

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین

پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شیمی

:

## ارزیابی ژئوشیمیایی آلودگی خاک اطراف معدن سرب و روی دونا

نگارنده: بهار ولی نژاد

استاد راهنما:

دکتر افشین قشلاقی

تیر ۱۳۹۸

شماره: ۹۹۰۶۱۵۲  
تاریخ: ۹۹/۶/۲۵

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم بهار ولی نژاد با شماره دانشجویی ۹۵۱۵۷۹۴ رشته زمین شناسی گرایش ژئوشیمی تحت عنوان ارزیابی ژئوشیمیایی آلودگی خاک اطراف معدن سرب و روی دونا که در تاریخ ۱۳۹۸/۴/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ...):  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر افشین قشلاقی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر گیتی فرقانی	استاد	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر غلامحسین کرمی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مسعود علیپور اصل	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر پرویز امیدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۹/۶/۲۵

تقدیم به آفریدگاری که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم رسیده و از بیچ محبتی دریغ نکرد و در تمام مراحل

زندگیم مراقبت قلب بود.

تقدیم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم به مهربانترین نگاه زندگیم، چشمان مهربان مادرم

که هرچه آموختم در کتب عشق شما آموختم و هرچه بگوختم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را پاس توانم بگویم

تقدیم به برادر عزیزم آرش

که باهم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم. قلم لبریز از عشق توست.

تقدیم به استاد عزیزم دکتر محمد رضا نرنخور

که اگر دلگرمی باو کجک های ایشان نبودیم سمودن این مسیر سخت و دشوار برایم رویایی میش بود.

## تقدیر و تشکر:

حمد و سپاس پروردگار مهربانی را که مرا به تحصیل پرتویی از دانش زمین و درج آن موفق گردانید و ستایش خالق که آموخته به انسان آموختن را و به او قدرت تعقل عطا نمود تا او نیز صانعی نیکو آفرین باشد. پژوهش حاضر، حاصل تلاشی است که با راهنمایی‌ها، بهکاری‌ها و الطاف خانواده و اساتید بزرگوار به پایان رسیده که بی‌تردید بدون مساعدت‌های ایشان انجام این مهم میسر نبوده. بدین محاظ بر خود لازم می‌دانم مراتب سپاس و تشکر خود را از ایشان ابراز دارم.

- خانواده عزیزم که در تمامی دوران تحصیل مرا یاری نموده و با صبر و سنگینی مرا به این درجه از علم و دانش رسانند صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.
- با تقدیر و تشکر شایسته از استاد راهنمای فریخته‌ام، جناب آقای دکتر افشین قشلاقی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه‌گشای بنده در اتمام و اكمال پایان نامه بوده است.

## تقدیر و تشکر فراوان از:

- جناب آقای دکتر محمد رضایز خوربه خاطر حمایت‌ها و محبت‌های بی‌دین‌شان. امیدوارم بتوانم در آینده‌ای نزدیک جوایب کوی محبت‌هایشان باشم.
- جناب آقای دکتر فریدین موسوند، استاد با کمال و شایسته به پاس یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشم داشت که بسیاری از سختی‌ها را بر ابرایم آسانتر نمودند.
- جناب آقای دکتر کامران نصیر احمدی رئیس بخش پژوهش اداره محیط زیست مازندران که همواره مرا مورد لطف خویش قرار دادند.
- جناب آقای مهندس عباس عبدی کارمند نمونه سازمان صنعت و معدن مازندران که در این راه از بیچ‌لکی دریغ نکردند.
- جناب آقای قرایی راننده محترم دانشگاه به جهت همراهی در انجام مطالعات و بازدید صحرایی که سختی‌های بسیاری را در بازدید صحرایی به جان خریدند صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.

- مسئول محترم کارگاه تهیه مقطع جناب آقای محمدیان که زحمت تهیه مقطع میکرو و سکوپ را متقبل شدند.
- دختر عمه‌ی عزیزم سرکار خانم مینا ولی‌نژاد که در امر ترجمه‌ی مقالات مرا یاری نمودند.

## تعهد نامه

اینجانب بهار ولی نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوشیمی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی ژئومیمیایی آلودگی خاک اطراف معدن سرب و روی دونا به راهنمایی جناب آقای دکتر افشین قشلاقی متعهد می‌شوم؛

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (با بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 افزارها 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

معدنکاری و فعالیت‌های وابسته به آن از مهم‌ترین منابع ورود فلزات به محیط خاک هستند. مطالعه حاضر با هدف بررسی غلظت و آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معدن سرب دونا و سد باطله آن صورت گرفته است. به این منظور تعداد ۱۲ نمونه خاک از اطراف معدن و سدهای باطله اطراف معدن برداشت شد و پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک و به همراه غلظت فلزات سنگین (سرب، روی، کادمیم، کروم، نیکل و مس) با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری گردید. همچنین بر روی برخی از نمونه‌های خاک آنالیز استخراج ترتیبی چهار مرحله‌ای صورت گرفت. نتایج نشان داد که میانگین مقادیر pH و ماده آلی به ترتیب ۷/۶۰ و ۲/۱۱ است که توزیع غیریکنواختی را در خاک‌های منطقه نشان می‌دهند. بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی غلظت بیشتر فلزات بویژه سرب (میانگین ۸۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، روی (میانگین ۱۲۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کادمیم (۹ میانگین میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های مجاور پیت اصلی معدن و همچنین سد باطله معدن افزایش بسیار شدیدی را نسبت به خاک‌های جهانی و نمونه خاک شاهد نشان می‌دهند. این مسئله با محاسبه ضرایب زمین‌انباشت و فاکتور آلودگی مورد تأیید قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج آنالیز استخراج ترتیبی بیش از ۵۰ درصد غلظت کل دو فلز سرب و روی در فاز دوم و بیش از ۶۰ درصد دو فلز نیکل، کروم و مس با فاز باقی‌مانده (فاز چهارم) همراه است. بر این اساس دو فلز روی و تا حدی مس بیشترین ضریب تحرک‌پذیری را در بین فلزات دارا هستند. ضرایب همبستگی محاسبه شده بیانگر همبستگی مثبت بین فلزات و همین‌طور بین فلزات و برخی پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک مانند درصد ماده آلی است که مبین منشأ مشترک (فعالیت‌های معدنکاری) و تأثیر پارامترهای خاک بر تغییرپذیری این فلزات در خاک‌های منطقه است.

**واژه‌های کلیدی:** معدن سرب و روی دونا، فلزات سنگین، سد باطله فرآوری، آلودگی خاک

## فهرست مطالب

### فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه ..... ۳
- ۱-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه ..... ۳
- ۲-۲-۱- جغرافیای طبیعی و وضعیت آب‌وهوایی منطقه ..... ۳
- ۳-۲-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ..... ۵
- ۴-۲-۱- چینه‌شناسی ..... ۶
- ۱-۴-۲-۱- سازند سلطانیه ..... ۶
- ۲-۴-۲-۱- سازند دورود ..... ۷
- ۳-۴-۲-۱- سازند روته ..... ۷
- ۴-۴-۲-۱- سازند نسن ..... ۸
- ۵-۴-۲-۱- سازندالیکا ..... ۸
- ۶-۴-۲-۱- سازند شمشک ..... ۹
- ۷-۴-۲-۱- سازند دلیچای ..... ۹
- ۸-۴-۲-۱- عضو سوم و پنجم سازند چالوس ..... ۹
- ۹-۴-۲-۱- سازند فجن ..... ۱۰
- ۱۰-۴-۲-۱- سازند زیارت ..... ۱۰
- ۵-۲-۱- تکتونیک منطقه مورد مطالعه ..... ۱۰
- ۶-۲-۱- کانی‌شناسی معدن سرب و روی دونا ..... ۱۱
- ۷-۲-۱- ژنز کانسار سرب دونا ..... ۱۵
- ۳-۱- اهداف پژوهش ..... ۱۵
- ۴-۱- ضرورت انجام تحقیق ..... ۱۶
- ۵-۱- روش انجام تحقیق ..... ۱۶
- ۶-۱- ساختار پایان نامه ..... ۱۷



## فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

- ۲-۱-۱- مقدمه ..... ۲۰
- ۲-۲- تعریف خاک و آلودگی آن ..... ۲۰
- ۲-۳- عوامل تشکیل خاک و افق‌های اصلی آن ..... ۲۱
- ۲-۴- فلزات سنگین و اهمیت آن‌ها ..... ۲۲
- ۲-۵- شکل‌های کلی فلزات در خاک ..... ۲۲
- ۲-۵-۱- یون‌های آزاد و انحلال‌پذیر ..... ۲۳
- ۲-۵-۲- یون‌های قابل جذب و تبادل‌پذیر ..... ۲۳
- ۲-۵-۳- کمپلکس با مواد آلی ..... ۲۳
- ۲-۵-۴- رسوب با کربنات‌ها ..... ۲۴
- ۲-۵-۵- رسوب با اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز ..... ۲۴
- ۲-۵-۶- تثبیت در شبکه کانی‌ها ..... ۲۴
- ۲-۶- تأثیر ویژگی‌های خاک بر جذب یا تحرک عناصر ..... ۲۵
- ۲-۶-۱- PH خاک ..... ۲۵
- ۲-۶-۲- ماده آلی ..... ۲۵
- ۲-۶-۳- بافت خاک ..... ۲۶
- ۲-۷- منابع فلزات سنگین در خاک‌ها ..... ۲۶
- ۲-۷-۱- منابع طبیعی یا زمین‌زاد ..... ۲۶
- ۲-۷-۲- منابع غیرطبیعی یا انسان‌زاد ..... ۲۶
- ۲-۸- اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی ..... ۲۸
- ۲-۸-۱- اثرات زیست‌محیطی باطله‌های حاصل از معدنکاری ..... ۲۸
- ۲-۹- مروری بر مطالعات پیشین در جهان ..... ۳۰
- ۲-۱۰- مروری بر مطالعات پیشین در جهان ..... ۳۲

## فصل سوم: مواد و روش‌ها

- ۳-۱- مقدمه ..... ۳۶
- ۳-۲- نمونه‌برداری از خاک ..... ۳۶

۳۸	۳-۳- آماده سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه
۳۸	۳-۴- اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک
۳۹	۳-۴-۱- اندازه‌گیری PH نمونه‌های خاک
۴۰	۳-۴-۲- اندازه‌گیری مقدار ماده آلی نمونه‌های خاک
۴۲	۳-۵- آنالیز XRD نمونه‌های خاک
۴۲	۳-۶- تجزیه فلزات سنگین در نمونه‌های خاک
۴۲	۳-۷- آنالیز نمونه‌های سنگ
۴۲	۳-۸- استخراج ترتیبی فلزات در نمونه‌های خاک
۴۳	۳-۹- ضریب تحرک پذیری فلزات
۴۳	۳-۱۰- ارزیابی آلودگی فلزی در نمونه‌های خاک
۴۳	۳-۱۰-۱- ضریب زمین‌انباشت
۴۴	۳-۱۰-۲- ضریب غنی‌شدگی
۴۵	۳-۱۱- تحلیل آماری داده‌ها
۴۶	۳-۱۱-۱- ضریب همبستگی
۴۶	۳-۱۲- نرم‌افزارهای به کار رفته جهت تحلیل داده‌ها

