





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری اکتشاف مواد معدنی

ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی باطله‌های سرب و روی سولفیدی - کربناتی و تعیین منشأ آن

نگارنده: مهدی زارع

اساتید راهنما:

دکتر علی مرادزاده

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور:

دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی

بهمن ۱۳۹۸

شماره: ۹۳۰۰۶۹۵
تاریخ: ۹۸/۱۲/۱۴
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای مهدی زارع دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن - اکتشاف به شماره دانشجویی ۹۳۰۰۶۹۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۲۷ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی باطله های سرب و روی سولفیدی-کربناتی و تعیین منشأ آن دفاع و با اخذ نمره ۱۹ به درجه عالی نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) مردود: کمتر از ۱۵

ردیف	هیئت داوران	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر علی مرادزاده	استاد راهنما	استاد	
۲	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	استاد راهنما	دانشیار	
۳	دکتر فرامرز دولتی ارده جانی	استاد مشاور	استاد	
۴	دکتر مهرداد سلیمانی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	
۵	دکتر امیررضا آزاد مهر	داور خارجی	دانشیار	
۶	دکتر علیرضا عرب امیری	داور داخلی	دانشیار	
۶۷	دکتر کیومرث سیف پناهی	داور داخلی	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای مهدی زارع بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطائی
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم بہ پسر م

کہ حس بودنت فہنکترین حس دنیا است

مشکر و قدردانی

پروردگار را سپاسگزارم، که بار دیگر به من فرصت آموختن داد تا بتوانی مضاعف، گام‌هایی هر چند کوتاه ولی استوار در جهت پیشبرد علوم که گذری است در راستای تعالی بشیریت، بردارم.

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از زحمات و مساعدت‌های بی‌دریغ اساتید بزرگوارم جناب آقایان پروردگاری علی مرادزاده و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی، که با دانش و مینش خویش، مسیر انجام این تحقیق را برای بنده هموار نمودند، مشکر و قدردانی نمایم. همچنین از استاد برجسته پروردگاری فرامرز دولتی ارده‌جانی، که در کمال سعصدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ‌لکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت مشاوره این رساله را بر عهده گرفتند، کمال مشکر و قدردانی را دارم.

این پژوهش با حمایت‌های مادی و معنوی "سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران" و "مجمع سرب و روی انگوران" انجام شده است. بدین وسیله، مراتب مشکر و قدردانی خود را از مدیریت محترم مجمع سرب و روی انگوران، جناب آقای مهندس فلاح و تمامی پرسنل زحمکش آن مجمع، به ویژه سرکار خانم مهندس قدیمی که نقش به‌سنجی در پیشبرد این پژوهش داشتند، ابراز می‌نمایم. در پایان از کلیه عزیزانی که بنده را در مراحل انجام عملیات صحرایی ژئوفیزیکی و آزمایشگاهی کمک و یاری نمودند، مراتب سپاسگزاری را ابراز می‌نمایم.

مدی زارع

بمهر ماه ۱۳۹۸

تعمدنامه

اینجانب مهدی زارع دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله دکتری تحت عنوان "ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی باطله‌های سرب و روی سولفیدی و کربناتی و تعیین منشأ آن" متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

مشکلات زیست‌محیطی ناشی از باطله‌های معدنی، همواره به عنوان یکی از موضوعات با اهمیت در اکثر کشورها مطرح است. شاید بدترین مشکل زیست‌محیطی در ارتباط با باطله‌های معدنی، تشکیل زهاب‌های معدنی بصورت اسیدی تا قلیایی و انتقال فلزات سمی به آب و خاک باشد. اکثر مطالعات انجام شده به بررسی آلودگی ناشی از باطله‌های معادن سولفیدی پرداخته‌اند و نحوه توزیع و شدت آلودگی عناصر آلاینده در محیط‌های اطراف این باطله‌ها (خاک و آب) ارزیابی شده است. در این مطالعات، منابع اصلی تولید آلودگی هم‌چون دمپ‌های باطله معدنی را که از نوع تیپ سولفیدی-کربناتی است، کمتر مورد توجه قرار داده است. بنابراین اولین گام در کاهش ریسک و مدیریت صحیح از این نوع باطله‌ها، درک صحیح و دانش کافی از رفتار زیست‌محیطی آنهاست. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی در باطله‌های سرب و روی تیپ سولفیدی با میزبان کربناتی در معدن انگوران می‌باشد. ترکیبی از روش‌های ژئوشیمیایی، آزمایشگاهی، کانی‌شناسی و مطالعات ژئوفیزیکی در این تحقیق این اجازه را داد که یک توصیف جامع از خصوصیات ژئوزیست‌محیطی این نوع دمپ‌های باطله به دست آید. در این راستا، به منظور انجام تحقیق، تعداد ۵۲ نمونه از عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری بخش‌های مختلف دمپ باطله سرب و روی انگوران برداشت شد و غلظت فلزات سنگین با استفاده از روش (ICP-MS) مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج ژئوشیمیایی توسط شاخص‌های درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک از دمپ باطله‌های سرب و روی انگوران حاکی از این است که این نوع باطله‌ها، حاوی مقادیر قابل توجهی فلزات سمی از جمله آرسنیک، کبالت، کروم، نیکل، سرب و روی است، که میانگین هر یک از این عناصر از حد مجاز در محیط‌زیست تجاوز کرده است. الگوی به دست آمده از پهنه‌بندی ریسک آلودگی، بخش شمال‌شرقی و جنوب‌غربی از محدوده دمپ باطله مورد مطالعه را به عنوان ریسک آلودگی خیلی زیاد نشان داد، که عناصر As و Cd بیشترین سهم در این آلودگی را دارند. در این تحقیق، روشی کاربردی برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی ریسک آلودگی عناصر سمی در دمپ‌های باطله با استفاده از روش آنالیز تمایز ارائه شد. نتایج نشان داد که عناصر As، Pb و Zn به عنوان مهمترین عواملی هستند که می‌توان

دمپ‌های باطله را بر اساس سطح آلودگی، تفکیک و طبقه‌بندی کرد. این روش می‌تواند ابزار مفید، سریع و مقرون به صرفه برای پایش و برنامه‌های احیاء و بازسازی دمپ‌های باطله در آینده باشد. نتایج آزمایش استاتیکی اسید- باز اصلاح شده نشان داد که دمپ باطله‌ها پتانسیل بالایی در خنثی‌سازی اسید دارند. در این تحقیق، رویکرد کانی‌شناسی به منظور پیش‌بینی پتانسیل تولید آلودگی و تعیین منشأ خنثی‌کننده آلودگی ارائه شد و نتایج این رویکرد با نتایج آزمایش استاتیکی مقایسه شد. نتایج مقایسه‌ای نشان داد که کانی کلسیت به عنوان منبع اصلی خنثی‌سازی است و رویکرد کانی‌شناسی در ارزیابی پتانسیل خنثی‌سازی آلودگی، نتایج مطلوبی می‌دهد. این رویکرد در مقایسه با روش استاتیکی، روشی سریع و ساده‌تر است. مطالعات کانی‌شناسی با مقاطع میکروسکوپی و XRD، کلسیت را به عنوان فاکتور اصلی در خنثی‌سازی اسید و نتایج آنالیز SEM پیریت را به عنوان منبع اصلی در تولید زهاب اسیدی در باطله‌های معدنی نشان داد. نتایج EPMA از کانی‌های سولفیدی نشان داد، اسفالریت به عنوان مهم‌ترین کانی حامل برخی فلزات سمی می‌باشد. نتایج ژئوفیزیکی به روش‌های VLF، مغناطیس‌سنجی و ژئوالکتریک بر روی دمپ باطله نشان داد که، افزایش خاصیت مغناطیسی و کاهش مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در بخش‌هایی از دمپ باطله، احتمالاً ناشی از لیچینگ نفوذی در اثر اکسایش باطله‌ها و تشکیل زهاب با خاصیت قلیایی است که می‌تواند حاوی یون‌های اصلی و فلزی محلول باشد. نتایج آنالیز و گونه‌پذیری از نمونه‌های آب محدوده مورد مطالعه، این مورد را تأیید کرد و مهم‌ترین عوامل مؤثر در خاصیت رسانایی الکتریکی (EC) زهاب خروجی از دمپ باطله‌های سرب و روی انگوران را، افزایش غلظت یون‌های فلزی، کمپلکس‌های فلزی آنیونی، SO_4^{2-} ، Na^+ و TDS نشان داد که می‌تواند دلیل شاخصی در افزایش خاصیت رسانندگی به دست آمده از نتایج ژئوفیزیکی باشد. اگرچه یافته‌های محققین نشان می‌دهد که خاصیت رسانندگی منحصر به زهاب اسیدی است ولی در این تحقیق این نتیجه حاصل شد که زهاب قلیایی هم می‌تواند به صورت زون‌های رسانا در نتایج ژئوفیزیکی نیز قابل شناسایی باشد.

کلمات کلیدی: دمپ باطله، پتانسیل آلودگی، زهاب اسیدی و قلیایی، فلزات سنگین، آنالیز تمایز، آزمایش استاتیکی اسید- باز اصلاح شده، روشهای ژئوفیزیکی، سرب و روی انگوران.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

مقالات علمی پژوهشی

- ✓ رده‌بندی داده های ژئوشیمی زیست‌محیطی به روش آنالیز تمایز و شبکه عصبی در باطله‌های سرب و روی تیپ سولفیدی-کربناتی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن
- ✓ بررسی آزمایشگاهی با روش ABA اصلاح شده جهت ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی از باطله-های ذخایر سولفیدی بامیزبان کربناته و مقایسه نتایج با رویکرد کانی‌شناسی، نشریه زمین شناسی مهندسی خوارزمی

مقالات کنفرانسی

- ✓ مطالعات کانی‌شناسی به منظور ارزیابی زیست‌محیطی دمپ‌های باطله سرب و روی، یازدهمین کنفرانس زمین‌شناسی اقتصادی ایران (ISC)، دانشگاه چمران، آذر ۱۳۹۸
- ✓ کاربرد مدل‌های ژئوزیست‌محیطی در شناخت مشکلات ناشی از معادن، یازدهمین کنفرانس زمین‌شناسی اقتصادی ایران (ISC)، دانشگاه چمران، آذر ۱۳۹۸
- ✓ پهنه‌بندی و ارزیابی ریسک آلودگی در باطله‌های سرب و روی تیپ سولفیدی-کربناتی، سی و هشتمین گردهمایی علوم زمین (ISC)، ۱۰ و ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۸
- ✓ پیش‌بینی پتانسیل آلودگی از باطله‌های ذخایر تیپ سولفیدی-کربناتی با روش استاتیک، سی و هشتمین گردهمایی علوم زمین (ISC)، ۱۰ و ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۸

فهرست مطالب

ش	فهرست جداول
ص	فهرست اشکال
۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- باطله‌های معدنی
۳	۳-۱- مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دمپ باطله‌های معدنی
۵	۱-۳-۱- تشکیل زهاب معدنی
۸	۲-۳-۱- آلودگی فلزات سنگین
۱۰	۴-۱- پیشینه تحقیقات زیست‌محیطی بر روی باطله‌های معدنی
۲۵	۵-۱- تعریف مساله و بیان سؤالات اصلی تحقیق
۲۶	۶-۱- اهداف مطالعه
۲۷	۷-۱- روش انجام تحقیق
۲۹	۸-۱- ساختار رساله
۳۱	فصل دوم: ارزیابی خصوصیات ژئوزیست‌محیطی باطله‌های معدنی
۳۲	۱-۲- مقدمه
۳۲	۲-۲- مدل های ژئوزیست‌محیطی
۳۴	۳-۲- روش‌های ارزیابی مشخصات ژئوزیست‌محیطی دمپ‌های باطله
۳۴	۱-۳-۲- مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی
۳۵	۲-۳-۲-۱- شاخص درجه آلودگی اصلاح شده
۳۷	۲-۳-۲-۲- شاخص ریسک اکولوژیک
۳۸	۲-۳-۲-۳- آنالیز تمایز
۴۱	۲-۳-۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی
۴۱	۲-۳-۲-۱- آزمایش استاتیکی
۴۴	۲-۳-۲-۳- آنالیزهای کانی‌شناسی
۴۵	۲-۳-۲-۴- مطالعات ژئوفیزیک زیست‌محیطی
۴۸	۲-۴- جمع‌بندی
۵۱	فصل سوم: موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه
۵۲	۱-۳- مقدمه
۵۲	۲-۳- ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی در ایران
۵۳	۳-۳- الگوی تشکیل و نحوه کانی‌زایی ذخایر سولفیدی- کربناتی

۵۸	۴-۳- معدن سرب و روی انگوران.....
۵۸	۳-۴-۱- موقعیت جغرافیایی معدن.....
۵۹	۳-۴-۲- زمین‌شناسی، مدل ژنتیکی و کانی‌زایی.....
۶۲	۳-۴-۳- هیدروژئولوژی و هیدرولوژی منطقه.....
۶۳	۳-۴-۴- دمپ‌های باطله معدن سرب و روی انگوران.....
۶۵	۳-۴-۵- تحقیقات زیست‌محیطی انجام شده در منطقه.....
۶۷	۳-۴-۶- انتخاب محدوده مورد مطالعه.....
۶۷	۳-۵- جمع‌بندی.....
۶۹	فصل چهارم: مواد و روش‌ها.....
۷۰	۴-۱- مقدمه.....
۷۰	۴-۲- نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها.....
۷۲	۴-۳- آنالیز ژئوشیمیایی.....
۷۳	۴-۴- تست آزمایشگاهی.....
۷۳	۴-۴-۱- اندازه‌گیری pH.....
۷۴	۴-۴-۲- آزمایش ABA اصلاح شده.....
۷۶	۴-۵- شناسایی ترکیبات کانی‌شناسی.....
۷۷	۴-۶- برداشت‌های ژئوفیزیکی.....
۸۱	۴-۷- جمع‌بندی.....
۸۳	فصل پنجم: ارائه داده‌ها و تحلیل نتایج.....
۸۴	۵-۱- مقدمه.....
۸۴	۵-۲- نتایج آماری.....
۸۹	۵-۳- ارزیابی و پهنه‌بندی ریسک آلودگی عناصر سمی.....
۹۰	۵-۳-۱- نتایج شاخص درجه آلودگی اصلاح شده.....
۹۰	۵-۳-۲- نتایج شاخص ریسک اکولوژیک.....
۹۵	۵-۴- طبقه‌بندی ریسک آلودگی عناصر سمی با روش آنالیز تمایز.....
۹۹	۵-۴-۱- کاربرد آنالیز تمایز در نمونه‌های جدید.....
۱۰۰	۵-۵- نتایج آزمایشگاهی.....
۱۰۰	۵-۵-۱- نتایج آزمایش PH و EC.....
۱۰۰	۵-۵-۲- نتایج آزمایش ABA اصلاح شده.....
۱۰۴	۵-۶- تلفیق رویکرد کانی‌شناسی با نتایج آزمایشگاهی.....
۱۰۸	۵-۷- نتایج کانی‌شناسی.....
۱۰۸	۵-۷-۱- نتایج مقاطع صیقلی- نازک.....

۱۱۰	۵-۷-۲- نتایج XRD
۱۱۲	۵-۷-۳- نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM)
۱۱۶	۵-۷-۴- نتایج آنالیز میکروپروپ الکترونی (EPMA)
۱۲۰	۵-۸-۸- مدل سازی و تفسیر یافته‌های ژئوفیزیکی
۱۲۰	۵-۸-۱- داده‌های VLF
۱۲۴	۵-۸-۲- داده‌های مغناطیس‌سنجی
۱۲۶	۵-۸-۳- داده‌های ژئوالکتریک
۱۳۹	۵-۹- مدل ژئویست محیطی از رفتار باطله‌های انگوران
۱۴۷	۵-۱۰- جمع‌بندی
۱۵۱	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۵۲	۶-۱- نتیجه‌گیری
۱۵۸	۶-۲- نوآوری تحقیق
۱۵۸	۶-۳- پیشنهادات
۱۵۹	پیوست (الف)
۱۶۰	الف-۱- نمودارهای هیستوگرام و احتمال نرمال شده عناصر مورد مطالعه
۱۶۴	الف-۲- نتایج خروجی روش آنالیز تمایز
۱۶۷	منابع

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- عوامل مؤثر در تولید آلودگی در باطله های معدنی و باطله های کانه آرایبی ۵
- جدول ۱-۲- برخی کانی های تولید یا خنثی کننده اسید ۸
- جدول ۱-۳- خلاصه ای از تحقیقات انجام شده در ارتباط با ارزیابی آلودگی معادن و باطله های معدنی ۲۲
- جدول ۱-۲- رده های متفاوت آلودگی براساس شاخص درجه آلودگی اصلاح شده ۳۷
- جدول ۲-۲- فاکتور سمیت فلزات سنگین ۳۸
- جدول ۳-۲- طبقه بندی مقادیر شاخص پتانسیل ریسک زیست محیطی (RI) ۳۸
- جدول ۱-۳- ویژگی های اصلی مهمترین ذخایر سرب - روی با میزبان رسوبی در ایران ۵۷
- جدول ۱-۴- فهرست عناصر آنالیز شده و حد تشخیص دستگاه ICP-MS (ppm) ۷۳
- جدول ۲-۴- حجم و نرمالیت HCl مورد استفاده بر اساس نرخ فیز ۷۴
- جدول ۱-۵- نتایج آنالیز ICP-MS و موقعیت جغرافیایی نمونه های باطله (غلظت عناصر به ppm است) ۸۶
- جدول ۲-۵- خلاصه ای از پارامترهای آماری فلزات مورد مطالعه و مقایسه با حداکثر غلظت مجاز استاندارد (ppm) در محیط زیست ۸۸
- جدول ۳-۵- نتایج شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)، شاخص ریسک اکولوژیک (RI) و پتانسیل ریسک اکولوژیک فلزات سنگین (Eri) در محدوده مورد مطالعه ۹۱
- جدول ۴-۵- طبقه بندی اصلاح شده مقادیر شاخص ریسک اکولوژیک (RI) ۹۲
- جدول ۵-۵- کد اختصاص داده شده به هر یک از طبقات ۹۶
- جدول ۶-۵- نتایج طبقه بندی نمونه ها با روش آنالیز تمایز ۹۸
- جدول ۷-۵- نتایج مقایسه ای آنالیز تمایز و شاخص ریسک اکولوژیک (RI) برای نمونه های جدید ۱۰۰
- جدول ۸-۵- نتایج آنالیز شیمیایی و تست استاتیکی با روش ABA اصلاح شده ۱۰۱
- جدول ۹-۵- پارامترهای مورد استفاده جهت محاسبه NP در رویکرد کانی شناسی، w وزن مولکولی؛ c تعداد کاتیون غیر اکسیدی؛ n تعداد مول مورد نیاز برای خنثی کردن یک مول اسید سولفوریک تولید شده ۱۰۵
- جدول ۱۰-۵- نتایج آنالیز XRD نمونه های باطله (مقادیر به درصد) ۱۱۲
- جدول ۱۱-۵- نتایج آنالیز میکروپروپ الکترونی از نمونه های باطله (مقادیر به درصد وزنی) ۱۱۹
- جدول ۱۲-۵- پارامترهای هیدروشیمیایی نمونه های آبی از محدوده مورد مطالعه (واحد mg/L می باشد) ۱۴۲
- جدول ۱۳-۵- غلظت فلزات حل شده در نمونه های آب از محدوده مورد مطالعه (واحد mg/L می باشد) ۱۴۵
- جدول الف-۱- مقادیر واریانس و همبستگی محاسبه شده جهت ارزیابی عملکرد هر یک از توابع تمایز ۱۶۴
- جدول الف-۲- مقدار ضریب لامبدای ویلکس هر یک از توابع محاسبه شده در روش آنالیز تمایز ۱۶۵
- جدول الف-۳- مختصات مرکز گروه های طبقه بندی شده در روش آنالیز تمایز ۱۶۵
- جدول الف-۴- ضرایب توابع بدست آمده از روش آنالیز تمایز ۱۶۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱-الف) فرآیند تولید انواع باطله معدنی (ب) شمائی از یک معدن روباز و باطله‌های معدنی..... ۳
- شکل ۱-۲-الف) بارگیری باطله، (ب) دمپ باطله..... ۴
- شکل ۱-۳-مدل مفهومی از ساختار داخلی دمپ باطله معدنی..... ۴
- شکل ۱-۴-نمونه‌ای از زهاب اسیدی ناشی از باطله‌های فرآوری معدن سرب و روی در جنوب مادرید..... ۶
- شکل ۱-۵-طبقه‌بندی زهاب معدنی به صورت تابعی از غلظت سولفات..... ۷
- شکل ۱-۶-مکانیزم تولید زهاب اسیدی/قلیایی از باطله‌های معدنی..... ۸
- شکل ۱-۷-طبقه‌بندی زهاب معدنی به صورت تابعی از غلظت فلزات حل شده..... ۱۰
- شکل ۱-۸-ارتباط نتایج بدست آمده از روش تولید اسید خالص (NAG) و پتانسیل تولید اسید خالص (NAPP) بدست آمده از آزمایش استاتیکی ABA..... ۱۱
- شکل ۱-۹-موقعیت نمونه‌های برداشت شده و نقشه توزیع پراکندگی فلزات سنگین در محدوده معدنکاری سرب و روی در اسپانیا (a) سرب، (b) روی، (c) کادمیوم و (d) مس..... ۱۳
- شکل ۱-۱۰-توزیع غلظت عناصر سنگین نسبت به عمق در نمونه عمقی از سد باطله لانا یا..... ۱۶
- شکل ۱-۱۱-مکان قرارگیری پروفیل ژئوالکتریک نسبت به سد باطله مس لانا، (b) مدلسازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه و نحوه نفوذ زهاب اسیدی در میان باطله‌ها..... ۱۷
- شکل ۱-۱۲-الف) موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک بر روی دمپ باطله‌های سولفیدی آهن ریومارینو، (ب) نتایج مدل‌سازی دوبعدی داده‌های ژئوالکتریک..... ۱۸
- شکل ۱-۱۳-فلوچارت مراحل انجام تحقیق..... ۲۸
- شکل ۱-۲-تغییرات مجموع غلظت فلزات سنگین در برابر pH در زهاب انواع ذخایر معدنی مختلف..... ۳۶
- شکل ۲-۲-مدل مفهومی آنالیز تمایز..... ۳۹
- شکل ۲-۳-الف) بیشینه‌سازی جدایش بین دو گروه (ب) توزیع امتیازات تمایز در امتداد محورها، که بیشترین جدایش بین دو گروه در امتداد محور جدید (تابع تمایز) حاصل شده است..... ۴۱
- شکل ۲-۴-توزیع اجزاء محلول در سیستم بسته کربناتی آبدار به صورت تابعی از pH..... ۴۳
- شکل ۲-۵-نقش بعضی از یون‌ها در رسانایی آب زیرزمینی..... ۴۶
- شکل ۲-۶-رفتار انحلال برخی هیدروکسیدهای فلزی نسبت به شرایط pH..... ۴۷
- شکل ۳-۱-نقشه توزیع کانسارهای سرب-روی با میزبان رسوبی در ایران..... ۵۳
- شکل ۳-۲-مدل مفهومی از نحوه کانی‌زایی سرب و روی سولفیدی با میزبان کربناتی..... ۵۵
- شکل ۳-۳-توسعه ذخایر سولفیدی-کربناته در ایران در طول تکامل زمین‌شناسی..... ۵۶
- شکل ۳-۴-موقعیت جغرافیایی و نمایی از معدن روباز انگوران..... ۵۸
- شکل ۳-۵-نقشه زمین‌شناسی معدن انگوران به همراه مقطع عرضی A-B-C از ذخیره..... ۶۰
- شکل ۳-۶-مقاطع عرضی زمین‌شناسی در جهت الف) شمال-جنوب و ب) شرق-غرب از ذخیره انگوران..... ۶۰

- شکل ۳-۷- تصویر ماهواره‌های از حوضه‌های زهکشی مشرف بر معدن سرب و روی انگوران..... ۶۳
- شکل ۳-۸- نمونه‌ای از رسوب‌گذاری اکسید آهن در منطقه روستای قلعه جوق..... ۶۳
- شکل ۳-۹- دمپ‌های باطله از نماهای مختلف و مشکلات زیست‌محیطی در ارتباط با آنها..... ۶۴
- شکل ۳-۱۰- گسترش و پیشروی دمپ‌های باطله در اطراف پیت معدن مربوط به سال‌های الف (۱۳۸۸، ب) ۱۳۹۰، ج) ۱۳۹۸..... ۶۵
- شکل ۴-۱- موقعیت مکانی نمونه‌های برداشت شده از باطله‌های معدنی..... ۷۱
- شکل ۴-۲- فلوجارت مراحل آماده‌سازی نمونه‌های باطله..... ۷۲
- شکل ۴-۳- انجام تست‌های آزمایشگاهی الف) شیکر جهت بهم زدن محلول برای مدت ۲۴ ساعت، ب) جدا کردن بخش محلول از جامد توسط کاغذ صافی، ج) تیتراسیون معکوس تا رسیدن به $pH=۸/۳$ ، د) ترازو دیجیتالی برای وزن کردن نمونه‌ها، ر) اندازه‌گیری pH و EC نمونه‌ها..... ۷۶
- شکل ۴-۴- موقعیت مکانی برداشت‌های ژئوفیزیکی بر روی دمپ باطله مورد مطالعه..... ۷۹
- شکل ۴-۵- عملیات صحرائی ژئوفیزیک، الف) تعیین محل نقاط اندازه‌گیری و محدوده شبکه برداشت، ب) اندازه‌گیری داده‌های VLF و مغناطیس، ج) برداشت پروفیل‌های IP/Res، د) نمایی از شبکه برداشت ژئوالکتریک ۸۰
- شکل ۴-۶- الف) تجهیزات مورد استفاده در برداشت ژئوالکتریک و ب) دستگاه مغناطیس‌سنج و VLF..... ۸۰
- شکل ۵-۱- نتایج بررسی نرمال بودن عنصر Cd، الف) و ب) نمودار توزیع فراوانی و نمودار احتمال قبل از نرمال سازی، ج) و د) نتایج نرمال‌سازی پس از تبدیل لگاریتمی..... ۸۵
- شکل ۵-۲- نتایج آنالیز خوشه‌ای نمونه‌های دمپ باطله معدن سرب و روی انگوران..... ۸۹
- شکل ۵-۳- پهنه‌بندی ریسک آلودگی براساس نتایج الف) شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)، ب) شاخص ریسک اکولوژیک (RI)..... ۹۳
- شکل ۵-۴- میانگین سهم فلزات مورد مطالعه در تعیین شاخص ریسک اکولوژیک..... ۹۴
- شکل ۵-۵- نتایج آنالیز تمایز، الف) موقعیت نمونه‌ها در گروه‌های طبقه‌بندی شده. ب) طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس امتیازات محاسبه شده در آنالیز تمایز..... ۹۷
- شکل ۵-۶- موقعیت نمونه‌های جدید در گروه‌های طبقه‌بندی شده در حالت دو و سه بعدی..... ۹۹
- شکل ۵-۷- نقشه کلاسه‌بندی دمپ باطله مورد مطالعه از نظر پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP)..... ۱۰۳
- شکل ۵-۸- ارتباط بین NP کانی‌شناسی با درصد Ca+Mg برای گونه‌های کربناتی مختلف..... ۱۰۶
- شکل ۵-۹- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج رویکرد کانی‌شناسی برای هر یک از کانی‌های کلسیت، دولومیت و منیزیت..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۰- مقایسه NP حاصل از رویکرد کانی‌شناسی در برابر مقادیر NP اندازه‌گیری شده..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۱- کلسیت (Cal)، کوارتز (Qtz)، کلریت (Chl)، کانی‌های رسی (Cly) و مواد آلی (Om) به صورت سیمان و ماتریکس در نمونه حضور دارند و به صورت یک لایه‌بندی ظریف در مقاطع دیده می‌شوند. الف) نمونه سنگ S1۲ ب) نمونه سنگ S1۹..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۲- حضور رگچه‌های اسمیت‌زونیت (Smt) در همی‌مورفیت (Hmp) در نمونه‌های سنگ الف) نمونه S2۵ ب) S2۹..... ۱۰۹

شکل ۵-۱۳- الف) پیریت (Py) و اسفالریت (Sp) در زمینه کلسیت و کوارتز در نمونه سنگ S۳۲، ب) بلورهای کشیده میلریت (Mir) در نمونه سنگ S۴۱..... ۱۱۰

شکل ۵-۱۴- الف) ادخال گالن (Ga) در همی مورفیت (Hmp) در نمونه سنگ S۴۵، ب) بلور پیریت (Py) با زمینه کلسیت در در نمونه سنگ S۴۹..... ۱۱۰

شکل ۵-۱۵- طیف‌های XRD به همراه کانی‌های شناسایی شده برای نمونه الف (S۱۵، ب) S۳۰، ج) S۴۲ و د) S۵۲..... ۱۱۱

شکل ۵-۱۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از آنالیز SEM به همراه نمودار طیف‌سنجی (EDS) از کانی‌های مهم سولفیدی و کانی‌های زمینه..... ۱۱۵

شکل ۵-۱۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) از کانی‌های مهم سولفیدی باطله‌های سرب و روی انگوران، که تجزیه نقطه ای با آنالیز EPMA بر روی آنها انجام شده است..... ۱۱۶

شکل ۵-۱۸- نتایج فیلتر فریزر روی داده‌های VLF دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران..... ۱۲۰

شکل ۵-۱۹- نمایش سه‌بعدی شبه مقاطع چگالی جریان به دست آمده از فیلتر کاروس- هجالت..... ۱۲۳

شکل ۵-۲۰- الف) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی از دمپ باطله‌های سرب و روی انگوران، ب) نقشه سیگنال تحلیلی، ج) نقشه روند سطحی، د) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۵ متر، ر) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۱۰ متر، ز) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۱۵ متر، و) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۳۰ متر، ی) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۶۰ متر..... ۱۲۷

شکل ۵-۲۱- نمایش سه‌بعدی از نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه برای پروفیل‌های P۱، P۳، P۵ و P۷ روی دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران..... ۱۲۹

شکل ۵-۲۲- نمایش سه‌بعدی از نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های IP پروفیل‌های P۱، P۳، P۵ و P۷ روی دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران..... ۱۳۰

شکل ۵-۲۳- نمونه‌ای از ترک و شکستگی‌های ایجاد شده در ساختار دمپ باطله‌های معدن انگوران..... ۱۳۳

شکل ۵-۲۴- الف) مدل ایجاد شده در مدل‌سازی وارون سه‌بعدی ب) نمای کلی از مش‌بندی و رابطه بین گره‌ها، خطوط مش‌بندی و بلوک‌ها..... ۱۳۴

شکل ۵-۲۵- مقاطع افقی حاصل از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های الف) مقاومت ویژه و ب) پلاریزاسیون القائی (IP) در محل دمپ باطله‌های سرب و روی معدن انگوران..... ۱۳۷

شکل ۵-۲۶- مقاطع قائم در جهت x حاصل از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های الف) مقاومت ویژه و ب) پلاریزاسیون القائی (IP) در محل دمپ باطله‌های سرب و روی معدن انگوران..... ۱۳۸

شکل ۵-۲۷- موقعیت مکانی نمونه‌های آب برداشت شده در اطراف دمپ باطله معدن انگوران..... ۱۴۰

شکل ۵-۲۸- الف و ب) تأثیر یون‌های فلزی محلول و جامدات محلول (TDS) بر خاصیت رسانایی (EC) نمونه‌های آب، ج) غلظت آنیون و کاتیون‌های موجود در نمونه زهاب خروجی از دمپ باطله معدن انگوران..... ۱۴۴

شکل ۵-۲۹- مدل ژئوزیست‌محیطی از زهاب و باطله‌های معدن سرب و روی انگوران..... ۱۴۷

شکل ۶-۱- مدل کلی از ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی باطله‌های سرب و روی سولفیدی با سنگ میزبان کربناته..... ۱۵۷

- شکل الف-۱- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر آلومینیوم بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۰
- شکل الف-۲- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر آرسنیک بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۰
- شکل الف-۳- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر کادمیوم بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۱
- شکل الف-۴- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر کبالت بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۱
- شکل الف-۵- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر کروم بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۱
- شکل الف-۶- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر مس بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۲
- شکل الف-۷- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر آهن از تبدیل لگاریتمی ۱۶۲
- شکل الف-۸- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر منگنز بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۲
- شکل الف-۹- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر مولیبدن بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۳
- شکل الف-۱۰- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر نیکل بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۳
- شکل الف-۱۱- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر سرب بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۳
- شکل الف-۱۲- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر سلنیوم بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۴
- شکل الف-۱۳- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر روی بعد از تبدیل لگاریتمی ۱۶۴

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه

آلودگی زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های معدنی، کانه‌آرایی و ذوب فلزات امروزه به عنوان یک نگرانی و مسئله جهانی در میان محققین و دولت‌مردان بسیاری از نقاط جهان شده است. این فعالیت‌ها علاوه بر نابودی پوشش گیاهی و فرسایش زمین‌های کشاورزی، باعث رها سازی فلزات سنگین به شکل گاز، ذرات معلق، زهاب اسیدی یا دمپ‌های باطله به محیط‌های اطراف خود می‌شود [Dudka et al, 1997; Yang et al, 2009].

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.

۱-۲- باطله‌های معدنی

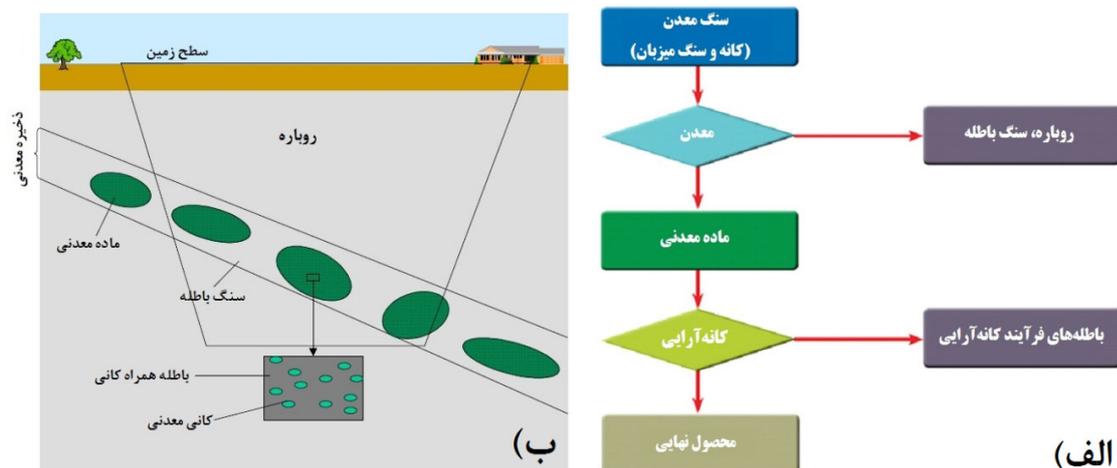
هر یک از مراحل معدن کاری و فرآوری باعث تولید مواد باطله می‌گردد که حجم تولیدی این باطله‌ها بستگی به نوع ذخیره و نوع تکنولوژی مورد استفاده در استخراج و فرآوری مواد دارد. شکل (۱-۱) مراحل تولید باطله در معدن کاری را نشان می‌دهد. به طور معمول در یک معدن کاری روباز، بیشترین حجم باطله مربوط به روباره‌های^۳ سطحی است که معمولاً از جنس خاک یا سنگ، ماده معدنی را می‌پوشانند. این سنگ‌های باطله اغلب فاقد عیار و یا عیار آنها در حد اقتصادی نمی‌باشد و ممکن است در صنایع دیگری از قبیل ساختمانی و راه‌سازی مورد استفاده قرار بگیرند. ماده معدنی استخراج شده به

1- Mine waste or gangues

2- Tailings

3- Overburden

منظور پرعیارسازی نیاز به فرآیند کانه‌آرایی دارد. در این فرآیند سنگ معدن برای استخراج کانی‌های با ارزش تا ابعاد بسیار ریزتر خرد می‌شوند. در نتیجه این عمل، مواد دانه‌ریز بی‌ارزشی تولید می‌شود که می‌باید با صرف کمترین هزینه در یک محل خاص انباشته شوند [BRGM, 2001; Romero et al., 2006].



شکل ۱-۱- الف) فرآیند تولید انواع باطله معدنی در طول فرایند معدن کاری [After Abdelaal, 2014]. ب) شمائی از یک معدن روباز و باطله‌های معدنی [After European Commission, 2009]

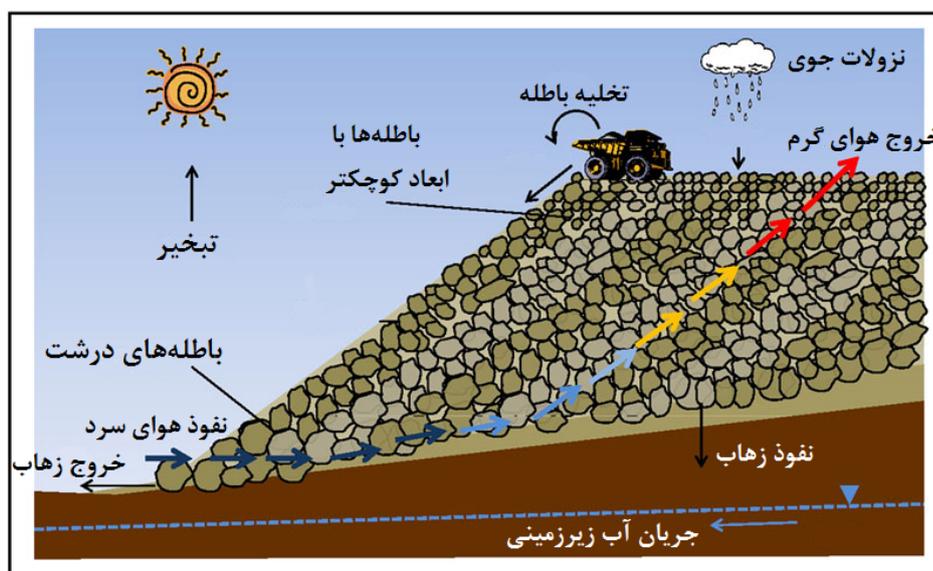
۳-۱- مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دمپ باطله‌های معدنی

باطله‌های معدنی اغلب به صورت دمپ‌های باطله در مناطقی با مساحت چند ده هکتار و ارتفاع چند ده متر در اطراف پیت معدن انباشته می‌شوند. شکل (۱-۲) نحوه ایجاد یک دمپ باطله معدنی را نشان می‌دهد. ابعاد متفاوت باطله‌ها از ریز تا درشت و حتی بلوک‌های چند متری باعث ایجاد یک ساختار ناهمگن در داخل دمپ باطله می‌شود که نفوذ جریان آب، هوا و توزیع رطوبت در داخل دمپ را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل (۱-۳) مدل مفهومی از ساختار داخلی یک دمپ باطله معدنی و مسیرهای انتقال جریان آب و واکنش‌های ژئوشیمیایی در ارتباط با این نوع ساختار را نشان می‌دهد [GARD, 2019]. حضور برخی فلزات و کانی‌های واکنش‌پذیر، نحوه قرارگیری کانی‌های تولید و خنثی‌کننده اسید در دمپ باطله سهم به‌سزایی در تولید و انتقال آلودگی به خاک و آب منطقه دارند. علاوه

بر این، پارامترهای دیگری از جمله رژیم هیدرولوژیکی مناطق مجاور، توپوگرافی منطقه، شرایط آب و هوایی، شرایط زمین‌شناسی و مکان‌های انباشت باطله را نیز باید در نظر داشت [Pugh et al., 1984].



شکل ۱-۲- الف) بارگیری باطله، ب) دمپ باطله [BRGM, 2001]



شکل ۱-۳- مدل مفهومی از ساختار داخلی دمپ باطله معدنی [After GARD, 2019]

در جدول (۱-۱)، مقایسه عوامل مؤثر در تولید آلودگی در باطله‌های معدنی و باطله‌های کانه‌آرایی نشان داده شده است.

جدول ۱-۱- عوامل مؤثر در تولید آلودگی در باطله‌های معدنی و باطله‌های کانه‌آرایی [After EPA, 1994]

عوامل مؤثر در تولید اسید	باطله معدنی	باطله کانه‌آرایی
منبع سولفید	غلظت‌های متفاوتی از کانی‌های سولفیدی وجود دارد	دارای مقادیر زیادی سولفید می‌باشد
اندازه ذرات	به طور متوسط بزرگتر از ۱۰ سانتی‌متر 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 به صورت یکنواخت تغییر می‌کند
آغاز اکسایش	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 به علت وجود خلل و فرج نفوذ اکسیژن زیاد است	نفوذ اکسیژن به دلیل کوچکتر بودن اندازه ذرات اندک است
زهاب آزاد شده	به دلیل نفوذپذیری بالای باطله‌ها، میزان نفوذ زهاب به آب‌های زیرزمینی و محیط اطراف زیاد است	زهاب بیشتر از اکسایش سطح باطله‌ها ناشی می‌شود

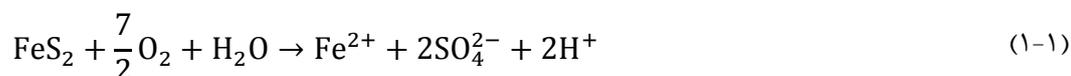
۱-۳-۱- تشکیل زهاب معدنی

شاید بدترین مشکل زیست‌محیطی در ارتباط با باطله‌های معدنی، تشکیل زهاب اسید سنگ^۱ در نتیجه اکسایش کانی‌های سولفیدی همراه باطله مخصوصاً پیریت (FeS_2) در مجاورت آب و اتمسفر مطابق واکنش (۱-۱) است، که نتیجه آن تولید Fe^{2+} ، SO_4^{2-} و H^+ می‌باشد. این پدیده با عنوان زهاب اسیدی^۲ معدن شناخته می‌شود. Fe^{2+} آزاد شده می‌تواند در مجاورت اکسیژن، اکسید و مطابق با واکنش (۱-۲) به آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) تبدیل شود [Singh and Doulati, 2003]. 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 10^6 برابر افزایش دهد. در نتیجه، در حضور این باکتری، یون فریک (Fe^{3+}) ایجاد شده مثل اکسیژن به عنوان عامل اکسید کننده برای پیریت عمل کرده و مطابق با رابطه (۱-۳) تحت شرایط غیر اکسیدان با پیریت واکنش داده و AMD بیشتری تولید خواهد

1- Acid rock drainage (ARD)

2- Acid mine drainage (AMD)

شد. بررسی‌ها نشان داده که تولید Fe^{3+} و اکسایش پیریت وقتی اهمیت دارد که باکتری‌های مذکور حضور داشته باشند [دولتی ارده‌جانی و همکاران، ۱۳۸۳].



زهاب اسیدی به دلیل داشتن pH پایین، حاوی غلظت بالایی از سولفات و یون‌های فلزی است، که مستعد ایجاد مخاطرات زیست‌محیطی جبران ناپذیری است [Doulati Ardejani., 2003]. شکل (۴-۱) نمونه‌ای از زهاب اسیدی تولید شده در اثر فعالیت‌های معدنی را نشان می‌دهد.



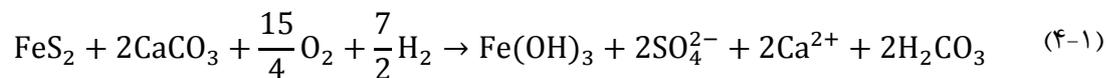
شکل ۴-۱- نمونه‌ای از زهاب اسیدی ناشی از باطله‌های فرآوری معدن سرب و روی در جنوب مادرید، اسپانیا [Garcia-Lorenzo et al., 2019]

هر چند pH پایین یک ویژگی ثابت و جهانی برای زهاب‌های ایجاد شده از باطله‌های معدنی نمی‌تواند شناخته شود. زیرا در شرایطی که کانی‌های خنثی‌کننده در باطله‌های معدنی به طور قابل توجهی موجود باشند و یا اکسایش کانی‌های سولفیدی ضعیف باشد، با پدیده‌ای تحت عنوان زهاب خنثی تا قلیایی^۱ (NAMD) و یا شور^۲ (SD) با مقادیر pH بالا مواجه خواهیم بود [Lottermoser, 2010]. یکی از بارزترین کانی‌های خنثی‌کننده اسید، کلسیت می‌باشد که به دلیل انحلال سریع منجر به خنثی‌سازی اسید و

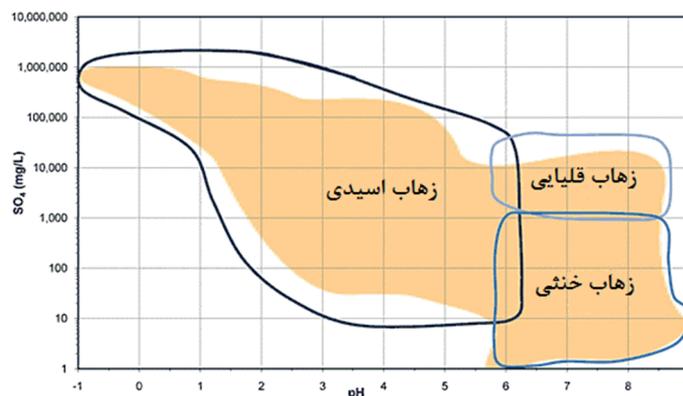
1- Neutral/Alkaline mine drainage (NAMD)

2- Saline drainage (SD)

افزایش pH می‌شود. واکنش (۴-۱) مکانیزم خنثی‌سازی زهاب اسیدی تولید شده از یک مول پیریت در برابر دو مول کلسیت را نشان می‌دهد [Abrosimova et al., 2015].

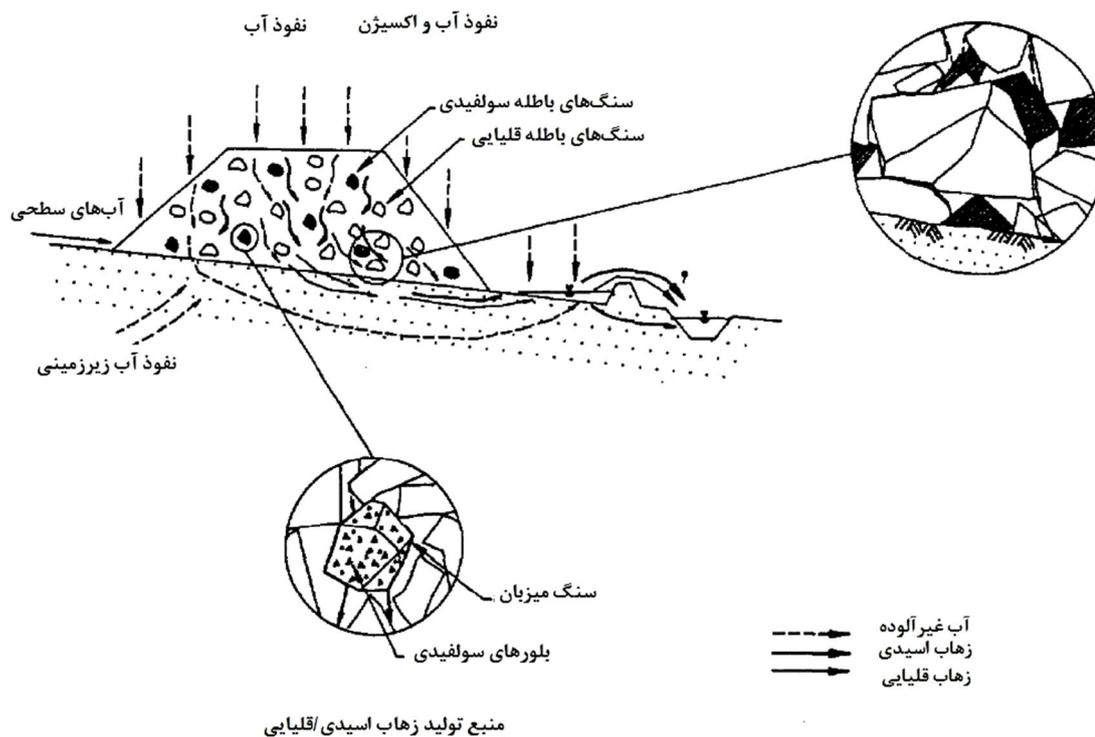


زهاب قلیایی حاوی برخی یون‌های فلزی محلول و زهاب نمکی حاوی سطح بالایی از سولفات و یون‌های کلسیم و منیزیم است، که می‌تواند به عنوان تهدیدی برای محیط‌زیست تلقی گردد. طبقه‌بندی زهاب معدنی بر پایه غلظت سولفات در شکل (۵-۱) ارائه شده است. هرچند کیفیت زهاب معدن به صورت دقیق قابل تفکیک نیست و زهاب قلیایی و شور می‌تواند با هم رخ دهد [GARD, 2019].



شکل ۵-۱- طبقه‌بندی زهاب معدنی به صورت تابعی از غلظت سولفات [After GARD, 2019]

شکل (۶-۱) مدل مفهومی از مکانیزم تولید زهاب معدنی با خاصیت اسیدی یا قلیایی از دمپ باطله معدنی را نشان می‌دهد و در جدول (۲-۱) برخی از مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی و قلیایی که در تولید زهاب اسیدی و قلیایی مؤثرند، ارائه شده است.



شکل ۱-۶- مکانیزم تولید زهاب اسیدی/قلیایی از باطله‌های معدنی [After Broughton and Robertson, 1991]

جدول ۱-۲- برخی کانی‌های تولید یا خنثی‌کننده اسید [Karlsson et al., 2018]

کانی تولید کننده اسید	کانی خنثی کننده اسید
پیریت (FeS_2)	کلسیت (CaCO_3)
کالکوپیریت (CuFeS_2)	دولومیت ($\text{Mg}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{CO}_3$)
کالکوسیت (Cu_2S)	منیزیت (MgCO_3)
آرستونوپیریت (FeAsS)	آنورتیت ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)
انارژیت (Cu_3AsS_4)	الیوین ($(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$)
میلریت (NiS)	بروسیت ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)

۱-۳-۲- آلودگی فلزات سنگین

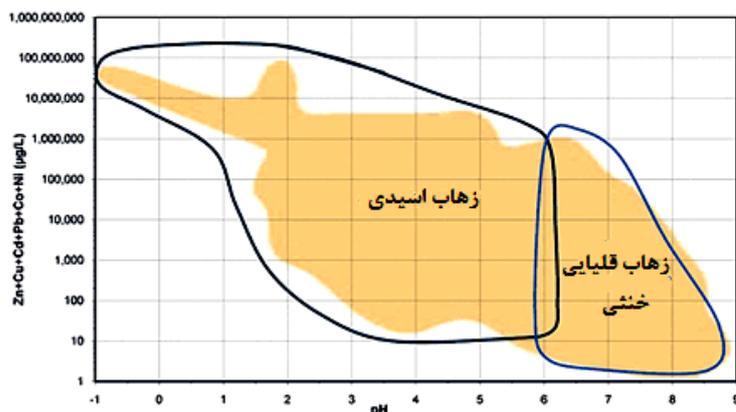
باطله‌های معدنی اغلب مشکلات زیست‌محیطی بیشتری نسبت به فعالیت‌های معدن‌کاری ایجاد می‌کنند. یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها، بحث حضور فلزات سنگین و سمی همراه با باطله‌های معدنی است. مدیریت نامناسب دمپ‌های باطله، منجر به انتقال فلزات سنگین به محیط اطراف می‌شود [Chopin and Alloway, 2007; Harries, 1990]. این امر کمک به آلودگی خاک، تخریب بافت خاک،

کمبود مواد مغذی، آلودگی آب‌های زیرزمینی و کاهش تنوع بیولوژیکی می‌کند. فلزات سنگین به دلیل این که به راحتی تحت تأثیر فرآیندهای تخریب زیستی قرار نمی‌گیرند و دارای ماندگاری طولانی مدت در محیط هستند، از خاک به گیاه، محصولات کشاورزی و در نتیجه فرآورده‌های دامی منتقل شده و وارد زنجیره غذایی انسان می‌شوند [Naicher, 2003; Kagambega, 2014].

به طور کلی فلزات سنگین همراه باطله‌های معدنی به سه روش می‌توانند به محیط‌زیست انتقال پیدا کنند، که عبارتند از:

- ✓ توسط باد فرسایش یافته و به صورت ذرات معلق وارد محیط‌زیست می‌شوند.
- ✓ آلاینده‌هایی که از طریق نزولات جوی تشکیل شده و به صورت رواناب وارد محیط‌زیست می‌شوند.
- ✓ یکی از مهم‌ترین فرآیندها، انتقال فلزات سنگین با زهاب‌های تولید شده از باطله‌های معدنی تحت شرایط اتمسفری و در گذر زمان است.

تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که اگرچه در زهاب اسیدی غلظت برخی فلزات سنگین هم‌چون Cu، Pb و Cd بالاست، ولی در مقابل آن فلزات سمی دیگری هم‌چون As، Se، Cr، V و Mo تمایل به انحلال‌پذیری بیشتر در شرایط pH بالا [Hageman et al., 2015] و فلزات سمی دیگری هم‌چون Ni، Zn، Co، As و Sb در شرایط pH نزدیک به خنثی را دارند و می‌توانند به طور بالقوه در تولید آلودگی حتی بدون شرایط اسیدی مؤثر باشند. بنابراین ویژگی زهاب تولید شده از باطله معدن به طور قابل توجهی بر روی ترکیب، انتقال و سرنوشت آلودگی‌های منتقل شده از باطله معدنی مؤثر است [Plante et al., 2010]. شکل (۷-۱) مدلی از طبقه‌بندی زهاب‌های معدنی را بر اساس مجموع غلظت فلزات سنگین Cu، Zn، Cd، Pb، Co، Ni و برای یک طیف گسترده از انواع ذخایر معدنی برحسب pH نشان می‌دهد [GARD, 2019].



شکل ۱-۷- طبقه‌بندی زهاب معدنی به صورت تابعی از غلظت فلزات حل شده [After GARD, 2019]

۱-۴- پیشینه تحقیقات زیست‌محیطی بر روی باطله‌های معدنی

در این قسمت با توجه به عنوان پیشنهادی رساله، مروری اجمالی بر تحقیقاتی که در مورد ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی و مشکلات زیست‌محیطی مربوط به معادن و باطله‌های معدنی صورت گرفته، انجام شده است. باطله‌های ناشی از معدن‌کاری یکی از منابع اصلی در انتقال آلاینده‌های فلزی به محیط‌زیست می‌باشد که منجر به آلودگی خاک و اثرات زیست‌محیطی مضر می‌شود. نخستین گام در راستای چاره‌اندیشی و نیز پیش‌گیری از گسترش این آلودگی، ارزیابی پتانسیل آلودگی و آگاهی از میزان و چگونگی پراکنش و شدت گسترش آلودگی است که در طراحی یک استراتژی زیست‌محیطی نقش مهمی دارد. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

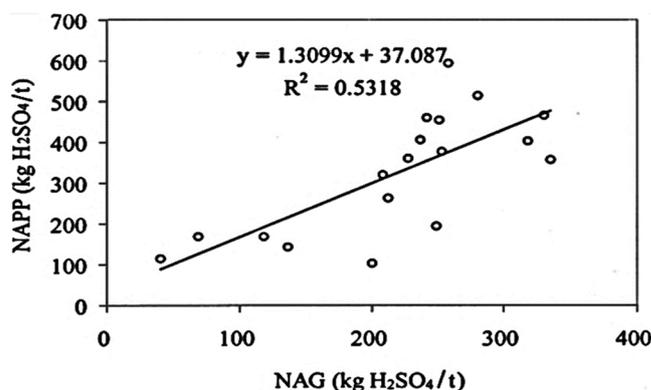
شو و همکاران در سال ۲۰۰۱ به مطالعات زیست‌محیطی بر روی باطله‌های معدن سرب - روی در گوانگدونگ^۱ چین پرداختند. محققان دو هدف از انجام این تحقیق را مدنظر قرار دادند: یکی بررسی و ارزیابی پتانسیل تولید زهاب اسید ناشی از باطله‌ها با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی محاسبه اسید-باز^۲ (ABA) و تولید اسید خالص^۳ (NAG) و دیگری بررسی اثر اسید تولیدی بر مهاجرت فلزات سنگین در دمپ. به همین منظور، ۱۸ نمونه سطحی به صورت تصادفی در فاصله ۲۰-۰ سانتی‌متری از سطح دمپ و ۲۴ نمونه عمقی به منظور بررسی تغییرات اکسایش و فلزات سنگین در دو نقطه از دمپ

1- Guangdong

2- Acid base accounting (ABA)

3- Net acid generation (NAG)

برداشت گردید. آزمایشات استاتیکی به دلیل سادگی، سریع و ارزان بودن انتخاب گردید. هر دو روش مورد استفاده نشان دادند که دمپ باطله، پتانسیل تولید اسید را دارد. شکل (۸-۱) ارتباط بین نتایج به دست آمده از روش تولید اسید خالص (NAG) و پتانسیل تولید اسید خالص^۱ (NAPP) بدست آمده از آزمایش استاتیکی ABA را نشان می‌دهد که دارای همبستگی بالایی می‌باشند. روش NAG نسبت به روش دیگر دقیق‌تر بود به خاطر این که اکسایش کامل پیریت رخ نداده است. نتایج نشان داد که اسیدزایی عمدتاً در لایه‌های سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متری) از دمپ رخ داده و اکسایش پیریت و نفوذ آب و اکسیژن تا این عمق می‌باشد. آنالیز شیمیایی از نمونه‌های عمقی، افزایش غلظت فلزات سنگین نسبت به عمق را نشان داد. زهاب اسیدی تولید شده در سطح باعث حلالیت فلزات سنگین شده و در نتیجه واکنش‌های اسیدی، ممکن است تنها عامل مهم در افزایش تحرک فلزات در دمپ باشد [Shu et al., 2001].



شکل ۸-۱- ارتباط نتایج بدست آمده از روش تولید اسید خالص (NAG) و پتانسیل تولید اسید خالص (NAPP) بدست آمده از آزمایش استاتیکی ABA [Shu et al., 2001]

لی در سال ۲۰۰۳ به بررسی آلودگی ناشی از معدن سرب و روی در کشور کره پرداخت. نمونه‌برداری از آب، خاک و رسوبات انجام شد. کانی‌های موجود در خاک و رسوبات شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، مالاکیت و گوتیت بودند. خاک‌های سطحی اطراف معدن و باطله‌های معدنی، درصد بالایی از غلظت فلزات سنگین Zn, Pb, Sb, Cu, Cd و As را نشان دادند. نتایج نشان داد که معدن کاری

1- Net acid production potential (NAPP)

سرب و روی باعث آلودگی زمین‌های اطراف محدوده معدن به عناصر سمی و سنگین شده است [Lee., 2003].

کابالا و همکاران در سال ۲۰۰۸ آلودگی خاک ناشی از انتقال فلزات سنگین از دمپ باطله کارخانه فرآوری سرب و روی در جنوب لهستان را با روش‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک مورد بررسی قرار دادند. مطالعات کانی‌شناسی و میکروسکوپی در باطله‌ها توسط روش‌های XRD^۱ و SEM^۲ مورد بررسی قرار گرفت و غلظت فلزات سنگین Zn, Pb, Fe, Mn, Cd و Tl توسط روش جذب اتمی شناسایی شد. از روش ژئوفیزیکی الکترومغناطیس^۳ (EM) جهت شناسایی زون‌های آلوده ناشی از دمپ باطله استفاده شد. نتایج نشان داد که باطله‌های معدن سرب و روی سرشار از کانی‌های سولفید-آهن و کربنات‌ها می‌باشند که در شرایط اکسایش منجر به تولید یون‌های SO₄, CO₃, OH⁻ می‌شود. کانی‌های سولفیدی و سولفات‌های ناپایدار هستند، مخصوصاً در شرایطی که pH پایین است. فلزات سنگین همچون Zn, Pb, Fe, Mn, Cd و Tl عناصر اصلی مواد معدنی اولیه و ثانویه هستند که در شرایط اسیدی تحرک بالایی دارند و باعث آلودگی آب و خاک می‌شوند. به دلیل رسانایی بالای آلاینده‌ها و خواص فیزیکی متفاوت با خاک‌های دربرگیرنده، محققان روش ژئوفیزیکی EM را به عنوان ابزاری موثر جهت شناسایی و تفکیک مناطق آلوده از غیرآلوده معرفی کردند [Cabala et al., 2008].

رودریگز و همکاران در سال ۲۰۰۹ پراکندگی فلزات سنگین در باطله‌ها کانه‌آرایی و خاک‌های اطراف یک معدن قدیمی سرب و روی در اسپانیا را مورد مطالعه قرار دادند. سه هدف اصلی مدنظر بود:

- ۱- آنالیز فلزات سنگین سرب، روی، مس و کادمیوم و بررسی پراکندگی این عناصر در خاک‌های اطراف معدن
- ۲- بررسی گونه‌پذیری سرب و روی با استفاده از روش اصلاح شده استخراج ترتیبی^۴ ۳- ارزیابی اولیه از خطرات زیست‌محیطی مرتبط با آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معدن. به همین

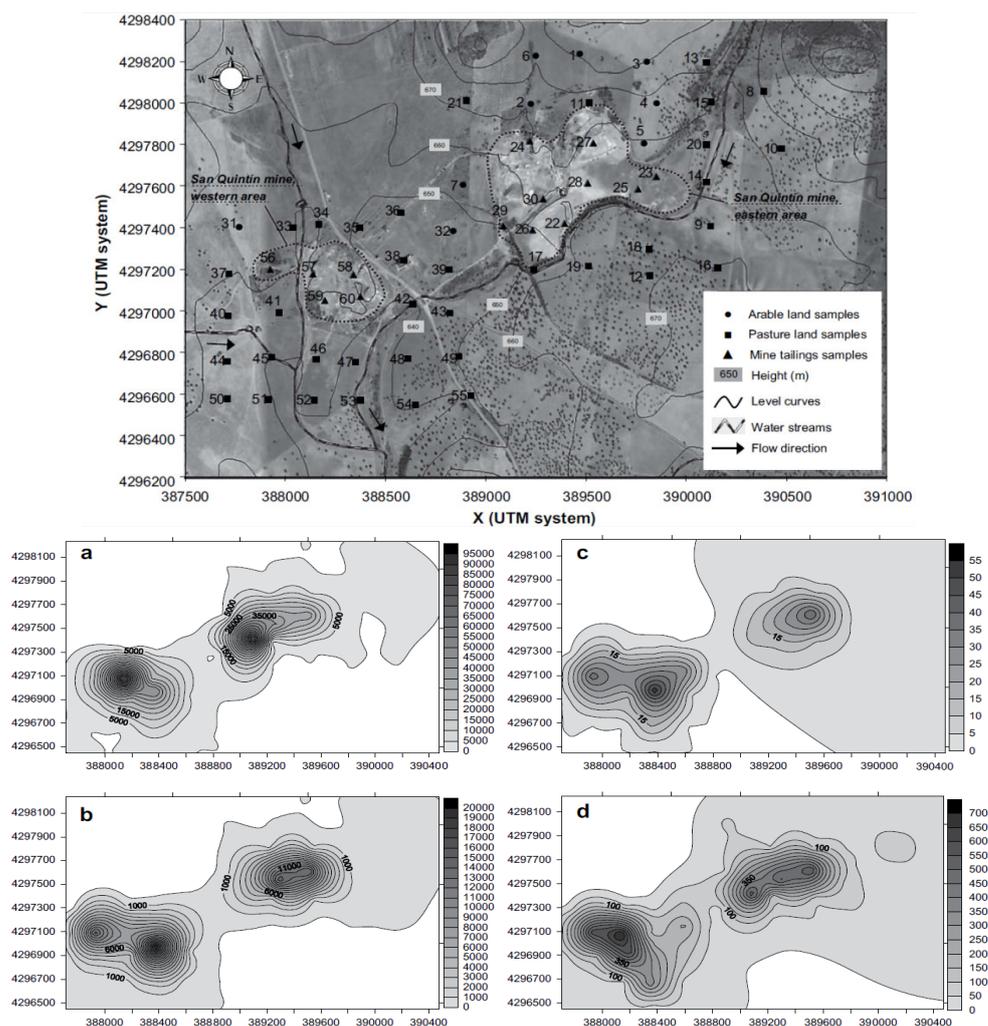
1- X-ray diffractometer (XRD)

2- Scanning electron microscope (SEM)

3- Electromagnetic (EM)

4- Sequential extraction

منظور در مجموع ۶۰ نمونه سطحی در فاصله ۲۰-۰ سانتی متری از باطله‌ها، خاک‌های اطراف معدن، مراتع و زمین‌های کشاورزی برداشت شد. نمونه‌ها با روش^۱ ICP-AES آنالیز و پارامترهای فیزیکی شیمیایی (pH، مواد آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و بافت) با روش‌های استاندارد تعیین و مطالعات کانی‌شناسی با روش XRD انجام گرفت. تجزیه و تحلیل آماری و توزیع مکانی عناصر با نرم‌افزارهای مربوطه صورت پذیرفت (شکل ۹-۱).



شکل ۹-۱- موقعیت نمونه‌های برداشت شده و نقشه توزیع پراکندگی فلزات سنگین در محدوده معدن کاری سرب و روی در اسپانیا (a سرب، b روی، c کادمیوم و d مس [Rodriguez et al., 2009])

1- Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES)

مطالعات کانی‌شناسی حضور بیشتر کانی‌های رسی (به صورت ایلیت و کائولینیت) را نشان داد. pH رفتار قلیایی تا اسیدی نشان داد. یک یافته قابل توجه عدم حضور گالن (PbS) و اسفالریت (ZnS) به عنوان سولفیدهای اصلی معدن در همه نمونه‌ها بود. این شاید به دلیل فرآوری مجدد باطله‌ها با روش فلوتاسیون باشد. نتایج آنالیز شیمیایی حاکی از آلودگی فلزات سرب، روی و کادمیوم در محدوده مورد نظر بود و محققان به این نتیجه رسیدند که مکانیزم اصلی گسترش و پراکندگی آلودگی، زهاب اسیدی تولید شده و باد می‌باشد [Rodriguez et al., 2009].

پلاسمنسیا و همکاران در سال ۲۰۱۰ مشکلات زیست‌محیطی ناشی از زهاب اسیدی تولید شده از باطله‌های معدن مس و طلا (Au-Cu) در جنوب غرب فنلاند را با استفاده از تلفیق مطالعات ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی مورد بررسی قرار دادند. باطله‌های معدنی اغلب حاوی مواد سولفیدی خصوصاً پیریت و پیروتیت می‌باشد که در اثر معدن‌کاری در طول سال‌های ۱۹۶۱-۱۹۴۲ به حجم تقریباً ۱/۵ میلیون تن تولید شده‌اند. آنها از تلفیق روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی جهت ارزیابی و مشخصات AMD استفاده نمودند. همبستگی بین داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی، سولفید کل و غلظت فلزات سنگین (Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) از نمونه‌های باطله و مقاومت ویژه و ژئوشیمی از نمونه‌های آب‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های عمقی با انجام حفاری از دمپ باطله برداشت و مقدار غلظت فلزات سنگین و کل سولفید موجود توسط روش ICP-MS^۱ و آنالیزگر گوگرد (CS-2000) اندازه‌گیری شد. تلفیق نمونه‌های آنالیز شده از باطله و آب، پارامترهای اصلی را برای تفسیر بهتر و دقیق‌تر داده‌های ژئوفیزیک فراهم کرد. اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی با روش مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد ۹ پروفیل با آرایش و نر صورت گرفت. جهت وضوح افزایش جانبی و عمق نفوذ بیشتر، در امتداد ۳ پروفیل از آرایه دوقطبی - دوقطبی استفاده شد. نتایج مدل ژئوفیزیکی - ژئوشیمی، بخشی از دمپ باطله را با مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۱۰ اهم متر) مشخص کرد، که در ارتباط با بالاترین حجم سولفید، گسترش اکسایش سولفید

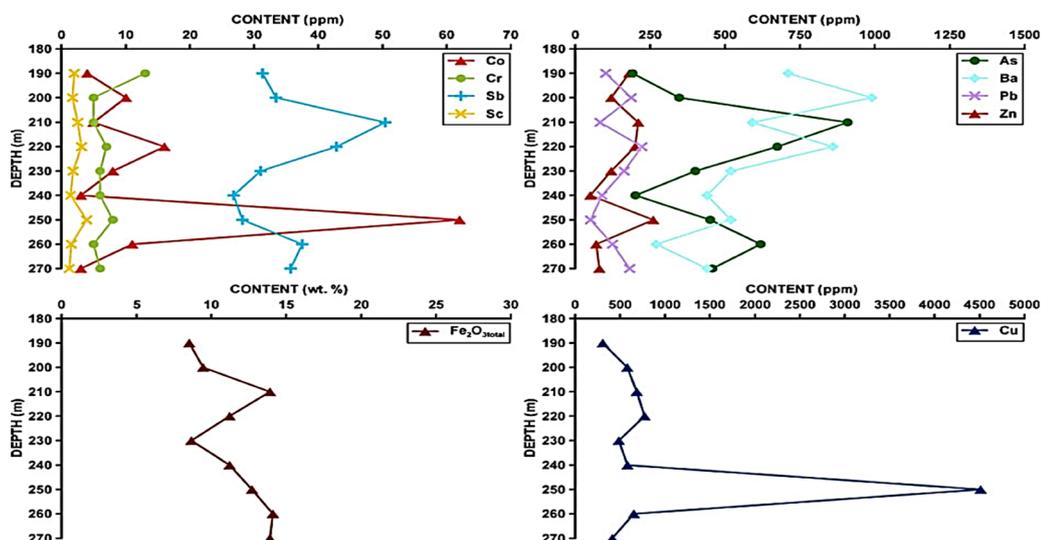
1- Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)

و pH پایین (کمتر از ۳/۱ به طور میانگین) است. از شرایط فیزیکی و ژئوشیمیایی ناشی از اکسایش کانی‌های سولفیدی می‌توان نتیجه گرفت که محدوده با مقاومت ویژه پایین در ارتباط با زهاب اسیدی باشد [Placencia et al., 2010].

