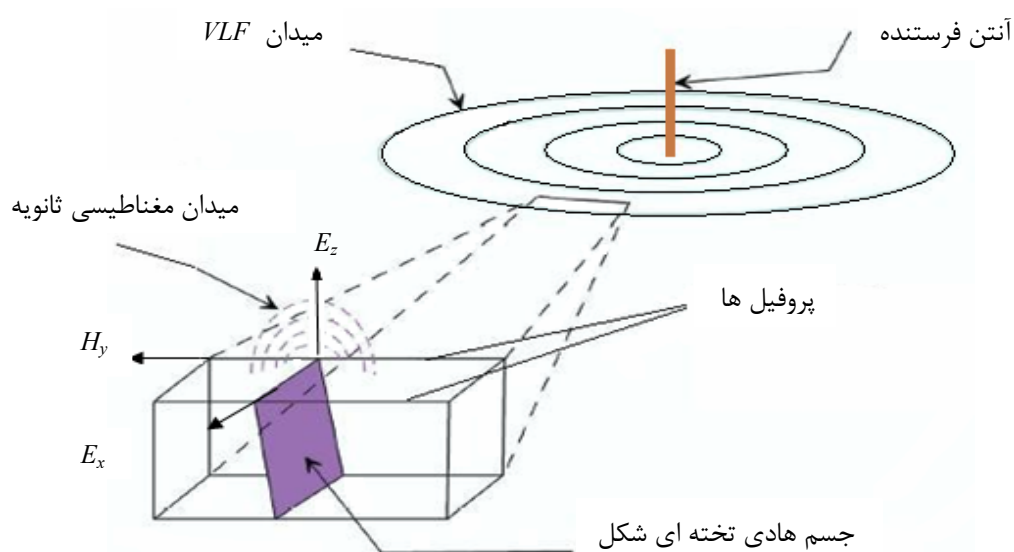
^۱ - Senatra

^۲ - VLF transmitter

^۳ - Milson

۵-۴- اصول اندازه گیری VLF

امواج VLF همان طور که می دانیم از میدان الکتریکی قائم و میدان مغناطیسی افقی تشکیل شده اند. اگر راستای انتشار امواج VLF با راستای زون رسانا یکی باشد، یک جریان ثانویه در زون مورد نظر به وجود می آید (القا) این جریان ثانویه به نوبه خود یک میدان مغناطیسی ثانویه تولید می کند که جهت آن خلاف جهت میدان مغناطیسی اولیه ساطع شده از فرستنده می باشد. فرکانس میدان مغناطیسی ثانویه با فرکانس میدان مغناطیسی اولیه یکی می باشد و فقط فاز این دو با هم متفاوت می باشد. به طور معمول جهت انجام عمل القاء طول امتداد جسم باید بیشتر از ۵۰ متر و عمق جسم بیش از ۱۰ متر باشد. ضخامت جسم بین ۰/۵ الی ۱ متر کافی است [هاچیسنون و بارتا، ۲۰۰۲]. علاوه بر این میدان فرستنده VLF باید به طور عمود از جسم بگذرد. شکل (۵-۲) نمایی شماتیک از القای میدان را در زون هادی نشان می دهد.



شکل ۵-۲- موقعیت فرستنده و زون هادی و نحوه ایجاد میدان ثانویه (القایی) مغناطیسی [هاچیسنون و بارتا، ۲۰۰۲]

۵-۴-۱- روابط فاز و دامنه

اگر جریان متناوبی با فرکانس f و شدت I_p در عبور از سیم پیچ فرستنده یک میدان اولیه (H_p) ایجاد کند، رابطه (۵-۱) بین آنها برقرار می باشد:

$$H_p = kI_p \sin(2\pi ft) \quad (۵-۱)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2-5)$$

که k پارامتری است که به شکل هندسی، تعداد دور و سطح سیم پیچ بستگی دارد. t عامل زمان و ω میزان فرکانس زاویه‌ای است که مقدار آن از طریق رابطه (2-5) محاسبه می‌گردد. حال اگر این میدان روی یک ساختار هادی اعمال شود یک جریان القایی در آن ایجاد می‌کند. این جریان به نوبه خود یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه H_s در اطراف آن ایجاد می‌نماید که با H_p متناسب بوده و به اندازه 90° درجه با آن اختلاف فاز دارد. وجود قابلیت هدایت الکتریکی جسم موجود در زیر سطح زمین نیز باعث اختلاف فازی برابر با ϕ نسبت به اختلاف پتانسیل القایی می‌شود. بنابراین اختلاف فاز بین میدان‌های اولیه و ثانویه مطابق با رابطه‌های (3-5) و (4-5) خواهد بود:

$$\theta_p - \theta_s = (90 + \phi) \quad (3-5)$$

$$\phi = \text{Arc tan}\left(\frac{2\pi f L}{R}\right) \quad (4-5)$$

که R مقاومت الکتریکی جسم هادی، f فرکانس میدان اولیه و L القاء جسم هادی می‌باشد. شکل (3-5) این تغییر فاز را به خوبی نشان می‌دهد. از شکل (3-5) و معادله (3-5) چنین می‌توان نتیجه گرفت که برای یک جسم با رسانندگی بالا، مقدار ϕ به 90° درجه نزدیک خواهد شد، در حالی که در اجسام نارسانا مقدار ϕ تقریباً به صفر میل می‌کند. در شکل (3-5-ب) تصویر H_s بر روی محور افقی (H_p) برابر با $H_s \sin \phi$ بوده که به اندازه π با میدان اولیه (H_p) اختلاف فاز داشته که در این حالت به آن مؤلفه هم فاز^۱ یا حقیقی^۲ می‌گویند. تصویر قائم H_s برابر با $H_s \cos \phi$ بوده که به اندازه 90° درجه با H_p اختلاف فاز دارد، که به این مؤلفه غیر هم فاز^۳ یا مجازی (موهومی)^۴ می‌گویند [تلفورد و همکاران، ۱۹۹۱].

۵-۴-۲- قطبش بیضی وار

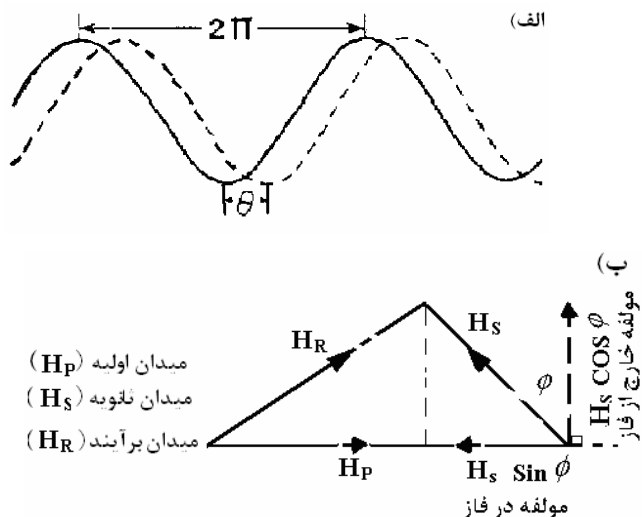
دستگاه‌های گیرنده در مطالعات VLF ، میدان‌های ثانویه حاصل از زون‌های مورد تجسس به اضافه میدان اولیه را اندازه‌گیری می‌کنند. این میدان که ترکیبی از میدان‌های اولیه و ثانویه می‌باشد،

¹ - In-phase component

² - Real

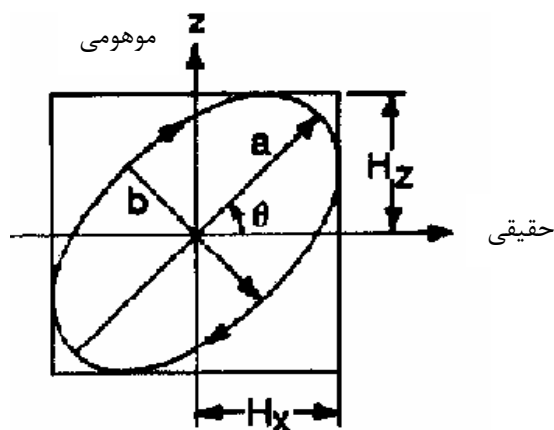
³ - Out-of-phase component

⁴ - Imaginary



شکل ۳-۵- روابط فاز و دامنه امواج اولیه و ثانویه به همراه مولفه‌های آنها [تلفورد و همکاران، ۱۹۹۱]

یک میدان مغناطیسی است که به صورت بیضی در صفحه قائم نشان داده می‌شود و اصطلاحاً به آن بیضی پلاریزه، یا پلاریزان بیضی وار در صفحه قائم می‌گویند. شکل (۴-۵) بیضی پلاریزان و زاویه انحراف برآیند از میدان اولیه را نشان می‌دهد.



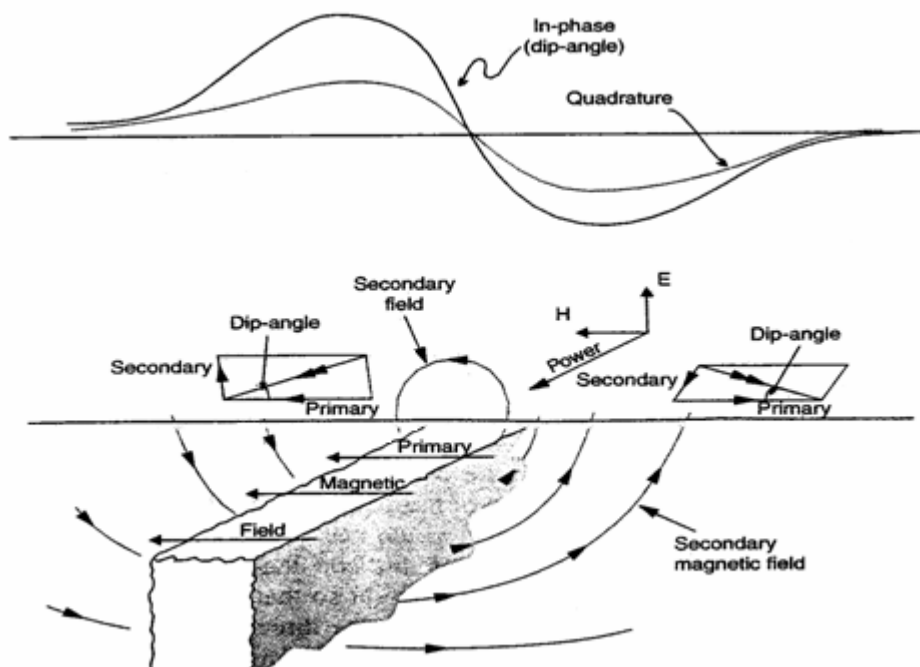
شکل ۴-۵- پارامترهای بیضی پلاریزان [مک نیل و لاسون، ۱۹۷۵]

۳-۴-۵- متد زاویه شیب^۱

زاویه بین بردار H_R با سطح افق را زاویه شیب یا زاویه تیلت (θ) میدان H_R می‌گویند. در متد زاویه شیب، که روش VLF در این گروه قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری تغییرات این زاویه (θ) مد نظر

^۱ - Tilt angle or dip angle

می‌باشد. معمولاً پروفیل‌های پیمایشی در جهت عمود بر امتداد ساختمان‌های زمین‌شناسی انتخاب می‌شوند. زمانی که از یک حلقه قائم و با یک سیم عمودی بلند (آنتن) به عنوان فرستنده در عملیات صحرایی استفاده می‌شود، میدان H_p افقی خواهد بود و میدان ثانویه H_s مطابق شکل (۵-۵) در اطراف زون رسانا زیر سطحی به صورت دوایر متحدالمرکز منتشر می‌شود. در طرفین زون رسانا میدان منتج H_R به سمت بالا و پایین شیب دارد و این شیب رفته رفته زمانی که حلقه گیرنده به سمت زون هادی نزدیک می‌شود کم شده و در روی جسم رسانا مقدار شیب به صفر می‌رسد. [کلاگری، ۱۳۷۱].



شکل ۵-۵- نحوه ایجاد میدان‌های ثانویه با امواج VLF و تغییرات زاویه شیب در پروفیلی عمود بر امتداد زون رسانا [میلسون، ۲۰۰۲]

زاویه شیب تقریباً برابر با مؤلفه حقیقی $\frac{H_z}{H_x}$ می‌باشد (H_z مؤلفه قائم میدان القایی مغناطیسی

است) و الیپتیسیته^۱ (بیضویت) تقریباً برابر با مؤلفه موهومی $\frac{H_z}{H_x}$ است، به لحاظ دامنه، میدان قائم

در قیاس با میدان افقی کوچکتر می‌باشد. اسمیت و وارد^۲ در سال ۱۹۷۴ نشان دادند که زاویه شیب

^۱ - Ellipticity

^۲ - Smith and Ward

را به وسیله رابطه (۵-۵) می توان به دست آورد:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \left(\frac{H_z}{H_x} \right) \cos \phi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x} \right)^2} \right) \quad (5-5)$$

و الیپتیسیتته بیضوی پلاریزان (ε) در شکل (۶-۵) توسط رابطه زیر به دست می آید.

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{H_z H_x \sin \phi}{\left| H_z e^{i\phi} \sin \theta + H_x \cos \theta \right|^2} \quad (6-5)$$

۵-۵- روش های تفسیر اندازه گیریهای VLF

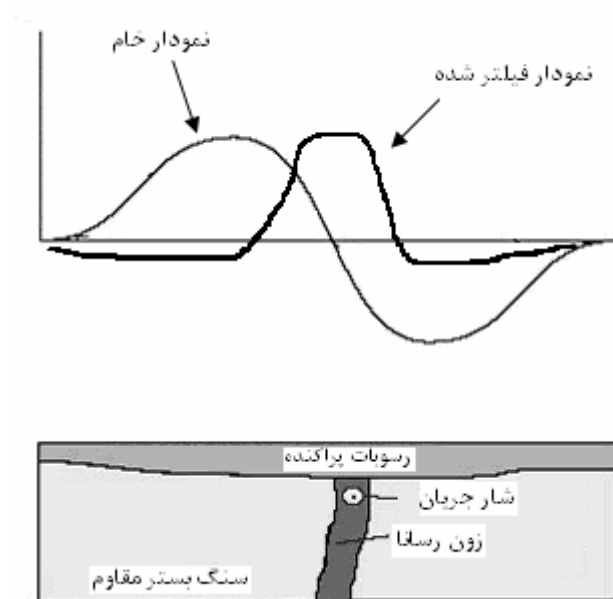
با توجه به استفاده عمومی از روش VLF به عنوان یک روش اکتشافی و همچنین جدیداً به عنوان یک روش مطالعات زیست محیطی و علی رغم توجه زیاد به طراحی روش های جدید اندازه گیری و استفاده عمومی صحرائی، تفسیر داده های VLF مورد توجه کمتری قرار گرفته است. بیشتر تفسیرهای روش VLF کیفی بوده و برای تعیین موقعیت اجسام رسانا به کار می روند ولی نمی توان عمق نسبی آنها را بدست آورد. برای مثال چنین می توان گفت که برای داده های خام دقیقاً بالای زون رسانا نقطه ای است که زاویه شیب برای عبور از قطبیت مثبت به قطبیت منفی صفر شود. این نقطه به نقطه فراگذر^۱ نیز معروف است. اما بدون حذف نوفه های زمین شناسی و اثرات توپوگرافی و همچنین اجتناب از نقاط فراگذر کاذب در اثر وجود زون های رسانای نزدیک به هم، داده های خام با روش های مختلف فیلتر شده، طوری که در نمودارهای فیلتر شده مکان بالای زون رسانا به صورت یک پیک آنومالی نشان داده می شود [نوروزی و همکاران، ۱۳۷۹]. شکل (۶-۵) مکان زون رسانا را در نمودارهای خام و فیلتر شده نشان می دهد.

در مقابل روش های کیفی، یک سری روش های نیمه کمی وجود دارند که در تفسیر نتایج VLF مورد استفاده قرار می گیرند و نتایج بهتری نسبت به روش های کیفی دارند. در اینجا به دو روش مهم که تا حدودی کمی نیز هستند اشاره می شود. این دو روش عبارتند از [امرادزاده و همکاران، ۱۳۸۷]:

الف) استفاده از روش فیلتر کردن داده های خام

ب) استفاده از چگالی جریان معادل

^۱ - Cross over



شکل ۵-۶- محل زون رسا حاصل از پاسخ زون به میدان VLF [ABEM, ۱۹۸۹]

در روش اول با استفاده از روش‌های مختلف، داده‌های خام فیلتر شده و محل قرارگیری آنومالی‌ها به صورت یک پیک مثبت در نمودار مشخص می‌شوند. در روش دوم استفاده از چگالی جریان معادل بر اساس فیلتر کردن خطی داده‌های VLF می‌باشد. خروجی حاصل از فیلتر، بصورت چگالی جریان معادل در یک عمق بخصوص که عامل بوجود آورنده میدان مغناطیسی است، می‌باشد. چگالی جریان معادل، شامل جریان القایی داخل هادی‌ها و جریان متمرکز شده در هادی به واسطه محیط اطراف می‌باشد [هاتچینسون و بارتا، ۲۰۰۲].

روش‌هایی که به طور معمول در فیلتر کردن داده‌های VLF مورد استفاده قرار می‌گیرند به دو صورت زیر می‌باشند.

✓ روش فیلتر فریزر^۱

✓ روش فیلتر کاروس - هجلت^۲

کاروس و هجلت با ارائه فیلتری با استفاده از پارامتر زاویه شیب، چگالی جریان معادل را در یک عمق معین محاسبه نمودند. این فیلتر به گونه‌ای عمل می‌کند که در جایی که جسم هادی وجود دارد منحنی چگالی جریان، بیشینه موضعی می‌دهد. این فیلتر اثر نویزهای محلی را نیز کم می‌کند. با

^۱ - Fraser filtering method

^۲ - Karous and Hjelt

محاسبه چگالی جریان در اعماق مختلف می توان به شبه مقطع چگالی جریان مولد بی هنجاری های مشاهده شده دست یافت. چنین شبه مقطعی می تواند ایده ای از توزیع مواد رسانای زیر سطحی به ما بدهد [کاروس و هجلت - ۱۹۸۹]. روش فیلتر کاروس - هجلت و فریزر به طور مختصر در پیوست (ج) شرح داده شده است.