### فصل چهارم: تحلیل داده‌ها

۴۸	۴-۱- مقدمه
۴۸	۴-۲- بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک
۴۸	۴-۲-۱- pH نمونه‌های خاک
۵۰	۴-۲-۲- میزان ماده آلی نمونه‌های خاک
۵۲	۴-۳- کانی‌شناسی نمونه‌های خاک
۵۵	۴-۴- غلظت کل و ژئوشیمی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک سطحی
۵۵	۴-۴-۱- توزیع فلزات در نمونه‌های خاک سطحی
۵۶	۴-۴-۱-۱- سرب
۵۸	۴-۴-۱-۲- روی
۶۰	۴-۴-۱-۳- مس
۶۲	۴-۴-۱-۴- کادمیم

- ۶۴..... ۵-۱-۴-۴ نیکل
- ۶۶..... ۶-۱-۴-۴ کروم
- ۶۷..... ۵-۴- گونه‌سازی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مورد مطالعه
- ۶۸..... ۱-۵-۴ مس
- ۶۹..... ۲-۵-۴ نیکل
- ۶۹..... ۳-۵-۴ روی
- ۷۰..... ۴-۵-۴ کروم
- ۷۱..... ۵-۵-۴ سرب
- ۷۲..... ۶-۴- ضریب تحرک پذیری فلزات در نمونه‌های خاک
- ۷۳..... ۷-۴- رابطه آماری بین فلزات با یکدیگر و با پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک
- ۷۴..... ۸-۴- ارزیابی کمی شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین
- ۷۵..... ۱-۸-۴ ضریب غنی‌شدگی
- ۷۵..... ۲-۸-۴ ضریب زمین‌انباشت

#### فصل پنجم: نتیجه‌گیری

- ۷۸..... ۱-۵- نتایج
- ۸۰..... پیشنهادها
- ۸۱..... منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- نقشه‌ی راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه ..... ۴
- شکل ۱-۲- نمایشی از معدن سرب و روی دونا ..... ۵
- شکل ۱-۳- نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ..... ۶
- شکل ۱-۴- کانه‌زایی شکاف پرکن و رگه‌ای ..... ۱۲
- شکل ۱-۵- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی اسفالریت و گالن ..... ۱۲
- شکل ۱-۶- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی مالاکیت و آزوریت ..... ۱۳
- شکل ۱-۷- باریت به همراه گالن در یک نمونه دستی ..... ۱۳
- شکل ۱-۸- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی پیریت و گوتیت ..... ۱۴
- شکل ۱-۹- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی کالکوپیریت ..... ۱۴
- شکل ۲-۱- نقش بیوسفر، اتمسفر، هیدروسفر و لیتوسفر در تشکیل خاک ..... ۲۰
- شکل ۲-۲- افق‌های خاک در نیمرخ فرضی خاک ..... ۲۲
- شکل ۱-۳- الف- موقعیت نقاط نمونه‌برداری از خاک معدن سرب دونا ..... ۳۷
- شکل ۱-۳- ب- نمایشی از روش نمونه‌برداری از خاک اطراف سد باطله ..... ۳۷
- شکل ۲-۳- اندازه‌گیری pH نمونه‌های خاک در آزمایشگاه ..... ۳۹
- شکل ۳-۳- اندازه‌گیری مقدار ماده آلی نمونه‌ها در آزمایشگاه ..... ۴۱
- شکل ۱-۴- الف- تغییرات pH نمونه‌های خاک اطراف معدن سرب دونا ..... ۴۹
- شکل ۱-۴- ب- روند تغییرات pH نمونه‌های خاک مورد مطالعه ..... ۵۰
- شکل ۲-۴- الف- تغییرات ماده آلی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه ..... ۵۱
- شکل ۲-۴- ب- روند تغییرات ماده آلی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه ..... ۵۲
- شکل ۳-۴- الف- پراش‌نگار XRD نمونه اطراف باطله معدن ..... ۵۳
- شکل ۳-۴- ب- پراش‌نگار XRD نمونه خاک بالغ در اطراف معدن ..... ۵۴
- شکل ۳-۴- ج- پراش‌نگار XRD نمونه‌های خاک اطراف معدن ..... ۵۴
- شکل ۳-۴- د- پراش‌نگار XRD نمونه‌های خاک اطراف معدن ..... ۵۵
- شکل ۴-۴- الف- تغییرات غلظت سرب در خاک اطراف معدن ..... ۵۷
- شکل ۴-۴- ب- پراکندگی فلز سرب در خاک منطقه دونا ..... ۵۸
- شکل ۴-۵- الف- تغییرات غلظت روی در خاک اطراف معدن ..... ۵۹
- شکل ۴-۵- ب- پراکندگی فلز روی در خاک معدن ..... ۵۹
- شکل ۴-۶- الف- تغییرات غلظت مس در خاک معدن دونا ..... ۶۱
- شکل ۴-۶- ب- پراکندگی فلز مس در خاک معدن ..... ۶۱
- شکل ۴-۷- الف- تغییرات غلظت فلز کادمیم در خاک معدن دونا ..... ۶۳

- شکل ۴-۷-ب-پراکندگی فلز کادمیم در خاک معدن ..... ۶۳
- شکل ۴-۸-الف-تغییرات غلظت فلز نیکل در خاک معدن دونا ..... ۶۵
- شکل ۴-۸-ب-پراکندگی فلز نیکل در خاک معدن ..... ۶۵
- شکل ۴-۹-الف-تغییرات غلظت فلز کروم در خاک معدن دونا ..... ۶۷
- شکل ۴-۹-ب-پراکندگی فلز کروم در خاک معدن ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۰-درصد مس استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی خاک ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱-درصد نیکل استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی خاک ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۲-درصد روی استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۳-درصد کروم استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۴-درصد سرب استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵-میانگین ضرایب غنی شدگی فلزات مورد مطالعه ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۶-نمودار جعبه‌ای ضرایب زمین‌انباشت برای فلزات مورد مطالعه ..... ۷۶

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲- مهم‌ترین منابع انسان‌زاد آلاینده‌های خاک ..... ۲۷
- جدول ۲-۲- اثرات زیست‌محیطی بالقوه معدنکاری فلزی ..... ۲۸
- جدول ۱-۳- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری از معدن سرب دونا ..... ۳۸
- جدول ۲-۳- طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس میزان pH ..... ۴۰
- جدول ۳-۳- شدت آلودگی در نمونه‌های خاک بر اساس شاخص زمین‌انباشت ..... ۴۳
- جدول ۴-۳- رده آلودگی بر اساس مقادیر ضریب غنی‌شدگی ..... ۴۴
- جدول ۵-۳- رده آلودگی بر اساس مقادیر ضریب غنی‌شدگی ..... ۴۵
- جدول ۱-۴- مقادیر pH نمونه‌های خاک ..... ۴۹
- جدول ۲-۴- درصد ماده آلی نمونه‌های خاک مورد مطالعه ..... ۵۱
- جدول ۳-۴- غلظت کل فلزات در نمونه‌های خاک مورد مطالعه ..... ۵۶
- جدول ۴-۴- غلظت میانگین فلزات مورد مطالعه در فازهای مختلف ژئوشیمیایی ..... ۶۸
- جدول ۵-۴- مقادیر میانگین ضریب تحرک پذیری برای فلزات مورد مطالعه ..... ۷۲
- جدول ۶-۴- ماتریسی همبستگی پیرسون بین خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و فلزات سنگین ..... ۷۳
- جدول ۷-۴- ضریب غنی‌شدگی فلزات برای نمونه‌های خاک مورد مطالعه ..... ۷۵

فصل اول

کلیات

## ۱-۱- مقدمه

محیط‌زیست یکی از ارکان مهم حیات و توسعه محسوب می‌شود، زیرا نقش‌های متعددی را برای ایجاد تعادل بین مؤلفه‌های مختلف حیات ایفا می‌کند. آلودگی محیط‌زیست، یکی از عوارض مهم برهم خوردن تعادل و توازن طبیعت است (Mico et al. 2006). یکی از انواع آلودگی‌های محیط‌زیست، آلودگی خاک است. آلودگی خاک عبارت است از: وجود، پخش یا ورود یک یا چند ماده خارجی یا آلاینده به خاک به مقدار و مدتی که کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن را برای انسان یا سایر موجودات زنده یا گیاهان زیان‌آور سازد. بنابراین هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزای تشکیل‌دهنده خاک به طوری که استفاده از آن ناممکن گردد آلودگی خاک نامیده می‌شود (Alloway, 2004). یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های خاک، فلزات سنگین هستند که باعث کاهش کیفیت خاک و در نتیجه کاهش کارکرد مطلوب آن می‌شوند. معدنکاری، فرآوری یا استحصال ماده معدنی و همچنین ذوب کانسنگ، یکی از جدی‌ترین منابع آلودگی خاک به حساب می‌آیند. در فعالیتهای معدنکاری، باطله‌هایی که ایجاد می‌شوند به طور معمول دارای غلظت بالایی از فلزات هستند. فلزات موجود در این مواد باطله به وسیله فرآیندهای مختلفی مانند هوازدگی، آبشویی و حمل ذرات وارد محیط اطراف شده و باعث آلودگی شدید محیط به انواع فلزات و برهم خوردن شرایط فیزیکوشیمیایی آن می‌شوند. فلزات از هر راهی که وارد محیط خاک شوند با اجزای تشکیل‌دهنده آن (کانی‌های رسی، هیدروکسیدهای آهن و منگنز، مواد آلی و غیره) پیوند ایجاد کرده و یا به شکل تبادل‌پذیر در محیط خاک باقی می‌مانند. شکل‌های پیوندی فلزات، تحرک‌پذیری و دسترس‌پذیری آن‌ها را در خاک کنترل می‌کنند (Tessier et al. 1979).

معدن سرب دونا واقع در مرزن‌آباد مازندران، از جمله بزرگ‌ترین معادن سرب و روی فعال کشور است. بهره‌برداری از این معدن از سال ۱۳۳۰ آغاز شده است. کارخانه فرآوری این معدن در مجاور آن قرار دارد. باطله‌های حاصل از بهره‌برداری و فرآوری سرب و روی در محوطه اطراف معدن دور ریخته می‌شوند که می‌توانند منبع بالقوه‌ای برای آلودگی محیط‌های مجاور باشند. هدف از انجام این پژوهش،



بررسی غلظت فلزات در خاک‌های اطراف معدن دونا و همچنین اطراف سد باطله کارخانه فرآوری، اندازه‌گیری خواص فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و تعیین رابطه آن با غلظت فلزات و بالاخره ارزیابی شدت و آلودگی خاک از طریق محاسبه شاخص‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های آماری است.