بابو و همکاران در سال ۲۰۱۱ خطرات زیست محیطی و پتانسیل منابع آلودگی معدن متروکه سرب و روی در شمال غرب تونس را مورد بررسی قرار دادند. این معدن در بین سال‌های ۱۸۹۲ تا ۲۰۰۴ فعالیت می‌کرد و از آن سال به بعد متروکه شد. در اثر معدن‌کاری، در حدود ۳۹۳/۱۷۵ تن مواد باطله اطراف معدن دپو گردید که نزدیک مناطق کشاورزی و روستایی بود. مطالعات زیست‌محیطی با نمونه‌برداری از باطله‌ها، گیاهان و خاک اطراف دمپ انجام گرفت. به منظور مطالعات کانی‌شناسی از روش‌های XRD و SEM و برای تعیین غلظت فلزات سنگین و مضر از دستگاه جذب اتمی استفاده گردید. تجزیه و تحلیل اندازه ذرات در نمونه‌های معرف از دمپ باطله نشان داد که توزیع اندازه ذرات بین ۲۰ تا ۳۱۵ میکرون می‌باشد. مطالعات میکروسکوپی حضور گالن (PbS)، اسفالریت (ZnS)، پیریت، کلسیت، کوارتز و دولومیت را به صورت ترکیبی یا تنها نشان داد. مطالعات میکروسکوپی به روش SEM، حضور گالن، اسفالریت و پیریت در نمونه‌های با اندازه ذرات زیر ۲۵ میکرون را تأیید کرد. آنالیزها نشان داد که بیشترین غلظت سرب و روی در نمونه‌هایی با اندازه ذرات ۳۵۰ میکرون و ۲۰ میکرون می‌باشد و حاکی از این است که دمپ باطله می‌تواند پتانسیل بالقوه‌ای در تولید آلودگی باشد. غلظت فلزات سرب - روی در نمونه‌های گرفته شده از خاک، آب و گیاهان اطراف معدن و دمپ باطله، بیش از حد استاندارد کشور تونس و کانادا بود و نتایج نشان داد که باطله‌ها توسط باد و آب فرسایش یافته و مواد آلاینده را به محیط زیست انتقال می‌دهند [Babbou et al., 2011].

مارتین-کرسپو و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مطالعات زیست محیطی در منطقه معدن‌کاری و استخراج ذخایر سولفیدی در اسپانیا توسط روش‌های ژئوفیزیکی-ژئوشیمی و کانی‌شناسی پرداختند. در اثر فعالیت معدنی حدود ۱۹ دمپ و سد باطله در منطقه ایجاد شده بود. در این بررسی، آنها مطالعات خود

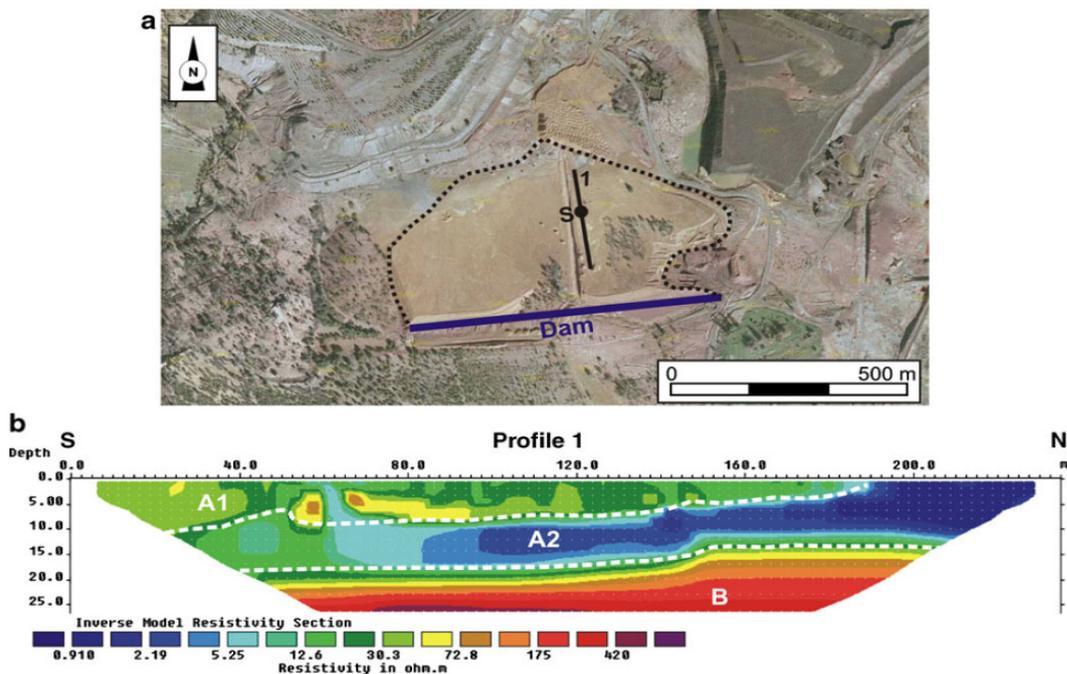
را بر روی دو سد باطله مونت رومرو^۱ که عمدتاً جهت استخراج و استحصال فلزات سرب و روی و سد باطله لانایا^۲ که برای فرآوری مس بود، انجام دادند. مطالعات کانی‌شناسی با روش‌های SEM، XRD^۳ و EDX^۳ و مطالعات ژئوشیمی با روش ICP-MS جهت آنالیز و بررسی حضور آلاینده‌ها با نمونه‌برداری عمقی صورت گرفت و مطالعات ژئوفیزیکی به روش ژئوالکتریک با آرایه ونر- شلومبرژه جهت بررسی ساختار سد باطله، ضخامت، ترکیب، بررسی آلودگی ناشی از نشت زهاب اسیدی صورت گرفت. نتایج نشان داد که سد باطله معدن مونت رومرو دارای فلزات سمی بیش از حد استاندارد برای زمین‌های کشاورزی است و نتایج ژئوفیزیک یک لایه همگن به ضخامت ۳ متر با مقاومت ویژه پایین در سطح نشان داد که به حضور گل و لای اشباع و کانی‌های رسی همراه با سولفید بالا تفسیر شد. باطله لانایا دارای ترکیب کانی‌شناسی همگن متشکل از کوارتز، کلریت- اسمکتیت و ژوراسیت است. عدم حضور پیریت و محتوای کم غلظت فلزات سنگین در نمونه‌ها به فرآیند بازیابی باطله ارتباط مستقیم دارد (شکل ۱-۱۰).



شکل ۱-۱۰- توزیع غلظت عناصر سنگین نسبت به عمق در نمونه عمقی از سد باطله لانایا [Crespo et al., 2011]

- 1- Monte Romero
- 2- La Naya
- 3- Energy dispersive x-ray (EDX)
- 4- X-ray fluorescence (XRF)

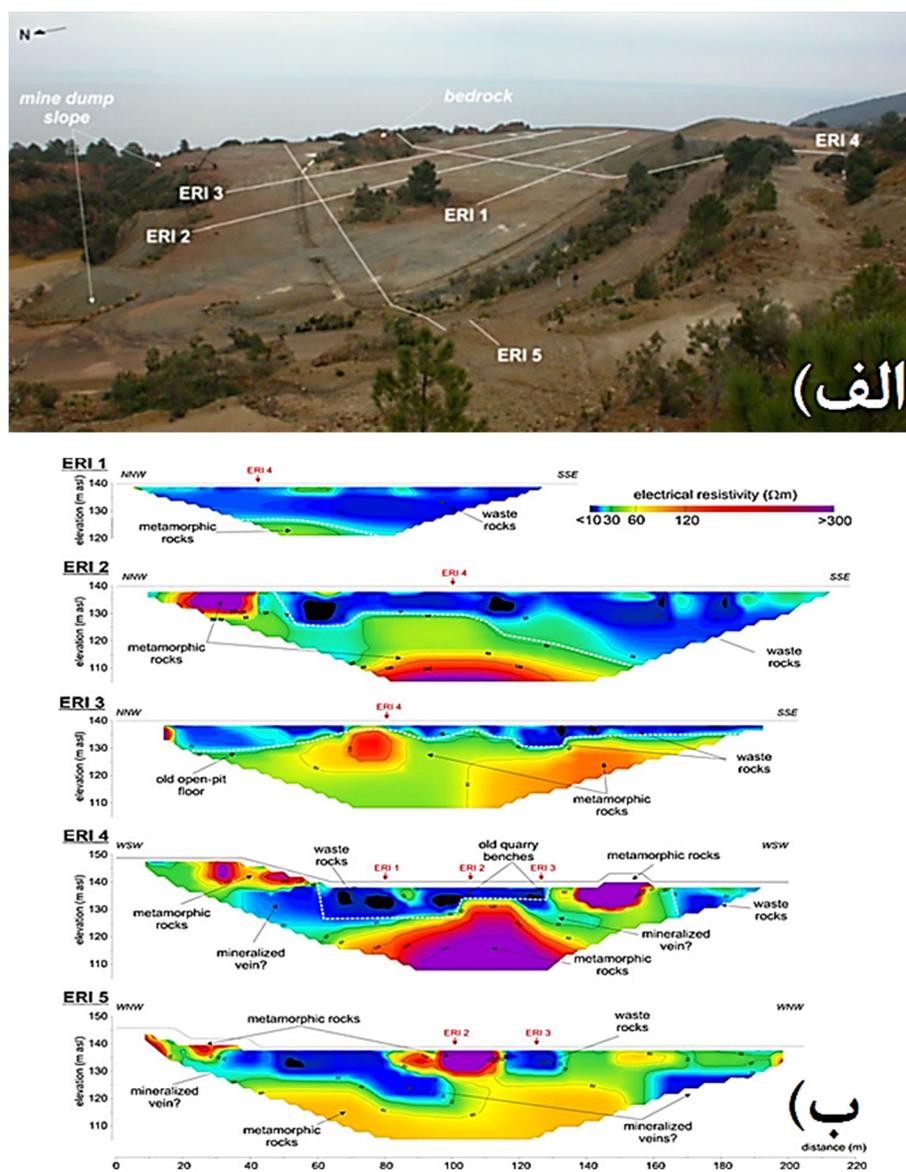
نتایج ژئوفیزیکی، ضخامت ثابتی از ساختار دمپ نشان نداد ولی نفوذ جریان آب در ساختار دمپ به خوبی قابل مشاهده بود (شکل ۱-۱۱). مقادیر مقاومت ویژه کم در مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، حضور و گسترش آلودگی (زهاب اسیدی) را در هر دو سد باطله نشان داد [Martin-Crespo et al., 2011].



شکل ۱-۱۱- (a) مکان قرارگیری پروفیل ژئوالکتریک نسبت به سد باطله مس لایانا، (b) مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه و نحوه نفوذ زهاب اسیدی در میان باطله‌ها [Martin-Crespo et al., 2011]

مله و همکاران در سال ۲۰۱۳ به منظور بررسی پتانسیل تولید آلودگی از یک دمپ باطله حاوی مواد سولفیدی از روش ژئوفیزیکی مقاومت ویژه استفاده کردند. باطله‌ها از فعالیت‌های معدنی بزرگ‌ترین ذخایر آهن سولفیدی در کشور ایتالیا به وجود آمده است. از آنجائی که تولید زهاب اسیدی بستگی به حجم و ترکیب مواد باطله دارد، بنابراین خصوصیات‌شان عامل مهمی برای ارزیابی ژئوشیمیایی و استراتژی بهبود برای به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی‌شان می‌باشد. این محققان روش‌های ژئوفیزیکی را به عنوان یک روش مقرون به صرفه جهت بررسی خصوصیات دمپ باطله معرفی کردند. به همین منظور ۵ پروفیل ژئوالکتریک بر روی سطح دمپ باطله طراحی و اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که دمپ باطله ناهمگن است و دارای ضخامتی در حدود ۳۰ متر است. با توجه به حضور مقادیر

زیادی مواد سولفیدی به صورت پراکنده همراه با باطله‌ها، اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی، هدایت الکتریکی بالاتری نسبت به سنگ بستر از خود نشان دادند (شکل ۱-۱۲).



شکل ۱-۱۲-الف) موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک بر روی دمپ باطله‌های سولفیدی آهن ریومارینوا، ب) نتایج مدل‌سازی دوبعدی داده‌های ژئوالکتریک [Mele et al., 2013]

رویکرد زمین آماری جهت ارزیابی ارتفاع لبه‌های دمپ باطله مورد استفاده قرار گرفت و حجم باطله از طریق آنالیز رستری^۲ از ارتفاعات مرز بالا و پایین دمپ باطله محاسبه شد. نتایج ژئوفیزیکی آنومالی‌هایی

1- Rio Marina

2- Raster

با هدایت الکتریکی بالا در مرکز دمپ باطله نشان داد. با تلفیق روش‌های هیدروژنولوزیکی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی از منطقه معدنی، پیشنهاد شد که این آنومالی‌ها می‌تواند یک ویژگی ژئوفیزیکی از مناطق زیرسطحی باشد که در آنجا AMD تولید یا ذخیره شده و در نتیجه منبع آلودگی محیط‌زیست است [Mele et al., 2013].

اسماعیلی و سالاری در سال ۲۰۱۵، به مطالعاتی بر روی پتانسیل تولید آلودگی از باطله‌های فرآوری معدن مس سرچشمه پرداختند. آنها از روش‌های کانی‌شناسی، آزمایش pH خمیری^۱، آزمایش استاتیکی اسید- باز اصلاح شده و آزمایش سینتیکی سلول مرطوب استفاده کردند. نتایج مطالعات کانی‌شناسی نشان داد که ترکیب اصلی نمونه‌ها کوارتز، پس از آن ایلیت، فلدسپات پتاسیم و به نسبت کمتر فلدسپات سدیم (آلبیت) و کائولینیت است. نتایج پتروگرافی، حضور فراوان پیریت و کالکوپیریت در تشکیل زهاب اسیدی و حضور کمتر کربنات‌ها (کلسیت و دولومیت) را نشان داد. آزمایش‌های استاتیکی تشکیل زهاب را تأیید و همچنین نتایج آزمایش‌های سینتیکی حاکی از تولید آلودگی بود، به طوری که خاصیت اسیدی با گذشت زمان به یک مقدار ثابت می‌رسید. در نهایت، با تفسیر نتایج و آنالیز پارامترهای مختلف زهاب مانند pH، Eh، هدایت الکتریکی، سختی و غلظت عناصر مختلف محلول مشخص شد که باطله‌های فلوتاسیون مس سرچشمه مولد زهاب اسیدی هستند [Esmaeily and Salari, 2015].

تللیل و همکاران در سال ۲۰۱۶، به مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمی زیست‌محیطی بر روی باطله‌های فرآوری معادن سرب و روی واقع در بخش شمالی تونس پرداختند. همچنین آنها، قابلیت تحرک فلزات سنگین (Zn، Pb و Cd) و شبه‌فلزات (As و Sb) را توسط تست لیچینگ به منظور شبیه‌سازی واکنش باطله‌ها با نزولات و آب‌های سطحی ارزیابی کردند. به همین منظور در سه منطقه از محدوده معدنی، نمونه‌برداری از عمق ۳۰ سانتی‌متری سدهای باطله فرآوری انجام گرفت. مطالعات کانی‌شناسی با روش XRD و SEM و XRF انجام گرفت. از روش طیف‌سنج القایی (ICP-OES^۲) برای آنالیز فلزات مورد

1- Paste pH

2- Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)

بررسی (Zn, Pb, Cd, As و Sb) استفاده شد. نتایج کانی‌شناسی، کانی‌های سولفیدی (اغلب به صورت آرسنوپیریت و اسفالریت به همراه مقادیر کمتری گالن و پیریت)، کانی‌های اکسیدی (سروزیت و اسمیت-زونیت)، سولفات‌ها (ژیپس و باریت)، کلسیت و مقادیر کمی کانی‌ها رسی در نمونه‌های باطله‌ها را شناسایی کرد. نتایج ژئوشیمیایی نشان داد غلظت فلزات مورد بررسی، بالاتر از مقدار میانگین پوسته زمین و همچنین حد مجاز آنها در خاک می‌باشد. نتایج تست لیچینگ با آب مقطر، یک واکنش با pH نزدیک به خنثی و قابلیت تحرک بالاتر Zn و Sb نسبت به Cd, As و Pb نشان داد. این محققین به این نتیجه رسیدند که قابلیت تحرک بالای Zn در مقایسه با Pb و تحرک نسبتاً بالای شبه فلزات که در pH قلیایی غالباً به شکل آنیونی رخ می‌دهد، یک ویژگی بارز از زهاب قلیایی (NAMD) است. از طرفی دیگر تحرک Cd از Zn کمتر است، هرچند این دو عنصر دارای رفتار شیمیایی مشابهی دارند [Talil et al., 2016].

حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۸، پتانسیل ریسک آلودگی فلزات سنگین در خاک اطراف معدن آهن موئیل در شهر اردبیل را با استفاده از شاخص ریسک اکولوژیک (RI)^۱ و فاکتور آلودگی (CF)^۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی‌ها، ریسک بالایی از آلودگی فلزات Fe, As, Cd و Cr در خاک محدوده معدن را نشان داد [Hosseini et al., 2018].

چلیشی و همکاران در سال ۲۰۱۹ به منظور ارزیابی و پتانسیل آلودگی ناشی از دمپ‌های باطله معدنی و فرآوری از معدن مس در منطقه چینگولا^۳ از کشور زامبیا از دو شاخص آلودگی هم‌چون شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)^۴ و شاخص بار آلودگی (PLI)^۵ بهره بردند. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص بار آلودگی برای باطله‌های فرآوری (۸/۹۷) تقریباً دو برابر باطله‌های معدنی است (۵/۸۴) است. یافته‌ها نشان می‌دهد که باطله‌های معدن مس (معدنی و فرآوری) از نظر فلزات سنگین آلودگی بالایی دارند و

1- Ecological risk Index (RI)

2- Contamination factor (CF)

3- Chingola

4- Modified degree of contamination (mCd)

5- Pollution load index (PLI)

به نوبه خود، ممکن است خطرات جدی برای سلامتی انسان و فعالیتهای کشاورزی داشته باشد [Chileshe et al., 2019].

جدیری در سال ۱۳۸۵ با استفاده از تلفیق مدل سازی ریاضی و مطالعات ژئوفیزیکی، مشکلات ناشی از باطله های زغال شویی البرز شرقی را مورد بررسی قرار داد. مدل سازی ریاضی به منظور شبیه سازی فرآیند اکسایش پیریت و تولید آلودگی انجام گرفت و نتایج ژئوفیزیکی VLF و ژئوالکتریک به صورت Time Laps، مبنی بر انتقال آلودگی در پایین دست دمپ به دست آمد [جدیری، ۱۳۸۵]. همچنین امیرخانی در سال ۱۳۸۹، با استفاده از روش های الکترومغناطیسی VLF و EM34-3، اثرات آلودگی این نوع باطله ها در این منطقه را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج مدل سازی داده های ژئوفیزیکی نشان داد که، زون های آلوده احتمالی به صورت پراکنده با مقاومت ویژه کمتر از ۵۰ اهم متر، عمدتاً در عمق بیش از ۳۰ متر در پایین دست محدوده مورد مطالعه قرار دارند و با دور شدن از محل انباشت باطله ها، از میزان آلودگی احتمالی کاسته شده است [امیرخانی، ۱۳۸۹].

همچنین خلاصه ای از تحقیقات انجام شده در ارتباط با ارزیابی پتانسیل آلودگی ناشی از دمپ های باطله معدنی در جدول (۱-۳) ارائه شده است.

جدول ۱-۳- خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در ارتباط با ارزیابی آلودگی معادن و باطله‌های معدنی

منبع	روش کار / نتایج	سال	عنوان
[Romero et al., 2006]	جهت بررسی ناهمگنی دمپ، تجزیه و تحلیل دانه‌بندی توسط سرنند و آنالیز XRD و SEM برای مطالعات کانی‌شناسی و آنالیز عناصر جهت مطالعات ژئوشیمیایی صورت گرفت. دمپ باطله ناهمگن و مسکویت بعنوان کانی خنثی کننده و توفهای آتشفشانی غنی از پیریت بعنوان منبع اصلی تولید آلودگی می‌باشد. ریسک آلودگی فلزات سنگین در آب و خاک منطقه وجود دارد.	۲۰۰۶	ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی باطله‌های معدن مس سولفیدی در جنوب غرب اسپانیا با نمونه‌برداری عمقی
[Akabzaa et al., 2007]	سازگاری نتایج بدست آمده از روش‌های استاتیکی، این روش‌ها را به‌عنوان ابزار کافی و مفید برای ارزیابی مقدماتی پتانسیل تولید آلودگی معرفی کرد	۲۰۰۷	پیش‌بینی پتانسیل تولید آلودگی با آزمایش‌های استاتیکی در معادن طلا و منگنز کشور غنا
[Marescotti et al., 2008]	دمپ باطله معدنی به دلیل غنی بودن از پیریت پتانسیل بالایی در تولید اسید دارد. در مقابل دمپ باطله کانه‌آرایی غالباً از گوتیت، لیپدوکروسیت و هماتیت تشکیل شده‌اند و قابلیت کمتری در تولید اسید دارند. غلظت آلاینده‌ها برای نمونه‌های باطله معدنی و فرآوری برای Cu, Ni, Co و As بیش از حد مجاز می‌باشد.	۲۰۰۸	بررسی خصوصیات کانی‌شناسی با روش XRD و SEM/EDS و ژئوشیمیایی (ICP-AES) از دمپ باطله کانه‌آرایی و معدن سولفیدی آهن - مس در ایتالیا
[Abbasi et al., 2009]	اهمیت واکنش‌های اکسایش کانی‌های سولفیدی و ترکیب شیمیایی تولید شده به وسیله واکنش‌های اکسایش را نشان می‌دهد.	۲۰۰۹	پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی معدن زغال‌سنگ در جنوب غربی کانادا با استفاده از یک مدل تعادل شیمیایی - ترمودینامیکی
[Adamu et al., 2010]	میزان مواد آلی در خاک اطراف کم و pH نمونه‌ها خصوصیات خنثی تا قلیایی نشان داد. باطله‌های معدنی منجر به آلودگی خاک (Cd و Pb, Zn) و آب‌های سطحی (Cd و Pb) شده است. منشأ این فلزات از اکسایش باطله‌های حاوی کانی سولفیدی مانند گالن و اسفالریت است	۲۰۱۰	بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک و آب اطراف و محدوده معدن سرب و روی واقع در شمال شرق نیجریه
[Nikolaidis et al., 2010]	با بکارگیری از شاخص‌های ارزیابی ژئوشیمیایی از جمله شاخص انباشتگی و فاکتور غنی-شدگی، آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی، آب و رسوبات آبراه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. آلودگی عناصر Cd, Zn, As در رسوبات آبراه‌ای نشان داد که آب‌های سطحی آلوده هستند که به نوعی در ارتباط با زهاب اسیدی می‌باشد. همچنین خاک‌های کشاورزی به این عناصر آلوده شده‌اند.	۲۰۱۰	ارزیابی ریسک آلودگی ناشی از باطله‌های کانه‌آرایی معدن سرب و روی در شمال شرقی یونان

ادامه جدول ۱-۳

منبع	نتایج	سال	عنوان
Keskin and Toptas.,] [2012	زهاب اسیدی تولید شده در نتیجه اکسایش کانی‌های سولفیدی همراه باطله‌های معدنی، باعث انحلال فلزات سنگین (Al و Mn .Fe ,Zn ,Pb) و انتقال به آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است	۲۰۱۲	بررسی آلودگی زیست‌محیطی ناشی از معدن سرب و روی در ترکیه
[Zhang et al., 2012]	بررسی انجام شده طی ۱۰ سال گذشته نشان می‌دهد که ذخایر سرب و روی در کشور چین حاوی مواد سولفیدی هستند که در اثر اکسایش، زهاب اسیدی ایجاد شده باعث انتقال فلزات سنگین به آب، خاک و گیاهان می‌شود. بیشترین سهم آلودگی آب، خاک، گیاهان و اثرات بر سلامت انسان مربوط به فلزات Pb و Cd می‌باشد. علائم در معرض قرار گرفتن این آلودگی، افزایش غلظت سرب در خون کودکان، آسیب‌های کلیوی، سرطان و... می‌باشد.	۲۰۱۲	بررسی اثرات معدن کاری و ذوب فلز سرب و روی بر محیط‌زیست و سلامت انسان در چین
[Kovacs et al., 2012]	نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای عمدتاً حاوی هیدروکسیدهای آهن می‌باشد. اگرچه زهاب خروجی بصورت خنثی است ولی غلظت Zn ,Cd ,As و Pb هنوز بالاتر از حد مجاز است که می‌تواند خطرات زیست‌محیطی ایجاد کند.	۲۰۱۲	مطالعات ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی از آب‌های سطحی و رسوبات محدوده معدن سرب و روی در مجارستان
[Ayolabi et al., 2013]	روش ژئوالکتریک، حضور آلودگی ناشی از لیچینگ لندفیل را با مقادیر مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر و مقادیر بارپذیری (IP) بین ۸ و ۲/۹- میلی‌ثانیه در عمق نشان داد. نتایج ژئوشیمیایی از نمونه‌های آب از چاه، تغییرات کاهش غلظت پارامترها را با الگوی نتایج ژئوفیزیکی به خوبی مطابقت داد.	۲۰۱۳	تلفیق روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمی برای ارزیابی زیست‌محیطی محل لندفیل‌های شهری در نیجریه
[Banerjee, 2013]	نتایج تست استاتیکی اسید- باز نشان داد باطله‌ها پتانسیل تولید آلودگی دارند. نتایج سینتیکی نشان داد در اوایل دوره اسید تولیدی توسط کانی‌های کربناتی خنثی می‌شود و از یک دوره به بعد تولید زهاب اسیدی پیش‌بینی می‌شود	۲۰۱۳	ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی از باطله‌های زغال در کشور هند بر پایه روش‌های استاتیکی و سینتیکی
[Esshaimi et al., 2013]	مقدار pH نمونه‌های دمپ باطله کانه‌آرایی و خاک‌های اطراف، رفتار خنثی تا قلیایی به دلیل حضور کربنات‌ها از خود نشان می‌دهند. غلظت Zn ,Pb ,Cu و Cd در محیط اطراف دمپ باطله بیش از حد مجاز گزارش شد	۲۰۱۳	بررسی آلودگی ناشی از باطله‌های سرب و روی در شمال مراکش

ادامه جدول ۳-۱

منبع	نتایج	سال	عنوان
[Gordio et al., 2014]	روش استاتیکی نشان داد که باطله‌های معدن پتانسیل تولید آلودگی ندارند. pH مقادیر بالایی نشان داد و پیش‌بینی شد زهاب به‌صورت خنثی تا قلیایی است. محتوای فلزات سنگین در باطله‌ها کم است.	۲۰۱۴	پیش‌بینی تولید زهاب اسیدی از دمپ باطله‌های معدن طلا در غرب آفریقا
Abrosimova et al., [2015]	آزمایش‌ها استاتیکی، سینتیکی و مطالعات کانی‌شناسی با روش XRD، XRF و مقاطع میکروسکوپی نشان داد باطله‌ها پتانسیل تولید آلودگی ندارند و در دراز مدت ۲۶ درصد نمونه‌ها قابلیت تولید اسید دارند. آرسنیک بعنوان یک نگرانی زیست‌محیطی در باطله‌ها شناسایی شد.	۲۰۱۵	ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی از باطله‌های معدن مس-مولیبدن در روسیه
Sidhardhan et al., [2015]	تحلیل فیزیوشیمیایی آب‌های زیرزمینی و همچنین بررسی ژئوفیزیک نشان داد که تأثیرات قابل توجهی از لیچینگ لندفیل در آبخوان‌های زیرزمینی وجود دارد.	۲۰۱۵	بررسی کیفیت آب زیرزمینی اطراف لندفیل شهری با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در هند
[Pierwola, 2015]	از روش مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی (IP) جهت به تصویر کشیدن آلودگی ناشی از دمپ باطله‌ها استفاده گردید. مهمترین عامل در کاهش مقادیر مقاومت ویژه و افزایش پلاریزاسیون القایی، حضور سولفیدهای آهن و سرب و کانی‌های رسی ارزیابی شد.	۲۰۱۵	استفاده از روش ژئوفیزیکی ژئوالکتریک جهت بررسی پتانسیل آلودگی باطله‌های کانه آرایه معدن سرب-روی در جنوب لهستان
[Bayatzadeh Fard et al., 2017]	مدل منفیس با دقتی بالا به‌عنوان بهترین روش در پیش‌بینی توزیع فلزات سنگین در آب‌زیرزمینی معرفی شد.	۲۰۱۷	پیش‌بینی توزیع فلزات سنگین در آب زیرزمینی، ناشی از فعالیت معدنکاری سرب و روی لکان اراک با هوش مصنوعی
[Modabberi, 2018]	مطالعات کانی‌شناسی با روش XRD، SEM و EPMA و آنالیز ژئوشیمیایی عناصر با ICP-MS، جهت بررسی باطله‌های معدن از نظر جنبه زیست‌محیطی و همچنین اقتصادی انجام گرفت. نقره به عنوان عنصر با ارزش از نظر اقتصادی و آرسنیک به عنوان ریسک آلودگی معرفی شد	۲۰۱۸	بررسی خصوصیات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی از دمپ باطله‌های معدن طلا موه، ایران
[یوسفی، ۱۳۹۳]	مطالعات کانی‌شناسی و آنالیز شیمیایی و ژئوشیمیایی عناصر موجود در دمپ باطله و پهنه-بندی ریسک آلودگی در محیط GIS نشان داد که ریسک آلودگی هر عنصر سمی در داخل دمپ باطله، بستگی به پایداری کانی منشأ و تثبیت کننده آن دارد.	۱۳۹۳	گونه‌پذیری ریسک آلودگی در دمپ باطله‌های مس سولفیدی سرچشمه

۱-۵- تعریف مساله و بیان سؤالات اصلی تحقیق

فعالیت‌های معدنی حجم زیادی باطله تولید می‌کنند، که به نوعی بر روی سطح زمین دپو شده و مساحتی از چندین ده هکتار با ارتفاع چند ده متری را اشغال می‌کنند. اندازه دانه‌های باطله‌های معدنی از ریزدانه تا درشت (در حد بلوک) می‌تواند متفاوت باشد و این گستره دانه‌بندی می‌تواند ناهمگنی قابل توجه در دمپ در اثر انباشت ایجاد کند. نحوه دپو کردن این باطله‌ها بر روی توزیع رطوبت و خصوصیات مواد تأثیر گذار است. حضور کانی‌های سولفیدی همراه باطله‌ها و اکسایش آنها در مجاورت آب و هوا، منجر به تولید اسید معدنی (ARD) یا زهاب اسیدی (AMD) می‌شود. اسید معدنی با حل کردن فلزات سنگین و سمی در خود و مهاجرت این فلزات به خاک و آب منطقه، موجبات آلودگی محیط‌زیست را فراهم می‌آورد. بنابراین نیاز به بررسی و ارزیابی پتانسیل آلودگی و توزیع این عناصر سنگین در باطله‌های معدنی وجود دارد. با مروری بر تحقیقات گذشته، نتایج نشان می‌دهد که اکثر مطالعات انجام شده به بررسی آلودگی ناشی از باطله‌های معادن سولفیدی پرداخته‌اند و نحوه توزیع و شدت آلودگی عناصر آلاینده در محیط‌های اطراف این باطله‌ها (خاک و آب) ارزیابی شده است. در این مطالعات، منابع اصلی تولید آلودگی هم‌چون دمپ‌های باطله معدنی که از نوع تیپ سولفیدی-کربناتی است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، بررسی مشخصات ژئوزیست‌محیطی^۱ منابع اصلی آلودگی (باطله‌های معدنی) از این نوع ذخایر می‌تواند اطلاعات مفیدی از منشأ آلودگی، الگویی از گونه‌پذیری عناصر سمی و همچنین عوامل کنترل‌کننده آلودگی را پیش‌بینی و ارزیابی کند. این اطلاعات می‌تواند یک راهکار مناسب جهت مدیریت صحیح از نحوه طبقه‌بندی ریسک آلودگی و استراتژی‌های احیاء و بازسازی در این نوع معادن باشد. ذخایر سرب و روی سولفیدی با میزبان کربناتی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی حائز اهمیت هستند. حضور کانی‌های سولفیدی به عنوان منبع تولید‌کننده آلودگی از یک طرف و حضور میزبان‌های کربناته از طرف دیگر، باعث شده که بررسی اثرات این نوع باطله‌ها بر محیط‌زیست به صورت جدی در

1- Geo-environmental

نظر گرفته نشود و تاکنون مطالعات علمی دقیقی روی پتانسیل تولید آلودگی باطله‌های این نوع تیپ ذخایر در جایی صورت نگرفته است. در این رساله سعی بر این است تا با استفاده از تلفیقی از روش‌های ژئوشیمیایی، آزمایشگاهی، کانی‌شناسی و ژئوفیزیکی بتوان خصوصیات ژئوزیست‌محیطی و پتانسیل تولید آلودگی این نوع باطله‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به موارد اشاره شده، سوال‌های اصلی تحقیق بشرح زیر بیان می‌گردد:

- ✓ آیا دمپ باطله معادن سولفیدی - کربناتی پتانسیل تولید آلودگی را دارد؟
- ✓ حضور کانی‌های سولفیدی و کربناته چه تأثیری بر تولید آلودگی دارد؟
- ✓ آیا ارتباط معنی‌داری بین آلودگی و عناصر سنگین در دمپ باطله وجود دارد؟
- ✓ باتوجه به منبع آلودگی، شدت و نوع عناصر آلاینده در دمپ چگونه می‌باشد؟
- ✓ رابطه بین آلاینده‌ها با مقاومت یا هدایت ویژه چگونه است؟
- ✓ آیا از روش‌های ژئوفیزیکی ژئوالکتریک، الکترومغناطیس و مغناطیس می‌توان برای بررسی ساختار دمپ و شناسایی زون‌های آلوده در باطله‌های معادن سولفیدی - کربناتی استفاده کرد؟
- ✓ نوع و تیپ کانی‌سازی سولفیدی - کربناتی چه تأثیری بر تولید آلودگی دارد؟
- ✓ منشأ آلودگی و خنثی‌سازی در تیپ کانی‌سازی سولفیدی - کربناتی چه عواملی می‌تواند باشد؟
- ✓ نتایج حاصل از این مطالعه چه اطلاعاتی را در جهت کنترل و جلوگیری از نشت آلاینده‌ها فراهم می‌سازد؟

۱-۶- اهداف مطالعه

هدف اصلی این مطالعه، بهره‌گیری از چند روش جهت ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی از دمپ باطله‌های سرب و روی سولفیدی-کربناتی است. همچنین استفاده از روش ژئوشیمیایی برای ارزیابی ریسک آلودگی ناشی از حضور فلزات سنگین در دمپ و ارائه یک الگو از پهنه‌بندی ریسک آلودگی بر روی سطح دمپ، استفاده از روش آنالیز تمایز جهت طبقه‌بندی دمپ باطله از نظر ریسک آلودگی، به کارگیری آزمایش

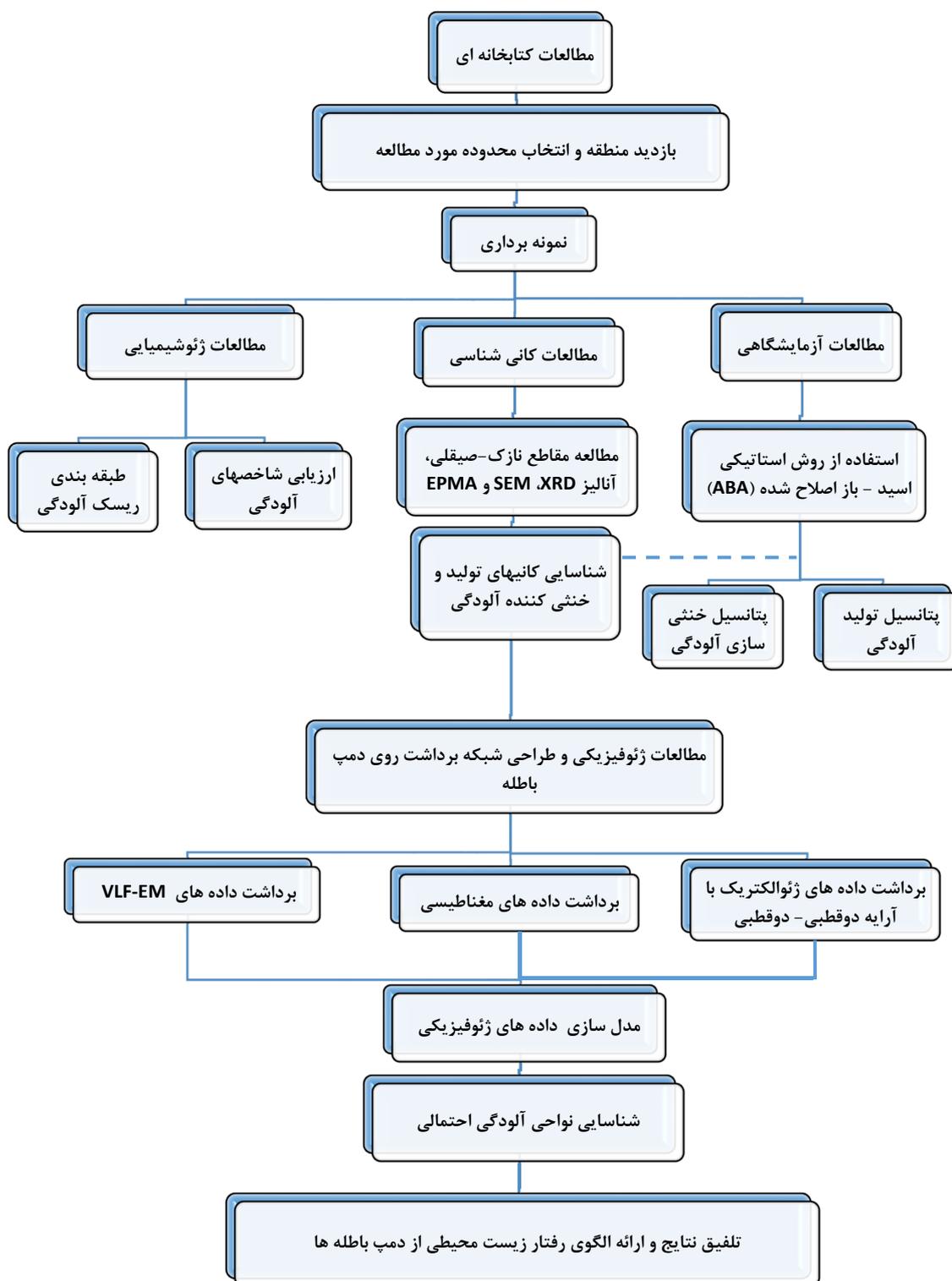
استاتیکی جهت بررسی قابلیت تولید یا خنثی‌سازی آلودگی باطله‌ها و استفاده از مطالعات کانی‌شناسی جهت بررسی ترکیبات کانی‌شناسی همراه باطله و شناسایی منابع اصلی تولید یا خنثی‌سازی آلودگی از اهداف تحقیق است. علاوه بر آن، بهره‌گیری از روش‌های ژئوفیزیکی به منظور بررسی نحوه نفوذ و گسترش سطحی و عمقی آلودگی احتمالی و شناسایی مسیرهای ترجیحی انتقال زهاب و یون‌های فلزی شسته شده به داخل دمپ در کنار رسیدن به یک الگوی اولیه از رفتارهای زیست‌محیطی در این تیپ باطله‌های سولفیدی-کربناتی نیز از دیگر اهداف این مطالعه است.

۱-۷- روش انجام تحقیق

روش تحقیق بدین صورت است که بعد از انتخاب محدوده مورد نظر، ابتدا نمونه‌برداری سطحی از دمپ مورد مطالعه صورت می‌گیرد. بر اساس نتایج آنالیز، مطالعات با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و شاخص‌ها جهت ارزیابی منشأ آلودگی، شدت و نوع عناصر آلاینده صورت می‌گیرد. در قدم دوم، مطالعات آزمایشگاهی جهت ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی با استفاده از آزمایش استاتیکی اسید- باز اصلاح شده از نمونه‌های دمپ انجام می‌گیرد. در قدم سوم جهت درک بهتر و صحیح‌تر از نتایج مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات کانی‌شناسی به روش مقاطع نازک - صیقلی، XRD، SEM و EPMA^۱ انجام می‌شود. در مرحله بعد با برداشت و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی ژئوالکتریک، الکترومغناطیس با فرکانس بسیار پایین (VLF^۲) و مغناطیس‌سنجی، ساختار داخلی دمپ و چگونگی گسترش زون‌های آلوده در داخل دمپ باطله انجام می‌گیرد. در انتها با جمع‌بندی نتایج، پتانسیل تولید آلودگی در باطله‌های سرب و روی سولفیدی-کربناتی که تاکنون صورت نگرفته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روش تحقیق و مراحل مختلف آن به صورت فلوچارتی در شکل (۱-۱۳) نشان داده شده است.

1- Electron probe micro-analyzer (EPMA)

2 - Very low frequency (VLF)



شکل ۱-۱۳- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

۱-۸- ساختار رساله

رساله مورد مطالعه، شامل شش فصل مجزا می‌باشد. فصل اول شامل کلیاتی از باطله‌های معدنی و مشکلات زیست‌محیطی در ارتباط با آنها، مروری بر سوابق مطالعات انجام شده، ضرورت و اهداف تحقیق است. در فصل دوم روش‌های مورد استفاده در ارزیابی مشخصات ژئوزیست‌محیطی دمپ‌های باطله توضیح داده شده است. فصل سوم به تشریح موقعیت جغرافیایی منطقه، زمین‌شناسی، الگوی ژنتیکی و کانی‌زائی ذخایر سولفیدی با سنگ میزبان کربناته و مختصری در مورد خصوصیات دمپ باطله‌های محدوده مورد مطالعه می‌پردازد. فصل چهارم نحوه نمونه‌برداری، آنالیزها و روش‌های اندازه‌گیری را بررسی می‌کند. در فصل پنجم نتایج حاصل از آنالیزها و روش‌های اندازه‌گیری، مورد تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی قرار گرفته و همچنین در مورد پهنه‌بندی ریسک آلودگی، پتانسیل تولید یا خنثی‌سازی آلودگی، شناسایی ترکیبات کانی‌شناسی مؤثر در تولید یا خنثی‌سازی آلودگی بحث می‌شود. در ادامه با استفاده از نتایج برداشت، پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی به شناسایی زون‌های آلوده و نحوه گسترش آنها پرداخته شده و با اعتبارسنجی و مقایسه نتایج حاصل، یک مدل ژئوزیست‌محیطی از باطله‌های معدنی ارائه می‌شود. در فصل ششم نتایج به دست آمده ارائه شده و پیشنهاداتی برای احیاء و بازسازی محل انباشت باطله‌ها و مواردی برای انجام مطالعه و بررسی بیشتر ارائه شده است.

فصل دوم: ارزیابی خصوصیات ژئوزیست محیطی

باطله های معدنی

۲-۱- مقدمه

اولین گام در مطالعات زیست محیطی باطله‌های معدنی، شناخت کامل از خصوصیات و همچنین درک صحیح از مکانیزم تولید و گسترش آلودگی ناشی از این نوع باطله‌ها به منظور مدیریت صحیح و کنترل و پایش آلودگی است. امروزه روش‌های مختلفی از جمله مطالعات ژئوشیمیایی، کانی‌شناسی [Hiller et al., 2013]، ژئوفیزیکی و تست‌های آزمایشگاهی (استاتیکی و سینتیکی) [Bouzahzah et al., 2014] این توانایی را دارند که مشخصات ژئوزیست محیطی و پتانسیل تولید آلودگی ناشی از دмп‌های باطله را به خوبی ارزیابی کنند. همچنین نتایج این مطالعات امکان توسعه یک مدلی را خواهد داد که به طور کامل و دقیق خصوصیات و رفتارهای زیست محیطی از سایر باطله‌های معدنی مشابه را در آینده نیز پیش‌بینی کند. در این میان، خصوصیات یا مدل‌های ژئوزیست محیطی از دмп باطله‌های معدنی را می‌توان به عنوان یک رویکرد کارآمد در فهم و شناخت رفتار باطله‌های معدنی معرفی کرد [Martin-Crespo et al., 2018]. در این فصل، ضمن معرفی مدل ژئوزیست محیطی، به ارائه توضیحاتی راجع به روش‌های مورد استفاده در این تحقیق جهت بررسی خصوصیات ژئوزیست محیطی دмп باطله‌های سرب و روی انگوران پرداخته می‌شود.

۲-۲- مدل‌های ژئوزیست محیطی

زمین‌شناسان اقتصادی تمایل دارند که ذخایر معدنی را بر اساس معیارهای زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی طبقه‌بندی کنند. این تلاش‌ها منجر به طبقه‌بندی ذخایر بر مبنای نوع، موقعیت زمین‌شناسی، استنباط از دما و فشار شکل‌گیری ماده معدنی و مدل ژنتیکی ذخایر می‌شود که منجر به ارائه "مدل‌های مفهومی از ذخایر معدنی" می‌گردد که به عنوان راهنمای اکتشافی جهت ارزیابی پتانسیل ذخایر معدنی کشف نشده با خصوصیات زمین‌شناسی مشابه، مورد استفاده قرار می‌گیرند [Plumlee and Nash, 1995].

مدل‌های ژئوزیست محیطی شکلی از مدل‌های ذخایر معدنی هستند که به‌عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی اثرات زیست محیطی ناشی از معدن و معدن‌کاری توسعه یافته‌اند و شامل مجموعه‌ای از اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، هیدرولوژی، آزمایشگاهی، کانی‌شناسی و ... است. اصل بر این است که دانش کافی در مورد ویژگی‌های اقتصادی ذخایر معدنی نه تنها ذخایر معدنی را از نظر اقتصادی طبقه‌بندی می‌کند بلکه کلاسه‌بندی ذخایر را از جنبه زیست محیطی نیز امکان‌پذیر می‌کند. یک مدل ژئوزیست محیطی قادر است اطلاعاتی در مورد تغییرات ژئوشیمیایی در ارتباط با یک ذخیره معدنی خاص، تغییرات ژئوشیمیایی در ارتباط با زهاب‌های معدنی، باطله‌های معدنی و فرآوری ارائه کند. با کمک مدل‌های ژئوزیست محیطی همچنین می‌توان خصوصیات فیزیکی- شیمیایی باطله‌ها، از جمله ماهیت زمینه، پتانسیل تولید و خنثی‌سازی اسید، هیدروشمی، ترکیب باطله‌های معدنی و غیره را پیش‌بینی کرد [Craw et al., 2015; Dent et al., 2016; Koscova et al., 2018].

پلوملی و همکاران در سال ۱۹۹۹، با گردآوری داده‌های آنالیز شده از زهاب خروجی و باطله معدنی چندین معدن مختلف، مدل ژئوزیست محیطی طیف گسترده‌ای از انواع ذخایر معدنی را بر اساس نمودارهای فیکلین^۱ مورد بررسی قرار دادند. در نمودار فیکلین، مجموع غلظت فلزهای Pb, Cu, Zn، Cd، Co و Ni در مقابل pH به نقشه در می‌آید. نتایج تحقیقات پلوملی و همکاران نشان داد که با تفسیر داده‌ها توسط این نمودارها، امکان کنترل pH و غلظت فلزات سنگین وجود دارد. این موضوع ممکن است در انواع ذخایر مختلف، بر اساس ماهیت و میزان دگرسانی، ترکیب کانی، فلزات موجود در کانی، حضور کانی‌های تولید کننده اسید مانند پیریت و ظرفیت خنثی‌سازی اسید متفاوت باشد. شکل (۱-۲) نتایج مدل ژئوزیست محیطی از برخی ذخایر معدنی همچون سولفید توده‌ای ولکانیکی^۲ (VMS)، اپی‌ترمال سولفید بالا، مس و مس-مولیبدن پورفیری، رگه‌های پلی‌متال، رسوبات آواری^۳ (SEDEX)،

1- Ficklin

2- Volcanogenic massive sulfide (VMS)

3- Sedimentary-exhalative (SEDEX)

نوع دره می‌سی‌سی‌پی^۱ (MVT)، اورانیوم با میزبان سنگ‌های رسوبی و اسکارن و جانشینی پلی‌متال را نشان می‌دهد. در این شکل، تعدادی از خطوط، روند افزایش پیریت، سولفیدهای فلزی و کربنات محتوی در ذخیره را نشان می‌دهد. همان طور که در نمودارها نشان داده شده است، افزایش پیریت منجر به تشکیل زهاب اسیدی بیشتر می‌شود. افزایش سولفیدهای فلزی منجر به افزایش غلظت فلزات سنگین می‌شود و افزایش کربنات منجر به تولید زهاب کلیایی می‌شود. با این حال، این روندها باید با ملاحظات و احتیاط بیشتری تفسیر شوند [Plumlee et al., 1999].

۲-۳- روش‌های ارزیابی مشخصات ژئویست محیطی دمپ‌های باطله

۲-۳-۱- مطالعات ژئوشیمی زیست محیطی

از مهم‌ترین کاربردهای علم ژئوشیمی، پایش آلودگی ناشی از عملیات معدن‌کاری شامل اکتشاف، استخراج، بهره‌برداری، کانه‌آرایی و ذوب فلزات را می‌توان اشاره نمود. در این میان، آلودگی فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست محیطی در سرتاسر جهان می‌باشد [Mireles, 2012; Yaylali, 2011]. یکی از موارد مهم که در ارزیابی ژئوشیمیایی این نوع آلودگی‌ها باید در نظر گرفت، منشأ فلزات سنگین و عوامل مؤثر پراکنش آنها در خاک‌ها می‌باشد. مطالعات ژئوشیمی زیست محیطی جهت ارزیابی آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های مختلفی انجام می‌شود. در این میان، شاخص‌های درجه آلودگی اصلاح شده^۲ (mCd) و ریسک اکولوژیک^۳ (RI) را می‌توان به عنوان شاخص‌های تجمیعی معرفی کرد، که به دلیل تجمیع فلزات در محاسبات، باعث کاهش حجم داده‌های نهایی و تفسیر راحت‌تر در ارزیابی اولیه می‌شود. با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان نوع عنصر آلوده، شدت و نحوه توزیع آلودگی را مورد ارزیابی قرار داد [Manna and Maiti, 2017].

1- Mississippi valley type (MVT)

2- Modified degree of contamination (mCd)

3- Ecological risk Index (RI)

همچنین، روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره از جمله تکنیک آنالیز تمایز این قابلیت را دارند که ریسک آلودگی ناشی از این آلاینده‌ها را طبقه‌بندی و پیش‌بینی کنند. مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، اگرچه با استفاده از شاخص‌های ارزیابی و روش‌های آماری چند متغیره (از قبیل رگرسیون، تحلیل همبستگی و آنالیز فاکتوری) آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های خاکی و آبی اطراف محدوده معدنی مورد مطالعه قرار گرفته است. [Vu et al, 2017; Cao et al., 2018; Weissmannova et al., 2019] ولی در مورد به کارگیری از شاخص‌های تجمیعی و تکنیک آنالیز تمایز در بررسی این نوع آلاینده‌ها بر روی دمپ‌های باطله معدنی گزارشی در دسترس نیست.

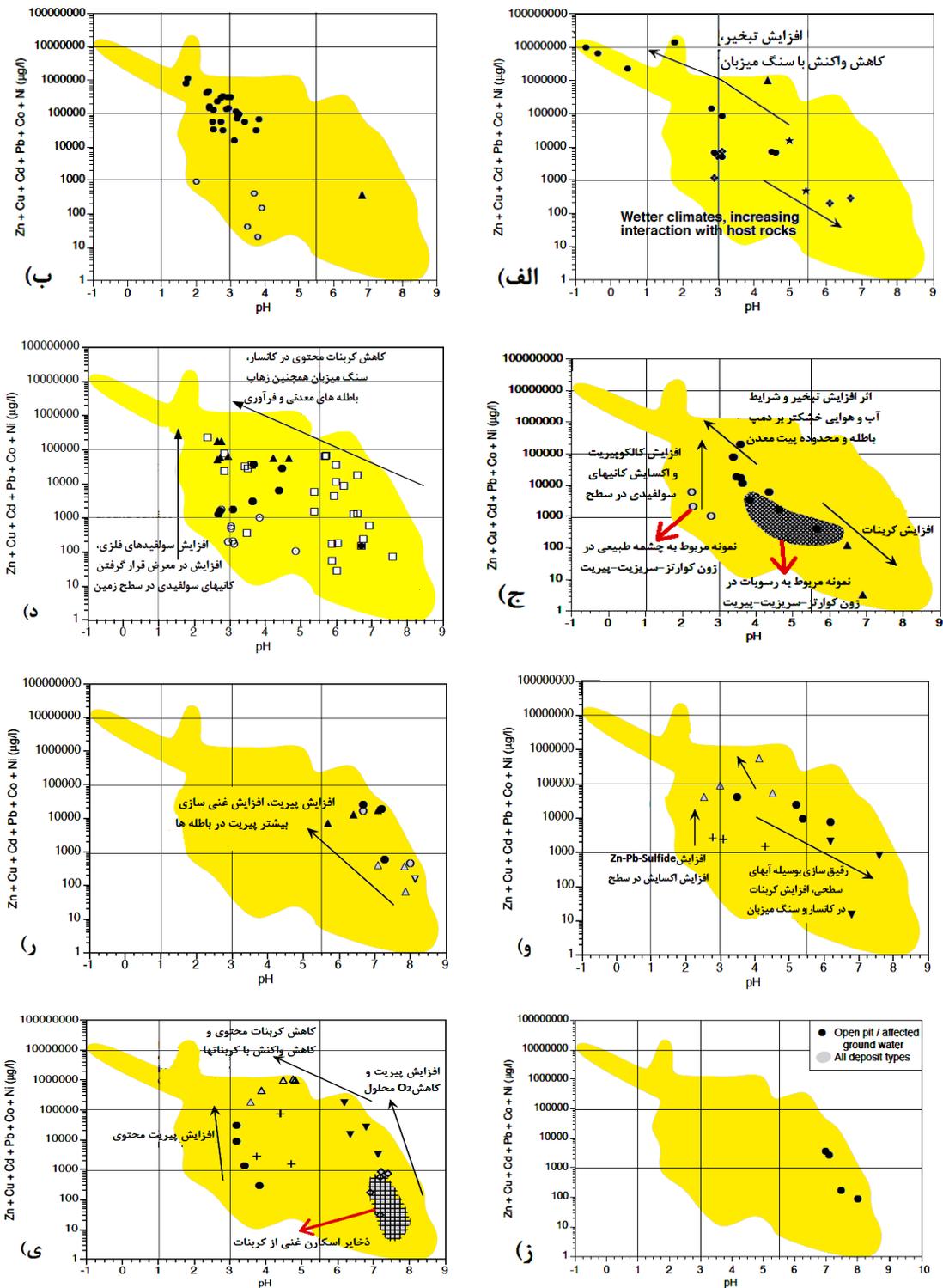
۲-۳-۱-۱- شاخص درجه آلودگی اصلاح شده

شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mC_d) روشی برای تخمین میزان آلودگی محیط به یک یا چند فلز است، که در سال ۲۰۰۸ توسط ابراهیم و پارکر مطابق رابطه (۱-۲) ارائه شد [Abraham and Parker, 2008].

$$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^n C_f}{n} \quad (1-2)$$

$$C_f = \frac{C_i}{B_i} \quad (2-2)$$

که در آنها، C_f فاکتور آلودگی برای هر آلاینده، n تعداد فلزات مورد مطالعه، C_i غلظت فلز سنگین اندازه‌گیری شده در یک نمونه و B_i مقدار زمینه می‌باشد. طبق نظر این محققین طبقه‌بندی سطوح آلودگی با استفاده از این شاخص در جدول (۱-۲) ارائه شده است.



شکل ۱-۲- تغییرات مجموع غلظت فلزات سنگین در برابر pH در زهاب انواع ذخایر معدنی مختلف از قبیل الف) ذخایر سولفید توده‌ای VMS (ب) ذخایر اپی ترمال سولفید بالا، ج) ذخایر مس و مس-مولیبدن پورفیری (د) ذخایر پلی متال رگه‌ای، و) نوع SEDEX (ر) نوع MVT (ز) ذخایر اورانیوم با میزبان سنگ‌های رسوبی، ی) ذخایر اسکارن و جانمایی پلی‌متال [After Plumlee et al., 1999]

جدول ۱-۲- رده‌های متفاوت آلودگی براساس شاخص درجه آلودگی اصلاح شده [Abraham et al., 2008]

mC_d	درجه آلودگی
$mC_d < 1/5$	آلودگی ناچیز
$1/5 < mC_d < 2$	آلودگی کم
$2 < mC_d < 4$	آلودگی متوسط
$4 < mC_d < 8$	آلودگی بالا
$8 < mC_d < 16$	آلودگی بسیار بالا
$16 < mC_d < 32$	آلودگی شدید
$mC_d > 32$	آلودگی بی‌نهایت شدید

۲-۳-۱-۲- شاخص ریسک اکولوژیک

روش شاخص ریسک اکولوژیک (RI) اولین بار توسط آقای هاکانسون^۱ در سال ۱۹۸۰ جهت ارزیابی آلودگی و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از فلزات سنگین در مناطق معدنی پیشنهاد شد و به طور گسترده در سایر مناطق شهری و صنعتی نیز مورد استفاده قرار گرفت [Hakanson, 1980]. این روش نسبتاً جامع، بر اساس غلظت، میزان سمی بودن و حساسیت‌های زیست‌محیطی فلزات سنگین به وسیله محققان مختلفی به کار گرفته شده است [Mugosa et al., 2016; Chen et al., 2017]. مطابق این روش، پتانسیل ریسک اکولوژیک برای یک عنصر (E_r^i) و شاخص ریسک اکولوژیک برای چند عنصر (RI) بر اساس روابط (۲-۳) و (۲-۴) قابل محاسبه است.

$$E_r^i = T_i \times C_f \quad (۲-۳)$$

$$RI = \sum_n^{i=1} E_r^i \quad (۲-۴)$$

که در آنها، C_f فاکتور آلودگی برای هر آلاینده، T_i فاکتور سمی بودن برای یک عنصر معین، C_i غلظت فلز سنگین اندازه‌گیری شده در یک نمونه و B_i مقدار زمینه فلز مورد بررسی می‌باشد. به دلیل اینکه B_i

1- Hakanson

مقدار واحد و یکسانی ندارد، می‌توان از برخی مقادیر پیشنهادی از جمله میانگین پوسته زمین، مقدار غلظت زمینه در منطقه مورد بررسی، استانداردهای زیست محیطی بین المللی، ملی، منطقه‌ای و غیره برای فلز مورد بررسی به عنوان زمینه در نظر گرفت [Mugosa et al., 2016].

مقادیر T_i از فلزات سنگین بر اساس نظر هاکنسون مطابق جدول (۲-۲) ارائه شده است و طبقه‌بندی سطح آلودگی بر اساس مقادیر به دست آمده از این شاخص، مطابق جدول (۳-۲) می‌باشد.

جدول ۲-۲- فاکتور سمیت فلزات سنگین [Hakanson, 1980; Li et al., 2015]

عناصر	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
فاکتور سمیت	۱۰	۳۰	۲	۵	۵	۵	۱

جدول ۳-۲- طبقه‌بندی مقادیر شاخص پتانسیل ریسک زیست محیطی (RI) [Hakanson, 1980]

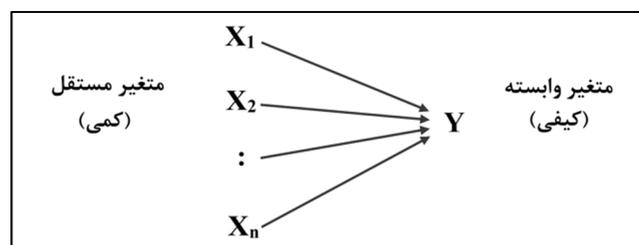
E_r^i	سطح آلودگی	RI	سطح آلودگی
$E_r^i < 40$	پایین	$RI < 150$	پایین
$40 < E_r^i < 80$	متوسط	$150 < RI < 300$	متوسط
$80 < E_r^i < 160$	قابل توجه	$300 < RI < 600$	قابل توجه
$160 < E_r^i < 320$	زیاد	$RI > 600$	خیلی زیاد
$320 < E_r^i$	خیلی زیاد		

۲-۳-۱-۳- آنالیز تمایز^۱

روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره ابزارهای مفیدی هستند که امروزه به طور گسترده جهت مدیریت و تفسیر صحیح داده‌های اکتشافی و به خصوص پارامترهای حاصل از مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، مطالعات ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی [گرانیان و همکاران، ۱۳۹۴] و همچنین مدیریت بهتر در راستای ارزیابی و پایش‌های زیست محیطی توسعه فراوان یافته است [Levitan, 2014; Gasmi et al., 2016].

1- Discriminant Analysis (DA)

یکی از روش‌های چند متغیره کارآمد، روش آنالیز تمایز (DA) می‌باشد که در واقع به نوعی یک روش آنالیز واریانس چند متغیره است. روش آنالیز تمایز یا آنالیز تشخیص اولین بار توسط آقای فیشر و ماهالانوبیس^۱ در سال ۱۹۳۶ معرفی شد [Fisher., 1936; Mahalanobis., 1936]. هدف آنالیز تمایز به دست آوردن یک مدل جهت پیش‌بینی یک متغیر کیفی از روی یک یا چند متغیر مستقل است. علاوه بر این، اجازه می‌دهد تا مشاهدات جدید داخل یکی از گروه‌های از قبل شناخته شده، طبقه‌بندی شود. آنالیز تمایز منتج به معادله‌ای می‌شود که به صورت ترکیب خطی از متغیرهای مستقل بیان می‌شود و هدف تفکیک بهتر بین گروه‌ها در متغیر وابسته است. این ترکیب خطی به نام تابع تمایز^۲ (Df) شناخته می‌شود. بنابراین پیدا کردن تابع یا توابع تمایز می‌تواند به طبقه‌بندی مطلوب مشاهدات جدید بر اساس خصوصیات اصلی‌شان کمک کند. وزن‌های اختصاص داده شده به هر متغیر مستقل برای ارتباط بین همه متغیرها به عنوان ضریب تمایز^۳ بیان می‌شوند. شکل (۲-۲) مدل مفهومی در آنالیز تمایز را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- مدل مفهومی آنالیز تمایز

به طور کلی تابع تمایز یا تشخیص (Df) برای طبقه‌بندی دو گروه، به صورت رابطه (۲-۵) بیان می‌گردد.

$$Df = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (۲-۵)$$

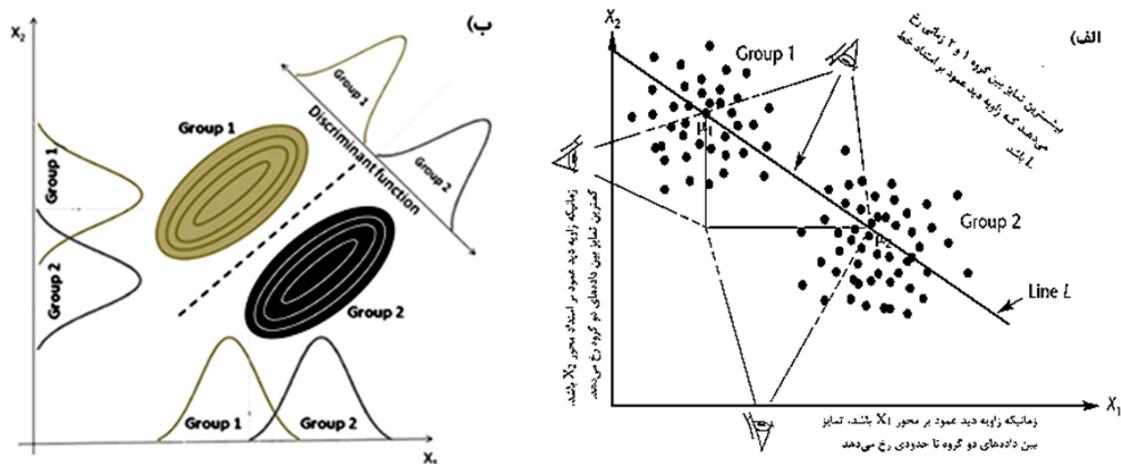
که در آن:

- 1- Fisher and Mahalanobis
- 2- Discriminant Function (DF)
- 3- Discriminant coefficients

Df تابع تمایز، X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای مستقل، n تعداد متغیرهای تخمین‌گر، a_1 تا a_n ضرایب تفکیک کننده و a_0 مقدار ثابت می‌باشند. تعداد توابع معمولاً یکی کمتر از تعداد گروه‌های شناخته شده است. به عبارتی برای K گروه $K-1$ تابع تمایز ایجاد می‌شود [هندی و حسنی‌پاک، ۱۳۹۲].

جهت درک بهتر، بخش الف از شکل (۳-۲) نشان می‌دهد که چگونه یک تابع تمایز توسعه پیدا می‌کند. در اینجا به دنبال امتداد برداری از ترکیب متغیرها هستیم که باعث بیشینه ساختن جدایش بین دو گروه می‌شود (در اینجا دو متغیر X_1 و X_2). همان‌طور که در شکل (۳-۲-الف) مشاهده می‌شود، اگر امتیازات تمایز فقط بر اساس مؤلفه X_2 به دست آید، جدایش خوبی بین دو گروه حاصل نمی‌شود. به عبارتی، اگر از محور X_2 به امتیازات تمایز نگاه شود، دو گروه دارای همپوشانی^۱ هستند. همان طوری که مشاهده می‌شود از این دیدگاه، برخی از امتیازات بالا در گروه دو به عنوان امتیازات پایین در گروه یک لحاظ می‌شوند. حال اگر از محور X_1 به امتیازات تمایز نگاه شود، جدایش بهتری بین دو گروه ایجاد می‌شود، هر چند از این دیدگاه، به راحتی قادر نخواهیم بود یک نقطه را متعلق به یک گروه مشخص بر اساس موقعیت مکانی طبقه‌بندی کرد. بنابراین در آنالیز تمایز، هدف بر این است که یک محور جدید همچون L تعریف شود که از مرکز دو گروه (میانگین‌ها) عبور کرده و تصاویر امتیازات مربوط به دو گروه در امتداد این محور بیشترین تمایز را نشان دهند که به خوبی در شکل (۳-۲-الف) نشان داده شده است. همچنین، در امتداد خط L به راحتی می‌توان موقعیت نقاط جدید که تعلق آن‌ها به یکی از دو گروه نامعلوم است را طبقه‌بندی کرد. با ترسیم توزیع به دست آمده از امتیازات تمایز بر اساس توابع ترسیم شده در امتداد محورها به خوبی می‌توان عملکرد آنالیز تمایز را مورد بررسی قرار داد. هر چه میزان هم‌پوشانی توزیع امتیازات بین دو گروه کمتر باشد حاکی از عملکرد خوب آنالیز تمایز می‌باشد (شکل ۳-۲-ب).

1- Overlap



شکل ۲-۳- الف) بیشینه‌سازی جدایش بین دو گروه (ب) توزیع امتیازات تمایز در امتداد محورها، که بیشترین جدایش بین دو گروه در امتداد محور جدید (تابع تمایز) حاصل شده است [After Robotti et al., 2014].