۵-۶- محل و موقعیت پروفیل های برداشتی داده های VLF

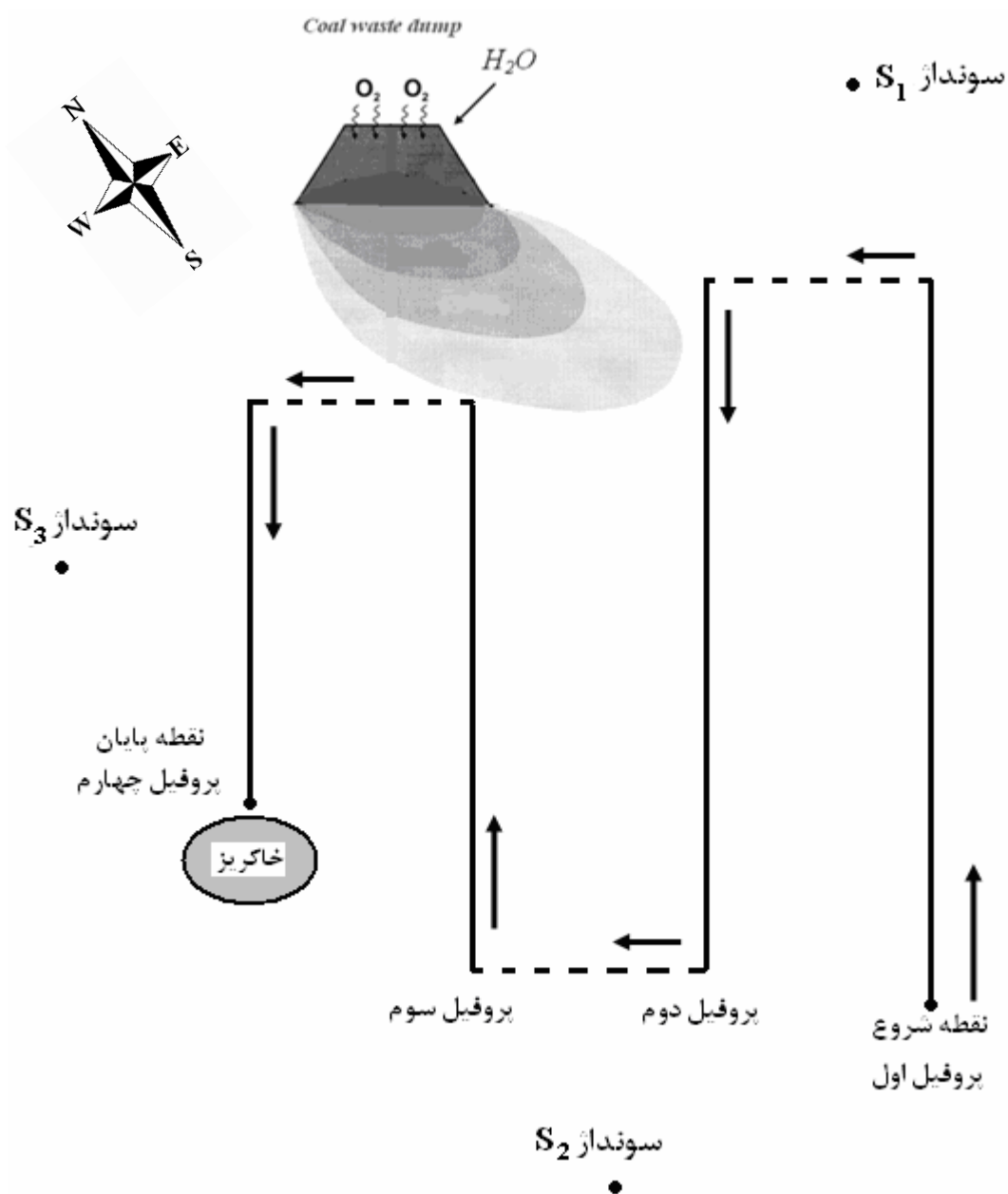
با توجه به انتخاب محل مورد بررسی که در پایین دست محل انباشت باطله های قدیمی دستگاه جیگ بود، اندازه گیری ها در امتداد ۴ پروفیل طوری طراحی شد که تقریباً کل منطقه پایین دست دمپ باطله را پوشش دهد. هدف از این اندازه گیری، تشخیص محدوده زون های آلوده ناشی از اکسیداسیون پیریت همراه باطله زغال و به دنبال آن طراحی شبکه برداشت ژئوفیزیکی سه بعدی مقاومت ویژه برای مطالعات دقیق تر بود. اندازه گیری ها توسط دستگاه دیجیتالی WADI [ABEM، ۱۹۸۹] ساخت شرکت سوئدی ABEM موجود در آزمایشگاه ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت و همچنین از یک دستگاه GPS برای تعیین مختصات نقاط استفاده گردید. شکل (۵-۷) نمایی از محل و موقعیت پروفیل های برداشتی را نشان می دهد. در پیوست (ج) شرح مختصری از دستگاه WADI آمده است.

۵-۷- نحوه برداشت داده های VLF

برای اینکه بی هنجاری ها به بهترین وجه آشکار شوند می بایست امتداد پروفیل بر امتداد زون آلوده عمود در نظر گرفته شود و همچنین جهت پروفیل ها نیز باید به گونه ای باشد که بر خطّ واصل فرستنده و دستگاه گیرنده عمود باشد. در منطقه ای که این اندازه گیری ها انجام گرفت، بهترین ایستگاه فرستنده، ایستگاه فرستنده (NSS) واقع در آنابلیس^۱ در کشور ایالات متحده آمریکا با توان تقریبی ۴۰۰ کیلو وات و فرکانس ۲۱/۴ کیلوهرتز انتخاب گردید. پس از انتخاب فرستنده مناسب، مختصات نقطه شروع، فاصله بین نقاط برداشتی و فاصله بین پروفیل ها به دستگاه ABEM داده شد. فواصل نقاط اندازه گیری ۵ متر انتخاب گردید. این فاصله توانست به صورت مؤثری بی هنجاری را به

^۱ - Annapolis, USA

تصویر بکشد. برای چنین بی‌هنجاری‌هایی فواصل بیشتر از این توصیه نمی‌شود، هر چند کمتر از این فاصله نیز کار پر زحمت و بی‌فایده‌ای است. فواصل خطوط پروفیل‌ها از هم دیگر ۳۰ متر اختیار شد تا کل منطقه مورد نظر پوشش داده شود. مختصات اولین نقطه شروع در سیستم UTM برابر $(X=0277601, Y=4025229, Z=1585)$ و جهت اولین پروفیل اندازه‌گیری ۴۳ درجه نسبت به شمال جغرافیایی بود.



شکل ۵-۷- موقعیت پروفیل‌های برداشتی و نحوه اندازه‌گیری داده‌های VLF

اندازه‌گیری‌ها بدین طریق انجام گرفت که بعد از قرائت نقطه اول، در امتداد پروفیل اول با آزیموت ۴۳ درجه به اندازه ۵ متر حرکت کرده و مکان نقطه دوم مشخص گردید، سپس در آن نقطه، قرائت انجام گرفت. باید توجه کرد که نقطه دوم در امتداد پروفیل با آزیموت ۴۳ درجه باشد که این کار توسط کمپاس کنترل گردید و به همین منوال بر روی خط پروفیل حرکت کرده تا پروفیل ابتدایی به اتمام برسد. سپس به میزان ۳۰ متر عمود بر خط پروفیل حرکت کرده و پروفیل دوم با آزیموت معکوس نسبت به پروفیل اول پیدا می‌گردد (۲۲۳ درجه) و اندازه‌گیری بر روی پروفیل دوم نیز به مانند پروفیل اول صورت می‌گیرد. به همین طریق بر روی پروفیل‌های سوم و چهارم نقاط اندازه‌گیری گردید. با توجه به وضعیت منطقه و حضور کپه‌های باطله و خاکریز، طول پروفیل‌های سوم و چهارم نسبت به پروفیل‌های اول و دوم کوتاه‌تر در نظر گرفته شد. شکل (۵-۷) نحوه اندازه‌گیری داده‌های VLF بر روی امتداد پروفیل‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۱) طول پروفیل‌ها و تعداد نقاط برداشتی روی هر یک از آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱- طول پروفیل‌ها و تعداد نقاط برداشتی

شماره پروفیل	۱	۲	۳	۴
طول پروفیل (بر حسب متر)	۳۵۰	۳۴۰	۲۵۵	۱۵۵
تعداد نقاط برداشتی	۷۱	۶۹	۵۲	۳۲

۵-۸- تعبیر و تفسیر یافته‌های VLF

به علت نامتقارن بودن مؤلفه‌های حقیقی و مجازی میدان القایی و همچنین تأثیر نویزها و عوامل متعدد دیگر، تفسیر منحنی‌های خام آنها مشکل می‌باشد. به همین خاطر امروزه دستگاه‌های جدید VLF با استفاده از کامپیوتر وابسته به آن، اطلاعات اولیه برداشت را فیلتر می‌نمایند چون منحنی‌های فیلتر شده برای تفسیر آسان‌تر هستند. همچنین نرم افزارهایی تهیه شده‌اند که به وسیله

کامپیوترهای معمولی، می توان چگالی جریان معادل داده ها را محاسبه نمود و نتایج را به صورت شبه مقطع نمایش داد.

برای تفسیر داده ها، بعد از اینکه داده ها را به کامپیوتر منتقل کردیم، توسط نرم افزار تخصصی RAMAG داده های برداشت شده پردازش شدند [RAMAG، ۲۰۰۲]. این نرم افزار نمودارهای خام و فیلتر شده و همچنین شبه مقطع چگالی جریان را برای هر چهار پروفیل فراهم می کند. لازم به ذکر است که این نرم افزار از فیلتر کاروس- هجالت برای فیلتر داده ها استفاده می کند. همچنین در تفسیر پروفیل های ذیل بر روی مؤلفه حقیقی تأکید شده است. در ادامه به تفسیر هر یک از پروفیل های اندازه گیری شده پرداخته می شود.

۵-۸-۱- پروفیل اول

شکل (۵-۸-الف) نمودار مربوط به داده های خام از پروفیل اول را نشان می دهد که در این نمودار، محور افقی فاصله بر حسب متر و محور قائم مؤلفه هم فاز و غیر هم فاز بر حسب درصد می باشد. با توجه به فیلتر نشدن داده ها، به درستی نمی توان تفسیر مناسبی برای این منحنی ها ارائه داد و نقطه فراگذر آنها به خوبی مشخص نمی باشد. با فیلتر کردن داده ها، تفسیر نمودارها تا حدودی راحت تر می شود (شکل ۵-۸-ب).

با توجه به نمودار فیلتر شده در حالت (ب) از شکل (۵-۸)، سه ناحیه در فواصل ۶۰ تا ۱۰۰ متر، ۱۶۵ تا ۲۰۰ متر و ۲۳۰ متر تا انتهای پروفیل برداشتی مشاهده می شود که دلیلی بر وجود مقاومت کم در منطقه می باشد، و احتمالاً نشان دهنده حضور آلودگی در منطقه می باشد. این نواحی آلوده نیز در شبه مقطع چگالی عرضی جریان (برای مؤلفه حقیقی) نیز به خوبی مشاهده می شوند (شکل ۵-۸-ج). زون اول در فاصله ۶۰-۱۰۰ متری در عمق تقریبی ۳۵ تا ۴۵ متری قرار دارد و گسترش کمتری نسبت به دو زون دیگر دارد. زون دوم در حد فاصل ۱۶۵-۲۰۰ متری، دارای گسترشی از عمق ۲۵ متر تا اعماق پایینتر می باشد و دارای شیب تقریبی ۴۵ درجه به سمت NE می باشد. زون سوم که در فاصله ۲۳۰ متری تا انتهای پروفیل قرار دارد دارای گسترشی از سطح به عمق می باشد و نسبت به دو زون دیگر، بزرگتر می باشد. با توجه به اطلاعات بدست آمده از این پروفیل، این چنین می توان یافت که در جهت دمپ باطله های زغال، احتمال حضور آلودگی بیشتر

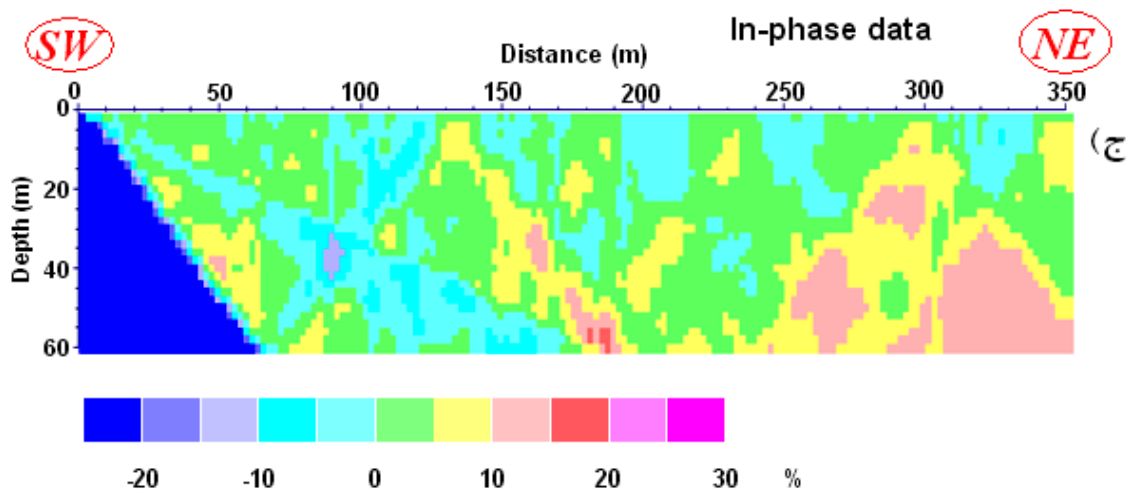
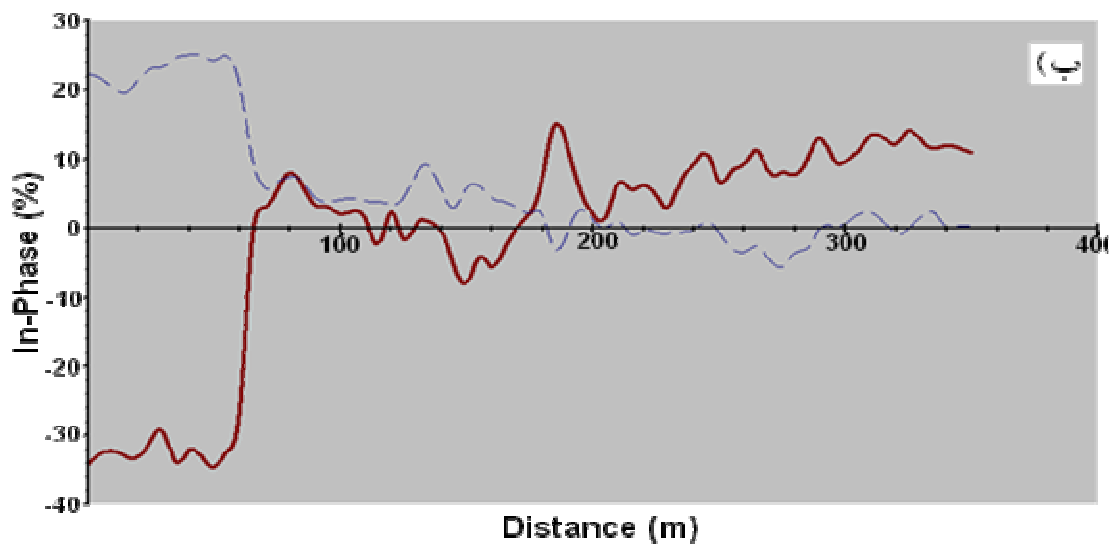
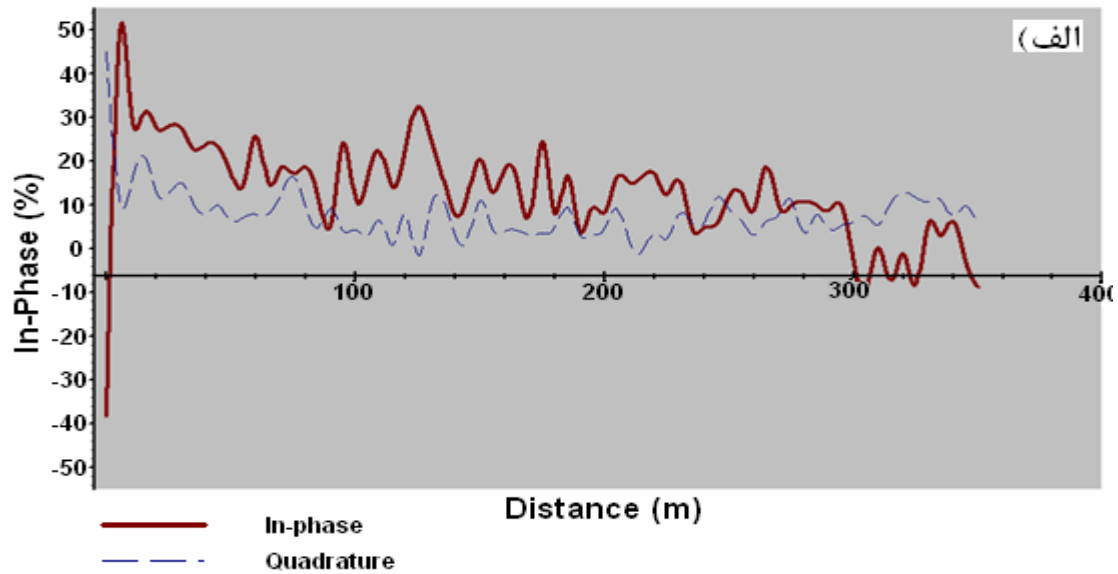
می شود که این آلودگی می تواند در اثر تولید پساب اسیدی ناشی از اکسیداسیون مستقیم پیریت همراه باطله های زغال در منطقه باشد.