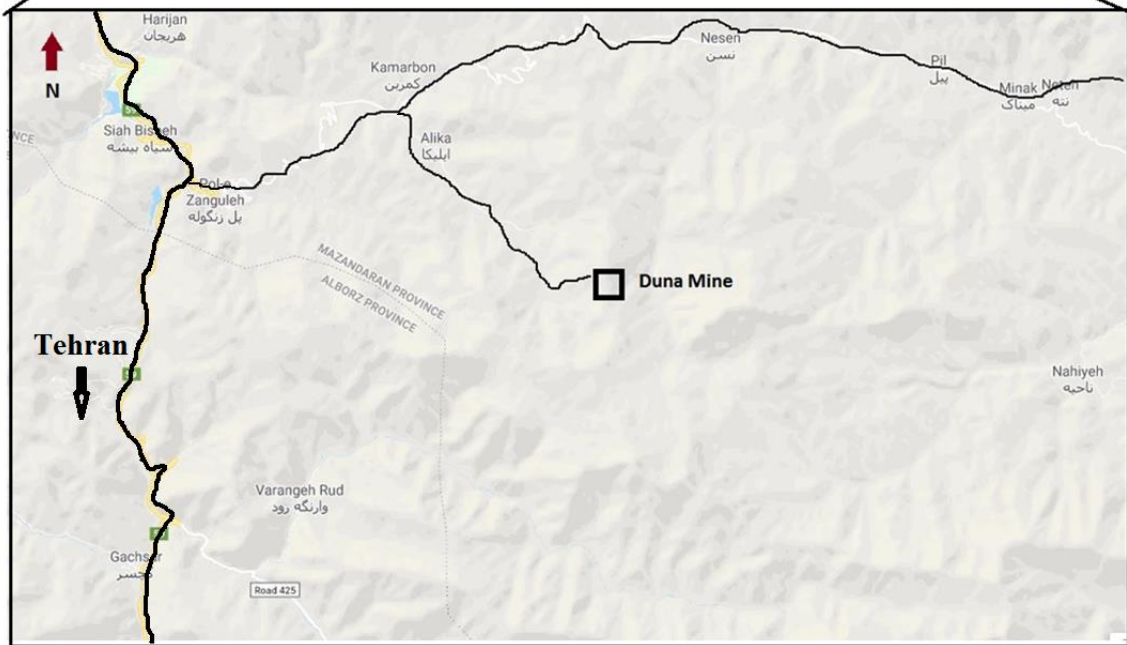
## ۱-۲- ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

### ۱-۲-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه:

معدن سرب دونا در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال شرقی گچسر و در ۹۲ کیلومتری جنوب شهر چالوس در مسیر جاده کندوان قرار دارد. جهت دسترسی می‌توان از جاده چالوس - تهران استفاده نمود. پس از طی مسافت ۷۰ کیلومتر در محل پل زنگوله جاده فرعی به سمت شرق منشعب می‌شود که پس از طی ۲۲ کیلومتر مسیر جاده (۱۲ کیلومتر آسفالتی و ۱۰ کیلومتر خاکی) به معدن دونا منتهی می‌شود (شکل ۱-۱).

### ۱-۲-۲- جغرافیای طبیعی و وضعیت آب و هوایی منطقه

آب‌وهوای منطقه دونا کوهستانی و سردسیر بوده و دارای زمستان‌های سرد طولانی و تابستان‌های معتدل است. به علت بارش فراوان برف در منطقه حدود ۹ ماه از سال معدن قابل بهره‌برداری نیست. از ارتفاعات منطقه می‌توان کوه دونا را نام برد که ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۳۲۰۰ متر است. مراکز جمعیتی مجاور معدن شامل روستاهای کمربن، الیکا و کلاونگا است. نزدیک‌ترین روستا به معدن دونا، کلاونگا است که حدود ۱۵۰ خانوار سکنه دارد (شکل ۱-۲). به علت کوهستانی بودن، پوشش گیاهی منطقه عمدتاً مرکب از گیاهان یکساله است. در ارتفاعات پایین‌تر نزدیک روستاهای کلاونگا، الیکا و کمربن، انواع متنوع درختان وجود دارد. در اطراف رودخانه نیز بوته‌های وحشی متنوعی یافت می‌شود (کریمیان، ۱۳۸۰).



شکل ۱-۱- نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه



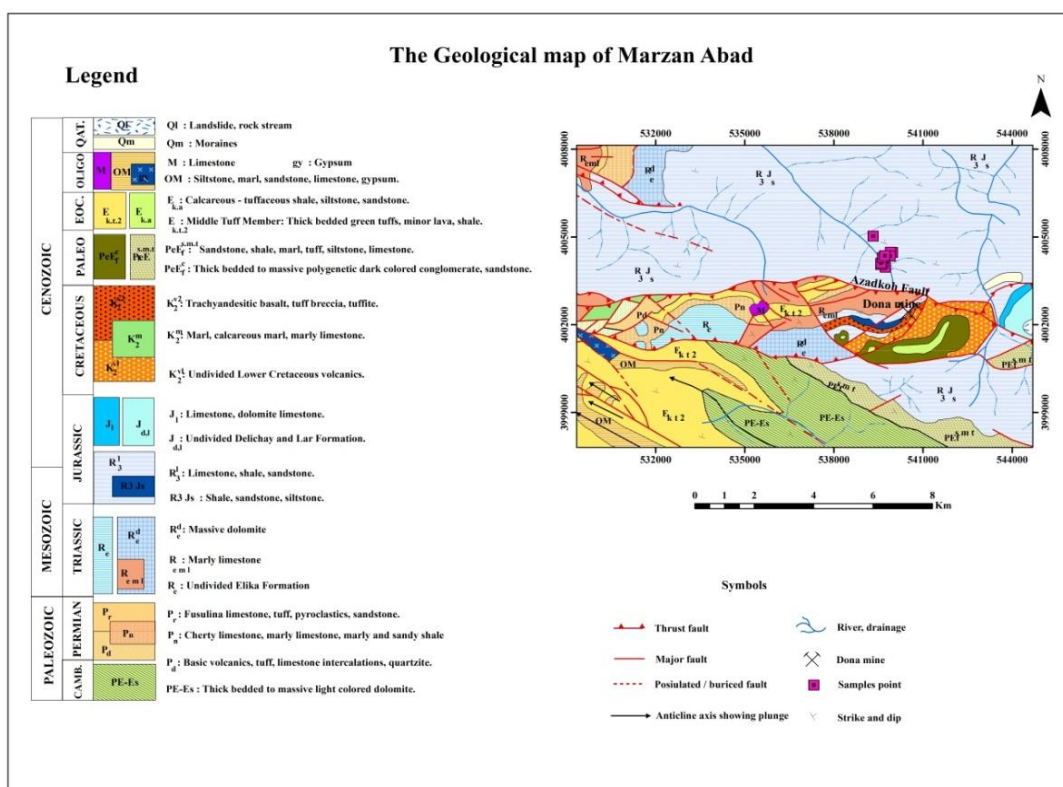
شکل (۲-۱) نمایی از منطقه معدنی دونا، روستای کلاونگا و رودخانه الیکا (دید به سمت شرق)

### ۱-۲-۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد نظر در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز مرکزی قرار دارد. مرز شمالی منطقه را بخش غربی توده نفوذی علم‌کوه تشکیل می‌دهد و مرز بخش شرقی آن دره رودخانه نور است. سن سنگ‌های بخش غربی از پرکامبرین تا ترشیاری را شامل می‌شوند. مهم‌ترین رخداد این قسمت، نفوذ توده‌های آذرین اسیدی مانند اکاپل است که سنگ‌های قدیمی‌تر را به شدت دگرگون ساخته است. سنگ‌های دگرگونی شامل هورنفلس، مرمیریت و شیست هستند. عملکرد گسل راندگی کندوان موجب بالا رفتن این بخش تا ارتفاع ۴۰۰۰ متری شده است. رسوبات بخش شرقی عمدتاً شامل سنگ‌های دوران مزوزوئیک و شامل سازندهای الیکا و شمشک است. به دلیل تأثیر گسل‌های رانده متعدد در برخی نقاط سنگ‌های دوران پالئوزوئیک نیز بروز دارند. این بخش از نظر اقتصادی اهمیت زیادی دارد چون معادن متعدد زغال‌سنگ و معدن سرب دونا در این بخش واقع می‌باشند. نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و واحدهای سنگی مرتبط با آن در شکل (۱-۳) آورده شده است (کریمیان، ۱۳۸۰).

## ۱-۲-۴- چینه‌شناسی

از نظر چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه شامل سنگ‌های پالئوزوئیک تا عهد حاضر است. در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ امل (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۸) بخش عمده واحدهای سنگی منطقه مربوط به سازند شمشک است اما در مقیاس بزرگ‌تر سازندهای قدیمی‌تر نیز مشاهده می‌شوند. به طور کلی واحدهای سنگی یا سازندهای زیر در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند که از قدیم به جدید عبارت‌اند از: سازندهای سلطانیه، درود، روته، نسن، الیکا، دلیچای، چالوس، فجن، زیارت (کریمیان، ۱۳۸۰).



شکل ۱-۳- نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مرزن‌آباد با کمی تغییرات)

## ۱-۲-۴-۱- سازند سلطانیه

سازند سلطانیه با ضخامت ۱۱۶۰ متر از دولومیت‌های ضخیم لایه روشن، سفید تا خاکستری تشکیل شده است که همراه با عضو شیلی چپقلو در بخش زیرین آن (متشکل از سیلت‌های تیره، شیل‌های ماسه‌ای، دولومیت‌های قهوه‌ای و سنگ‌آهک) بدون اختلاف شیب محسوس، با ناپیوستگی و همبری

تند روی سازند کهر جای گرفته است. سن سازند سلطانیه را پرکامبرین پسین تا کامبرین پیشین تعیین نموده‌اند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۱۳۷۸). بخش‌هایی از این سازند در جنوب منطقه دونا دیده می‌شود.

### ۱-۲-۴-۲- سازند درود

این سازند متعلق به پرمین زیرین است و از نظر لیتولوژی از بخش‌های زیر تشکیل شده است :

الف- دولومیت که در برخی نقاط سیلیسی شده و کانی سازی باریت نیز به صورت پرشدگی فضای خالی در آن به چشم می‌خورد.

ب- دولومیت های شیلی و ماسه‌ای

ج- کوارتزیت کاملاً خالص و سفیدرنگ که در متن آن کانی سازی گالن به صورت پراکنده و باریت در داخل درز و شکاف‌ها دیده می‌شود.

ضخامت سازند درود در این منطقه در حدود ۲۵۰ متر است. لازم به توضیح است که سازند درود در اثر عملکرد یک گسل رورانده که شاخه‌ای از گسل کندوان است از عمق بالا آمده و در مجاورت سازند شمشک با سن تریاس فوقانی تا ژوراسیک زیرین قرار گرفته است (کریمیان، ۱۳۸۰).

### ۱-۲-۴-۳- سازند روته

این سازند متعلق به پرمین میانی است و از نظر لیتولوژی از پایین به بالا شامل بخش‌های زیر است:

الف- دولومیت های زردرنگ

ب- دولومیت سیلیسی شده با قطعات سنگ‌های آذرین

ج- دولومیت تجدید تبلور یافته خاکستری‌رنگ

د- ماسه سنگ دگرگون شده دولومیتی

ه- دولومیت سیلیسی شده دارای بلورهای شکل دار پیریت

و- دولومیت ریزبلور با رگه‌های کلسیت

ز- دولومیت شدیداً سیلیسی شده با رگه‌های کوارتز

ضخامت سازند روته در این منطقه از مقطع تیپ آن بیشتر است و در برخی نقاط به حدود ۳۰۰ متر می‌رسد. سازند روته به صورت هم‌شیب بر روی سازند درود قرار دارد اما همبندی آنها به صورت یک سطح فرسایشی است. در اشکوب‌های بالایی پرمین میانی، در منطقه مورد مطالعه آتشفشان شدیدی اتفاق افتاده که طی آن سنگ‌های آتشفشانی به ضخامت حدود ۳۰۰ متر شامل گدازه‌های بازالتی مربوط به محیط قاره‌ای است. کانه‌زایی اصلی معدن دونا در داخل این سازند رخ داده است.