۲-۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی

به طور کلی روش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی به دو گروه روش‌های استاتیکی و سینتیکی دسته‌بندی می‌شوند و عواملی که بر انتخاب روش نمونه‌برداری و نوع آزمایش تأثیر می‌گذارند شامل زمین‌شناسی منطقه، هزینه‌ها و مدت زمان لازم برای اجرای آزمایش‌ها می‌باشند. روش‌های پیش‌بینی استاتیکی مختلفی به منظور ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی از باطله‌های معدنی موجود است [Plante et al., 2012]. آزمایش‌های استاتیکی، پتانسیل کلی تولید و خنثی‌سازی آلودگی از یک نمونه باطله را تخمین می‌زنند و در مقایسه با آزمایش‌های سینتیکی، سریع و کم هزینه‌تر می‌باشند. آزمایش‌های سینتیکی تمایل به شبیه‌سازی فرآیندهای تولید آلودگی را دارند که معمولاً با نرخ سریع در محل معدن می‌تواند انجام شود. این آزمایش‌ها نیاز به زمان زیادی دارند و به طور قابل توجهی گران‌تر از روش‌های استاتیکی هستند [Bouzahzah et al., 2014].

۲-۳-۲-۱- آزمایش استاتیکی

یکی از مرسوم‌ترین روش‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی از باطله‌های معدنی، آزمایش اسید-باز^۱ (ABA) می‌باشد که در سال ۱۹۷۸ توسط سوپک و همکارانش مورد استفاده قرار

1- Acid-Base Accounting (ABA)

گرفت [Sobek et al., 1978] و در سال ۱۹۸۹ توسط لارنس و همکاران اصلاح و با نام اسید- باز اصلاح شده^۱ (Modified ABA) معرفی شد [Lawrence et al., 1989]. قابلیت تولید یا خنثی‌سازی اسید از باطله‌های معدنی، احتیاج به تخمین پتانسیل تولید آلودگی^۲ (AP) و پتانسیل خنثی‌سازی آلودگی^۳ (NP) می‌باشد. سرانجام پتانسیل خنثی‌سازی خالص^۴ (NNP) از طریق اختلاف NP و AP (NNP=NP-) و یا در بعضی موارد نسبت NP/AP بر حسب کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن محاسبه و تفسیر می‌شود. بر اساس مقادیر به دست آمده، نمونه‌ها به انواع باطله‌های حاوی پتانسیل تولید آلودگی (NNP<-۲۰)، پتانسیل خنثی‌سازی آلودگی (NNP>+۲۰) و مقادیر نامشخص (-۲۰<NNP<+۲۰) کلاسه‌بندی می‌شوند [Mohammadi et al., 2015].

در این روش مقدار AP مستقیماً از مقادیر سولفور کل (S_{Total}) یا سولفید (S_{Sulphide}) بیان شده به صورت درصد وزنی (Wt%) محاسبه می‌شود. با ضرب مقدار S_{Total} یا S_{Sulphide} در ضریب ۳۱/۲۵، مقدار پتانسیل تولید اسید بر حسب کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن مطابق رابطه (۲-۶) به دست می‌آید [Parbhakar-Fox and Lottermoser, 2015].

$$AP = (\%) \text{ سولفید یا سولفور کل} \times 31.25 \text{ Kg CaCO}_3/\text{t} \quad (۲-۶)$$

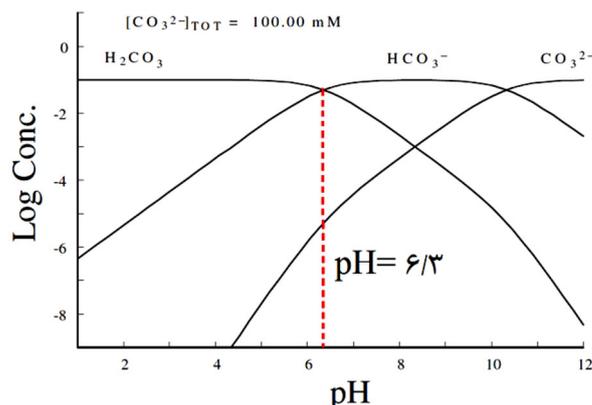
ضریب ۳۱/۲۵ از رابطه استوکیومتری واکنش اکسایش پیریت و خنثی‌سازی اسید توسط کلسیت به دست می‌آید. مکانیزم خنثی‌سازی اسید توسط کلسیت بر اساس تابعی از pH محیط در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.

1- Modifide Acid-Base Accounting (Modified ABA)

2- Acid Potential (AP)

3- Neutralization Potential (NP)

4- Net-Neutralization Potential (NNP)



شکل ۲-۴- توزیع اجزاء محلول در سیستم بسته کربناتی آبدار به صورت تابعی از pH [Dold, 2017]

همان طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، زمانی که pH محیط کمتر از ۶/۳ باشد، در اثر انحلال کلسیت، گونه غالب محلول به صورت اسید کربنیک (H_2CO_3) خواهد بود و واکنش خنثی‌سازی به صورت رابطه (۷-۲) بیان می‌شود.



بیشتر روش‌های محاسبه اسید-باز (ABA) فرض می‌کنند، یون H_2CO_3 جزء غالب در سیستم کربناتی است. در pHهای کمتر از ۶/۳، مطابق رابطه (۷-۲)، یک مول کلسیت قادر خواهد بود دو مول H^+ را خنثی کند. از آنجایی که در اثر اکسایش پیریت ۴ مول پروتون (H^+) تولید می‌شود و پیریت حاوی دو مول سولفور است، بنابراین فرض بر این است که دو مول H^+ تولید شده از یک مول سولفور توسط یک مول کلسیت خنثی می‌شود. این فرضیه منجر به محاسبه ضریب ۳۱/۲۵ بر اساس رابطه (۸-۲) می‌شود:

$$\frac{100(\text{mole weight calcite})}{32(\text{mole weight sulfur})} \times 10 \left(\frac{tCaCO_3}{1000t} \right) = 31.25 \quad (8-2)$$

ضریب ۱۰ یک واحد کاربردی است که نشان می‌دهد چه مقدار کربنات به واحد $\left(\frac{tCaCO_3}{1000t} \right)$ (یا گرم بر کیلوگرم یا %) برای خنثی‌سازی سیستم باید به محصولات تولید شده از AMD اضافه شود.

حال اگر pH محیط بیشتر از ۶/۳ باشد، تا زمانی که کلسیت به عنوان خنثی کننده در سیستم موجود باشد، انحلال آن منجر به آزادسازی بی‌کربنات (HCO_3^-) در محلول تحت شرایط $pH > 6.3$ محیط خواهد شد (شکل ۲-۴). در این صورت واکنش خنثی‌سازی اسید به صورت رابطه (۹-۲) بیان می‌گردد:



به عبارتی خنثی‌سازی یک مول H^+ به ازای یک مول کلسیت حل شده رخ خواهد داد. بنابراین در pH بیشتر از ۶/۳، نیاز به دو مول کلسیت برای خنثی‌سازی دو مول H^+ تولید شده از یک مول سولفور است. این منجر به محاسبه ضریب ۶۲/۵ بر اساس رابطه (۲-۱۰) می‌شود:

$$2 \times \frac{100(\text{mole weight calcite})}{32(\text{mole weight sulfur})} \times 10 \left(\frac{\text{tCaCO}_3}{1000\text{t}} \right) = 62.5 \quad (10-2)$$

از این‌رو، در محاسبات ABA، رابطه (۲-۷) باید به جای رابطه (۲-۷) در نظر گرفته شود و با ضرب مقدار S_{Total} یا S_{Sulphide} در ضریب ۶۲/۵ به جای ۳۱/۲۵، مقدار پتانسیل تولید اسید (AP) به دست می‌آید [Dold, 2017].

مقادیر NP با روش استاتیکی ABA اصلاح شده با اضافه کردن اسیدکلریدریک (HCL) به نمونه و انحلال تحت شرایط محیط (به مدت ۲۴ ساعت) و در نهایت تیتراسیون معکوس با سود (NaOH) تا نقطه پایانی pH=۸/۳ به دست می‌آید. هر دو مقدار بر حسب کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن بیان می‌شوند.

۲-۳-۳- آنالیزهای کانی‌شناسی

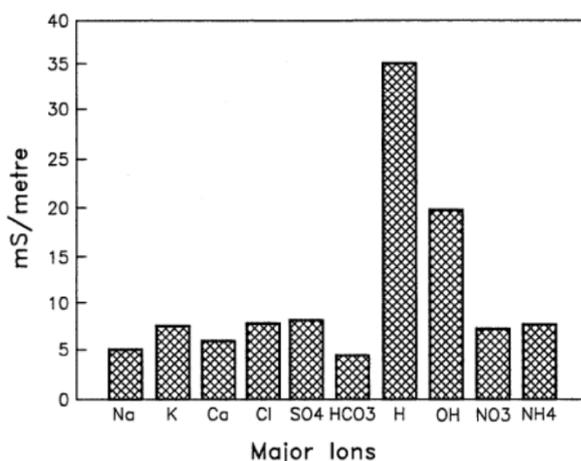
بکارگیری مطالعات کانی‌شناسی باطله‌های معدنی در ارزیابی پتانسیل آلودگی باعث بهبود ریسک ارزیابی و به عنوان راهنمای مفید جهت برنامه‌ریزی فعالیت‌ها حین معدن‌کاری و بهینه‌سازی فرآیندها پس از معدن‌کاری می‌باشد. در بسیاری موارد نتایج حاصل از آزمایش‌های پیش‌بینی تولید اسید به تنهایی قابل تفسیر نیست و معمولاً از شواهد کانی‌شناسی به خصوص فاز کربنات و سولفید برای تفسیر صحیح این اطلاعات استفاده می‌شود [Jamieson et al., 2015]. از نتایج ارزشمند در مطالعات کانی‌شناسی باطله‌ها می‌توان به بررسی و تعیین کانی‌های اولیه و ثانویه در باطله‌ها و نقش آنها در انتقال فلزات و شدت آلودگی [Smuda et al., 2007; Hammarstorm et al., 2003]، بررسی کانی‌های تولید کننده اسید (پیریت) و خنثی کننده اسید (کربناته) [Miler and Gosar, 2012]، درک صحیحی از ثبات واکنش تحت شرایط اکسایش-احیا و ... اشاره کرد. از جمله روش‌های مرسوم کانی‌شناسی می‌توان به روش‌های

XRF، XRD، میکروسکوپ نوری، الکترونی، آنالیز میکروسکوپی مبتنی بر سنکروترون و روش‌های خودکار اشاره کرد [Jamieson et al., 2015]. بررسی‌های متعددی با استفاده از روش‌های تحلیلی و مطالعات کانی‌شناسی بر روی باطله‌های معدنی انجام شده است. جهت مطالعات بیشتر می‌توان به این منابع اشاره کرد [Souissi et al., 2012; Assawincharoenkij et al., 2017; Modabberi, 2018]

۲-۳-۴- مطالعات ژئوفیزیک زیست محیطی

در طول چند دهه گذشته روش‌های ژئوفیزیکی به طور چشم‌گیر و با نتایج موفقیت آمیز در به تصویر کشیدن مناطق آلوده با پتانسیل بالایی از عناصر و ترکیبات سمی از جمله آلودگی ناشی از باطله‌های معدنی، صنعتی و لندفیل‌های شهری مورد استفاده قرار گرفتند [Rucker et al., 2009]. به منظور پایش و کنترل مناطق آلوده، نیاز به اطلاعات کامل زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و همچنین دانشی از رفتار و نحوه انتقال آلاینده‌ها می‌باشد. روش‌های ژئوفیزیکی به عنوان یک مکمل در ارائه این اطلاعات خیلی سودمند بوده و می‌توانند یک جایگزین مقرون به صرفه و غیر مخرب برای حفاری‌های گران‌قیمت نیز باشند. دمپ‌های باطله معدنی اغلب حاوی کانی‌های واکنش‌پذیر و ساختار داخلی ناهمگنی می‌باشند. واکنش‌های شیمیایی به واسطه ساختار داخلی ناهمگن دمپ، می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسب و مفید برای تعیین خصوصیات پتروفیزیکی و ساختار داخلی دمپ‌های باطله معدنی و همچنین شناسایی و نحوه گسترش آلودگی در داخل این دمپ‌ها به کار برده می‌شوند. تشخیص مناطق آلوده و نحوه گسترش آنها با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، می‌تواند اساس یک طراحی موفقیت آمیز در استراتژی بازسازی معادن باشد [Lghoul et al., 2012]. روش‌های ژئوالکتریکی (مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی) و الکترومغناطیس (VLF) را می‌توان از جمله روش‌های شناخته شده در بررسی مشکلات ناشی از زهاب‌های اسیدی (AMD) در ارتباط با باطله‌های معدنی و لندفیل‌های شهری یاد کرد [Baawain et al., 2018]. منابع علمی موجود نشان می‌دهد، یون‌های هیدروژن $[H^+]$ به عنوان مهم‌ترین مؤلفه از کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول در تعریف رسانایی

یک زهاب اسیدی است (شکل ۲-۵). قابلیت تحرک بسیار بالای این یون، منجر به افزایش خاصیت اسیدی و در نهایت انحلال برخی یون‌های اصلی و فلزی و همچنین افزایش^۱ TDS و^۲ TSS در زهاب اسیدی می‌شود.



شکل ۲-۵- نقش بعضی از یون‌ها در رسانایی آب زیرزمینی [مرادزاده و همکاران، ۱۳۹۱]

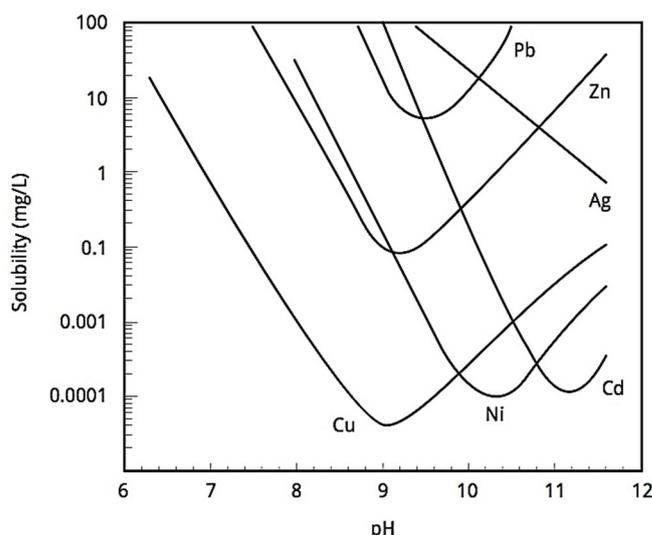
مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده از محل دمپ باطله‌های معدنی و صنعتی، به خوبی خصوصیات زهاب اسیدی را با افزایش خاصیت رسانایی در نتایج ژئوفیزیکی نشان داده است. از جمله تحقیقات انجام گرفته نشان داد، افزایش ذرات جامد محلول (TDS) باعث کاهش در مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده در برداشت‌های ژئوفیزیکی شده است [Rucker et al., 2009]. نتایج برداشت سه‌بعدی ژئوالکتریک و مطالعات هیدروشیمیایی انجام گرفته توسط پاور و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که افزایش مقادیر EC و TDS به شدت مقادیر مقاومت ویژه را کاهش می‌دهند و مقدار TSS در آب‌های زیرزمینی ممکن است بر پاسخ IP تأثیر بگذارد. به طوری که ذرات معلق در آب‌های منفذی می‌توانند منجر به افزایش بارپذیری شود [Power, 2018].

در مقابل، زهاب قلیایی دارای خصوصیات شیمیایی متفاوتی از زهاب اسیدی است. انحلال‌پذیری برخی یون‌های اصلی و فلزی تحت شرایط قلیایی و خاصیت شوری و قلیائیت در زهاب قلیایی می‌تواند از

1- Total dissolved solids (TDS)

2- Total suspended solids (TSS)

عوامل تأثیرگذاری بر خاصیت رسانایی زهاب قلیایی باشد. فرآیند تشکیل رسوب فلزات محلول در زهاب، به مقدار زیادی بستگی به pH دارد. در pHهای بالا بیشتر فلزات به صورت هیدروکسید رسوب می‌نمایند. با ادامه افزایش pH، حلالیت برخی اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی افزایش خواهد یافت. این موضوع در شکل (۲-۶) نشان داده شده است [دولتی ارده‌جانی و همکاران، ۱۳۸۳].



شکل ۲-۶- رفتار انحلال برخی هیدروکسیدهای فلزی نسبت به شرایط pH [دولتی ارده‌جانی و همکاران، ۱۳۸۳]

به عنوان مثال، بررسی‌های انجام گرفته بر روی باطله‌های معدن کالامین (ترکیبی از کانی‌های کربناتی و سیلیکاتی روی) در کشور بلژیک نشان می‌دهد که باطله‌های معدن حاوی کانی‌هایی هم‌چون اسمیت‌زونیت، سروزیت، سیدریت، کلسیت و ژیبس است. آزادسازی برخی فلزات سنگین موجود در باطله‌ها می‌تواند وابسته به ترکیبات کانی‌شناسی و شرایط pH محیط باشد. نتایج تست لیچینگ بر روی باطله‌ها به روش PH_{state} نشان داد که در مقادیر pH بالا، افزایش انحلال فلزات Cu و Zn و در برخی نمونه‌ها As، Pb و Ni مشاهده می‌شود که به احتمال زیاد به دلیل ویژگی آمفوتریک^۱ این عناصر است. بنابراین حضور یون‌های فلزی آزاد و کمپلکس‌های آنیونی ایجاد شده در زهاب خروجی تحت شرایط pH بالا، می‌تواند یکی از دلایل افزایش رسانایی باشد [Cappuyns et al., 2013]. نتایج بررسی آلودگی

1- Amphoteric

آب‌های سطحی با pH قلیایی در اطراف معدن سرب و روی در کشور لهستان نشان می‌دهد، بیشترین مقادیر EC مربوط به نمونه‌هایی است که بیشترین غلظت یون‌های فلزی و کمپلکس‌های آنیونی (غالباً کلرید و سولفات‌ها) را در بر دارند [Jablonska-Czapla et al., 2016]. نتایج به دست آمده از نمودارهای ژئوفیزیکی و آنالیزهای شیمیایی آب از لیچینگ یک لندفیل شهری در جنوب شرقی استرالیا نشان داد که یک همبستگی بالایی بین مقادیر HCO_3 و رسانایی الکتریکی اندازه‌گیری شده وجود دارد [Jorstad et al., 2004]. همچنین، بررسی‌های زیست‌محیطی انجام شده در اطراف یک لندفیل شهری در کشور برزیل نشان داد که بیشترین مقادیر EC (با مقادیر 1113 و 1006) و خاصیت قلیائیت از نمونه‌های آب زیرزمینی (با مقادیر 337 و 437 mg/L CaCO_3)، مربوط به محدوده‌ای است که در مدل ژئوفیزیکی به زون‌های آلوده تفسیر شده است [Lopes et al., 2012].

بررسی‌های زیست‌محیطی انجام شده از دمپ‌های باطله معدنی در نقاط مختلف جهان نشان داد که زهاب اسیدی همواره با خاصیت رسانایی بالا در نتایج ژئوفیزیکی مشخص می‌شود. اگرچه مطالعات محدودی توسط روش‌های ژئوفیزیکی در بررسی پساب با مقادیر pH بالا از لندفیل‌های شهری انجام گرفته است. ولی تاکنون در مورد پاسخ مدل‌های ژئوفیزیکی در ارتباط با زهاب قلیایی از باطله‌های معدنی گزارشی وجود ندارد. اگرچه روش مغناطیس‌سنجی کاربرد کمتری در این مورد دارد، ولی می‌توان از این روش در ارزیابی ریسک آلودگی فلزات سنگین استفاده کرد [Rachwal et al., 2017].

۲-۴- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا کاربرد مدل‌های ژئوزیست محیطی در معادن توضیح داده شد. در ادامه روش‌های ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی و بررسی خصوصیات ژئوزیست محیطی دمپ‌های باطله معدنی معرفی و بررسی شد. در میان روش‌های ژئوشیمیایی، شاخص‌های درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک به دلیل تجمع فلزات در محاسبات، باعث کاهش حجم داده‌های نهایی و تفسیر راحت‌تر در ارزیابی اولیه می‌شود. تکنیک آنالیز تمایز قادر است باطله‌ها را بر اساس سطح آلودگی طبقه‌بندی و طبقه

نمونه‌های جدید را پیش‌بینی کند. روش‌های آزمایشگاهی، از جمله روش استاتیکی ABA اصلاح شده این قابلیت را دارند که دمپ باطله را از نظر پتانسیل تولید یا خنثی‌سازی آلودگی مشخص کنند. مطالعات کانی‌شناسی سهم بسزایی در ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی از یک دمپ باطله بر اساس شناسایی ترکیبات کانی‌شناسی دارد. روش‌های ژئوفیزیکی VLF و مغناطیس‌سنجی به عنوان روش‌های سریع برای بررسی اولیه و روش ژئوالکتریک برای بررسی ساختاری و نحوه گسترش آلودگی می‌تواند در مطالعات زیست‌محیطی مفید واقع شود.

فصل سوم: موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی محدوده

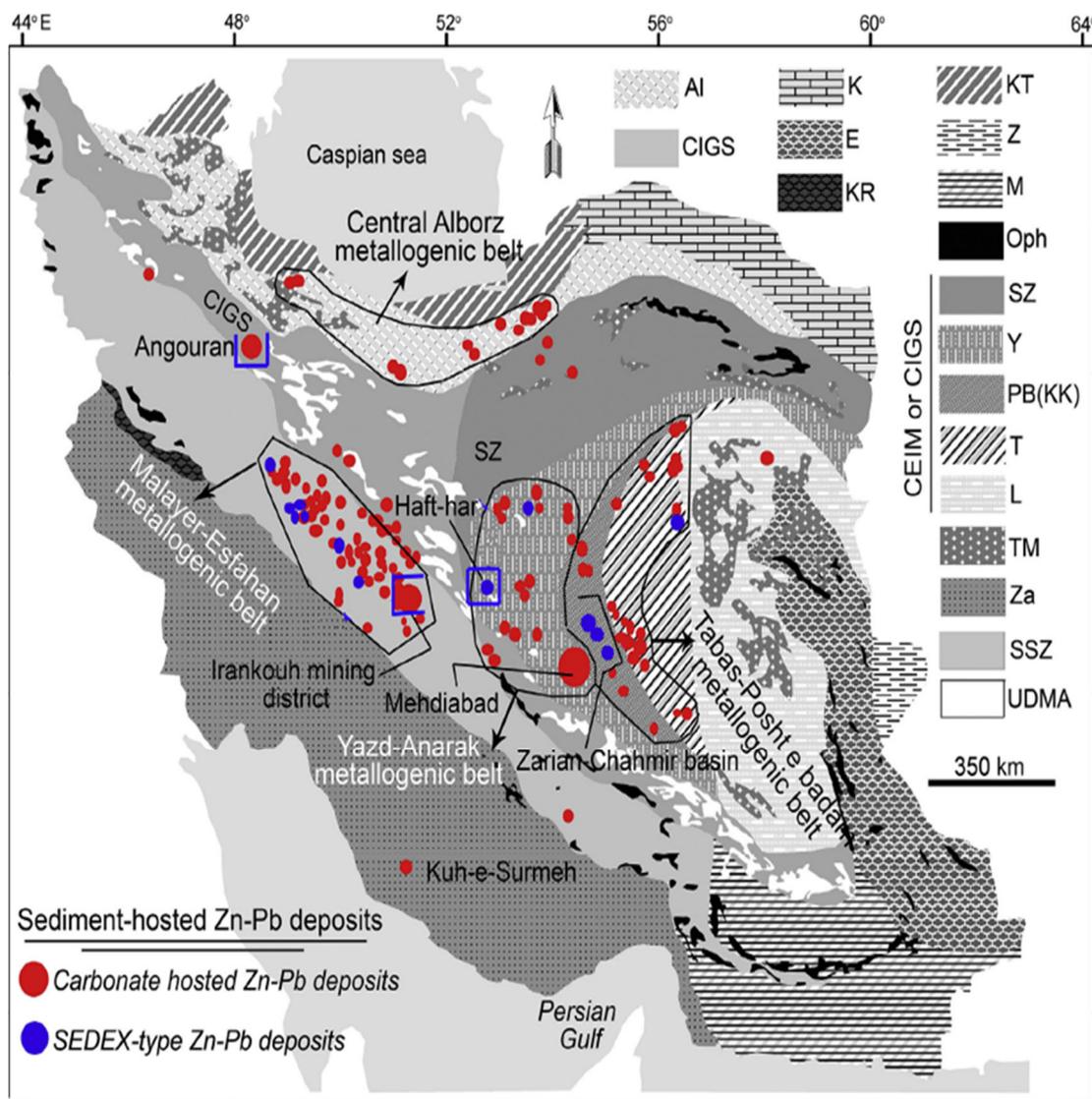
مورد مطالعه

۳-۱- مقدمه

در این فصل ضمن توضیح ذخایر سولفیدی سرب و روی با سنگ میزبان کربناته، به معرفی و تعیین محدوده مورد مطالعه در معدن سرب و روی انگوران که بزرگ‌ترین معدن سرب و روی خاورمیانه است پرداخته می‌شود. با تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از این مطالعات، می‌توان درک بهتری از نحوه تشکیل و تکامل کانسارهای حوضه معدنی انگوران داشت. با توجه به اینکه تعیین الگوی ژنتیکی و نوع تیپ کانی‌سازی می‌تواند نقش مهمی در ادامه فعالیت‌های استخراجی، اکتشاف ذخایر پنهان و فرآوری مواد معدنی داشته باشد، اطلاعات حاصل می‌تواند به عنوان یک الگو مبنا برای مطالعات زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شود.

۳-۲- ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی در ایران

بیش از ۳۵۰ ذخیره سرب و روی در ایران وجود دارد که شامل نوع SEDEX (متصاعدی-رسوبی)، Irish و MVT (دره می‌سی‌سی‌پی) است و در طیف متنوعی از سنگ‌های کربناته و سیلیکات‌ها تشکیل شده‌اند [Rajabi et al., 2012]. این نشان دهنده پتانسیل بالای ایران از نظر ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی است [Borg, 2005; Rajabi et al., 2012]. با این حال فقط تعداد کمی از آنها مورد اکتشاف و استخراج قرار گرفته‌اند. شکل (۳-۱) تنوع توزیع ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی در ایران را نشان می‌دهد. مهم‌ترین ذخایر سرب - روی از نوع سدکس در بخش‌هایی از کمربند فلززایی ملایر- اصفهان، یزد- انارک و طبس- پشت بادام واقع شده‌اند، که ذخایر کوشک، حوضه زیرگان- چاه‌میر و هفت‌هر اصلی‌ترین آنها می‌باشند. ذخایر سرب - روی با سنگ میزبان کربناتی (MVT) از جایگاه ساختاری بیشتر در پهنه‌های سنندج- سیرجان، ایران مرکزی و البرز مرکزی قرار گرفته‌اند. از جمله ذخایر در حد کلاس جهانی با میزبان کربناته، می‌توان به انگوران، مهدی آباد و ایران‌کوه اشاره کرد (شکل ۳-۱) [Maghfouri et al., 2018].



شکل ۳-۱- نقشه توزیع کانسارهای سرب-روی با میزبان رسوبی در ایران. البرز مرکزی (AI)؛ زون ساختمانی و زمین‌شناسی ایران مرکزی (CIGS)؛ نواحی شرق ایران (E)؛ کوپه- داغ (K)؛ کرمانشاه (KR)؛ زون ساختاری خزر- طالش-زیوه (KT)؛ بلوک لوت (L)؛ زون مکران (M)؛ کمر بند افیولیتی (Oph)؛ بلوک پشت- بادام (PB)؛ زون سنندج - سیرجان (SSZ)؛ بلوک طبس (T)؛ سنگ‌های ماگمایی (TM)؛ زون ماگمایی ارومیه- دختر (UDMA)؛ بلوک یزد (Y)؛ منطقه زاہل (Z)؛ ناحیه زاگرس (Za)؛ [Maghfouri et al., 2018].

۳-۳- الگوی تشکیل و نحوه کانی‌زایی ذخایر سولفیدی- کربناتی

ریچرت و بورگ در سال ۲۰۰۸، نحوه کانی‌زایی ذخایر سرب و روی سولفیدی با سنگ میزان کربناته در ایران را طی یک مدل مفهومی ارائه دادند (شکل ۳-۲). آنها نشان دادند که، نفوذ اکسیژن و دی‌اکسید کربن از طریق منافذ و فضاهاى سنگ میزبان باعث اکسایش کانی‌های سولفیدی و تولید حجم بسیار

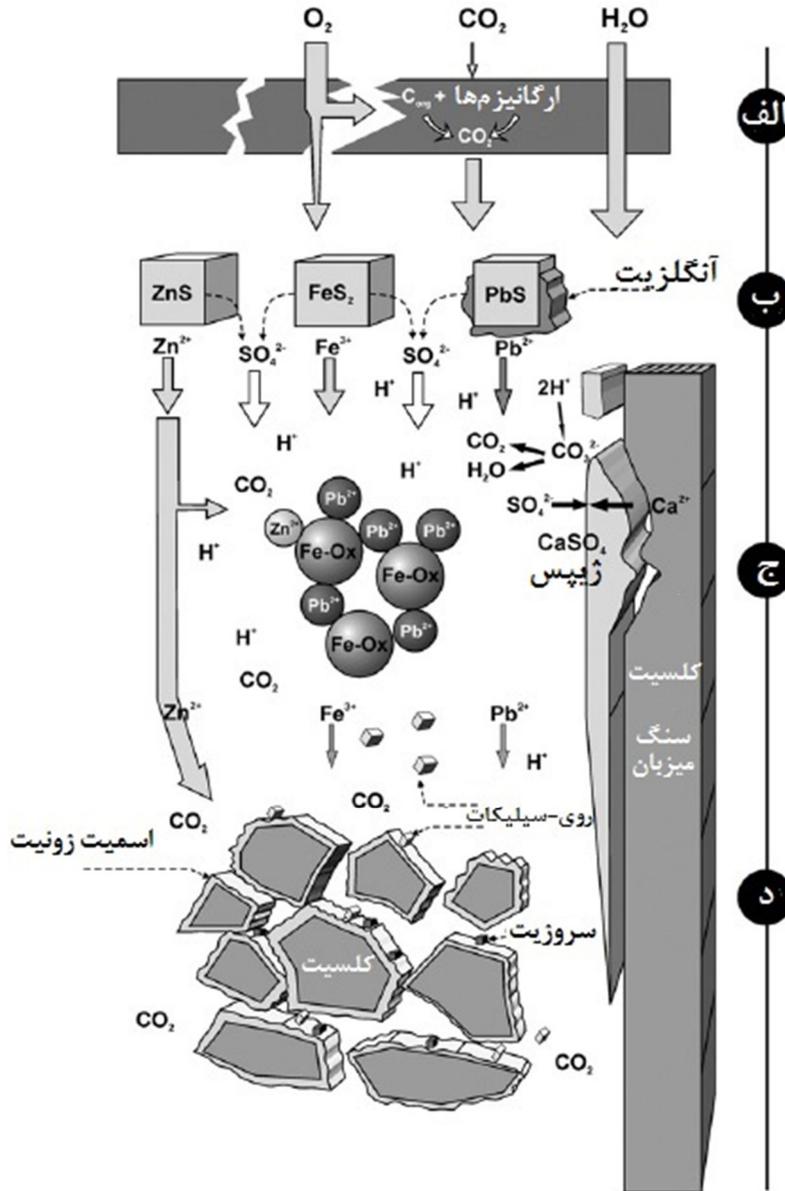
زیادی از محلول اسیدی می‌شود. با حضور میکروارگانسیم‌های هوازی، آهن سه‌ظرفیتی به عنوان عامل دیگری است که باعث اکسایش بیشتر کانی‌های سولفیدی می‌شود (بخش ۳-۲-الف). در محیط‌های خشک هم‌چون ایران، غلظت اکسیژن محلول به بیشینه مقدار خود در مقایسه با دیگر شرایط آب و هوایی می‌رسد و توسط فعالیت‌های بیولوژیکی^۱ در خاک مصرف نخواهد شد. یکی از فرآیندهای مهمی که به طور هم‌زمان در طول مرحله تولید محلول‌های اسیدی در ذخایری با میزبان کربناته رخ می‌دهد، ایجاد پوشش موقت بر روی سنگ‌های کربناته به ویژه کلسیت توسط کانی ژپس می‌باشد. این پوشش بر روی سنگ‌های کربناته باعث جلوگیری از خنثی‌سازی محلول اسیدی می‌شود و شرایط اسیدی در یک حالت ثابت و پایدار باقی می‌ماند (شکل ۳-۲-ب). تحت شرایط اسیدی، یون‌های Pb^{2+} و Zn^{2+} آزاد می‌شوند. یون‌های Pb^{2+} به طور مؤثر توسط اکسیدهای آهن آبدار^۲ (HFO) جذب و یا به صورت آنگلیزیت در همان محل یا نزدیک کانسنگ اولیه باقی می‌مانند. پایداری آنگلیزیت در محلول اسیدی به مقدار یون (SO_4^{2-}) بستگی دارد. در اثر واکنش اسید با سنگ‌های کربناته، مقدار (SO_4^{2-}) کاهش و در چنین شرایطی کانی سروزیت تشکیل و یا به صورت جان‌شینی در اطراف آنگلیزیت‌ها به وجود می‌آیند (شکل ۳-۲-ج). در حالی که یون‌های Zn^{2+} موجود در محلول اسیدی با فواصل بیشتری از کانسنگ اولیه مهاجرت و با فرآیند انحلال سنگ میزبان کربناته (کارستی^۳) سبب تشکیل کانی اسمیت‌زونیت می‌شود. به طور معمول افزایش فشار گاز دی‌اکسید کربن موجب افزایش پایداری اسمیت‌زونیت و کانی‌های کربناته سرب و روی درون سنگ میزبان می‌شود. پس از مرحله اکسایش و کاهش فشار این گاز تا شرایط اتمسفری، اسمیت‌زونیت ناپایدار می‌شود و به صورت هیدروزینکیت $(Zn_5(CO_3)_2(OH)_6)$ یا همی‌مورفیت $(Zn_4[(OH)_2-Si_2O_7].H_2O)$ در شرایط حضور سیلیس قابل مشاهده است (شکل ۳-۲-د) [Reichert and Borg, 2008]. شکل (۳-۳) مدل مفهومی از نحوه تشکیل انواع ذخایر

1- Biological

2- Hydrous ferric oxides (HFO)

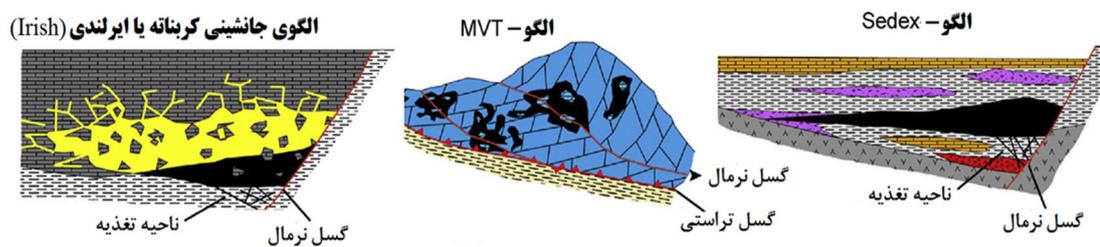
3- Karstic

سرب و روی در ایران را توضیح می‌دهد. ویژگی‌های اصلی مهم‌ترین ذخایر سولفیدی-کربناتی ایران در جدول (۱-۳) ارائه شده است.

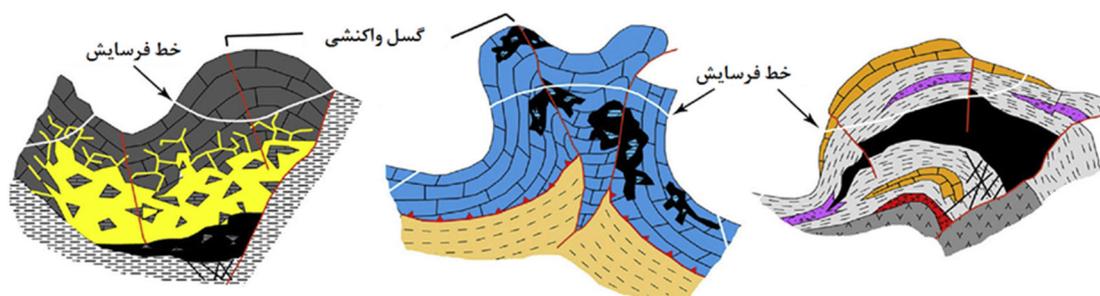


شکل ۳-۲- مدل مفهومی از نحوه کانی‌زایی سرب و روی سولفیدی با میزبان کربناتی
[After Reichert and Borg, 2008]

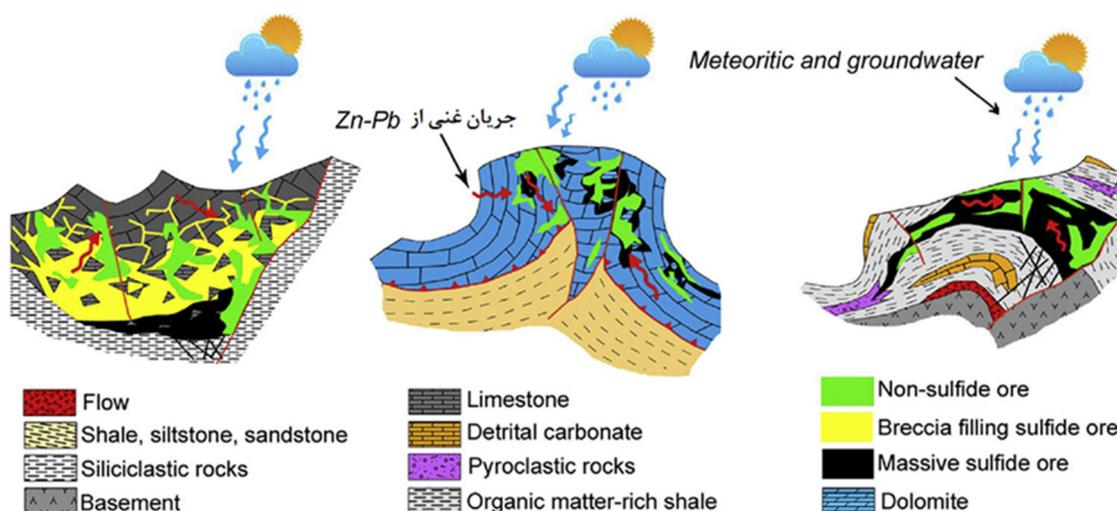
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۳-۳- توسعه ذخایر سولفیدی-کربناته در ایران در طول تکامل زمین‌شناسی، الف) انواع ذخایر سولفیدی سرب-روی در ایران و تشکیل آنها، ب) فشردگی، تغییر شکل (گسل و چین‌خوردگی)، بالا آمدگی کانسنگ سولفیدی اولیه و فرسایش، ج) نفوذ آب‌های سطحی، هوازدهی کانی‌های سولفیدی، مهاجرت محلول‌های حاوی سرب و روی، تشکیل حفره‌های کارستی، تشکیل کانی اکسیدی [After Maghfouri et al., 2018]

جدول ۳-۱- ویژگی‌های اصلی مهمترین ذخایر سرب - روی با میزبان رسوبی در ایران [Maghfouri et al., 2018]

نام	ناحیه قرارگیری	نوع ذخیره	سنگ میزبان	نوع سوپرژن	کانی‌های سولفیدی	کانی‌های اکسیدی
انگوران	زون سنندج - سیرجان	SEDEX-MVT	مرمر و شیست	جانشینی مستقیم (جانشینی سنگ دیواره)	اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت	اسمیت زونیت، هیدروزینکیت، (همی مورفیت، سروسیت، اکسید آهن)
مهدی آباد	کمر بند فلز زایی یزد - انارک	SEDEX	شیل، سیلستون و دولومیت	جانشینی مستقیم (جانشینی سنگ دیواره)	اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت	همی مورفیت، اسمیت زونیت، هیدروزینکیت، سروسیت، اکسید آهن و منگنز
ایران کوه	کمر بند فلز زایی ملایر - اصفهان	ناشناخته - SEDEX	دولومیت، شیل، سیلستون، توف	جانشینی مستقیم (جانشینی سنگ دیواره)	اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت	همی مورفیت، اسمیت زونیت، هیدروزینکیت، سروسیت، اکسید آهن
کوه - سورمه	زون زاگرس	MVT	دولومیت و سنک آهک دولومیتی	جانشینی سنگ دیواره (جانشینی مستقیم)	اسفالریت، گالن، پیریت	اسمیت زونیت (سروسیت، همی مورفیت، هیدروزینکیت)
هفت - هر	کمر بند فلز زایی یزد - انارک	SEDEX	شیل، سیلستون و توف	جانشینی مستقیم	پیریت، اسفالریت، گالن	سروسیت، همی مورفیت، اکسید آهن (اسمیت زونیت، انگلزیت)
زریگان	بلوک پشت - بادام	SEDEX	سیلستون و سنگ آهک سیلتی	جانشینی مستقیم	پیریت، اسفالریت، گالن	اکسید آهن، سروسیت، اسمیت زونیت (همی مورفیت، انگلزیت)

۳-۴- معدن سرب و روی انگوران

۳-۴-۱- موقعیت جغرافیایی معدن

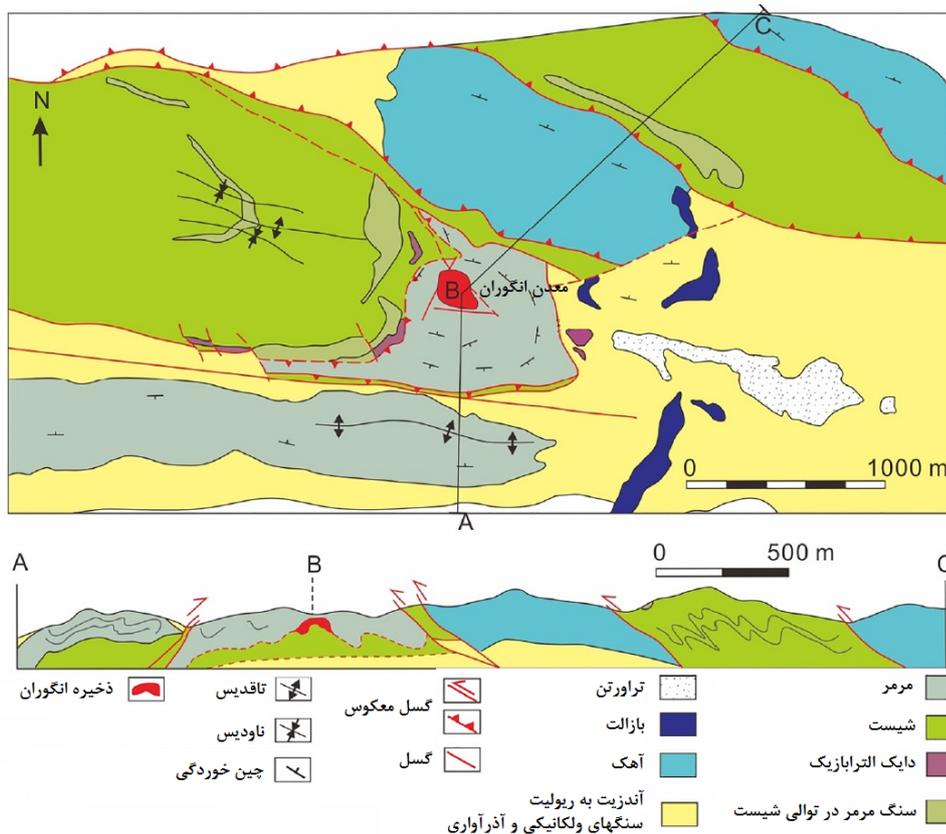
معدن سرب و روی انگوران در شهرستان ماهنشان، در ۱۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهر زنجان با موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی و ارتفاع حدوداً ۳۰۰۰ از سطح دریا در شمال غربی ایران واقع شده است. نزدیک‌ترین شهر، دندی با جمعیت دو هزار نفر و نزدیک‌ترین روستا به معدن، روستای قلعه جوق با جمعیت ۲۰۰ نفر می‌باشد. منطقه انگوران دارای آب و هوای نیمه خشک تا سرد با دمای سالانه ۲۲- درجه سانتی‌گراد در زمستان تا ۳۶ درجه سانتی‌گراد در تابستان است. میزان بارندگی سالانه بیش از ۳۵۰ میلی‌متر است [Qishlaqi et al, 2009]. معدن سرب و روی انگوران (شکل ۳-۴) یکی از بزرگ‌ترین معادن سرب و روی خاورمیانه و در رده معادن بزرگ دنیا به شمار می‌رود که توسط هر دو روش زیرزمینی و روباز عملیات استخراج انجام می‌گیرد [Ghadimi et al, 2018].



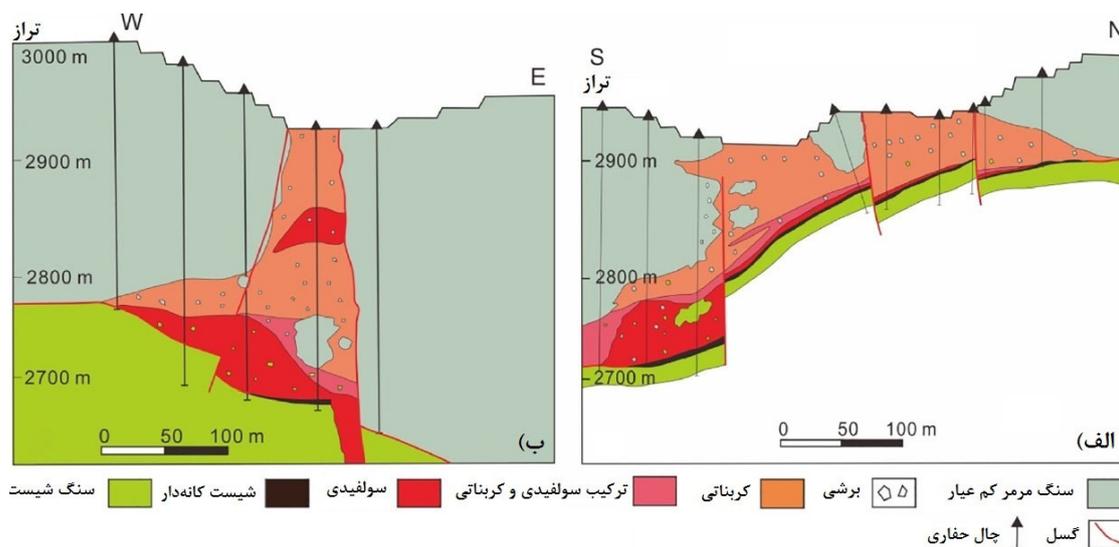
شکل ۳-۴- موقعیت جغرافیایی و نمایی از معدن روباز انگوران

۳-۴-۲- زمین‌شناسی، مدل ژنتیکی و کانی‌زایی

کانسار سرب و روی انگوران دارای خصوصیات تکتونوماگمایی و زمین‌شناسی مشابه با زون سنندج - سیرجان می‌باشد. سنگ میزبان ماده معدنی در یک کمپلکس دگرگونی به سن نئوپروتروزوئیک تا کامبرین قرار گرفته است. این کمپلکس دگرگونی، طی میوسن زیرین توسط فرآیندهای کششی دچار دگرشکلی شده و باعث تشکیل سنگ‌های دگرگونی شامل شیست‌ها، مرم‌های آهکی، گنایس و آمفیبولیت‌ها شده است که دارای روند شمال‌غرب- جنوب‌شرقی هستند [Gilg et al., 2006]. مهم‌ترین افق کانه‌دار کانسار انگوران در بالاترین واحدهای آهک بلورین تشکیل شده است که بیشترین طول و عرض آن حدود ۷۰۰ و ۶۰۰ متر گزارش شده است. در اواخر پروتروزوئیک پایانی، فاز دگرگونی منجر به یک چین‌خوردگی شدید در سنگ‌ها و هم‌چنین در مقیاس منطقه‌ای شده است [Ghadimi et al., 2018]. در حقیقت کانسار انگوران تقریباً در بخش مرکزی یک تاقدیس، بین دو بخش دگرگونی شیستی و آهکی واقع شده و از دیدگاه ساختاری در منطقه سه گسل در بخش‌های شرقی، شمالی و غربی معدن وجود دارد که نقش مهمی در کانی‌سازی و مهاجرت سیال کانه‌ساز از عمق به سطح ایفا نمودند. در کمر بالای کانسار، طبقات آهکی قرار دارند و شیب کلی آن‌ها حدود ۲۵-۲۰ درجه به سمت جنوب شرق است. در کمر پایین، شیست‌های دگرگونی قرار دارند، که شیب کلی آن‌ها ۲۵-۱۰ درجه و در همان جهت جنوب شرق هستند [قدیمی و همکاران، ۱۳۹۳]. شکل (۳-۵) نقشه زمین‌شناسی معدن سرب و روی انگوران را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، معدن انگوران دارای دو نوع ماده معدنی سولفیدی و کربناتی است که طی مراحل هیپوژن تشکیل و در مراحل سوپرژن توسعه یافته است. مطابق شکل (۳-۶)، بخش سولفیدی و کربناتی از ماده معدنی بر اساس ساخت، بافت، کانی‌شناسی و نوع ماده معدنی از سطح به عمق به انواع مختلفی مانند ماده معدنی خیلی کم‌عیار، کالامین، کربنات نرم، کربنات برشی، کربنات سخت، مخلوط (سولفید-کربنات)، سولفید و شیست کانه‌دار تقسیم می‌شود [Song et al., 2019].



شکل ۳-۵- نقشه زمین‌شناسی معدن انگوران به همراه مقطع عرضی A-B-C از ذخیره
[After Song et al., 2019]



شکل ۳-۶- مقاطع عرضی زمین‌شناسی در جهت الف (شمال-جنوب و ب) شرق-غرب از ذخیره انگوران که طرز
قرارگیری و انواع ماده معدنی را نشان می‌دهد [After Song et al., 2019]

در مورد مدل ژنتیکی کانسار انگوران نظریه‌های متفاوتی ارائه شده است. نتایج تحقیقات صورت گرفته، طیف گسترده‌ای از مدل‌های سولفیدی توده‌ای (VMS) و رسوبات آواری (SEDEX) را گزارش کرده‌اند [Daliran et al., 2013]. شواهد موجود در کانسار انگوران، مانند سنگ میزبان، بافت و ساخت سولفیدها، کانی‌شناسی، غلظت عناصر اصلی و کمیاب و ترکیب ایزوتوپی گوگرد بیانگر تشابه بیشتر این ذخیره با ذخایر سرب و روی نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) است. ذخایر MVT معمولاً پس از فرآیند سنگ‌شدگی درون کربنات‌ها در محیط فشارشی و در ارتباط با ساختارهای گسلی و کارستی تشکیل می‌شوند [Zhuang et al., 2019].

از نظر اقتصادی، بخش سولفیدی و کربناتی مهم‌ترین بخش کانسار سرب و روی انگوران است. بخش سولفیدی غالباً از اسفالریت (ZnS)، به همراه گالن (PbS)، پیریت (FeS₂) و آرسنوپیریت (FeAsS) تشکیل شده است. بافت‌های برشی، توده‌ای، دانه پراکنده و گل کلمی در این بخش دیده می‌شود. در حالی که بخش کربناته شامل اسمیت‌زونیت (ZnCO₃) و سرروزیت (PbCO₃) است. مقادیر کمی همی‌مورفیت (Zn₄[(OH)₂-Si₂O₇].H₂O)، میمیتیت (Pb₅[AsO₄]₃Cl)، پیرومورفیت، هیدروزینکیت و آنگلیزیت در این بخش نیز حضور دارند. کانی‌های یاد شده، عمدتاً دارای بافت گل کلمی، پرکننده فضای خالی و برشی دارند. مهم‌ترین کانی‌های باطله در این بخش، کوارتز، کلسیت، اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی می‌باشند [Ghadimi et al., 2018].

در سال ۱۳۸۴ میزان ذخیره کانسار انگوران در بخش سولفیدی ۴ میلیون تن (Zn ۴۰/۴٪، Pb ۱/۹٪) و بخش کربناتی ۱۸/۲۳ میلیون تن (Zn ۲۸/۱٪، Pb ۴/۴٪ و Ag ۱۱۰ گرم بر تن) گزارش شد [Maghfouri et al., 2018]. بر اساس اطلاعات موجود تا پایان سال ۱۳۹۵، میزان ذخیره بخش سولفیدی ۱/۷ میلیون تن (Zn ۳۶/۷٪، Pb ۲/۷۷٪) و بخش کربناتی ۵/۱۴ میلیون تن (Zn ۳۳٪، Pb ۲/۵۶٪) برآورد شده است [Ataepoor, 2017].

۳-۴-۳- هیدروژئولوژی و هیدروژئولوژی منطقه

نوع زهکشی یک منطقه معدنی از نظر مطالعات زیست‌محیطی حائز اهمیت است. حوضه‌های آبریز منطقه مورد مطالعه در حالت بلوغ می‌باشد، هم‌چنین، با توجه به پراکندگی جغرافیایی چشمه‌ها و آبدهی چاه‌های موجود منطقه، می‌توان گفت که تغذیه آبخوان‌های آبرفتی تابع جورشده‌گی در رسوبات کواترنری و سیستم شکستگی در سایر سنگ‌ها خواهد بود. لازم به ذکر است که شرایط مساعد جهت بارش از عوامل مهم بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی است. بنابراین میزان انحلال و تغییر ترکیب شیمیایی آب به مقدار و نحوه تغذیه آبخوان‌ها بستگی خواهد داشت. در منطقه مورد مطالعه چهار حوضه زهکشی به شرح زیر مشخص شد:

✓ حوضه رودخانه الله لو مشرف به خروجی آب‌های زهکشی شده از معدن

✓ حوضه بیلاق بلقیس مشرف بر آبراهه‌های بالا دست معدن

✓ حوضه رودخانه انگوران چای مشرف بر سمت راست شمال معدن

✓ حوضه کاکارود مشرف بر سمت چپ جنوب معدن

جریان‌های فصلی در اطراف معدن به رودخانه الله لو وصل می‌شوند. از چهار حوضه زهکشی منطقه، حوضه رودخانه الله لو با موقعیت مندرج در شکل (۳-۷)، به عنوان حوضه‌ای است که بیشترین سهم در انتقال آلودگی ناشی از محدوده معدن را دارد. این منطقه دارای اراضی قابل کشت و زراعی گسترده‌ای است و به دو الگوی کاربری شامل زمین‌های کشاورزی و مراتع طبقه‌بندی شده است [قدیمی، ۱۳۹۵]. شکل (۳-۸) نمونه‌ای از رسوب اکسید آهن در منطقه قلعه جوق نزدیک‌ترین روستا از شرق معدن را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷- تصویر ماهواره‌ای از حوضه‌های زهکشی مشرف بر معدن سرب و روی انگوران [Google Earth, 2019]



شکل ۳-۸- نمونه‌ای از رسوب‌گذاری اکسید آهن در منطقه روستای قلعه جوق

۳-۴-۴- دمپ‌های باطله معدن سرب و روی انگوران

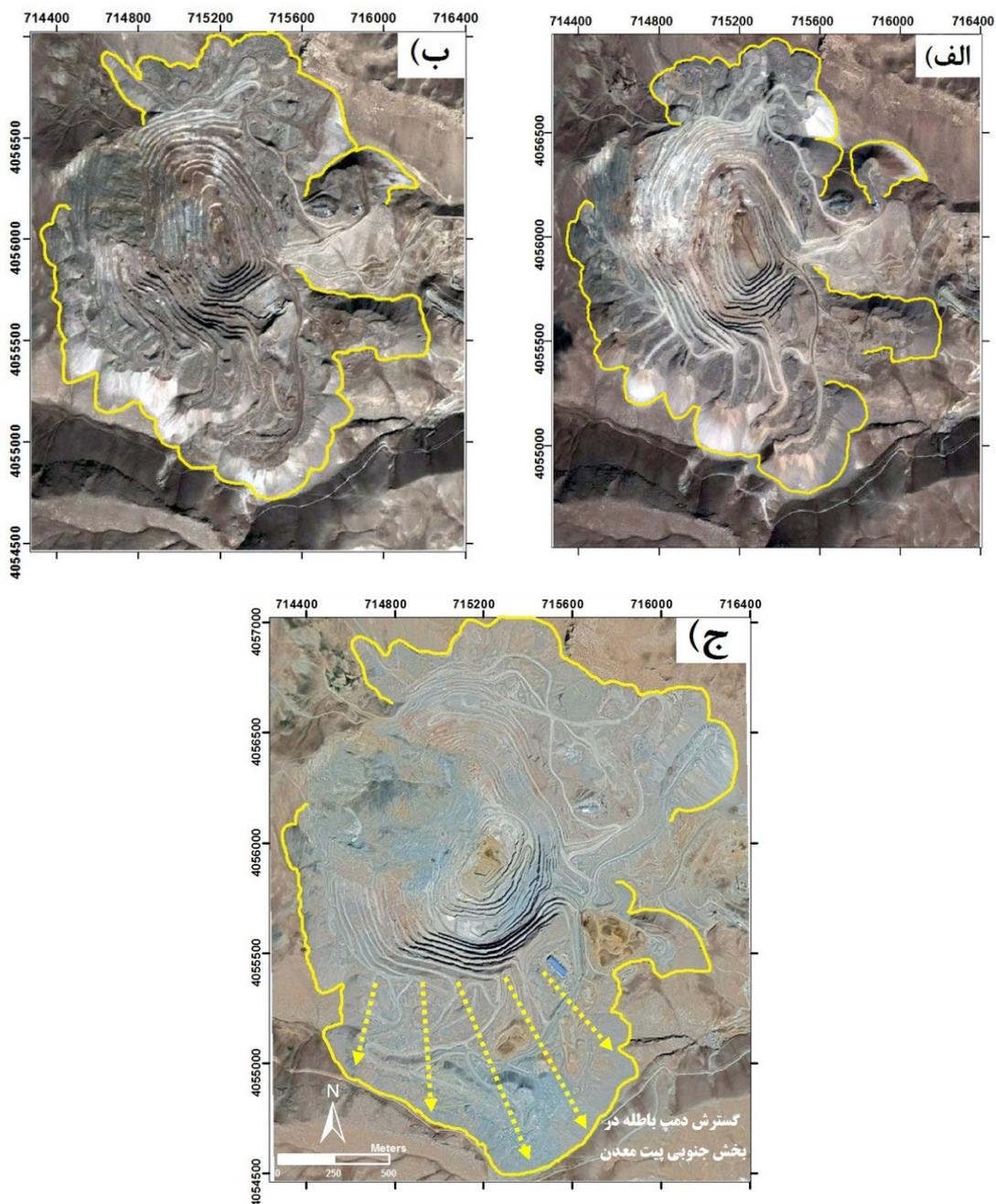
اولین فعالیت‌های استخراجی بر روی کانسار انگوران به سال ۱۳۰۱ بر می‌گردد و عملیات معدن‌کاری سرب و روی انگوران به صورت قابل توجه پس از سال ۱۳۲۴ با واگذاری به بخش خصوصی شروع و تا

به امروز فعال می‌باشد. در اثر استخراج مواد معدنی، حجم زیادی از باطله به صورت دمپ در اطراف پیت معدن انباشته شده است که ارتفاع آنها تا بیش از چند ده متر می‌رسد (شکل ۳-۹). بر اساس آمار موجود، میزان باطله‌برداری انجام شده در معدن طی سال‌های ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۵ حدود ۸۲ میلیون تن برآورد گردید. تناژ باقی مانده از باطله معدنی ۴۸ میلیون تن تا تراز ۲۷۴۰ از پیت معدن در سال ۱۳۹۵ برآورد گردید [Ataepoor, 2017].



شکل ۳-۹- دمپ‌های باطله از نماهای مختلف و مشکلات زیست‌محیطی در ارتباط با آنها همراه با اشغال فضای زیادی در منطقه، آسیب رساندن به منظره و تأثیر بر روی اکوسیستم منطقه

شکل (۳-۱۰) عکس‌های ماهواره‌ای از محدوده معدن در سه بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد که حاکی از گسترش و دپو باطله‌ها در محدوده شمال و بیشتر در جنوب پیت معدن می‌باشد. دره‌های جنوب و جنوب‌غربی پیت معدن، توسط حجم بالایی از باطله‌ها پر شده است که نشان می‌دهد عملیات دپو باطله در این محدوده فعال است. هر چند در بخش شمالی پیت معدن به دلیل وجود کوه، عملیات دپو گسترش چندانی نداشته و تقریباً غیر فعال است.



شکل ۳-۱۰- گسترش و پیشروی دمپ‌های باطله در اطراف پیت معدن مربوط به سال‌های (الف) ۱۳۸۸، (ب) ۱۳۹۰، (ج) ۱۳۹۸ [Google Earth, 2019].

۳-۴-۵- تحقیقات زیست‌محیطی انجام شده در منطقه

در سال‌های اخیر تحقیقاتی مختلفی در محدوده معدن سرب و روی انگوران انجام شده که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

بررسی میزان آلاینده‌گی ناشی از صنایع معدنی و فرآوری سرب و روی بر آب و خاک منطقه انگوران - دندی [شریعتی و همکاران، ۱۳۹۰]، تحلیل عددی پراکنش آلودگی خاک به برخی عناصر سنگین منطقه انگوران زنجان [عبداللهی و همکاران، ۱۳۹۱]، تعیین پهنه‌بندی توزیع مکانی سرب، روی و کادمیم و ارزیابی آلودگی خاک‌های منطقه انگوران، استان زنجان [عبداللهی و همکاران، ۱۳۹۱]، بررسی اثرات زیست‌محیطی عناصر سنگین در نهشته‌های رسوبی دشت انگوران [حسینی، ۱۳۹۳]. بررسی زمین شیمیایی معدن روی-سرب انگوران و اثرات فعالیت‌های معدنکاری بر آلودگی منطقه [قدیمی و همکاران، ۱۳۹۳]، بررسی غلظت عناصر بالقوه سمی در آئروسول‌های ناشی از فرآیند معدن‌کاری در منطقه معدنی انگوران [قدیمی، ۱۳۹۵]، ارزیابی توزیع مکانی کادمیوم موجود در خاک منطقه انگوران [Qishlaqi et al., 2009] و ویژگی‌های آلودگی فلزات در خاک‌های کشاورزی و مراتع در منطقه انگوران [Qishlaqi et al., 2010]، بررسی غلظت عناصر بالقوه سمی در ذرات معلق معدنی (آئروسول‌ها)^۱، ناشی از فرآیند معدنکاری در منطقه معدنی انگوران [Ghadimi et al., 2018]، مطالعات ژئوشیمی زیست محیطی از آب‌های محدوده معدن و مطالعات کانی‌شناسی معدن سرب و روی انگوران [Sharafi et al., 2018].

بررسی منابع نشان می‌دهد که علی‌رغم انجام چند تحقیق در مورد بررسی مشکلات زیست‌محیطی در محیط‌های خاکی و آبی اطراف و یا محدوده معدن سرب و روی انگوران، متأسفانه تاکنون مطالعه اساسی در مورد ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی و طبقه‌بندی ریسک آلودگی در خصوص دمپ‌های باطله معدنی تیپ سولفیدی-کربناته انگوران، صورت نگرفته است. بنابراین مطالعه در ارتباط با تعیین پتانسیل تولید یا خنثی‌سازی زهاب اسیدی و بررسی آلودگی ناشی از فلزات سنگین در محیط دمپ‌های باطله می‌تواند به عنوان موضوعات با اهمیت در معدن سرب و روی انگوران باشد.

۱- آئروسول‌ها (Aerosols) شامل قطره‌های مایع و ذرات جامد زیر ۲۰ میکرون در اتمسفر (غبار، دود و ذرات معلق)

۳-۴-۶- انتخاب محدوده مورد مطالعه

به دلیل نبود اطلاعات در مورد تعداد و نام دمپ و همچنین عدم انجام مطالعات زیست‌محیطی بر روی دمپ‌های باطله، تصمیم بر آن شد که با توجه به راه‌های دسترسی، محدوده جنوب و جنوب‌غربی پیت معدن به منظور انجام مطالعات در نظر گرفته شود. از عوامل مهم در انتخاب این محدوده، می‌توان به حضور دمپ‌های فعال و غیرفعال جهت ارزیابی پتانسیل تولید آلودگی اشاره کرد.

۳-۵- جمع‌بندی

در این فصل به توضیح نحوه تشکیل و پراکندگی ذخایر سرب و روی در ایران پرداخته شد. همچنین اطلاعاتی در مورد موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی، نوع کانی‌سازی و هیدرولوژی معدن انگوران ارائه شد. بر اساس بررسی پیشینه تحقیقات زیست‌محیطی انجام شده در محدوده معدن، می‌توان دریافت که هیچ‌گونه مطالعات زیست‌محیطی در خصوص دمپ‌های باطله انجام نگرفته است. با توجه به گسترش و دپو این باطله‌ها در محیط‌زیست، ارزیابی پتانسیل آلودگی این باطله‌ها برای به کنترل در آوردن مشکلات زیست‌محیطی با اهمیت و ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو با توجه به موقعیت دمپ‌ها و مسیرهای دسترسی، بخش جنوبی پیت معدن جهت انجام چنین مطالعاتی انتخاب گردید. در ادامه در فصل ۴، توضیحات مربوط به نحوه نمونه‌برداری و آنالیزهای انجام شده ارائه شده است.