۵-۸-۲- پروفیل دوم

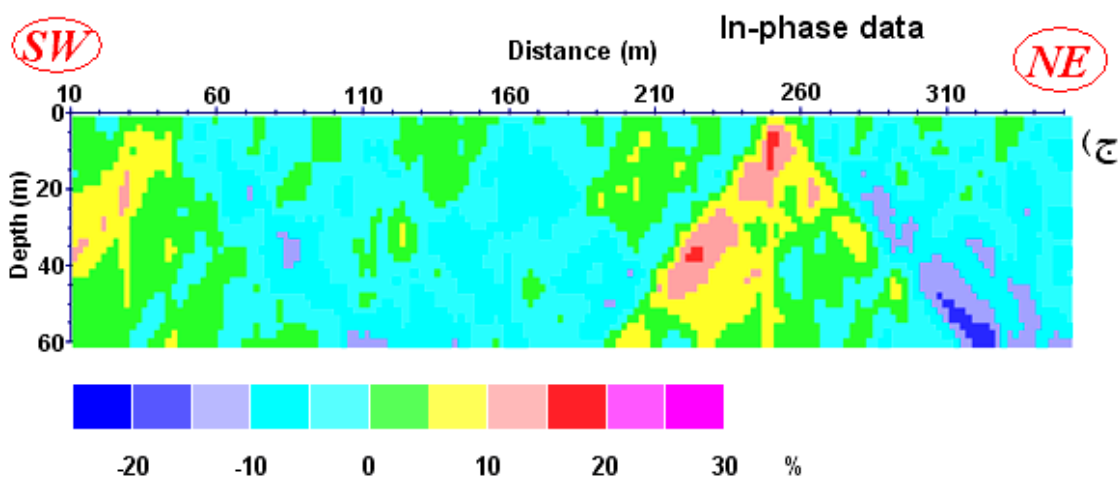
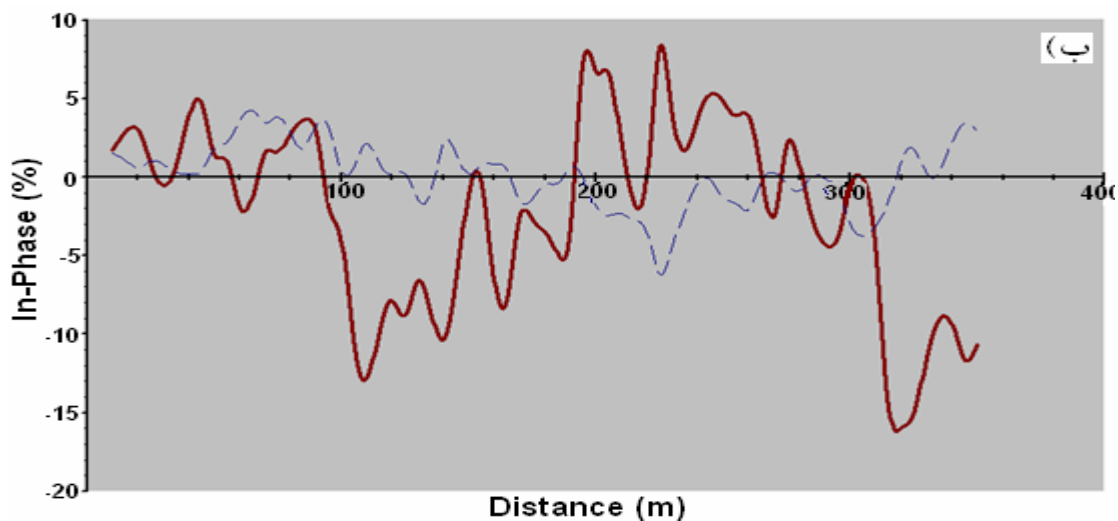
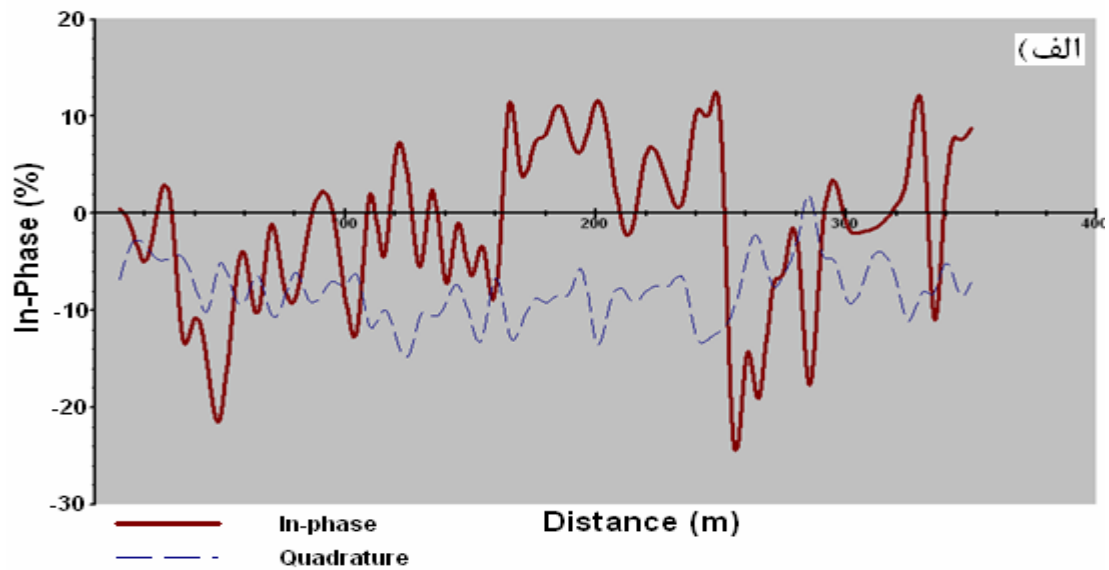
پس از رسم نمودار داده های خام، فیلتر شده و هم چنین شبه مقطع عرضی چگالی جریان (شکل ۵-۹) چنین می توان استنباط کرد که پروفیل برداشتی دارای دو ناحیه با مقاومت ویژه کم می باشد و این خود دلیلی بر حضور آلودگی احتمالی در منطقه می باشد. ناحیه اول در حد فاصله ۱۰ تا ۵۰ متری و عمق تقریبی ۳۵ متری قرار دارد، این ناحیه دارای گسترش کم و مقدار مؤلفه هم فاز پایینی می باشد که شاید ناشی از آلودگی کم در آن محل باشد. ناحیه دوم گسترش بیشتری نسبت به ناحیه اول دارد و در حد فاصله ۲۰۰ تا ۲۶۰ متری بر روی امتداد پروفیل برداشتی قرار گرفته است و دارای گسترشی از سطح به اعماق پایینتر و شیب تقریبی ۴۵ درجه به سمت *SW* می باشد که این نتایج به خوبی در شبه مقطع عرضی چگالی جریان (شکل ۵-۹-ج) دیده می شود. همانند پروفیل قبلی، در این پروفیل نیز حضور آلودگی منطقه در جهت دمپ باطله زغال و گسترش آن به سمت شمال شرقی مشاهده می شود.

۵-۸-۳- پروفیل سوم

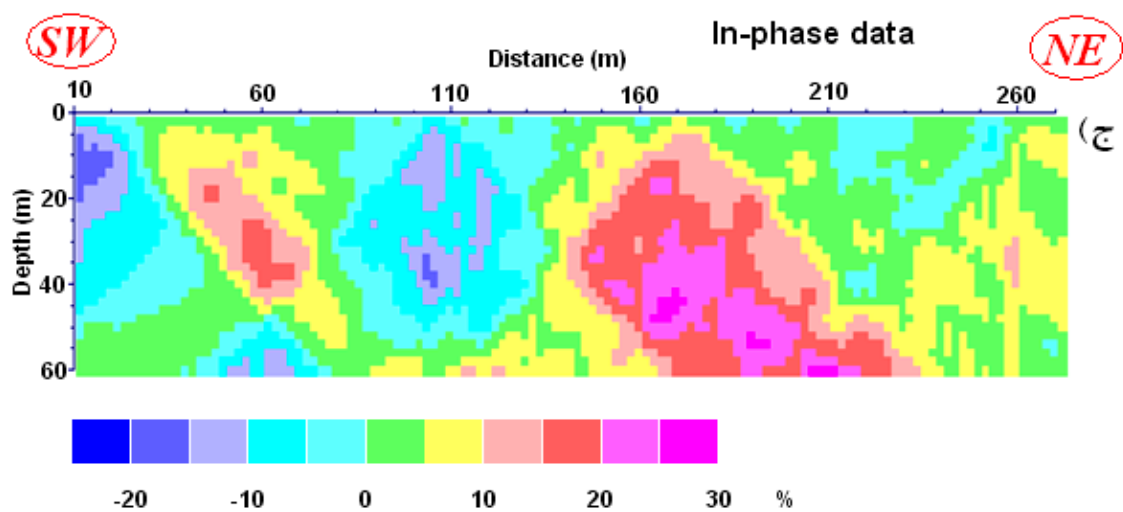
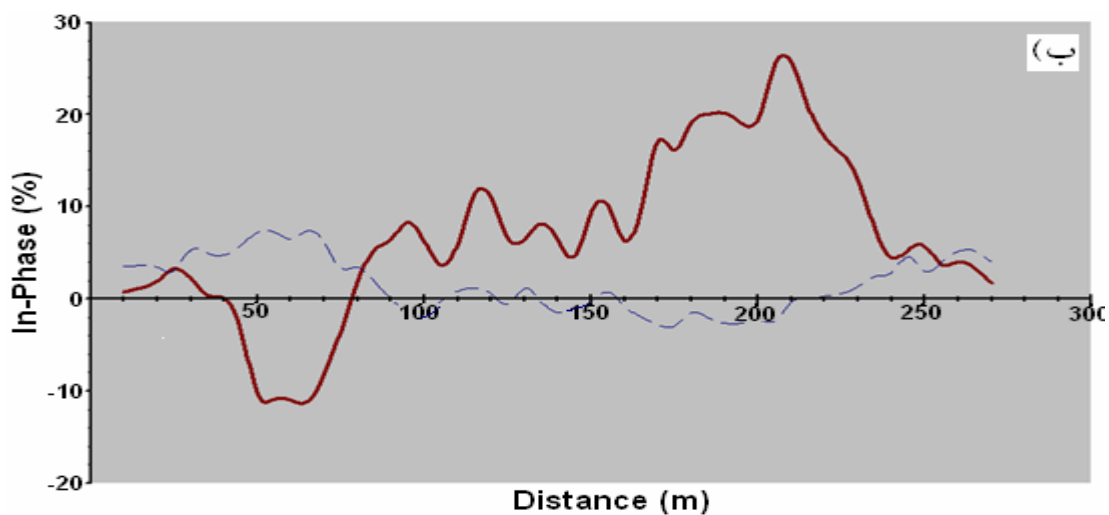
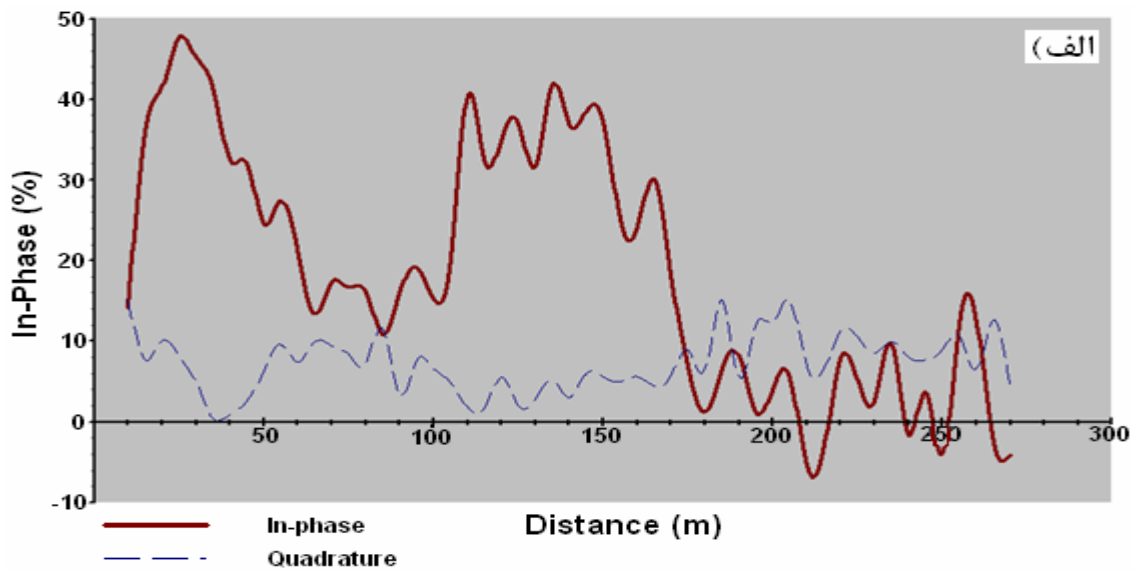
با توجه به نمودار فیلتر شده و هم چنین شبه مقطع عرضی چگالی جریان که در شکل (۵-۱۰) (ب و ج) نشان داده شده است، به خوبی می توان حضور دو ناحیه با مقاومت ویژه کم که دلیلی بر وجود آلودگی در منطقه است را مشاهده کرد. اولین ناحیه در حد فاصل ۳۰ تا ۷۰ متری و از سطح تا عمق ۴۵ متری گسترش یافته است. ناحیه دوم در فاصله ۱۴۰ تا ۲۴۰ متری قرار دارد و گسترش آن به دلیل نزدیکی آن به دمپ، نسبت به ناحیه اول بیشتر و از سطح به اعماق پایین تر می باشد. در این ناحیه به خوبی حضور آلودگی مشاهده می شود، که ممکن است بیشترین آلودگی سطحی در منطقه باشد و این شاید به دلیل قرارگیری این پروفیل در پایین دست محل باطله های جدید و یا نزدیکی به حوضچه لجن باشد. همان طور که از روی شبه مقطع چگالی جریان مشاهده می شود، دو ناحیه دارای شیب به سمت راست پروفیل می باشند و همانند پروفیل های قبلی، گسترش آلودگی در جهت دمپ باطله زغال بیشتر می باشد.



شکل ۵-۸- نتایج حاصل از پروفیل ۱، الف) نمودار خام داده‌های VLF (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ب) نمودار فیلتر شده داده‌های VLF (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ج) شبه مقطع عرضی چگالی جریان (مؤلفه حقیقی)



شکل ۵-۹- نتایج حاصل از پروفیل ۲، الف) نمودار خام داده‌های *VLF* (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ب) نمودار فیلتر شده داده‌های *VLF* (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ج) شبه مقطع عرضی چگالی جریان (مؤلفه حقیقی)



شکل ۵-۱۰- نتایج حاصل از پروفیل ۳، الف) نمودار خام داده‌های *VLF* (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ب) نمودار فیلتر شده داده‌های *VLF* (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ج) شبه مقطع عرضی چگالی جریان (مؤلفه حقیقی)

۵-۸-۴- پروفیل چهارم

با توجه به نمودار داده‌های فیلتر شده و شبه مقطع عرضی چگالی جریان در شکل (۵-۱۱) در حالت (ب و ج)، تنها یک ناحیه کوچک رسانا که می‌تواند ناشی از آلودگی‌های احتمالی منطقه باشد، در فاصله ۱۴۵-۱۷۵ متری و با عمق قرارگیری از سطح تا ۲۵ متری مشاهده می‌شود. در این پروفیل حضور آلودگی ناشی از دمپ باطله زغال، کمتر دیده می‌شود. که نشان‌دهنده عدم گسترش آلودگی بیشتر در این جهت می‌باشد.

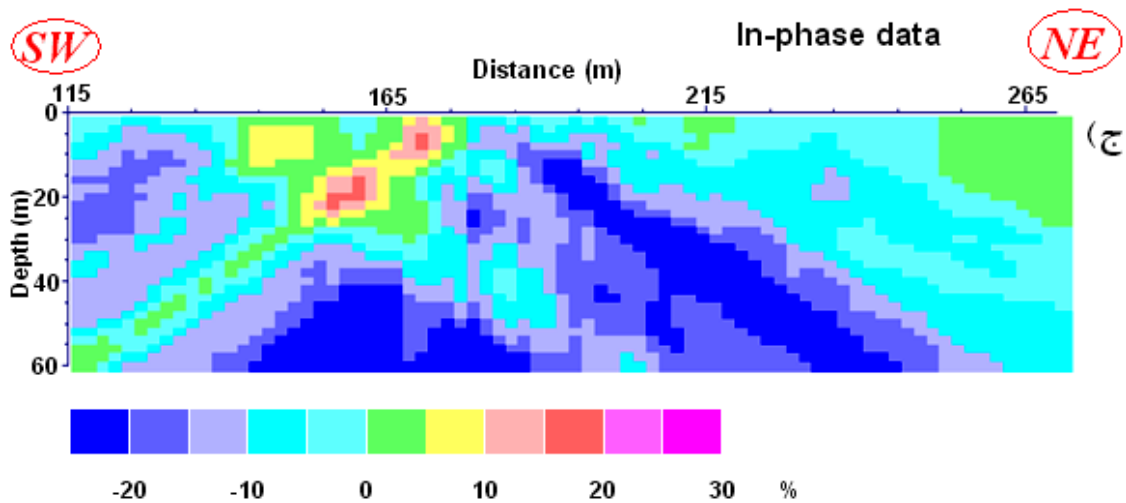
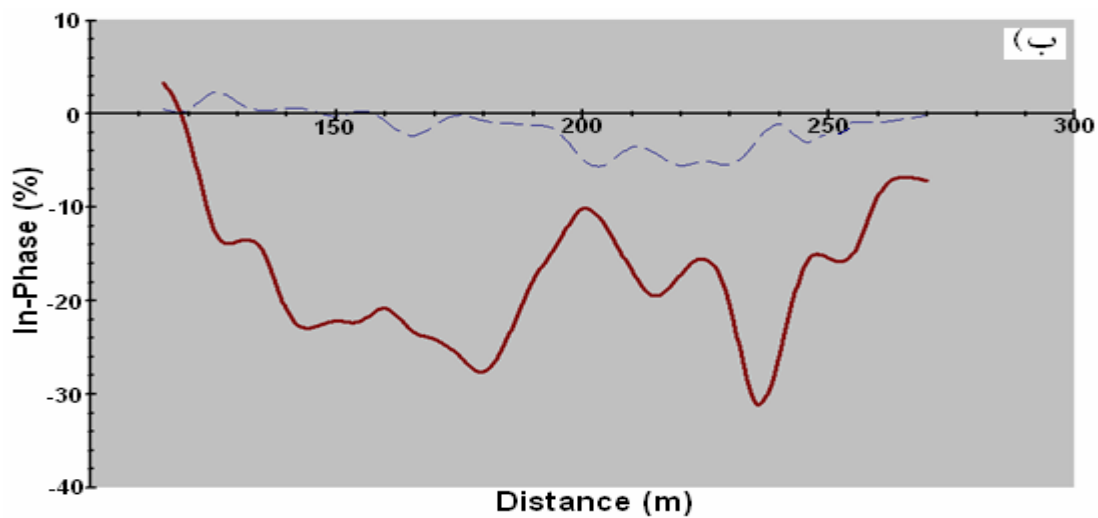
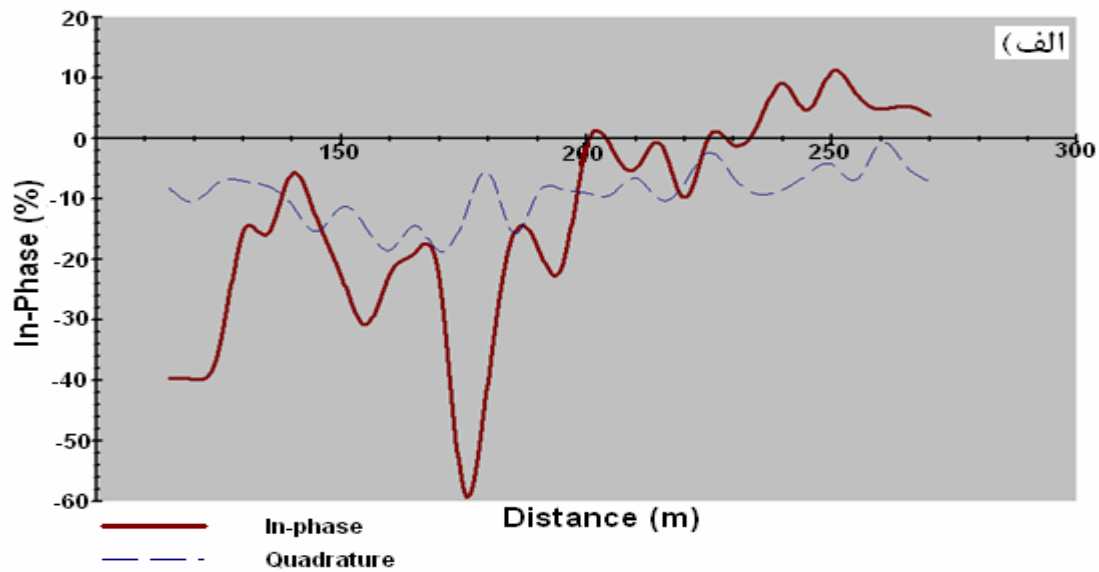
۵-۹- نتایج