#### ۱-۲-۴-۴- سازند نسن

از نظر زمانی این سازند متعلق به پرمین بالایی است. مقطع تیپ این سازند در دهکده نسن در بخش شمال شرقی منطقه مورد مطالعه واقع است. ضخامت این سازند متغیر است و از ۴۰ تا ۱۰۰ متر تغییر می‌کند. از نظر لیتولوژی این سازند شامل شیل آهکی و دولومیتی است.

#### ۱-۲-۴-۵- سازند الیکا

سن این سازند تریاس زیرین تا میانی است و از نظر لیتولوژی شامل دو بخش بالایی و پایینی است. بخش پایینی از آهک ورمیکوله تشکیل شده که رنگ آن زرد تا خاکستری است و بخش بالایی عمدتاً از دولومیت زردرنگ تشکیل شده و دارای لایه‌بندی مشخص است. در برخی نقاط میان‌لایه‌هایی از شیل نازک در آن دیده می‌شود. سازند الیکا در منطقه مورد مطالعه گسترش زیادی دارد و به علت سختی نسبتاً زیاد سنگ‌های تشکیل‌دهنده آن، بلندترین ارتفاعات و قله‌های منطقه را می‌سازد. لازم به توضیح است که مقطع تیپ این سازند در همین منطقه و در نزدیکی روستای دونا قرار دارد که در گذشته به غلط، الیکا نامگذاری شده است. ضخامت این سازند در این منطقه به حدود ۴۰۰ متر می‌رسد اما به دلیل عملکرد گسل‌های متعدد، سنگ‌های این سازند تکرار شده و ضخامت ظاهری آن خیلی بیشتر به نظر می‌رسد. بر روی این سازند، رسوبات سازند شمشک به

صورت دگرشیب قرار دارد (کریمیان، ۱۳۸۰).

#### ۱-۲-۴-۶- سازند شمشک

از نظر زمانی این سازند متعلق به تریاس فوقانی تا ژوراسیک زیرین است. این سازند از لحاظ لیتولوژی به چهار بخش ماسه‌سنگ زیرین، شیل زغال‌دار زیرین، ماسه‌سنگ بالایی و شیل زغال‌دار بالایی تقسیم می‌شود. هر یک از این بخش‌ها لیتولوژی جداگانه‌ای دارند اما به طور کلی از لایه‌سنگ‌های (siltstone) سبزرنگ میکادار، ماسه‌سنگ‌های آهکی، شیل‌های آهکی و ماسه‌ای تشکیل شده‌اند. در بخش‌های بالایی این سازند به طور کلی یک لایه لاتریت قرمزرنگ به چشم می‌خورد. سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه گسترش زیاد دارد و حتی در برخی مناطق ضخامت آن از مقطع تیپ نیز بیشتر است. از نظر مورفولوژی، این سازند دره‌های وسیع و دامنه‌های کم‌شیبی را تشکیل می‌دهد. برونزدهای این سازند از دهانه شمالی تونل کندوان تا دره رودخانه نور ادامه دارد. رسوبات این سازند هم از نوع دریایی و هم از نوع قاره‌ای و تخریبی است. محیط تشکیل این رسوبات، دریای کم‌عمقی بوده که گهگاه به سوی ساحل پیشروی می‌کرده است. بخش‌های زغال‌دار، تحت شرایط احیایی محیط تشکیل شده است زیرا در این بخش‌ها، آثاری از کانی پیریت که معرف چنین محیطی است دیده می‌شود (کریمیان، ۱۳۸۰).

#### ۱-۲-۴-۷- سازند دلیچای

در البرز مرکزی، در ژوراسیک میانی تا بالایی، یک پیشروی گسترده ولی نامنظم و ناهمزمان، سبب پدیدار شدن محیط اغلب دریایی با رسوب‌گذاری کربنات‌ها شده است. سازند دلیچای متشکل از تناوب مارن و سنگ‌آهک، با ناپیوستگی فرسایشی بر روی سازند شمشک جای گرفته است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۸).

#### ۱-۲-۴-۸- عضو سوم و پنجم سازند چالوس

سن سازند چالوس مربوط به کرتاسه است. این سازند دارای ۵ عضو می‌باشد. عضو سوم و پنجم این سازند در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند. عضو سوم با ضخامت ۸۰ متر شامل سنگ‌های



آتشفشانی تیره و پیروکلاستی، ماسه توفی سبز با ریگ‌های آهکی سیاه‌رنگ و لایه‌های سیلتی قرمز، دیاباز پورفیری سیاه به‌شدت هوازده است. عضو پنجم سازند چالوس ضخامت ۵۱۰ متر دارد و متشکل از دیاباز پورفیری، ماسه آتشفشانی سبزرنگ، توفیت‌های ماسه‌ای و آگلومرای سبزرنگ با درون‌لایه‌هایی از قلوه‌سنگ‌های آهکی است.

### ۱-۲-۴-۹- سازند فجن

سن این سازند پالئوسن تا ائوسن زیرین تعیین شده و از نظر لیتولوژی از ماسه‌سنگ و کنگلومرای قرمز رنگ پلی‌ژنتیک تشکیل شده است. در منطقه مورد مطالعه، این سازند به طور عمده از کنگلومرای قرمز رنگ درشت‌دانه تشکیل شده است که اندازه قطعات آن گاهی به حدود ۵۰ سانتی‌متر می‌رسد. جنس اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن عمدتاً از سازندهای قدیمی‌تر مانند الیکا و شمشک است. در بعضی نقاط به طور کلی فوران‌های ولکانیکی در داخل این سازند به چشم می‌خورد. ضخامت این سازند در منطقه مورد مطالعه تقریباً ۲۰۰ متر است و در قسمت‌های بالاتر به ماسه‌سنگ‌های آهکی سازند زیارت تبدیل می‌شود (کریمیان، ۱۳۸۰).

### ۱-۲-۴-۱۰- سازند زیارت

سن این سازند ائوسن زیرین و از نظر لیتولوژی شامل ماسه‌سنگ‌های آهکی و آهک نومولیت‌دار است. از خصوصیات سنگ‌های آهکی این سازند، رنگ خاکستری مایل به آبی و متورق بودن آنها است. ضخامت این سازند در منطقه مورد مطالعه در حدود ۲۵۰ متر است (کریمیان، ۱۳۸۰).

### ۱-۲-۵- تکتونیک منطقه مورد مطالعه

مرز جنوبی منطقه مورد مطالعه را گسل کندوان تشکیل می‌دهد. این گسل یک گسل رورانده با امتداد شمال غرب-جنوب شرق و شیب ۳۰ تا ۸۰ درجه است. شیب این گسل در بخش غربی بیشتر است و باعث شده که ارتفاعات علم‌کوه به بلندای حدود ۴۰۰۰ متر تشکیل شود. جهت شیب در همه جا به سمت شمال است. این گسل در نزدیکی دهانه شمالی تونل کندوان به خوبی دیده می‌شود. در اینجا



عملکرد گسل باعث شده که سنگ‌های سازند شمشک بر روی سازند کرج رانده شوند. به سمت مشرق، شاخه‌ای از گسل کندوان جدا شده و با امتداد شرقی-غربی تا شمال معدن سرب دونا ادامه می‌یابد. طول این گسل حدود ۱۵ کیلومتر و شیب آن نیز ۳۰ تا ۵۰ درجه به سوی شمال است. بر اثر سازوکار روراندگی این گسل، رسوبات دوران پالئوزوئیک یعنی سازندهای درود، روته و نسن و همچنین رسوبات تریاس به مقدار زیاد بالا آمده و بر روی سازند شمشک رانده شده‌اند. زون خرد شده و برشی در ۵۰۰ متری شمال معدن کاملاً حرکت این گسل را تأیید می‌کند. عملکرد این گسل باعث شده است که لایه‌ها از حالت افقی خارج شوند و شیب آنها به حدود ۵۰ درجه برسد. به دلیل تراستی بودن منطقه، سنگ‌ها کاملاً خرد شده و گسل‌های عادی و رانده و حتی امتدادلغز به فراوانی دیده می‌شوند. از آنجا که جهت نیروهای وارده شمال غرب-جنوب شرق و تنش اصلی در همین جهت اعمال شده است، بنابراین در این راستا، گسل‌های رانده به وجود آمده‌اند. در راستای عمود بر تنش اصلی، چون فاز کششی حکم‌فرماست، گسل‌های عادی با راستای شمالی-جنوبی دیده می‌شوند (کریمی‌ان، ۱۳۸۰).

### ۱-۲-۶- کانی‌شناسی معدن سرب و روی دونا

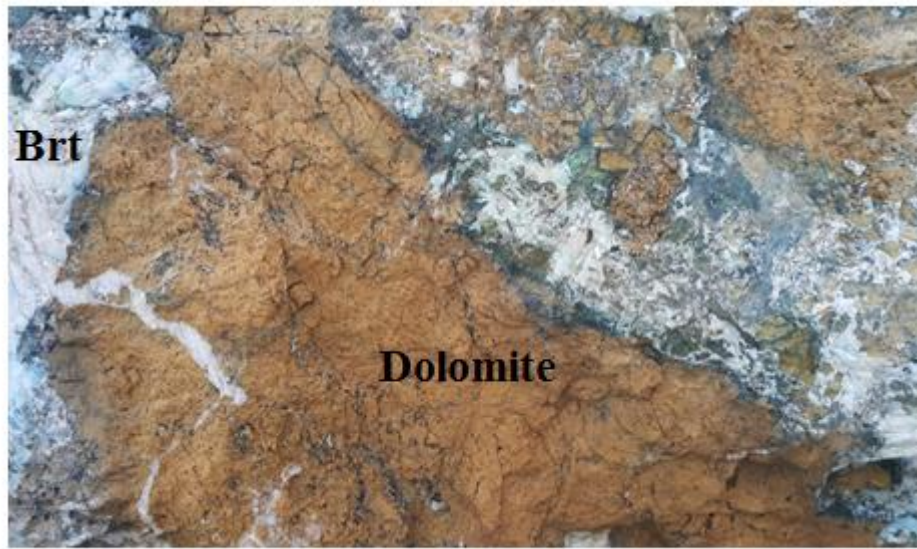
معدن سرب دونا در سنگ‌های کربناته سازند روته تشکیل شده است. کانی‌سازی به صورت رگه‌ای و پراکنده از نوع پرشدگی فضای خالی است (شکل ۱-۴). کانسنگ اصلی معدن دونا از نوع برشی است. ذرات ریز و خشن گالن همراه با اسفالریت (شکل ۱-۵)، مالاکیت، آزوریت (شکل ۱-۶) و کوارتز کانی‌های اصلی این ذخیره‌اند. کانسنگ اصلی معدن گالن است. کانی‌سازی در دو سطح اولیه و ثانویه به ترتیب زیر صورت گرفته است:

کانه‌زایی اولیه شامل: پیریت، اسفالریت، گالن، کالکوپیریت، باریت

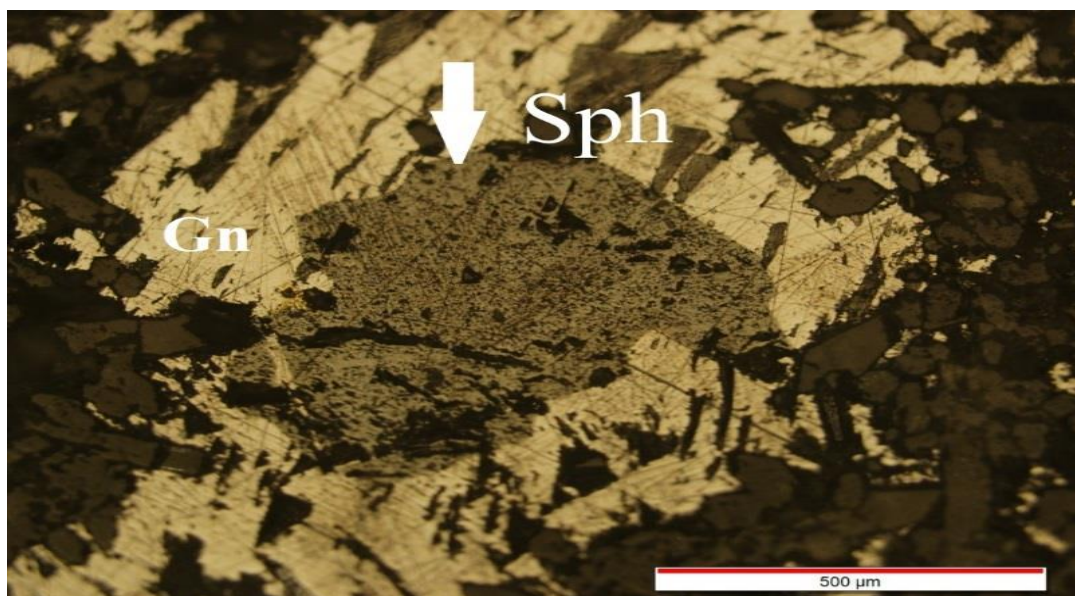
کانه‌زایی ثانویه شامل: آزوریت، کالکوزیت، اکسیدهای سرب، کلسیت و کوارتز.