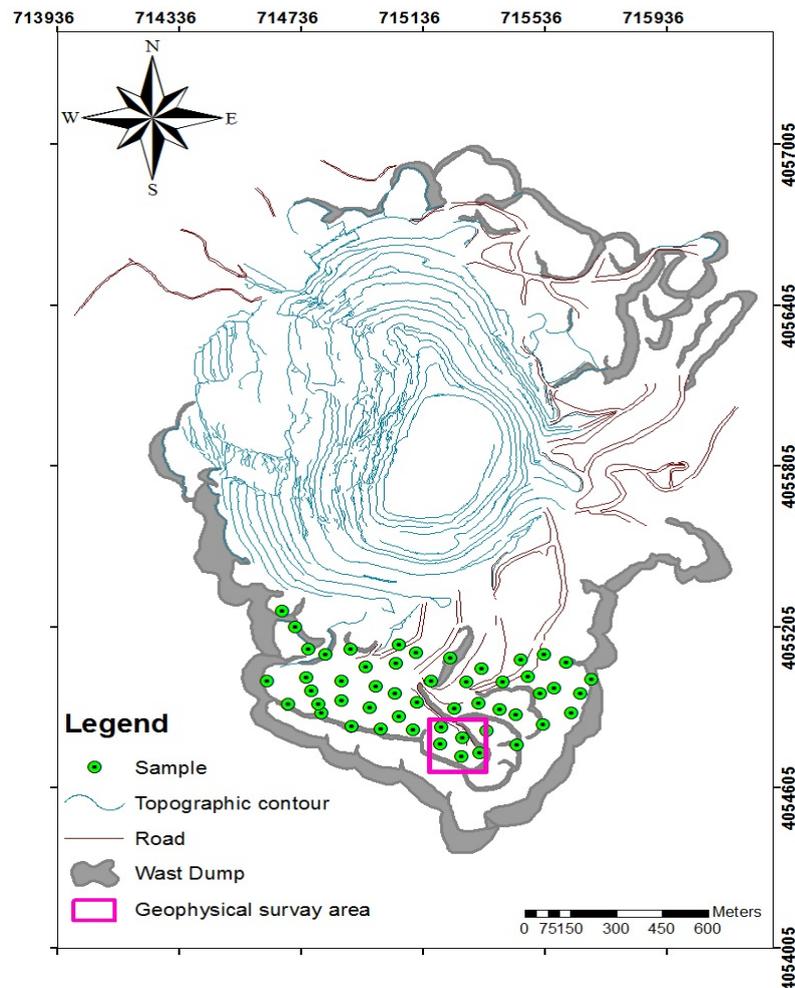
فصل چہارم: مواد و روش ہا

۴-۱- مقدمه

در این فصل مکان‌های نمونه‌برداری، روش‌های نمونه‌گیری، آماده‌سازی نمونه‌ها و روش‌های اندازه‌گیری به کار رفته در این تحقیق بیان می‌شود. در ابتدا، جزئیات نمونه‌برداری و نحوه آماده‌سازی آنها ارائه شده و در ادامه به تفکیک، روش‌ها و آنالیزهای مورد استفاده در این تحقیق، جهت بررسی خصوصیات ژئویست‌محیطی دمپ‌های باطله توضیح داده می‌شود. تمام نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌ها در فصل بعد ارائه و مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۴-۲- نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

همان‌طور که در فصل قبل توضیح داده شد، باطله‌های معدنی در دو محدوده از شمال و جنوب پیت معدن دپو شده‌اند. در حال حاضر فقط در بخش جنوبی، عملیات دپو باطله صورت می‌گیرد. با توجه به موقعیت و راه‌های دسترسی، عملیات نمونه‌برداری در بخش جنوبی پیت معدن در ۵۲ نقطه و با وزن تقریبی ۲ تا ۲/۵ کیلوگرم از عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری از سطح دمپ باطله انجام گرفت. این عمق نمونه‌برداری بخاطر سهولت در جمع‌آوری نمونه‌ها و همچنین احتمال فعل و انفعالات شیمیایی بیشتر مواد سطحی در اثر هوازدگی انتخاب گردید. علاوه بر این، فرسایش فیزیکی توسط رواناب‌ها و لغزش‌های سطحی، باعث در معرض قرار دادن سطوح جدیدی شده که امکان واکنش شیمیایی بیشتر را فراهم می‌کند [Marescotti et al, 2010]. هر نمونه در کیسه پلاستیکی مجزا قرار گرفت. مختصات جغرافیایی مکان نمونه‌ها توسط دستگاه GPS ثبت و به هر نمونه یک کد اختصاص داده شد. موقعیت مکانی نمونه‌های برداشت شده از دمپ‌های باطله جنوبی در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

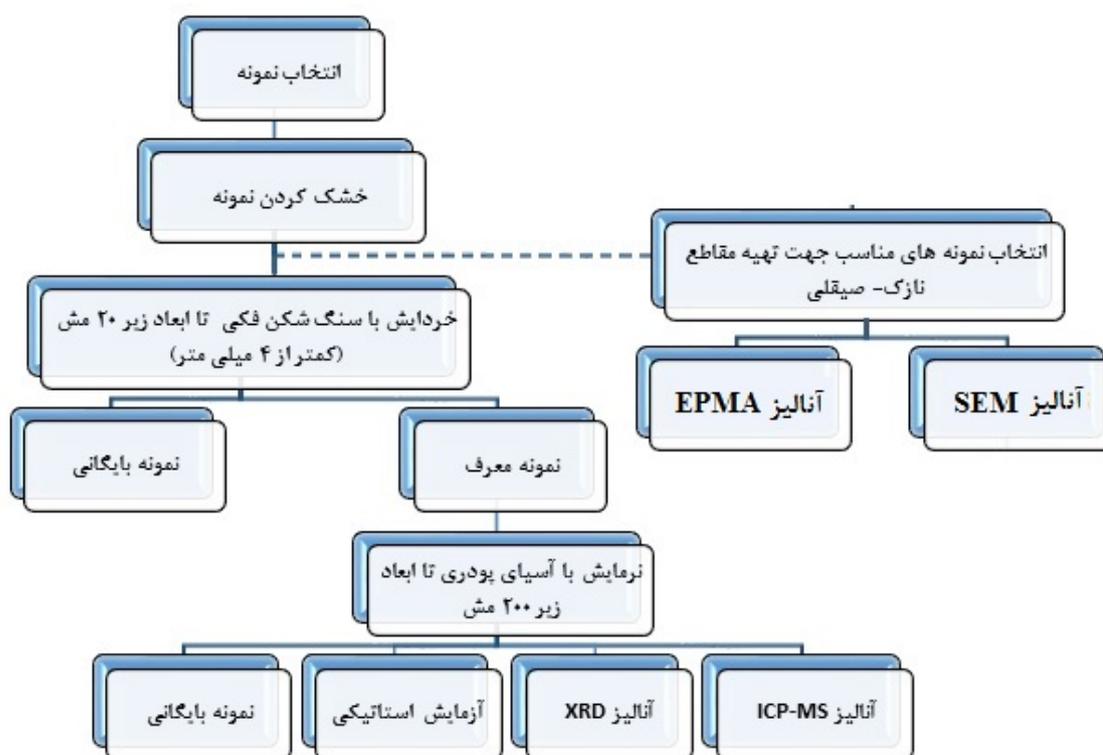


شکل ۴-۱- موقعیت مکانی نمونه‌های برداشت شده از باطله‌های معدنی

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه دیسکاتور تحت شرایط دمایی ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. سپس خردایش نمونه‌ها توسط سنگ شکن فکی و غلطکی به منظور همگن‌سازی انجام گرفت، به طوری که تمام ذرات نمونه از سرنده ۲۰ مش (۴ میلی‌متر) عبور کند. نمونه‌ها با ابعاد کمتر از ۴ میلی‌متر به دو قسمت، شامل نمونه‌های معرف و شاهد تقسیم‌بندی و نمونه‌های بخش شاهد بایگانی گردید. لازم به توضیح است به منظور مطالعات میکروسکوپی، قبل از عملیات خردایش، چندین نمونه سنگی مناسب، جهت تهیه مقاطع نازک - صیقلی^۱ انتخاب گردید. با استفاده از مقاطع نازک - صیقلی، امکان مطالعه هم‌زمان نمونه در نور انعکاسی و عبوری فراهم می‌شود.

1- Thin polish section

علاوه بر آن، برای مطالعات میکروسکوپ الکترونی و تجزیه نقطه‌ای قابل استفاده است. نمونه‌های معرف عبور کرده از سرنده ۲۰ مش، توسط دستگاه پالوایزر^۱ (آسیای پودری) به اندازه ذرات کوچک‌تر از ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) تبدیل گردید. هر نمونه زیر ۲۰۰ مش به نمونه‌های معرف جهت آنالیز و نمونه بایگانی تقسیم شد. وجود نمونه‌های بایگانی شده به منظور آنالیزهای شیمیایی مجدد در صورت نیاز و اطمینان از صحت و دقت نتایج می‌تواند مفید واقع شود. فلوچارت مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها در شکل (۲-۴) ارائه شده است. لازم به توضیح است که مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه زرآزما و آزمایشگاه محیط‌زیست معدنی و هیدروژئولوژی دانشکده معدن دانشگاه تهران انجام گرفت.



شکل ۲-۴- فلوچارت مراحل آماده‌سازی نمونه‌های باطله

۳-۴- آنالیز ژئوشیمیایی

به منظور ارزیابی، پهنه‌بندی و شناسایی الگوی گسترش آلودگی به فلزات سنگین در دمپ‌های باطله، آنالیز ژئوشیمیایی با استفاده از روش طیف‌سنج جرمی پلاسمای القایی (ICP-MS) در ۵۲ نمونه توسط

1- Pulverizer

آزمایشگاه زراعت انجام گرفت. در این روش، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، انحلال نمونه‌ها با تلفیقی از روش‌های ذوب قلیایی و هضم چهار اسیدی مشتمل بر اسیدهای هیدروفلوئوریک، پرکلریک، نیتریک و هیدروکلریک صورت گرفت و غلظت عناصر با استفاده از دستگاه ICP-MS مدل Agilent series 500 ساخت کشور آمریکا در حد ppm اندازه‌گیری شد. حد تشخیص دستگاه ICP-MS برای عناصر مورد مطالعه در این تحقیق در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

جدول ۴-۱- فهرست عناصر آنالیز شده و حد تشخیص دستگاه ICP-MS (ppm)

Al (۱۰۰)	As (۰/۱)	Ca (۱۰۰)	Cd (۰/۱)	Co (۱)
Cr (۱)	Cu (۱)	Fe (۱۰۰)	Mg (۱۰۰)	Mn (۵)
Mo (۰/۱)	Ni (۱)	Pb (۱)	S (۵۰)	Sb (۰/۵)
Zn(۱)				

۴-۴- تست آزمایشگاهی

آنالیزهای آزمایشگاهی با تعیین مقادیر pH و EC و همچنین پیش‌بینی قابلیت تولید اسید از نمونه‌های باطله با روش ABA اصلاح شده انجام گردید. کلیه تست‌ها در آزمایشگاه ژئوشیمی و آزمایشگاه محیط‌زیست معدنی و هیدروژئولوژی دانشکده معدن پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران انجام گرفت.

۴-۴-۱- اندازه‌گیری pH

pH و EC هر یک از نمونه‌ها با دستگاه چند کاره مدل WA-2017SD ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد. قبل از آزمایش، دستگاه در سه نقطه (pH=۴، pH=۷ و pH=۹) توسط محلول‌های بافر استاندارد، کالیبره شده بود. پارامتر pH و EC از یک محلول که از ترکیب ۱۰ گرم نمونه پودر شده با ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر تشکیل شده بود، اندازه‌گیری شد (نسبت ۱ به ۲/۵) [Cappuyne et al, 2013]. قبل از خواندن

مقادیر pH، محلول‌ها توسط هم‌زن^۱ به مدت ۱۰ دقیقه بهم زده شدند و پس از آن برای ۳۰ دقیقه به حالت ساکن ماندند.

۴-۴-۲- آزمایش ABA اصلاح شده

به منظور ارزیابی اولیه از پتانسیل تولید یا خنثی‌سازی اسید در باطله‌های معدنی، از آزمایش استاتیکی ABA اصلاح شده برای ۴۷ نمونه استفاده گردید. برای این منظور، ابتدا جهت تعیین نرخ فیز^۲، ۰/۵ گرم از نمونه عبور کرده از سرد ۲۰۰ مش در شیشه ساعت قرار داده و چند قطره اسید کلریدریک (HCl) ۲۵٪ به آن اضافه گردید. حضور کانی‌های کربناتی همراه نمونه، منجر به ایجاد یک صدای فیز می‌شود. آزمایش فیز، یک آزمایش کیفی است که بر اساس شدت واکنش نمونه‌ها، نرخ فیز به صورت بدون واکنش، ضعیف، متوسط و قوی طبقه‌بندی می‌شود و بر اساس آن می‌توان حجم و نرمالیت از اسید کلریدریک مورد نیاز جهت آزمایش را مطابق جدول (۴-۲) مشخص کرد.

جدول ۴-۲- حجم و نرمالیت HCl مورد استفاده بر اساس نرخ فیز [MEND, 1991]

نرخ فیز	حجم HCl (میلی لیتر)	HCl (نرمالیت)
بدون واکنش	۲۰	۰/۱
ضعیف	۴۰	۰/۱
متوسط	۴۰	۰/۵
قوی	۸۰	۰/۵

با توجه به کیفی بودن آزمایش فیز، برای مقایسه شدت فیز نمونه‌ها، کلیه این آزمایش‌ها در یک زمان انجام شد و در صورت عدم صحت فیز نمونه‌ها، حجم و نرمالیت اسید مورد استفاده اصلاح گردید. پس از تعیین نرخ فیز، برای اندازه‌گیری پتانسیل خنثی‌سازی (NP) به ۲ گرم از نمونه در یک ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری، اسید کلریدریک با حجم و نرمالیت مشخص (مطابق جدول ۴-۲) افزوده شد. محتویات

1- Shaker

2- Fizz

ظرف توسط هم‌زن به مدت ۲۴ ساعت تحت شرایط دمای محیط تکان داده شد. حداقل یکبار و ترجیحاً پس از گذشت ۶ ساعت از آزمایش، pH محلول اندازه‌گیری شد، اگر pH بیشتر از ۲ بود، مقداری HCl با خصوصیات اولیه به آن اضافه می‌شد و مقدار اسید اضافه شده ثبت می‌گردید. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، pH محلول اندازه‌گیری شد که باید در محدوده ۱/۵ تا ۲ باشد. در صورتی که pH در این محدوده قرار داشت، محلول نهایی از کاغذ صافی عبور داده می‌شد و سپس تیتراسیون معکوس تا نقطه پایانی pH=۸/۳ با هیدروکسید سدیم یا سود (NaOH) انجام می‌گرفت. مقدار NP بر اساس مقدار اسید و سود مصرف شده، از طریق رابطه (۱-۴) محاسبه شد [MEND, 1991]:

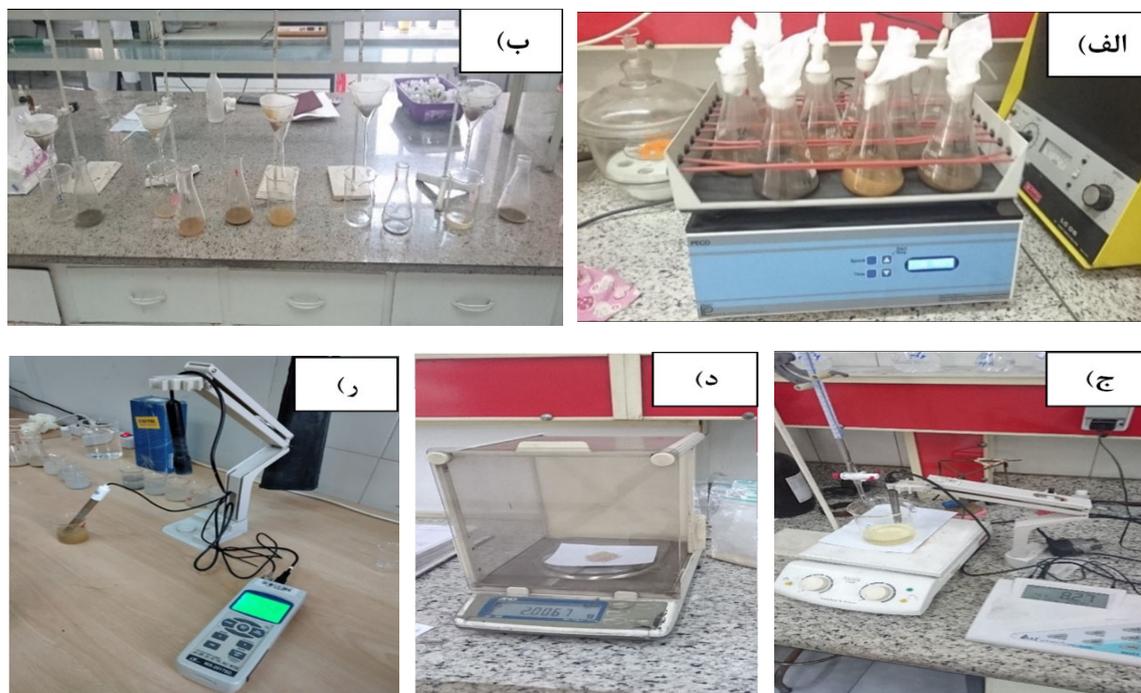
$$NP = \frac{50a[x - (b/a)y]}{c} \quad (1-4)$$

که در آن، NP پتانسیل خنثی‌سازی بر حسب کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن، a نرمالیت اسید کلریدریک، b نرمالیت سود، c وزن نمونه به گرم، x و y به ترتیب حجم اسید کلریدریک و سود مصرفی به میلی‌لیتر می‌باشد [MEND, 1991].

در مواقعی که pH نهایی محلول بیشتر از محدوده ۱/۵ تا ۲ بود، چنین استنباط شد که مقدار اسید اضافه شده برای انجام واکنش ناکافی بوده و اگر pH کمتر بود، چنین نتیجه‌گیری شد که اسید اضافه شده بیشتر از نیاز واکنش بوده است. به هر حال نمونه‌هایی که مقادیر pH آنها خارج از محدوده ۱/۵ تا ۲ بود، آزمایش آنها مجدداً با حجم و نرمالیت بیشتر یا کمتر تکرار شد.

جهت محاسبه مقدار پتانسیل تولید اسید (AP)، سولفور موجود در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه سولفور به اشکال مختلف در باطله‌ها وجود دارد، معمولاً ملاک‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری AP استفاده می‌شود. در بعضی موارد با تعیین سولفور سولفیدی، مقدار AP محاسبه می‌شود ولی امروزه استفاده از سولفور کل با فرض اینکه پیریت منبع سولفور نمونه است گسترش بیشتری یافته است. با توجه به اینکه نرخ انحلال کانی‌های کربناته بسیار کمتر از کانی‌های سولفیدی است و از طرفی مقداری از گوگرد آلی در تولید اسید شرکت می‌کند، لذا نتایج با استفاده از مقادیر سولفور کل می‌تواند به واقعیت نزدیک‌تر باشد. همچنین استفاده از این روش، هزینه‌های آنالیز را نیز کاهش می‌دهد

[سهرابی و همکاران، ۱۳۸۳]. بنابراین با استفاده از روش ICP-MS سولفور کل مورد آنالیز قرار گرفت و با توجه به اینکه مقادیر سولفور کل کمتر از ۰.۱٪ بود، سولفور کل به عنوان ملاک تعیین AP انتخاب شد. بخشی از اقدامات انجام شده مربوط به مطالعات آزمایشگاهی در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- انجام تست‌های آزمایشگاهی الف) شیکر جهت بهم‌زدن محلول برای مدت ۲۴ ساعت، ب) جدا کردن بخش محلول از جامد توسط کاغذ صافی، ج) تیتراسیون معکوس تا رسیدن به $\text{pH}=8/3$ ، د) ترازو دیجیتال برای وزن کردن نمونه‌ها، ر) اندازه‌گیری pH و EC نمونه‌ها

۴-۵- شناسایی ترکیبات کانی‌شناسی

مطالعات کانی‌شناسی به روش‌های مقاطع نازک- صیقلی، طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) و آنالیز میکروپروب الکترونی^۲ (EPMA) به منظور شناسایی نوع و الگوی توزیع انواع ترکیبات کانی‌شناسی مرتبط با دمپ باطله انجام گرفت. مطالعات میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری پلاریزان زایس مدل Axioplan 2 با هر دو حالت نور عبوری و انعکاسی بر روی نمونه‌های انتخاب شده از باطله‌های معدنی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد.

1- Scanning Electron Microscope (SEM)

2- Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

آنالیز XRD بر روی ۱۰ گرم از نمونه‌های پودری با اندازه ۷۵ میکرون با استفاده از دستگاه پراش‌سنج پیشرفته $\theta - 2\theta$ مدل D8-Advance ساخت شرکت Bruker AXS آلمان با پرتو آند Cu با طول موج $K\alpha = 1/54 \text{ \AA}$ انجام گرفت. مطالعات در محدوده زاویه 2θ برابر با ۴-۷۰ درجه با گام‌های ۰/۰۲ درجه و زمان توقف در هر گام ۱ ثانیه انجام گرفت و گراف‌ها با استفاده از نرم‌افزار Eva از بسته DiffraPlus در دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران انجام گرفت. مطالعات میکرو کانی‌شناسی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM Leo1450VP مجهز به طیف سنجی پراش انرژی^۱ (EDS) و دستگاه میکروپروب الکترونی (EPMA) مدل SX100 مجهز به میکروسکوپ الکترونی^۲ (BSE) ساخت کشور فرانسه در شدت جریان 10 nA و ولتاژ شتاب‌دهنده 15 Kv مستقر در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران بر روی چند نقطه از مقاطع میکروسکوپی جهت شناسایی نوع و ترکیب شیمیایی کانی‌های سولفیدی و کربناتی انجام گرفت.

۴-۶- برداشت‌های ژئوفیزیکی

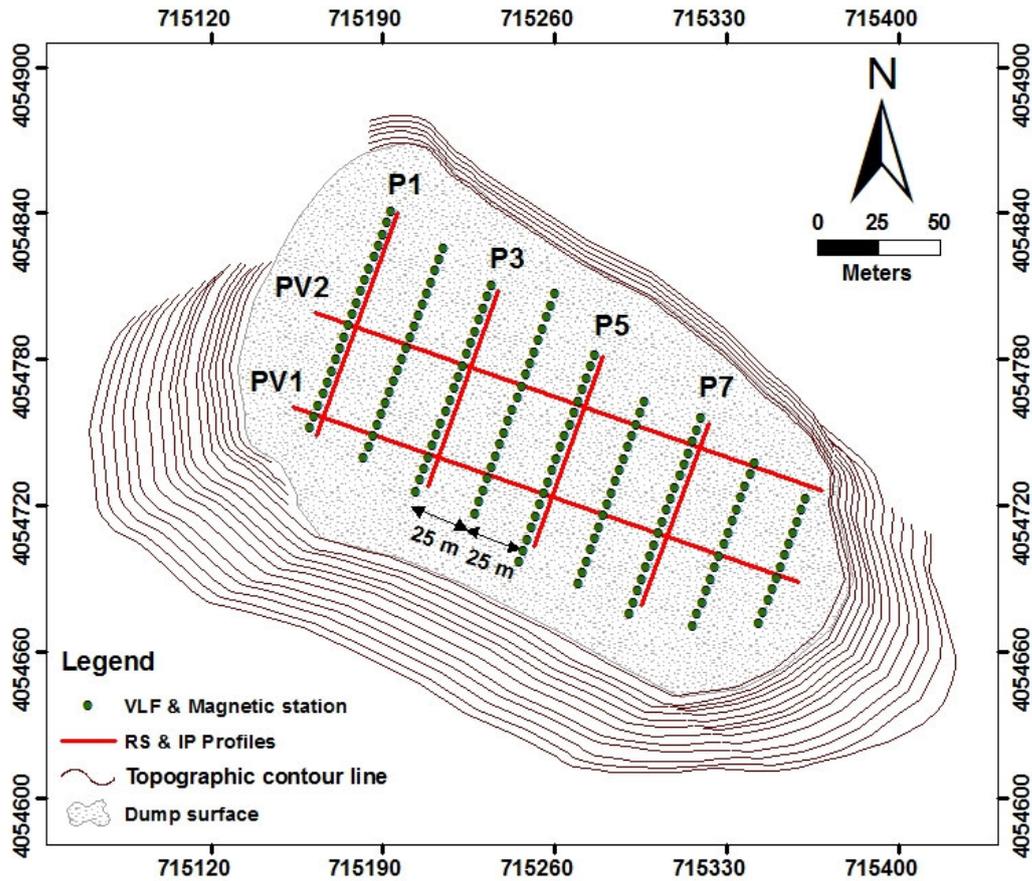
در این مطالعه، جهت بررسی و نحوه گسترش آلودگی در داخل دمپ باطله معدنی، از چهار روش ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، الکترومغناطیس^۳ (VLF)، مقاومت ویژه^۴ (Res) و پلاریزاسیون القایی^۵ (IP) بر روی یکی از دمپ‌های باطله استفاده شد. موقعیت مکانی محدوده مطالعات ژئوفیزیکی بر روی دمپ باطله در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. به همین منظور، قبل از اندازه‌گیری ابتدا شبکه برداشت طراحی و سپس مختصات جغرافیایی نقاط اندازه‌گیری توسط GPS ثبت گردید. محدوده مورد مطالعه بر روی دمپ باطله به صورت یک شبکه مستطیلی با ۹ پروفیل موازی P_1 تا P_9 (در جهت شمال شرقی- جنوب غربی) به فاصله ۲۵ متر و فاصله نقاط اندازه‌گیری ۵ متری طراحی گردید. لازم به ذکر است که

-
- 1- Energy dispersion spectrometer (EDS)
 - 2- Back scattered electron (BSE)
 - 3- Very Low Frequency (VLF)
 - 4- Resistivity (Res)
 - 5- Induced polarization (IP)

طول پروفیل‌ها بسته به فضای قابل دسترسی در محدوده مورد مطالعه بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر متغیر بود. شکل (۴-۴) موقعیت مکانی پروفیل‌های اندازه‌گیری شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. برداشت‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از دستگاه مدل GSM-19T شرکت GEMSystem ساخت کشور کانادا و مستقر در دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت. این دستگاه، میدان مغناطیسی کل زمین را بر حسب نانوتسلا اندازه‌گیری می‌کند و مجهز به یک سنسور الکترومغناطیسی می‌باشد که قادر است به طور همزمان داده‌های VLF را نیز اندازه‌گیری کند. از این رو به طور همزمان، شدت کل میدان مغناطیسی و مقادیر داده‌های الکترومغناطیسی VLF بر روی ۹ پروفیل و در مجموع در ۱۶۰ نقطه در اواخر تابستان سال ۱۳۹۷ اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری داده‌های VLF با فرکانس ۱۶/۴ کیلو هرتز انجام گرفت و فقط از داده‌های مؤلفه حقیقی در این مطالعه استفاده شد. در عملیات صحرائی ژئوالکتریک، داده‌های مقاومت ویژه (Res) و پلاریزاسیون القایی (IP) در دو جهت x و y با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی برداشت شد. آرایه دوقطبی- دوقطبی عموماً از قدرت تفکیک جانبی و عمودی بالایی برخوردار است [Power et al., 2018]. به همین منظور، ابتدا برداشت داده‌ها در جهت x و در امتداد پروفیل‌های P_1 ، P_2 ، P_5 و P_7 با فاصله الکترودی ۵ متر صورت گرفت. سپس دو پروفیل PV_1 و PV_2 در جهت y و فواصل الکترودی ۲۵ متری، عمود بر جهت x طراحی و اندازه‌گیری شد. شدت جریان اولیه به کار برده شده ۲۰۰mA و حداقل شدت خروجی در ۵۰mA مد نظر قرار گرفت، این امر در مطالعه IP برای به دست آوردن بهترین کیفیت داده‌های ممکن، حائز اهمیت است [Pierwola, 2015].

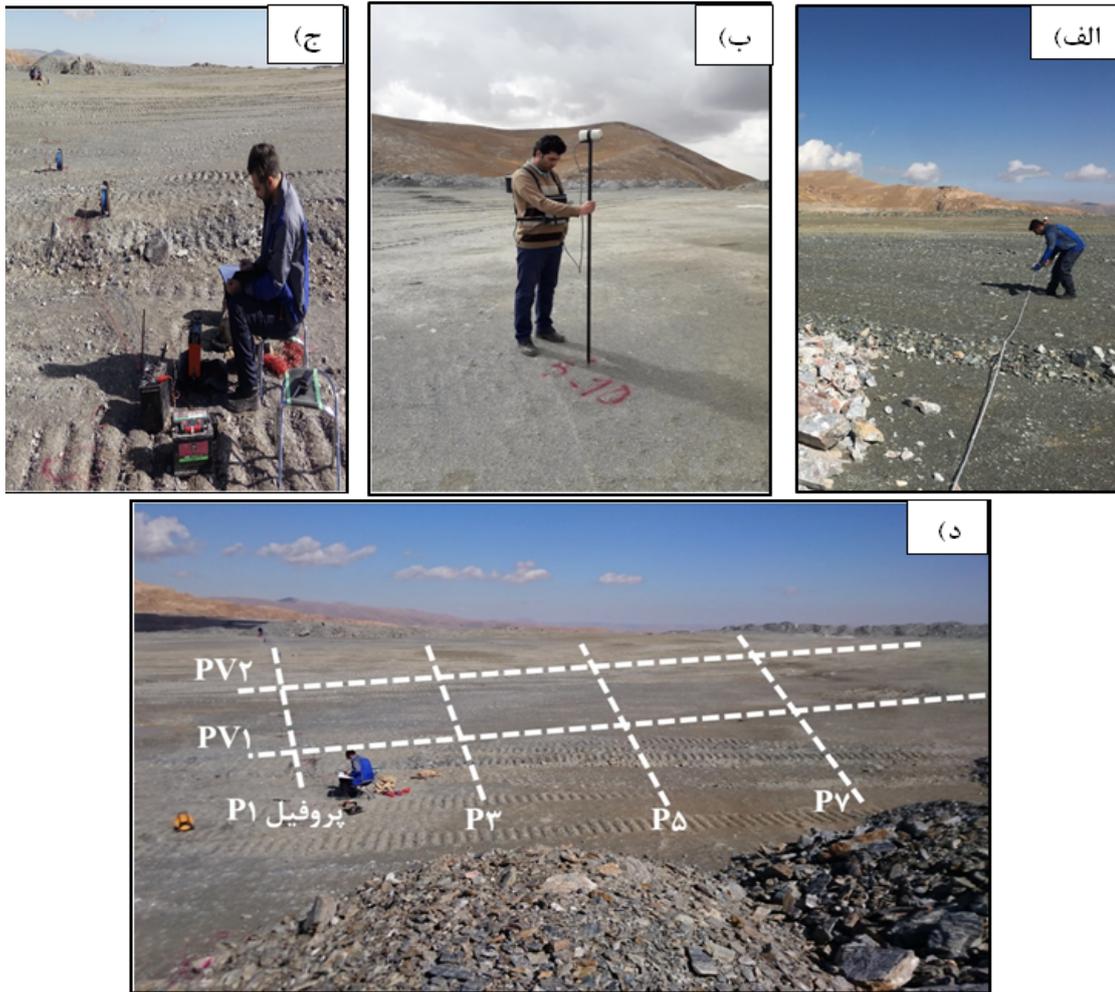
در مطالعه حاضر، اندازه‌گیری‌های Res و IP با استفاده از دستگاه ژئوالکتریک مدل SAS4000 ساخت شرکت سوئدی ABEM مستقر در آزمایشگاه ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. این دستگاه قابلیت سنجش مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان را دارد و از قابلیت تنظیم‌های مختلفی برخوردار است. انحراف معیار پایین داده‌های قرائت شده که توسط دستگاه محاسبه می‌گردد، تأیید کننده کیفیت خوب داده‌های اندازه‌گیری شده است. همچنین، از یک دستگاه GPS برای تعیین

مختصات الکترودهای قرار داده شده در شبکه برداشت استفاده شده است. موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری VLF و مغناطیسی و همچنین امتداد پروفیل‌های ژئوالکتریک در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.



شکل ۴-۴- موقعیت مکانی برداشت‌های ژئوفیزیکی بر روی دمپ باطله مورد مطالعه

بخشی از عملیات صحرایی و تجهیزات مورد استفاده در مطالعات ژئوفیزیکی در شکل‌های (۴-۵) و (۴-۶) ارائه شده است.



شکل ۴-۵- عملیات صحرائی ژئوفیزیک، الف) تعیین محل نقاط اندازه‌گیری و محدوده شبکه برداشت، ب) اندازه‌گیری داده‌های VLF و مغناطیس، ج) برداشت پروفیل‌های IP/Res، د) نمایی از شبکه برداشت ژئوالکتریک



شکل ۴-۶- تجهیزات مورد استفاده در برداشت ژئوالکتریک و ب) دستگاه مغناطیس‌سنج و VLF مدل GSM-19T

۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل توضیحاتی در مورد نوع آنالیزها و تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق ارائه شد. همچنین، نحوه انجام کارهای آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی (برداشت‌های ژئوفیزیکی) توضیح داده شد. در فصل بعدی به ارائه نتایج، مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها پرداخته می‌شود.

فصل پنجم: رائے دادہ اور تحلیل نتائج

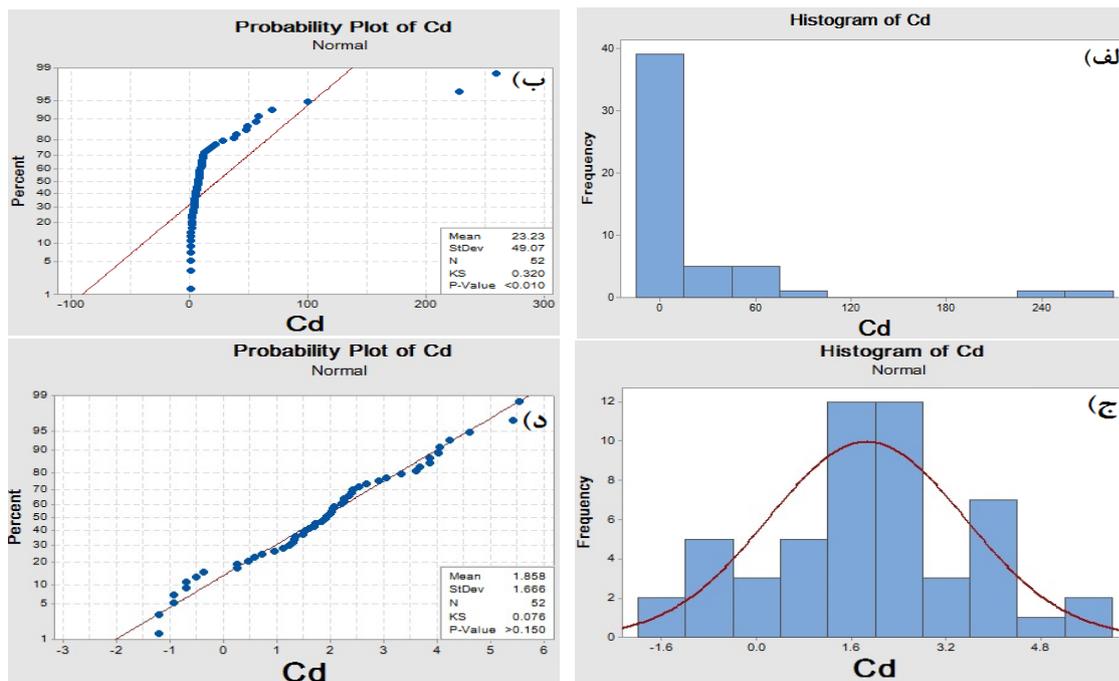
۵-۱- مقدمه

در فصل پیشین راجع به نحوه نمونه‌برداری، نوع روش‌ها و آنالیزها بحث شد. در این فصل ضمن ارائه داده‌ها به تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آنالیزها و مطالعات انجام شده در این تحقیق پرداخته می‌شود. برخی دیگر از نتایج و داده‌ها در پیوست (الف) رساله ارائه شده است.

۵-۲- نتایج آماری

نتایج غلظت فلزات سنگین به دست آمده از روش ICP-MS برای ۵۲ نمونه برداشت شده از محدوده مورد مطالعه، به همراه موقعیت جغرافیایی نمونه‌ها، در جدول (۵-۱) ارائه شده است. خلاصه‌ای از نتایج آنالیز آماری به همراه مقادیر حداکثر مجاز این فلزات در محیط‌زیست بر اساس استاندارد محیط‌زیست ایران [سازمان محیط‌زیست، ۱۳۹۷] و حد تشخیص دستگاه در جدول (۵-۲) ارائه شده است. لازم به توضیح است که، کلیه آنالیزهای آماری توسط نرم افزار IBM SPSS نسخه ۲۳ انجام گرفت. با توجه به جدول (۵-۲) می‌توان دریافت که میانگین غلظت فلزات سنگین برحسب (ppm) برای آرسنیک (۲۲۳/۹)، کادمیوم (۲۳/۲)، کروم (۱۰۴/۹)، نیکل (۸۳/۶)، سرب (۵۲۴/۶) و روی (۳۸۴۷/۱) از مقادیر مجاز بالاتر است و عناصر کبالت (۱۵/۵)، مس (۳۸/۳)، آهن (۱۶۷۱۷/۳)، مولیبدن (۱/۳) و آنتیموان (۱۳/۶) کمتر از مقادیر مجاز استاندارد محیط‌زیست ایران تعیین شد. اگرچه فلزات کبالت، مس، مولیبدن و آنتیموان، میانگینی کمتر از غلظت حد مجاز دارند، با این حال مقدار حداکثر آن حاکی از این است که در برخی مناطق غلظت این فلزات از مقدار مجاز در محیط‌زیست تجاوز کرده است (جدول ۵-۲). با این حال می‌توان بیان داشت با توجه به مقادیر میانگین غلظت فلزات سنگین، احتمال پتانسیل آلودگی فلزات سنگین در دمپ‌های باطله وجود دارد. در تحلیل همبستگی فلزات مورد مطالعه، نرمال بودن توزیع عناصر، مطلوب است ولی ضروری نیست. ولی در عین حال، انحراف شدید از توزیع نرمال می‌تواند باعث کاهش اعتماد به نتایج شود [یوسفی، ۱۳۹۳]. پیش از آغاز تحلیل‌های آماری، نرمال بودن داده‌ها

از طریق آزمون کلموگروف-اسمیرنوف^۱ اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد، تمام عناصر در این مطالعه توزیع غیرنرمال دارند. شکل (۵-۱) نتایج بررسی نرمال بودن عنصر Cd را نشان می‌دهد که دارای توزیع غیر نرمال است. جهت جلوگیری از انحراف آماری در نتایج تحلیل همبستگی، نرمال‌سازی کلیه داده‌ها با تبدیل لگاریتمی انجام گرفت (نتایج نرمال‌سازی عناصر در پیوست (الف) ارائه شده است).



شکل ۵-۱- نتایج بررسی نرمال بودن عنصر Cd، (الف) و (ب) نمودار توزیع فراوانی و نمودار احتمال^۲ قبل از نرمال‌سازی، (ج) و (د) نتایج نرمال‌سازی پس از تبدیل لگاریتمی

1- Kolmogorov-smimov
2- Probability plot

جدول ۵-۱- نتایج آنالیز ICP-MS و موقعیت جغرافیایی نمونه‌های باطله (غلظت عناصر به ppm است)

مختصات نمونه‌ها (زون S ۳۸)		نمونه	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
X	Y														
۷۱۵۶۷۷	۴۰۵۵۱۹۴	S۱	۲۹۳۷۶	۴۱۸	۶۹/۲	۳۳/۵	۹۲	۵۱	۱۷۷۰۰	۵۹۴۳	۳/۲	۱۰۰	۱۹۰۷	۱۷/۳	۱۶۶۸۰
۷۱۵۶۰۷	۴۰۵۵۰۷۱	S۲	۳۶۳۲	۱۹۷	۲۱/۵	۶/۷	۱۶	۱۸	۳۶۰۰	۲۶۵۳	۳/۵	۲۲	۱۱۴۱	۱۱	۴۰۰۹
۷۱۵۶۸۹	۴۰۵۵۰۰۷	S۳	۱۴۵۶۶	۹/۶	۱/۶	۵	۶۵	۲۷	۱۰۶۰۰	۲۳۵۳	۵/۲	۶۷	۵۸	۴/۸	۱۹۰
۷۱۵۵۳۳	۴۰۵۵۱۰۲	S۴	۱۴۳۹	۳۴۳	۵۶/۲	۱۵/۶	۱۲	۲۶	۵۶۰۰	۳۳۷۳	۲/۴	۱۳	۹۴۴	۴۲/۳	۱۱۷۹۰
۷۱۵۴۸۱	۴۰۵۵۰۱۹	S۵	۱۹۹۹۴	۱۶۶	۹/۶	۱۰/۸	۲۷	۲۸	۱۰۷۰۰	۵۸۹۲	۱/۱	۲۳	۴۵۲	۹/۵	۱۲۰۱
۷۱۵۴۵۸	۴۰۵۵۰۸۲	S۶	۳۰۸۸	۱۱۹	۴/۵	۱/۱	۱۲	۱۵	۲۶۰۰	۲۱۹۶	۰/۷	۱۱	۱۹۹	۹/۵	۳۵۱
۷۱۵۵۲۰	۴۰۵۴۹۵۵	S۷	۵۰۳۴۱	۳۰۴	۲۵۸/۶	۷۷/۴	۹۸۷	۴۴	۵۷۴۰۰	۹۲۳۷	۰/۶	۶۲۴	۲۶۳	۸/۷	۳۴۷۰۰
۷۱۵۳۹۸	۴۰۵۴۹۹۷	S۸	۶۰۲۱	۲۳۱	۸	۱۱/۹	۲۴	۴۲	۸۰۰۰	۸۸۵۸	۱/۴	۲۰	۴۹۱	۱۷/۸	۱۰۹۶
۷۱۵۳۲۸	۴۰۵۵۰۴۹	S۹	۵۳۳۴۲	۳۲	۵	۱۳/۵	۵۹	۶۵	۳۴۳۰۰	۶۸۳۲	۰/۰۵	۴۴	۱۰	۰/۲	۸۱۷
۷۱۵۶۲۳	۴۰۵۴۸۸۱	S۱۰	۳۵۳۷۸	۱۴۸	۷/۹	۱۲	۴۰	۵۱	۱۴۶۰۰	۶۲۶۳	۰/۹	۳۸	۴۱۲	۸	۲۸۹۰
۷۱۵۶۵۵	۴۰۵۴۹۵۶	S۱۱	۱۸۵۱۴	۲۳۳	۳۹/۴	۱۹/۲	۶۹	۲۸	۱۲۰۰۰	۳۶۱۱	۰/۶	۵۶	۱۴۶۹	۵/۴	۸۷۲۹
۷۱۵۵۶۷	۴۰۵۴۹۷۴	S۱۲	۴۴۲۲	۱۰۱	۱۱/۲	۴/۵	۱۴	۸	۲۹۰۰	۱۶۱۶	۱/۴	۱۴	۱۹۸	۶/۳	۲۵۱۴
۷۱۵۳۸۹	۴۰۵۴۸۹۶	S۱۳	۶۴۳۲	۱۸۲	۵/۷	۰/۵	۱۰	۱۱	۳۴۰۰	۴۷۲۷	۰/۵	۷	۲۲۲	۷/۵	۲۷۱
۷۱۵۳۴۵	۴۰۵۴۸۱۵	S۱۴	۴۱۹۳۶	۴۷/۹	۴/۶	۱۷/۴	۱۲۸	۴۸	۲۷۴۰۰	۷۴۸۵	۰/۱	۱۱۱	۱۳۵	۶	۵۵۱
۷۱۵۱۰۶	۴۰۵۴۸۲۰	S۱۵	۵۸۳۱	۱۹۷	۶/۹	۸	۱۵	۲۰	۵۰۰۰	۴۶۷۸	۰/۹	۱۰	۵۱۲	۱۲/۹	۳۶۸
۷۱۵۲۴۰	۴۰۵۴۸۹۸	S۱۶	۴۸۴۹۱	۲۴/۹	۱/۳	۱۵/۷	۱۲۱	۳۶	۲۹۲۰۰	۷۶۵۷	۰/۱	۹۵	۸۸	۱/۵	۱۶۴
۷۱۵۳۲۰	۴۰۵۴۹۱۹	S۱۷	۳۳۲۸	۱۲۴	۰/۷	۰/۵	۱۵	۴۴	۶۳۰۰	۶۸۰۹	۰/۵	۲۳	۲۴	۴/۸	۱۷۹
۷۱۵۰۵۸	۴۰۵۴۸۶۸	S۱۸	۳۰۳۶	۱۰۳	۹/۱	۰/۵	۱۰	۱۶	۴۰۰۰	۲۶۲۸	۰/۵	۶	۲۲۷	۱۰/۶	۳۰۰
۷۱۵۱۱۹	۴۰۵۴۹۲۲	S۱۹	۵۷۲۷۳	۹/۲	۰/۶	۳۷/۵	۴۶۹	۵۹	۵۹۶۰۰	۸۲۷۴	۰/۰۵	۳۵۲	۹	۰/۲	۱۴۳
۷۱۵۰۴۶	۴۰۵۴۹۵۵	S۲۰	۴۵۸۶	۱۱۵	۹/۶	۱/۹	۱۳	۱۲	۳۲۰۰	۲۱۵۸	۰/۸	۹	۲۱۰	۶/۴	۱۲۹۷
۷۱۴۹۶۳	۴۰۵۴۹۰۱	S۲۱	۹۸۶۸	۱۰۸	۳/۸	۲/۲	۲۳	۱۶	۵۹۰۰	۲۱۹۱	۰/۱	۲۰	۹۴	۴/۴	۲۵۸
۷۱۴۹۰۱	۴۰۵۴۸۳۳	S۲۲	۴۸۹۴	۳۱۳۵	۱۰۰	۹۹/۲	۱۰۴	۹۷	۵۵۰۰۰	۱۸۲۹۷	۱۴/۳	۴۶	۴۸۲۹	۱۴/۱	۵۲۹۰
۷۱۴۹۹۸	۴۰۵۴۸۲۴	S۲۳	۵۹۴۸	۱۷۵	۶/۴	۱/۱	۱۶	۲۰	۳۱۰۰	۲۳۸۴	۰/۲	۸	۹۹۱	۹	۵۶۷
۷۱۴۹۸۲	۴۰۵۴۹۸۳	S۲۴	۱۸۸۴۶	۱۴۶	۵/۵	۲/۸	۲۴	۱۳	۱۰۳۰۰	۲۷۵۴	۰/۳	۱۲	۱۷۸	۶/۱	۴۲۸
۷۱۵۰۴۷	۴۰۵۵۰۶۶	S۲۵	۱۶۹۶	۱۸۳	۱۸/۷	۴/۴	۸	۵۲	۳۴۰۰	۳۹۵۲	۱/۸	۸	۵۰۰	۲۷/۱	۱۶۴۸
۷۱۵۱۱۵	۴۰۵۵۱۰۷	S۲۶	۹۸۰	۱۱۵	۷/۶	۳/۶	۸	۱۶	۱۶۰۰	۲۰۵۶	۱/۴	۵	۳۰۰	۷/۴	۶۴۳۷
۷۱۵۰۵۷	۴۰۵۵۱۳۶	S۲۷	۶۹۶۵	۱۲۸	۱۴/۸	۵/۵	۵۴	۲۰	۶۹۰۰	۳۱۷۰	۰/۵	۴۴	۳۱۹	۱۳/۹	۴۹۶۱

ادامه جدول ۵-۱

مختصات نمونه‌ها (زون S ۳۸)		نمونه	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
X	Y														
۷۱۴۸۷۰	۴۰۵۴۹۲۷	S۲۸	۵۸۵۸	۱۲۲	۳/۷	۰/۵	۱۳	۲۱	۳۸۰۰	۳۰۲۳	۰/۵	۹	۹۳	۶/۱	۱۸۸
۷۱۴۸۰۴	۴۰۵۴۸۸۱	S۲۹	۱۵۲۷۸	۴۶۷	۲۲۸	۳۲/۱	۳۸	۳۷	۱۱۳۰۰	۳۹۷۳	۱/۸	۸۷	۹۶۹	۲۶/۱	۳۳۵۰۰
۷۱۴۷۷۱	۴۰۵۴۹۶۶	S۳۰	۹۸۷۰	۱۲۷	۶/۸	۳/۲	۱۹	۲۳	۵۹۰۰	۳۶۵۷	۰/۳	۱۷	۲۴۰	۱۱	۲۰۶۵
۷۱۴۷۹۴	۴۰۵۴۹۱۶	S۳۱	۹۲۲	۳۳/۵	۱/۳	۰/۵	۵	۲۵	۲۰۰۰	۳۰۶۳	۰/۲	۳	۴۱	۷	۱۳۵
۷۱۴۶۹۴	۴۰۵۴۹۱۴	S۳۲	۱۰۲۶۷	۲۵۳	۲۸/۲	۲۰/۷	۲۷	۲۹	۷۸۰۰	۶۴۸۸	۱/۵	۲۴	۹۸۴	۱۳/۸	۴۳۱۷
۷۱۴۶۲۴	۴۰۵۵۰۰۰	S۳۳	۹۳۴۴	۱۶۶	۳/۹	۲	۲۰	۶۲	۶۴۰۰	۶۱۶	۱/۹	۱۲	۱۶۰	۱۲/۸	۳۶۵
۷۱۴۷۶۰	۴۰۵۵۱۲۲	S۳۴	۵۰۲۵۸	۳۴/۷	۰/۵	۳۹/۸	۶۲۸	۵۱	۵۴۰۰۰	۹۰۷	۱/۹	۴۶۴	۳۶	۵	۱۳۱
۷۱۴۸۱۵	۴۰۵۵۱۰۱	S۳۵	۱۸۶۱۴	۱۱۸	۱/۸	۸/۱	۹۴	۳۰	۱۵۰۰۰	۴۳۸	۲/۱	۸۷	۳۱۴	۲۲/۵	۳۶۹
۷۱۴۷۱۷	۴۰۵۵۲۰۳	S۳۶	۱۶۰۰	۲۷/۶	۰/۴	۰/۵	۸	۴۳	۲۴۰۰	۲۹۰	۰/۲	۵	۱۴	۶	۱۰۵
۷۱۴۶۷۴	۴۰۵۵۲۶۲	S۳۷	۴۷۸۲	۱۰۲	۲/۱	۰/۵	۱۳	۲۳	۴۱۰۰	۲۶۲	۱/۱	۱۱	۱۰۶	۹/۲	۴۳۳
۷۱۴۷۵۳	۴۰۵۵۰۱۵	S۳۸	۱۰۳۱	۳۵/۹	۰/۵	۰/۵	۶	۲۹	۱۸۰۰	۳۱۹	۰/۰۵	۴	۲۳	۴/۵	۷۸
۷۱۴۹۰۰	۴۰۵۵۱۲۰	S۳۹	۶۷۹۰	۱۰۳	۳/۵	۲/۲	۲۵	۴۰	۷۰۰۰	۴۱۶	۱	۲۸	۹۱	۱۱/۸	۴۴۳
۷۱۴۹۵۰	۴۰۵۵۰۵۳	S۴۰	۱۳۹۱۵	۱۵۴	۳/۱	۳/۱	۱۷	۳۳	۸۹۰۰	۲۶۴	۱/۸	۱۲	۱۳۱	۵/۶	۵۱۰
۷۱۴۸۷۱	۴۰۵۵۰۰۰	S۴۱	۲۳۱۷۳	۱۴۴	۷/۵	۱۱/۸	۱۱۰	۳۱	۱۶۱۰۰	۵۱۰	۱	۷۸	۲۶۰	۷/۶	۱۴۷۴
۷۱۵۱۶۴	۴۰۵۵۰۰۰	S۴۲	۳۷۹۰۶	۱۷۳	۳۷/۲	۲۰/۲	۱۱۲	۴۲	۱۵۳۰۰	۴۹۹	۰/۴	۷۵	۸۹۷	۱۵/۴	۷۵۳۶
۷۱۵۲۲۸	۴۰۵۵۰۸۹	S۴۳	۳۸۹۲	۴۷۰	۴۷/۸	۱۸/۷	۱۹	۳۳	۴۵۰۰	۳۶۵	۱/۲	۲۱	۲۵۹۸	۶۱/۱	۱۵۰۳۸
۷۱۵۲۸۰	۴۰۵۴۹۹۹	S۴۴	۶۱۴۰۲	۱۴/۵	۰/۳	۳۳/۸	۳۸۸	۵۳	۵۸۲۰۰	۸۴۷	۰/۱	۳۴۰	۱۹	۱/۸	۱۶۰
۷۱۵۴۴۳	۴۰۵۴۸۷۴	S۴۵	۵۸۴۶۶	۱۳۴	۱۰/۵	۱۷/۱	۷۴	۷۴	۳۳۹۰۰	۱۲۱۶	۰/۰۵	۵۲	۳۷۱	۲/۶	۲۷۱۴
۷۱۵۵۳۰	۴۰۵۴۸۳۸	S۴۶	۵۵۱۷۵	۷/۳	۰/۳	۳۳/۴	۴۱۹	۴۹	۵۵۵۰۰	۸۱۳	۰/۰۵	۳۳۵	۱۰	۰/۵	۱۱۲
۷۱۵۴۴۶	۴۰۵۴۷۶۲	S۴۷	۵۹۳۳۰	۱۱	۰/۴	۲۸/۶	۲۷۱	۱۴۴	۵۲۷۰۰	۹۴۴	۰/۰۵	۲۵۷	۱۶	۰/۸	۱۲۸
۷۱۵۱۹۸	۴۰۵۴۸۲۹	S۴۸	۶۶۰۵۸	۲۰۹	۴۸/۲	۳۱/۵	۱۲۴	۶۴	۲۴۴۰۰	۷۷۴	۱	۱۳۴	۱۲۲	۱۰/۵	۶۵۴۱
۷۱۵۱۹۴	۴۰۵۴۷۶۶	S۴۹	۴۵۷۰۰	۷۶۶	۱۱/۴	۳۹/۱	۲۵۱	۶۴	۳۳۷۰۰	۱۱۷۳	۲	۲۱۸	۹۹۲	۲۴/۷	۱۷۳۵
۷۱۵۲۶۶	۴۰۵۴۷۹۰	S۵۰	۳۰۲۸۵	۱۰۷	۲/۶	۱۲/۷	۱۱۲	۴۰	۱۴۵۰۰	۵۴۶	۱/۳	۱۰۴	۲۱۷	۴/۶	۴۷۱
۷۱۵۲۶۲	۴۰۵۴۷۲۱	S۵۱	۲۴۵۹۹	۲۰۵	۱۲/۶	۱۷/۳	۱۵۵	۴۱	۱۵۰۰۰	۵۶۲	۱/۲	۱۱۹	۴۳۴	۱۴/۹	۱۹۲۹
۷۱۵۳۲۴	۴۰۵۴۷۳۵	S۵۲	۱۱۶۰۴	۵۶۸	۵۷/۶	۱۷/۳	۶۷	۳۲	۱۰۸۰۰	۴۱۲	۱/۷	۶۱	۱۹۵۸	۲۲/۴	۱۱۷۴۴

جدول ۵-۲- خلاصه‌ای از پارامترهای آماری فلزات مورد مطالعه و مقایسه با حداکثر غلظت مجاز استاندارد (ppm) در محیط زیست

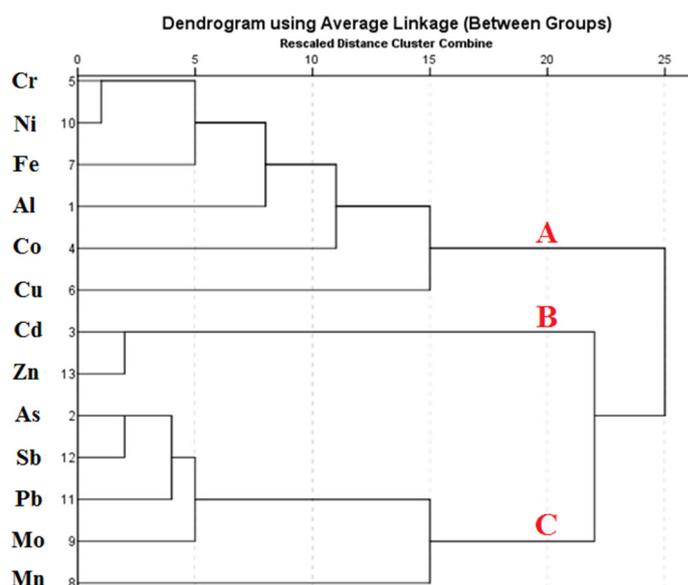
حد تشخیص دستگاه	حد مجاز	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانگین	فلز
۱۰۰	-	۲۰۵۱۰	۶۶۰۵۸	۹۲۲	۲۰۸۹۱/۲	Al
۰/۱	۱۷	۴۳۷/۶	۳۱۳۵	۷/۳	۲۲۳/۹	As
۰/۱	۳/۹	۴۹/۱	۲۵۸/۶	۰/۳	۲۳/۲	Cd
۱	۲۰	۱۹	۹۹/۲	۰/۵	۱۵/۵	Co
۱	۶۴	۱۸۰	۹۸۷	۵	۱۰۴/۹	Cr
۱	۶۳	۲۳/۶	۱۴۴	۸	۳۸/۳	Cu
۱۰۰	۴۱۰۰۰	۱۷۸۳۵/۴	۵۹۶۰۰	۱۶۰۰	۱۶۷۱۷/۳	Fe
۵	-	۳۳۵۰/۲	۱۸۲۹۷	۲۶۲	۳۲۷۷/۴	Mn
۰/۱	۴	۲/۱	۱۴/۳	۰/۰۵	۱/۳	Mo
۱	۵۰	۱۲۸	۶۲۴	۳	۸۳/۶	Ni
۱	۳۰۰	۸۲۴	۴۸۲۹	۹	۵۲۴/۶	Pb
۰/۵	۲۰	۲۰/۹	۱۴۱	۰/۲	۱۳/۶	Sb
۱	۲۰۰	۷۲۶۰/۱	۳۴۷۰۰	۷۸	۳۸۴۷/۱	Zn

سپس به منظور بررسی همبستگی عناصر مورد مطالعه، از آنالیز خوشه‌ای^۱ بر مبنای محاسبه ضریب همبستگی پیرسون^۲ بین متغیرها استفاده گردید. آنالیز خوشه‌ای یکی از پرکاربردترین روش‌های آماری چند متغیره است که متغیرهایی با همبستگی بالا را در یک گروه یا خوشه مجزا قرار می‌دهد. هر چه شباهت یا اختلاف متغیرها بیشتر باشد، خوشه‌های بارزتری تشکیل خواهد شد. هدف اصلی استفاده از آنالیز خوشه‌ای در این بخش، شناسایی گروه‌هایی از آلاینده‌های مورد مطالعه با روابط مشابه به منظور تفکیک و ارزیابی اولیه آنهاست. نتایج آنالیز خوشه‌ای در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که عناصر در سه خوشه اصلی (A، B و C) طبقه‌بندی می‌شوند. در بین عناصر موجود در خوشه A، بیشترین همبستگی مربوط به کروم و نیکل می‌باشد، که احتمالاً نشان‌دهنده منبع یکسان این دو فلز است [Mamat et al., 2014]. همچنین می‌توان دریافت که بین فلز آهن و کروم-نیکل یک ضریب همبستگی مثبتی وجود دارد. خوشه B شامل کادمیوم و روی است که به تنهایی در یک خوشه

1- Cluster Analysis (CA)

2- Pearson correlation

طبقه‌بندی شده‌اند. احتمالاً این دو عنصر فلزی به دلیل منشأ و رفتار ژئوشیمیایی مشابه، منجر به قرارگیری در یک خوشه شده است. خوشه C شامل عناصر آرسنیک، آنتیموان، سرب، مولیبدن و منگنز است که بین فلزات آرسنیک-آنتیموان-سرب یک همبستگی بالایی مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۲- نتایج آنالیز خوشه‌ای نمونه‌های دمپ باطله معدن سرب و روی انگوران

۵-۳- ارزیابی و پهنه‌بندی ریسک آلودگی عناصر سمی

ارزیابی و پهنه‌بندی ریسک آلودگی به فلزات سنگین، یکی از اقدامات اولیه جهت شناسایی گستره آلودگی به منظور اقدامات حفاظتی و کنترلی می‌باشد. چنین نقشه‌هایی قادر به نشان دادن ریسک آلودگی با تقسیم‌بندی محدوده مورد مطالعه بر اساس سطوح مختلف غلظت و یا مقادیر بیش از حد مجاز هستند. با توجه به مطالعات قبلی در معدن سرب و روی انگوران [Qishlaqi et al., 2009; Ghadimi et al., 2018]، غلظت عناصر Cr، Cu، Ni، Pb و Zn از لحاظ زیست‌محیطی در رسوبات و خاک‌های اطراف معدن حائز اهمیت هستند. فلذا، این عناصر برای ارزیابی ریسک آلودگی فلزات سنگین در محیط دمپ باطله‌های مورد مطالعه، با استفاده از دو شاخص ریسک اکولوژیک و شاخص درجه آلودگی اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفتند. از مهم‌ترین مزایای استفاده از این دو شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر، می‌توان به تجمیع فلزات در محاسبات اشاره کرد.

این امر باعث کاهش حجم داده‌های نهایی و تفسیر راحت‌تر در ارزیابی اولیه آلودگی فلزات سنگین شد. در ادامه نقشه‌های پهنه‌بندی از نحوه توزیع و گسترش فلزات سنگین با استفاده از نتایج این دو شاخص، توسط نرم افزار Surfer با روش کریجینگ تهیه شد.

۵-۳-۱- نتایج شاخص درجه آلودگی اصلاح شده

نتایج ارزیابی شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) در جدول (۵-۳) ارائه شده است. حداقل و حداکثر این شاخص به ترتیب ۰/۴۶ برای نمونه S۳۶ و ۴۱ برای نمونه S۷ به دست آمد. بر اساس نتایج این شاخص، تعداد ۳ نمونه در محدوده آلودگی بی‌نهایت شدید، ۳ نمونه آلودگی شدید، ۵ نمونه آلودگی بسیار بالا، ۷ نمونه آلودگی بالا، ۱۸ نمونه آلودگی متوسط، ۶ نمونه آلودگی کم و ۱۰ نمونه آلودگی ناچیز قرار دارند. پهنه‌بندی کیفی ریسک آلودگی از دمپ باطله با استفاده از نتایج این شاخص در شکل (۵-۳-الف) نشان داده شده است. یافته‌ها حاکی از این است که بخش شمال‌شرقی و جنوب غربی محدوده مورد مطالعه، دارای درجه آلودگی با ریسک بالایی می‌باشد و این موضوع نشان‌دهنده تجمع بالای فلزات سنگین در باطله‌های معدنی در این نواحی است.

۵-۳-۲- نتایج شاخص ریسک اکولوژیک

هاکانسون یک طبقه‌بندی استاندارد برای مقادیر شاخص ریسک اکولوژیک (RI) بر اساس غلظت ۸ آلاینده PCBs, Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr و Zn پیشنهاد کرد [Hakanson, 1980]. اگرچه غلظت^۱ PCBs و Hg در این مطالعه در نظر گرفته نشد، ولی این امر می‌تواند منجر به نتایج ناصحیح در طبقه‌بندی شود. از این رو در این تحقیق، طبقه‌بندی شاخص ریسک اکولوژیک بر اساس نوع و تعداد آلاینده‌های مورد بررسی، اصلاح گردید [Chen et al., 2017]. نتایج ارزیابی شاخص ریسک اکولوژیک

۱- غلظت پلی کلرو بی‌فنیل‌ها (PCBs)، دسته‌ای از هیدروکربن‌ها هستند که به روغن‌های پایه نفتی افزوده می‌شوند تا خواص آن را بهبود بخشد و در صنایع رنگ‌سازی، لاستیک‌سازی، الکتریکی و... کاربرد دارد.

برای هر فلز (E_r^i) و مجموع فلزات (RI) در جدول (۳-۵) ارائه شده است. طبقه‌بندی اصلاح شده برای فلزات مورد مطالعه (As, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) در جدول (۴-۵) ارائه شده است.