نتایج مربوط به شبه مقطع عرضی چگالی جریان مربوط به چهار پروفیل و موقعیت آنها نسبت به دمپ باطله به صورت شماتیکی در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گسترش آلودگی در جهت دمپ باطله بیشتر می‌شود و حضور آلودگی در پروفیل‌های اول و سوم که با علامت فلش در شکل نشان داده شده است، نسبت به دو پروفیل دیگر بیشتر به نظر می‌آید. با توجه به نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های VLF ، محدوده بین پروفیل‌های اول و سوم برای بررسی‌های دقیق‌تر و همچنین تعیین حضور آلودگی توسط برداشت سه بعدی ژئوالکتریک انتخاب گردید.

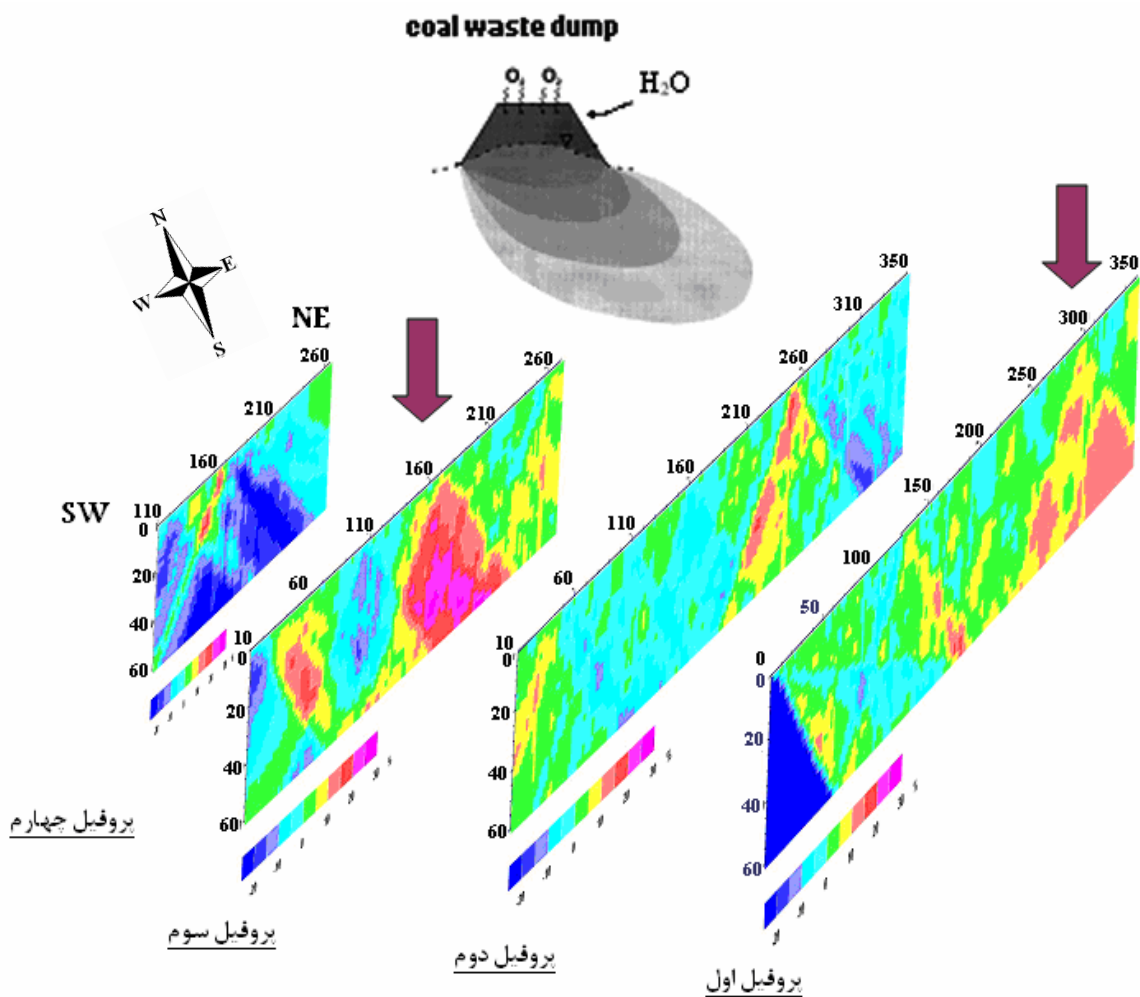
۵-۱۰- تعیین سطح آب زیرزمینی منطقه

از آنجائیکه در مطالعه حاضر شناسایی عمق سطح آب زیرزمینی جهت طراحی برداشت سه بعدی مد نظر است، بنابراین با توجه به وسعت عملیاتی و شرایط زمین شناسی منطقه از عملیات سونداژ (گمانه) زنی^۱ الکتریکی استفاده شد. گمانه‌های الکتریکی با آرایه الکترودی شلومبرژه در سه نقطه طوری انتخاب شد که کل ناحیه را در بر بگیرد و همچنین هر گمانه در رأس یک مثلث باشد (شکل ۵-۷). حداکثر فاصله الکترودهای فرستنده جریان (AB)، ۳۰۰ متر انتخاب شد. پس از پیاده سازی محل سونداژها روی زمین، عملیات سونداژ مقاومت ویژه بر روی سه نقطه انجام گرفت و داده‌های اندازه‌گیری شده ثبت شد.

^۱ - Vertical Electrical Sounding (VES)



شکل ۵-۱۱- نتایج حاصل از پروفیل ۴، الف) نمودار خام داده‌های VLF (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ب) نمودار فیلتر شده داده‌های VLF (مؤلفه حقیقی و مجازی)، ج) شبه مقطع عرضی چگالی جریان (مؤلفه حقیقی)



شکل ۵-۱۲- نمایی از گسترش زون آلوده و پروفیل‌های اندازه‌گیری شده نسب به دمپ باطله زغال

۵-۱۰-۱- دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده

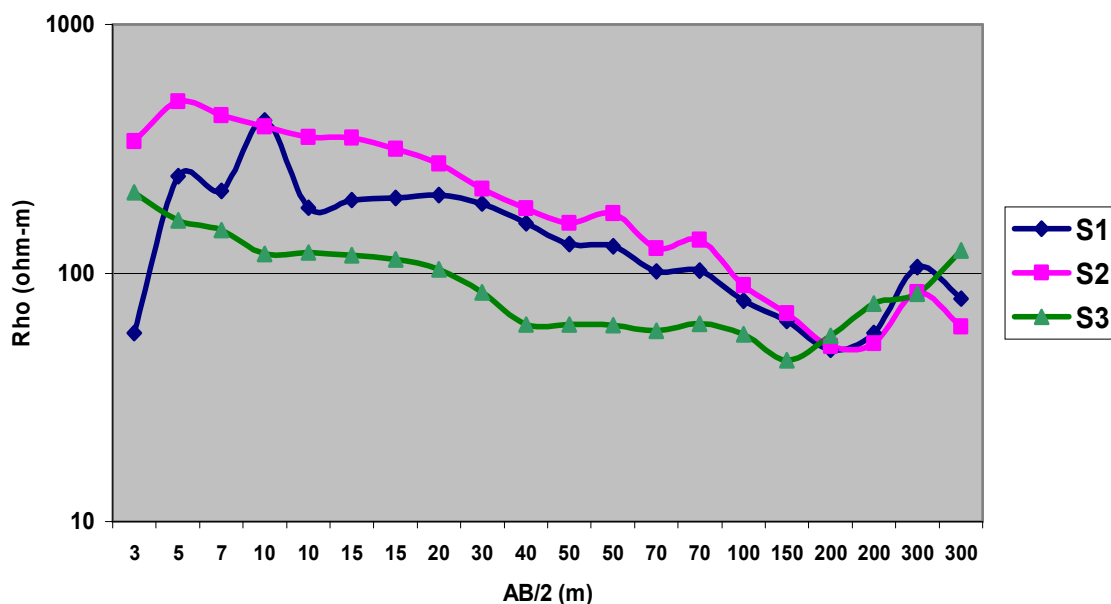
در عملیات صحرائی ژئوالکتریک، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از یک دستگاه ژئوالکتریک مدل *SASI000* ساخت کمپانی سوئدی *ABEM* موجود در آزمایشگاه ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. این دستگاه قابلیت سنجش مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القائی در حوزه زمان را دارد و از قابلیت تنظیم‌های مختلفی برخوردار است [ABEM, ۱۹۹۹]. علاوه بر دستگاه‌های مذکور، تجهیزات جنبی دیگر شامل کابل‌های رابط و قرقه‌های مربوطه، الکترودهای فلزی و غیره نیز مورد استفاده قرار

گرفته است. همچنین از یک دستگاه *GPS* برای تعیین مختصات الکترودهای قرار داده شده در شبکه برداشت استفاده شده است.

۵-۱۰-۲- ارائه داده‌ها و تفسیر کیفی آنها

پس از اینکه کارهای صحرائی به پایان رسید، نتایج اندازه‌گیری‌های حاصله از محل هر سونداژ الکتریکی توسط کامپیوتر مورد بازخوانی قرار گرفتند و با طرح یک صفحه گسترده^۱ در نرم افزار اکسل^۲، مقادیر فاکتور هندسی آرایش (K) برای هر فاصله الکترودی محاسبه و سپس مقادیر مقاومت ویژه برحسب اهم-متر محاسبه گشتند.

به منظور پی بردن به چگونگی تغییرات مقاومت ویژه لایه‌های مختلف زیرزمین در محل هر یک از سونداژهای الکتریکی، نتایج مربوط به سه سونداژ مقاومت ویژه به صورت تغییرات مقاومت ویژه ظاهری بر حسب نصف فاصله الکترودهای جریان تهیه شد (شکل ۵-۱۳).



شکل ۵-۱۳- نتایج سونداژ زنی بر روی سه محل (S_1 ، S_2 و S_3)

همان گونه که شکل (۵-۱۳) نشان می‌دهد، نتایج بدست آمده از سه سونداژ هماهنگی نسبتاً خوبی دارند. با یک نگاه تقریبی می‌توان چنین گفت که در هر سه مورد مقاومت ویژه ظاهری از سطح

^۱ - *Spread sheet*

^۲ - *Excel*

به طرف عمق کاهش یافته و پس از یک کاهش قابل ملاحظه دوباره افزایش می یابد. پس فرض لایه‌ای بودن محدوده مورد بررسی تا حدود زیادی تأیید می گردد.

۵-۱۰-۳- مدل سازی یک بعدی و تفسیر کمی داده‌ها

برای تفسیر دقیق تر داده‌ها و پیدا کردن مقاومت ویژه واقعی و ضخامت هر یک از طبقات در محل هر یک از سونداژها بایستی مدل سازی داده‌ها به طریقی مناسب صورت گیرد و داده‌ها با توجه به واقعیت‌های زمین شناسی مورد تفسیر قرار گیرند. برای مدل سازی عددی یک بعدی^۱ داده‌های سونداژ الکتریکی، از دو روش مدل سازی معکوس هموار^۲ و پارامتری^۳ استفاده شد. برای این کار از نرم افزار *RESIX-IP* استفاده گردید. در این نرم افزار برای پایداری بیشتر در معکوس سازی پارامتری و جلوگیری از تولید نتایج غلط، از یک الگوریتم غیر خطی مناسب به نام رگرسیون ریج^۴ استفاده می شود که خود مزیت بزرگی نسبت به دیگر نرم افزارهای مورد استفاده برای مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ الکتریکی است.

در این نرم افزار می توان به راحتی داده‌ها را وارد کرد. علاوه بر داده‌های مقاومت ویژه، می توان داده‌های مربوط به برداشت‌های *IP* را به نرم افزار داد و مدل سازی کرد. در قسمت مقاومت ویژه می توان نوع سونداژرزی را نیز مشخص نمود. پس از مدل سازی می توان با تغییر اندازه مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها به طور هم زمان بر روی مدل به بهترین جواب ممکن با توجه به اطلاعات زمین شناسی دست یافت [استویر^۵ و همکاران، ۱۹۹۳].

در مدل سازی داده‌ها روش کار بدین صورت بود که در ابتدا با در نظر گرفتن یک زمین همگن به عنوان مدل اولیه، داده‌های هریک از سونداژها با استفاده از نرم افزار *RESIX-IP* به صورت معکوس مورد مدل سازی هموار قرار گرفتند تا وضعیت تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق و همچنین وضعیت لایه بندی طبقات تا حدودی روشن شود. در این شیوه مدل سازی به جای تغییرات ناگهانی مقاومت ویژه، در حین عمل مدل سازی اجازه داده می شود تا مقاومت ویژه زمین نسبت به عمق

¹ - One-Dimensional (1-D) numerical modeling

² - Smooth modeling

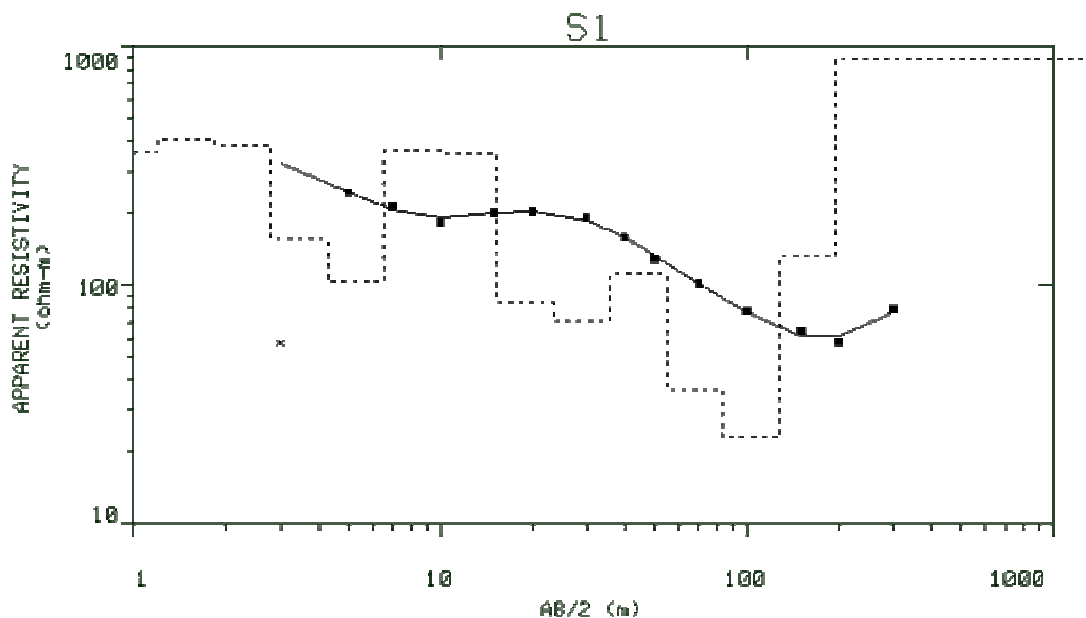
³ - Parametric modeling

⁴ - Ridge regression

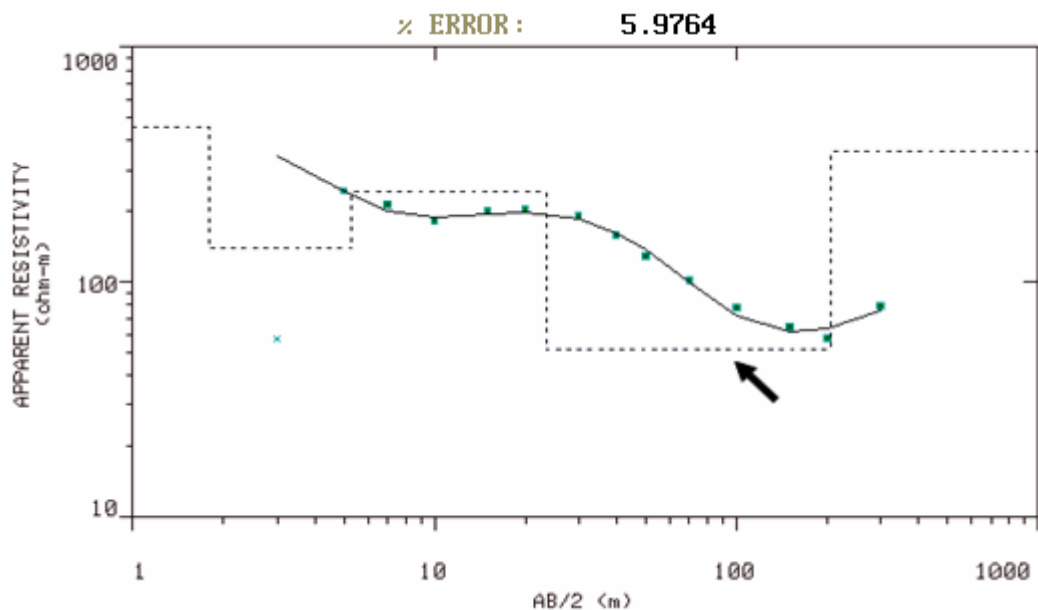
⁵ - Stoyer

تغییرات تدریجی داشته باشد که ممکن است در عمل با بسیاری از شرایط زمین‌شناسی مطابقت داشته باشد و یا اینکه نتیجه مدل‌سازی بسیاری از محدودیت‌های فیزیکی روش اکتشافی را مد نظر قرار دهد [مرادزاده، ۱۳۸۴].