نکته ی شایان توجه، حضور باریت به مقدار زیاد و با کیفیت عالی به عنوان باطله همراه کانی اصلی

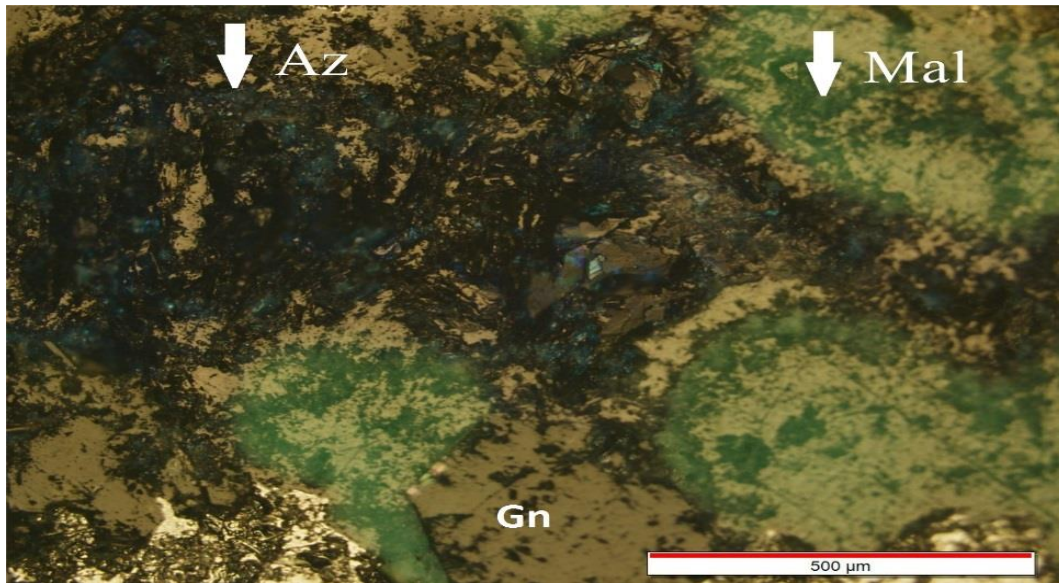
سرب (گالن) است (شکل ۷-۱). سولفیدهای فلزی دیگر چون پیریت و کالکوپیریت (شکل‌های ۸-۱ و ۹-۱) و هیدرواکسیدهای آهن (گئوتیت) به وفور در نواحی کانه زایی شده مشاهده گردید. کربنات سرب (سروزیت) نیز در برخی نقاط گزارش گردیده است ولیکن در مقاطع نازک مشاهده نگردید. وجود مقادیری نقره در کانسنگ ارزش اقتصادی آن را افزایش داده است.



شکل ۴-۱- کانه زایی شکافه پرکن (برشی) و رگه ایی شامل باریت (Brt) و گالن در سنگ میزبان دولومیتی سازند روته در معدن دونا



شکل ۵-۱- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی اسفالریت (Sph) همراه با گالن (Gn) (مطالعه در نور PPL)

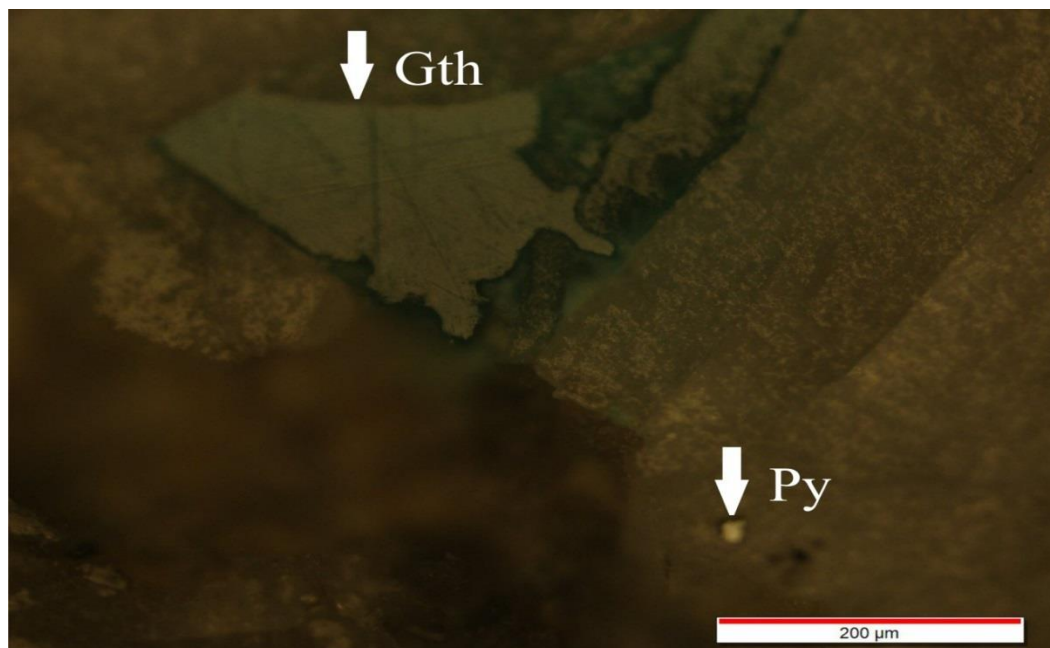


شکل ۱-۶- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی ملاکیت (Mal) و آزوریت (Az) همراه با گالن (Gn) (مطالعه در نور PPL)

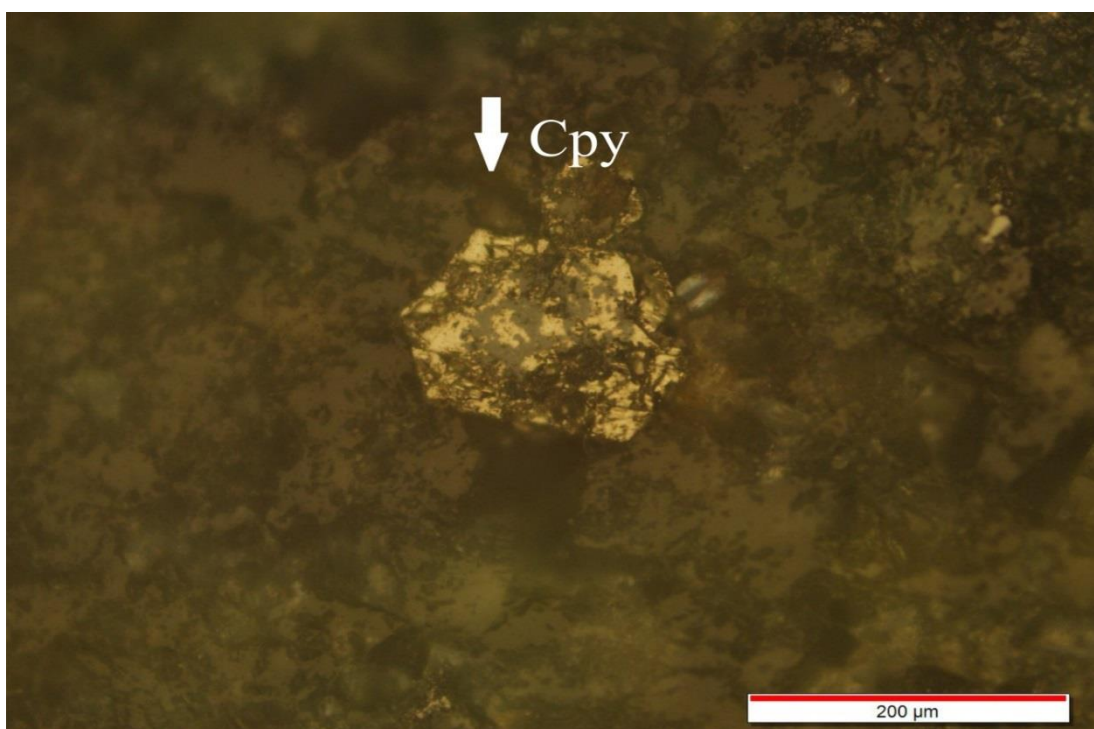


شکل ۱-۷- باریت به همراه گالن در یک نمونه دستی از معدن سرب دونا





شکل ۱-۸- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی پیریت (Py) و گوتیت (Gth) در متن سنگ (مطالعه در نور PPL)



شکل ۱-۹- مطالعه مقطع میکروسکوپی صیقلی از کانی کالکوپیریت (Cpy) در متن سنگ (مطالعه در نور PPL)

## ۱-۲-۷- ژنز کانسار سرب دونا

بر اساس پژوهش‌های انجام شده، کانسار دونا از نوع جانیشینی اپی‌ترمال تا مزوترمال است. سنگ میزبان این کانسار دولومیت‌های سازند روته با سن پرمین میانی است اما کانی‌سازی در دیگر سنگ‌های منطقه نیز به طور ضعیف‌تر انجام شده است. پدیده‌هایی چون دولومیتی شدن، سیلیسی شدن، گسلش و کارستی شدن، سنگ میزبان را برای کانی‌سازی آماده ساخته است. کانه اصلی گالن و کانی‌های دیگر اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت و باریت است. بافت کانه‌ها به طور عمده پرشدگی فضای خالی است. کانی‌سازی به صورت رگه‌ای در داخل گسل‌ها و به شکل شکافه‌پرکن و حفره‌های کارستی رخ داده است (سامانی راد، ۱۳۷۸).