جدول ۳-۵- نتایج شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)، شاخص ریسک اکولوژیک (RI) و پتانسیل ریسک اکولوژیک فلزات سنگین (E_r^i) در محدوده مورد مطالعه

نمونه	E_r^i							RI	mCd
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
S1	۲۴۵/۹	۵۳۲/۳	۲/۹	۴	۱۰	۳۱/۸	۸۳/۴	۹۱۰/۳	۱۹/۵
S2	۱۱۵/۹	۱۶۵/۴	۰/۵	۱/۴	۲/۲	۱۹	۲۰	۳۲۴/۵	۶
S3	۵/۶	۱۲/۳	۲	۲/۱	۶/۷	۱	۱	۳۰/۷	۰/۷
S4	۲۰/۱/۸	۴۳۲/۳	۰/۴	۲/۱	۱/۳	۱۵/۷	۵۹	۷۱۲/۵	۱۳/۹
S5	۹۷/۶	۷۳/۸	۰/۸	۲/۲	۲/۳	۷/۵	۶	۱۹۰/۴	۳
S6	۷۰	۳۴/۶	۰/۴	۱/۲	۱/۱	۳/۳	۱/۸	۱۱۲/۴	۱/۶
S7	۱۷۸/۸	۱۹۸۹/۲	۳۰/۸	۳/۵	۶۲/۴	۴/۴	۱۷۳/۵	۲۴۴۲/۷	۴۱
S8	۱۳۵/۹	۶۱/۵	۰/۸	۳/۳	۲	۸/۲	۵/۵	۲۱۷/۲	۳/۵
S9	۱۸/۸	۳۸/۵	۱/۸	۵/۲	۴/۴	۰/۲	۴/۱	۷۲/۹	۱/۴
S10	۷۸/۱	۶۰/۸	۱/۳	۴	۳/۸	۶/۹	۱۴/۵	۱۷۸/۲	۴/۱
S11	۱۳۷/۱	۳۰۳/۱	۲/۲	۲/۲	۵/۶	۲۴/۵	۴۳/۶	۵۱۸/۲	۱۰/۷
S12	۵۹/۴	۸۶/۲	۰/۴	۰/۶	۱/۴	۳/۳	۱۲/۶	۱۶۳/۹	۳/۲
S13	۱۰۷/۱	۴۳/۸	۰/۳	۰/۹	۰/۷	۳/۷	۱/۴	۱۵۷/۸	۲/۱
S14	۲۸/۲	۳۵/۴	۴	۳/۸	۱۱/۱	۲/۳	۲/۸	۸۷/۵	۱/۷
S15	۱۱۵/۹	۵۳/۱	۰/۵	۱/۶	۱	۸/۵	۱/۸	۱۸۲/۴	۲/۵
S16	۱۴/۶	۱۰	۳/۸	۲/۹	۹/۵	۱/۵	۰/۸	۴۳/۱	۱
S17	۷۲/۹	۵/۴	۰/۵	۳/۵	۲/۳	۰/۴	۰/۹	۸۵/۹	۱/۴
S18	۶۰/۶	۷۰	۰/۳	۱/۳	۰/۶	۳/۸	۱/۵	۱۳۸/۱	۱/۶
S19	۵/۴	۴/۶	۱۴/۷	۴/۷	۳۵/۲	۰/۲	۰/۷	۶۵/۴	۲/۴
S20	۶۷/۶	۷۳/۸	۰/۴	۱	۰/۹	۳/۵	۶/۵	۱۵۳/۷	۲/۴
S21	۶۳/۵	۲۹/۲	۰/۷	۱/۳	۲	۱/۶	۱/۳	۹۹/۶	۱/۴
S22	۱۸۴۴/۱	۷۶۹/۲	۳/۳	۷/۷	۴/۶	۸۰/۵	۲۶/۵	۲۷۳۵/۸	۳۶/۷
S23	۱۰۲/۹	۴۹/۲	۰/۵	۱/۶	۰/۸	۱۶/۵	۲/۸	۱۷۴/۴	۲/۷
S24	۸۵/۹	۴۲/۳	۰/۸	۱	۱/۲	۳	۲/۱	۱۳۶/۳	۱/۹
S25	۱۰۷/۶	۱۴۳/۸	۰/۳	۴/۱	۰/۸	۸/۳	۸/۲	۲۷۳/۲	۳/۸
S26	۶۷/۶	۵۸/۵	۰/۳	۱/۳	۰/۵	۵	۳۲/۲	۱۶۵/۳	۶/۱
S27	۷۵/۳	۱۱۳/۸	۱/۷	۱/۶	۴/۴	۵/۳	۲۴/۸	۲۲۶/۹	۵/۶
S28	۷۱/۸	۲۸/۵	۰/۴	۱/۷	۰/۹	۱/۶	۰/۹	۱۰۵/۷	۱/۴
S29	۲۷۴/۷	۱۷۵۳/۸	۱/۲	۲/۹	۸/۷	۱۶/۲	۱۶۷/۵	۲۲۲۵	۳۷/۱
S30	۷۴/۷	۵۲/۳	۰/۶	۱/۸	۱/۷	۴	۱۰/۳	۱۴۵/۵	۳
S31	۱۹/۷	۱۰	۰/۲	۲	۰/۳	۰/۷	۰/۷	۳۳/۵	۰/۵
S32	۱۴۸/۸	۲۱۶/۹	۰/۸	۲/۳	۲/۴	۱۶/۴	۲۱/۶	۴۰۹/۳	۶/۹
S33	۹۷/۶	۳۰	۰/۶	۴/۹	۱/۲	۲/۷	۱/۸	۱۳۸/۹	۲/۱

ادامه جدول ۳-۵

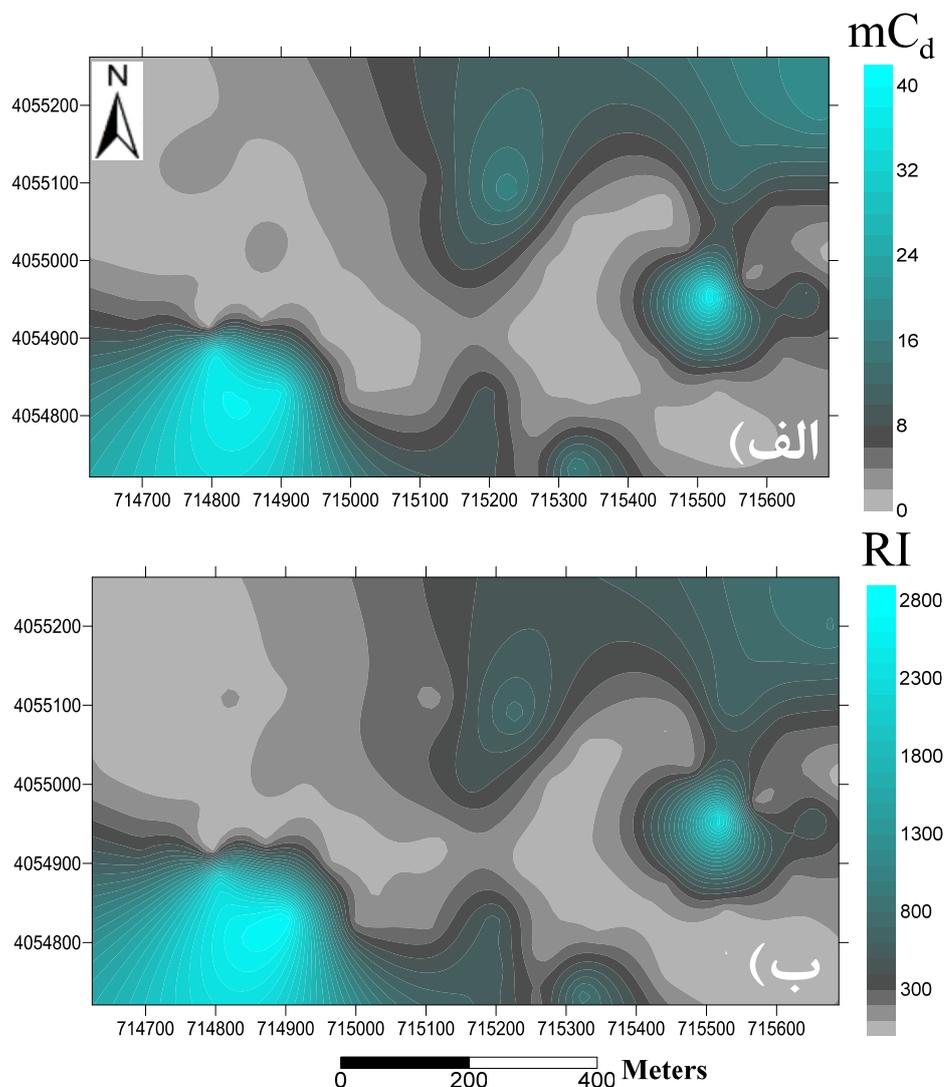
نمونه	E_r^i							RI	mCd
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
S۳۴	۲۰/۴	۳/۸	۱۹/۶	۴	۴۶/۴	۰/۶	۰/۷	۹۵/۶	۳/۳
S۳۵	۶۹/۴	۱۳/۸	۲/۹	۲/۴	۸/۷	۵/۲	۱/۸	۱۰۴/۴	۲
S۳۶	۱۶/۲	۳/۱	۰/۳	۳/۴	۰/۵	۰/۲	۰/۵	۲۴/۲	۰/۴۶
S۳۷	۶۰	۱۶/۲	۰/۴	۱/۸	۱/۱	۱/۸	۲/۲	۸۳/۴	۱/۴
S۳۸	۲۱/۱	۳/۸	۰/۲	۲/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۲۸/۶	۰/۵
S۳۹	۶۰/۶	۲۶/۹	۰/۸	۳/۲	۲/۸	۱/۵	۲/۲	۹۸	۱/۶
S۴۰	۹۰/۶	۲۳/۸	۰/۵	۲/۶	۱/۲	۲/۲	۲/۶	۱۲۳/۵	۲
S۴۱	۸۴/۷	۵۷/۷	۳/۴	۲/۵	۷/۸	۴/۳	۷/۴	۱۶۷/۸	۳/۲
S۴۲	۱۰۱/۸	۲۸۶/۲	۳/۵	۳/۳	۷/۵	۱۵	۳۷/۷	۴۵۴/۹	۹/۲
S۴۳	۲۷۶/۵	۳۶۷/۷	۰/۶	۲/۶	۲/۱	۴۳/۳	۷۵/۲	۷۶۸	۱۷/۹
S۴۴	۸/۵	۲/۳	۱۲/۱	۴/۲	۳۴	۰/۳	۰/۸	۶۲/۳	۲/۲
S۴۵	۷۸/۸	۸۰/۸	۲/۳	۵/۹	۵/۲	۶/۲	۱۳/۶	۱۹۲/۷	۴/۱
S۴۶	۴/۳	۲/۳	۱۳/۱	۳/۹	۳۳/۵	۰/۲	۰/۶	۵۷/۸	۲/۲
S۴۷	۶/۵	۳/۱	۸/۵	۱۱/۴	۲۵/۷	۰/۳	۰/۶	۵۶/۱	۱/۹
S۴۸	۱۲۲/۹	۳۷۰/۸	۳/۹	۵/۱	۱۳/۴	۲	۳۲/۷	۵۵۰/۸	۹/۱
S۴۹	۴۵۰/۶	۸۷/۷	۷/۸	۵/۱	۲۱/۸	۱۶/۵	۸/۷	۵۹۸/۲	۹/۹
S۵۰	۶۲/۹	۲۰	۳/۶	۳/۲	۱۰/۴	۳/۶	۲/۴	۱۰۶/۱	۲/۱
S۵۱	۱۲۰/۶	۹۶/۹	۴/۸	۳/۳	۱۱/۹	۷/۲	۹/۷	۲۵۴/۴	۴/۶
S۵۲	۳۳۴/۱	۴۴۳/۱	۲/۱	۲/۵	۶/۱	۳۲/۶	۵۸/۷	۸۷۹/۳	۱۶/۶

جدول ۴-۵- طبقه‌بندی اصلاح شده مقادیر شاخص ریسک اکولوژیک (RI)

E_r^i	RI	سطح آلودگی
$E_r^i < 30$	$RI < 70$	پایین
$30 < E_r^i < 60$	$70 < RI < 140$	متوسط
$60 < E_r^i < 120$	$140 < RI < 280$	قابل بررسی
$120 < E_r^i < 240$	$280 < RI < 560$	زیاد
$240 < E_r^i$	$RI > 560$	خیلی زیاد

بر اساس رویکرد هاگانسون (رابطه ۲-۴ از فصل دوم)، حداقل و حداکثر مقادیر شاخص ریسک اکولوژیک (RI) به ترتیب ۲۴/۲ برای نمونه S۳۶ و ۲۷۳۵/۸ برای نمونه S۲۲ به دست آمد که تعداد ۸ نمونه ریسک آلودگی خیلی زیاد، ۵ نمونه ریسک زیاد، ۱۵ نمونه ریسک قابل بررسی، ۱۵ نمونه ریسک متوسط و ۹ نمونه دارای ریسک پایین می‌باشند. پهنه‌بندی کیفی ریسک آلودگی از دمپ باطله با استفاده از نتایج

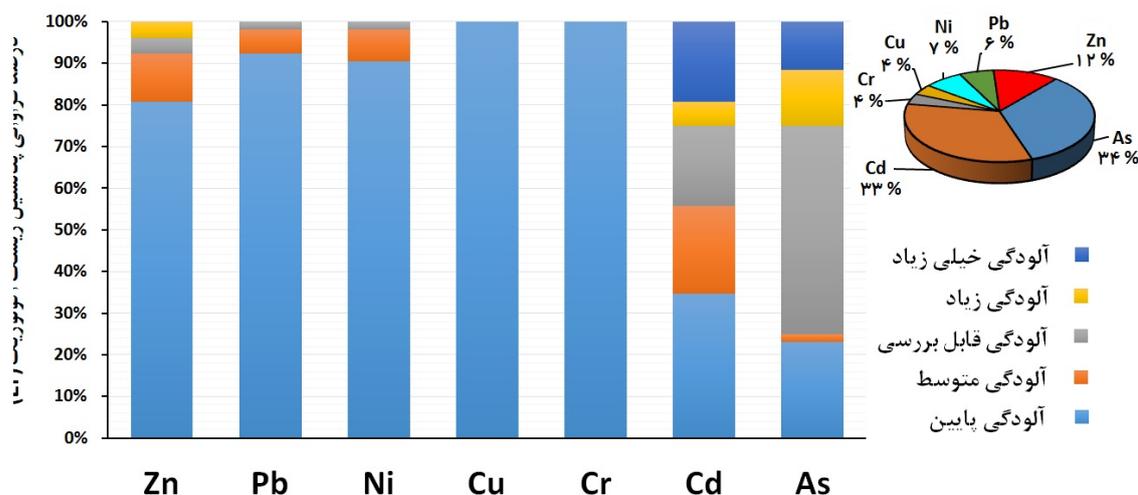
شاخص ریسک اکولوژیک (RI) در شکل (۵-۳-ب) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بخش شمال شرقی و جنوب غربی محدوده مورد مطالعه، دارای درجه آلودگی با ریسک بالایی می‌باشد و همانند شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mC_d) روند مشابهی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳- پهنه‌بندی ریسک آلودگی براساس نتایج الف) شاخص درجه آلودگی اصلاح شده (mC_d)، ب) شاخص ریسک اکولوژیک (RI)

علاوه بر این، میانگین شاخص ریسک اکولوژیک برای هر فلز ($E_{R_i}^I$) در محدوده دمپ‌های باطله از روند $As > Cd > Zn > Ni > Pb > Cr > Cu$ پیروی می‌کند. در بین فلزات انتخاب شده، فلزات Cu و Cr در همه نمونه‌ها دارای مقادیر $E_{R_i}^I < 30$ بوده و نشانگر ریسک آلودگی کم این دو فلز می‌باشد. مقادیر $E_{R_i}^I$ برای Pb نشان داد که ۹۲٪ نمونه‌ها در سطح آلودگی کم، ۶٪ نمونه‌ها دارای آلودگی متوسط و یک نمونه

(S22) دارای ریسک آلودگی قابل بررسی است. فلز Ni در ۹۰٪ از نمونه‌ها ریسک کم، ۸٪ نمونه‌ها ریسک متوسط و یک نمونه (S7) دارای ریسک آلودگی قابل بررسی است. برای Zn، ۸۱٪ از نمونه‌ها دارای مقادیر $E_{T_i}^I$ در محدوده ریسک آلودگی کم، ۱۲٪ ریسک متوسط و دو نمونه (S1 و S43) ریسک قابل بررسی و دو نمونه (S29 و S7) ریسک زیاد بود. برای Cd، مقادیر $E_{T_i}^I$ نشان داد که در ۳۵٪ از نمونه‌ها ریسک آلودگی کم، ۲۱٪ آلودگی متوسط، ۱۹٪ آلودگی قابل بررسی، ۶٪ آلودگی زیاد و در ۱۹٪ نمونه‌ها دارای ریسک آلودگی خیلی زیاد است. فلز As در ۲۳٪ نمونه‌ها ریسک آلودگی کم، یک نمونه (S12) دارای آلودگی متوسط، ۵۰٪ ریسک آلودگی قابل بررسی، ۱۳٪ آلودگی زیاد و ۱۲٪ آلودگی خیلی زیاد دارد. سهم هر یک از عناصر مورد مطالعه در تعیین شاخص ریسک اکولوژیک در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- میانگین سهم فلزات مورد مطالعه در تعیین شاخص ریسک اکولوژیک

این نتایج نشان می‌دهد که عناصر As و Cd معرف بزرگترین ریسک اکولوژیک می‌باشند و بخاطر دارا بودن شرایط ژئوشیمیایی خاص، قابلیت انحلال و تحرک بالا حتی تحت شرایط خنثی تا قلیایی و همچنین فاکتور سمیت بالا نسبت به فلزات دیگر دارای خطرات زیست‌محیطی جدی‌تری حتی در غلظت‌های کم هستند. ارزیابی شاخص ریسک اکولوژیک (RI) از خاک اطراف معدن سرب و روی در کشور چین نشان داد که، خاک منطقه آلوده به فلزات سنگین است و فلز Cd به عنوان یک نگرانی بزرگ

زیست‌محیطی در منطقه می‌باشد [Lu et al., 2015]. نتایج بررسی پائولینوس در سال ۲۰۱۶ نشان داد که زهاب خروجی از معدن و دمپ‌های باطله در معدن سرب و روی، باعث افزایش غلظت کادمیوم و آرسنیک در آب‌های سطحی منطقه شده است [Paulinus, 2016]. نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط قشلاقی و همکاران در سال ۲۰۱۰ نشان داد، خاک‌های اطراف محدوده معدن انگوران حاوی غلظت بالایی از فلز کادمیوم است و این امر بیشتر در ارتباط با فعالیت معدنی است، جایی که حجم بالایی از باطله‌های معدنی دپو شده است [Qishlaqi et al., 2010]. یافته‌های شریعتی و همکاران در سال ۱۳۹۰ در بررسی میزان آلودگی ناشی از باطله‌های فرآوری سرب و روی بر آب و خاک منطقه انگوران نشان داد که میانگین غلظت فلزات As، Cd، Ni، Pb و Zn بیش از حد مجاز هستند و بیشترین آلودگی در آب و خاک منطقه مربوط به عنصر Cd می‌باشد [شریعتی و همکاران، ۱۳۹۰].

به کارگیری این شاخص‌ها به عنوان روشی سریع و آسان در پهنه‌بندی ریسک آلودگی فلزات سنگین در دمپ‌های باطله، یک الگوی کلی و اطلاعات با ارزشی برای پیش‌بینی و مدل‌سازی در طبقه‌بندی آلودگی داد.

۵-۴- طبقه‌بندی ریسک آلودگی عناصر سمی با روش آنالیز تمایز

کاربرد تکنیک آنالیز تمایز به عنوان روشی مفید در مطالعات اکتشافی جهت شناسایی و تفکیک گروه‌ها در فصل ۲ توضیح داده شد. هر چند در مورد استفاده از این روش جهت کلاسه‌بندی و پیش‌بینی ریسک آلودگی دمپ‌های باطله، سابقه‌ای موجود نیست. بنابراین استفاده از روش آنالیز تمایز در این تحقیق، می‌تواند آنرا به عنوان ابزاری سریع و کارآمد در کلاسه‌بندی باطله‌های جدید، جهت طراحی و احداث دمپ‌ها بر اساس سطح آلودگی‌شان معرفی کند. به همین منظور، بعد از نرمال‌سازی داده‌ها، تعداد ۴۷ نمونه (S۱ تا S۴۷) برای کلاسه‌بندی و ۵ نمونه با شماره‌های S۴۸ تا S۵۲ جهت بررسی صحت نتایج به عنوان نمونه‌های جدید در نظر گرفته شد.

نتایج پهنه‌بندی و توزیع مکانی غلظت آلاینده‌ها توسط دو شاخص RI و mCd، الگو و روند مشابهی را نشان داد (شکل ۵-۲). بنابراین در این رساله، نتایج شاخص RI به عنوان اطلاعات ورودی در روش آنالیز تمایز مورد استفاده قرار گرفت. به همین منظور، ابتدا مطابق جدول (۵-۵) به هر یک از ۴۷ نمونه با توجه به سطح آلودگی محاسبه شده از شاخص RI، یک کد اختصاص داده شد. از آنجایی که تعداد نمونه‌های قرار گرفته در سطوح آلودگی زیاد و خیلی زیاد کم بود و این می‌تواند بر روی نتایج طبقه‌بندی تأثیرگذار باشد، از این رو، مجموع نمونه‌های قرار گرفته در این دو سطح آلودگی، به عنوان یک کد در نظر گرفته شد.

جدول ۵-۵- کد اختصاص داده شده به هر یک از طبقات

تعداد نمونه	شاخص (RI)	کد اختصاصی	سطح آلودگی
۹	$RI < 70$	۰	پایین
۱۴	$70 < RI < 140$	۱	متوسط
۱۴	$140 < RI < 280$	۲	قابل بررسی
۱۰	$RI > 280$	۳	زیاد+خیلی زیاد

تعداد ۱۳ متغیر از قبیل غلظت فلزات Zn، Sb، Pb، Ni، Mo، Mn، Fe، Cu، Cr، Co، Cd، As، Al، متغیر از قبیل غلظت فلزات Zn، Sb، Pb، Ni، Mo، Mn، Fe، Cu، Cr، Co، Cd، As، Al، عنوان پارامتر ورودی در روش آنالیز تمایز در نظر گرفته شد. از آنجایی که برخی از پارامترهای ورودی می‌توانند ترکیب خطی یا غیرخطی از پارامترهای ورودی دیگر داشته و باعث افزایش حجم محاسبات در تابع تمایز شود، به همین منظور آنالیز تمایز به صورت مرحله‌ای^۱ با معیار فاصله ماهالونوبیس^۲ در نرم افزار SPSS23 انجام شد. در این حالت، متغیری که بر اساس آزمون‌های آماری کمترین اثر را در تابع تمایز دارد در هر گام شناسایی و از مجموعه متغیرها خارج شد. از بین ۱۳ فلز سنگین As، Al، Cd، Co، Cr، Cu، Fe، Mn، Mo، Ni، Pb، Sb و Zn شرکت کننده در آنالیز تمایز، فقط ۳ فلز سنگین As، Pb و Zn که بیشترین تأثیر را در طبقه‌بندی مناطق بر اساس سطح آلودگی دارند، در غالب سه تابع تمایز که در رابطه‌های (۵-۱) تا (۵-۳) ارائه شده، محاسبه شد.

1- Stepwise

2- Mahalanobis distance

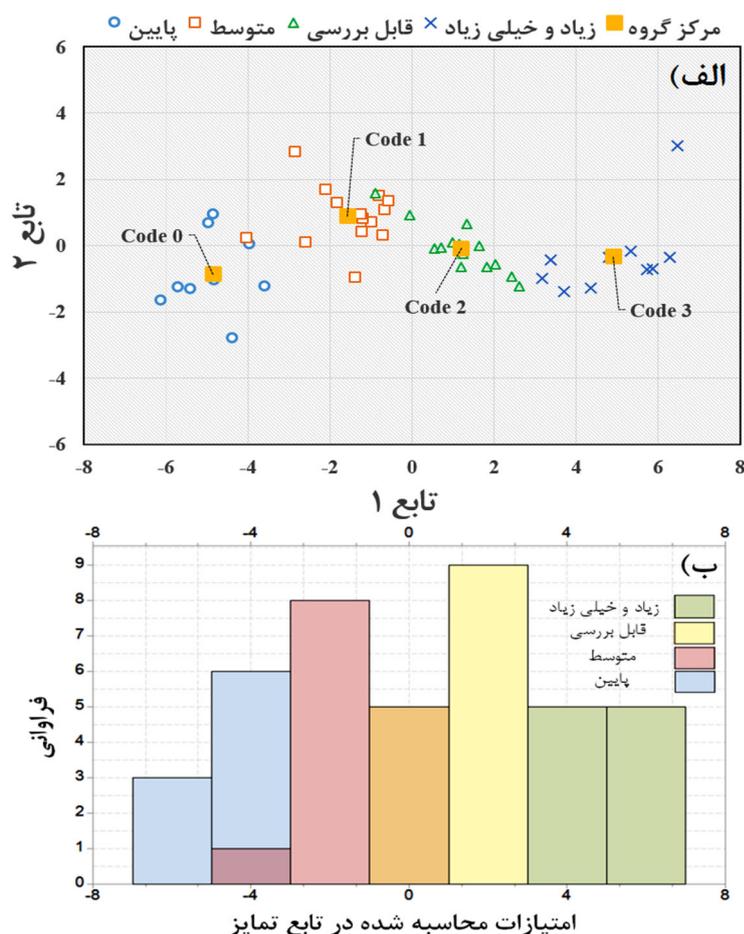
نتایج خروجی روش آنالیز تمایز در جدول (الف-۱) تا (الف-۴) پیوست الف ارائه شده است.

$$Df_1 = 0.805As + 0.512Pb + 1.180Zn - 14.465 \quad (۱-۵)$$

$$Df_2 = 1.920As - 0.791Pb - 0.535Zn - 1.138 \quad (۲-۵)$$

$$Df_3 = -0.647As + 1.301Pb - 0.74Zn + 1.260 \quad (۳-۵)$$

نقشه پراکندگی نمونه‌ها و مرکز هر یک از گروه‌ها در شکل (الف-۵) ارائه شده است. با توجه به این که اولین تابع بهترین تابع می‌تواند باشد، به منظور درک بهتر توانایی آنالیز تمایز در کلاسه‌بندی داده‌ها، نمودار فراوانی کل نمونه‌ها بر اساس امتیازات محاسبه شده با رابطه (۱-۵) ترسیم شد و نتایج در شکل (الف-۵-ب) نشان داده شده است.



شکل ۵-۵- نتایج آنالیز تمایز، الف) موقعیت نمونه‌ها در گروه‌های طبقه‌بندی شده. ب) طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس امتیازات محاسبه شده در آنالیز تمایز

در شکل (۵-۵-ب)، محدوده‌های آلودگی پایین، قابل توجه و زیاد + خیلی زیاد هیچ‌گونه همپوشانی با یکدیگر ندارند و میزان همپوشانی محدوده آلودگی متوسط با دو محدوده مجاور، کم است که این امر حاکی از قابلیت بالای روش آنالیز تمایز در طبقه‌بندی نمونه‌ها می‌باشد. به منظور نمایش عملکرد نتایج پیش‌بینی آنالیز تمایز، ارزیابی صحت طبقه‌بندی نمونه‌ها به دو روش اصلی^۱ و اعتبار سنجی متقابل^۲ صورت گرفت. در روش اعتبار سنجی متقابل، (n-۱) نمونه برای آموزش و یک نمونه برای آزمایش در نظر گرفته شده و این کار برای تمام نمونه‌ها تکرار و انجام شد. نتایج طبقه‌بندی نمونه‌ها در جدول (۶-۵) ارائه شده است.

جدول ۶-۵- نتایج طبقه‌بندی نمونه‌ها با روش آنالیز تمایز

طبقه‌بندی‌های پیش‌بینی شده							
روش	تعداد نمونه	زیاد و خیلی زیاد	قابل بررسی	متوسط	پایین	درصد صحت (%)	
اصولی	پایین	۰	۰	۰	۹	۱۰۰	
	متوسط	۰	۰	۱۳	۱	۹۲/۹	
	قابل بررسی	۰	۱۳	۱	۰	۹۲/۹	
	زیاد و خیلی زیاد	۱۰	۰	۰	۰	۱۰۰	
اعتبار سنجی متقابل	پایین	۰	۰	۰	۹	۱۰۰	
	متوسط	۰	۰	۱۳	۱	۹۲/۹	
	قابل بررسی	۰	۱۲	۲	۰	۸۵/۷	
	زیاد و خیلی زیاد	۹	۱	۰	۰	۹۰	

میزان صحت طبقه‌بندی برای کل نمونه‌ها در روش آنالیز تمایز توسط رابطه (۴-۵) محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 g_i}{N} \times 100 \quad (۴-۵)$$

که در آن، g_i معرف تعداد نمونه‌های صحیح طبقه‌بندی شده در هر گروه و N برابر تعداد کل نمونه‌ها است. بر اساس نتایج به دست آمده از طبقه‌بندی برای هر گروه، صحت روش آنالیز تمایز در طبقه‌بندی

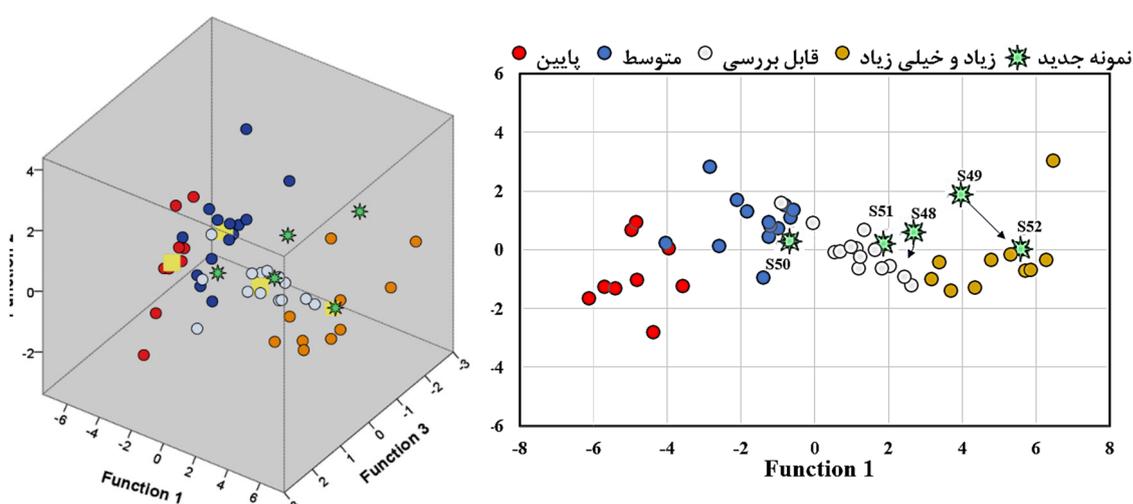
1- Original

2- Cross-Validation

کل داده‌ها، در دو روش اصلی و اعتبارسنجی متقابل به ترتیب معادل ۹۵/۷ و ۹۱/۵ درصد محاسبه گردید.

۵-۴-۱- کاربرد آنالیز تمایز در نمونه‌های جدید

مهمترین کاربرد آنالیز تمایز، کلاسه‌بندی نمونه‌های جدید در گروه‌های مورد بررسی است. بدین منظور، بر اساس توابع تمایز به دست آمده، غلظت پارامترهای مؤثر (Zn و Pb، As) از ۵ نمونه جدید (نمونه‌های S۴۸ تا S۵۲) در توابع تمایز قرار داده شد و امتیاز تمایز هر تابع به دست آمد. شکل (۵-۶) موقعیت نمونه‌های جدید نسبت به مرکز گروه‌ها را بر اساس مقادیر به دست آمده از توابع تمایز نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶- موقعیت نمونه‌های جدید در گروه‌های طبقه‌بندی شده در حالت دو و سه بعدی

بر اساس نزدیکی به مرکز هر گروه، نمونه‌های جدید کلاسه‌بندی و با نتایج شاخص RI مقایسه شد. نتایج ارائه شده در جدول (۵-۷) حاکی از این است که کلاسه‌بندی به دست آمده از روش آنالیز تمایز به غیر از نمونه S۴۸، برای بقیه نمونه‌های جدید دارای نتایج مشابهی با شاخص RI است. نتایج نشان می‌دهد که برای کلاسه‌بندی نمونه‌های جدید در باطله‌های معدن سرب و روی انگوران، روش آنالیز تمایز دارای مزیت بیشتری نسبت به شاخص‌های ارزیابی آلودگی است. در تعیین سطح آلودگی توسط شاخص‌ها، نیاز است که آنالیز شیمیایی برای تمام فلزات سنگین مرتبط با شاخص آلودگی اندازه‌گیری شود، ولی در روش آنالیز تمایز برای این نوع باطله‌ها، فقط با آنالیز سه فلز سنگین آرسنیک، سرب و

روی می‌توان تشخیص داد که نمونه در چه سطحی از آلودگی قرار دارد تا دمپ‌های باطله جدید را بر اساس این نتایج در مکان‌های مشخص طراحی و ایجاد کرد.

جدول ۵-۷- نتایج مقایسه‌ای آنالیز تمایز و شاخص ریسک اکولوژیک (RI) برای نمونه‌های جدید

نمونه	امتیاز توابع تمایز			آنالیز تمایز	شاخص (RI)
	Df_1	Df_2	Df_3		
S۴۸	۲/۷	۰/۶	-۲/۴	قابل بررسی	زیاد+ خیلی زیاد
S۴۹	۳/۹	۲/۱	۰/۴	زیاد+ خیلی زیاد	زیاد+ خیلی زیاد
S۵۰	-۰/۷	۰/۳	۰/۷	متوسط	متوسط
S۵۱	۱/۹	۰/۲	۰/۱	قابل بررسی	قابل بررسی
S۵۲	۵/۶	۰/۰۳	۰/۱	زیاد+ خیلی زیاد	زیاد+ خیلی زیاد

۵-۵- نتایج آزمایشگاهی

۵-۵-۱- نتایج آزمایش pH و EC

نتایج آزمایش pH نمونه‌ها، در دامنه‌ای بین ۹/۰۹ تا ۱۰/۰۷ با میانگین ۹/۷ بدست آمد که حاکی از قلیایی بودن نمونه‌های باطله می‌باشد. هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها، در محدوده‌ای بین ۴۷ تا ۱۱۳ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر با میانگین ۷۰/۹ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر تغییر می‌کند. نتایج اندازه‌گیری pH و EC نمونه‌های باطله در جدول (۵-۸) ارائه شده است.

۵-۵-۲- نتایج آزمایش ABA اصلاح شده

بعد از انجام آزمایش‌ها، مقادیر NP، AP و در نهایت NNP محاسبه و در جدول (۵-۸) ارائه شده است. آنالیز ICP-MS نشان داد که غلظت سولفور کل در نمونه‌ها کمتر از ۱٪ است و محیط دارای شرایط قلیایی با $pH > 6.3$ است، بنابراین در محاسبات ABA اصلاح شده از ضریب ۶۲/۵ (مطابق با رابطه ۲-۱۰ از فصل دوم) و سولفور کل به عنوان ملاک تعیین AP استفاده شد.

جدول ۵-۸- نتایج آنالیز شیمیایی و تست استاتیکی با روش ABA اصلاح شده

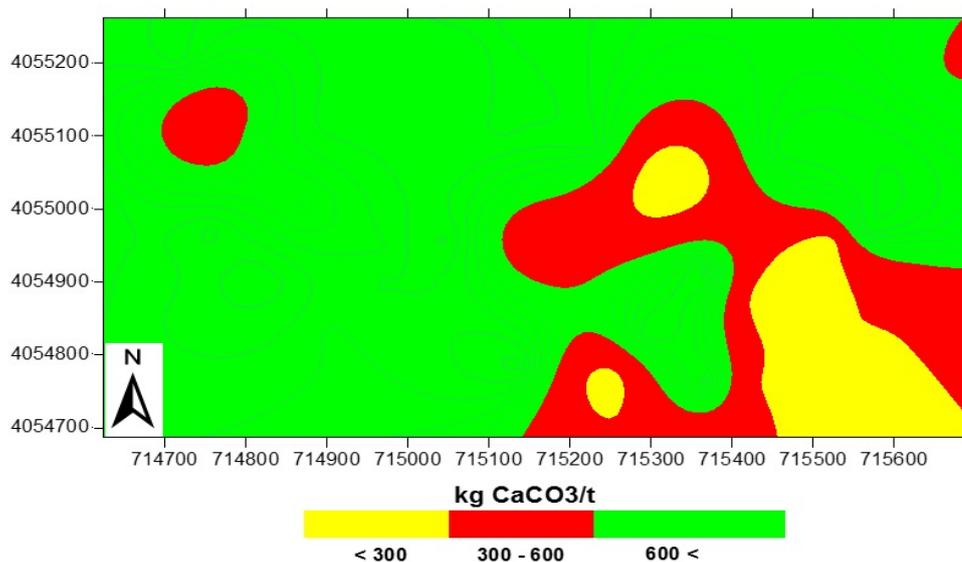
نمونه	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	S (%)	Ca (%)	Mg (%)	AP kg CaCO ₃ /t	NP kg CaCO ₃ /t	NNP kg CaCO ₃ /t
S1	۹/۵۹	۱۰۸/۷	۰/۰۶۹	۲۲/۶۶	۰/۹۹	۴/۳۱	۶۱۶/۲۵	۶۱۱/۹۴
S2	۹/۲۳	۹۸/۵	۰/۰۲۱	۳۴/۴۲	۰/۳۱	۱/۳۴	۹۳۷/۵	۹۳۶/۱۶
S3	۹/۴۴	۸۹/۵	۰/۱۴۴	۳۰/۲۲	۰/۹۴	۹/۰۳	۸۵۰	۸۴۰/۹۸
S5	۹/۷۶	۶۷/۹	۰/۰۱۷	۲۷/۷۹	۰/۵۲	۱/۰۴	۷۵۳/۷۵	۷۵۲/۷۱
S6	۹/۳۴	۷۶/۲	۰/۰۲۲	۳۵/۷۵	۰/۴۰	۱/۳۹	۹۲۸/۷۵	۹۲۷/۳۶
S7	۹/۲۶	۱۰۲/۳	۰/۰۲۹	۷/۱۹	۴/۲۳	۱/۷۹	۲۵۰	۲۴۸/۲۱
S8	۹/۶۹	۶۴/۸	۰/۰۱۲	۳۵/۵۱	۰/۲۴	۰/۷۶	۹۸۶/۲۵	۹۸۵/۴۹
S9	۹/۷۵	۵۶/۹	۰/۰۰۵	۰/۴۱	۱/۳۴	۰/۳۲	۵۰/۲۵	۴۹/۹۳
S10	۹/۷۵	۵۵/۵	۰/۰۱۲	۱۵/۵۷	۰/۶۷	۰/۷۴	۴۰۸/۷۵	۴۰۸/۰۱
S11	۹/۶۵	۴۷/۴	۰/۰۴۰	۲۹/۲۶	۰/۵۹	۲/۵۱	۸۰۵	۸۰۲/۴۹
S12	۹/۷۹	۵۹/۴	۰/۰۲۳	۳۵/۱۸	۰/۳۳	۱/۴۱	۹۴۷/۵	۹۴۶/۰۹
S13	۱۰/۰۷	۵۹/۱	۰/۰۱۲	۳۶/۱۷	۰/۲۰	۰/۷۳	۹۳۷/۵	۹۳۶/۷۷
S14	۹/۷۱	۷۸/۱	۰/۱۲۷	۱۴/۸۹	۲/۳۵	۷/۹۳	۴۱۲/۵	۴۰۴/۵۸
S16	۹/۶۸	۵۷/۸	۰/۰۰۷	۶/۱۳	۲/۴۳	۰/۴۶	۱۷۷/۵	۱۷۷/۰۴
S17	۱۰/۰۶	۶۵/۸	۰/۰۰۸	۳۳/۴۸	۱/۳۹	۰/۴۷	۹۳۱/۲۵	۹۳۰/۷۸
S18	۹/۹۸	۶۲/۳	۰/۰۲۲	۳۶/۰۳	۰/۲۱	۱/۳۶	۹۷۸/۷۵	۹۷۷/۳۹
S20	۹/۵۷	۶۱/۲	۰/۰۲۳	۳۵/۱	۰/۲۵	۱/۴۳	۹۶۲/۵	۹۶۱/۰۷
S21	۱۰/۰۶	۶۲/۱	۰/۰۳۷	۳۳/۷۳	۰/۳۴	۲/۳۲	۹۰۳/۷۵	۹۰۱/۴۳
S22	۹/۶۵	۷۶/۶	۰/۰۱۳	۳۱/۹۸	۰/۱۴	۰/۸۲	۸۴۲/۵	۸۴۱/۶۸
S23	۱۰/۰۶	۶۱/۶	۰/۰۵۰	۳۴/۹۸	۰/۲۷	۳/۱۲	۸۶۶/۲۵	۸۶۳/۱۳
S24	۹/۸۸	۷۴/۱	۰/۰۲۲	۳۱/۴۷	۰/۲۶	۱/۳۵	۸۴۳/۷۵	۸۴۲/۴۰
S25	۹/۷۰	۶۹/۳	۰/۰۱۰	۳۵/۵۳	۰/۲	۰/۶۵	۹۳۶/۲۵	۹۳۵/۶۰
S26	۹/۹۵	۶۱/۴	۰/۰۰۷	۳۶/۱۱	۰/۱	۰/۴۴	۹۶۱/۲۵	۹۶۰/۸۱
S27	۱۰/۰۱	۶۲/۱	۰/۰۰۹	۳۲/۸۵	۰/۵	۰/۵۹	۹۰۶/۲۵	۹۰۵/۶۶
S28	۹/۷۵	۶۳/۵	۰/۰۰۸	۳۵/۷	۰/۱۸	۰/۵۱	۹۵۶/۲۵	۹۵۵/۷۴
S30	۹/۸۳	۶۴/۵	۰/۰۰۸	۳۴/۲	۰/۲۵	۰/۵۲	۹۱۸/۷۵	۹۱۸/۲۳
S31	۹/۶۹	۵۶/۲	۰/۰۰۷	۳۶/۲۸	۰/۲۹	۰/۴۳	۹۹۱/۲۵	۹۹۰/۸۳
S32	۹/۶۹	۸۱/۹	۰/۰۱۸	۳۱/۷۵	۰/۲۶	۱/۱۴	۸۷۲/۵	۸۷۱/۳۶
S33	۹/۹۵	۶۲/۸	۰/۰۱۰	۳۳/۹	۰/۲۳	۰/۶۱	۹۳۱/۲۵	۹۳۰/۶۴
S34	۹/۹۴	۶۰/۴	۰/۰۱۱	۱۱/۱۳	۵/۱۰	۰/۷۰	۳۰۶/۲۵	۳۰۵/۵۵
S35	۹/۵۶	۶۷/۷	۰/۰۱۱	۲۸/۵۹	۱/۰۴	۰/۶۸	۷۹۱/۲۵	۷۹۰/۵۷
S36	۹/۹۳	۵۴/۸	۰/۰۱۰	۳۶/۵۵	۰/۲۳	۰/۵۹	۹۷۵	۹۷۴/۴۱
S37	۹/۹۶	۶۱/۷	۰/۰۱۱	۳۴/۶	۰/۲۷	۰/۷۱	۹۴۳/۷۵	۹۴۳/۰۴

ادامه جدول ۵-۸

نمونه	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	S (%)	Ca (%)	Mg (%)	AP kg CaCO ₃ /t	NP kg CaCO ₃ /t	NNP kg CaCO ₃ /t
S۳۸	۹/۷۵	۶۴/۷	۰/۰۰۷	۳۶/۰۶	۰/۱۲	۰/۴۱	۹۶۸/۷۵	۹۶۸/۳۴
S۳۹	۹/۷۴	۶۶/۸	۰/۰۱۴	۳۳/۶۵	۰/۳۸	۰/۸۸	۹۲۵	۹۲۴/۱۲
S۴۱	۹/۷۶	۶۶/۵	۰/۰۵۷	۲۹/۳۲	۱/۲۴	۳/۵۵	۷۲۸/۷۵	۷۲۵/۷۰
S۴۲	۹/۷۷	۶۷/۵	۰/۰۳۰	۱۸/۳	۰/۹	۱/۸۸	۴۶۷/۵	۴۶۵/۶۳
S۴۳	۹/۸۰	۵۷/۵	۰/۰۱۱	۳۳/۹۱	۰/۱۵	۰/۶۶	۹۳۳/۷۵	۹۳۳/۰۹
S۴۴	۹/۶۶	۶۴/۲	۰/۰۷۲	۴/۸	۵/۴۸	۴/۴۸	۲۵۰/۲۵	۲۴۵/۷۷
S۴۵	۹/۷۵	۶۰/۶	۰/۰۱۳	۲/۱۸	۲/۴۵	۰/۸۰	۱۰۳/۷۵	۱۰۲/۹۵
S۴۶	۱۰/۰۲	۵۵/۳	۰/۰۲۹	۱۲/۳۶	۳/۳۵	۱/۷۸	۳۴۶/۲۵	۳۴۴/۴۷
S۴۷	۹/۵۰	۹۱/۵	۰/۱۷۸	۶/۵۷	۳/۷۹	۱۱/۱۰	۲۶۵/۲۵	۲۵۴/۱۵
S۴۸	۹/۳۷	۱۳۱/۵	۰/۲۷۸	۴/۷	۱/۲۰	۱۷/۳۹	۲۰۵/۵	۱۸۸/۱۱
S۴۹	۹/۳۰	۱۱۳/۵	۰/۱۳۷	۱۴/۶۲	۰/۰۳	۸/۵۴	۳۷۶/۲۵	۳۶۷/۷۱
S۵۰	۹/۱۸	۱۰۳/۱	۰/۰۷۵	۲۱/۷۱	۱/۱۰	۴/۷۰	۵۸۰/۷۵	۵۷۶/۰۵
S۵۱	۹/۱۲	۱۱۹/۶	۰/۰۴۸	۲۲/۹۱	۰/۹۸	۲/۹۹	۵۹۴/۲۵	۵۹۱/۲۶
S۵۲	۹/۰۹	۱۳۱/۸	۰/۰۳۰	۳۰/۵۳	۰/۷۰	۱/۸۶	۷۹۲/۲۵	۷۹۰/۳۹

نتایج تست استاتیکی ABA اصلاح شده (جدول ۵-۸) نشان می‌دهد که مقادیر NNP دارای یک محدوده بین ۴۹ تا ۹۹۰ کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن است و مقادیر تمام نمونه‌ها بزرگتر از $20 \text{ (kg CaCO}_3/\text{t)}$ می‌باشد. مقادیر AP و NP به ترتیب در دامنه‌ای بین $0/32$ تا $17/39$ و 50 تا 991 کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن به دست آمد. این مقادیر نشان می‌دهد که باطله‌ها ظرفیت بالایی در خنثی‌سازی اسید دارند و می‌توان مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده توسط فرگوسن و مورین (Ferguson and Morin, [1991]، پیش‌بینی کرد که باطله‌های معدن پتانسیل تولید زهاب اسید را ندارند و زهاب خروجی از این نوع باطله‌ها به صورت خنثی تا قلیایی می‌باشد. نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که برخی فلزات سنگین هم‌چون As، Sb، Mo و Se تمایل دارند به صورت کمپلکس‌های آنیونی در زهاب‌های خنثی تا قلیایی مشاهده شوند. ترکیبات کانی‌شناسی نقش مهمی در خنثی‌سازی اسید دارد. حضور کانی‌های کربناتی می‌تواند دلیلی بر ظرفیت بالای خنثی‌سازی اسید در باطله‌های معدن مورد مطالعه باشد. جامبور با استفاده از آزمایش استاتیکی نشان داد که کانی‌های سیلیکاته مشارکت خیلی پایینی

نسبت به کربنات‌ها در خنثی‌سازی اسید دارند [Jambor, 2003]. مقادیر NNP به صورت نقشه‌های دوبعدی با استفاده از درونیابی کریجینگ^۱ در نرم افزار Surfer 12 ترسیم شد (شکل ۵-۷). روش کریجینگ یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین روش‌های درونیابی است که بر پایه مدل‌ها و روابط آماری برنامه‌ریزی شده است. نقشه‌های دوبعدی امکان نمایش توزیع پراکندگی متغیرها و همبستگی مستقیم و معکوس بین آنها و همچنین تعریف مناطق با ویژگی‌های خاص در مطالعات زیست‌محیطی را می‌دهد [Marescotti et al, 2010].



شکل ۵-۷- نقشه کلاسه‌بندی دمپ باطله مورد مطالعه از نظر پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP)

بر اساس نقشه کنترولی، محدوده دمپ باطله مورد مطالعه، به سه زون از نظر شدت پتانسیل خنثی‌سازی خالص (NNP) کلاسه‌بندی شد (شکل ۵-۷). زون اول در جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه با مقادیر NNP کمتر از ۳۰۰ کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن قرار گرفت که دارای مقادیر سولفور بالاتری نسبت به سایر محدوده است (محدوده زرد رنگ). زون دوم نیز در محدوده جنوب‌شرقی با گسترشی بیشتر به سمت مرکز و یک بخش کوچک در شمال غربی محدوده مورد مطالعه با مقادیر بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن قابل مشاهده است (محدوده قرمز رنگ). از ویژگی‌های این زون می‌توان به حضور

1- Kriging

کانی‌های خنثی‌کننده اشاره کرد که موجب افزایش مقادیر NNP شده است. زون سوم با مقادیر NNP بیش از ۶۰۰ کیلوگرم کربنات کلسیم برتن، بیشترین گسترش از محدوده مورد مطالعه را در بر می‌گیرد (محدوده سبز رنگ) و از مشخصات این زون می‌توان به حضور بالای کانی‌های خنثی‌کننده و مقادیر ناچیز سولفور اشاره کرد.

۵-۶- تلفیق رویکرد کانی‌شناسی با نتایج آزمایشگاهی

رویکرد کانی‌شناسی به ندرت جهت تخمین پتانسیل خنثی‌سازی آلودگی بکار برده می‌شود که اساساً بخاطر هزینه بالا و محدودیت امکانات جهت کمی کردن داده‌ها است. هرچند آنالیز کانی‌شناسی کمی خودکار (مثل QEMSCAN^۱ یا MLA^۲) امروزه می‌توانند استفاده موفقیت آمیز روش کانی‌شناسی در تخمین پتانسیل خنثی‌سازی را فراهم کنند [Dold, 2017]. در سال ۱۹۹۹، پاکتونس^۳ یک رویکرد جدید برای تعیین پتانسیل خنثی‌سازی بر اساس ترکیبات کانی‌شناسی پیشنهاد کرد [Paktunc, 1999]. در این روش، برای هر کانی موجود در نمونه براساس فراوانی و ضرایب واکنش‌های خنثی‌سازی، یک مقدار NP بر حسب اسیدسولفوریک یا کربنات کلسیم محاسبه شده است. بدین منظور برای محاسبه NP با بیش از یک نوع کانی خنثی‌کننده در نمونه، مطابق رابطه (۵-۵) خواهیم داشت:

$$NP = \sum_{i=1}^k \frac{98 \times 10 \times X_i \times c_i \times n_s}{n_i \times w_i} \quad (5-5)$$

که در آن، NP پتانسیل خنثی‌سازی با رویکرد کانی‌شناسی و واحد کیلوگرم اسید سولفوریک بر تن، ضریب ۹۸ مقدار وزن مولکولی اسید سولفوریک، ۱۰ ضریب تبدیل برای کیلوگرم بر تن، X_i مقدار کانی خنثی‌کننده i به واحد wt%، C_i تعداد کاتیون‌های غیراکسیدی در یک فرمول واحد از کانی خنثی‌کننده i ، n_s تعداد مول‌های اسید سولفوریک تولید شده از اکسایش یک مول کانی سولفیدی s ، n_i تعداد

1- Quantitative Evaluation of Minerals by SCANing electron microscopy (QEMSCAN)

2- Mineral Liberation Analysis (MLA)

3 - Paktunce

مول مورد نیاز از کانی خنثی کننده اسید، w_i وزن مولکولی کانی خنثی کننده i ($g.mol^{-1}$) و k تعداد کانی‌های خنثی کننده در نمونه است. با ضرب رابطه (۵-۵) در عدد $1/0.2$ ، مقدار NP بر حسب کیلوگرم کربنات کلسیم بر تن به دست می‌آید. پارامترهای مورد نیاز برای برخی گونه‌های کربناتی رایج در جدول (۹-۵) ارائه شده است. مقدار NP برای کانی کلسیت را می‌توان به شکل روابط (۶-۵) و (۷-۵) ساده کرد [Paktunc, 1999]:

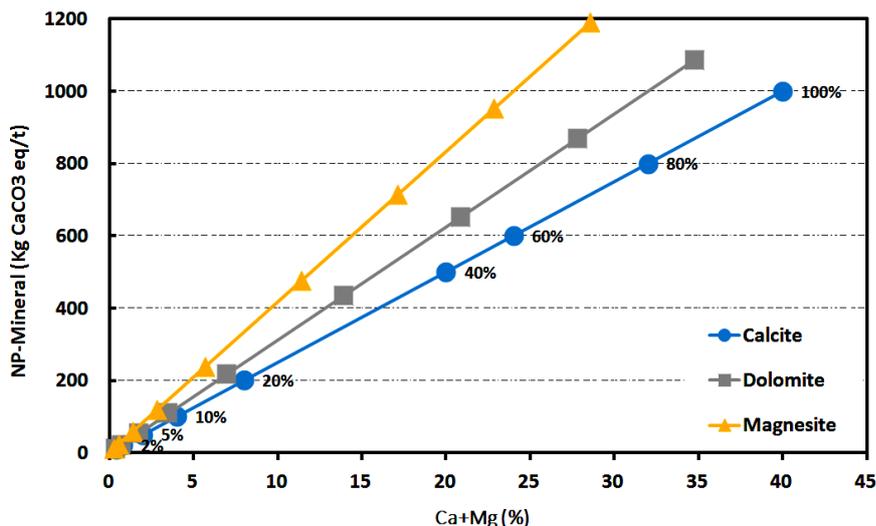
$$NP = 9.8 \times X_i \quad \text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t} \quad (۶-۵)$$

$$NP = 10 \times X_i \quad \text{kg CaCO}_3/\text{t} \quad (۷-۵)$$

مقادیر NP با رویکرد کانی‌شناسی با استفاده از پارامترهای ارائه شده در جدول (۹-۵) و رابطه (۵-۵)، برای مقادیر متنوعی (۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ تا ۱۰۰ درصد (wt%)) از یکسری کانی‌های کربناتی رایج از جمله کلسیت، دولومیت و منیزیت که قابلیت انحلال بالایی دارند، به طور جداگانه محاسبه و نتایج در شکل (۸-۵) برحسب تابعی از Ca+Mg ارائه شده است. این نمودارها می‌توانند به عنوان ابزار کیفی جهت کنترل مقادیر NP آزمایشگاهی و شناسایی نوع کانی خنثی کننده آلودگی بدون انجام آنالیزهای کانی‌شناسی، مورد استفاده قرار گیرند. در شکل (۸-۵) خطوط مربوط به کلسیت و دولومیت و منیزیت به ترتیب کمترین تا بیشترین مقادیر NP را در برابر Ca+Mg از خود نشان می‌دهند.

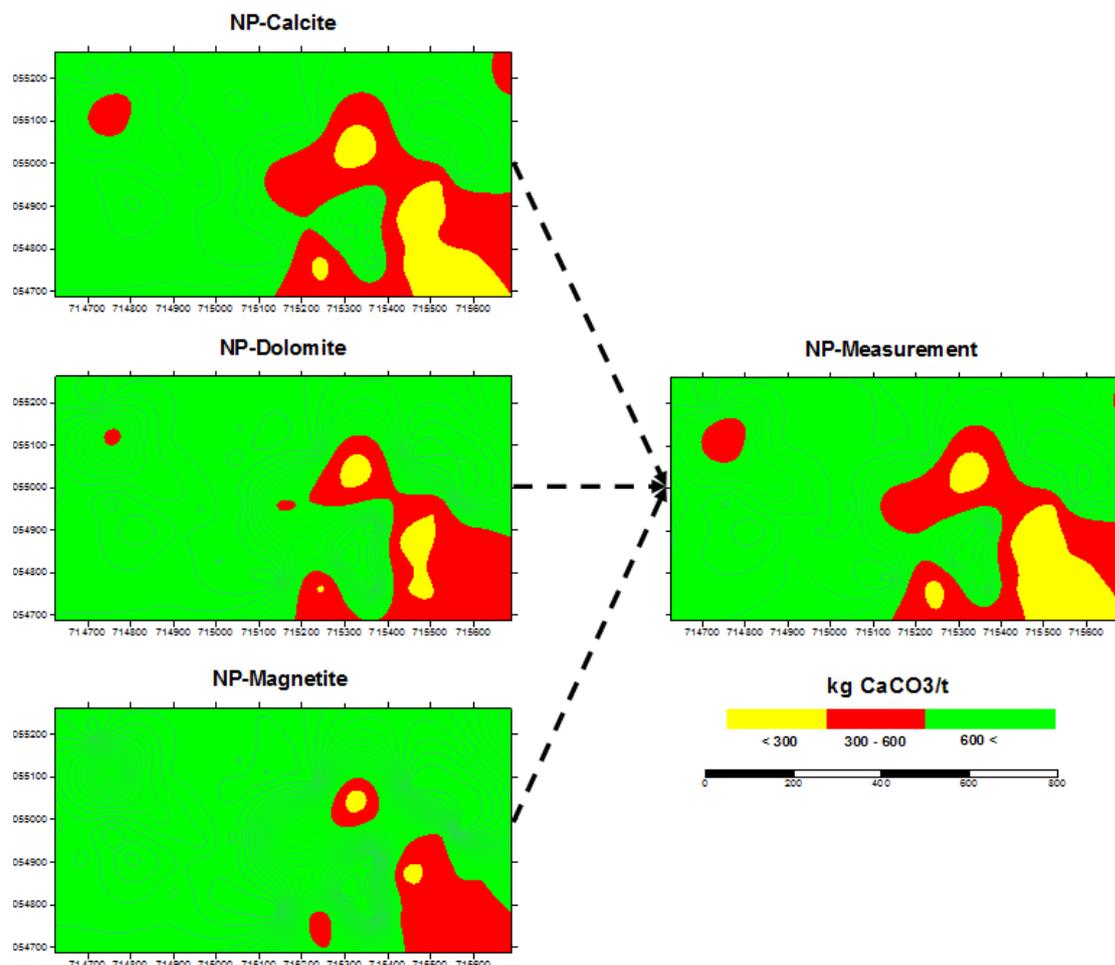
جدول ۹-۵- پارامترهای مورد استفاده جهت محاسبه NP در رویکرد کانی‌شناسی، w وزن مولکولی؛ c تعداد کاتیون غیر اکسیدی؛ n تعداد مول مورد نیاز برای خنثی کردن یک مول اسید سولفوریک تولید شده [Paktunc, 1999]

کانی	فرمول شیمیایی	w	c	n
کلسیت	CaCO_3	۱۰۰	۱	۱
مگنزیت	MgCO_3	۸۴/۳	۱	۱
دولومیت	$\text{Mg}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{CO}_3$	۹۲	۱	۱



شکل ۵-۸- ارتباط بین NP کانی‌شناسی با درصد Ca+Mg برای گونه‌های کربناتی مختلف

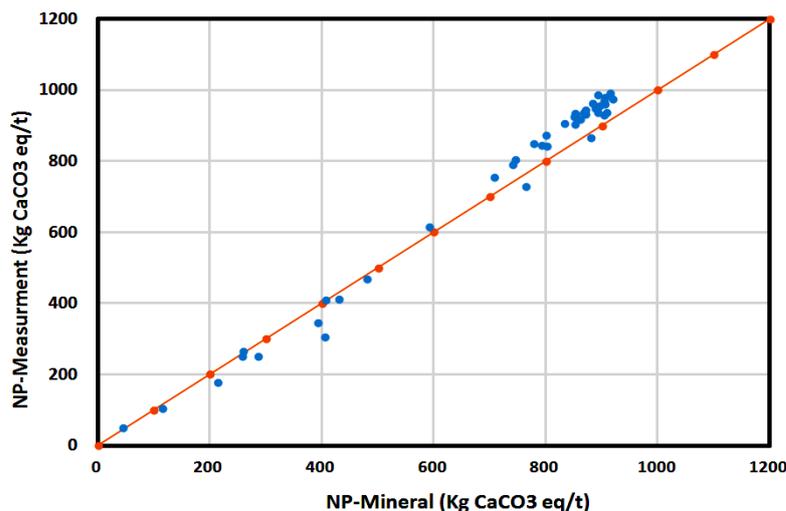
به منظور شناسایی منبع کانی خنثی‌کننده اسید در نمونه‌های باطله مورد مطالعه، ابتدا غلظت Ca و Mg از نمونه‌ها با روش ICP-MS آنالیز گردید (نتایج آنالیز در جدول ۵-۸)، سپس با استفاده از رابطه رگرسیونی به دست آمده از رویکرد کانی‌شناسی برای هر یک از کانی‌های خنثی‌کننده کلسیت، دولومیت و منیزیت در شکل (۵-۸)، مقادیر NP با رویکرد کانی‌شناسی محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده NP در روش اسید-باز اصلاح شده مقایسه گردید. توزیع دوبعدی نتایج مقایسه‌ای به سه محدوده از نظر شدت پتانسیل خنثی‌سازی کلاسه‌بندی و در شکل (۵-۹) ارائه شده است. یافته‌ها حاکی از این است که اگر کلسیت به عنوان کانی خنثی‌کننده غالب در نمونه‌ها در نظر گرفته شود، نتایج رویکرد کانی‌شناسی با حضور کلسیت دارای تطابق بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی دارد. بنابراین، کلسیت با حلالیت نسبتاً بالا را می‌توان به عنوان منبع اصلی خنثی‌سازی آلودگی و عاملی مهم در تولید زهاب قلیایی در منطقه شناسایی کرد.



شکل ۵-۹- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج رویکرد کانی‌شناسی برای هر یک از کانی‌های کلسیت، دولومیت و منیزیت

شکل (۵-۱۰) رابطه بین مقادیر پتانسیل خنثی‌سازی محاسبه شده با رویکرد کانی‌شناسی (mNP) مربوط به کلسیت در برابر NP حاصل از روش اسید-باز اصلاح شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵-۱۰) مشاهده می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری شده ارتباط خوبی با مقادیر به دست آمده از رویکرد کانی‌شناسی (mNP) با ضریب همبستگی ۰/۹۹ دارد. معادله رگرسیون خطی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و کانی‌شناسی به صورت رابطه (۵-۸) تعریف می‌شود.

$$NP = 1.12 \times mNP - 53.12 \quad R^2 = 0.989 \quad (۵-۸)$$



شکل ۵-۱۰- مقایسه NP حاصل از رویکرد کانی‌شناسی در برابر مقادیر NP اندازه‌گیری شده

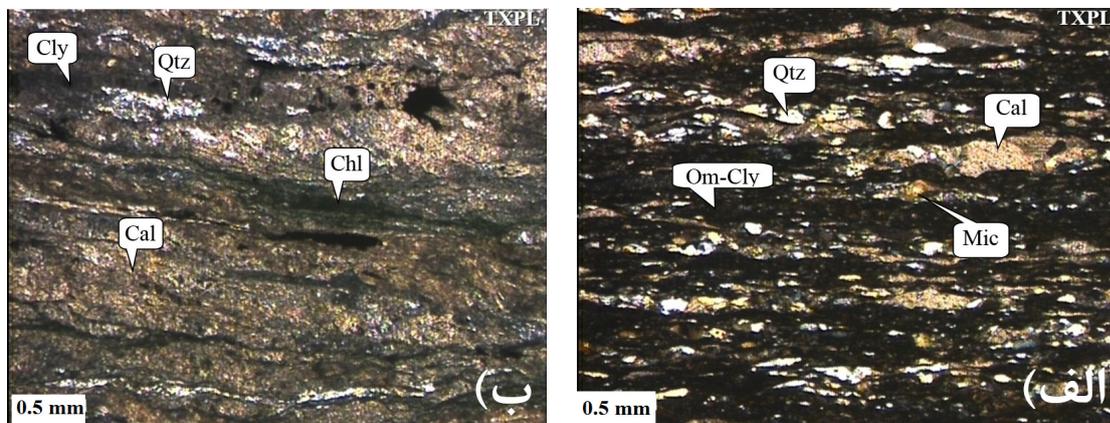
۵-۷- نتایج کانی‌شناسی

مطالعات کانی‌شناسی به منظور شناسایی نوع و الگوی توزیع کانی‌های تولید یا خنثی‌کننده اسید انجام و نتایج مربوط به هر روش در ادامه توضیح داده می‌شود.

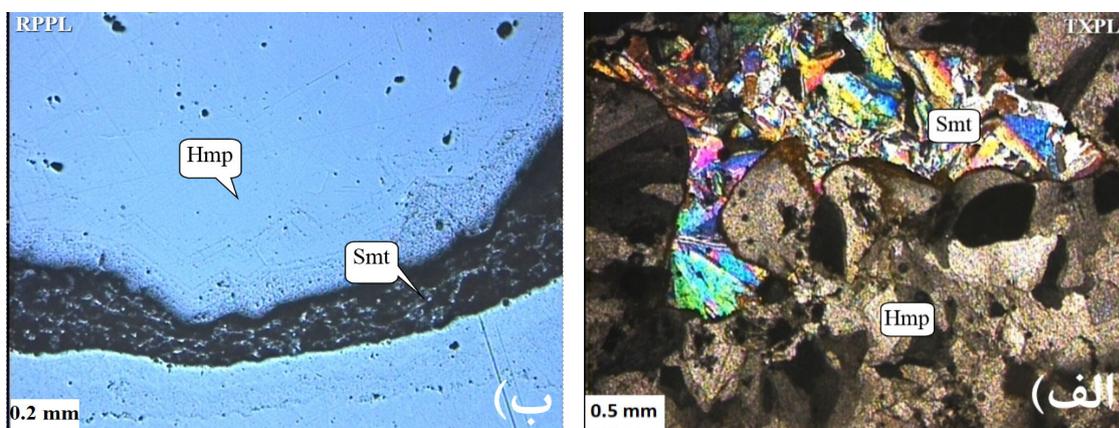
۵-۷-۱- نتایج مقاطع صیقلی - نازک

بر اساس مطالعات میکروسکوپی انجام گرفته بر روی ۸ نمونه سنگی، یک لایه‌بندی ظریف از سنگ‌های رسوبی آواری با سیمان آهکی و حاوی کمی مواد آلی و رس مشاهده شد که در آن دانه‌های کوارتز که اکثراً بی‌شکل است دارای سطح شفاف و پراکنده در زمینه کلسیت و کانی‌های رسی وجود دارد. کلریت دیگر کانی‌های سازنده نمونه می‌باشد (شکل ۵-۱۱). در بین کانی‌های کربناتی معدن، اسمیت‌زونیت مهم‌ترین، متنوع‌ترین و فراوان‌ترین کانی‌های کربناتی روی هستند که در نمونه‌های باطله مشاهده می‌شوند (شکل ۵-۱۲-الف)، همی‌مورفیت بعد از اسمیت‌زونیت، فراوان‌ترین کانی سیلیکات روی در بخش کربناتی می‌باشد که در باطله‌ها وجود دارد (شکل ۵-۱۲-ب). پیریت به صورت هم‌رشدی با اسفالریت تشکیل شده و در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود (شکل ۵-۱۳-الف)، همچنین بلورهای کشیده میلریت در زمینه کلسیت و کوارتز در مقاطع میکروسکوپی قابل مشاهده است (شکل ۵-۱۳-ب).

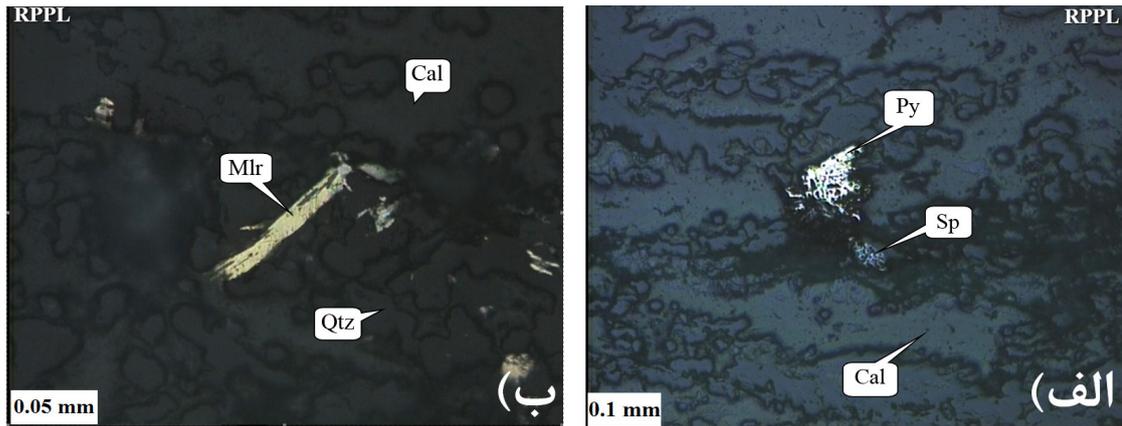
ب). ذرات گالن به صورت ادخال در همی مورفیت و بلورهای پیریت غیراکسید شده در نمونه‌های باطله وجود دارد (شکل ۵-۱۴-الف و ب).



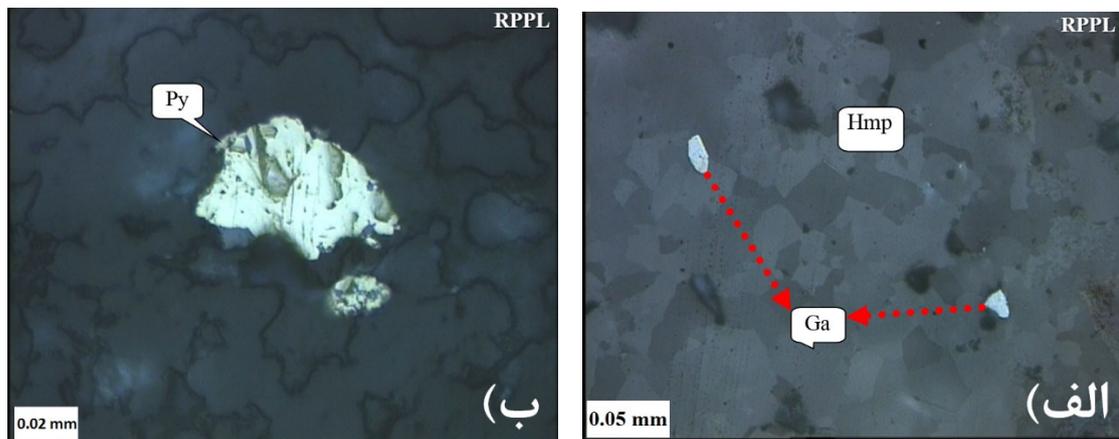
شکل ۵-۱۱- کلسیت (Cal)، کوارتز (Qtz)، کلریت (Chl)، کانی‌های رسی (Cly) و مواد آلی (Om) به صورت سیمان و ماتریکس در نمونه حضور دارند و به صورت یک لایه‌بندی ظریف در مقاطع دیده می‌شوند. الف) نمونه سنگ S۱۲ ب) نمونه سنگ S۱۹



شکل ۵-۱۲- حضور رگچه‌های اسمیت‌زونیت (Smt) در همی مورفیت (Hmp) در نمونه‌های سنگ الف) نمونه S۲۵ ب) S۲۹



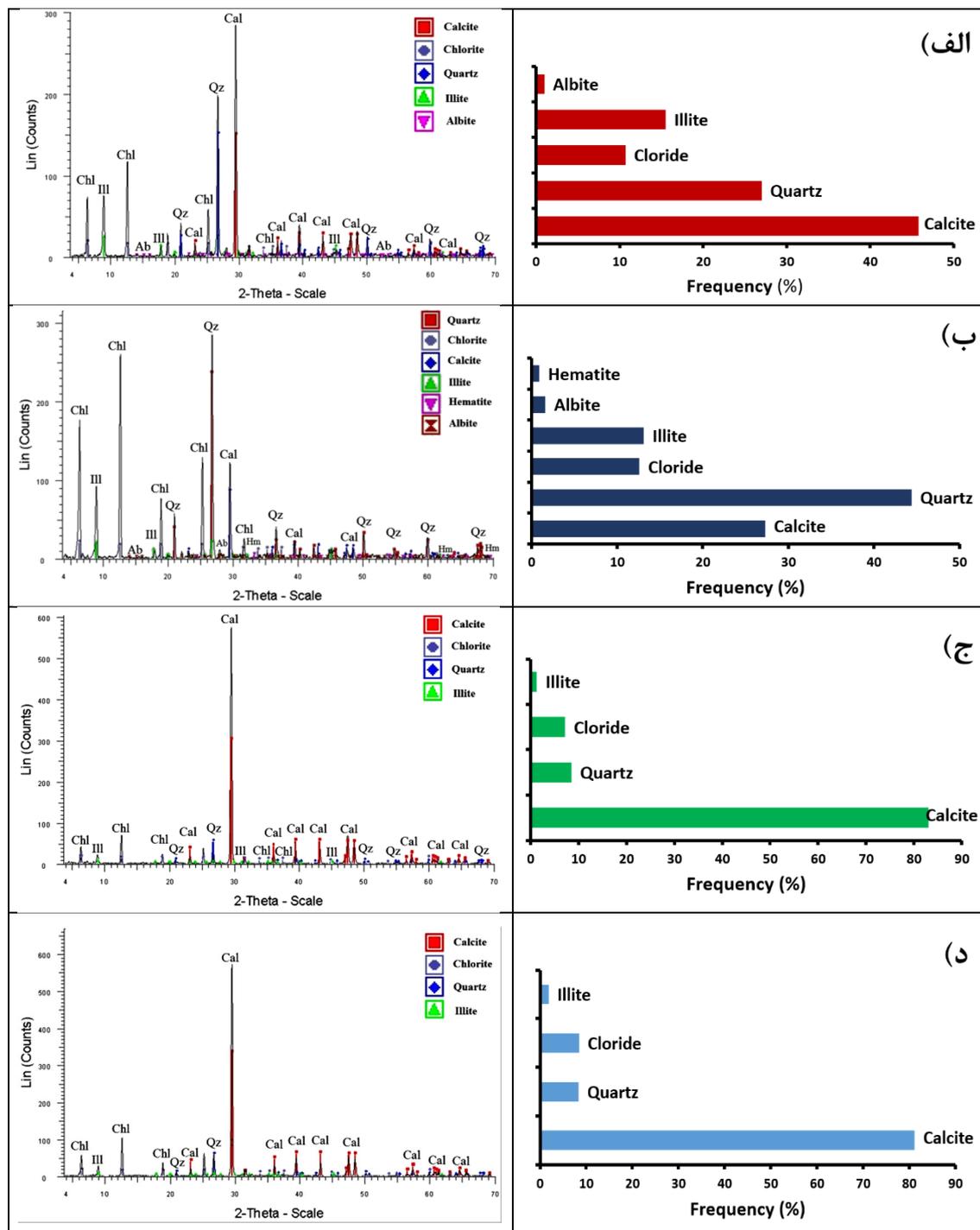
شکل ۵-۱۳- الف) پیریت (Py) و اسفالریت (Sp) در زمینه کلسیت و کوارتز در نمونه سنگ S۳۲، ب) بلورهای کشیده میلریت (Mlr) در نمونه سنگ S۴۱



شکل ۵-۱۴- الف) ادخال گالن (Ga) در همی‌مورفیت (Hmp) در نمونه سنگ S۴۵، ب) بلور پیریت (Py) با زمینه کلسیت در در نمونه سنگ S۴۹

۵-۷-۲- نتایج XRD

مطالعات به روش XRD جهت تشخیص فازهای کانی‌شناسی بر روی ۴ نمونه از دمپ باطله انجام گرفت. بر اساس نتایج آنالیز XRD، کانی‌های کلسیت، کوارتز به همراه کلریت، ایلیت و مقادیر جزئی‌تری آل‌بیت و همتایت در نمونه‌های باطله معدنی شناسایی شدند. الگوی به دست آمده از آنالیز XRD به همراه درصد کانی‌های شناسایی شده در شکل (۵-۱۵) و جدول (۵-۱۰) ارائه شده است.