شکل (۵-۱۴) نتیجه مدل‌سازی هموار برای سونداژ R_1 را نشان می‌دهد. بین پاسخ مدل و یا داده‌های محاسبه‌ای (منحنی) با داده‌های اندازه‌گیری شده (نقاط) مقاومت ویژه برازش خوبی وجود دارد و این مطلب دلالت بر دقت مدل‌سازی را دارد. مدل‌سازی فوق به عنوان مدل اولیه مناسبی برای مدل‌سازی معکوس پارامتری می‌تواند باشد و با انجام محاسبات عددی و تکرارهای متعدد پارامترهای لایه‌های زیرزمینی در محل هر یک از سونداژها می‌توان مدلی بدست آورد که برازش خوبی با داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده داشته باشد. شکل (۵-۱۵) نتیجه مدل‌سازی پارامتری را برای داده‌های سونداژ S_1 نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، پاسخ مدل یک زمین پنج لایه‌ای با خطای کمتر از ۶ درصد را نشان می‌دهد. با توجه به مقاومت ویژه برخی سنگ‌ها، مواد معدنی و شیمیایی (جدول د-۱ از پیوست (د)) می‌توان چنین گفت که لایه چهارم که در شکل با علامت فلش مشخص شده است در محل این سونداژ، لایه آبدار را در عمق ۲۶/۵۸ متری نشان می‌دهد. نتایج مربوط به مدل‌سازی در جدول (۵-۲) آورده شده است.



شکل ۵-۱۴- نتایج مدل‌سازی هموار داده‌های سونداژ R_1 ، داده‌های مشاهده‌ای مقاومت ویژه با مربع‌های کوچک و پاسخ مدل با منحنی پر و همچنین مدل داده شده به صورت خط چین نشان داده شده است.

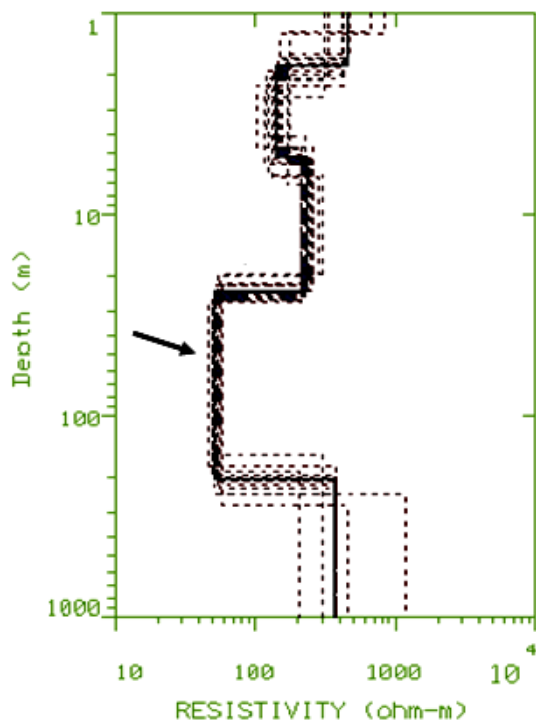


شکل ۵-۱۵- نتایج مدل سازی معکوس پارامتری داده های سونداژ R_1 ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه با مربع های کوچک و پاسخ مدل با منحنی پر و همچنین مدل داده شده به صورت خط چین نشان داده شده است.

برای ارزیابی های بهتر از صحت نتایج مدل سازی پارامتری و رفع پاره ای از ابهامات از پارامترهای مدل حاصل، آنالیز مدل های هم ارز^۱ (بر اساس اصل هم ارزی) صورت گرفت. نتیجه چنین آنالیزی برای سونداژ R_1 در شکل (۵-۱۶) آورده شده است. بر اساس شکل (۵-۱۶)، مرز مشترک لایه سوم و چهارم که سطح ایستابی آب زیرزمینی را نشان می دهد و در عمق ۲۶/۵۸ متر قرار دارد خوب مدل شده است و دارای دامنه تغییرات بسیار کمی است.

مدل سازی معکوس هموار و پارامتری و همچنین مدل هم ارز برای دو سونداژ دیگر به طریقی که اشاره شد به طور مجزا صورت گرفت (پیوست د) و نتایج در جدول (۵-۲) آمده است. نتایج نشان می دهد که در محل سونداژ R_2 و R_3 ، لایه آبدار به ترتیب در عمق ۳۵/۲۱ و ۱۲/۳۸ متری قرار دارد، که این اختلاف ممکن است به دلیل نزدیکی سونداژ R_3 به محل حوضچه لجن باشد.

^۱ - Equivalence Model



شکل ۵-۱۶- مدل‌های هم ارز (مدل‌های معادل) حاصل از مدل‌سازی معکوس پارامتری داده‌های سونداژ S_1 ، خطوط نمایش داده شده به صورت خط‌چین مدل هم ارز مربوط به بهترین مدل حاصل را که با خط پر مشخص شده، نشان می‌دهد. لایه آبدار با فلش در شکل مشخص شده است.

جدول ۵-۲- نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های اندازه‌گیری شده سه سونداژ

لایه	S_1		S_2		S_3	
	مقاومت ویژه (اهم متر)	ضخامت (متر)	مقاومت ویژه (اهم متر)	ضخامت (متر)	مقاومت ویژه (اهم متر)	ضخامت (متر)
۱	۴۵۰/۵۶	۰/۸	۱۴۲/۶۸	۰/۷۸	۲۷۱/۴۹	۱/۵۸
۲	۱۴۹/۸۹	۳/۷۵	۱۳۴۸/۴۶	۱/۴۷	۱۲۵/۳۸	۱۰/۸۲
۳	۲۳۸/۲۳	۲۲/۰۳	۲۰۶/۸۶	۳۲/۹۶	۵۰/۸۴	۱۲۶/۶۳
۴	۵۲/۰۱	۱۸۴/۵۶	۴۵/۷۲	۲۵۸/۱۶	۱۲۴۰/۵۵	Infinite
۵	۳۷۸/۹۹	Infinite	۳۳۱/۹۳	Infinite		
	RMS = ۵/۹		RMS = ۶/۲۵		RMS = ۳/۲۴	

۵-۱۱- مقدمه‌ای بر برداشت‌های سه بعدی

هر چند تمام ساختارهای زمین‌شناسی در طبیعت بصورت سه بعدی می‌باشند، ولی برداشت‌ها سه بعدی در حال حاضر در مقایسه با برداشت‌های سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی یک بعدی^۱ یا حتی برداشت‌های توموگرافی دو بعدی^۲ به ندرت انجام می‌شود. این مسئله شاید به دلیل تعداد نقاط اندازه‌گیری بیشتر در برداشت‌های سه بعدی^۳ و همچنین نبود یک نرم‌افزار پیشرفته در امر معکوس‌سازی داده‌ها باشد [لوک و بارکر، ۱۹۹۶].

برداشت‌های سه بعدی ژئوالکتریک امروزه در بررسی‌های زیست محیطی به طور مؤثر مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج قابل قبول این نوع اندازه‌گیری‌ها نسبت به برداشت‌های یک و دو بعدی، سبب تمایل در به کارگیری این روش‌ها در مسائل و مشکلات زیست محیطی شده است. در بررسی‌های زیست محیطی اولین قدم در جهت درمان یا رفع آلودگی خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی، تشخیص وسعت یا محدوده آلودگی و نیز تعیین نحوه توزیع و گسترش آلودگی در زیر سطح زمین است. این آلودگی ممکن است به مرور زمان از نظر عمقی یا جانبی و یا از هر دو نظر وسعت بیشتری در زیر سطح زمین پیدا کند. روش برداشت سه بعدی ژئوالکتریک در بررسی آلودگی‌های خاک و آب‌زیرزمینی مناسب‌ترین روش می‌باشند و در این موارد بیشترین سهم و موفقیت را نسبت به سایر روش‌های ژئوفیزیکی دارند. این نوع روش‌ها به تنهایی می‌توانند عمق، محدوده یا گسترش جانبی، ضخامت و حجم تقریبی سفره یا ذخیره آب‌زیرزمینی آلوده در یک محل را تعیین نمایند. بنابراین یک توده خاک یا آب‌زیرزمینی آلوده به دلیل داشتن خصوصیات الکتریکی متفاوت از محیط یا سنگ‌ها و لایه‌های در برگرنده خود، به راحتی توسط این چنین اندازه‌گیری‌هایی قابل تشخیص است. روش‌های ژئوالکتریک علاوه بر تشخیص و تعیین محدوده آلودگی‌های زیرزمینی، می‌تواند تا حدودی خصوصیات آلودگی را تعیین نماید [لوک، ۱۹۹۹].

^۱ - One-dimensional (1D) resistivity sounding

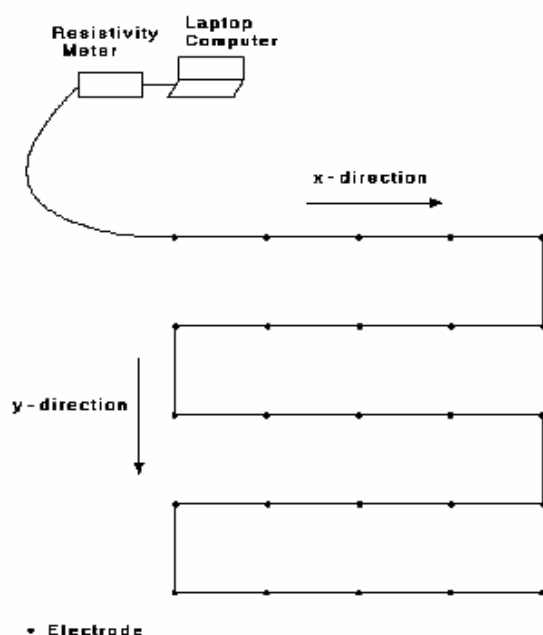
^۲ - Two-dimensional (2D) resistivity tomography

^۳ - Three-dimensional (3D) resistivity surveys

۵-۱۲- اصول اندازه‌گیری در برداشت‌های سه بعدی

برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی سه بعدی معمولاً توسط سیستم اندازه‌گیری مقاومت ویژه چند کاناله صورت می‌گیرد. در این برداشت، از تعداد زیادی الکتروود که متصل به یک کابل چند هسته‌ای^۱ می‌باشند، استفاده می‌شود. یک لپ‌تاپ^۲ به همراه یک سوئیچ الکترونیکی^۳ به کار برده می‌شود تا به‌طور خودکار چهار الکتروود مناسب برای هر بار اندازه‌گیری را انتخاب کند.

از مزایای مهم در برداشت‌های سه بعدی، استفاده از تعداد متوسطی الکتروود (۲۵ یا بیشتر) می‌باشد که با سیستم اندازه‌گیری مقاومت ویژه چند کاناله می‌تواند انجام شود. نحوه قرارگیری الکتروودها برای یک سیستم ۲۵ الکتروودی در برداشت سه بعدی در شکل (۵-۱۷) آورده شده است. برای راحتی کار معمولاً الکتروودها در یک شبکه مربعی و با فواصل یکسان در راستای x و y در نظر گرفته می‌شوند. البته ممکن است در بعضی موارد از یک شبکه مستطیلی و با فواصل غیر یکسان در راستای x و y نیز استفاده نمود. برداشت بدین صورت می‌باشد که بعد از اندازه‌گیری مقاومت ویژه تمام پروفیل‌ها در راستای x در مرحله بعد اندازه‌گیری در راستای y صورت می‌گیرد [لوک و بارکر، ۱۹۹۶].



شکل ۵-۱۷- نحوه قرارگیری الکتروودها برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در برداشت‌های سه‌بعدی [لوک و بارکر، ۱۹۹۶].

¹ - Multi-core cable

² - Laptop

³ - Electronic switching unit

۵-۱۳- انواع آرایه‌های مورد استفاده در برداشت‌های سه بعدی

آرایه‌های قطبی-قطبی^۱، قطبی-دوقطبی^۲ و دوقطبی-دوقطبی^۳ بیشتر اوقات برای برداشت‌های سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، این بدین دلیل است که آرایه‌های دیگر پوشش ضعیفی در شبکه برداشت دارند. در پیوست (و) به توضیح هر یک از آرایه‌ها پرداخته می‌شود.

۵-۱۳-۱- مقایسه آرایه‌ها

به طور کلی در برداشت‌های سه بعدی با شبکه‌های کوچک، آرایه قطبی-قطبی در مقایسه با دیگر آرایه‌ها دارای نقاط اندازه‌گیری بیشتری می‌باشد و در نتیجه پوشش خوبی در شبکه برداشت دارند و این یک آرایه مفیدی برای شبکه‌های برداشتی کوچک و با فواصل بین الکترودی نسبتاً کم (کمتر از ۵ متر) می‌باشد. این آرایه به دلیل نیاز به دو الکتروود خارج از شبکه برداشت دارای معایبی نیز می‌باشد، که آن استفاده از دو الکتروود در فواصل خیلی بزرگتری نسبت به شبکه برداشت می‌باشد. به همین دلیل با فاصله زیاد بین دو الکتروود پتانسیل، این آرایه نسبت به نویزهای تلوریک^۴، حساسیت بیشتری پیدا می‌کنند. آرایه قطبی-دوقطبی یک انتخاب مناسبی برای شبکه‌های متوسط می‌باشد. این آرایه کیفیت بالاتری نسبت به آرایه قطبی-قطبی دارد و فقط نیاز به یک الکتروود دور (الکتروود C_2) می‌باشد و نسبت به نویز حساسیت کمتری دارد. اثر الکتروود دور در اندازه‌گیری‌ها در مقایسه با آرایه قطبی-قطبی خیلی کمتر است و در مقایسه با آرایه دوقطبی-دوقطبی دارای شدت سیگنال بالاتری است. برای شبکه‌های بزرگ، مخصوصاً وقتی که محل مناسبی برای الکتروود دور نمی‌باشد، آرایه دوقطبی-دوقطبی می‌تواند مفید واقع شود. مهمترین مشکل این آرایه، پایین بودن شدت سیگنال می‌باشد [لوک، ۲۰۰۴].

با توجه به وضعیت منطقه و ابعاد شبکه برداشت سه بعدی، در مطالعه حاضر از آرایه قطبی-دوقطبی جهت اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه و انجام مدل‌سازی سه بعدی استفاده گردید.