## ۱-۳- اهداف پژوهش

هدف کلی این مطالعه، بررسی آلودگی فلزی در خاک‌های اطراف معدن سرب و روی دونا است. جهت نیل به این هدف، اهداف فرعی زیر نیز دنبال گردید:

- بررسی و اندازه‌گیری غلظت فلزات بالقوه سمی (سرب، روی، نیکل، کادمیم، کروم و مس) در

نمونه‌های خاک اطراف معدن و همچنین در اطراف سد باطله کارخانه فراوری

- اندازه‌گیری و تعیین برخی از پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک

- بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی نمونه‌های خاک و باطله‌های معدن

- بررسی رابطه بین غلظت فلزات با خواص فیزیکوشیمیایی خاک و کانی‌شناسی آن.

- تعیین شدت آلودگی به فلزات سنگین (سرب، روی، نیکل، کادمیم و مس) در خاک‌های اطراف معدن

و همین‌طور در اطراف کارخانه فراوری آن از طریق محاسبه شاخص‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های

آماري

## ۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

معادن به ویژه معادن سرب از منابع بالقوه ورود فلزات به خاک‌های اطراف خود هستند. معدن سرب و روی دونا با ذخیره حدود ۶/۵ میلیون تن کانسنگ با عیار متوسط سرب ۵ درصد، روی ۱ درصد، باریت ۱۸/۵ درصد و میزان نقره ۱۵۰-۲۵۰ گرم در تن، از جمله معادن مهم سرب و روی در ایران محسوب می‌شود. این معدن به شکل روباز استخراج شده که با تولید حجم زیادی از مواد باطله همراه است. به نظر می‌رسد فعالیت گسترده این معدن باعث آلودگی شدید خاک‌های اطراف شده باشد. بنابراین انجام یک مطالعه به منظور تعیین میزان آلودگی خاک منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

## ۱-۵- روش انجام تحقیق

روش انجام تحقیق در این مطالعه به شرح زیر است:

- ۱- مطالعات دفتری: شامل گردآوری کلیه اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه از طریق مراجعه به کتابخانه، سازمان‌ها و منابع اینترنتی .
- ۲- بازدید از منطقه و نمونه‌برداری: در این مرحله بر اساس روش‌های استاندارد از خاک‌های منطقه معدنکاری و همچنین منطقه شاهد نمونه‌برداری به عمل آمد.
- ۳- آنالیز نمونه‌ها: اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مانند ماده آلی و pH و همچنین تعیین میزان غلظت کل فلزات در نمونه‌های خاک، و همچنین انجام مطالعات کانی‌شناسی بر روی نمونه‌ها.
- ۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها: شامل تفسیر آماری داده‌ها، تعیین رابطه بین غلظت فلزات و پارامترهای خاک، تعیین شدت آلودگی نمونه‌های خاک و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی خاک.
- ۵- نگارش و تدوین پایان‌نامه

## ۱-۶- ساختار پایان نامه

فصل اول: کلیات

فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

فصل سوم: مواد و روش‌ها

فصل چهارم: ارزیابی کیفیت و آلودگی رسوبات بستر دریاچه

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها





## فصل دوم

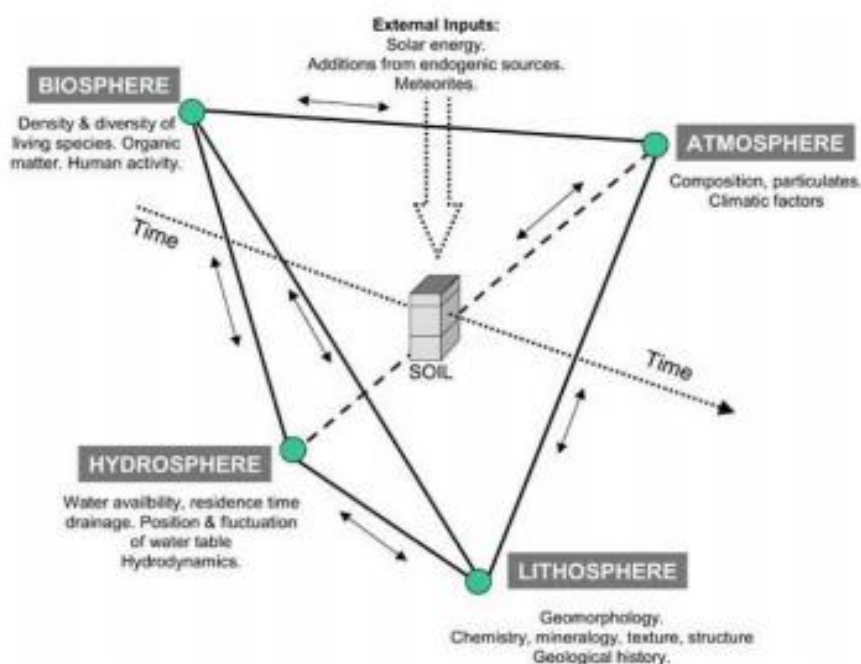
مروری بر مطالعات پیشین

## ۲-۱- مقدمه

فصل دوم تحت عنوان مروری بر مطالعات پیشین در دو بخش ارائه می‌شود. در بخش نخست تعاریف خاک، فلزات سنگین، معدنکاری و اثرات زیست‌محیطی آن انجام خواهد شد و سپس به مطالعات و تحقیقات انجام گرفته با موضوع مشابه اشاره خواهد شد.

## ۲-۲- تعریف خاک و آلودگی آن

خاک مجموعه‌ای ناهمگن از مواد معدنی (کانی‌ها)، ماده آلی، آب و هوا است. بنابراین خاک حاصل برهمکنش چهار بخش اصلی محیط یعنی لیتوسفر، اتمسفر، بیوسفر و هیدروسفر است (شکل ۲-۱) و از دیدگاه زمین‌شناسی نیز محصول هوازدگی سنگ به حساب می‌آید (Chesworth, 2008). به دلیل ماهیت برهمکنشی تشکیل خاک، آلودگی می‌تواند از سایر محیط‌ها (آب، هوا یا سنگ) وارد محیط خاک گردد.

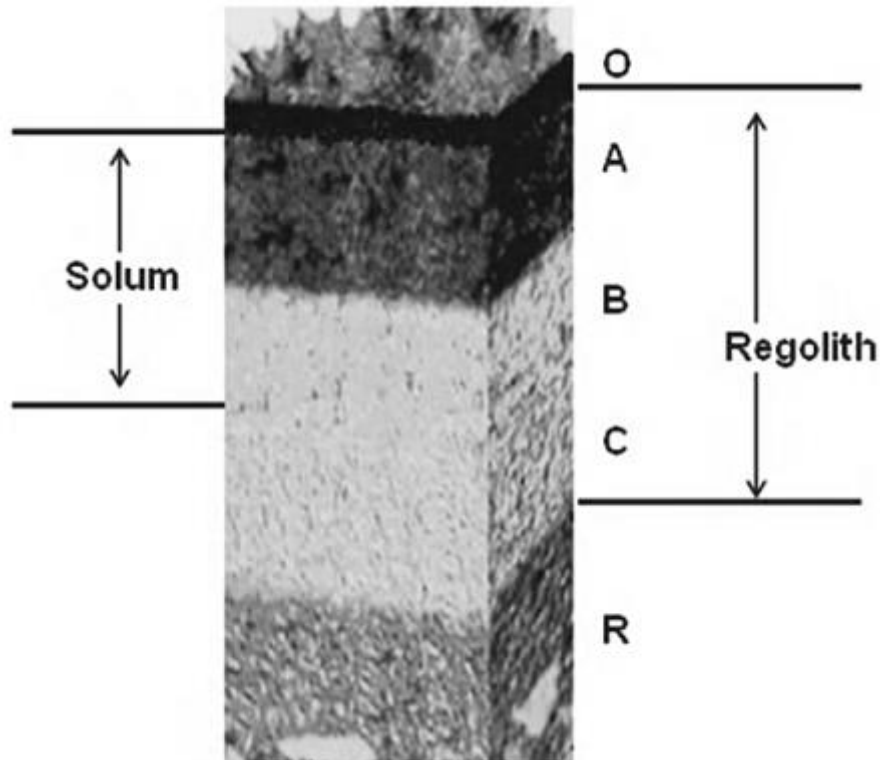


شکل ۲-۱- نقش بیوسفر، اتمسفر، هیدروسفر و لیتوسفر در تشکیل خاک (Chesworth, 2008)

در یک تعریف ساده آلودگی خاک عبارت است از ورود هرگونه ماده‌ی شیمیایی یا بیولوژیکی که غلظت آن بیش از زمینه طبیعی بوده و باعث تغییر در کیفیت خاک گردد (Kabata-Pendias, 2010).

## ۳-۲- عوامل تشکیل خاک و افق‌های اصلی آن

خاک، به دنبال هوازدگی و تجزیه سنگ‌ها و در اثر تغییرات عوامل محیطی مانند ( تغییرات درجه حرارت، بارش و...) ایجاد می‌شود. مهم‌ترین عوامل مؤثر در تشکیل خاک عبارت‌اند از آب و هوا، میکروارگانسیم‌ها، توپوگرافی، نوع سنگ مادر و زمان. کانی‌ها (مواد معدنی) انحلال‌پذیر در واکنش با آب حل می‌شوند و در مقابل کانی‌های به نسبت نامحلول مانند کوارتز، به ذرات کوچک‌تر متلاشی می‌شوند و در نهایت لایه‌های مجزا یا افق‌های خاک توسعه می‌یابند (شکل ۲-۲). اولین لایه در نیمرخ خاک، افق O نامیده می‌شود که اغلب شامل مواد آلی تجزیه شده مانند (برگ، شاخه) و دیگر مواد هیومیک است. لایه زیرین افق O، افق A (افق شسته شده) است که از کانی‌ها و مواد آلی شسته شده افق O تشکیل شده‌اند. رس‌ها و مواد شیمیایی حل شده (مانند آهن، کلسیم، منیزیم و فلزات بالقوه سمی) به افق B (لایه زیرین افق A) منتقل شده و در آن انباشته می‌شوند، به همین دلیل افق B، افق ته‌نشینی نامیده می‌شود. از دیگر ویژگی‌های افق B، میزان بالای کانی‌های رسی و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در آن است، بنابراین این افق به واسطه مواد تشکیل‌دهنده خود، توانایی جذب فلزات بالقوه سمی را دارد. آخرین و پایین‌ترین لایه از نیمرخ خاک، افق C بوده که ترکیب شیمیایی آن، نشان‌دهنده ترکیب سنگ مادر است. با توجه به عوامل مؤثر در تشکیل خاک در هر منطقه، وسعت و عمق خاک متفاوت است (Bradl, 2005).



شکل ۲-۲- افق‌های خاک در یک نیمرخ فرضی: رگولیت به افق‌های زیر خاک به جز افق O، سلوم نیز به مجموع افق‌های A و B اطلاق می‌شود (Osman, 2014)

## ۲-۴- فلزات سنگین و اهمیت آنها

فلزات سنگین گروهی از فلزات و شبه فلزات هستند که چگالی آنها بیش از ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و با عدد اتمی بیش از ۲۳ در جدول تناوبی مشخص می‌شوند (Perk, 2013) (شایان ذکر آنکه امروزه به جای واژه فلز سنگین از اصطلاح فلزات بالقوه سمی استفاده می‌شود). کادمیم، کبالت، مس، منگنز، نیکل، روی، قلع، جیوه و سرب معمول‌ترین این فلزات هستند. فلزات سنگین یا فلزات بالقوه سمی از آلاینده‌های پایدار و بادوام محیط‌زیست به شمار می‌آیند. این فلزات به محض ورود به داخل خاک با اجزای آلی و غیرآلی خاک واکنش می‌دهند. تحرک‌پذیری و زیست‌دسترس‌پذیری این فلزات در خاک به شکل‌ها یا حالت پیوندی آنها در خاک بستگی دارد (Kabata-Pendias, 2010).