شکل ۵-۱۵- طیف‌های XRD به‌همراه کانی‌های شناسایی شده برای نمونه الف (S۱۵، ب) S۳۰، ج) S۴۲ و د) S۵۲

جدول ۵-۱۰- نتایج آنالیز XRD نمونه‌های باطله (مقادیر به درصد)

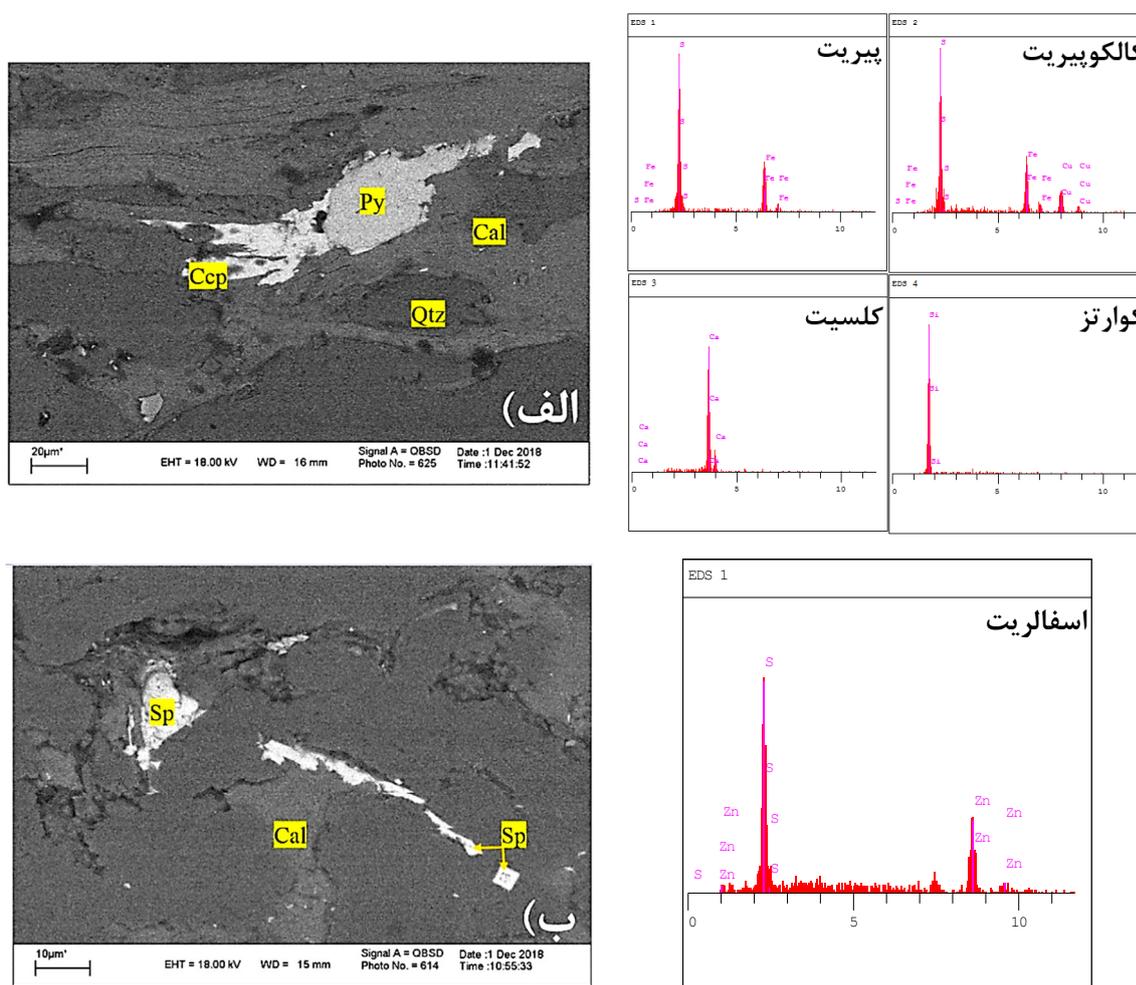
نمونه	کلسیت (Cal)	کوارتز (Qz)	کلریت (Chl)	ایلیت (Ill)	آلبیت (Ab)	هماتیت (Hm)
S۱۵	۴۵/۸	۲۷	۱۰/۷	۱۵/۵	۱	-
S۳۰	۲۷/۳	۴۴/۴	۱۲/۶	۱۳/۱	۱/۶	۰/۹
S۴۲	۸۳	۸/۵	۷/۲	۱/۳	-	-
S۵۲	۸۱/۲	۸/۴	۸/۵	۱/۹	-	-

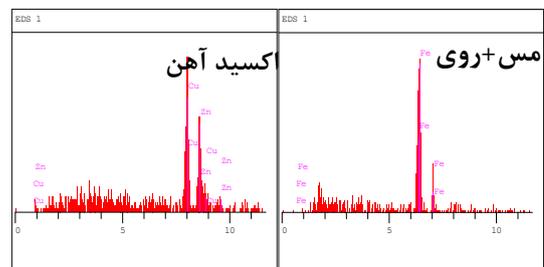
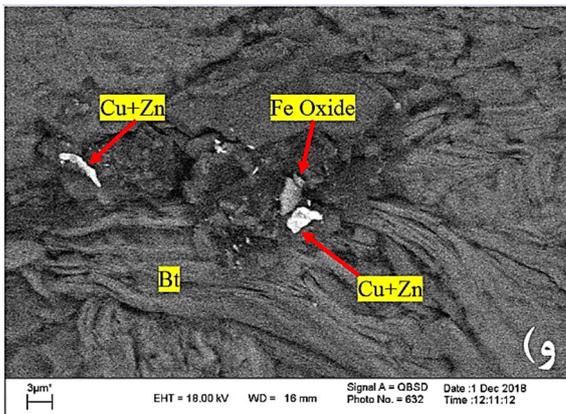
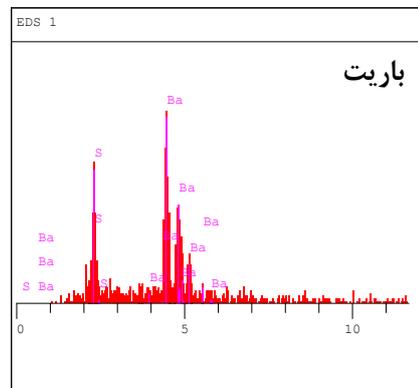
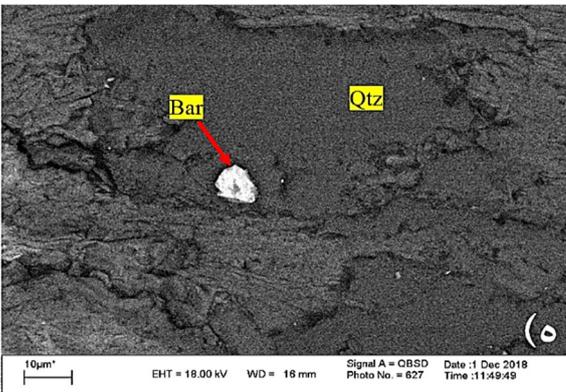
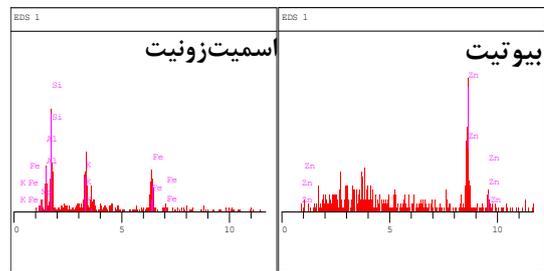
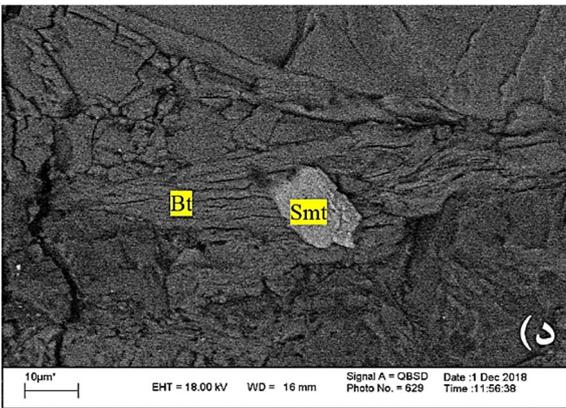
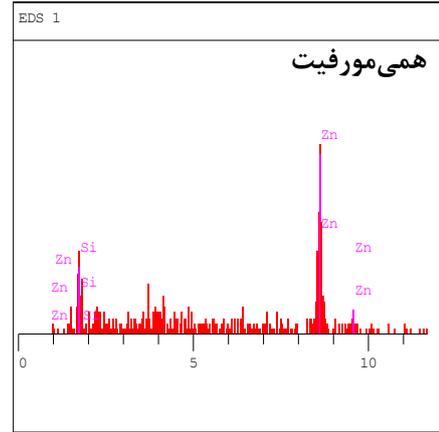
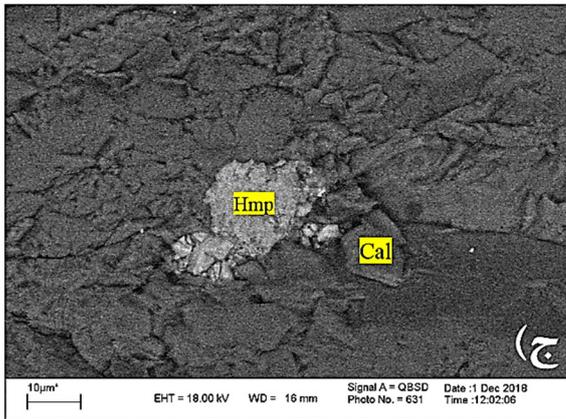
بر اساس نتایج XRD، کلسیت، کوارتز و کلریت را می‌توان به عنوان کانی‌های اصلی در خنثی‌سازی اسید در نمونه‌های باطله معرفی کرد. هرچند نرخ انحلال (R) و ظرفیت خنثی‌سازی یک مول اسید سولفوریک (C) در pH=۵ توسط کلسیت ($r = 5.62 \times 10^{-10}, c = 1$) به مراتب بالاتر از کلریت ($r = 3 \times 10^{-17}, c = 0.125$) و کوارتز ($r = 4.07 \times 10^{-18}, c = 0.004$) می‌باشد [Dold, 2017]. بنابراین می‌توان گفت که در مقایسه با کانی کلسیت، نقش دیگر کانی‌های باطله در خنثی‌سازی اسید قابل چشم‌پوشی است و کلسیت به عنوان منبع اصلی در خنثی‌سازی اسید در باطله‌های معدن شناخته می‌شود. این نتیجه می‌تواند نتایج به دست آمده از رویکرد کانی‌شناسی در بخش آزمایش ABA اصلاح شده را مورد تأیید قرار دهد. کانی‌های سولفیدی با توجه به درصد وزنی کم آنها در نمونه‌های مورد مطالعه، بر اساس آنالیز XRD قابل تشخیص نبودند. کانی‌های سولفیدی به خوبی در مطالعات میکروسکوپی و الکترونی در این تحقیق تشخیص داده شدند.

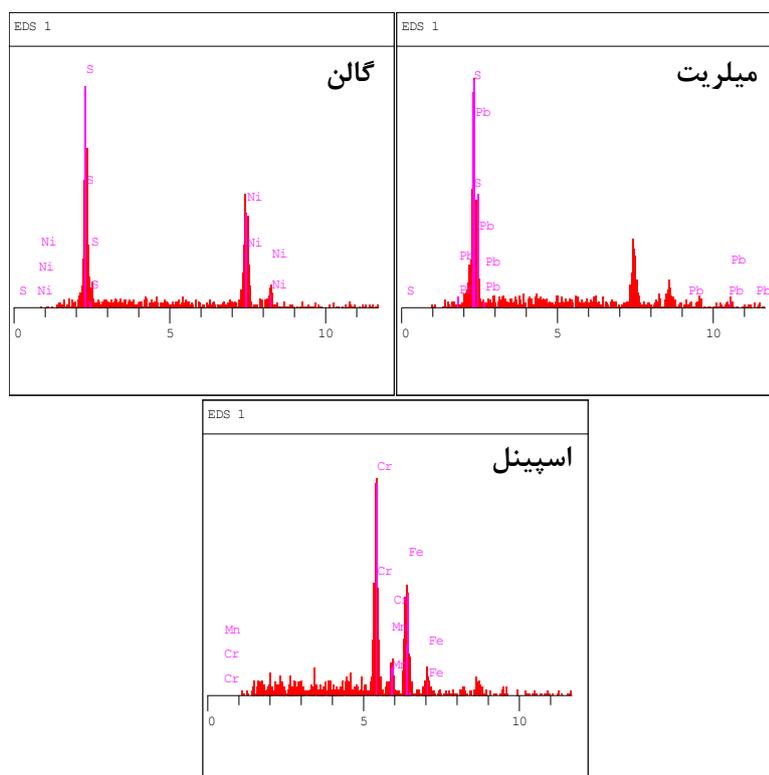
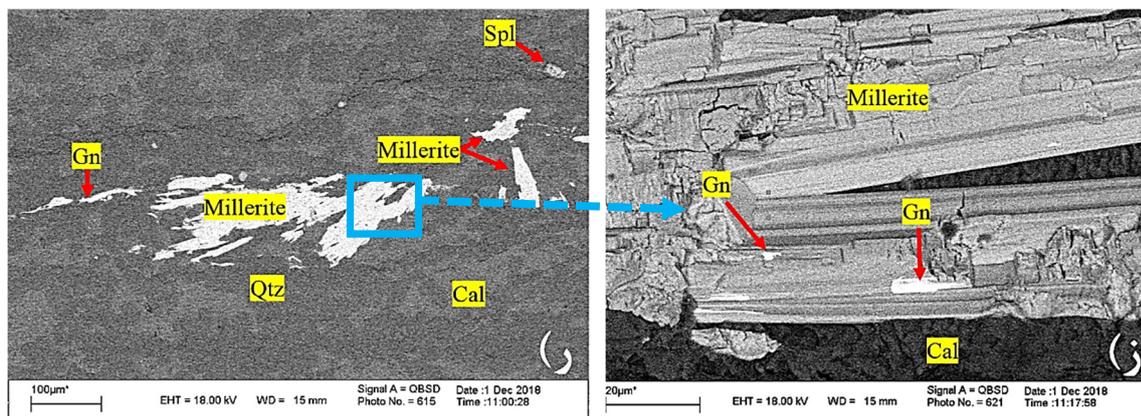
۵-۷-۳- نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM)

مطالعات SEM با هدف بررسی کانی‌های سولفیدی و شناخت بهتر ترکیب کانی‌شناسی آنها، در ۱۴ نقطه بر روی مقاطع میکروسکوپی انجام گرفت. بزرگ‌نمایی بالاتر نسبت مقاطع میکروسکوپ نوری، وضوح بیشتر، سهولت مشاهده نمونه‌ها، آنالیز SEM را به یکی از ابزارهای تحلیلی مطلوب تبدیل کرده است [Mansor, 2008]. میزان تمرکز عناصر شیمیایی که می‌توانند در ساختار کانی‌های سولفیدی و کربناتی وجود داشته باشند به صورت نمودارهای طیف‌سنجی (EDS) به همراه تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. در بررسی کانی‌های سولفیدی مشخص شد که عمده

کانی‌های موجود در این نمونه، پیریت، میلریت، اسفالریت و گالن در زمینه کلسیت و کوارتز می‌باشند. پیریت به عنوان اصلی‌ترین و بیشترین کانی سولفیدی و گالن به صورت ذرات ریز و عمدتاً درگیر درون میلریت قابل مشاهده است. پیریت به صورت محدود به اکسیدهای آهن تبدیل شده و در تصاویر قابل مشاهده است. میلریت به شکل رگچه و بلورهای کشیده که اغلب حاوی ذرات ریز گالن است به صورت پراکنده در زمینه کلسیت و کوارتز دیده می‌شود. علاوه بر آن، در زمان مطالعات انجام شده با SEM برخی کانی‌ها از جمله باریت، بیوتیت و اسپینل شناسایی و مشاهده شدند (شکل ۵-۱۶).



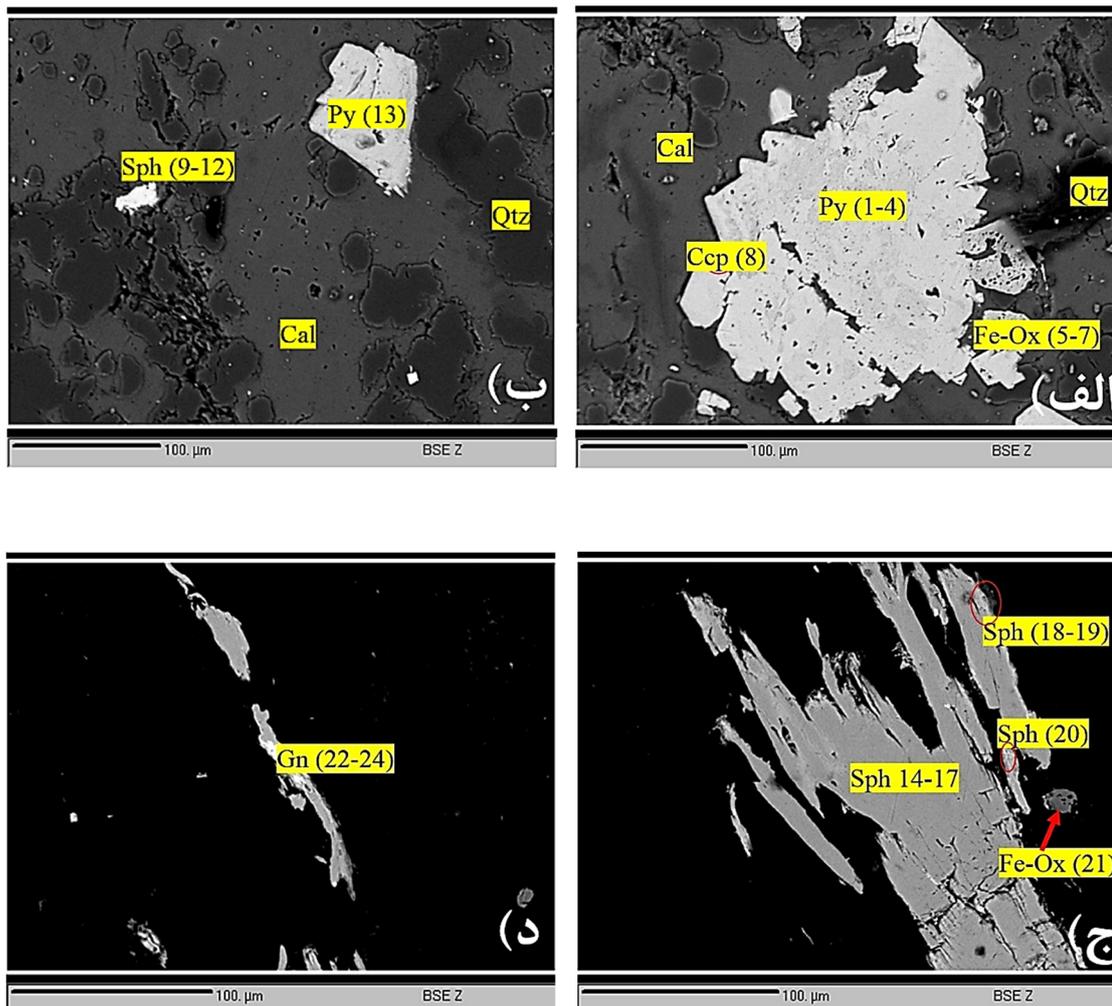




شکل ۵-۱۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از آنالیز SEM به همراه نمودار طیف‌سنجی (EDS) از کانی‌های مهم سولفیدی و کانی‌های زمینه الف) هم‌رشدی پیریت (Py) به همراه کالکوپیریت (Ccp) در زمینه کلسیت (Cal) و کوارتز (Qtz)، ب) کانی اسفالریت (Sp) گاهاً به شکل بلورهای مکعبی در زمینه کلسیت، ج) کانی همی‌مورفیت (Hmp)، د) کانی اسمیت زونیت (Smt) به همراه کانی بیوتیت (Bt)، ه) مقادیر جزئی باریت (Ba) در زمینه کوارتز، و) هم‌رشدی کانی‌های روی و مس (Cu+Zn) به همراه اکسیدهای آهن (Fe-Oxide) ناشی از اکسایش پیریت، ر) رگچه‌های کشیده میلریت (Millerite) به همراه ذرات گالن (Gn) و اسپینل (Spl) در زمینه کلسیت و کوارتز، ز) ذرات گالن در داخل کانی میلریت

۵-۷-۴- نتایج آنالیز میکروپروپ الکترونی (EPMA)

مطالعات EPMA در ۲۴ نقطه بر روی مقاطع صیقلی به منظور شناسایی ترکیبات شیمیایی از عناصر اصلی، فرعی و کمیاب در بخش کانی‌های سولفیدی نمونه‌های باطله انجام شد. در شکل (۵-۱۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) برخی از کانه‌های مورد آنالیز نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) از کانی‌های مهم سولفیدی باطله‌های سرب و روی انگوران، که تجزیه نقطه‌ای با آنالیز EPMA بر روی آنها انجام شده است. الف) هم‌رشدی پیریت (Py) به همراه کالکوپیریت (Ccp) و تبدیل پیریت به اکسیدهای آهن (Fe-Ox)، ب) کانی اسفالریت (Sph) به همراه پیریت (Py) در زمینه کلسیت (Cal) و کوارتز (Qtz)، ج) بلورهای کشیده اسفالریت (Sph) به همراه بخش محدودی اکسید آهن (Fe-Ox)، د) گالن (Gn) در زمینه کلسیت و کوارتز

بر اساس نتایج آنالیز ترکیبات شیمیایی توسط روش EPMA از کانی‌های سولفیدی که در جدول (۵-۱۱) ارائه شده است، در ترکیب کانی پیریت، متوسط درصد وزنی آرسنیک ۰/۰۳، سرب ۰/۵ و نیکل ۰/۲، در کانی کالکوپیریت، نقره ۰/۰۶، آرسنیک ۰/۰۵ و تیتانیوم ۰/۰۴ درصد، در کانی اسفالریت، آهن ۱/۴۲، کادمیوم ۰/۵۶، مس ۰/۱۵ و سرب ۰/۵ درصد، در کانی گالن، روی ۰/۳۴، کادمیوم ۰/۱، نقره ۰/۲۹ درصد و در کانی اکسید آهن، آلومینیوم ۱ و روی ۰/۸ درصد است. در واقع می‌توان اظهار داشت، حضور کادمیوم در اسفالریت به نوعی نشان‌دهنده ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه کادمیوم با عنصر روی است که باعث جانشینی آنها به جای یکدیگر در اسفالریت شده است [Gutiérrez et al, 2016]. اگرچه Cd در ساختار گالن نیز وجود دارد ولی کانی اسفالریت میزبان مناسب‌تری برای این عنصر محسوب می‌شود [اسکندری‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸]. همچنین اسفالریت می‌تواند عنصر Fe را در شبکه خود جایگزین نماید [Cook et al., 2009]. عنصر Ag در کانی گالن وجود دارد که این موضوع به علت قابلیت جایگزینی Ag در ساختار گالن است، همچنین، در ساختار کالکوپیریت نقره نیز مشاهده می‌شود.

غنی‌شدگی S بیشتر در ارتباط با کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت است. As به‌عنوان عنصر ردیاب در پیریت و کالکوپیریت وجود دارد [Miler and Gosar, 2012]. با وجود این، جانشینی As به‌جای Pb در کانی گالن نیز وجود دارد که در تحقیقات گذشته به آن اشاره شده است [Jazi and Shahabpour, 2011]. بیشترین مقادیر Cu در ارتباط با کانی کالکوپیریت است که نتایج نشان می‌دهد در ساختار اسفالریت هم می‌تواند وجود داشته باشد. عنصر Ni در کانی‌های پیریت و اکسید آهن تمرکز دارند و کانی میلریت حاوی Fe می‌باشد. نتایج کانی‌شناسی نشان داد که باطله‌های معدنی یک منبع قابل توجهی از آلودگی فلزات سمی به محیط‌زیست است. در باطله‌های سرب و روی، کانی‌های سولفیدی اغلب به‌صورت پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن و میلریت وجود دارند. کانی اسفالریت را می‌توان میزبان اصلی عناصری مانند Cd، Fe و Cu معرفی کرد و کانی‌های پیریت را به عنوان منبع فلزاتی نظیر As، Ni، Pb و S و کانی گالن و کالکوپیریت را میزبان Ag دانست. از نظر ژئوشیمیایی، بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط مرنندی و همکاران (۱۳۹۶)، در کانسنگ

سولفیدی، اسفالریت به‌عنوان مهم‌ترین کانی حامل عناصر فرعی و کمیاب شناسایی شد که به‌عنوان منبع اصلی عناصری نظیر کادمیوم، نقره، ژرمانیم، کبالت، آرسنیک، گالیم و ایندیم با عیار اقتصادی قابل تأمل است. در کانسنگ کربناتی، اسمیت‌زونیت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کانی‌های میزبان برای عناصری هم‌چون نیکل، کبالت، آرسنیک، کادمیوم معرفی شد [مرندی و همکاران، ۱۳۹۶]. بنابراین، این کانی‌ها به‌دلیل فراوانی در معدن و هم‌چنین حاوی عناصر فرعی و کمیاب، از جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی حائز اهمیت می‌باشند.

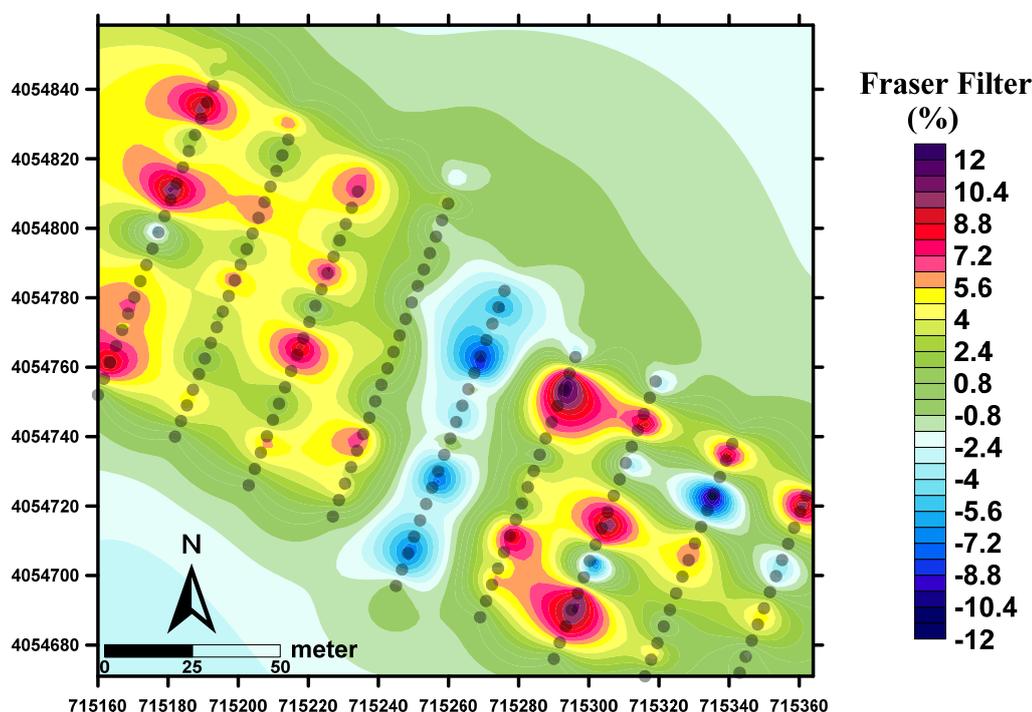
جدول ۵-۱۱- نتایج آنالیز میکروپروپ الکترونی از نمونه‌های باطله (مقادیر به درصد وزنی)، موقعیت نقاط آنالیزی در شکل (۵-۱۷) با اعداد ۱ تا ۲۴ نمایش داده شده است

نقطه آنالیز	کانی	Ag	Al	As	Ba	Ca	Cd	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	S	Ti	Zn	کل
۱	پیریت	۰	۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۰/۰۹	۴۵/۹۳	۰	۰	۰/۱۸	۰/۷۴	۵۲/۳۵	۰	۰	۹۹/۳۶
۲		۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰	۰/۰۷	۴۵/۹۹	۰/۰۲	۰	۰/۱	۰/۸۱	۵۲/۹۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۱۰۰/۳
۳		۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۳۵	۰/۰۳	۰	۰	۴۵/۴۹	۰	۰	۰	۰/۳۲	۵۲/۷۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۹۹/۱۱
۴		۰	۰	۰/۰۸	۰	۰/۱	۰	۰	۴۵/۵۰	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۴۴	۵۳/۰۷	۰/۰۵	۰	۹۹/۷
۱۳		۰	۰	۰/۰۲	۰	۰/۰۷	۰	۰/۲	۴۵/۸۶	۰/۰۱	۰	۰/۲۹	۰/۱۵	۵۲/۷۱	۰	۰/۰۵	۹۹/۴
۸	کالکوپیریت	۰/۰۶	۰	۰/۰۵	۰	۰/۲۲	۰	۳۳/۸۸	۳۰/۱۳	۰/۰۴	۰	۰	۰	۳۳/۷۲	۰/۰۴	۰	۹۸/۲۲
۹	اسفالریت	۰/۰۷	۰	۰	۰	۰/۱۷	۱/۴۶	۰	۲/۸۶	۰/۰۳	۰/۱	۰	۰/۲۶	۳۲/۲۱	۰	۶۳/۱۵	۱۰۰/۴
۱۰		۰/۰۹	۰	۰	۰/۰۲	۰/۲۸	۰/۷۶	۰/۲	۳/۵۹	۰/۰۲	۰	۰	۰/۶۸	۳۲/۲۷	۰/۰۵	۶۱/۷۶	۹۹/۸۸
۱۱		۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۳۳	۰/۳۵	۰	۳/۸۱	۰/۰۳	۰	۰	۰	۳۳/۸۹	۰	۶۱/۸۳	۱۰۰/۳
۱۲		۰	۰	۰	۰	۰/۳۱	۰/۳۶	۰	۱/۷۳	۰/۱	۰/۰۶	۰	۰	۳۲/۷۹	۰	۶۴/۴۱	۹۹/۷۶
۱۴		۰	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۴۴	۰/۶۴	۰/۰۴	۰	۰	۱/۷۵	۳۳/۴۷	۰/۰۳	۶۳/۲۵	۹۹/۷۷
۱۵		۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۵۸	۰/۰۱	۰/۰۳	۰	۰	۳۳/۱۱	۰/۰۳	۶۴/۲۴	۹۸/۵۹
۱۶		۰	۰	۰	۰/۳۶	۰/۰۳	۲/۵۱	۰/۲۲	۰/۷۳	۰	۰	۰	۱/۰۹	۳۳/۸۴	۰/۰۲	۶۲/۰۹	۱۰۰/۹
۱۷		۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۴۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰	۰	۳۳/۱۸	۰/۰۲	۶۴/۴۱	۹۸/۴۱
۱۸		۰	۰/۰۳	۰	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۳۲	۰	۰/۱۵	۰	۰	۰	۰/۴۷	۳۲/۵۱	۰	۶۴/۰۱	۹۹/۱۱
۱۹		۰	۰/۰۶	۰	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۵۹	۰/۱۲	۰/۰۳	۰	۰	۳۳/۲۰	۰	۶۴/۳۱	۹۸/۹۴
۲۰		۰	۰/۰۱	۰	۰	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۵۹	۰/۰۵	۰	۰	۱/۱۵	۳۲/۶۴	۰	۶۱/۱۲	۹۶/۱۶
۲۲	گالن	۰	۰	۰	۰	۰/۱۳	۰	۰/۲۸	۰/۰۲	۰	۰/۴۷	۸۵	۱۲/۷۲	۰	۰/۳۱	۹۹/۱۱	
۲۳		۰/۲۹	۰	۰/۰۵	۰	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۰۹	۰	۰	۰	۸۵/۷۲	۱۲/۸۲	۰/۰۳	۰/۳۲	۱۰۰/۱
۲۴		۰	۰	۰	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۲۳	۰	۰/۳۸	۰	۰/۰۵	۰	۸۵/۸۵	۱۲/۸۶	۰	۰/۴۱	۱۰۰
۵	اکسید آهن	۰	۱/۰۱	۰	۰	۰/۲۱	۰	۰/۲۱	۵۶/۳۳	۰/۲۱	۲/۱۵	۰/۴۳	۰	۰	۰/۰۹	۰/۹۱	۶۴/۹۲
۶		۰	۰/۷۹	۰	۰	۰/۵۷	۰	۰	۵۷/۷۴	۰/۱۶	۱/۶۳	۰	۰	۰/۱۸	۰/۵۲	۶۲/۳۴	
۷		۰	۰/۳۵	۰	۰/۱۳	۰/۳۹	۰	۰	۵۹/۰۱	۰/۲۸	۲/۰۸	۰/۳۴	۰	۰	۰/۲۱	۱/۰۲	۶۵/۴۶
۲۱		۰	۰/۸۳	۰	۰	۰/۳۹	۰	۰	۵۵/۹۷	۰/۱۷	۱/۹۱	۰/۷۹	۰	۰	۰/۱۵	۰/۷۱	۶۱/۰۱

۵-۸- مدل‌سازی و تفسیر یافته‌های ژئوفیزیکی

۵-۸-۱- داده‌های VLF

به منظور تفسیر آسان‌تر داده‌های VLF از برنامه کامپیوتری KHFILT [Pirttijarvi, 2004] جهت فیلتر کردن داده‌ها استفاده گردید. این نرم افزار از روش فریزر و کاروس- هجلت برای فیلتر نمودن و همچنین تهیه شبه مقطع چگالی جریان بر روی مؤلفه حقیقی میدان القائی مغناطیسی استفاده می‌کند. نقشه مربوط به فیلتر فریزر برای پروفیل‌های P_۱ تا P_۹ در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، دو محدوده در شمال غربی و جنوب شرقی با بی‌هنجاری مثبت (با رنگ قرمز و قرمز تیره) که حاکی از رسانایی بالا می‌باشند، توسط یک بی‌هنجاری منفی (رنگ آبی و آبی تیره) در مرکز از یکدیگر جدا و قابل تشخیص است. این الگو، مشابه نتایج بررسی‌های انجام شده آلودگی‌های ناشی از باطله‌های زغال در خاک‌های پایین دست می‌باشد [Moradzadeh et al., 2011].

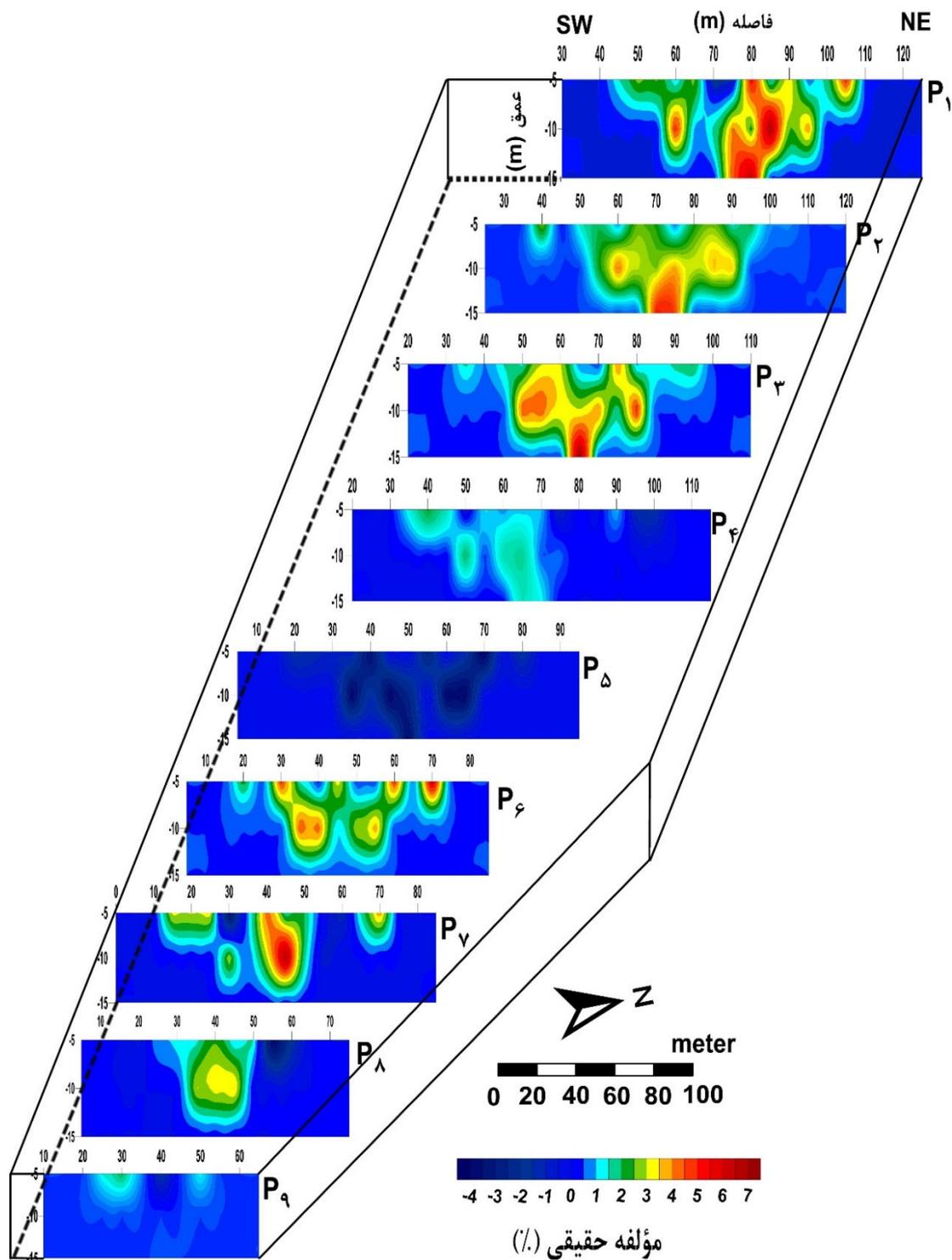


شکل ۵-۱۸- نتایج فیلتر فریزر روی داده‌های VLF (مؤلفه حقیقی) دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران

از فیلتر کاروس- هجالت به منظور تفسیر نیمه کمی و بررسی تغییرات عمقی بی‌هنجاری‌ها استفاده شد و نتایج به صورت شبه مقطع چگالی جریان برحسب درصد به صورت کنتورهای رنگی در شکل (۵-۱۹) برای ۹ پروفیل نشان داده شده است. کنتورهای با رنگ‌های گرم (قرمز و قرمز تیره) بیانگر شدت چگالی جریان و رسانایی بالا و رنگ‌های سرد (آبی تیره) نشان‌دهنده شدت چگالی جریان و رسانایی پایین است. علت نمایش شبه مقاطع چگالی جریان بدین فرم این است تا یک دید سه بعدی از گسترش زون‌های آلوده احتمالی در بخش‌های مختلف دمپ باطله حاصل شود. در پروفیل P۱ سه زون در فواصل ۵۸ تا ۶۲ متر، ۷۲ تا ۹۰ متر و ۱۰۰ تا ۱۱۰ متر مشاهده می‌شود که زون دوم در حدفاصل ۷۲ تا ۹۰ متری با مقادیر بالایی از چگالی جریان، گسترش بیشتری از سطح به عمق نسبت به دو زون دیگر دارد که می‌تواند دلیلی بر رسانایی بالای این ناحیه و احتمالاً نشان‌دهنده حضور آلودگی باشد. در پروفیل‌های P۲ و P۳ سه زون به طور پیوسته در حد فاصل ۵۰ تا ۹۰ متری از ابتدای پروفیل‌ها قابل مشاهده است. در پروفیل P۲ در حد فاصل ۶۸ تا ۷۷ متری و در پروفیل P۳ در حد فاصل ۶۲ تا ۶۸ متری و در عمق تقریبی ۱۰ تا ۱۵ متری در هر دو پروفیل، بی‌هنجاری با مقادیر بالاتری از چگالی جریان مشاهده می‌شود. سه زون به طور پیوسته نسبتاً رسانا در حد فاصله ۳۲ تا ۷۰ متری از ابتدای پروفیل P۴ وجود دارند که دارای گسترشی از سطح به اعماق پایین‌تر و شیب تقریبی در جهت NE می‌باشند. شبه مقطع چگالی جریان از پروفیل P۵ حاکی از این است که در این پروفیل هیچ‌گونه بی‌هنجاری یا زون احتمالی از آلودگی قابل مشاهده نیست. لازم به ذکر است که این پروفیل در داخل زون بی‌هنجار منفی مشخص شده در شکل (۵-۱۸) قرار دارد. سه زون بی‌هنجار مثبت در حد فاصل ۳۰ تا ۴۰ متری، ۵۰ تا ۶۰ متری و ۷۰ متری از پروفیل P۶ قابل مشاهده است که زون اول و دوم از سطح تا عمق ۱۵ متری با شیب تقریبی به سمت NE و SW به ترتیب گسترش دارند و زون سوم گسترش سطحی دارد. در پروفیل P۷ به خوبی می‌توان حضور سه زون با مقاومت ویژه کم مشاهده کرد. زون اول در حد فاصل ۱۰ تا ۲۵ متری دارای گسترش سطحی، زون دوم در بخش میانی پروفیل و در حد فاصل ۳۵ تا ۵۲ متری دارای گسترشی از سطح به اعماق پایین‌تر و زون سوم در حد فاصل ۶۵ تا

۷۵ متری با گسترش سطحی قرار گرفته‌اند. هرچند زون دوم دارای مقادیر بالاتری از چگالی جریان نسبت به دو زون دیگر است و حاکی از حضور آلودگی احتمالی در این ناحیه می‌باشد. پروفیل P۸ یک زون نسبتاً رسانا در حد فاصل ۳۰ تا ۵۰ متر و گسترش از سطح به عمق کمتر از ۱۵ متر را نشان می‌دهد. در پروفیل P۹، دو زون با گسترش سطحی و مقادیر چگالی جریان پایین در حد فاصل ۲۰ تا ۳۵ متر و ۴۵ تا ۵۵ متر از ابتدای پروفیل وجود دارد.

نتایج فیلتر کاروس- هجالت نشان داد که زون‌های رسانا در دمپ باطله، چگالی جریان بالایی از خود نشان می‌دهند، که این امر می‌تواند به دلیل نفوذ نزولات جوی و فعل و انفعالات شیمیایی صورت گرفته بین کانی‌های سولفیدی همراه باطله در مجاورت اکسیژن باشد. مواد شسته شده نفوذی می‌تواند حاوی یون‌های فلزی حل شده باشد که باعث کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش چگالی جریان نسبت به زمینه شده است. همچنین تغییرات بی‌هنجاری‌ها در نتایج فیلتر فریزر و کاروس - هجالت حاکی از این است که دمپ باطله مورد مطالعه دارای ساختاری ناهمگن است و این امر باعث ایجاد مسیرهای ترجیحی جهت نفوذ مواد شسته شده به داخل دمپ شده است. نتایج مشابه در تحقیقات سایر محققین نیز ارائه شده است [Raji and Adeoye, 2017].



شکل ۵-۱۹- نمایش سه بعدی شبه مقاطع چگالی جریان به دست آمده از فیلتر کاروس- هجرت داده‌های VLF

۵-۸-۲- داده‌های مغناطیس‌سنجی

در این مطالعه به منظور تعیین موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، نیاز به پردازش و تفسیر نقشه‌های بی‌هنجاری‌های حاصل از برداشت داده‌های مغناطیسی است. مهم‌ترین مرحله در تفسیر داده‌های مغناطیسی، جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای^۱ از مقادیر مغناطیسی اندازه‌گیری شده و رسیدن به بی‌هنجاری‌های محلی و یا باقی‌مانده^۲ است که در این تحقیق از فیلترهای پردازشی شامل سیگنال‌تحلیلی، روند سطحی و ادامه فراسو در نرم‌افزار Geosoft استفاده و نتایج به صورت نقشه‌های دوبعدی ارائه شده است. از نظر توپوگرافی محدوده مورد مطالعه نسبتاً هموار است. با توجه به ناچیز بودن تغییرات روزانه در مدت زمان انجام برداشت، از اعمال تصحیح روزانه صرف نظر شد و نقشه‌ها با استفاده از میدان مغناطیسی کل در هر ایستگاه ترسیم شد. شکل (۵-۲۰-الف) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد که یک تصویر کلی از داده‌های مغناطیسی برای تفسیر کلی فراهم کرده است. دامنه تغییرات شدت میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده چندان زیاد نبود و بین ۴۸۱۲۳ تا ۴۸۱۴۲ نانوتسلا است که رنگ آبی تا سبز معرف شدت مغناطیسی پایین و رنگ قرمز تا صورتی معرف شدت مغناطیسی بالا است. در این نقشه، دو محدوده در شمال‌غربی و جنوب‌شرقی دارای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با مقادیر بیش از ۴۸۱۳۵ نانو تسلا است که بخش جنوب شرقی شدت مغناطیسی نسبتاً بیشتری را نشان می‌دهد (رنگ قرمز تا صورتی). در مرکز نقشه، یک ناحیه با مقادیر مغناطیسی پایین (در حدود ۴۸۱۳۰ نانوتسلا) که با رنگ آبی و سبز نشان داده شده است و با گسترشی در جهت شمال شرقی- جنوب‌غربی، باعث جداسازی دو زون بی‌هنجار شده است. این بی‌هنجاری‌های مشاهده شده ممکن است تلفیق اثرات کانی‌های موجود در داخل دمپ باطله (اثرات محلی) و سنگ بستر (اثرات ناحیه‌ای) موجود در منطقه باشند که لازم است با روش‌های مناسب از هم جدا و مورد بررسی بیشتر قرار گیرند. هدف اصلی بر این است که با حذف اثرات ناحیه‌ای از مقادیر اندازه‌گیری شده، بتوان تفسیری بهتر در مورد بی‌هنجاری‌های

1- Regional

2- Residual

ایجاد شده از محل دمپ باطله داشت. شکل (۵-۲۰-ب) نقشه سیگنال تحلیلی اعمال شده بر داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. به منظور برجسته کردن بی‌هنجاری‌های سطحی و وضوح بهتر حاشیه و لبه‌های این بی‌هنجاری‌ها از فیلتر سیگنال تحلیلی استفاده شد. فیلتر روند سطحی با درجات متفاوت به منظور جداسازی بی‌هنجاری‌های سطحی از اثرات ناحیه‌ای بر روی داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده، اعمال شد. شکل (۵-۲۰-ج) نقشه باقی‌مانده در نتیجه اعمال فیلتر روند سطحی مرتبه سه را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که، نتیجه فیلتر روند سطحی با درجات مختلف، تغییرات زیادی را با روند سطحی مرتبه سه نشان نداد. همان طور که از روی این نقشه دیده می‌شود، میدان مغناطیسی در بخش شمال غربی و جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه با مقادیر بیش از ۲ نانو تسلا (رنگ قرمز تا صورتی)، نسبت به بقیه نواحی شدت بیشتری نشان می‌دهد. البته در بخش شمال غربی، شدت میدان مغناطیسی مشهودتر است. همچنین ناحیه بی‌هنجار با مقادیر مغناطیسی پایین (کمتر از ۲ نانو تسلا) که باعث جداسازی دو زون بی‌هنجار شده در مرکز این نقشه با رنگ آبی و سبز قابل مشاهده است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در تفسیر داده‌های مغناطیسی، تعیین عمق بی‌هنجاری‌ها می‌باشد که روش ادامه فراسو یا گسترش رو به بالا قادر است این پارامتر را تعیین و از آن می‌توان برای بررسی گسترش عمقی بی‌هنجاری‌ها به صورت کیفی استفاده کرد. در این فیلتر، داده‌های مغناطیسی با استفاده از تبدیلات ریاضی در سطحی بالاتر از سطح زمین محاسبه و منتقل می‌شوند و باعث حذف و تضعیف نوفه‌های سطحی در مقابل بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر می‌شود. به منظور پی بردن به این که، بی‌هنجاری‌های ایجاد شده می‌تواند ناشی از اثرات سنگ بستر باشد یا نه، از فیلتر ادامه فراسو برای عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ متر بر روی نقشه باقی‌مانده حاصل از فیلتر روند سطحی مرتبه سه اعمال شد. شکل‌های (۵-۲۰-د) نتیجه اعمال فیلتر ادامه فراسو برای عمق ۵ متر را نشان می‌دهد که در آن سه بی‌هنجاری A، B و C با مقادیر بیش از ۱/۷۴ نانو تسلا (رنگ قرمز تا صورتی) قابل مشاهده است. بی‌هنجاری‌های A و B در بخش شمال غربی محدوده، دارای شدت بیشتری نسبت به نواحی دیگر است. همان گونه که در شکل‌های (۵-۲۰-ر-ز-و) ملاحظه می‌شود، با افزایش عمق

گسترش در فیلتر ادامه فراسو، اثرات بی‌هنجاری‌های سطحی کم‌تر و دامنه تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده کم‌تر می‌شود، به طوری که برای عمق ۶۰ متری، دامنه تغییرات این شدت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش و در دامنه‌ای بین ۰/۰۲- تا ۰/۹۴- نانتوسلا قرار می‌گیرد (۵-۲۰-ی). این موضوع نشان می‌دهد که سنگ بستر دمپ باطله، هیچ گونه آثاری از موادی با خاصیت مغناطیسی بالا ندارد و بی‌هنجاری‌های ایجاد شده در نقشه‌های باقی‌مانده، گسترش سطحی در دمپ باطله دارند. هم‌چنین بی‌هنجاری‌های سطحی که در نقشه سیگنال تحلیلی ظاهر شده بودند در فیلتر ادامه فراسو با افزایش عمق گسترش محو شده‌اند که نشان‌دهنده گسترش کم عمق این بی‌هنجاری‌ها است. با توجه به مطالعات کانی‌شناسی، حضور کانی مگنتیت که عامل اصلی در افزایش شدت مغناطیسی می‌باشد در باطله‌ها مشاهده نشده است ولی حضور قطعاتی از کانی‌هماتیت و کانی‌های سولفیدی هم‌چون پیریت و میلریت با خودپذیری^۱ متوسط در باطله‌ها و یون‌های فلزی محلول در اثر فرآیند اکسایش باطله‌ها، می‌تواند دلیلی بر افزایش نسبی شدت مغناطیسی باشد.

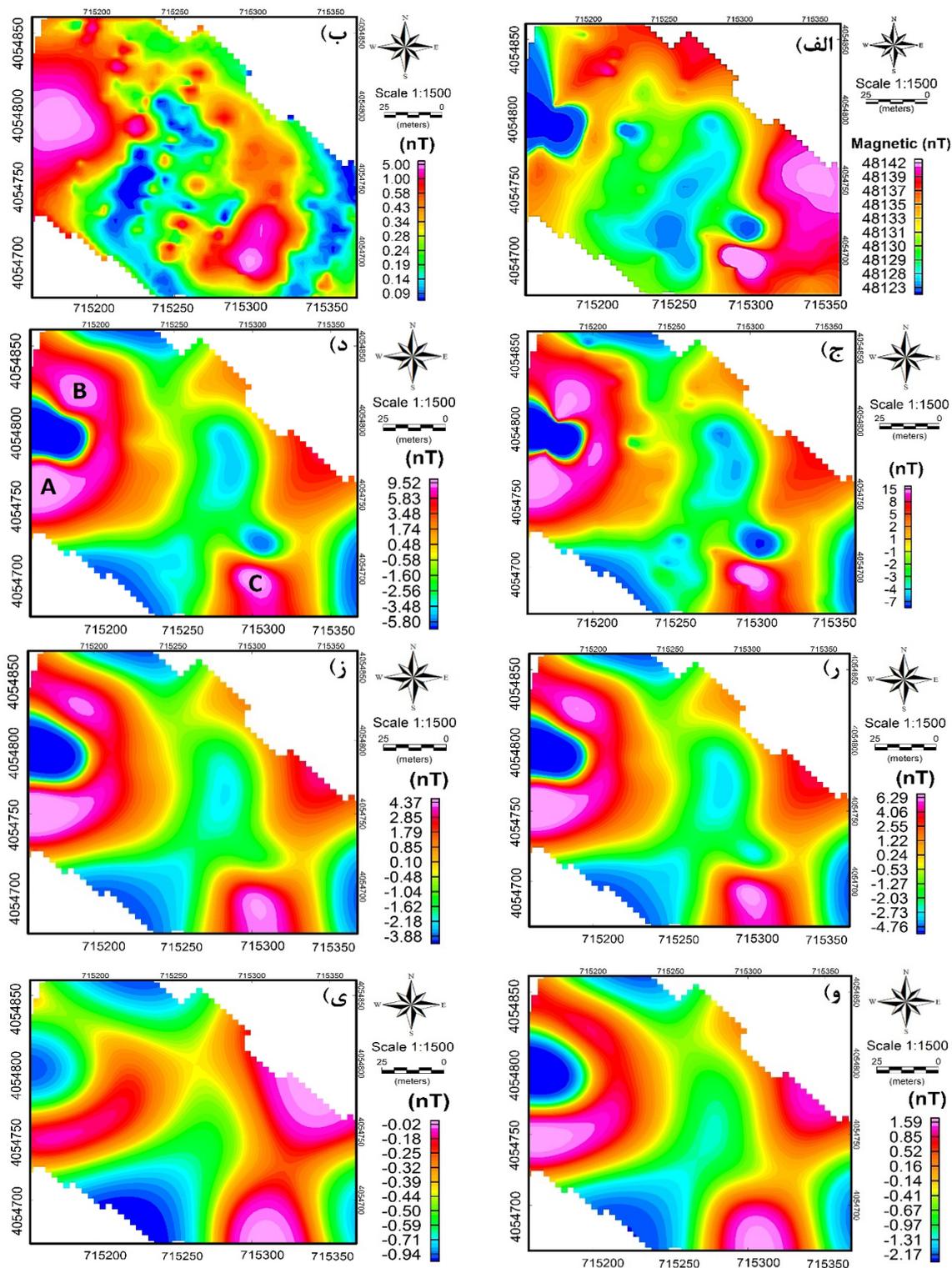
۵-۸-۳- داده‌های ژئوالکتریک

پس از برداشت داده‌های ژئوالکتریک، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار Excel بازخوانی و مقدار مقاومت ویژه ظاهری با توجه به فاکتور هندسی (K) مربوط به آرایش دوقطبی- دوقطبی محاسبه گردید. برای مدل‌سازی وارون^۲ داده‌های برداشت شده، از دو نرم‌افزار RES2DINV و RES3DINV استفاده گردید. این نرم‌افزارها علاوه بر داده‌های مقاومت ویژه، داده‌های مربوط به برداشت‌های IP را نیز مدل‌سازی می‌کنند. وارون‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط این نرم‌افزارها، بر اساس روش کمترین مربعات مقید هموار شده^۳ می‌باشد که هدف از آن، کمینه‌کردن اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل شده است [Loke, 2019].

1- Susceptibility

2- Inverse modelling or Inversion

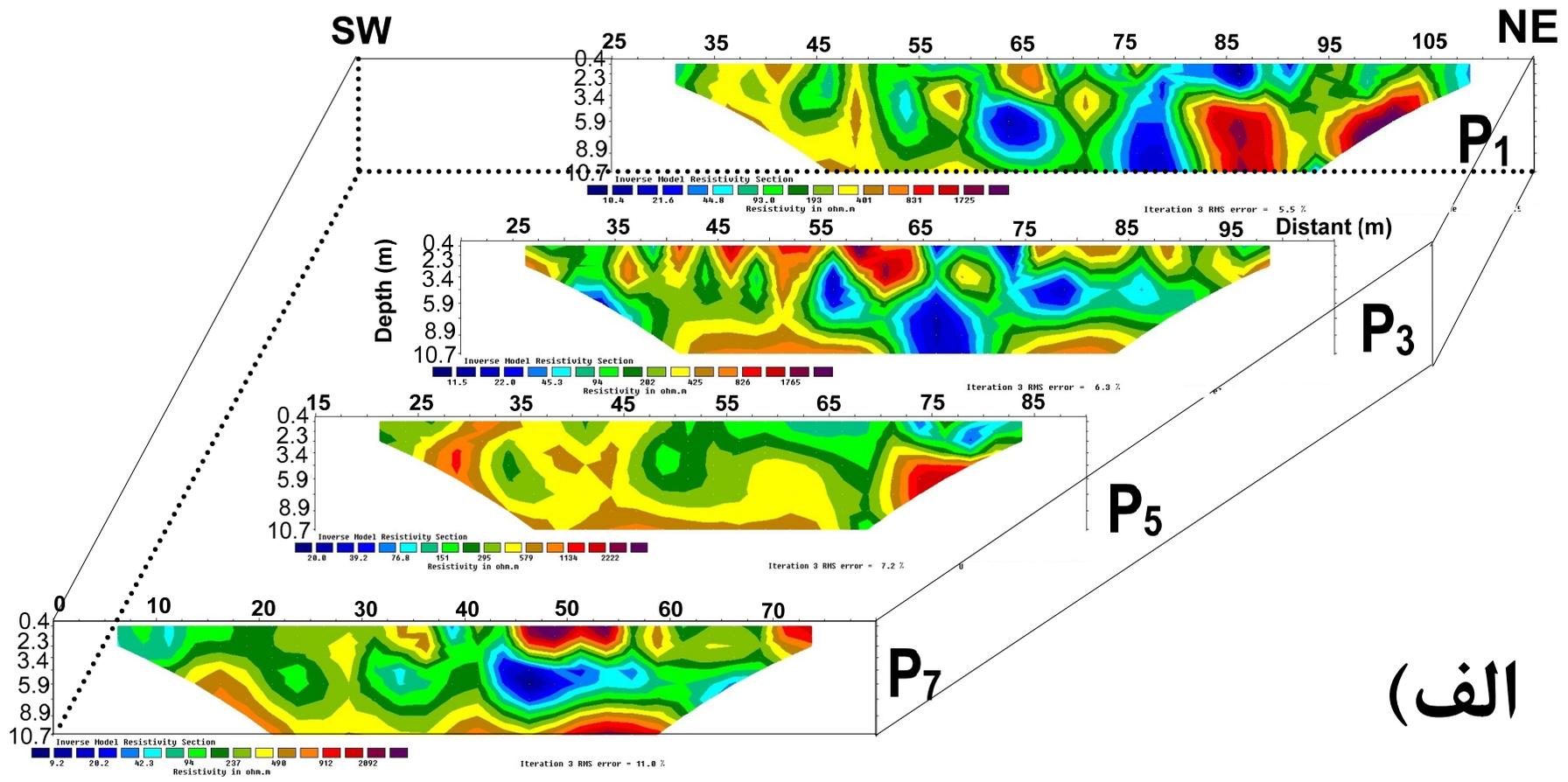
3- Smoothness – constrained Least - Squares



شکل ۵-۲۰-الف) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی از دمپ باطله‌های سرب و روی انگوران، ب) نقشه سیگنال تحلیلی، ج) نقشه روند سطحی، د) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۵ متر، ر) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۱۰ متر، ز) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۱۵ متر، و) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۳۰ متر، ی) نقشه ادامه فراسو برای عمق ۶۰ متر

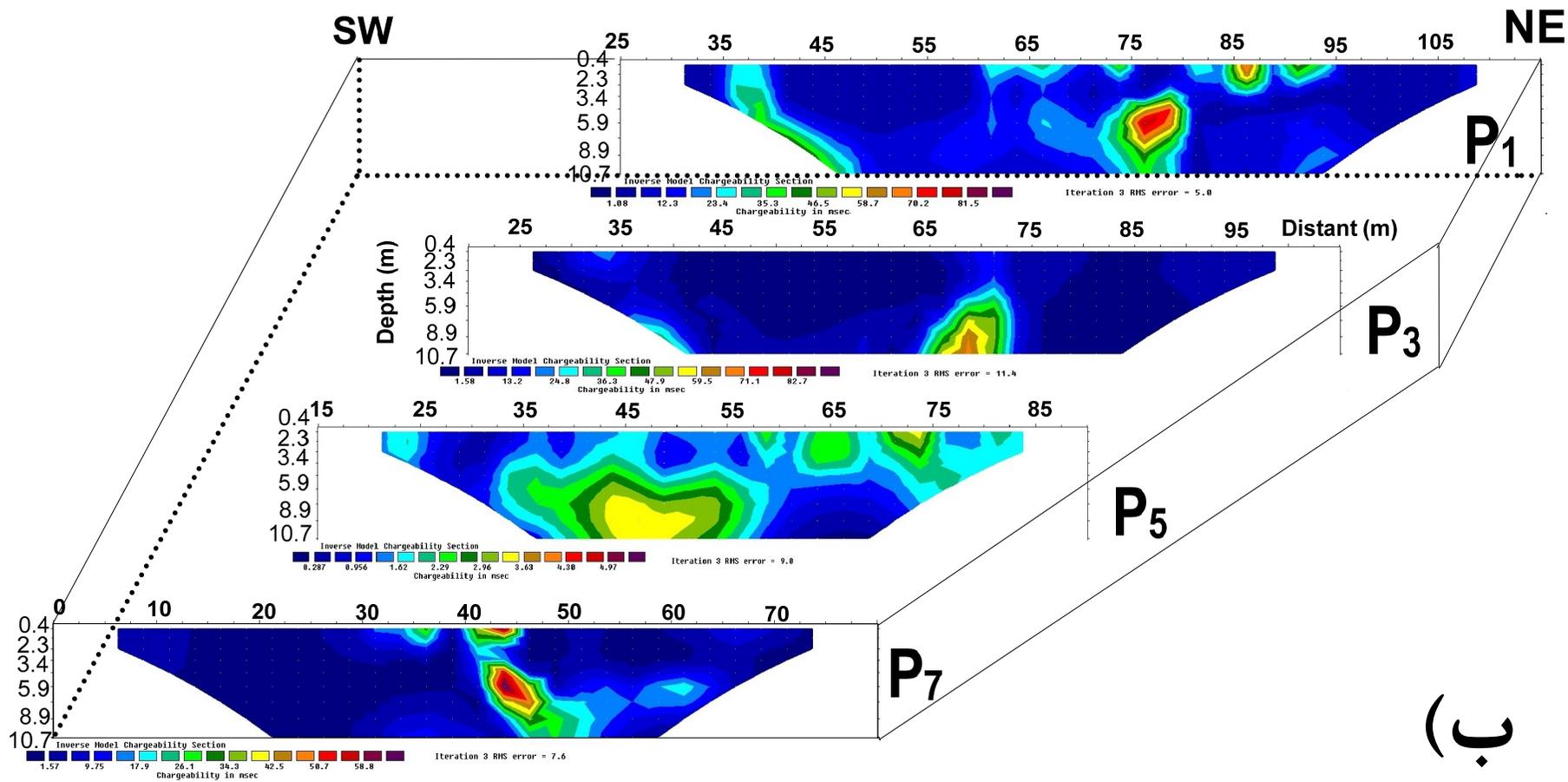
به منظور مدل‌سازی دوبعدی، داده‌ها به صورت فرمت ورودی نرم افزار RES2DINV مرتب گردید و سپس توسط نرم افزار فوق الذکر فراخوانی شدند. مدل دوبعدی استفاده شده در فرآیند وارون‌سازی، به تعدادی بلوک‌های مستطیلی شکل از سطح به عمق مش‌بندی گردید. به منظور افزایش قدرت تفکیک، اندازه بلوک‌ها به نصف فاصله الکترودها کاهش یافت. نتایج مدل‌سازی دوبعدی وارون داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی برای پروفیل‌های P₁، P₃، P₅ و P₇ به ترتیب در شکل‌های (۲۱-۵) و (۲۲-۵) ارائه شده است. لازم به توضیح است که به دلیل مسطح بودن محدوده مورد مطالعه، تصحیحات مربوط به توپوگرافی در مدل اعمال نشده است. مقاطع مقاومت ویژه بر حسب اهم‌متر و مقاطع پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان به صورت بارپذیری بر حسب میلی‌ثانیه به صورت کنتورهای رنگی در شکل‌های (۲۱-۵) و (۲۲-۵) نشان داده شده است. این تغییرات به عوامل سنگ‌شناسی مانند ترکیب کانی‌ها، اندازه مواد، تخلخل و نفوذپذیری بستگی دارد [Pierwola, 2015]. کنتورهای با رنگ‌های گرم (قرمز و قرمز تیره) بیانگر مقاومت ویژه و بارپذیری بالا و رنگ‌های سرد (آبی و آبی تیره) نشان دهنده مقاومت ویژه و بارپذیری پایین است.

بر اساس نتایج مدل‌سازی دوبعدی در پروفیل P₁ این‌گونه می‌توان استنباط کرد که لایه سطحی دارای مقاومت ویژه‌ای بین ۹۳ تا ۴۰۰ اهم‌متر است و فقط در حد فاصل ۸۰ تا ۹۲ متری از ابتدای پروفیل محدوده‌ای با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر با رنگ آبی پر رنگ مشاهده می‌شود. این زون با گسترش به سمت پایین به یک زون با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر که در حدفاصل ۷۵ تا ۸۰ از ابتدای پروفیل در عمق قرار دارد، متصل می‌شود. این ارتباط و پیوستگی احتمالاً نشان دهنده مسیرهای ترجیحی از نفوذ مواد شسته یا لیچ شده به داخل دمپ می‌باشد. همچنین، یک زون در حد فاصل ۶۵ متری از ابتدای پروفیل و تقریباً در عمق ۵ تا ۹ متری با مقادیر مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۲۰) با رنگ آبی پر رنگ در این پروفیل قابل مشاهده است که می‌تواند حاکی از زون آلوده در این قسمت باشد.



(الف)

شکل ۵-۲۱- نمایش سه بعدی از نتایج مدل سازی وارون دوبعدی داده های مقاومت ویژه برای پروفیل های P1, P3, P5 و P7 روی دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران



(ب)

شکل ۵-۲۲- نمایش سه بعدی از نتایج مدل سازی وارون دوبعدی داده های IP پروفیل های P1، P3، P5 و P7 روی دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران

در سمت راست و انتهای پروفیل P₁ و از عمق ۳/۴۰ متر به سمت پایین دو زون با مقادیر مقاومت ویژه بالا (بالای ۱۵۰۰ اهم‌متر و به رنگ قرمز تیره) وجود دارد که احتمالاً به دلیل حضور مواد دانه درشت و کاهش رطوبت محتوی، منجر به افزایش مقاومت ویژه شده است [Power, 2018]. نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های IP مربوط به پروفیل P₁ در شکل (۵-۲۲) ارائه شده است. در حد فاصل ۸۵ تا ۹۵ متری ابتدای پروفیل در سطح و یک زون دیگر در حدفاصل ۷۰ تا ۸۰ متری ابتدای پروفیل با گسترش بین عمق ۵ تا ۱۰ متری دارای افزایش مقدار بارپذیری می‌باشد. نتایج مدل‌سازی داده‌های IP دارای هماهنگی خوبی با داده‌های مقاومت ویژه است. این افزایش مقدار بارپذیری، احتمالاً می‌تواند ناشی از تجمع یون‌های فلزی انتقال یافته در این قسمت از دمپ باطله باشد. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی عمقی از دمپ باطله در تحقیقات دیگران نشان می‌دهد که در اثر اکسایش باطله‌های سولفیدی و لیچینگ یون‌های فلزی به داخل دمپ، غلظت برخی فلزات سنگین، یک افزایش قابل توجهی نسبت به سطح دمپ نشان می‌دهند و این زون‌ها با مقادیر مقاومت ویژه کم در مطالعات ژئوفیزیکی شناسایی شده‌اند [Korneeva et al., 2016; Epov et al., 2017].