¹ - Pole-pole array

² - Pole-dipole array

³ - Dipole-dipole array

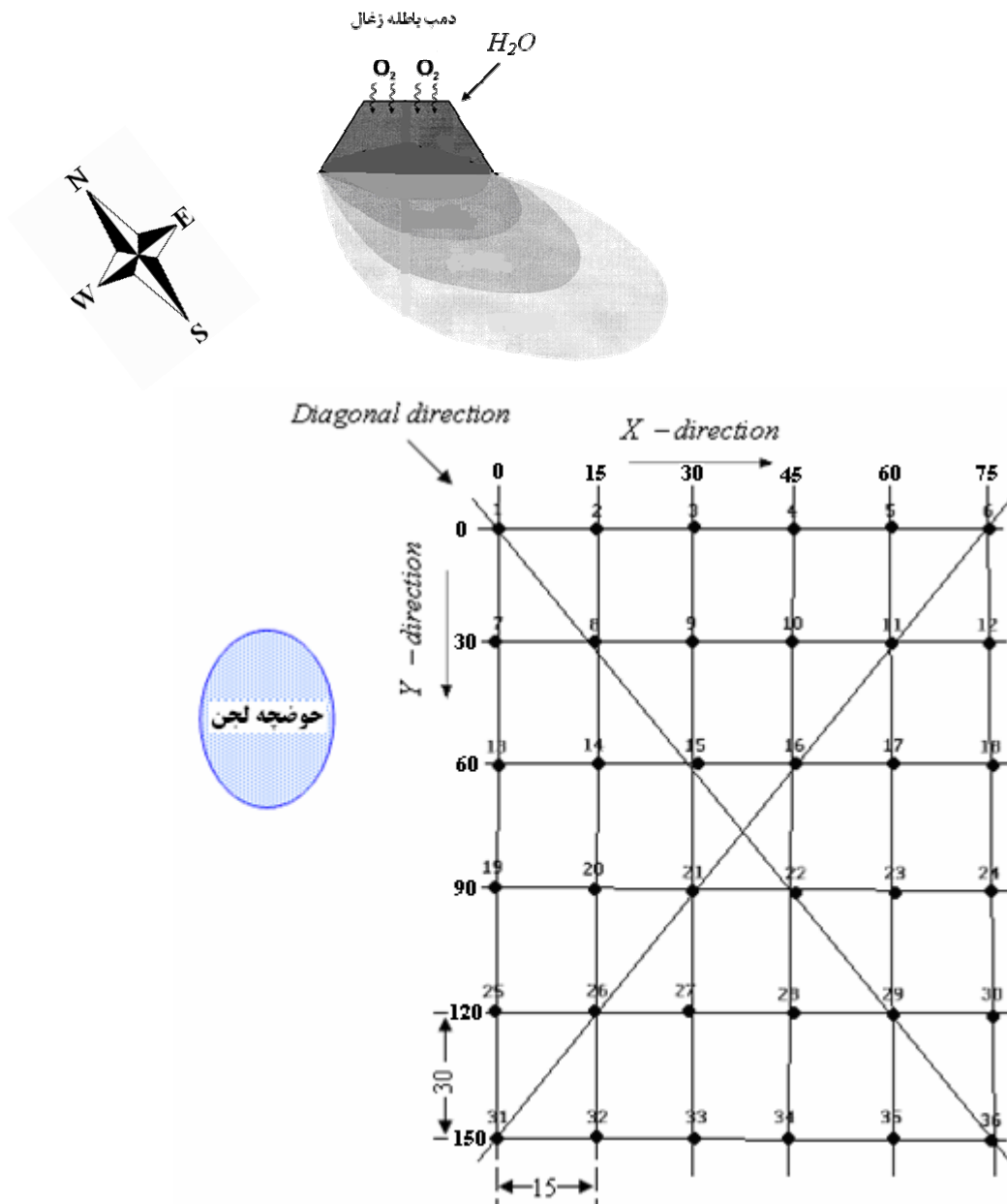
⁴ - Telluric noise

۵-۱۴- طراحی شبکه برداشت سه بعدی داده‌ها

برای طراحی شبکه برداشت، در نظر گرفتن عوامل زیر به انتخاب حالت بهینه شبکه کمک می‌کند. این عوامل شامل زمین‌شناسی، نحوه انتشار، امتداد و عمق آلودگی، عمق تجسس، عوامل اقتصادی، تکنولوژیکی و اطلاعات موجود از منطقه می‌باشد. با در نظر گرفتن عوامل فوق و با توجه به اطلاعات بدست آمده از برداشت‌های الکترومغناطیسی VLF و همچنین برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی به روش سونداژزنی جهت تعیین سطح آب زیرزمینی و با انجام بازدید صحرائی از منطقه مورد مطالعه، پروفیل‌های برداشت سه بعدی ژئوفیزیکی در یک شبکه مستطیلی 6×6 و با فواصل الکترودی متفاوت در راستای x و y ، طراحی گردید و با توجه به بررسی جهت انتشار آلودگی، طول پروفیل‌ها در جهت انتشار آلودگی بیشتر و برای نتایج دقیق‌تر فاصله‌های آن کمتر نسبت به راستای دیگر (در حد فاصل بین پروفیل‌های اول و سوم VLF) در نظر گرفته شد. به این ترتیب اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از دستگاه $ABEM SAS1000$ صورت گرفت. نحوه قرارگیری الکترودها و امتداد پروفیل‌ها در شبکه برداشت سه بعدی، جهت بررسی انتشار آلودگی ناشی از دمپ باطله‌های زغالشویی البرز شرقی در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است.

۵-۱۵- مطالعات ژئوالکتریکی بر روی آلودگی احتمالی باطله‌های زغالشویی البرز شرقی

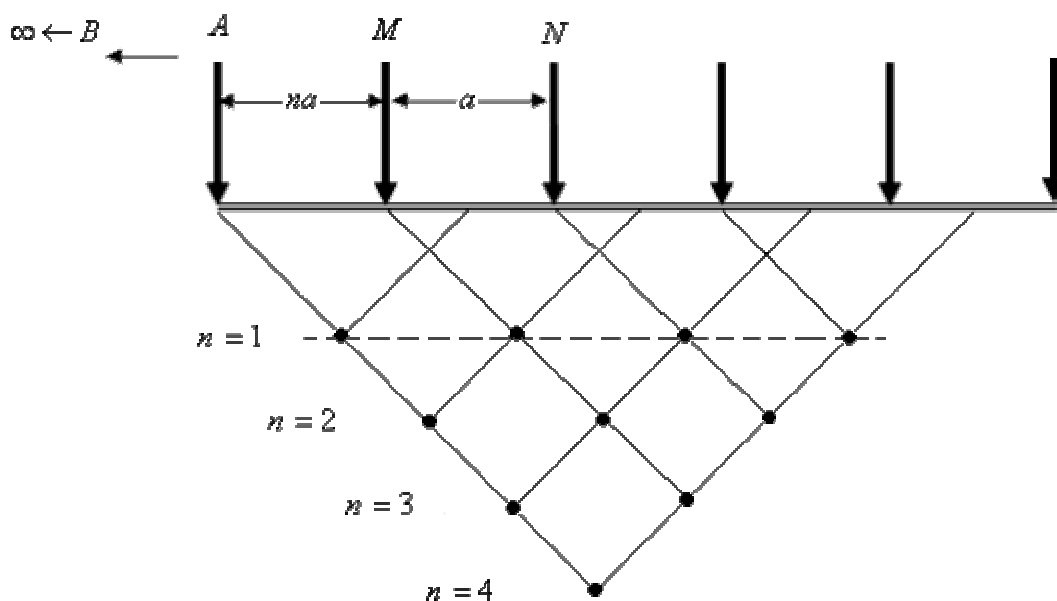
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، پس از شناسایی زون‌های آلوده توسط روش الکترومغناطیسی VLF در محدوده پایین دست دمپ باطله زغال‌شویی، مطالعات ژئوالکتریک با برداشت ۳ گمانه الکتریکی در سه نقطه، برای تشخیص سطح آب زیرزمینی و اندازه‌گیری‌های برداشت سه بعدی در یک شبکه مستطیلی جهت تشخیص دقیق‌تر محل آلودگی انجام گرفت. با توجه به محدوده مورد بررسی و دقت روش برداشت سه بعدی مقاومت ویژه، از آرایش قطبی-دوقطبی در یک شبکه مستطیلی 6×6 با فواصل الکترودی ۱۵ و ۳۰ متر در راستاهای x و y جهت اندازه‌گیری مقاومت ویژه استفاده شد. به دلیل اهمیت آلودگی ناشی از دمپ باطله زغال، آرایه قطبی-دوقطبی به صورت "رفت" و "برگشت" و همچنین نیز بر روی قطر این شبکه به صورت آریبی به مانند آرایه قبل، برداشت داده‌ها در دو راستا صورت گرفت، این کار به دلیل افزایش دقت و



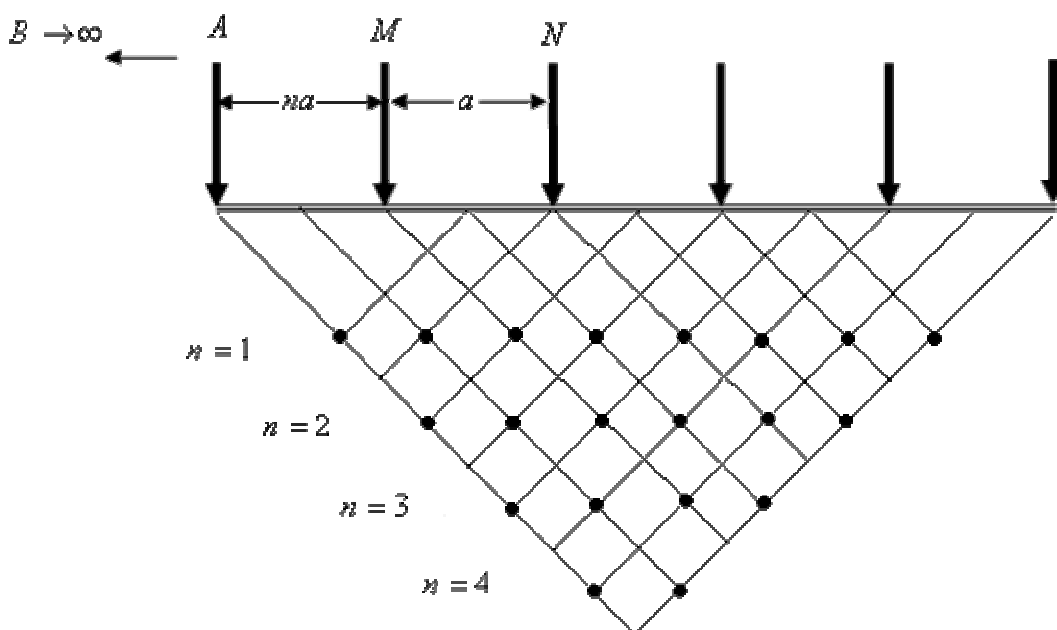
شکل ۵-۱۸- نحوه قرارگیری الکترودها جهت بررسی انتشار آلودگی در برداشت سه بعدی

کاهش خطا در نتایج مدل سازی بود. همان طور که در شکل (۵-۱۹) مشاهده می شود اندازه گیری برای یک پروفیل ۶ الکترودی در جهت x یا y از شبکه برداشت، فقط برای حالت رفت دارای ۱۰ نقطه اندازه گیری به ازای $n = 1, 2, 3, 4$ می باشد و به عبارتی تعداد اندازه گیری ها با آرایش قطبی - دوقطبی برای کل شبکه با این حالت، برابر ۱۴۰ نقطه می باشد و این می تواند سبب کاهش دقت در نتایج مدل سازی به دلیل پوشش کم اندازه گیری ها در منطقه شود.

برداشت با آرایه قطبی - دو قطبی به صورت "رفت" و "برگشت" باعث افزایش تعداد نقاط اندازه گیری می شود (شکل ۵-۲۰). به طوری که در این حالت تعداد نقاط برداشتی دو برابر حالت قبلی و به تعداد ۲۸۰ نقطه اندازه گیری برای کل شبکه می شود و این باعث نزدیک تر شدن نتایج مدل سازی به واقعیت، نسبت به حال قبل است.



شکل ۵-۱۹- اندازه گیری مقاومت ویژه با آرایش قطبی - دو قطبی برای حالت رفت به ازای ۶ الکترو



شکل ۵-۲۰- اندازه گیری مقاومت ویژه با آرایش قطبی - دو قطبی برای حالت رفت و برگشت به ازای ۶ الکترو

۵-۱۶- مدل سازی و تفسیر داده‌های سه بعدی

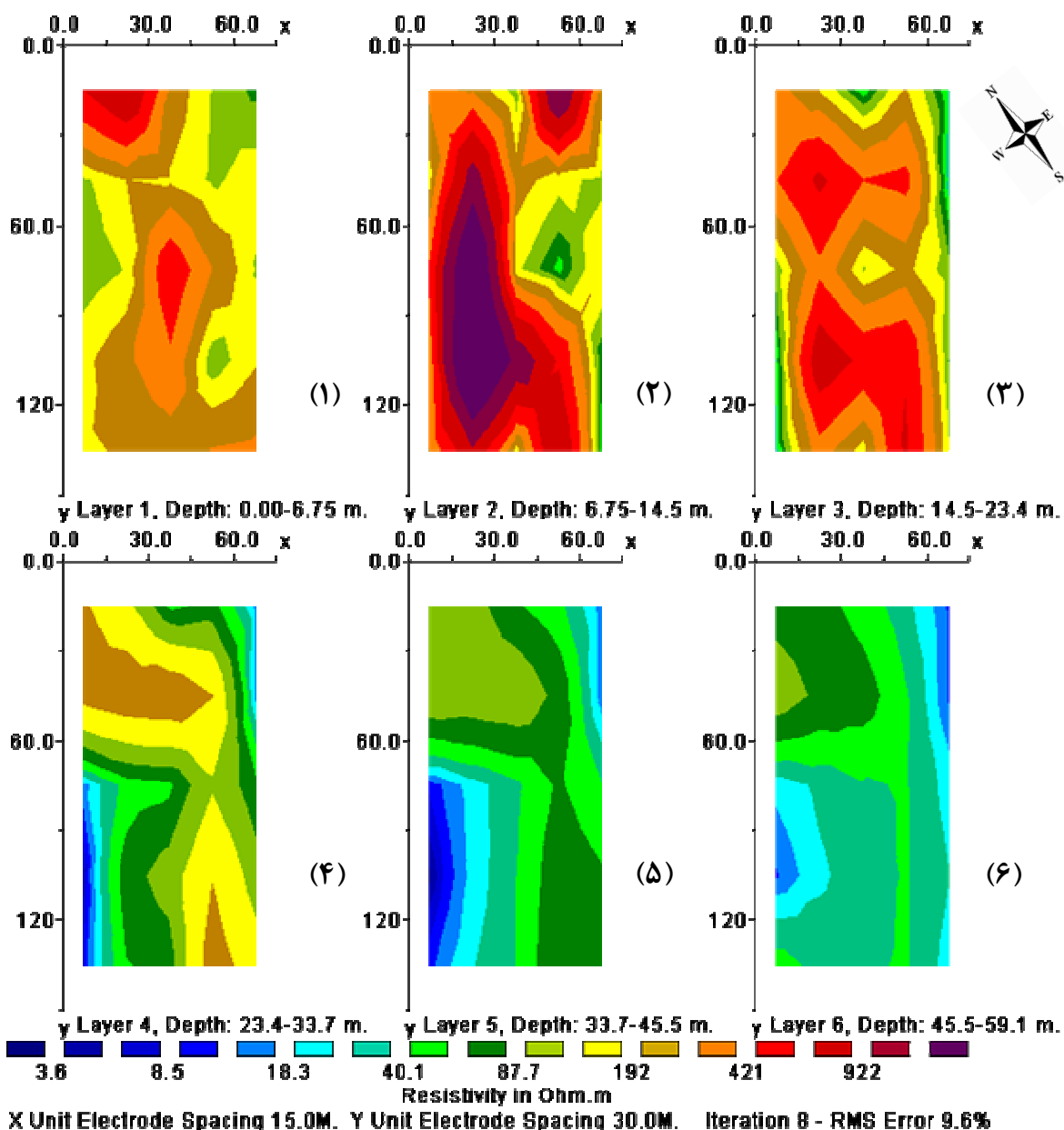
پس از برداشت داده‌ها در برداشت سه بعدی ژئوالکتریک، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط صفحه گسترده اکسل^۱ بازخوانی شد و مقدار مقاومت ویژه ظاهری با توجه به فاکتور هندسی مربوط به آن محاسبه گردید. برای مدل سازی سه بعدی داده‌های برداشت شده، از نرم افزار *RES3DINV* استفاده شده است [لوک، ۲۰۰۱]. داده‌ها به صورت فرمت ورودی نرم افزار مرتب گردید و سپس توسط نرم افزار فوق الذکر مدل سازی گردید. نرم افزار *RES3DINV* از جمله برنامه‌های کامپیوتری است که به صورت خودکار مدل سه بعدی داده‌های حاصل از مشاهدات صحرایی را رسم می‌کند. این برنامه تحت ویندوز عمل نموده و محیط گرافیکی مناسبی دارد. این برنامه توانایی معکوس سازی تعداد زیادی داده را دارا می‌باشد. معکوس سازی داده‌های اندازه‌گیری شده در برداشت سه بعدی توسط این نرم افزار، بر اساس روش کمترین مربعات هموار مقید شده^۲ می‌باشد که در معکوس سازی دو بعدی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته باید توجه داشت که داده‌های یک بعدی و دو بعدی را نیز می‌توان با استفاده از این نرم افزار مدل سازی کرد، اما دقت آن از داده‌های برداشت شده سه بعدی کمتر است [لوک، ۲۰۰۱]. تئوری به کار برده شده در نرم افزار *RES3DINV* در پیوست (و) توضیح داده شده است. شکل‌های (۵-۲۱) تا (۵-۲۳) نتایج مدل سازی معکوس داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نرم افزار *RES3DINV* را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۵-۲۱) مشاهده می‌شود، نتایج به صورت ۶ مقاطع افقی مقاومت ویژه در بازه‌های متفاوت عمقی آورده شده‌اند. با توجه به مقاطع بدست آمده، لایه‌های سطحی به دلیل هوازگی رسوبات آبراهه‌ای مقاومت بالایی را از خود نشان می‌دهند که این نواحی با رنگ‌های قرمز تیره به خوبی مشخص می‌باشند. ولی در نتایج مدل سازی، مقطع سطحی نسبت به دومین مقطع دارای مقاومت ویژه پایین‌تری می‌باشد، که این شاید به دلیل پراکندگی ذرات ریز ناشی از دپو باطله زغال‌شویی در اثر باد، و قرارگیری آنها بر روی خاک منطقه پایین دست آن باشد. از مقطع سوم به سمت عمق در قسمت شمال شرقی و جنوب غربی از شبکه برداشت، کاهش در مقاومت ویژه را مشاهده می‌کنیم که این نواحی در مقطع سوم با رنگ سبز فسفری با مقاومتی بین ۵۰-۴۰ اهم‌متر

^۱ - Excel

^۲ - Smoothness – constrained Least - Squares

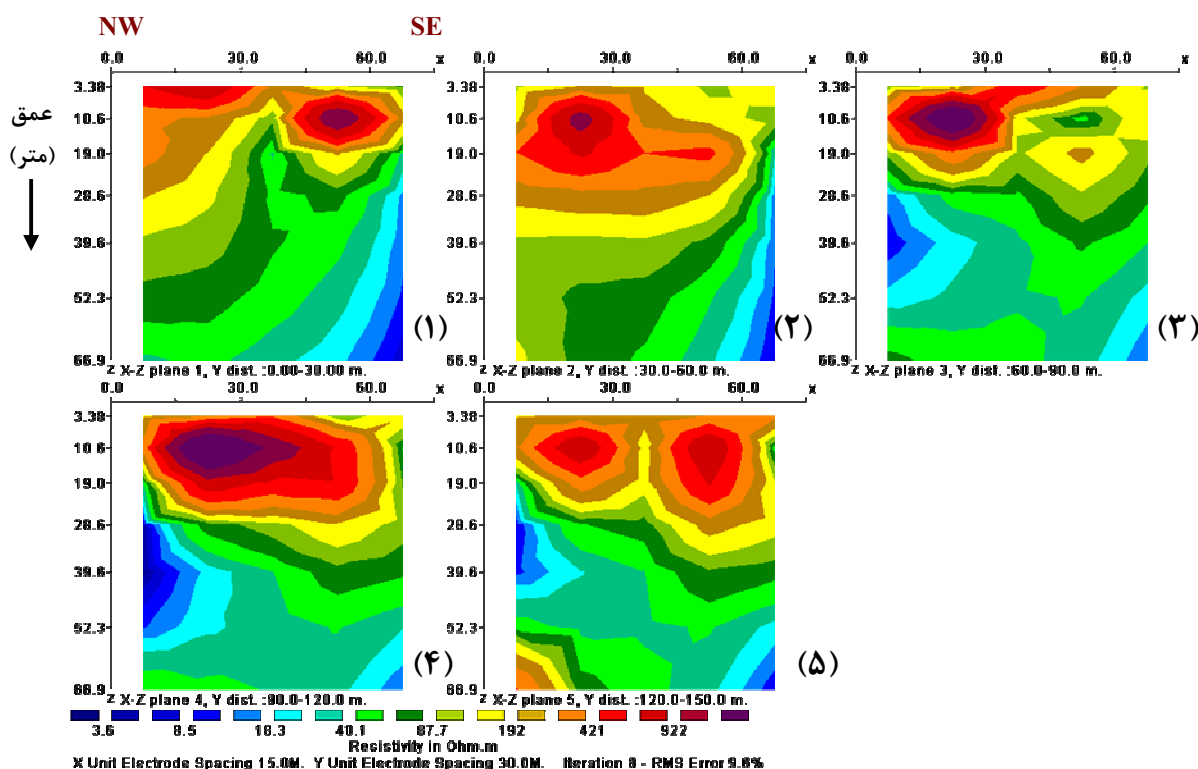
شروع و در مقاطع ۵،۴ و ۶ با رنگ آبی تا آبی تیره که دارای مقاومتی کمتر از ۱۸ اهم متر می باشند به خوبی مشاهده می شود. رینولدز در سال ۱۹۹۷، مقاومت ویژه شیرابه های محل دفن زباله ها^۱ را در دامنه ۵۰ تا کمتر از ۱۰ اهم متر و مقاومت ویژه پساب اسیدی معدن را کمتر از ۱۰ اهم متر تعیین کرد [رینولدز، ۱۹۹۷]. بنابراین تمرکز آلودگی در مقطع پنجم در عمق ۳۳/۷ تا ۴۵/۵ متری بیشتر به نظر می آید که به دلیل تأثیر نفوذ آب از طریق حوضچه لجن می باشد.