## ۲-۵- شکل‌های ژئوشیمیایی فلزات در خاک

فلزات در خاک به شکل‌ها یا فرم‌های گوناگونی حضور دارند که عبارت‌اند از: یون‌های آزاد و انحلال‌پذیر، یون‌های قابل جذب و تبادل‌پذیر، کمپلکس با مواد آلی، رسوب با کربنات‌ها، فسفات‌ها و

ترکیبات سولفیدی، رسوب با اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز و تثبیت در شبکه کانی‌ها. در زیر شرح مختصری در مورد هر یک از این شکل‌های ژئوشیمیایی آورده می‌شود:

## ۲-۵-۱- یون‌های آزاد و انحلال‌پذیر

اگرچه در داخل خاک یون‌ها تمایل دارند که به صورت کمپلکس شده درآیند اما برخی عناصر هم می‌توانند به صورت یون‌های آزاد (Free ion) در خاک حضور داشته باشند. عناصری که به صورت یون‌های آزاد و محلول در خاک حضور می‌یابند، دارای تحرک بالایی هستند (Alloway, 2004). حضور یون‌ها به صورت آزاد تا حد زیادی به قدرت یونی محلول خاک و همچنین به پتانسیل شیمیایی خود یون بستگی دارد.

## ۲-۵-۲- یون‌های قابل جذب و تبادل‌پذیر

در این شکل، فلز از طریق جذب سطحی به کلونیدهای خاک چسبیده و می‌تواند در اثر تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی محیط از سطح آنها جدا شوند. ظرفیت تبادل کاتیونی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی کلونیدهای خاک و کانی‌های رسی است. این ویژگی می‌تواند بر بسیاری از ویژگی‌های دیگر خاک از جمله قابلیت نگهداشت آن و همچنین بر تحرک‌پذیری بسیاری از فلزات تأثیر بگذارد (Foth and Ellis, 1997).

## ۲-۵-۳- کمپلکس با مواد آلی

مواد آلی از جمله مهم‌ترین ترکیبات کمپلکس‌کننده فلزات در داخل خاک هستند. این ترکیبات در بیشتر pH‌های معمول خاک دارای بار سطحی منفی هستند و بدین علت می‌توانند با فلزات یا کاتیون‌ها تشکیل پیوندهای سطحی داده و یا آنها را در ساختار مولکولی خود جای دهند. (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). به تشکیل پیوند بین فلزات و مواد آلی اصطلاحاً کلیتی شدن (Chelation) گفته می‌شود. در اثر اکسید شدن محیط، مواد آلی تجزیه می‌شوند که در این صورت قادرند فلزات همراه خود را آزاد سازند.

## ۲-۵-۴- رسوب با کربنات‌ها

کربنات‌ها یکی از بهترین جذب‌کننده‌های فلزات به حساب می‌آیند. عناصر جزئی می‌توانند همراه با کربنات‌ها ته‌نشین شوند، در ساختار آنها شرکت کنند، روی سطح کربنات‌ها جذب شوند یا به نسبت‌های مختلف جانشین کلسیم موجود در ساختار کلسیت (رایج‌ترین فرم کربنات در خاک‌ها و رسوبات) شوند (فرقانی و مر، ۱۳۹۱). یک فلز در شکل کربناتی دارای اتصال ضعیفی بوده و با تغییر شرایط محیطی (به ویژه کاهش pH) آزاد می‌شود (Rao et al., 2007).

## ۲-۵-۵- رسوب با اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز

اکسیدهای آهن و منگنز، مخازن اصلی برای جذب فلزات سنگین هستند (Ure et al. 1993). این ترکیبات، اغلب به صورت پوشش روی سطح کانی یا به صورت ذرات مجزای ریز حضور داشته و توسط سازوکارهای تشکیل کمپلکس سطحی با فلزات، تبادل یونی و نفوذ به درون شبکه، فلزات جزئی را جذب می‌کنند (Rao et al., 2007). اکسی هیدروکسیدهای آمورف آهن و منگنز در ابتدا عناصر جزئی را به صورت فازهای تبادل‌پذیر جذب می‌کنند؛ اما با گذشت زمان، فلزات جذب سطحی شده وارد ساختار فازهای اکسیدی آمورف و متبلور می‌شوند و در نتیجه تحرک آنها کاهش می‌یابد (Kabata-Pendias, 2010). با وجود اینکه اکسیدهای آهن و منگنز اجزاء نسبتاً پایدار هستند اما تغییر در شرایط اکسیداسیون - احیا می‌تواند منجر به آزادسازی عناصر متصل به این فاز شود (Salomons, 1995). موفق‌ترین روش استخراج فلزات از اکسیدهای آهن و منگنز، استفاده از معرف‌هایی است که فلزات موجود در فازها را به صورت فاز احیایی درمی‌آورند (Tessier et al., 1979).

## ۲-۵-۶- تثبیت در شبکه کانی‌ها

فلزاتی که به صورت تثبیت شده در شبکه بلوری کانی‌ها حضور دارند، دارای کمترین انحلال‌پذیری هستند. در این حالت، فلزات بسته به عدد کئوردیناسیون خود در داخل شبکه بلوری کانی‌های

تشکیل‌دهنده خاک به دام افتاده و به این علت نمی‌توانند در واکنش‌های تبادل یونی یا دیگر واکنش شیمیایی داخل خاک شرکت کنند (Mclean and Bledsoe, 1992).

## ۲-۶- تأثیر ویژگی‌های خاک (پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک) بر جذب یا تحرک عناصر

اولین گام جهت ارزیابی زیست‌محیطی خاک، بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن است؛ چراکه غلظت فلزات، تمرکز و تحرک‌پذیری آنها با خواص ذاتی خاک ارتباط نزدیکی دارد. مهم‌ترین این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: pH خاک، میزان ماده آلی خاک و بافت نمونه‌های خاک (به‌ویژه محتوای رس آن).

### ۲-۶-۱- pH خاک

pH یا قدرت یون هیدروژن، پارامتری است که میزان اسیدی یا قلیایی بودن یک محیط را نشان می‌دهد. احتمالاً pH مهم‌ترین عامل حاکم بر گونه‌سازی و انحلال‌پذیری فلزات از سطح کانی‌ها، تحرک و انتقال فلزات و در نهایت زیست‌دسترس‌پذیری فلزات در خاک است (USGS, 1995). قابلیت تحرک و دسترس‌پذیری فلزات سنگین، رابطه معکوس با pH دارد. اغلب مکان‌های جذب فلزات در خاک‌ها (مانند اکسیدهای آهن و منگنز، مواد آلی، کربنات‌ها)، تحت تأثیر pH قرار می‌گیرند، زیرا همزمان با کاهش pH (افزایش  $H^+$ )، شمار مکان‌های با بار منفی برای جذب کاتیون‌ها، کاهش و برای جذب آنیون‌ها، افزایش می‌یابد. با اسیدی شدن محیط و افزایش  $H^+$ ، رقابت شدیدی میان کاتیون‌ها برای جای‌گیری در مواضع دسترس‌پذیر به وجود می‌آید، اما ته‌نشینی و تجمع هیدروکسیدها، اکسیدها، کربنات‌ها و فسفات‌های فلزی تنها در شرایط قلیایی رخ می‌دهد (Lindsay, 1972).

### ۲-۶-۲- ماده آلی

ماده آلی در خاک، شامل اندام‌های تخریب شده گیاهان، هوموس و میکروارگانیسم‌های زنده است. ماده آلی خاک، نقش کلیدی در جذب فلزات در خاک دارد (Sherene, 2010). مواد آلی داخل خاک، می‌توانند تحرک فلزات را تحت تأثیر قرار دهند؛ چرا که با ایجاد یکسری لیگاندها در محلول خاک (و

جذب بیشتر فلزات)، باعث کاهش تحرک پذیری آنها می‌شوند (Arenas-Lago, 2014). لیگاندها شامل اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین مانند اسید اگزالات، اسید سیتریک، اسید فورمیک و استیک اسید است (Sherene, 2010) که با کاتیون‌ها تشکیل پیوند ساده یا چندگانه می‌دهند.

## ۲-۶-۳- بافت خاک

بافت خاک، نقش مهمی در تحرک فلزات در خاک ایفا می‌کند و نشان‌دهنده توزیع اندازه ذرات خاک است (Sherene, 2010). تمرکز فلزات سنگین درون اجزاء خاک، معمولاً با اندازه ذرات آن، رابطه معکوس دارد. به صورتی که با کاهش اندازه ذرات، سطح ویژه و توان جذب فلزات، افزایش می‌یابد؛ بنابراین در خاک‌های رسی جذب فلزات در مقایسه با خاک‌های ماسه‌ای، بسیار بیشتر است (Sherene, 2010).

## ۲-۷-۲- منابع فلزات سنگین در خاک‌ها

فلزات سنگین از دو راه، طبیعی (زمین‌زاد) و غیرطبیعی (انسان‌زاد) وارد محیط خاک می‌شوند:

### ۲-۷-۱- منابع طبیعی یا زمین‌زاد

در برخی موارد، ورود فلزات سنگین به طور طبیعی و بدون دخالت انسان صورت می‌گیرد. در حقیقت همه‌ی عناصر به طور طبیعی در خاک وجود دارند ولی ممکن است از منابع انسان‌زاد نیز وارد خاک شوند. یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تشکیل خاک که باعث ورود فلزات از سنگ مادر به داخل خاک می‌شود هوازدگی است. در طی این فرآیند رفتار عناصر ارتباط زیادی با خواص ژئوشیمیایی آنها دارد (Kabata-Pendias, 2010). برخی منابع طبیعی دیگر فلزات سنگین، شامل: فعالیت‌های آتشفشانی و چشمه‌های آب گرم هستند (Garrett, 2000).

### ۲-۷-۲- منابع غیرطبیعی یا انسان‌زاد

اگرچه منابع طبیعی ورود فلزات به خاک تا حدی زیادی محدود است اما منابع انسان‌زاد آلودگی خاک در مقابل بسیار متعدد و متنوع است. مهم‌ترین منابع انسان‌زاد ورود فلزات به داخل خاک شامل



فعالیت‌های کشاورزی، معدنکاری (استخراج، فراوری و ذوب کانسنگ)، صنایع شیمیایی و حمل و نقل است (جدول ۱-۲). در ضمن فعالیت‌های کشاورزی مقادیر زیادی کود و آفت‌کش مورد استفاده قرار می‌گیرد که اینها می‌توانند منبع بالقوه‌ای برای ورود انواع فلزات به داخل خاک باشند. در اثر فعالیت واحدهای صنعتی نیز به علت تولید پسماندهای شیمیایی و یا تخلیه فاضلاب و همچنین گسیل آلاینده‌های جوی از دودکش کارخانجات صنعتی آلودگی فلزی خاک‌ها رخ خواهد داشت. فلزاتی چون سرب، روی، قلع، جیوه و کروم مهم‌ترین این آلاینده‌های فلزی هستند که غلظت آنها در خاک‌های پیرامون واحدهای صنعتی می‌تواند صدها برابر غلظت زمینه باشد. حمل‌ونقل و ترافیک هم از منابع بالقوه آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین بویژه در مناطق شهری هستند که می‌توانند فلزاتی چون روی، سرب، نیکل و وانادیوم را وارد محیط خاک سازند (Alloway, 2004). این فلزات عمدتاً از طریق آگزوز خودروها یا رواناب‌های شهری وارد محیط می‌شوند.