نتایج وارون‌سازی پروفیل P_۳ نشان می‌دهد که لایه سطحی تا عمق ۵ متر به دلیل خشک بودن، مقادیر مقاومت ویژه بالایی از خود نشان می‌دهند و فقط در حد فاصل ۶۵ تا ۷۵ متری از ابتدای پروفیل، دو محدوده کوچک با رسانایی بالا (مقادیر مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر و به رنگ آبی پررنگ)، تا عمق ۸ متر ملاحظه می‌شود که می‌تواند مسیر ترجیحی احتمالی از نزولات جوی و شیرابه‌های شکل گرفته باشد. بیشترین مقادیر مقاومت ویژه (بالای ۹۰۰ اهم‌متر و به رنگ قرمز و قرمز تیره) در حد فاصل ۴۵ تا ۶۵ متری از ابتدای پروفیل در لایه سطحی دیده می‌شود که این امر می‌تواند به واسطه حضور قطعات درشت از باطله‌های خشک موجود در سطح دمپ باشد که منجر به افزایش مقاومت ویژه در این بخش از پروفیل شده است. در این پروفیل سه زون رسانا (آبی پررنگ) در افق‌های پایین‌تر قرار گرفته‌اند. اولین زون در اعماق ۲/۳ تا ۷/۵ متری در محدوده ۵۵ تا ۵۷/۵ متری و زون دوم از عمق ۳/۴ تا عمق بیش از ۱۰ متر تقریباً به‌صورت عمودی گسترش پیدا کرده است. به نظر می‌رسد بیشترین گسترش

آلودگی احتمالی در این بخش باشد. زون سوم در بخش راست پروفیل بین اعماق ۳/۴ تا ۷/۳۵ متری به صورت تقریباً افقی گسترش پیدا کرده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در زون‌های دوم و سوم یک ارتباط و تا حدودی پیوستگی با محدوده‌های رسانا در لایه‌های سطحی وجود دارد. این امر می‌تواند بیانگر ناهمگنی ساختار داخلی و مسیرهای ترجیحی از نفوذ آلودگی از سطح به عمق در داخل دمپ باشد که به طور مشابه در سایر تحقیقات انجام شده از باطله‌های معدنی نیز بدان اشاره شده است [Yurkevich et al., 2017; Olenchenko et al., 2016]. در مقطع IP این پروفیل (شکل ۵-۲۲) یک زون با مقادیر بالای بارپذیری (بین ۳۰ تا ۷۰ میلی‌ثانیه) در محدوده ۶۵ تا ۷۲/۵ متری از ابتدای پروفیل که از عمق ۳/۴ به اعماق پایین‌تر گسترش یافته، قابل مشاهده است.

نتایج وارون‌سازی پروفیل P۵ نشان می‌دهد که از سطح به عمق، دمپ باطله دارای یک روند افزایشی در مقادیر مقاومت ویژه (با مقادیر بیش از ۱۵۰ اهم‌متر) است و فقط محدوده‌ای کوچک از بخش راست پروفیل، زون رسانا (با مقاومت ویژه کمتر از ۵۰ اهم‌متر و رنگ آبی) در لایه سطحی دیده می‌شود. مقادیر قابل توجهی از بارپذیری در نتایج مدل‌سازی IP پروفیل P۵ مشاهده نشد. یکی از کاربردهای روش‌های ژئوالکتریک، بررسی ساختار داخلی دمپ‌های باطله است. با توجه به دپو غیراصولی و شیب تند دمپ‌های باطله محدوده مورد مطالعه، امکان شکست و لغزش در ساختار داخلی دمپ باطله وجود دارد که بعضاً ممکن است باعث ایجاد فضاهای خالی شود. طی بازدیدهای صحرایی از محدوده مورد مطالعه، در بخش‌هایی از سطح دمپ باطله، شکست و ترک‌خوردگی مشاهده شد (شکل ۵-۲۳).

بر این اساس می‌توان چنین استنباط کرد که در محل پروفیل P۵، ترک و شکستگی‌های بخش‌های داخلی دمپ توسط لایه‌های سطحی از باطله‌ها پوشیده شده است. محل پروفیل P۵ همان جایی است که داده‌های VLF بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهد. به دلیل واقع شدن این پروفیل در مسیر شکستگی و ترک‌های داخلی دمپ، جریان‌ات نفوذی و شیرابه‌های حاوی یون‌های فلزی در این بخش از دمپ تمرکزی نداشته و یک مسیری ترجیحی برای انتقال مواد شسته شده به بخش‌های مجاور به وجود آمده است.



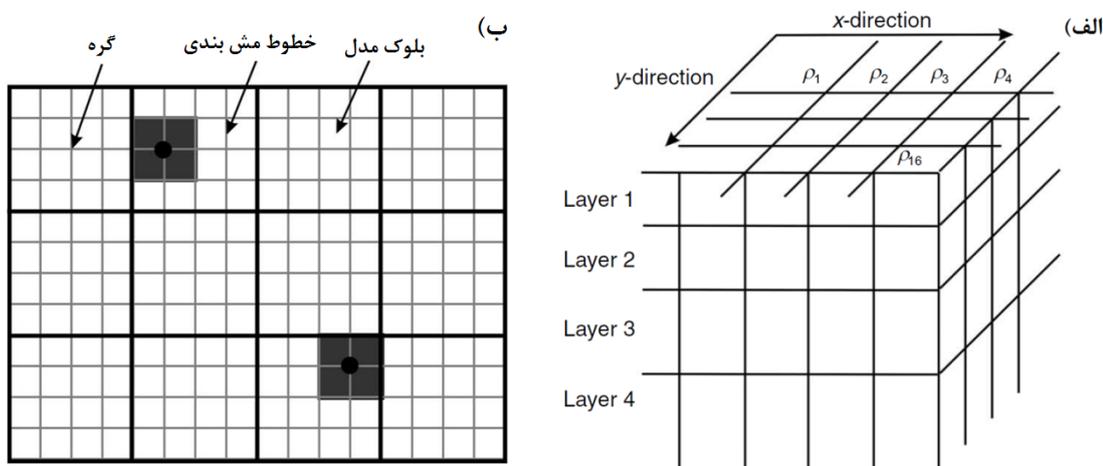
شکل ۵-۲۳- نمونه‌ای از ترک و شکستگی‌های ایجاد شده در ساختار دمپ باطله‌های سرب و روی معدن انگوران

اگرچه افزایش تبخیر و دمای هوا در منطقه با توجه به این که عملیات برداشت در اواخر دوره خشک سال بود، می‌تواند نتایج ژئوفیزیک در این بخش از دمپ را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل داده‌های VLF بی‌هنجاری منفی نشان داده و نتایج وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و IP این پروفیل، زون رسانای قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. البته در فصول بارندگی احتمالاً این بخش‌ها به صورت زون رسانا مشاهده می‌شوند.

نتایج وارون‌سازی پروفیل P_v نشان می‌دهد یک زون رسانا با مقدار مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر در حد فاصل ۴۰ تا ۵۵ از ابتدای پروفیل در عمق تقریباً ۳/۴۰ تا ۸ متری قرار دارد. در مقطع IP (شکل ۵-۲۲) این زون خودش را در این محدوده با مقادیر بارپذیری بالا با شیبی در جهت راست مقطع نشان می‌دهد که تا عمق ۹ متری گسترش یافته است. به طور کلی، تغییرات در مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در مطالعات ژئوفیزیکی زیست‌محیطی انجام شده، عمدتاً به واسطه ساختار ناهمگن دمپ باطله و حضور زون‌هایی با مقادیر بالایی از یون‌های فلزی و جامدات محلول (TDS) که در ارتباط با زهاب اسیدی داخل دمپ می‌باشند، استنباط شده است. نتایج مدل‌سازی دوبعدی ژئوالکتریک تا حدودی با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی داده‌های VLF مطابقت دارد و دلالت بر این دارد که دمپ

باطله مورد مطالعه به شدت ناهمگن بوده و به واسطه همین موضوع، مسیرهای ترجیحی قابل توجهی برای عبور جریان‌ات زیرسطحی و زهاب‌های شکل گرفته در آن مشاهده شده است.

اگرچه داده‌های ژئوالکتریک در امتداد پروفیل‌های دو بعدی اندازه‌گیری شد، ولی می‌توان این داده‌ها را در قالب مجموعه‌ای از داده‌های سه بعدی ترکیب و در یک کد وارون‌سازی سه بعدی تحت نرم‌افزار RES3DINV با همدیگر مدل‌سازی کرد تا دید بهتری از ساختار داخلی دمپ باطله پیدا نمود. برای حل مسئله وارون‌سازی سه بعدی داده‌ها و پارامتری کردن مدل، ساختار زیرسطحی مدل، مطابق شکل (۵-۲۴-الف) به چندین لایه تقسیم‌بندی می‌شود و هر لایه نیز به تعدادی گره و بلوک‌های (سلول‌های) مستطیلی شکل مش‌بندی می‌شود. شکل (۵-۲۴-ب) یک نمای کلی با جزئیات بیشتر از رابطه بین خطوط مش در جهت x و y ، بلوک‌های مدل و گره‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۴-الف) مدل ایجاد شده در مدل‌سازی وارون سه بعدی (ب) نمای کلی از مش‌بندی و رابطه بین گره‌ها، خطوط مش‌بندی و بلوک‌ها [Rucker et al., 2010]

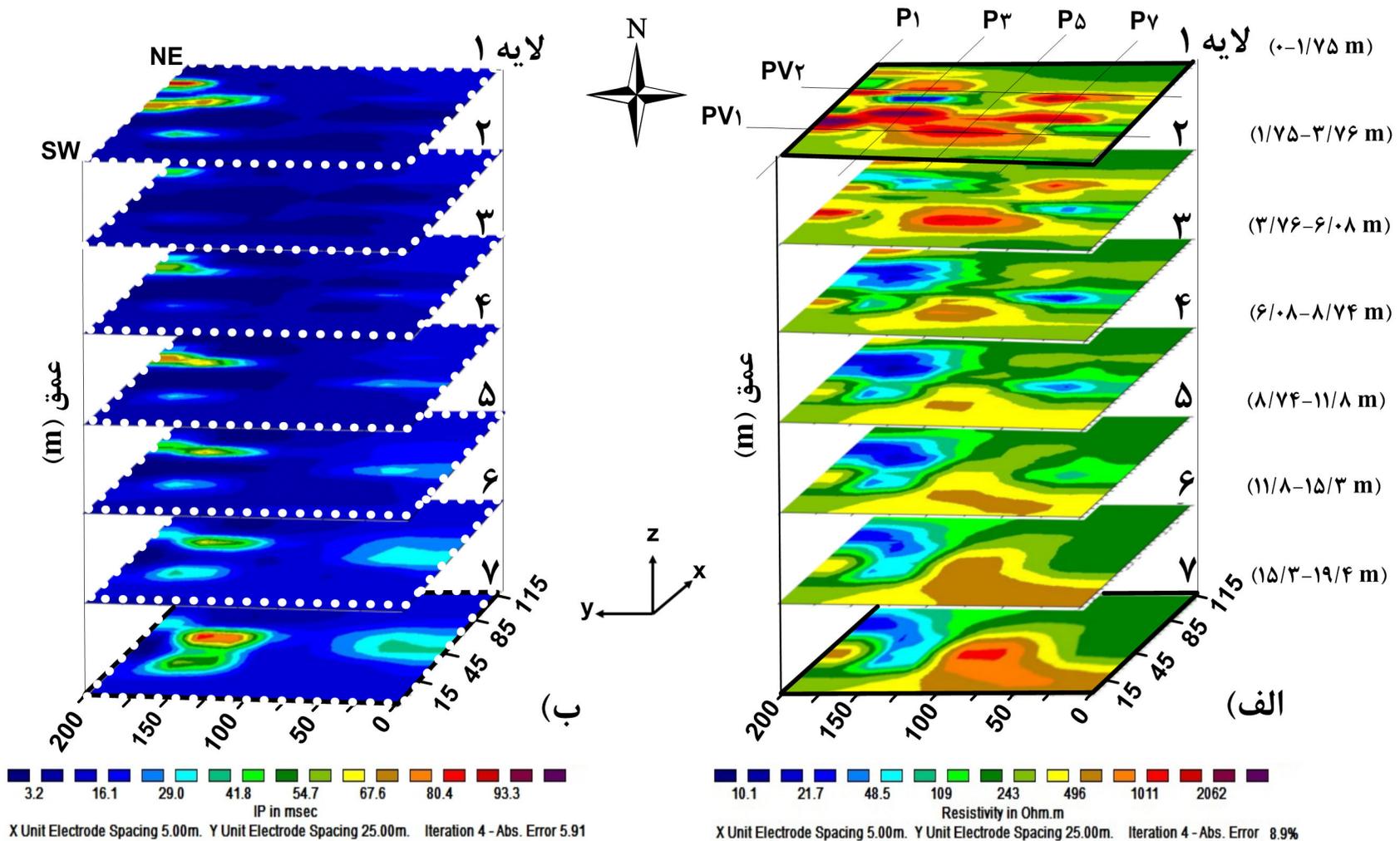
هر یک از بلوک‌ها دارای مقاومت ویژه یا بارپذیری متفاوت ولی مجهول هستند. با تقسیم این سلول‌ها به اجزای کوچک‌تر، تعداد پارامترهای مدل و نیز زمان مورد نیاز برای وارون‌سازی این دسته از داده‌ها به نحو چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی وارون سه بعدی، هدف این است تا مقادیر مقاومت ویژه یا بارپذیری هر یک از سلول‌های مدل به طریقی تعیین شوند تا پاسخ مدل در تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده باشد [امرادزاده و همکاران، ۱۳۹۱].

در این تحقیق، از ترکیب داده‌های پروفیل‌های دوبعدی P1، P3، P5، P7 و همچنین داده‌های دو پروفیل عمودی PV1 و PV2 برای مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده گردید. ابتدا داده‌های مربوط به پروفیل‌های دوبعدی در قالب یک کد وارون‌سازی سه‌بعدی، ترکیب و به فرمت ورودی نرم‌افزار RES3DINV تبدیل شد و سپس توسط نرم‌افزار مذکور فراخوان شد. محدوده مورد مطالعه به صورت یک شبکه مستطیلی با تعداد 24x9 خطوط مش با فاصله 5 متر در جهت X و 25 متر در جهت Y، مش‌بندی گردید. تعداد لایه‌های زیرین مدل 7، تعداد کل بلوک‌ها 1288 و تعداد گره‌ها 40807 محاسبه گردید. از روش کمترین مربعات مقید هموار شده و روش عددی اجزاء محدود برای مدل‌سازی وارون سه‌بعدی استفاده شد. نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت مقاطع افقی و قائم برای فواصل و عمق‌های مشخص در شکل (5-25) و (5-26) نشان داده شده است. پس از 4 تکرار، خطای مدل‌سازی RMS¹ برابر 8/9٪ برای داده‌های مقاومت ویژه و 5/9٪ برای داده‌های IP به دست آمد. هر چند می‌توان با کاهش فاصله الکترودها و افزایش تراکم داده‌ها با استفاده از پروفیل‌های بیشتر، خطای RMS را تا حد زیادی کاهش داد.

مقاطع مقاومت ویژه بر حسب اهم‌متر و مقاطع پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان به صورت بارپذیری بر حسب میلی‌ثانیه به صورت کنتورهای رنگی ارائه شده است. کنتورهای با رنگ‌های گرم (قرمز و قرمز تیره) بیانگر مقاومت ویژه و بارپذیری بالا و رنگ‌های سرد (آبی و آبی تیره) نشان دهنده مقاومت ویژه و بارپذیری پایین است. مقاطع مدل‌سازی به دست آمده در شکل (5-25)، شامل 7 لایه عمقی بوده که لایه 1 مربوط به محدوده عمقی 0-1/75 متر، لایه 2 محدوده 1/75-3/76، لایه 3 محدوده 3/76-6/08، لایه 4 محدوده 6/08-8/74، لایه 5 محدوده 8/74-11/8، لایه 6 محدوده 11/8-15/3 و لایه 7 نهایتاً لایه 7 مربوط به محدوده عمقی 15/3-19/4 متر از مقادیر مقاومت ویژه و بارپذیری می‌باشد. نتایج به دست آمده از شکل (5-25-الف)، مقاومت ویژه در نزدیکی سطح زمین را بالا (با رنگ قرمز

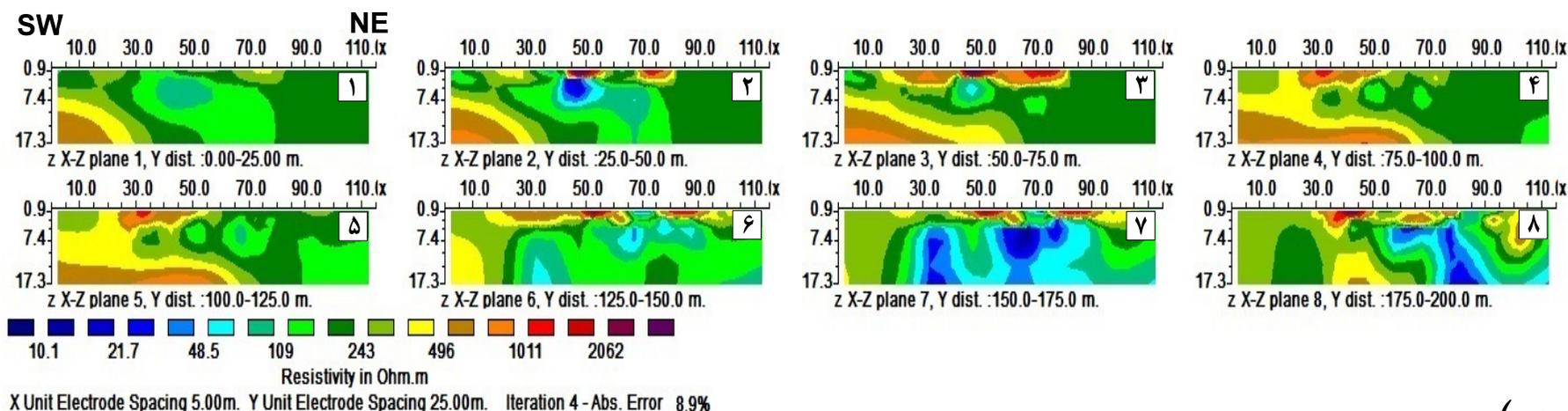
1- Root mean square error (RMS)

تیره) نشان می‌دهد که می‌تواند متأثر از تبخیر و تعرق باطله‌ها باشد. از لایه دوم به سمت عمق در قسمت چپ از شبکه برداشت (محدوده بین پروفیل‌های P₁ و P₅)، کاهش در مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که این قسمت‌ها در لایه سوم در عمق ۳/۷ متری با رنگ آبی و آبی تیره با مقاومت ویژه بین ۱۰-۲۰ اهم‌متر شروع و تا مقطع هفتم (۱۹/۴-۱۵/۳ متر) گسترش یافته است. کاهش مقادیر مقاومت ویژه تا حدودی در قسمت راست از شبکه برداشت از لایه دوم تا چهارم قابل مشاهده است. همچنین در دو قسمت راست و چپ از شبکه برداشت، افزایش مقادیر بارپذیری مشاهده می‌شود (۵-۲۵-ب). مقدار بارپذیری در نزدیکی سطح زمین در قسمت چپ شبکه برداشت دارای مقداری بیش از ۸۰ میلی‌ثانیه (رنگ قرمز و قرمز تیره) است، همچنین در این قسمت از لایه سوم، بارپذیری با مقدار حدوداً ۵۰ میلی‌ثانیه در عمق ۳/۷ متری با رنگ سبز تا زرد شروع و در عمق ۱۹/۴-۱۵/۳ متر (لایه هفتم) بیشترین مقدار (بیش از ۸۰ میلی‌ثانیه) را دارد (شکل ۵-۲۶-ب). نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی به صورت مقاطع قائم در جهت X در شکل (۵-۲۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل فوق، حضور بخش‌های آلوده با مقاومت ویژه کم (کمتر از ۲۰ اهم‌متر) که به رنگ آبی و آبی تیره هستند، در مقاطع قائم هفتم و هشتم به خوبی مشاهده می‌شوند که یک گسترش از سطح به عمق بیش از ۱۷ متر را نشان می‌دهند (شکل ۵-۲۶-الف). مقادیر بارپذیری بالا (بیش از ۴۰ میلی‌ثانیه) در مقاطع IP با رنگ سبز تا قرمز تیره در مقاطع قائم ششم تا هشتم که در بخش عمقی قرار دارد، مشاهده می‌شود (شکل ۵-۲۶-ب). حضور یون‌های فلزی حل شده از زهاب شکل گرفته در داخل دمپ باطله و پیریت موجود می‌تواند دلیلی بر کاهش مقاومت ویژه و افزایش بارپذیری در این مناطق از دمپ باطله باشد. نتایج این مدل‌ها می‌تواند مسیرهای ترجیحی را نشان دهد، جایی که در امتداد مناطقی با نفوذپذیری بالا، زهاب تمایل به نفوذ و گسترش دارد. تقریباً زون‌هایی که مقاومت ویژه کم دارند دارای ارتباط از سطح به عمق هستند.

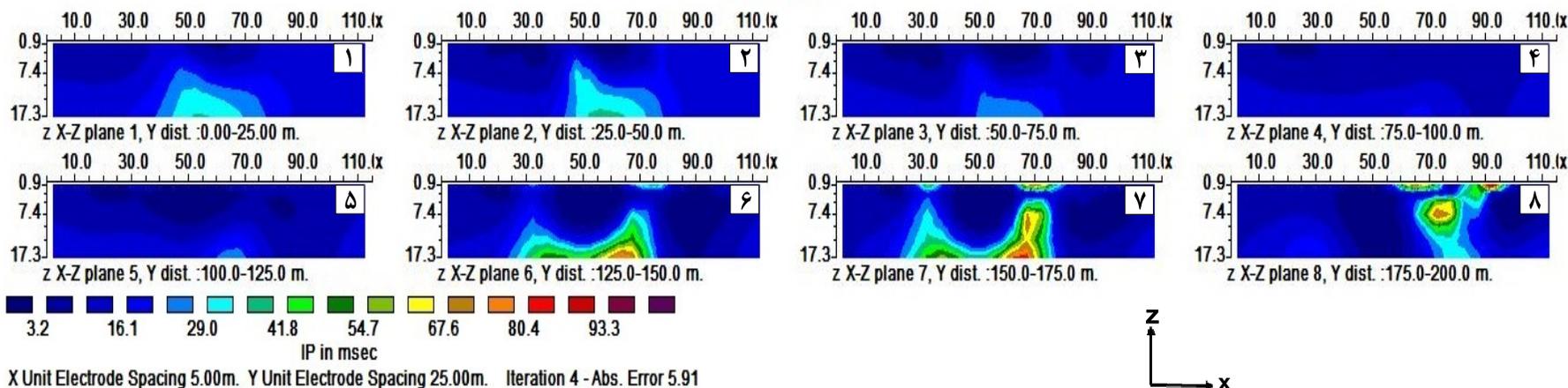


شکل ۵-۲۵- مقاطع افقی حاصل از وارون‌سازی سه بعدی داده‌های الف) مقاومت ویژه و ب) پلاریزاسیون القایی (IP) در محل دمپ باطله‌های سرب و روی معدن انگوران

الف



ب

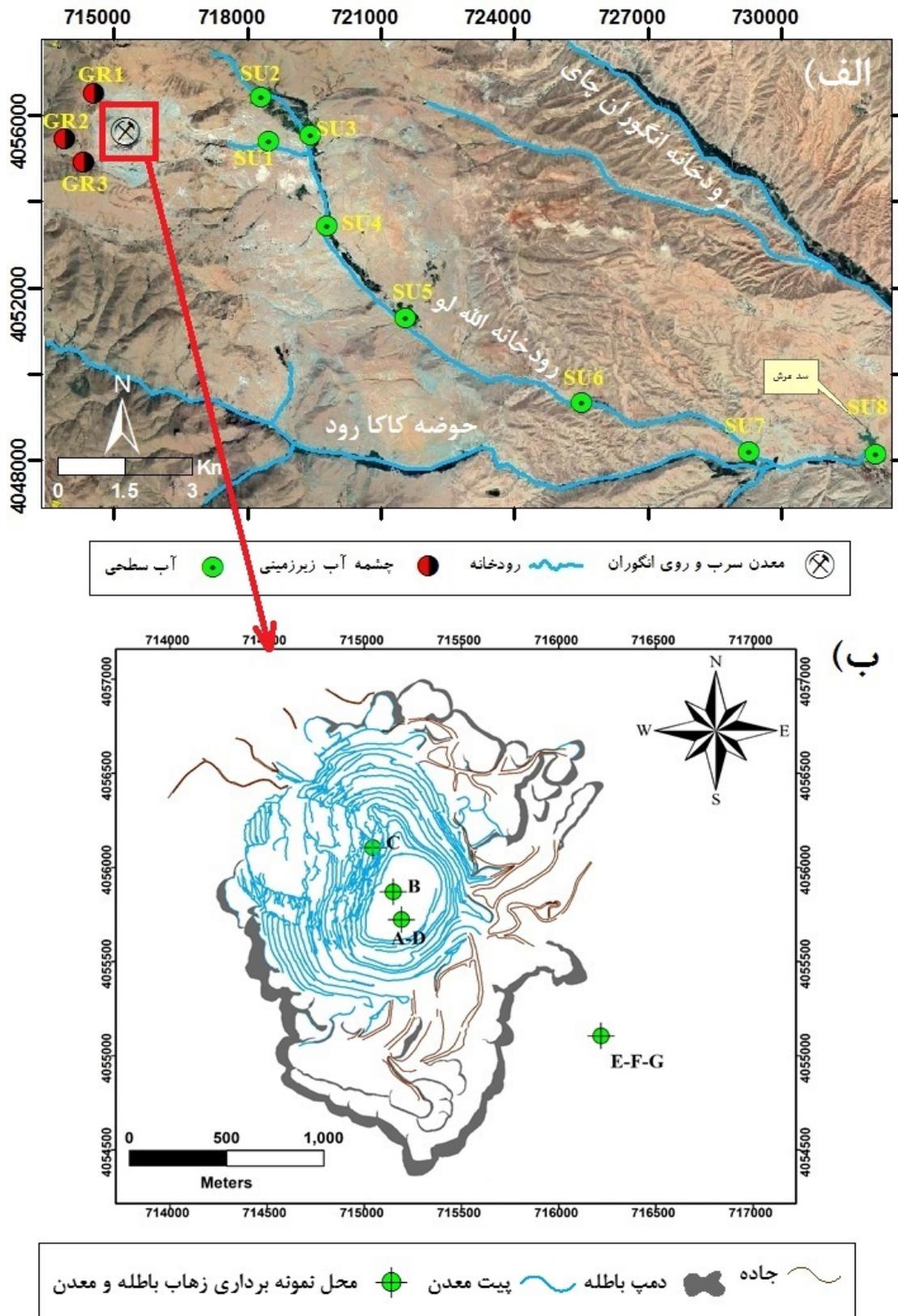


شکل ۵-۲۶- مقاطع قائم در جهت x حاصل از وارون سازی سه بعدی داده های الف) مقاومت ویژه و ب) پلاریزاسیون القائی (IP) در محل دمپ باطله های سرب و روی معدن انگوران

نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوفیزیکی در این تحقیق نشان داد، رسانایی الکتریکی همواره مختص به زهاب اسیدی نمی‌باشد، بلکه زهاب‌های خنثی تا قلیایی از معادن نیز می‌توانند رفتاری رسانا در نتایج ژئوفیزیکی از خود نشان دهند. از این رو، نمونه‌برداری عمقی و نمونه‌برداری از زهاب این نوع باطله‌ها در این تحقیق، می‌تواند در جهت شناسایی پارامترهای که بر نتایج ژئوفیزیکی تأثیرگذار هستند، با اهمیت باشد.

۵-۹- مدل ژئویست محیطی از رفتار باطله‌های انگوران

به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از مطالعات انجام شده در این تحقیق و ارائه یک مدل از رفتار ژئویست محیطی باطله‌های سرب و روی سولفیدی با میزبان کربناته انگوران، از آنجایی که امکان نمونه برداری عمقی از دمپ باطله میسر نشد، از داده‌های گزارش شده و موجود در آرشیو معدن در مورد آنالیز آب‌های سطحی و زیرزمینی در محدوده معدن، استفاده گردید. در مجموع نتایج آنالیز ۱۸ نمونه آب جمع‌آوری شد که شامل ۱۵ نمونه از آب‌های سطحی و ۳ نمونه از چشمه آب‌های زیرزمینی است. لازم به توضیح است که از ۱۸ نمونه آب جمع‌آوری شده، ۶ نمونه (A, B, C, D, E و F) مربوط به یک کار تحقیقاتی انجام شده است [Sharafi et al., 2018] که در این تحقیق استفاده شد و آنالیزهای مربوط به ۱۲ نمونه دیگر (G, SU_۱ تا SU_۸ و GR_۱ تا GR_۳)، از اطلاعات موجود در آرشیو معدن سرب و روی انگوران جمع‌آوری گردید [آرشیو معدن سرب و روی انگوران، ۱۳۹۸]. موقعیت جغرافیایی نمونه‌های آب برداشت شده در شکل (۵-۲۷) نشان داده شده است.



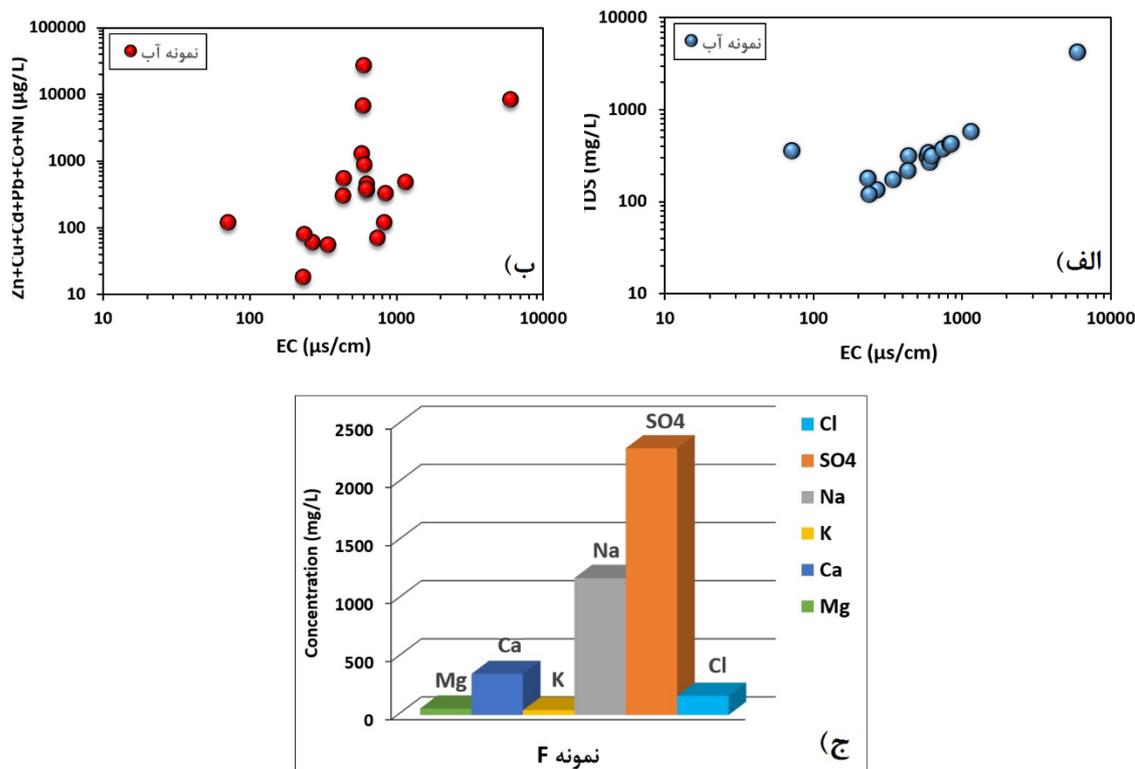
شکل ۵-۲۷- موقعیت مکانی نمونه‌های آب برداشت شده در اطراف دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران

نمونه‌ها در دو دوره زمانی از فصول (سرد و خشک) برداشت شده است. نمونه‌های A، B، C و D از محل پیت معدن برداشت شده است که موقعیت مکانی نمونه‌های A و D یکسان است ولی در دو فصل متفاوت زمستان و تابستان به ترتیب برداشت شده است. سه نمونه E، F و G از آب‌های خروجی از محل دمپ باطله‌ها به ترتیب در فصول زمستان، تابستان و بهار برداشت شده است. ۸ نمونه SU_۱ تا SU_۸ از آب‌های سطحی در محدوده بیرون از پیت معدن برداشت شده است. سه نمونه GR_۱، GR_۲ و GR_۳ مربوط به آب‌های زیرزمینی می‌باشد که از چشمه‌های بالا دست معدن گرفته شده است. نمونه‌برداری این نمونه‌ها، در فصل بهار انجام گرفته است. پارامترهای فیزیکوشیمیایی و غلظت عناصر آنالیز شده با روش ICP-MS از نمونه‌های آب در جدول (۵-۱۲) ارائه شده است. نتایج pH از نمونه‌های آب در محدوده مورد مطالعه، با دامنه‌ای از ۷/۵ تا ۸/۳، خصوصیات قلیایی را نشان می‌دهند. بیشترین EC (۶۰۰۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر) و کمترین pH مربوط به نمونه F می‌باشد که در فصل خشک سال از محل دمپ باطله‌ها نمونه‌برداری شده است. مقادیر EC در نمونه‌های سطحی نشان می‌دهد که با فاصله از محدوده معدن، مقادیر EC روندی کاهشی دارد. به طوری که نمونه SU_۱ در نزدیکی پیت معدن دارای EC برابر با ۱۱۵۵ $\mu\text{s}/\text{cm}$ است و نمونه SU_۸ در دورترین فاصله از پیت معدن، کمترین EC برابر ۷۵/۵ $\mu\text{s}/\text{cm}$ را دارد. غلظت متوسطی از یون بی‌کربنات HCO_3^- (محدوده‌ای بین ۷۵ تا ۱۶۵ mg/L) برای نمونه‌های داخل پیت معدن و خروجی دمپ باطله به دست آمد و کمترین مقدار مربوط به نمونه D با مقدار ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد. بر اساس مقادیر کل جامدات محلول (TDS)، بیشترین مقدار مربوط به نمونه F با مقدار ۴۱۸۹ mg/L است که در محل آب‌های خروجی از باطله‌های معدن قرار گرفته است و کمترین مقدار مربوط به چشمه آب‌های زیرزمینی در محدوده بالادست پیت معدن است (محدوده‌ای بین ۱۷۲-۱۱۹ mg/L). مقادیر TDS از نمونه‌ها نشان می‌دهد که مقدار آن در فصل خشک سال نسبت به دیگر فصل‌ها بالا می‌باشد و ارتباط مستقیمی با مقادیر رسانایی الکتریکی آب (EC) دارد (شکل ۵-۲۸-الف).

جدول ۵-۱۲- پارامترهای هیدروشیمیایی نمونه‌های آبی از محدوده مورد مطالعه (واحد mg/L می‌باشد) [Sharafi et al., 2018] و [آرشیو معدن سرب و روی انگوران، ۱۳۹۸]

نمونه	pH	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	TDS	TSS	قلیائیت (mg/L CaCO ₃)	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
A	۷/۹۸	۵۹۷	۳۱۷	-	۱۳۳/۴	۱۶۵	-	۲۲	۹۱	۲۱	۱۳	۵/۵	۶۷/۷	۱۵
B	۸/۲۵	۵۸۶	۳۰۷/۵	-	۱۰۷	۱۳۰	-	۱۱	۸۳	۶۴	۱۱	۵/۳	۶۶	۱۸
C	۸/۲۴	۴۳۷	۳۱۲	-	۱۰۷	۱۳۰	-	۱۰	<۵	۸۷	۱۵	۴/۶	۴۷	۱۷
D	۷/۶	۶۰۰	۳۳۸	۱۲۲۴	۵۹	۷۵	۰/۲۵	۴۱	<۵	۵۵	۲۷	۲	۱۰۵	۵
E	۸/۰۵	۶۰۷	۲۶۹	-	۶۹	۸۵	-	۴۸	۱۰۵	۳۰	۱۲	۰/۷	۸۶	۶
F	۷/۵	۶۰۰۰	۴۱۸۹	۵۰	۷۰	۹۰	۱/۰۹	۱۶۴	<۵	۲۲۹۴	۱۱۷۸	۴۰	۳۵۳	۵۴
G	۷/۹	۶۲۸	۳۱۴	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۱	۷/۸	۱۱۵۵	۵۷۹	۰/۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۲	۷/۸	۶۳۳	۳۱۶	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۳	۸/۳	۴۳۳	۲۱۷	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۴	۷/۹	۶۲۷	۳۱۵	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۵	۷/۹	۷۴۴	۳۷۲	۰/۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۶	۷/۹	۸۳۳	۴۱۶	۰/۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۷	۸	۸۴۴	۴۲۲	۰/۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU۸	۸/۲	۷۱/۵	۳۵۸	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GR۱	۷/۹	۲۶۸	۱۳۴	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GR۲	۷/۷	۳۴۳	۱۷۲	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GR۳	۸/۱	۲۳۷	۱۱۹	۰/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

بیشترین مقدار TSS با مقدار 1224 mg/L مربوط به نمونه D از محل پیت معدن می‌باشد که مربوط به فصل خشک سال است. نمونه‌های آب سطحی تقریباً مقادیر یکسانی از TSS را نشان می‌دهند. بر اساس مقادیر پارامتر قلیائیت، بیشترین و کمترین مقدار این پارامتر مربوط به نمونه‌های A و D با مقادیر $133/4 \text{ mg/L}$ و 70 mg/L به ترتیب می‌باشد. روند تغییرات از نتایج جدول (۵-۱۲) نشان می‌دهد که مقادیر EC ارتباط مستقیمی با مقادیر HCO_3^- و خاصیت قلیائیت ندارد، به طوری که بیشترین مقدار EC با مقادیر کمی از HCO_3^- و خاصیت قلیائیت همراه است. مقادیر غلظت بالا از NO_3^- ، در نمونه‌های آب مشاهده می‌شود. این مقدار بالا می‌تواند ناشی از استفاده مواد منجره هم‌چون آنفو باشد که در ترکیب‌شان نیترات وجود دارد [Sharafi et al., 2018]. غلظت کاتیون‌ها (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) و آنیون‌های (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) آنالیز شده نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر مربوط به این یون‌ها در ارتباط با نمونه F می‌باشد که از محل خروجی دمپ باطله‌ها در فصل خشک سال نمونه‌برداری شده است. همچنین نتایج حاکی از این است که غلظت این یون‌ها در همان محل (نمونه E) در فصول سرد کاهش پیدا کرده‌اند. یون سولفات (SO_4^{2-}) فراوان‌ترین آنیون و یون سدیم (Na^+) فراوان‌ترین کاتیون محلول در زهاب خروجی از دمپ باطله‌ها می‌باشد که ارتباط مستقیمی با مقادیر EC دارند (شکل ۵-۲۸ ج). با توجه به حضور کانی کلسیت همراه باطله‌ها، انتظار بر این است که کاتیون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} به عنوان یون‌های غالب در زهاب خروجی از دمپ باطله باشد ولی تحت شرایط قلیایی موجود، انحلال کانی کلسیت با سرعت کمتری اتفاق افتاده است.



شکل ۵-۲۸- الف و ب) تأثیر یون‌های فلزی محلول و جامدات محلول (TDS) بر خاصیت رسانایی (EC) نمونه‌های آب، ج) غلظت آنیون و کاتیون‌های موجود در نمونه زهاب خروجی از دمپ باطله سرب و روی معدن انگوران

نتایج آنالیز غلظت فلزات سمی در آب محدوده مورد مطالعه در جدول (۵-۱۳) ارائه شده است. مدل رفتار زیست‌محیطی از زهاب معدن سرب و روی انگوران بر اساس نمودار فیکلین در شکل (۵-۲۹) ارائه شده است. بر اساس مدل ارائه شده این گونه می‌توان تفسیر کرد که نمونه‌های A، B و D از پیت معدن و نمونه F از محل خروجی دمپ باطله، در گروه فلزات محتوی بالا با مقادیر pH قلیایی طبقه‌بندی شده‌اند و نمونه‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی پایین و بالادست معدن در گروه فلزات محتوی کم طبقه‌بندی می‌شوند. می‌توان گفت یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در رسانایی الکتریکی (EC) زهاب خروجی از دمپ باطله‌ها، مجموع غلظت یون‌های فلزی محلول است. شکل (۵-۲۸-ب) تأثیر غلظت یون‌های محلول بر روی مقادیر EC در نمونه‌های زهاب خروجی از دمپ باطله مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۳- غلظت فلزات حل شده در نمونه‌های آب از محدوده مورد مطالعه (واحد mg/L می‌باشد) [Sharafi et al., 2018] و آرشیو معدن سرب و روی انگوران، ۱۳۹۸

نمونه	As (ppb)	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
A	۰/۰۰۱	۰/۰۳۳	۰/۰۱۳	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۳۵	۰/۰۵۱	۰/۵۸۶	۶/۰۳
B	۰/۰۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۵	۰/۱۱۲	۰/۱	۱/۰۴
C	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵۱	۰/۰۳۶	۰/۴۵
D	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۸	۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۱۰۲	۲۷
E	۰/۰۰۱	۰/۰۱۴	۰/۰۴۹	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴۵	۰/۰۰۴	۰/۷۶
F	۰/۰۳۵	۰/۰۰۰۱	۰/۲	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۱۲۳	۸
G	۹/۶	۰/۰۱	-	-	-	-	۰/۰۵	-	۰/۳۹
SU _۱	<۱۰	-	-	-	-	۰/۰۱	۰/۰۵	-	۰/۴۳
SU _۲	۱۰/۵	-	-	-	-	۰/۰۴	۰/۱۶	-	۰/۲۱
SU _۳	۸/۴	-	-	-	-	۰/۰۰۹	۰/۱۸	-	۰/۱۲
SU _۴	۸/۳	-	-	-	-	۰/۰۸	۰/۱	-	۰/۲۸
SU _۵	۹/۸	-	-	-	-	۰/۰۲	۰/۰۵	-	<۰/۱
SU _۶	۸/۲	-	-	-	-	۰/۰۶	۰/۰۷	-	<۰/۱
SU _۷	<۱۰	-	-	-	-	۰/۰۲	۰/۱۲	-	۰/۲۱
SU _۸	۱۳/۲	-	-	-	-	۰/۰۱	۰/۰۷	-	<۰/۱
GR _۱	۱۲/۵	۰/۰۱	-	-	-	-	۰/۰۱	-	<۰/۱
GR _۲	۶/۳	-	-	-	-	-	۰/۰۰۵	-	<۰/۱
GR _۳	۷/۸	-	-	-	-	-	۰/۰۳	-	<۰/۱

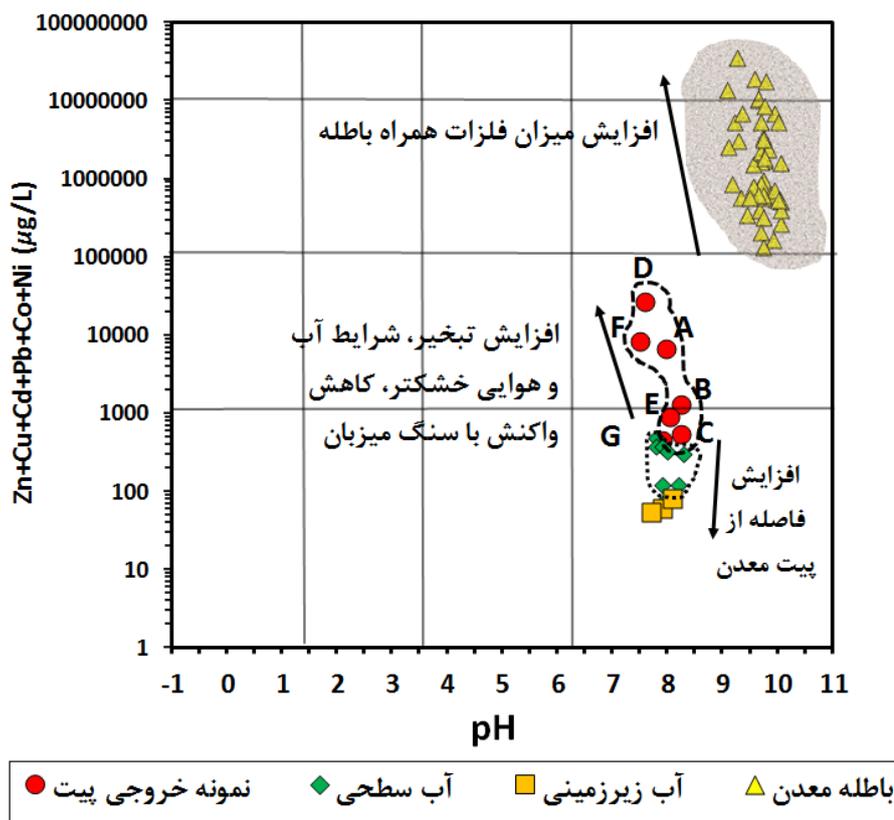
روند تغییرات مقادیر غلظت فلزات سمی از محل خروجی دمپ باطله (نمونه‌های E، F و G) برای فصول مختلف که در جدول (۵-۱۳) ارائه شده است، نشان می‌دهد که، غلظت تمام فلزات سمی به‌غیر از Cd و Ni، در فصل خشک مقادیر بالاتری نسبت به فصل سرد و بارانی از خود نشان می‌دهند و همچنین با افزایش pH از ۷/۵ به ۸/۰۵ در فصول سرد و بارانی، قابلیت تحرک و حلالیت فلزات Cd و Ni نسبت به سایر فلزات بیشتر شده است.

نتایج آنالیز نمونه‌های آب بالادست معدن (GR_۱ تا GR_۳) مقادیر کمی از غلظت فلز Ni و در حد کم As را نشان می‌دهد و نتایج غلظت فلزات سمی از پایین دست معدن (SU_۱ تا SU_۸) حاکی از انحلال و انتقال فلزات Zn، Ni، Fe و مقادیر جزئی‌تری از As به مناطق پایین دست معدن است. بیشترین مقدار غلظت فلز محلول در آب مناطق پایین دست مطابق جدول (۵-۱۳)، مربوط به فلز Zn با مقدار ۰/۴۳

میلی گرم بر لیتر است که از نمونه نزدیک به دمپ باطله می‌باشد (SU1). روند تغییرات نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از دمپ باطله، مقادیر غلظت Zn روند کاهشی پیدا می‌کند و این می‌تواند به تأثیر دمپ‌های باطله بر آب‌های سطحی مناطق پایین دست تفسیر شود.

در مجموع، با توجه به مدل ارائه شده در شکل (۵-۲۹) می‌توان نتیجه گرفت که باطله‌های معدن سرب و روی سولفیدی با میزبان کربنانه انگوران، حاوی مقادیر بالایی از فلزات سمی می‌باشند. افزایش کانی‌های کربناتی همراه باطله، عامل اصلی در افزایش pH نمونه‌ها شده است. از آنجائی که نمونه‌های آبی طی دو دوره زمانی مختلف (فصول خشک و مرطوب) برداشت شده است، تاثیر شرایط آب و هوایی در منطقه به خوبی در مدل ژئوزیست محیطی و رفتار زیست‌محیطی باطله‌های معدنی قابل درک است. در فصول مرطوب، بارندگی موجب رقیق شدگی زهاب معدن و همچنین افزایش بیشتر تماس آب با کانی‌های کربناتی در سنگ میزبان و باطله‌ها شده و این منجر به افزایش pH و کاهش غلظت فلزات سنگین در آب‌های خروجی معدن شده است. در مقابل، در فصول گرم به دلیل خشکی و بالا بودن عملیات تبخیر، نسبت ذرات جامد به مایع بیشتر و در نتیجه باعث افزایش TDS، محصولات اکسید شده و میزان یون‌های فلزی محلول می‌شود. از این‌رو، مهم‌ترین عوامل مؤثر در خاصیت رسانایی الکتریکی (EC) زهاب خروجی از دمپ باطله‌های سرب و روی انگوران، افزایش غلظت یون‌های فلزی، SO_4^{2-} ، Na^+ ، TDS و تشکیل کمپلکس‌های آنیونی می‌باشد که می‌تواند دلیل شاخصی در افزایش خاصیت رسانایی به دست آمده از نتایج ژئوفیزیکی باشد.

نتایج به دست آمده از گونه‌پذیری عناصر در نمونه‌های آب با استفاده از مدل‌سازی هیدروژئوشیمیایی برای عناصر Fe، Cd، Co، Ni، Pb و Zn توسط نرم افزار PHREEQC نشان می‌دهد که تحت شرایط زهاب قلیایی موجود در منطقه، فلز Fe غالباً به شکل هیدروکسید آهن $Fe(OH)_3$ می‌باشد. کمپلکس‌های $NiCO_3$ و $PbCO_3$ ، گونه‌های غالب برای عناصر Ni و Pb در نمونه‌های آب می‌باشند و یون‌های آزاد Cd^{2+} ، Co^{2+} و Zn^{2+} رایج‌ترین شکل غالب از این عناصر در نمونه‌های آب بر اساس مدل‌سازی، پیش‌بینی شدند [Sharafi et al., 2018].



شکل ۵-۲۹- مدل ژئوزیست محیطی از زهاب و باطله‌های معدن سرب و روی انگوران

۵-۱۰- جمع‌بندی

در این فصل نتایج به دست آمده از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و جمع‌بندی نتایج به شرح ذیل می‌باشد:

به طور کلی، زهاب قلیایی می‌تواند از پتانسیل خنثی‌سازی بالا یا گسترش کم کانی‌های سولفیدی در دمپ باطله‌ها ایجاد شود که در محدوده مورد مطالعه هر دو شرایط وجود دارد. نتایج استاتیکی ABA اصلاح شده به خوبی این موارد را نشان دادند. با وجود پتانسیل بالای خنثی‌سازی و ویژگی زهاب خنثی تا قلیایی، باطله‌های سرب و روی انگوران حاوی مقادیر بالایی از فلزات سمی از جمله آرسنیک، کبالت، کروم، نیکل، سرب و روی است که میانگین هر یک از این عناصر از حد مجاز در محیط‌زیست تجاوز کرده است. نتایج ارزیابی و پهنه‌بندی ریسک آلودگی به فلزات سمی توسط شاخص‌های درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک حاکی از گسترش آلودگی در بخش شمال شرقی و جنوب غربی از محدوده

مورد مطالعه است که عناصر As و Cd بیشترین سهم در این آلودگی را دارند. جریان باد و نزولات جوی، نقش اصلی در پراکندگی و انتقال این آلاینده‌ها به مناطق پایین می‌تواند داشته باشند. با استفاده از روش آنالیز تمایز، ریسک آلودگی به فلزات سنگین در دمپ‌های باطله کلاسه‌بندی شد و نشان داده شد که فلزات As، Pb و Zn مهم‌ترین عناصری هستند که در تفکیک و کلاسه‌بندی ریسک آلودگی می‌توانند مؤثر باشند. مطالعات کانی‌شناسی به روش SEM نشان می‌دهد که حضور کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت به عنوان منبع اصلی در تولید زهاب اسیدی می‌تواند باشد. از طرف دیگر، مقاطع میکروسکوپی و آنالیز XRD، حضور کانی‌های کربناتی از جمله کلسیت که با فراوانی بالایی در نمونه‌های باطله مشاهده شد را به عنوان فاکتور اصلی در خنثی‌سازی اسید و جلوگیری از تولید زهاب اسیدی در باطله‌های معدنی معرفی می‌نماید. نتایج آنالیز EPMA از کانی‌های سولفیدی نشان می‌دهد که از دیدگاه زیست‌محیطی برخی فلزات سمی در بخش سولفیدی تمرکز پیدا کردند و از جنبه اقتصادی، باطله‌های معدنی حاوی مقادیری از نقره، روی، کادمیوم و ... می‌باشند که بازیابی و فرآوری آنها پیشنهاد می‌شود. نتایج ژئوفیزیکی به روش VLF و مغناطیس، دو محدوده با خاصیت رسانایی و مغناطیسی بالا در بخش شمال‌غربی و جنوب شرقی از دمپ باطله شناسایی نمود که این دو زون توسط یک بخش نارسانا از یکدیگر جدا شده‌اند. حضور شکستگی‌ها و حفرات ایجاد شده در ساختار داخلی دمپ احتمالاً باعث شده تا این بخش از محدوده مورد مطالعه به صورت نارسانا با خاصیت مغناطیسی کم ظاهر شود. از مطالعات ژئوالکتریک به منظور بررسی عمقی و نحوه گسترش آلودگی استفاده شد و نتایج به صورت دوبعدی و سه بعدی مدل‌سازی گردید. نتایج مطالعات ژئوالکتریک نشان داد که در بخش‌هایی از دمپ باطله، زون‌هایی با رسانایی و بارپذیری بالا وجود دارد که در بعضی قسمت‌ها گسترش این زون‌ها از سطح به عمق است. این امر می‌تواند به دلیل نفوذ مواد لیچ شده حاوی یون‌های فلزی حل شده باشد که باعث کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش بارپذیری نسبت به زمینه شده است. ناهمگنی ساختار داخلی دمپ نیز دلیلی شده که مسیرهای ترجیحی برای نفوذ این شیرابه‌های تشکیل شده فراهم نماید. نتایج آنالیز فیزیکوشیمیایی از زهاب خروجی باطله‌ها نشان داد که pH آن به صورت خنثی تا قلیایی است و مهم‌ترین

عواملی که می‌تواند در خاصیت رسانایی الکتریکی (EC) زهاب خروجی از دمپ باطله‌های سرب و روی انگوران و همچنین نتایج به دست آمده از روش‌های ژئوفیزیکی تأثیر مستقیمی داشته باشد، غلظت یون‌های فلزی محلول، SO_4^{2-} ، Na^+ ، TDS و کمپلکس‌های تشکیل شده تحت شرایط موجود است. مدل ژئوزیست‌محیطی از زهاب معدن سرب و روی انگوران نشان می‌دهد که تغییرات شرایط آب و هوایی به شدت بر رفتار زیست‌محیطی زهاب خروجی از باطله‌ها تأثیرگذار است. به طوری که در فصل گرم سال به دلیل خشکی و بالا بودن میزان تبخیر، بیشترین اثرات زیست‌محیطی را داشته است.

فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه‌گیری

باطله‌های معدنی رها شده به دلیل داشتن حجم بالایی از عناصر آلاینده، همواره به عنوان یک تهدید جدی برای محیط‌زیست منطقه به شمار می‌آیند. عمده‌ترین تفاوت آلودگی بین دمپ‌های باطله از ذخایر مختلف، مربوط به اندازه ذرات، کانی‌شناسی، رژیم هیدرولوژیکی، واکنش‌های شیمیایی و شرایط pH می‌باشد که پتانسیل تولید یا خنثی‌سازی آلودگی و سرنوشت انتقال فلزات به محیط‌زیست را تعیین می‌کند. در این رساله، قابلیت تولید آلودگی از دمپ‌های باطله سرب و روی سولفیدی با سنگ میزبان کربناته در معدن انگوران مورد ارزیابی قرار گرفت. ترکیبی از روش‌های ژئوشیمیایی، آزمایشگاهی، کانی‌شناسی و مطالعات ژئوفیزیکی در این تحقیق این فرصت را فراهم نمود تا که یک توصیف جامع از خصوصیات ژئوزیست‌محیطی از این نوع دمپ‌های باطله به دست آید. علاوه بر این، خصوصیات فیزیکوشیمیایی آبهای خروجی از باطله‌ها برای ارزیابی تحرک و انتقال فلزات سمی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در این تحقیق به طور خلاصه به شرح ذیل است:

- نتایج ارزیابی ریسک آلودگی به عناصر آلاینده توسط شاخص‌های ژئوشیمیایی درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک از باطله‌های سرب و روی انگوران حاکی از این است که این نوع باطله‌ها، حاوی مقادیر قابل توجهی از فلزات سمی هستند. نه تنها دمپ باطله‌ها پتانسیل آلودگی به فلزات سنگین را دارند بلکه محیط‌های آبی و خاکی اطراف نیز به فلزات سمی آلوده شده‌اند. نتایج پهنه‌بندی نشان داد، بخش شمال‌شرقی و جنوب‌غربی از محدوده دمپ باطله مورد مطالعه، دارای ریسک آلودگی خیلی زیاد می‌باشد که این نشان‌دهنده بیشترین تمرکز عناصر آلاینده در این بخش‌ها است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که ریسک آلودگی به فلزات سمی از روند $As > Cd > Zn > Ni > Pb > Cr > Cu$ پیروی می‌کند. فلذا فلزات As و Cd بیشترین سهم در آلودگی را دارند.

- ریسک آلودگی آلاینده‌های فلزی در دمپ باطله‌ها توسط روش آنالیز تمایز به چهار سطح آلودگی کم، متوسط، قابل بررسی و زیاد+خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که از ۱۳ پارامتر ورودی (عناصر آلاینده)، تنها فلزات As، Pb و Zn به عنوان مهم‌ترین پارامترها در تفکیک این گروه‌ها شناسایی شدند. به منظور ارزیابی عملکرد روش آنالیز تمایز، از ۵ نمونه جدید استفاده شد و نتایج نشان داده شد که روش آنالیز تمایز چهار نمونه را به درستی طبقه‌بندی نموده است.
- نتایج آزمایشگاهی و تست استاتیکی ABA اصلاح شده نشان داد که دمپ باطله پتانسیل بالایی از خنثی‌سازی اسید دارد و زهاب خروجی به صورت خنثی تا قلیایی پیش‌بینی شد. همچنین، کانی کلسیت به عنوان منبع اصلی خنثی‌سازی معرفی شد.
- مطالعات کانی‌شناسی توسط مقاطع میکروسکوپی یک لایه‌بندی ظریف از سنگ‌های رسوبی آواری با سیمان آهکی و حاوی کمی مواد آلی و رس همراه دانه‌های کوارتز نشان داد. همچنین اسمیت‌زونیت و همی‌مورفیت از کانی‌های کربناتی و اسفالریت و گالن از کانی‌های سولفیدی معدن در نمونه‌های باطله نیز مشاهده شدند. حضور کانی‌های کربناتی از جمله کلسیت با فراوانی بالا توسط روش XRD در نمونه‌های باطله شناسایی شد. همچنین کلسیت به عنوان فاکتور اصلی در خنثی‌سازی اسید و جلوگیری از تولید زهاب اسیدی در باطله‌های معدنی معرفی شد و این موارد، نتایج حاصل از بخش آزمایشگاهی را مورد تأیید قرار داد. نتایج SEM به منظور تشخیص نوع کانی‌های سولفیدی نشان داد که پیریت به عنوان منبع اصلی در تولید زهاب اسیدی می‌تواند باشد که بعضاً به طور محدود به صورت اکسیدهای آهن در نتیجه اکسایش پیریت در تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده شد. نتایج EPMA از کانی‌های سولفیدی نشان داد که از دیدگاه زیست‌محیطی برخی فلزات سمی در بخش سولفیدی تمرکز پیدا کردند. اسفالریت به‌عنوان مهم‌ترین کانی حامل عناصر شناسایی شد که به عنوان منبع اصلی عناصری نظیر کادمیوم، آهن و مس است.

- نتایج مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های VLF و مغناطیسی، دو محدوده با خاصیت رسانایی و مغناطیسی بالا در بخش شمال‌غربی و جنوب شرقی از دمپ باطله را شناسایی کرد که این دو زون توسط یک بخش نارسانا و غیرمغناطیس از یکدیگر جدا شده بود. با توجه به دپو غیر اصولی باطله‌ها، شکست و ترک خوردگی در بخش‌هایی از سطح دمپ باطله مشاهده شد. چنین استنباط می‌شود که ترک و شکستگی‌های بخش‌های داخلی دمپ توسط لایه‌های سطحی از باطله‌های جدید پوشیده شده است و حضور هوا در این ناحیه، منجر به یک بی‌هنجاری نارسانا در نتایج ژئوفیزیکی روش الکترومغناطیس VLF شده است. البته در فصول بارندگی احتمالاً این بخش‌ها به صورت زون رسانا مشاهده می‌شوند.

- از مطالعات ژئوالکتریک به منظور بررسی ساختار داخلی دمپ و نحوه نفوذ و گسترش آلودگی استفاده شد. داده‌ها به صورت دو و سه بعدی مدل‌سازی گردید. نتایج ژئوالکتریک نشان داد که در بخش‌هایی از دمپ باطله، زون‌هایی با رسانایی بالا وجود دارد که در بعضی قسمت‌ها گسترش این زون‌ها از سطح به عمق است. از این رو، چنین استنباط شد که به دلیل نفوذ نزولات جوی و فعل و انفعالات شیمیایی صورت گرفته بین کانی‌های همراه و اکسایش باطله‌ها، لیچینگ نفوذی می‌تواند حاوی یون‌های اصلی و فلزی حل شده باشد که باعث کاهش مقاومت الکتریکی نسبت به زمینه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار داخلی دمپ ناهمگن است و باعث ایجاد مسیرهای ترجیحی جهت انتقال مواد شسته شده به داخل دمپ شده است. اگرچه یافته‌های قبلی نشان می‌دهد که خاصیت رسانایی منحصر به زهاب اسیدی است ولی در این تحقیق این گونه پیشنهاد شد که زهاب قلیایی نیز می‌تواند به صورت زون‌های رسانا در نتایج ژئوفیزیکی قابل شناسایی باشد و این مورد تا کنون در جایی گزارش نشده است.

- به منظور شناسایی پارامترهای موثر در نتایج ژئوفیزیکی، از نتایج آنالیز نمونه‌های آب در دو دوره زمانی از فصول (سرد و خشک)، شامل ۱۵ نمونه سطحی و ۳ نمونه از چشمه آب زیرزمینی در محدوده معدن استفاده شد. نتایج آنالیز نشان داد که زهاب معدن به صورت خنثی تا قلیایی

است. مقادیر کل جامد محلول (TDS) از نمونه‌ها نشان می‌دهد که یک ارتباط مستقیمی با مقادیر رسانایی الکتریکی آب (EC) وجود دارد. همچنین یون سولفات (SO_4^{2-}) فراوان‌ترین آنیون و یون سدیم (Na^+) فراوان‌ترین کاتیون محلول در زهاب خروجی از دمپ باطله‌ها می‌باشد که ارتباط مستقیمی با مقادیر EC دارند.

- مدل ژئوزیست‌محیطی از زهاب معدن سرب و روی انگوران بر اساس نمودار فیکلین ارائه شد. بر اساس مدل ارائه شده این گونه می‌توان تفسیر کرد که، آب‌های محدوده پیت معدن و زهاب خروجی از دمپ باطله‌ها، در گروه حاوی فلزات زیاد با مقادیر pH قلیایی طبقه‌بندی شده‌اند و نمونه‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی پایین و بالادست معدن در گروه حاوی فلزات کم طبقه‌بندی می‌شوند. می‌توان نتیجه گرفت که یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در رسانایی الکتریکی (EC) زهاب خروجی از دمپ باطله‌ها، یون‌های فلزی محلول است.

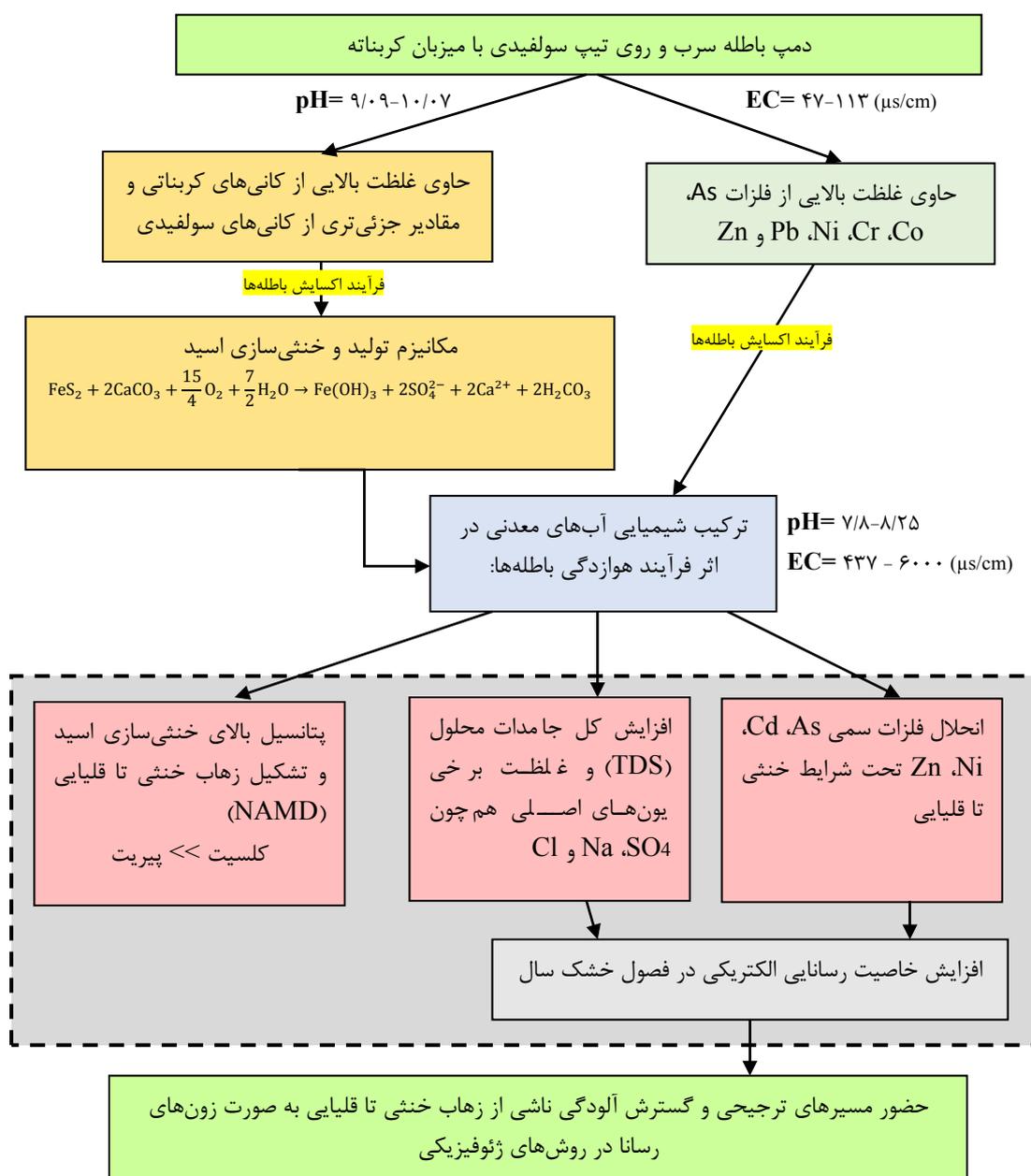
- افزایش کانی‌های کربناتی همراه باطله‌های سرب و روی انگوران، عامل اصلی در افزایش pH نمونه‌های آب می‌باشد. همچنین، شرایط آب و هوایی در منطقه، رفتار زیست‌محیطی باطله‌های معدنی را تحت تأثیر قرار داده است. در حالت کلی، در فصول مرطوب، بارندگی موجب رقیق شدگی زهاب معدن و همچنین افزایش بیشتر تماس آب با کانی‌های کربناتی در سنگ میزبان و باطله‌ها شده و این امر منجر به افزایش pH و کاهش غلظت فلزات سنگین در آب‌های خروجی معدن شده است. در مقابل در فصول گرم به دلیل خشکی و بالا بودن میزان تبخیر، نسبت ذرات جامد به مایع بیشتر و در نتیجه باعث افزایش TDS، محصولات اکسید شده و میزان غلظت یون‌های فلزی محلول شده است.

- می‌توان نتیجه گرفت، مهم‌ترین عوامل مؤثر در خاصیت رسانایی الکتریکی (EC) زهاب خروجی از دمپ باطله‌های سرب و روی انگوران، افزایش غلظت یون‌های فلزی، SO_4^{2-} ، Na^+ و TDS و کمپلکس‌های فلزی تشکیل شده تحت شرایط موجود باشد که می‌تواند دلیل شاخصی در افزایش خاصیت رسانایی به دست آمده از نتایج ژئوفیزیکی باشد.

- نتایج به دست آمده از گونه‌پذیری عناصر موجود در نمونه‌های آب نشان داد که Fe به طور غالب به شکل $Fe(OH)_3$ است. گونه‌های Ni و Pb غالباً به شکل‌های $NiCO_3$ و $PbCO_3$ بوده و Zn^{2+} و Co^{2+} ، Cd^{2+} رایج‌ترین شکل غالب از این عناصر در نمونه‌های آب تحت شرایط موجود می‌باشند.

تلفیق مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده به همراه نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل‌ها در مطالعه حاضر را می‌توان در قالب یک مدل کلی و مفهومی مطابق شکل (۶-۱) خلاصه کرد که بیانگر مسائل زیست‌محیطی در ارتباط با دپ‌های باطله سرب و روی سولفیدی با میزبان کربناته است. از چنین مدلی می‌توان برای پیش‌بینی مسائل زیست‌محیطی معادن مشابه، در مراحل مختلف اکتشاف، توسعه معدن، عملیات فرآوری، احیاء و بازسازی دپ‌های باطله و ... استفاده کرد.