شکل ۵-۲۱- مقاطع افقی مقاومت ویژه بدست آمده از مدل سازی معکوس توسط نرم افزار RES3DINV

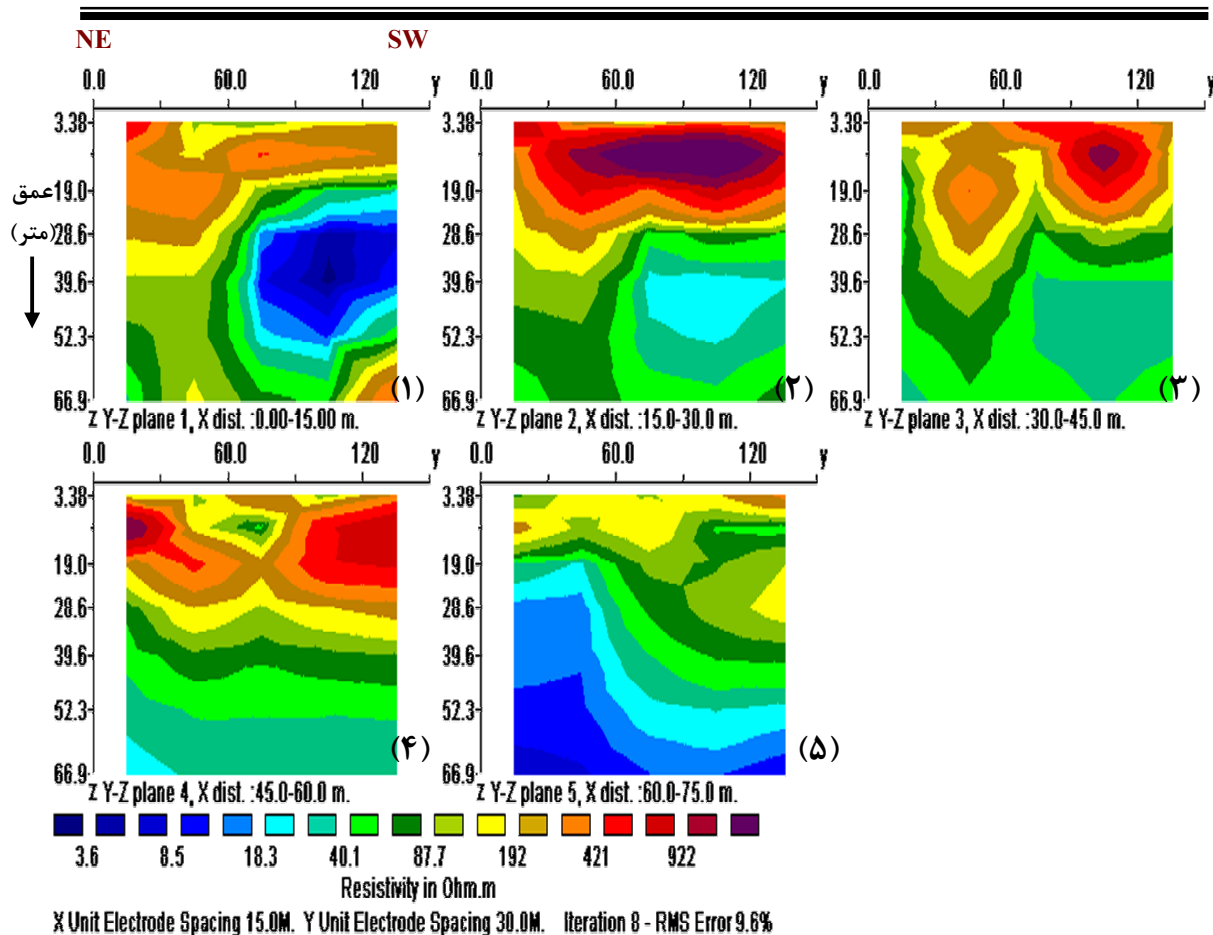
^۱ - Landfill leachates

شکل (۵-۲۲) نتایج مدل سازی سه بعدی را به صورت مقاطع قائم در جهت x نشان می دهد. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، در دو مقطع اول نواحی با مقاومت کم با رنگ آبی تا آبی تیره از عمق تقریبی ۲۸ متری به سمت اعماق پایین تر گسترش پیدا کردند. در سه مقطع دیگر ضخامت منطقه آلودگی تقریباً ۳۰ متر می باشد که از عمق ۲۸ متری شروع و تا عمق ۶۰ متری ادامه دارد. نحوه گسترش آلودگی در این ناحیه به سمت راست و در جهت عمق می باشد.



شکل ۵-۲۲- مقاطع قائم مقاومت ویژه (در امتداد محور X) حاصل از مدل سازی سه بعدی توسط نرم افزار *RES3DINV*

شکل (۵-۲۳) نتایج مدل سازی را به صورت مقاطع قائم مقاومت ویژه در جهت y نشان می دهد. با توجه به شکل، حضور نواحی آلوده با مقاومت ویژه پایین که به رنگ آبی تا آبی تیره می باشد، در مقطع اول به خوبی مشاهده می شود و در مقاطع دوم تا چهارم شدت آلودگی کم شده است. مرکز آلودگی در مقطع اول تقریباً در عمق ۳۶ متری می باشد که این تطابق خوبی با نتایج سونداژنی در قسمت پایین دست این منطقه دارد (سونداژ S_2). عمق سطح آب زیرزمینی در ناحیه سونداژنی تقریباً در ۳۵ متری نشان داده شده است.

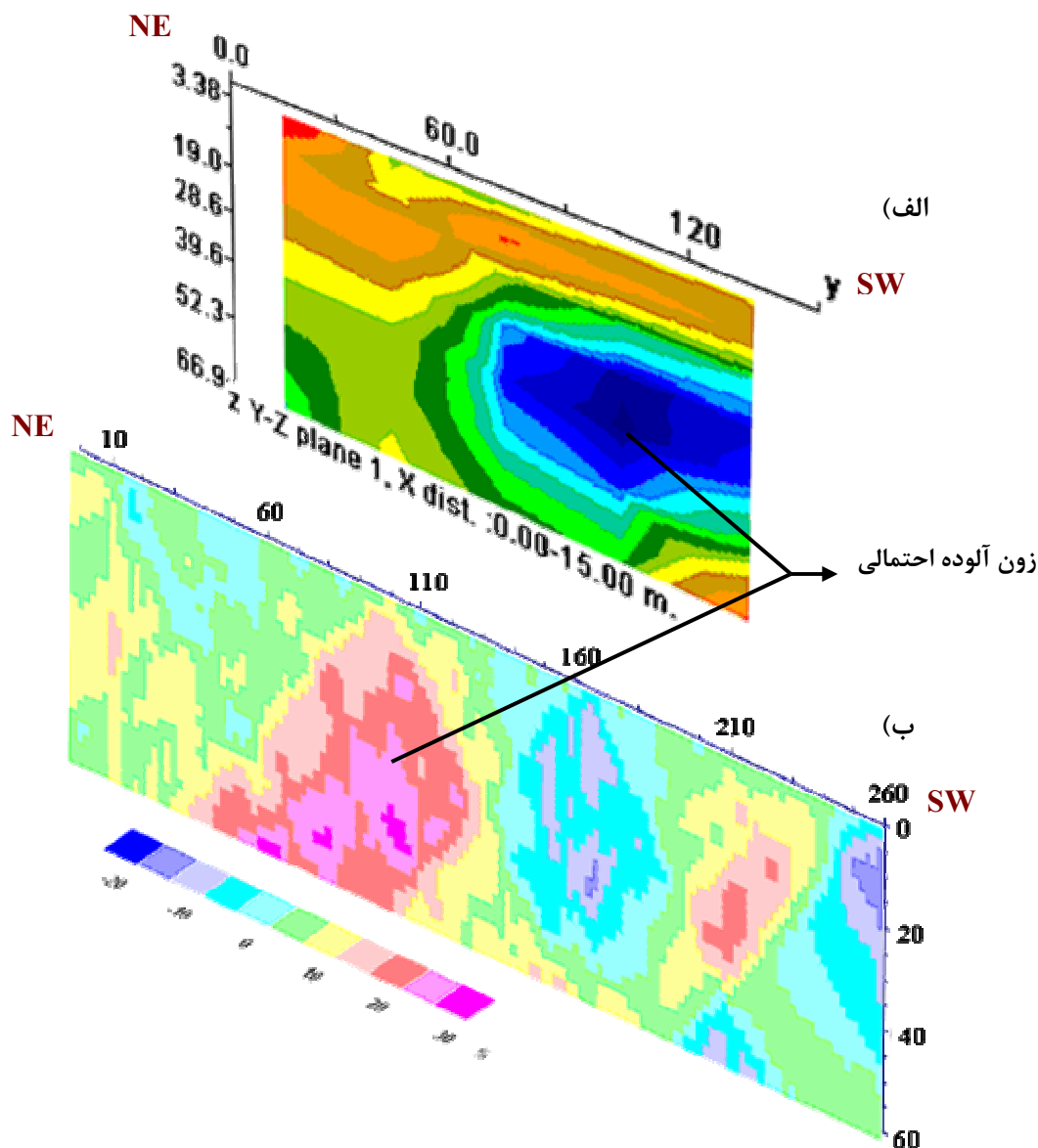


شکل ۵-۲۳- مقاطع قائم مقاومت ویژه (در امتداد محور Y) حاصل از مدل سازی سه بعدی، توسط نرم افزار *RES3DINV*

شکل (۵-۲۴) مدل سه بعدی ایجاد شده توسط نرم افزار *Slicer\Dicer* را نشان می دهد. نواحی آلوده در این مدل به خوبی با رنگ آبی و آبی مایل به صورتی قابل مشاهده می باشند. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، در جهت عمق گسترش آلودگی احتمالی در قسمت شمال شرقی و جنوب غربی از شبکه برداشت مشاهده می گردد. بنابراین نتایج بدست آمده از مدل سازی حاکی از حضور آلودگی احتمالی و همچنین گسترش آلودگی به سمت عمق در منطقه پایین دست دمپ می باشد.

شکل (۵-۲۵) موقعیت برداشت های ژئوفیزیکی در بررسی آلودگی ناشی از باطله های زغال شویی البرز شرقی را برای مقایسه نتایج روش های مختلف ژئوفیزیکی نشان می دهد. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، سه پروفیل از اندازه گیری های *VLFF* در محدوده شبکه برداشت سه بعدی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از مدل سازی داده های اندازه گیری شده در برداشت های ژئوفیزیکی حاکی بر تطابق بین این روش ها می باشد. همان طور که از شکل (۵-۲۶) مشاهده می شود، پروفیل سوم از اندازه گیری های VLF با نتایج مقاومت ویژه در برداشت سه بعدی ژئوالکتریک تطابق خوبی دارند و هر دو مدل مؤید آلودگی در این محدوده می باشند.



شکل ۵-۲۶- مقایسه نتایج مدل سازی داده های ژئوفیزیکی VLF و مقاومت ویژه در محدوده پروفیل سوم. الف) مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه در حد فاصل $X=0-15$ (m) ب) شبه مقطع چگالی جریان معادل برداشت VLF در امتداد پروفیل سوم

۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری مطالب

پساب اسیدی (*AMD*) یکی از منابع آلوده کننده محیط زیست است که می‌تواند از فرآیند اکسیداسیون کانی پیریت همراه باطله‌های زغال‌شویی ناشی گردد. هنگامی که کانی‌های سولفیدی (خصوصاً پیریت) در معرض هوا و رطوبت محیط قرار می‌گیرند، سبب تولید پساب‌های اسیدی می‌شوند. اسید سولفوریک ایجاد شده و انتقال فلزات سنگین سبب کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی خواهد شد.

هدف از ارائه این کار تحقیقی، انجام مطالعات زیست محیطی بر روی آلودگی ناشی از باطله‌های دستگاه جیگ کارخانه زغال‌شویی البرزشرقی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و مدل‌سازی ریاضی مکانیزم حاکم بر اکسیداسیون پیریت و تولید اسید در محل دمپ باطله‌های زغال‌شویی می‌باشد. برای این منظور پس از مطالعات مقدماتی و بازدید اولیه از منطقه، ابتدا نمونه‌برداری، آنالیز و مدل‌سازی ریاضی برای ارزیابی پتانسیل آلودگی دمپ باطله تشریح گردید و بعد نتایج برداشت و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی از محل پایین دست دمپ باطله مورد بررسی قرار گرفت.

مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی به صورت نمونه‌برداری عمقی بر روی دمپ باطله جهت بررسی تغییرات اکسایشی پیریت انجام پذیرفت. برای نمونه‌برداری دو نقطه روی دمپ باطله انتخاب شد. نمونه‌های عمقی به فواصل ۰/۲۵ متری و تا عمق ۲/۲۵ متری به صورت دستی گرفته شد. پس از مراحل آماده‌سازی و طبقه‌بندی نمونه‌ها، به کمک تجزیه سرنندی، از روش جذب اتمی به منظور تعیین درصد پیریت باقی‌مانده در نمونه‌ها استفاده گردید. نتایج حاصل از آنالیز نشان‌دهنده نفوذ اکسیژن تا عمق تقریبی ۱/۵-۱/۲۵ متری و افزایش میزان پیریت باقی‌مانده نمونه‌ها با افزایش عمق نمونه‌برداری بود. برای تأیید نتایج آنالیزهای مربوط به اکسیداسیون پیریت در باطله، از مدل‌سازی یک و دو بعدی ریاضی با استفاده از نرم افزار *PHOENICS* استفاده شد. در مدل‌سازی یک بعدی، با

استفاده از روش المان حجمی محدود، معادله حاکم بر نفوذ اکسیژن در باطله‌ها و مدل مغزه انقباضی به طور همزمان تحت گام‌های زمانی مختلف و با در نظر گرفتن پدیده کاهش سطح پیریت ضمن انجام فعالیت‌های اکسیداسیون، حل شدند. نتایج به دست آمده حاکی از انطباق خوب بین داده‌های صحرائی و پیش‌بینی مدل ریاضی یک بعدی ارائه شده، می‌باشد. مدل‌سازی دو بعدی نیز برای بررسی دقیق‌تر انجام گرفت. نتایج مدل‌سازی دو بعدی با نتایج آنالیز عمقی به دست آمده برای عناصر مختلف در یک نقطه روی دمپ باطله حاکی از اکسایش پیریت، تولید پساب اسیدی و نشت محصولات اکسیداسیون به مناطق پایین دست و علی‌الخصوص منابع آب زیرزمینی می‌باشد که به نوبه خود می‌تواند محیط‌زیست منطقه را تحدید نماید.

مطالعات ژئوفیزیکی زیست‌محیطی با اندازه‌گیری‌های *VLF* جهت تعیین مناطق آلوده در امتداد چهار پروفیل به فواصل ۳۰ متر و نقاط اندازه‌گیری ۵ متر با توجه به وسعت منطقه انجام گرفت. انتخاب روش *VLF* در این بررسی بیشتر به خاطر مناسب بودن، سادگی روش، سرعت عمل و کم هزینه بودن آن بود. سپس داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نرم افزار تخصصی *RAMAG* مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدل‌های تهیه شده شامل نمودارهای خام داده‌ها، نمودارهای فیلتر شده داده‌ها و مقاطع عرضی بودند. در تهیه مدل‌ها فیلتر کاروس - هجالت با عمق فیلتر ۶۰ متر انتخاب گردید و حضور آلودگی در پروفیل‌های اول و سوم به خوبی مشخص بود.

در مرحله بعد سطح آب زیرزمینی منطقه با استفاده از آرایش شلومبرژه در سه نقطه اطراف محدوده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اطلاعات بدست آمده از برداشت الکترومغناطیسی *VLF* و مقاومت ویژه الکتریکی به روش سونداژ زنی جهت تعیین سطح آب زیرزمینی، پروفیل‌های برداشت سه بعدی ژئوفیزیکی در یک شبکه مستطیلی 6×6 و با فواصل الکترودی متفاوت در راستای $x=15$ و $y=30$ ، طراحی گردید و با توجه به بررسی جهت انتشار آلودگی، طول پروفیل‌ها در امتداد انتشار آلودگی بیشتر و برای نتایج دقیق‌تر فاصله‌های آن کمتر نسبت به راستای دیگر در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری سه بعدی ژئوالکتریک با آرایش قطبی - دوقطبی به صورت رفت و برگشت انجام گرفت و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نرم افزار *RES3DINV* مدل‌سازی و مورد تفسیر قرار گرفت. نتایج حاکی بر نشانه‌های آلودگی احتمالی در نواحی شمال شرقی و جنوب غربی از شبکه می‌باشد. در تمامی مقاطع حاصل از مدل‌های سه بعدی، وجود آلودگی احتمالی با توجه به کاهش مقادیر مقاومت ویژه (کمتر از

۱۸ اهم‌تر) از عمق تقریبی ۲۸ متری شروع و تا عمق ۶۰ متری ادامه دارد. با مقایسه مدل‌ها می‌توان گسترش و عمق قرارگیری مرکز آلودگی احتمالی را مورد توجه قرار داد.

۶-۲- پیشنهادات

بر اساس نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر، پیشنهادات و راهکارهای زیر جهت کنترل و کاهش مقدار اسید تولیدی و جلوگیری از نشت آلاینده‌ها به سیستم جریان آب زیرزمینی، آب‌های سطحی و خاک ارائه می‌گردد.

✓ با توجه به اهمیت تأثیرات انباشت باطله‌ها، برای مدیریت صحیح و جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی، در نظر گرفتن عوامل زیر در طراحی دپوهای باطله الزامی می‌باشد:

- (۱) وجود زمین کافی
- (۲) توپوگرافی: سیستم مدیریت زهاب حاصل از باطله باید بگونه‌ای باشد که آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، گرد و غبار و دیگر تأثیرات به حداقل ممکن برسد.
- (۳) موقعیت: با تعیین جهت آب زیرزمینی می‌توان از رسیدن آلودگی به آب‌های زیرزمینی جلوگیری کرد.
- (۴) وجود فضای کافی در اطراف کپه باطله به منظور ایجاد کانال و ترانشه جهت جمع‌آوری زهاب اسیدی تولید شده از باطله‌ها.
- (۵) در نظر گرفتن جهت و قدرت متوسط باد در منطقه: ذرات موجود در سطح باطله‌ها ممکن است در اثر جریان باد پراکنده شده و باعث آلودگی در منطقه شود. با دانستن جهت و قدرت متوسط باد در منطقه می‌توان تمهیدات لازم را جهت جلوگیری از پراکنده شدن ذرات در هوا و ایجاد گرد و غبار بکار گرفت.
- (۶) فاصله محل انباشت باطله‌ها از کارخانه شستشوی زغال: فاصله محل انباشت باطله از کارخانه باید بگونه‌ای باشد که مناسب‌ترین و نزدیک‌ترین محل به منظور به حداقل رساندن هزینه و اثرات نامطلوب، انتخاب شود.
- (۷) حداقل نمودن هزینه حمل و نقل

- ✓ بهترین روش مدیریت باطله‌های فرآوری، نصب پوششی بر روی آن می‌باشد. اهداف سیستم‌های پوشش به طور عام عبارتند از:
 - (۱) کنترل گرد و غبار
 - (۲) تثبیت شیمیایی باطله‌های مولد اسید از طریق کنترل میزان نفوذ اکسیژن در آنها
 - (۳) کنترل آلاینده‌ها (از طریق کنترل فرآیندهای فیلتراسیون)
 - (۴) کنترل رشد گیاهان پس از انجام فعالیت‌های معدنی
- ✓ استفاده از مواد قلیایی همچون آهک و ریختن آن بر روی دمپ باطله جهت خنثی‌سازی پساب اسیدی که یکی از کم هزینه‌ترین و راحت‌ترین راه‌کارهای متداول در کنترل پساب‌های اسیدی می‌باشد.
- ✓ بررسی حضور باکتری‌ها و تأثیر آنها در روند اکسیداسیون پیریت که مشابه چنین کاری در محل دمپ‌های باطله معدن سرچشمه در حال انجام است.
- ✓ گمانه‌زنی و نمونه‌برداری عمقی از محل آلودگی مشخص شده توسط نتایج مدل‌سازی ژئوفیزیکی.
- ✓ بررسی‌ها و پایش زیست‌محیطی با حفر پیزومترها در محدوده دمپ به منظور تعیین سرعت جریان آب زیرزمینی در منطقه جهت بررسی روند انتقال آلودگی در سیستم جریان آب زیرزمینی.
- ✓ انجام مطالعات سه بعدی ژئوالکتریک به صورت *Time Laps* برای مدت زمان ۱ سال و یا بیشتر تا نحوه حرکت و انتشار آلودگی به طور کامل مشخص گردد.
- ✓ جمع‌آوری اطلاعات مناسب جهت کالیبراسیون مدل ریاضی تا مقایسه با نتایج حاصل از روش ژئوفیزیکی به خوبی انجام گیرد.
- ✓ اندازه‌گیری درصد اکسیژن نفوذی در اعماق مختلف دمپ باطله به کمک دستگاه سنجش نفوذ اکسیژن در خاک^۱ به منظور بررسی بهتر روند اکسیداسیون پیریت و تعیین با آلودگی تولید شده.
- ✓ مدل‌سازی ریاضی با توجه به حضور باکتری‌های مؤثر در تولید پساب اسیدی

^۱ - Oxygen Diffusion meter

-
- ✓ استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و سینتیکی در دمپ باطله‌ها به منظور بررسی پتانسیل تولید پساب اسیدی.
 - ✓ تبدیل شیب دمپ باطله به حالت پله‌ای جهت جلوگیری از شکست یا ریزش دمپ با توجه به حضور زلزله‌های متعدد در منطقه.

فهرست منابع و مراجع فارسی

- اداره آب زیرزمینی دامغان. (۱۳۸۶). گزارش وضعیت آب منطقه مهماندوست و البرز شرقی
- آرشیو شرکت زغالسنگ البرز شرقی، ۸ اطلاعات مربوط به زغال شویی و آزمایشگاه کیفیت زغال، ۱۳۸۶
- اصانلو، م. (۱۳۷۸). مهندسی زغال سنگ، انتشارات ناقوس، چاپ اول،
- باقری ثانی، م. (۱۳۸۶). مطالعه پتانسیل تولید پساب اسیدی معدن در باطله‌های کارخانه فرآوری معادن زغال آزاد شهر - مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- جدیری شکری، ب. (۱۳۸۵). تلفیق مدل‌سازی ریاضی و مطالعات ژئوفیزیکی زیست‌محیطی مواد حاصل از شستشوی کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- دولتی ارده جانی، ف.، شفائی تنکابنی، س. ض.، میر حبیبی، ع. و بدیعی، خ.، (۱۳۸۳). بیوتکنولوژی، ژئوشیمی زیست محیطی و مدیریت پساب‌ها: جلد اول - پساب‌های معدنی، پژوهشکده صنایع رنگ ایران، چاپ دانشگاه صنعتی شاهرود،
- رضایی، ب.، (۱۳۸۰)، تکنولوژی زغال‌شویی، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، ص ۳۳۵-۳۴۶.
- سازمان زمین‌شناسی شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۰). نقشه زمین‌شناسی منطقه شاهرود
- سالنامه آماری هواشناسی ناشر سازمان هواشناسی کشور، (۱۳۸۶-۱۳۷۵). اداره کل آمار و فناوری اطلاعات
- عباس‌نژاد، ا.، (۱۳۸۰). بررسی و جمع‌بندی روش‌های مدیریت زهاب اسیدی، مجله محیط زیست، شماره ۳۸، ص ۴۸ - ۵۵

قادری، م.، (۱۳۸۲). قابلیت تولید پتانسیل زهاب اسیدی باطله های کارخانه زغالشویی البرز شرقی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

کلاگری، ع.، (۱۳۷۱). اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، انتشارات تابش، ۲۶۰-۱۵۵ ص

مرادزاده، ع. دولتی ارده جانی، ف. فلاح پیشه، س.، (۱۳۸۷)، مطالعه محدوده آلودگی ناشی از معدنکاری سرب و روی تاش با روش های ژئوفیزیکی VLF ، IP و مقاومت ویژه. سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۸۸-۲۸۳ ص.

مرادزاده، ع. (۱۳۸۴). اهمیت آنالیز مدل های هم ارز در مدل سازی داده های سونداژ الکتریکی. ارائه در دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. ۷۸-۷۴ ص

مؤسسه جغرافیایی ایران، (۱۳۸۰). اطلس راه های ایران، مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی و گیتاشناسی

نوروزی، غ. ر.، حسین زاده گویا، ن.، حاتمی، م. ر.، ۱۳۷۹، مطالعه کانسار هادی قلعه زری بیرجند با استفاده از روش الکترومغناطیس VLF . مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۲۶، شماره ۱، ۶۱-۷۰ ص.

یزدی، م.، ۱۳۸۱. روش های مرسوم در اکتشافات ژئوشیمیایی، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۵-۱۷

یزدی، م.، (۱۳۸۲)، زغال سنگ (از منشأ تا اثرات زیست محیطی)، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر، ص ۱۵۹-۵۷.

فهرست منابع و مراجع انگلیسی

- ABEM Interpretation Guide, (1989). *ABEM WADI VLF Interpretation*. p 1-36
- ABEM, (1999). *Instruction manual for Terameter SAS 1000*. ABEM Instrument AB 91.
- Benson A. K., Payne K. L., and Stubben M. A. (1997). *Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical method- A case study Geophysics*, Vol. 62, No.1, pp.80-86.
- Cathles, L.M. and Apps, J.A. (1975). *A model of the dump leaching process that incorporates oxygen balance, heat balance and air convection*. Metallurgical Transactions B. Volume 6B, pp.617-624.
- CHAM (2008), The PHOENICS On-Line Information System, http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/polis.htm
- Dahlin, T., Bernstone, C., (1997). *A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays*. Proceedings SAGEEP'97, Reno, Nevada, Vol. 2, pp. 927-935.
- Davis, G.B. and Ritchie, A.I.M. (1986). *A model of oxidation in pyritic mine wastes: part 1: Equations and approximate solution*. Applied Mathematical Modelling, 10 (5), pp.314-322.
- 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.
- Doulati Ardejani, F. (2003). *Hydrogeological Investigation of Backfilled Surface Coal Mine Sites*. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Australia, 435p.
- 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, 23p.
- Doulati Ardejani, F., Singh, R.N. (2004). *Two-Dimensional simulation of pyrite oxidation and pollutant transport in backfilled open cut coal mines*. International Mine Water Association Symposium, Proceedings of the Symposium: Mine Water 2004-Process, Policy and Progress, A.P. Jarvis, Dudgeon and P.L. Younger (Eds.), University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 19th – 23th September 2004, Volume 1, pp.121- 132.
- Doulati Ardejani, F., Shafaei, S. Z., Moradzadeh, A., Marandi, R., Kakaei, R. and Jodeiri Shokri, B. (2008). *Environmental problems related to pyrite oxidation from an*

active coal waste plant, Alborz Sharghi, Iran, 10th International Mine Water Association Congress, 2-5 June, 2008, Karloryvary, Czech Republic, pp. 239-242.

Elberling, B., Nicholson, R.V. and Scharer, J.M. (1994). *A combined kinetic and diffusion model for pyrite oxidation in tailings: a change in controls with time.* Journal of Hydrology, 157(1), pp.47-60.

Fahringer P., (2002), *Shallow EM investigations of AMD at an abandoned coal mine in northern west Virginia, the leading edge,* p 478- 481.

Frid, V., Liskevich, G., Doudkinski, D. and Korostishevsky, N. (2007). *Evaluation of landfill disposal boundary by means of electrical resistivity imaging.* , Environ Geol 49, pp. 839–853.

Hammack, R.W., Sams, J. I. Veloski, G. A., and Mabie J.S. (2003). *Geophysical Investigation of the Sulphur Bank Mercury Mine Superfund Site, Lake County, California,* Mine Water and the Environment 22, pp. 69–79.

Herber Jr., R.B. (1994). *Metal transport in groundwater contaminated by acid mine drainage.* Nordic Hydrology, 25, pp.193-212

Hutchinson P.J , and Barta L.S , (2002). *VLF surveying to delineate long wall mine-induced fractures* , The Hutchinson Group , Ltd. ,Murrysville , Pennsylvania , U.S.

Jaynes, D.B. (1983). *Atmosphere and temperature within a reclaimed coal-stripmine and a numerical simulation of acid mine drainage from stripmined lands.* Ph.D. dissertation, Pa. State Univ., University Park, pp.161-170

Jaynes, D.B., Rogowski, A.S. and Pionke, H.B., (1984). *Acid mine drainage from reclaimed coal strip mines, 1, Model description.* Water Resources Research, 20 (2), pp.233-242.

Kamkar Rouhani, A., (2001). *Developments in Resistivity Methods for Detection of Subsurface Pollution,* Proceedings of the 31st Congress of International Association of Hydrogeologists (IAH), pp.734-738.

Karous, M., and Hjelt., S. E., (1989), *Linear filtering of VLF dip angle measurements: Geophysic. Prosp.,* 39, 567-580.

Kleinmann. R. L. P., (2001). *Prediction of Water Quality at Surface Coal Mines.* The National Mine Land Reclamation Center, pp.73-129

Levenspiel, O. (1972). *Chemical Reaction Engineering,* John Wiley, New York, 578p

Loke M.H. and Barker R.D.,(1996). *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion.* Geophysical Prospecting, 44, 499-523.

Lock, M.H., (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, A practical guide to 2-D and 3-D surveys, p 1-58

Lock, M.H., (2001a). *Res3dinv ver.2.1*, Geotomo software, p 1-50

Loke M.H., (2001b), *RES3DINV - Rapid 3D Resistivity and IP Inversion using the least squares method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. : Computer software manual.* Geotomo Software, Malaysia

Loke M.H., (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.* www.geoelectrical.com, pp. 1-128

Mainali, G. (2006:07). *Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods.* Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, pp. 1-74.

Milson.J, (2002). *Field geophysics*, 3 Edition, Cambridge university press.

McNeill J.D., Labson V.F., (1975). *Geological Mapping using VLF Radio Fields , Electromagnetic methods in applied geophysics*, Edited by Nabighian M.N. ,Vol.2 , 1991 chapter7, society of exploration geophysics.p

Mitchell.P. (2000). *Prediction, Prevention Control, and Treatment of Acid Rock Drainage In: Environmental Policy in Mining Corporate Strategy and Planning for Clousure.* Edited by :Warhurst. A, Noronha. L, Chapter 7, p.p.117-144. Lewies publishers.

Moony, H.m., (1980), *Handbook of engineering geophysics*, volume 2, first edition, Bison instruments, inc. and Minneapolis, Minnesota, p.1-31

Norris, Charles H., (2005), *Water Quality Impacts from Remediating Acid Mine Drainage with Alkaline Addition*, pp. 1-28

Nowaczyk, K., Domka, F., (2000). *Oxidation of Pyrite and Marcasite by Thiobacillus ferrooxidans Bacteria*, Polish Journal of Environmental Studies Vol. 9, No. 2, pp.87-90.

Oldenburg, D. W. (1996). *DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems: results from the Copper Cliff mine tailings impoundments*, Journal of Applied Geophysics 34, p 187-198

Pellerin L., (2002). *Applications of Electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations* Surveys in Geophysics 23, pp. 101-132.

Pugh, C.E., Hossner, L. R., Dixon, J. B. (1984). *Oxidation rate of iron sulfides as affected by surface area, morphology, oxygen concentration, and autotrophic bacteria.* Soil Science, v. 137, No. 50

Ramag instruction manual, (2002). *VLF survey planning and interpretation software*, pp 1-18.

Reynolds, J. M., (1997), *An introduction to applied and environmental geophysics*: John Willey and Sons.

Rogowski, A.S., Pionke, H.B., and Broyan, J.G. (1977). *Modelling the impact of strip mining and reclamation processes on quality and quantity of water in mined areas: A review*. Journal of Environmental Quality, 6 (3), pp.237-244

Senatra, D., Perego, A., and Giubilaro, G., (1978). *Biological Effects of Low-Level, Very Low-Frequency (VLF) Electric Fields on the Blood Sedimentation Rate*. Int. J. Biometeor. 1978, vol. 22, number 1, pp. 59-66.

Singh, R.N., Doulati Ardejani, F. (2003). *Evaluation of factors affecting pyrite oxidation and subsequent pollutant generation in backfilled open cut coal mines*. 8th International Congress on Mine Water and the Environment, Johannesburg, South Africa, 19th – 22nd October 2003, pp.173-186.

Singh, R.N., Doulati Ardejani, F. (2004). *Finite volume discretisation for solving acid mine drainage problems*. Archives of Mining Science, 49 (4), pp. 531-556.

Soupios, P, Papadopoulos, I., Kouli, M., Georgaki, I., Vallianatos, F. and Kokkinou, E. (2006). *Investigation of waste disposal areas using electrical methods: a case study from Chania, Crete, Greece*, Environ Geol 51, pp. 1249–1261.

Stoyer, C., Zerilli, A. and Wilson, G., (1993). *ResixIp user's manual for resistivity and induced polarization data interpretation software*. Interpex Ltd.

Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E., (1998), *Applied geophysics*, second edition, Cambridge university press, p 45-47 and 522-560.

Tiwary, R. K., (2001). *Environmental impact of coal mining on water regime and its management* Water, Air, and Soil Pollution 132, pp. 185–199.

Todd, D. K. (1980). *Ground water hydrology*, Second edition, John Wiley and Sons. Inc 535 pp.

U.S. Environmental Protection Agency. (1994). *Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction*, EPA 730-R-94-036. Office of Solid Waste, Special Waste Branch, Washington D. C., December 1994.

U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Bioremediation of Acid Mine Drainage Using Sulfate-Reducing Bacteria*, Washington D. C., August 2006, pp. 1-65.

www.slicerdicer.com