یکی از موارد مهم در معدن سرب و روی انگوران، حضور کلسیت فراوان در سنگ میزبان است که این امر باعث می‌شود باطله‌ها پتانسیل بالایی از خنثی‌سازی اسید داشته باشند و همچنین سبب شود، pH در کل محدوده از دپ باطله‌های معدن در حالت خنثی تا قلیایی باقی بماند. البته با گذر زمان و فعالیت استخراج از بخش سولفیدی، امکان تغییرات pH در آینده وجود دارد. باطله‌های معدنی منبع قابل توجهی از فلزات سمی می‌باشند، اگرچه برای مورد بررسی شده در این مطالعه، زهاب معدن دارای خاصیت خنثی تا قلیایی است، ولی تحت چنین شرایطی، انحلال برخی از این فلزات موجود در دپ باطله و انتقال آنها به منابع آب و خاک پایین دست باعث آلودگی آنها و تخریب محیط‌زیست می‌شود.



شکل ۶-۱- مدل کلی از ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی باطله‌های سرب و روی سولفیدی با سنگ میزبان کربناته. نتایج حاصله نشان می‌دهند که، ناهمگنی ساختار داخلی و نرخ عبوردهی آب از دمپ باطله‌ها، نحوه دیو، شرایط آب و هوایی و نرخ اکسایش باطله‌ها به شدت بر کیفیت ترکیب شیمیایی زهاب خروجی از دمپ باطله‌ها تأثیرگذار است. روش‌های ژئوفیزیکی به خوبی توانستند پتانسیل آلودگی این نوع باطله‌ها را به تصویر بکشند و یک ارتباطی بین تأثیر ترکیب شیمیایی زهاب قلیایی بر روی نتایج ژئوفیزیکی به صورت زون‌های رسانا داشته باشند. اگرچه این موضوع برای زهاب‌های اسیدی توسط محققین زیادی مورد

بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند یک راهکار مناسب جهت مدیریت صحیح و کنترل آلودگی در این نوع باطله‌ها باشد.

۶-۲- نوآوری تحقیق

به طور خلاصه می‌توان جنبه‌های نوآوری در تحقیق حاضر را به شرح زیر بیان کرد:

- گونه‌پذیری و پهنه‌بندی ریسک آلودگی به فلزات آلاینده بر روی منبع آلودگی (دمپ باطله‌ها)
- بکارگیری از روش آنالیز تمایز به منظور کلاسه‌بندی ریسک آلودگی دمپ‌های باطله
- تلفیق رویکرد کانی‌شناسی و آزمایشگاهی در تعیین منشأ اصلی خنثی‌کننده آلودگی
- بکارگیری از روش‌های ژئوفیزیکی جهت به تصویر کشیدن خصوصیات زهاب قلیایی دمپ

باطله‌ها

- ارائه مدل ژئوزیست‌محیطی رفتار و خصوصیات زهاب نای از باطله‌های سرب و روی سولفیدی با میزبان کربناته

۶-۳- پیشنهادات

- استفاده از تست سینتیکی جهت بررسی مکانیزم‌های درگیر و روند انتقال آلودگی از باطله‌ها
- نمونه‌برداری عمقی از دمپ باطله جهت بررسی نحوه گسترش و توزیع آلودگی
- نمونه‌برداری عمقی از آب‌های منفذی جهت شناسایی پارامترهای درگیر در آلودگی
- اندازه‌گیری مقدار نفوذ اکسیژن در داخل دمپ به منظور تعیین ضریب نفوذ
- ایجاد پوشش گیاهی جهت احیاء و بازسازی دمپ‌های باطله و کاهش فرسایش آبی و بادی و هم‌چنین استفاده از استراتژی گیاه‌پالایی به منظور کاهش واکنش‌های شیمیایی داخل دمپ و نهایتاً جلوگیری از آزادسازی عناصر آلاینده به محیط‌زیست. در روش گیاه‌پالایی، بسته به نوع آلودگی به فلز سنگین، می‌توان گیاهی که جاذب آن می‌باشد، انتخاب کرد.

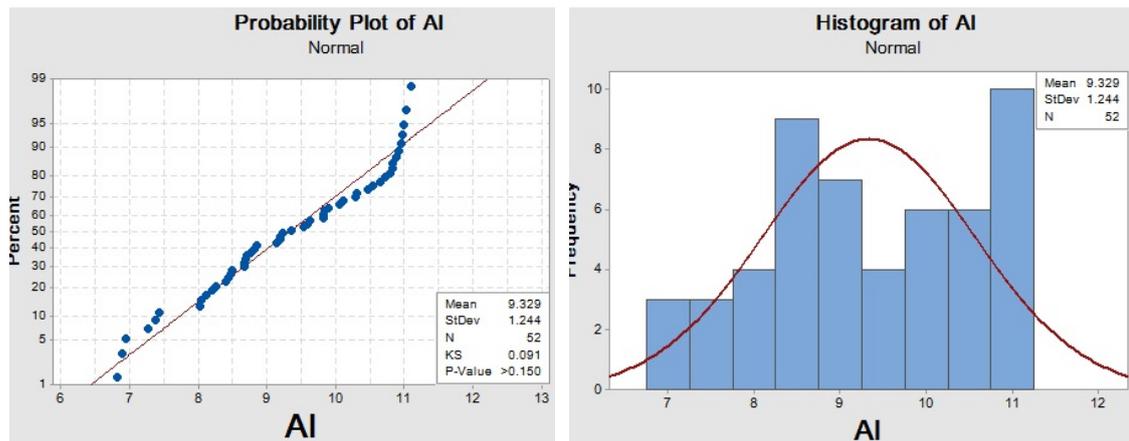
پوست (الف):

نمودارهای، مستگرام و احتمال نرمال شده عناصر مورد

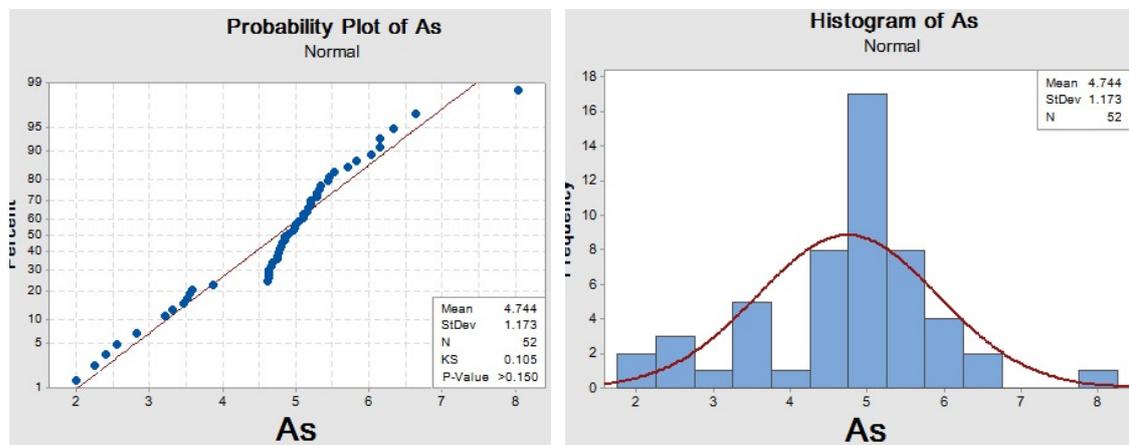
مطالعه و نتایج خروجی آنالیزهای

الف-۱- نمودارهای هیستوگرام و احتمال نرمال شده عناصر مورد مطالعه

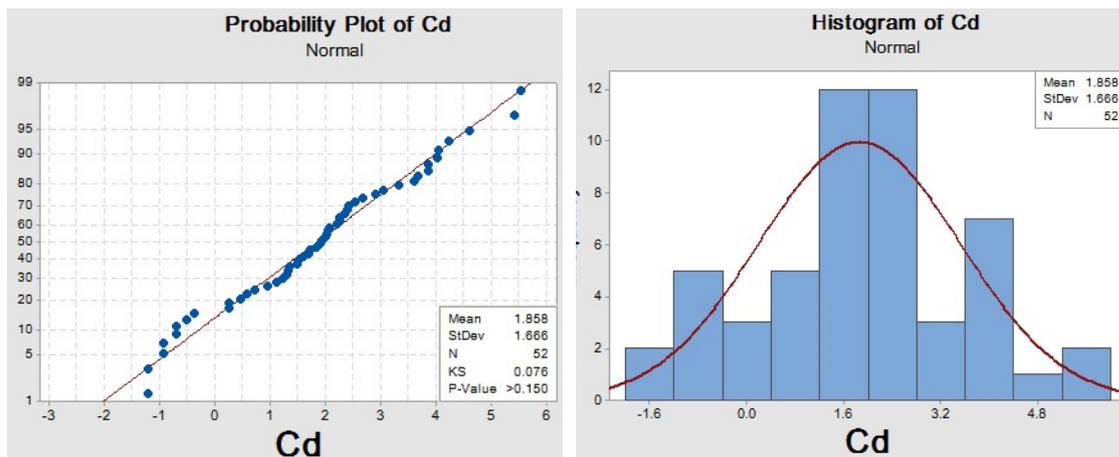
با توجه به این که عناصر مورد مطالعه از دمپ باطله دارای توزیع نرمال می‌باشند، نرمال‌سازی عناصر با استفاده از تبدیل لگاریتمی انجام گرفت و نمودارهای هیستوگرام و احتمال بعد از نرمال‌سازی در ادامه در شکل‌های (الف-۱) تا (الف-۱۳) نشان داده شده است.



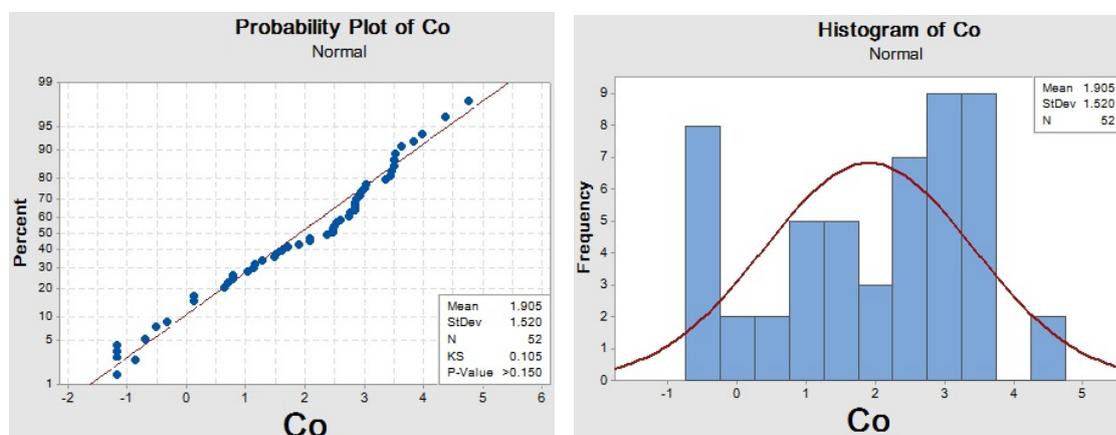
شکل الف-۱- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر آلومینیوم بعد از تبدیل لگاریتمی



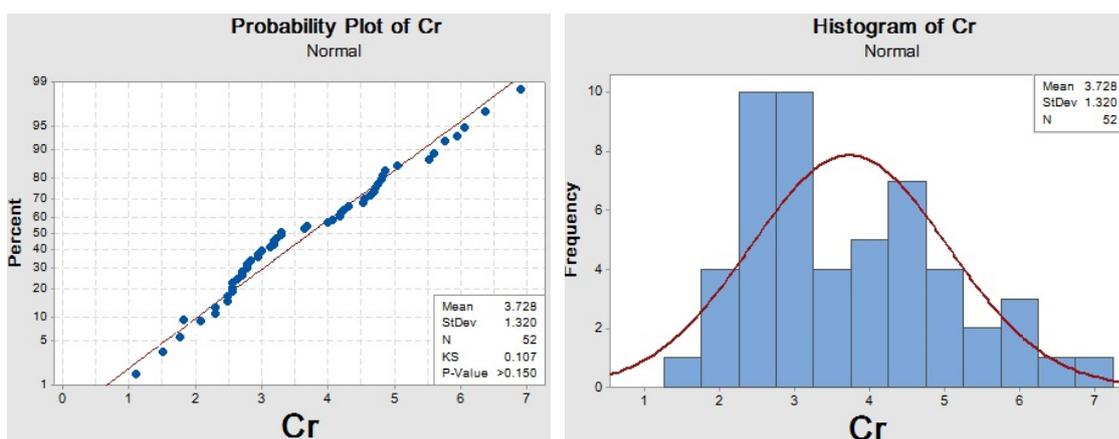
شکل الف-۲- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر آرسنیک بعد از تبدیل لگاریتمی



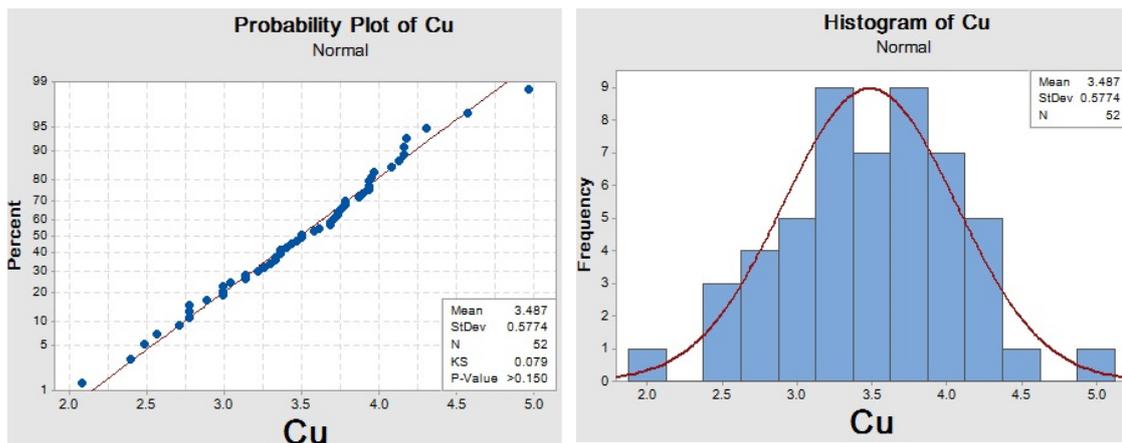
شکل الف-۳- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر کادمیوم بعد از تبدیل لگاریتمی



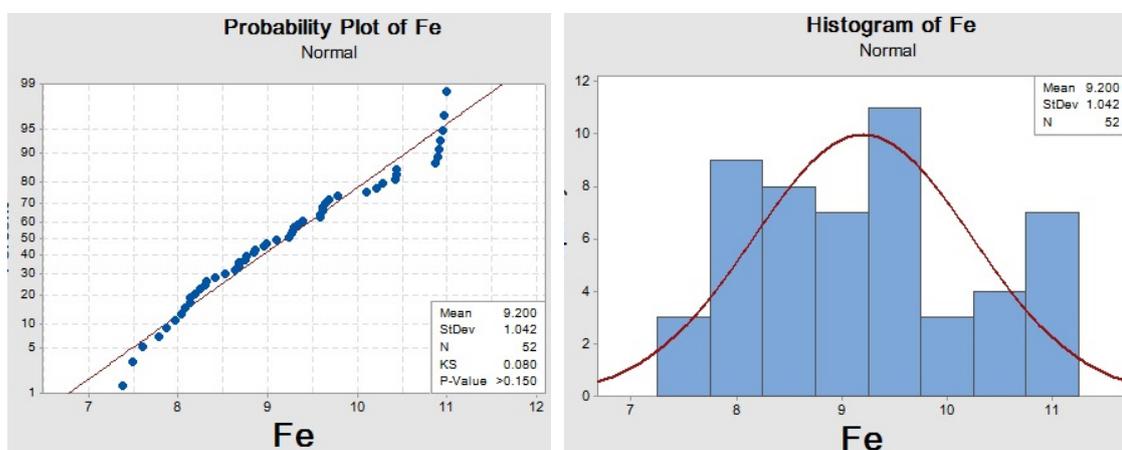
شکل الف-۴- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر کبالت بعد از تبدیل لگاریتمی



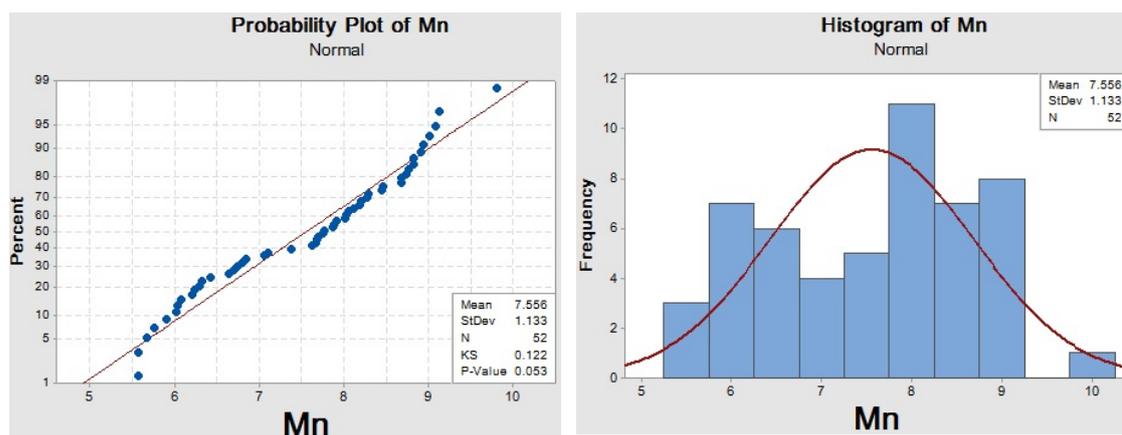
شکل الف-۵- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر کروم بعد از تبدیل لگاریتمی



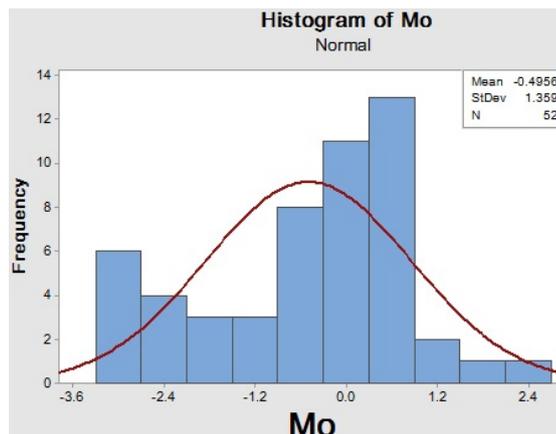
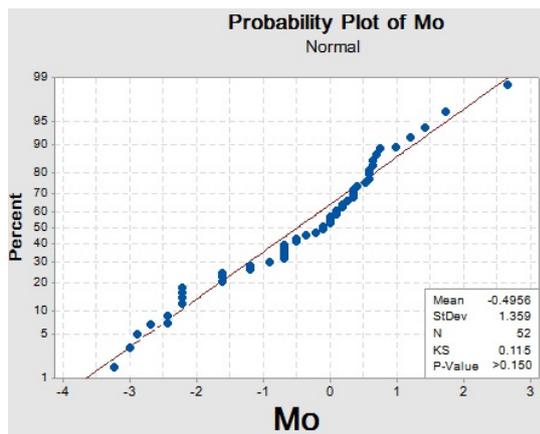
شکل الف-۶- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر مس بعد از تبدیل لگاریتمی



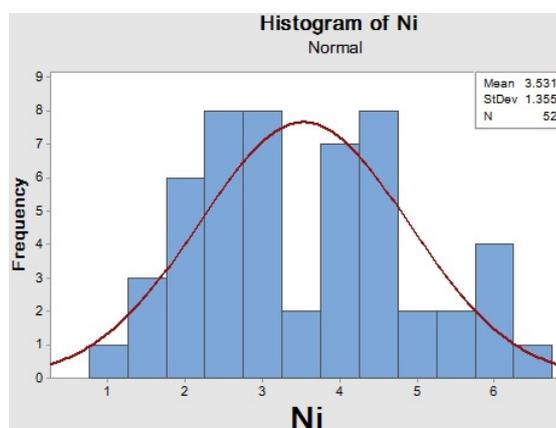
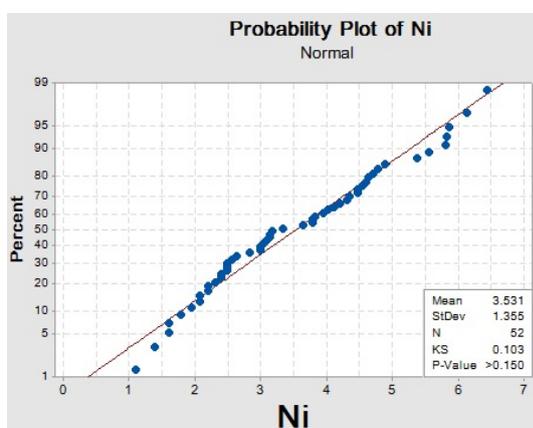
شکل الف-۷- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر آهن از تبدیل لگاریتمی



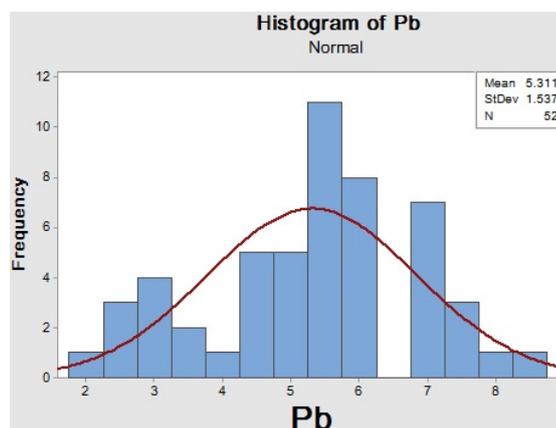
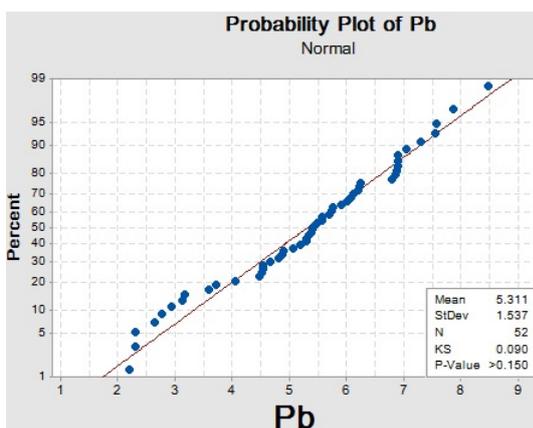
شکل الف-۸- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر منگنز بعد از تبدیل لگاریتمی



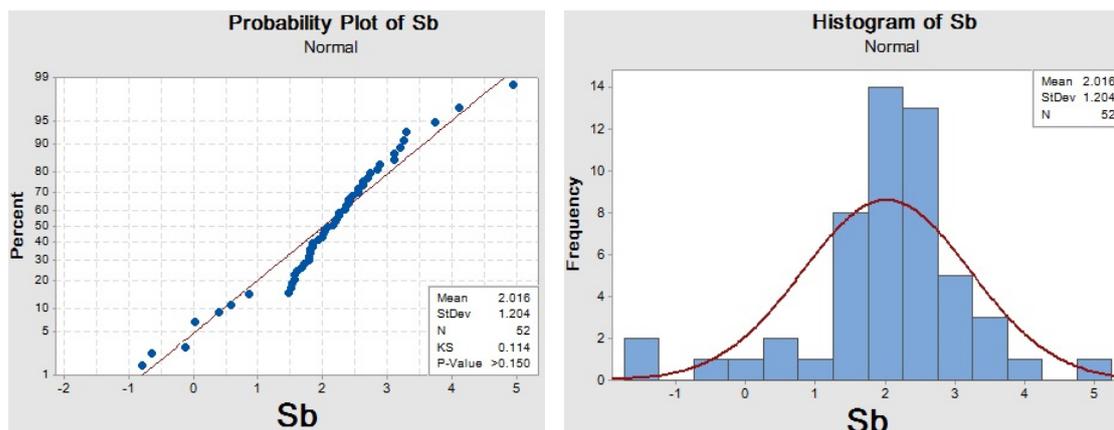
شکل الف-۹- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر مولیبدن بعد از تبدیل لگاریتمی



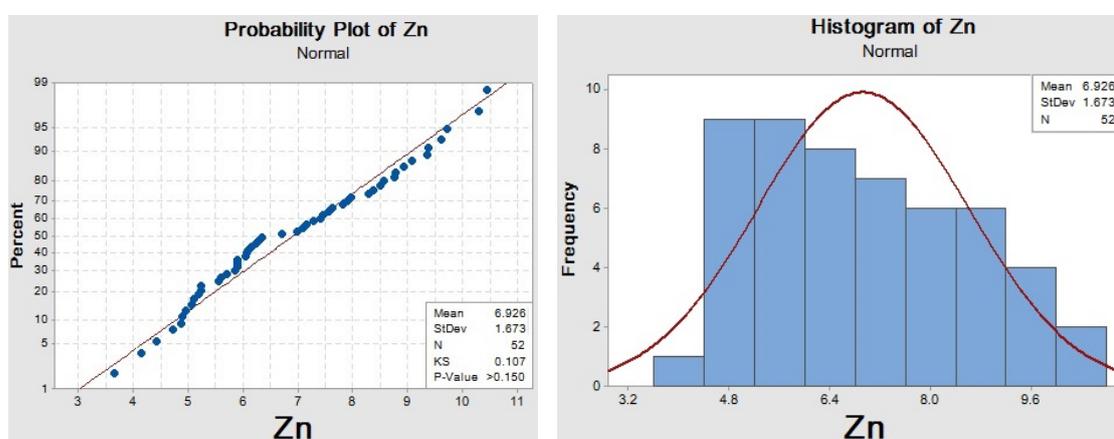
شکل الف-۱۰- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر نیکل بعد از تبدیل لگاریتمی



شکل الف-۱۱- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر سرب بعد از تبدیل لگاریتمی



شکل الف-۱۲- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر سلیوم بعد از تبدیل لگاریتمی



شکل الف-۱۳- نمودار هیستوگرام و احتمال عنصر روی بعد از تبدیل لگاریتمی

الف-۲- نتایج خروجی روش آنالیز تمایز

خلاصه‌ای از نتایج خروجی روش آنالیز تمایز در جداول (الف-۱) تا (الف-۴) ارائه شده است.

جدول الف-۱- مقادیر واریانس و همبستگی محاسبه شده جهت ارزیابی عملکرد هر یک از توابع تمایز

Eigenvalues				
Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	11.825 ^a	96.2	96.2	.960
2	.435 ^a	3.5	99.8	.551
3	.030 ^a	.2	100.0	.170

a. First 3 canonical discriminant functions were used in the analysis.

جدول الف-۲- مقدار ضریب لامبدای ویلکس هر یک از توابع محاسبه شده در روش آنالیز تمایز

Wilks' Lambda

Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig.
1 through 3	.053	125.032	9	.000
2 through 3	.677	16.598	4	.002
3	.971	1.247	1	.264

جدول الف-۳- مختصات مرکز گروه‌های طبقه‌بندی شده در روش آنالیز تمایز

Functions at Group Centroids

RI	Function		
	1	2	3
.00	-4.858	-.859	-.071
1.00	-1.582	.878	-.071
2.00	1.198	-.083	.245
3.00	4.909	-.341	-.179

Unstandardized canonical discriminant functions evaluated at group means

جدول الف-۴- ضرایب توابع بدست آمده از روش آنالیز تمایز

Canonical Discriminant Function Coefficients

	Function		
	1	2	3
As	.805	1.920	-.647
Pb	.512	-.791	1.301
Zn	1.180	-.535	-.740
(Constant)	-14.465	-1.138	1.260

Unstandardized coefficients

منابع

منابع فارسی

- آرشیو مجتمع سرب و روی انگوران، (۱۳۹۸)، "اطلاعات مربوط به نمونه‌های آب آنالیز شده" آزاد م. ر.، (۱۳۹۴)، "کاربرد فیلتر گسترش رو به بالا در تفسیر داده‌های میدان مغناطیس به همراه تعیین ارتفاع بهینه در منطقه منصور آباد یزد، ایران"، **فیزیک زمین و فضا**، دوره ۴۱، شماره ۲، ص ۲۲۹-۲۳۸.
- اسکندری نژاد ر.، زندهمقدم ح.، خراسانی پور م.، (۱۳۹۸) "کانی‌شناسی و ژئوشیمی بخش سولفیدی معدن سرب و روی طرز، شمال استان کرمان: مورد مطالعاتی از کانسارهای رسوبی با سنگ میزبان کربناته"، **پژوهش های چینه نگاری و رسوب شناسی**، سال سی و پنجم، شماره پیاپی ۷۶، شماره سوم، ص ۲۲-۱.
- امیرخانی ف.، (۱۳۸۹)، پایانامه کارشناسی ارشد، "استفاده از روش های اکتشاف الکترومغناطیسی VLF و EM34-3 جهت مطالعه اثرات زیست محیطی باطله های کارخانه زغالشویی البرز شرقی"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- حسینی م.، (۱۳۹۳)، پایانامه کارشناسی ارشد، "بررسی اثرات زیست محیطی عناصر سنگین در نهشته‌های رسوبی دشت انگوران"، دانشگاه ارومیه، ص ۱۳۱.
- جدیری ب.، (۱۳۸۵)، پایانامه کارشناسی ارشد، "تلفیق مدل سازی ریاضی و مطالعات ژئوفیزیکی زیست محیطی مواد حاصل از شستشوی کارخانه زغالشویی البرز شرقی"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- دولتی ارده جانی ف.، شفائی تنکابنی س. ض.، میر حبیبی ع. و بدیعی خ.، (۱۳۸۳)، "بیوتکنولوژی، ژئوشیمی زیست محیطی و مدیریت پساب ها" جلد اول، پژوهشکده صنایع رنگ ایران، چاپ دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۲۴۵.
- سهرابی و.، قادری م.، سالاری راد م. م.، (۱۳۸۳)، "بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی از باطله‌های کارخانه زغالشویی البرز شرقی با استفاده از آزمایش ABA اصلاح شده"، کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱۶-۱.
- شریعتی ش.، آقائاتی س. ع.، موسوی حرمی س. ر.، مدبری س.، آدابی م. ح.، (۱۳۹۰)، "بررسی میزان آلاینده‌های ناشی از صنایع معدنی و فراوری سرب و روی بر آب و خاک منطقه انگوران- دندی"، **علوم زمین**، سال بیست و یکم، شماره ۸۱، ص ۴۵-۵۴.
- گرانیان ح.، طباطبائی س. ح.، اسدی ه.، محمدی آ.، (۱۳۹۴)، "کاربرد روش آنالیز تمایز و ماشین بردار پشتیبان مرحله‌ای در مدل سازی کانی‌زایی کانسارهای طلای داشکسن"، **نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن**، دوره دهم، شماره ۲۸، ص ۵۳-۶۵.
- عبداللهی س.، دلاور م. ا.، شکاری پ.، (۱۳۹۱)، "تحلیل عددی پراکنش آلودگی خاک به برخی عناصر سنگین منطقه انگوران زنجان"، **نشریه آب و خاک**، جلد ۲۶، شماره ۵، ص ۱۱۴۰-۱۱۵۱.
- عبداللهی س.، دلاور م. ا.، شکاری پ.، (۱۳۹۱)، "پهنه‌بندی توزیع مکانی سرب، روی و کادمیم و ارزیابی آلودگی خاک‌های منطقه انگوران، استان زنجان"، **نشریه آب و خاک**، جلد ۲۶، شماره ۶، ص ۱۴۲۰-۱۴۱۰.

- قدیمی س.، (۱۳۹۵)، پایانامه کارشناسی ارشد، "بررسی غلظت عناصر بالقوه سمی در آئروسول‌های ناشی از فرآیند معدن-کاری در منطقه معدنی انگوران"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قدیمی س.، نباتیان ق.، (۱۳۹۳)، "بررسی زمین شیمیایی معدن روی-سرب انگوران و اثرات فعالیتهای معدنکاری بر آلودگی منطقه"، *مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته*، شماره ۱۳، ص ۶۶-۵۶.
- سازمان محیط‌زیست ایران، (۱۳۹۷)، "ضوابط و استانداردهای زیست‌محیطی در ایران"، معاونت محیط‌زیست، دفتر آب و خاک.
- مردادزاده ع.، زارع م.، دولتی ارده‌جانی ف.، (۱۳۹۱)، "تشخیص منطقه آلودگی حاصل از زهاب اسیدی با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های ژئوالکتریک در محدوده کارخانه زغال‌شویی البرزشرقی"، *مجله ژئوفیزیک ایران*، جلد ۶، شماره ۲، ص ۹۵-۱۱۱.
- مرنگی ح.، عظیم زاده ا. م.، نباتیان ق.، کوهستانی ح.، محمدی نیایی ر.، (۱۳۹۶)، "کاربرد کانی شناسی و ژئوشیمی عناصر فرعی و کمیاب در تعیین فازهای حامل عناصر استراتژیک در معدن روی و سرب انگوران جنوب غرب زنجان"، *مجله علمی-پژوهشی زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، شماره ۲۵، ص ۹۵-۱۱۳.
- ملکی س.، کلاگری ع. ا.، سیاه‌چشم ک.، علیرضائی س.، (۱۳۹۷)، "تفسیر و مقایسه داده‌های مغناطیسی و نتایج حفاری‌های انجام شده در کانسار اسکارن آهن خاک سرخ، غرب یزد"، *پژوهشهای دانش زمین*، سال نهم، شماره ۳۵، ص ۱۱۰-۱۲۳.
- هندی ر.، حسنی پاک ع. ا.، (۱۳۹۲)، "کاربرد روش آنالیز تمایز در تهیه کلید اکتشافی در ذخایر مس با میزبان رسوبی در بلوک طبی-راور"، *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن*، دوره هشتم، شماره ۲۰، ص ۴۷-۶۲.
- یوسفی س.، (۱۳۹۳)، رساله دکتری، "ارائه روش جدید برای گونه‌پذیری و پهنه‌بندی ریسک آلودگی عناصر سمی در محیط GIS مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

منابع انگلیسی

- Abbassi R., Khan F., Hawboldt K., (2009) "Prediction of minerals producing acid mine drainage using a computer-assisted thermodynamic chemical equilibrium model" *Mine Water Environ* 28:74-78.
- Abdelaal A. K. A., (2014), Ph.D. thesis, "Environmental modelling and spatial landscape analysis for the contamination risk assessment of sensitive areas", University of Szeged, Faculty of Science and Informatics, pp 104.

- Abraham G. M. S., Parker R. J., (2008) "Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand" *Environ Monit Assess* 136, 227- 238.
- Abrosimova N., Gaskova O., Loshkareva A., Edelev A., Bortnikova S., (2015) "Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit" *Journal of Geochemical Exploration*
- Akabzaa T. M., Armah T. E. K., Baneong-Yakubo B. K., (2007) "Prediction of acid mine drainage generation potential in selected mines in the Ashanti Metallogenic Belt using static geochemical methods" *Environ Geol* 52:957–964.
- Al-Tarazi E., Abu Rajab J., Al-Naqa A., El-Waheidi M., (2008) "Detecting leachate plumes and groundwater pollution at Ruseifa municipal landfill utilizing VLF-EM method" *Journal of Applied Geophysics* 65, 121-131.
- Adamu C. I., Nganje T. N., (2010) "Heavy Metal Contamination of Soil and Surface Water in the Arufu Lead-Zinc Mining District, Middle Benue trough, Nigeria" *Ghana Mining Journal*, Vol. 12, pp. 17 - 23.
- Assawincharoenkij T., Hauzenberger C., Ettinger K., Sutthirat C., (2018) "Mineralogical and geochemical characterization of waste rocks from a gold mine in northeastern Thailand: application for environmental impact protection " *Environ Sci Pollut Res*, Vol. 25(4), pp 3488–3500.
- Ayolabi E. A., Folorunso A. F and Kayode O. T., (2013) "Integrated Geophysical and Geochemical Methods for Environmental Assessment of Municipal Dumpsite System" *International Journal of Geosciences*, 4, 850-862.
- Ataepoor Z., (2017) "Angouran lead and zinc mine" 4th YES Congress, Tehran, Iran, pp 1-34.
- Baawain M.S., Al-Futaisi A.M., Ebrahimi A., Omidvarborna H., (2018) "Characterizing leachate contamination in a landfill site using TDEM (Time Domain Electromagnetic) imaging" *Journal of Applied Geophysics* Volume 151, 73-81.
- Babbou-Abdelmalek C., Sebei A., Chaabani F., (2011) "Incurred environmental risks and potential contamination sources in an abandoned mine site" *African Journal of Environmental Science and Technology* Vol. 5(11), pp. 894-915.
- Banerjee D., (2013) "Acid drainage potential from coal mine wastes: environmental assessment through static and kinetic tests" *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Volume 11, Issue 5, pp 1365–1378
- Bayatzadehfarad Z., Ghadimi F., Fattahi H., (2017) "Use of artificial intelligence techniques to predict distribution of heavy metals in groundwater of Lakan lead-zinc mine in Iran" *Journal of Mining and Environment*, Vol.8, No.1, 35-48.

- Borg G., (2005) "Geological and economical significance of supergene nonsulphide zinc deposits in Iran and their exploration potential" In: Geological Survey of Iran (ed) Mining and Sustainable Development. 20th World Mining Congress, Tehran, Iran, 385-390.
- Bouzahzah H., Benzaazoua M., Bussiere B., Plante B.,(2014) "Prediction of Acid Mine Drainage: Importance of Mineralogy and the Test Protocols for Static and Kinetic Tests" *Mine Water Environ*, 33:54–65.
- BRGM (2001) "Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union" Study made for DG Environment, European Commission, p79.
- Broughton L. M., Robertson A. (1991) "Modelling of leachate quality from acid generating waste rock dumps" Preprint for the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Montreal, Quebec, 18p.
- Cabala J., Zogala B., Dubiel R., (2008) "Geochemical and Geophysical Study of Historical Zn-Pb Ore Processing Waste Dump Areas (Southern Poland)" *Polish J. of Environ. Stud.* Vol. 17, No. 5, 693-700
- Cao Congcong., Wang L., Li H., Wei B., Yang L., (2018) "Temporal Variation and Ecological Risk Assessment of Metals in Soil Nearby a Pb–Zn Mine in Southern China" *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, 940, 1-13
- Cappuyns V., Alian V., Vassilieva E., Swennen R., (2013) "pH Dependent Leaching Behavior of Zn, Cd, Pb, Cu and As from Mining Wastes and Slags: Kinetics and Mineralogical Control" *Waste Biomass Valor*, Springer, Published online.
- Chambers J.C., Kuras O., Meldrum P.I., Ogilvy R.D., Hollands J., (2006) "Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site" *Geophysics* 71 (6), B231–B239.
- Chen Y., Jiang X., Wang Y., Zhuang D., (2017) "Spatial characteristics of heavy metal pollution and the potential ecological risk of a typical mining area: A case study in China" *Process Safety and Environment Protection*, 1-35pp.
- Chileshe M. N., Syampungani S., Festin E. S., Tigabu M., Daneshvar A., Oden P. C., (2019) "Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations, of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration" *J. For. Res.* P 1-11.
- Chopin E. I. B., Alloway B. J., (2007) "Distribution and mobility of trace elements in soils and vegetation around the mining and smelting areas of Tharsis, Riotinto and Huelva, Iberian Pyrite Belt, SW Spain" *Water, Air, and Soil Pollution*, 182, p.245–261.

- Cook N. j., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky Leonid., Saini Eidukat B., Melcher F., (2009) "Trace and minor elements in sphalerite: A LA ICPMS study" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol: 73, p 4761–4791.
- Craw D., Cavanagh J., Druzbecka J., Harding J.S., Kerr G., Pope J., Trumm D., (2015) "A Geoenvironmental Model for Orogenic Gold Deposits to Predict Potential Environmental Effects" *Mine Water Environ*, 34, 388–403.
- Daliran F., Pride K., Walther J., Berner Z.A., Bakker R.J., (2013) "The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide-zinc carbonates mineralization" *Ore Geology Reviews* 53; pp.373-402.
- Dent J., Rotting T., Williams M., (2016) "3D geological modelling for geo-environmental characterization of mineral deposits and pragmatic management of geochemical risks" *Proceedings IMWA, Mining Meets Water – Conflicts and Solutions*, 1246-1248
- Dold B., (2017) "Acid rock drainage prediction: A critical review" *Journal of Geochemical Exploration* 172, 120–132.
- Dudka S., Adriano D. C. (1997) "Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review" *Jenvironmental quality*, 26:590-602.
- Doulati Ardejani F., (2003), Ph.D. Thesis, "Hydrogeological Investigation of Backfilled Surface Coal Mine Sites", University of Wollongong, Australia, p435.
- EPA (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., pp 52.
- Epov M.I., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Karin Yu.G., Saeva O.P., (2017) "Analysis of mine waste by geochemical and geophysical methods (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore-processing plant)" *Russian Geology and Geophysics*, 58, 1543–1552
- Esmaeily S. S., Salari M. M., (2015) "Study of acid mine drainage production potential in flotation tailings of Sarcheshmeh porphyry copper mine" *Arab J Geosci*, DOI10.1007/s12517-014-1761-8
- Esshaimi M., Ouazzani N., Gharmali A., Berrekhis F., Valiente M., Mandi L., (2013) "Speciation of Heavy Metals in the Soil and the Tailings, in the Zinc-Lead Sidi Bou Othmane Abandoned Mine" *Journal of Environment and Earth Science*, Vol. 3, No.8, pp138-146.
- European Commission, (2009), "**Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities**", pp.557.
- Ferguson K. D., Morin K. A., (1991) "The prediction of acid rock drainage—lessons from the database" *Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acid Drainage*. Montreal, 3, pp. 85–106.

- Fisher R. A., (1936) "The Use of Multiple Measures in Taxonomic Problems" *Ann. Eugenics*, vol. 7, pp 179-188.
- GARD., (2019) "The Global Acid Rock Drainage", <http://www.gardguide.com> is the web address,
- Garcia-Lorenzo M. L., Crespo-Feo E., Esbri J. M., Higuera P., Grau P., Crespo I., Sanchez-Donoso R., (2019) "Assessment of Potentially Toxic Elements in Technosols by Tailings Derived from Pb–Zn–Ag Mining Activities at San Quintín (Ciudad Real, Spain): Some Insights into the Importance of Integral Studies to Evaluate Metal Contamination Pollution Hazards" *Minerals*, 9, 346, 1-19 pp.
- Gasmi T., Khouni I., Ghrabi A., (2016) "Assessment of heavy metals pollution using multivariate statistical analysis methods in Wadi El Bey (Tunisia)" *Desalination and Water Treatment*, pp 1-14
- Gilg A. H., Boni M., Balassone G., Allen C. R., Banks D., Moore F., (2006) "Marble hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb–Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex" *Miner Deposita*. 41: 1–16.
- Ghadimi S., Forghani G., Kazemi G. A., (2018) "Distribution, geochemistry, and mineralogy of aerosols in the Angouran Mine area, northwest Iran" *Environ Geochem Health*, Volume 40, Issue 5, pp 2087–2100
- Gutierrez M., Mickus K., Camacho L. M., (2016) "Abandoned Pb\Zn mining wastes and their mobility as proxy to toxicity: A review" *Science of the Total Environment* 565, 392–400
- Gnaneshwar P., Shivaji A., Srinivas Y., Jettaiah P., Sundararajan N., (2011) "Very-low-frequency electromagnetic (VLF-EM) measurements in the Schirmacheroasen area, East Antarctica" *Polar Science* 5, 11-19.
- Gordio A., Kagambega N., Bamba O., Sako A., Miningou MYW., (2014) "Prediction of acid mine drainage occurrence at the Inata gold mine-Burkina Faso, West Africa" *Acad. J. Environ. Sci.* 2(3): 043-051.
- Hakanson, L., (1980) "An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach" *Water Research*, 14, 8, 975-1001.
- Hammarstrom J. M., Seal R. R., Meier A. L., Kornfeld J. M., (2005) "Secondary sulfate mineral associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments" *Chem. Eol*, 215, 407-431.
- Harries J. R., (1990), "Acid Drainage from Waste Rock Dumps at Mine Site (Australia and Scandinavia)" *Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO)*, p 67.
- Hageman P.L., Seal R.R., Diehl S.F., Piatek N.M., Lowers H.A., (2015) "Evaluation of selected static methods used to estimate element mobility, acid-generating and

- acidneutralizing potentials associated with geologically diverse mining wastes" *Appl. Geochem.* 57, 125–139.
- Hiller E., Petrák M., Tóth R., Lalinská V. B., Jurkovič L., Kučerová G., Radková A., Šottník P., Vozár J., (2013) "Geochemical and mineralogical characterization of a neutral, low-sulfide/high-carbonate tailings impoundment, Markušovce, eastern Slovakia" *Environ Sci Pollut Res*, Nov, 20(11):7627-42
- Hosseini M., Kamranjam M., Brewer R, Rezazadeh M., Ghorbanli M., (2018) "Environmental risks posed by heavy metal contamination from mine waste: Case study from northwest Iran, Human and Ecological Risk Assessment" *An International Journal*, pp. 1-18.
- Jablonska-Czapla M., Nocon K., Szopa S., Lyko A., (2016) " Impact of the Pb and Zn ore mining industry on the pollution of the Biała Przemsza River, Poland " *Environ Monit Assess*, 188: 262, 1-16
- Jambor J.L., 2003., Mine-waste mineralogy and mineralogical perspectives of acid-base accounting in: Jambor, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.I.M. (Eds.), "**Environmental Aspects of Mine Wastes**" Mineralogical Association of Canada Short Course Series, v. 31, pp. 117-146.
- Jamieson H.E., Walker S.R., Parsons M.B., (2015) "Mineralogical Characterization of Mine Waste" *Applied Geochemistry*, 1-85.
- Jazi M.A. and Shahabpour J. (2011) "Mineralogical, textural, structural and geochemical aspects of Nakhlak lead mine, Isfahan" *Journal of Economic Geology*, 2(3): 131-151.
- Jodeiri Shokri B, Doulati Ardejani F., Moradzadeh A., (2016) "Mapping the flow pathways and contaminants transportation around a coal washing plant using the VLF-EM, Geo-electrical and IP techniques—A case study, NE Iran" *Environ Earth Sci* 75:62.
- Jorstad L.B., Jankowski J., Acworth R.I., (2004) "Analysis of the distribution of inorganic constituents in a landfill leachate-contaminated aquifer Astrolabe Park, Sydney, Australia" *Environmental Geology*, 46, 263–272.
- Kagambega A., Sawadogo S., Bamba O., Zombre p and Galvez R., (2014) "Acid mine drainage and heave metals contamination of surface water and soil in southwest Burkina Faso west Africa" *International Journal of Multidisciplinary Academic Research*, Vol. 2, No. 3, p 9-19.
- Karlsson T., Raisanen M.L., Lehtonen M., Alakangas L.,(2018) "Comparison of static and mineralogical ARD prediction methods in the Nordic environment" *Environ Monit Assess*, 190:719, 1-29.
- Karous M., and Hjelt S. E., (1989) "Linear filtering of VLF dip angle measurements" *Geophysic. Prosp.*, 39, 567-580.

- Keskin T., Toptaş E., (2012) "Heavy metal pollution in the surrounding ore deposits and mining activity: a case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey)" *Environ Earth Science* 67, 859-866.
- Khalil M. A., Santos F. M., (2013) "On the depth to anomaly estimation using Karous and Hjelt filter in VLF-EM data" *Arab J Geosci*, DOI 10.1007/s12517-013-1110-3
- Kovacs E., Tamas J., Fran ciskovic-Bilinski S., omanovic D, Bilinski H., Pizeta I., (2012), "geochemical study of surface water and sediment at the abandoned Pb-Zn mining site at Gyong yosoroszi" *hungary, Fre senius Environmental Bulletin*, 2012, 5a, 21.
- Korneeva T., Yurkevich N., Kucher D., Savea O., (2016) "A Geochemical And Geophysical Characterization Of Acid Mine Drainage And Sulfide Tailings At Karabash Mine Site (South Ural, Russia)" *International Journal of Advances in Science, Engineering and Technology*, ISSN: 2321 –9009
- Koscova M., Hellmer M., Anyona S., Gvozdkova T., (2018) "Geo-Environmental Problems of Open Pit Mining: Classification and Solutions" *E3S Web of Conferences* 41, 01034 , IIIrd International Innovative Mining Symposium,
- Lawrence R.W., Poling G.W., Marchant P.B., (1989) "Investigation of predictive techniques for acid mine drainage", MEND/NEDEM report 1.16.1a, Canadian Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, Canada
- Levitan D. M., (2014) "Statistical Analysis of the Environmental Geochemistry of an Unmined Uranium Ore Deposit" *Phd Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, pp 1-148.
- Lghoul M., Teixido T., Pena J. A., Hakkou R., Kchikach A., Guerin R., Jaffal M., Zouhri L., (2012) "Electrical and Seismic Tomography Used to Image the Structure of a Tailings Pond at the Abandoned Kettara Mine, Morocco" *Mine Water Environ* 31:53–61.
- Li P., Zhang J., Wang J., Li Z., (2015) "Heavy metal(loid) pollution in mine wastes of a Carlin-type gold mine in southwestern Guizhou, China and its environmental impacts" *Chin. J. Geochem*, 34(3), 311–319.
- Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B., (2013) "Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method" *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135-156.
- 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
- Lopes D.D., Silva S.M.C.P., Fernandes F., Teixeira R.S., Celligoi A., DallAntonia L.H., (2012) "Geophysical technique and groundwater monitoring to detect leachate

- contamination in the surrounding area of a landfill - Londrina (PR - Brazil)" *Journal of Environmental Management* 113, 481-487
- Lottermoser B. G., (2010), "Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts", 3rd edition, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, pp 410.
- Lu S., Teng, Y., Wang Y., Wu J., Wang J., (2015) "Research on the ecological risk of heavy metals in the soil around, a Pb-Zn mine in the Huize County, China" *Chin. J. Geochem.* 34(4):540-549.
- Maghfouri S., Hossenzadeh M. R., Rajabi A., Choulet F., (2018) "A review of major non sulfide zinc deposits in Iran" *Geoscience Frontiers*, pp.1-25.
- Mahalanobis P. C.,(1936) "On the Generalized Distance in Statistics" *Proceedings of the National Institute of Science of India*, Vol. 2, No. 1, 1936, pp. 49-55.
- Mamat Z., Yimit H., Ji R.Z.A., Eziz M., (2014) "Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi basin, northwest China" *Sci Total Environ*, 493, 1-14.
- Manna A., Maiti R., (2017) "Geochemical contamination in the mine affected soil of Raniganj Coalfield - A river basin scale assessment" *Geoscience Frontiers*, Volume 9, Issue 5, pp 1577-1590.
- Mansor, N., (2008), PhD thesis, "Investigation of lead and zinc dispersion from an abandoned mine site at Tyndrum", University of Glasgow, Scotland., 1-199
- Martin-Crespo T., Martin-Velazquez S., Gomez O. D., Jose S. I. D. C., Lillo R. J., (2011) "A Geochemical and Geophysical Characterization of Sulfide Mine Ponds at the Iberian Pyrite Belt (Spain)" *Water Air Soil Pollut* 217:387-405.
- Martin-Crespo T., Gomez O. D., Martin-Velazquez S., Martinez P. P., Ignacio C. D., Lillo J., Faz A., (2018) "Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain)" *Engineering Geology*, 232, 135-146.
- Marescotti P., Carbone C., Capitani L. D., Grieco G., Lucchetti G., (2008) "Mineralogical and geochemical characterisation of open-air tailing and waste-rock dumps from the Libiola Fe-Cu sulphide mine (Eastern Liguria, Italy)" *Environ Geol*, Volume 53, Issue 8, pp 1613-1626.
- Marescotti P., Azzali E., Servida D., Carbone C., Grieco G., Capitani L. D., Lucchetti G., (2010) "Mineralogical and geochemical spatial analyses of a waste-rock dump at the Libiola Fe-Cu sulphide mine (Eastern Liguria, Italy)" *Environ Earth Sci*, 61:187-199.
- Mele M., Servida D., Lupis D., (2013) "Characterisation of sulphide-bearing waste-rock dumps using electrical resistivity imaging: the case study of the Rio Marina mining district (Elba Island, Italy)" *Environ Monit Assess*, 185:5891-5907.

- MEND, (1991), "MEND project 1.16.1b. **Acid rock drainage prediction manual**" By Price, W.A. CANMET, Natural resources Canada, 1-77.
- Mireles F., Davila JI., Pinedo JL., Reyes E., Speakman RJ., Glascock MD., (2012) "Assessing urban soil pollution in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Mexico by instrumental neutron activation analysis" *Microchem J* 103:158–164
- Miler M., Gosar M., (2012) "Characteristics and potential environmental influences of mine waste in the area of the closed Mezica Pb-Zn mine (Slovenia)" *J. Geochem. Explor.* 112, 152-160.
- Modabberi. S., (2018) "Mineralogical and geochemical characterization of mining wastes: remining potential and environmental implications, Muteh Gold Deposit, Iran" *Environ Monit Assess*, 190:734.
- Mohammadi Z, Modabberi S, Jafari M. R, Ajayebi K. S., (2015) "Comparison of different static methods for assessment of AMD generation potential in mining waste dumps in the Muteh Gold Mines, Iran" *Environ Monit Assess*, 187:374, 1-14.
- Moradzadeh A., Amirkhani F., Doulati F., Arab-Amiri, A.R., (2011) "Investigation of contaminated plumes caused by pyrite oxidation from a coal refuse pile at the Alborz Sharghi coal washing plant using VLF geophysical method" *IMWA, Aachen, Germany*, 417-422
- Mugosa B., Durovic D., Nedovic-Vukovic M., Barjaktarovic S., Vrvic M., (2016) "Assessment of Ecological Risk of Heavy Metal Contamination in Coastal Municipalities of Montenegro" *Int. J. Environ. Res; Public Health*; 13; 393.
- Nikolaidis Ch., Zafiriadis I., Mathioudakis V. Constantinidis Th., (2010) "Heavy metal pollution Associated with an abandoned Lead-Zinc mine in the Kirki Region, NE Greece" *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 85, 3, 307-312.
- Naicher E. C. A. T. S. M., (2003) "Acid mine drainage arising from gold mining activity in Johannesburg, South Africa and environs" *Environmental Pollution*, 122(1), 29-40.
- Olenchenko V. V., D. O. Kucher S. B. Bortnikova O. L. Gas'kova A. V. Edelev M. P. Gora. (2016) "Vertical and Lateral Spreading of Highly Mineralized Acid Drainage Solutions (Ur Dump, Salair): Electrical Resistivity Tomography and Hydrogeochemical Data" *Russian Geology and Geophysics* 57 (4): 617-628.
- Paktunc A.D., (1999) "Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage" *Environmental Geology* 39. Springer-Verlag, pp 103–112
- Paulinus, N., (2016) "Surface Water Contamination by Heavy Metals from Enyigba Pb-Zn Mine District, Southeastern Nigeria Using Metal Enrichment and Pollution Indices" *International Journal of Science and Technology* Volume 5 No. 1, 8-18

- Parbhakar-Fox A., Lottermoser B., (2015) "A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices" *Minerals Engineering*, Volume 82, Pages 107-124
- Perez I., Romero F., Zamora O., Gutiérrez ruiz M., (2014) "Magnetic susceptibility and electrical conductivity as a proxy for evaluating soil contaminated with arsenic, cadmium and lead in a metallurgical area in the San Luis Potosi State, Mexico" *Environ Earth Sci*, 72, 1521-1531.
- Plante B., Benzaazoua M., Bussière B., (2010) "Predicting Geochemical Behaviour of Waste Rock with Low Acid Generating Potential Using Laboratory Kinetic Tests" *Mine Water Environ*, 1-20. DOI 10.1007/s10230-010-0127-z
- Plante B., Bussière B., Benzaazoua M., (2012) "Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials" *Journal of Geochemical Exploration* 114, 57–69.
- Plumlee G.S., Nash J.T., (1995) "Geoenvironmental models of mineral deposits – fundamentals and applications" U.S. Geological Survey Open-File Report 95-831, p. 1-9.
- Plumlee G.S., (1999), *The Environmental Geology of Mineral Deposits*. In: G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (Eds.), "The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits", Part A: Processes, Techniques and Health Issues, *Reviews in Economic Geology* Vol. 6A, Society of Economic Geologists, Inc., 71-116.
- Plumlee G.S., Smith K.S., Montour M.R., Ficklin W.H., E.L. Mosier, (1999), *Geologic Controls on the Composition of Natural Waters and Mine Waters Draining Diverse Mineral-Deposit Types*. In: L.H. Filipek and G.S. Plumlee (Eds.), "The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits", Part B: Case Studies and Research Topics, *Reviews in Economic Geology* Vol. 6B, Society of Economic Geologists, Inc., 373-432.
- Pierwoła P., (2015) "Using Geoelectrical Imaging to Recognize Zn-Pb Post-Mining Waste Deposits" *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 24, No. 5, 2127-2137
- Pirttijarvi M., (2004), "Karous-Hjelt and Fraser filtering of VLF measurements", *Manual of the KHFFILT Program*.
- Placencia-Gomez E., Parviainen A., Hokkanen T., Loukola R. K., (2010) "Integrated geophysical and geochemical study on AMD generation at the Haveri Au–Cu mine tailings, SW Finland" *Environ Earth Sci* (2010) 61:1435–1447.
- Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M., (2018) "Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada" *Journal of Applied Geophysics*, Volume 150, 40-51.

- 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
- Qishlaqi A., Moore F., Forghani G., (2009) "Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis" *J. Hazard. Mater.* 172, (2009) 374–384.
- Qishlaqi A., Moore F., Forghani G., (2010) "Assessing the Spatial Variability of Total and Available Cadmium in Soils of the Angouran Area, NW Iran, Soil and Sediment Contamination" *An International Journal*, 19:6, 707-724.
- Rachwal M., Wawer M., Magiera T., Steinnes E., (2017) "Integration of soil magnetometry and geochemistry for assessment of human health risk from metallurgical slag dumps" *Environ Sci Pollut Res*, 24:26410-26423.
- Rajabi A., Rastad E., Alfonso P., Canet C., (2012) "Geology, ore facies and sulfur isotopes of the Koushk vent-proximal sedimentary-exhalative deposit, Posht-eBadam block, Central Iran" *International Geology Review* 54, 1635-1648.
- Raji W. O., Adeoye T. O., (2017) "Geophysical mapping of contaminant leachate around a reclaimed open dumpsite" *Journal of King Saud University – Science*, 29, 348–359.
- Reichert J, Borg G., (2008) "Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted non-sulphide zinc deposits" *Ore Geol. Rev.*, 33, 134-151.
- Robinson E.S., Coruh C., (1988), "**Basic Exploration Geophysics**" Wiley, New York, p. 562.
- Robotti E., Manfredi M., Marengo E., (2014) "Biomarkers Discovery through Multivariate Statistical Methods: A Review of Recently Developed Methods and Applications in Proteomics" *J Proteomics Bioinform* S3: 003.
- Rodriguez L., Ruiz E., Alonso-Azcarate J., Rincon J., (2009) "Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain" *Journal of Environmental Management* 90, 1106–1116.
- Romero A., Gonzalez I. and Gala E. (2006) "Estimation of potential pollution of waste mining dumps at pen a del Hierro (Pyrit Belt, SW Spain) as a base for future mitigation action" *Appl. Geochem.*, 21, 1093-1108.
- Rucker D. F., Glaser D. R., Osborne T., Maehi W. C., (2009) "Electrical Resistivity Characterization of a Reclaimed Gold Mine to Delineate Acid Rock Drainage Pathways" *Mine Water Environ*, 28,146–157.
- Rucker D.F., Loke M.H., Levitt M.T., Noonan G.E., (2010) "Electrical resistivity characterization of an industrial site using long electrodes" *Geophysics* 75, No.4, WA95–WA104.

- Rucker D.F., Schindler A., Levitt M.T., Glaser D.R., (2009) "Three-dimensional electrical resistivity imaging of a gold heap" *Hydrometallurgy*, 98, 267–275
- Shu W. S., Ye Z. H., Lan C. Y., Zhang Z. Q., (2001) "Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility" *Environment International* 26, pp 389-394.
- Sidhardhan S., Adishkumar S., Jayganesh D.,(2015) "A Geophysical Investigation of Resistivity and Groundwater Quality near a Corporate Solid Waste Dump" *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 24, No. 6, 2761-2766.
- 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, pp.173-186.
- Sharafi, A., Doulati, F., Rezaei, B., Sargheini, J., (2018) "Environmental geochemistry of near-neutral waters and mineralogy of zinc and lead at the Angouran non-sulphide zinc mine, NW Iran" *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 186, pp 77-93.
- Smuda J., Dold B., Friese K., Morgenstern P., Glaesser W., (2007) "Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excelsior waste rock dump from the polymetallic Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) deposit, Cerro de Pasco, Peru" *Journal of Geochemical Exploration* 92, 97–110.
- Soupios P., Kokinou E., (2016), *Environmental geophysics: Techniques, advantages and limitations*, In book: "**Geophysics: Principles, Applications and Emerging Technologies**", Publisher: Nova Publisher - USA, Editors: Gemma Aiello, pp.13-47
- Sobek A.A., Schuller W.A., Freeman J.R., Smith R.M., (1978) "Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoil", EPA report no. EPA-600/2-78-054, US Govt Printing Office, Washington, pp. 47–50.
- Song Y.C., Liu Y.C., Hou Z.Q., Fard M., Zhang H.R., Zhuang L.L., (2019) "Sediment-hosted Pb–Zn deposits in the Tethyan domain from China to Iran: Characteristics, tectonic setting, and ore controls" *Gondwana Research*, 75, 249–281.
- Souissi R., Souissi F., Chakroun H. K., Bouchardon J. L., (2012) "Mineralogical and Geochemical Characterization of Mine Tailings and Pb, Zn, and Cd Mobility in a Carbonate Setting (Northern Tunisia)" *Mine Water Environ*, Vol. 32(1), pp 16–27.
- Sundararajan N., Pracejus B., Al-khribash S., Al-Hosni T. K., Ebrahimi A., Al-Mashani M., Al-Lazki A., (2018) "Geophysical and geochemical investigation for structures favorable to uranium mineralization in Dhofar region, Sultanate of Oman" *Arabian Journal of Geosciences*, 11:700.
- Sundararajan N., Babu V. R., Prasad N. S., Srinivas Y., (2006) "VLFPROS—A Matlab code for processing of VLF-EM data" *Computers & Geosciences* 32, 1806–1813.

- Talil H., Souissi R., Souissi F., Lattanzi P., Podda F., Concas S., Arda C., Cidu R., (2016) "Environmental mineralogy and geochemistry of Pb–Zn mine wastes, Northern Tunisia" *Rend. Fis. Acc. Lincei*, Springer, 1-8
- Uchegbulam O. and Ayolabi E.A., (2014) "Application of Electrical Resistivity Imaging in Investigating Groundwater Pollution in Sapele Area, Nigeria" *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 1369-1379.
- Ustra A.T., Elis V.R., (2018), Resistivity and Induced Polarization Application for Urban Waste Disposal Site Studies, In book: Kanli, A.I., "**Applied Geophysics with Case Studies on Environmental, Exploration and Engineering Geophysics**" IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.81225, 1-19
- Vu C.T., Shern C.C., Yeh G., Le V.G., Tran H.T., (2017) "Contamination, ecological risk and source apportionment of heavy metals in sediments and water of a contaminated river in Taiwan" *Ecological Indicators* 82, 32–42
- Weissmannova, H.D., Mihocova, S., chovance, P., Pavlovsky, J., (2019) "Potential Ecological Risk and Human Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Industrial Affected Soils by Coal Mining and Metallurgy in Ostrava, Czech Republic" *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 4495, 1-19
- Yaylal A. G., (2011) "Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey". *Microchem J* 99(1):82–92
- Yang Y.G. Jin Z. Bi, X. Li F. Sun L. Liu, J. Fu, Z., (2009) "Atmospheric deposition-carried Pb, Zn, and Cd from a Zinc smelter and their effect on soil microorganisms" *Pedosphere*. V.19. P. 422-433
- Yurkevich N., Abrosimova N., Bortnikova S., Karin Y., Petrovna O., (2017) "Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area" *Toxicological & Environmental Chemistry*, 99:9-10, pp 1328-1345.
- Zhang X., Yang L., Li Y., Li H., Wang W., Ye B., (2012) "Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China" *Environ Monit Assess* 184:2261–2273.
- Zhuanga L. , Songb Y., Liub Y., Fardd M., Houb Z., (2019) "Major and trace elements and sulfur isotopes in two stages of sphalerite from the world-class Angouran Zn–Pb deposit, Iran: Implications for mineralization conditions and type" *Ore Geology Reviews*, 109, 184–200

Abstract

Environmental problems caused by mine wastes have always been one of the most important issues in most developing countries. Perhaps the worst environmental problem associated with mine waste is the formation of acid to alkaline mine drainages and the transfer of toxic metals into water and soil. Most studies in this regard have investigated the pollution caused by sulfide mine wastes, and the distribution and intensity of contamination have been examined in the surrounding areas, i.e. in surrounding soil and water. In these studies, the main sources of contaminations such as sulfide-carbonate waste dumps have received less attention. Thus, the first step in reducing the risk and proper management of these wastes is to have a proper understanding and knowledge of their environmental behavior. The purpose of this study is to evaluate the pollutant potential of the wastes of lead and zinc sulfide compounds with carbonate host in Anguran mine. The combination of geochemical, laboratory, mineralogical, and geophysical studies in this study allows us to obtain a comprehensive description of the geo-environmental properties of the waste dumps. For this purpose, 52 samples have been taken from 0-50 cm depths of different surficial parts of the waste dump, and then, have been analyzed by using the ICP-MS method to determine the concentration of elements and heavy metals in the samples. Geochemical results from the modified degree of the contamination index (mC_d) and ecological risk assessment indices (RI) indicate that these mine wastes contain significant amounts of toxic metals such as arsenic, cobalt, chromium, nickel, lead and zinc that the average of each of these elements exceeds the permissible level in the environment. The pattern obtained from the contamination risk zonation shows that the northeast and southwest parts of study area have very high contamination risk, and in this regard, As and Cd elements have the highest contribution in this contamination. In this research, discriminant analysis has been used for prediction and classification of the risk of the toxic elements contamination in the waste dumps. The results show that As, Pb and Zn elements are the most important factors that the waste dumps can be classified according to the contamination level. This method can be a useful, fast, and cost-effective tool for monitoring and recovery plans in the future. The results of the modified acid-base static test show that waste dumps have a high neutralization potential. In this research, the mineralogical approach has been presented to predict the pollution potential and to determine the source of neutralization. The results

of this approach have compared with the results of the static test. The comparative results show that calcite is the main source of neutralization, and the mineralogical approach has rendered good results in evaluating the neutralization potential of contamination. This approach is faster and simpler than the static test. Mineralogical and XRD studies have identified calcite as a major factor in the acid neutralization, and also, the SEM analysis results have indicated pyrite as the main source of acid mine drainage in the waste dumps. The EPMA results of the sulfide minerals have shown that sphalerite is the most important carrier of some toxic metals. The geophysical results obtained from applying VLF, magnetometric and geoelectrical methods on waste dumps have shown that, due to the oxidation of the wastes, the generated alkaline mine drainage can contain dissolved metals and major ions that increase the magnetic property and decrease the electrical resistivity in the geophysical results. The results of the analysis and speciation of the water samples taken from the study area have confirmed this matter, and also shown the most important factors affecting the electrical conductivity (EC) of the produced water from the Anguran mine waste dump are the increase of metal ions concentration, anionic metal complexes SO_4^{2-} and Na^+ and TDS that could be a significant reason for the increased conductivity of the geophysical results. Although the researchers' findings indicate that the conductivity is related to acid mine drainage, it has been concluded in this study that alkaline mine drainage can also be identified as conductive zones in the geophysical results.

Keywords: mine waste dumps, Pollution potential, Acid and Alkaline mine drainage, Heavy metals, Discriminant analysis, Modified acid-base static test, geophysical `



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D Thesis in Mineral Exploration

**Assessment of pollution potential of sulfide – carbonate lead
and waste dump and its source determination**

Mehdi Zare

Supervisors:

Prof. Dr. Ali Moradzadeh

Dr. Abolghasem Kamkar-Rouhani

Advisor:

Prof. Dr. Faramars Doulati Ardejani

February 2020