جدول (۱-۲) مهم‌ترین منابع انسان‌زاد آلاینده‌های خاک (Osman, 2014)

Source	Materials	Pollutants
Agricultural	Phosphate fertilizers	As, Cd, Mn, U, V, and Zn
	Pig and Poultry manures	As, Cu
	Pesticides	As, Cu, Mn, Pb, Zn, organic pollutants
Metalliferous mining and smelting	Dispersed tailings, ore separates	Metals, including heavy metals, cyanides
Metallurgical industries	Metal wastes, solvents, residues, aerosols	Metals including heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Mn, etc.)
Chemical industries	Particulates, effluents, scraps, damaged parts	Heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Mn, etc.) and organic pollutants, including PAHs
Waste disposal	Sewage sludge, scrap heaps, coal ash, waste incinerators, landfills	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , PAGHs, PCBs, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Mn, etc.)
Transport	Particulates, acid deposits, solvents, oils	Pb, Br, Cd, Zn, P, As

از آنجا که مطالعه حاضر بر روی اثرات زیست‌محیطی یک معدن صورت گرفته است لذا در زیر به طور جداگانه به اثرات زیست‌محیطی معادن اشاره خواهد شد.

## ۲-۸- اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی

اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی طیف وسیعی از اثرات شامل تخریب پوشش گیاهی تا آلودگی آب، خاک و حتی هوا را شامل می‌شود. در جدول (۲-۲) مهم‌ترین اثرات زیست‌محیطی معادن فلزی بویژه از نظر آلودگی‌هایی که در پی دارند آورده شده است. با توجه به آنکه بخش اعظم اثرات زیست‌محیطی معادن در ارتباط با تولید باطله‌ها است در زیر به آنها پرداخته می‌شود.

جدول (۲-۲) اثرات زیست‌محیطی بالقوه معدنکاری فلزی (Hoskin et al. 2000)

اثرات فیزیکی (Physical impacts)	اثرات آلودگی (Pollution impacts)
۱. تخریب زیستگاه‌های طبیعی در مکان‌های معدنی	۱. تولید زهاب اسیدی معدن در منطقه معدنکاری
۲. تغییر در رژیم و اکولوژیکی رودخانه‌ها به علت تغییر در مسیر جریان	۲. ایجاد رواناب‌های سطحی در سایت معدنی
۳. تغییر در چشم‌انداز طبیعی و شکل زمین	۳. آلودگی رسوبات رودخانه‌ای
۴. تخریب زمین به علت عدم اصلاح زمین پس از بسته شدن معدن	۴. تولید پساب‌های آلوده در حین فراوری کانسنگ
۵. ناپایداری و نشست زمین	۵. آلودگی خاک
۶. شکسته شدن سدها و شیب‌های ناپایدار	۶. فروشست آلاینده‌ها از باطله‌ها، نرمه‌ها و مناطق آلوده
۷. برجای ماندن تجهیزات معدنکاری و سازه‌های معدنی بر روی زمین	۷. آلودگی هوا در اثر گسیل مواد آلاینده از سایت معدنی یا واحدهای فراوری کانسنگ و از بین رفتن پوشش گیاهی

## ۲-۸-۱- اثرات زیست‌محیطی باطله‌های حاصل از معدنکاری

به طور کلی هر سه مرحله عملیات معدنکاری یعنی استخراج، فرآوری و استحصال با تولید باطله همراه هستند. سنگ‌های باطله حاصل از استخراج و همچنین باطله‌های حاصل از فرآیند فرآوری، رایج‌ترین باطله‌های معدنی هستند (Lottermoser, 2010). باطله‌هایی که در عملیات معدنکاری ایجاد می‌شوند و یا نرمه‌هایی که در اثر فرآوری مواد معدنی تولید می‌شوند به طور معمول دارای غلظت بالایی از فلزات هستند. همچنین بسته به نوع فرآیند به کار رفته، نوع کانسنگ فرآوری شده و یا نوع

مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته، حجم و مقدار باطله و همچنین مقدار فلز موجود در آنها متغیر است. مواد باطله تولید شده به علت دانه ریز بودن راحت تر تحت تأثیر فرسایش قرار می گیرند و در نتیجه میزان آلودگی توسط آنها بسیار بالا است. بنابراین منبع بالقوه ای برای آلودگی محیط پیرامون به عناصر بالقوه سمی به حساب می آیند (Siegel, 2002). مهم ترین اثرات زیست محیطی باطله های معدنکاری عبارتند از:

۱- رهاسازی آلاینده های فلزی در محیط: فلزات موجود در باطله های معدنی به وسیله فرآیندهای مختلفی مانند هوازدگی، آبشویی و حمل ذرات وارد محیط می شوند و در نتیجه باعث آلودگی آب، خاک و گیاهان به عناصر فلزات سنگین می شوند (Singh et al, 2005). میزان آزاد شدن فلزات از باطله ها به ویژگی های کانی شناختی و شیمیایی آنها، نوع رخداد فلزات (سولفیدی یا غیرسولفیدی) و شرایط زمین شناختی و هیدرولوژیکی محیط بستگی دارد (قشلاقی، ۱۳۸۸).

۲- تولید زهاب اسیدی معدن، مخرب ترین اثر زیست محیطی باطله ها و پسماندهای معدنکاری به حساب می آید. این محلول اسیدی می تواند با سایر کانه ها و سنگ ها واکنش شیمیایی داده و ترکیبی از عناصر را به وجود آورد که ممکن است اثرات جدی زیست محیطی را بر محیط اطراف داشته باشد. امکان تولید زهاب اسیدی در معادن حاوی کانی های سولفیدی و معادن زغال سنگ بسیار زیاد است ولی به طور معمول در معادنی با سنگ میزبان کربناته ایجاد نمی شوند. زهاب اسیدی معدن در اثر اکسیداسیون کانی های سولفیدی (به ویژه پیریت) در طی یک سری واکنش های خودکاتالیزی ایجاد می شود که اکسیژن موجود در واکنش به وسیله هوا و آب موجود در واکنش توسط بارش های جوی تأمین می شود (Lottermoser, 2010).

## ۲-۹- مروری بر مطالعات پیشین در جهان

تاکنون مطالعات متعددی بر روی آلودگی‌های فلزی در محیط‌های اطراف معادن انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات، علاوه بر خاک، غلظت فلزات در سایر محیط‌های متأثر از آلودگی چون رسوبات رودخانه‌ای، منابع آب زیرزمینی، گیاهان و آب‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش به تعدادی از این مطالعات اشاره می‌شود.

نتایج تحقیق لیائو و همکاران (Liao et al. 2008) برای خاک‌های اطراف معدن سرب و روی هونان در چین نشان داد که منطقه بر حسب نوع آلودگی در اثر فعالیت معدنکاری، به چهار ناحیه آلوده به مواد باطله، آلوده به مواد اسیدی زهکشی شده از معدن، آلوده به رسوبات حاصل از گردوغبار و آلوده به مواد پراکنده شده در مسیر حمل‌ونقل قابل تقسیم است. در نهایت غلظت فلزات سرب، روی، کادمیم، مس و آرسنیک بالاتر از حد مجاز بدست آمد.

اوبیارا و همکاران (Obiara et al. 2016) مطالعه‌ای جهت ارزیابی آلودگی معدن سرب و روی در معدن اینگبا در نیجریه انجام دادند. نتایج حاکی از آلودگی فلزات سرب، روی، کادمیم و کروم در خاک‌های منطقه است. ضریب غنی‌شدگی فلز سرب بسیار بالا بدست آمد و در مرحله بعد فلزات کادمیم و روی قرار دارند که به ترتیب ضریب غنی‌شدگی قابل ملاحظه و متوسط نشان می‌دادند.

در محدوده معدن سرب و روی آرزو در نیجریه، خاک نزدیک معدن و خاک جنگلی (به عنوان شاهد) جهت ارزیابی فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه غلظت فلزات Zn, Cd, Pb و در خاک‌های نزدیک معدن بالاتر از غلظت این فلزات در خاک شاهد بوده که نشان‌دهنده تأثیر معدنکاری و دورریزی باطله‌ها بر غلظت این فلزات خاک‌ها است (Ikenaka et al. 2010).

در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معدن مس تورو (Touro) در شمال غربی اسپانیا انجام گرفت، غلظت کل فلزات Cr, Cd, Mn, Ni, Pb, Zn در بخش زیست‌دسترس‌پذیر آنها با استفاده از روش استخراج ترتیبی تعیین شد. سنگ‌های منطقه شامل آمفیبولیت، با مقدار قابل توجهی از سولفیدهای فلزی مانند پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت است. نتایج

نشان داد که غلظت کل مس از (۲۴۲۹ mg/kg - ۱۰۴) تغییر می‌کند که بالاتر از حد مجاز است و همچنین مشخص شد که بیشترین غلظت فلزات سنگین نیز در فاز باقی‌مانده حضور دارد (Arenas-Lago, 2014).

در پژوهشی که توسط عبدالله الذهیری و همکاران (Abdellah EL Azhari et al, 2017) در خاک و رسوبات اطراف معدن سرب منطقه زئیدا در شمال شرقی مراکش صورت گرفت، مشخص شد که غلظت Pb در نمونه‌های خاک و رسوب حد مجاز بالاتر رفته و انتظار می‌رود که تأثیرات مخربی روی ارگانسیم‌های آبی و گیاهان داشته باشد. بر اساس مقایسه با حد مجاز سمیت، آلوده‌ترین نمونه‌های گیاهی در اطراف باطله‌های معدنی یافت شدند. نتیجه‌ی تحلیل خوشه‌ای در این پژوهش به این صورت است که: (۱) Pb و Zn موجود در رسوبات از باطله‌های معدنی رها شده مشتق می‌شوند و به طور عمده به صورت ذرات جامد حمل شده و به رسوبات بستر منتقل می‌شوند. (۲) Cu, Zn, Pb در سیستم خاک و گیاه مرتبط با پراکندگی مواد معدنی بوده، در حالی که Cd, As در هر دو سیستم خاک-گیاه و آب-رسوب از زمینه‌های طبیعی منطقه نشأت گرفته‌اند.

در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین، در اطراف معدن سرب Murgal در ترکیه انجام گرفت، نمونه‌برداری از خاک و خزه، در نزدیکی معدن و در فواصل مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های خزه و خاک، حاوی غلظت بالایی از Pb, Al, V, Cr, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn, As هستند و مقایسه غلظت آنها با مقادیر مجاز برای سلامت انسان، نشان داد که آلودگی فلزی در منطقه در حد بحرانی قرار دارد (Koz et al., 2012).

مطالعه ناوارو و همکاران (Navarro et al, 2008) حاکی از آن بود که عملیات معدنکاری در منطقه Cabezo Rajao (شمال شرق اسپانیا) شامل آسیاب کردن و تغلیظ سنگ معدن و دورریزی غیر استاندارد مواد باطله همراه با پساب معدن باعث بالارفتن غلظت فلزات بویژه سرب و روی در خاک‌های سطحی اطراف معدن شده است. همچنین مشخص شد که وجود ماده آلی زیاد و کربنات بالا در نمونه‌های خاک تمرکز و تثبیت فلزات را در اطراف معدن تشدید کرده است.

## ۲-۱۰- مروری بر مطالعات پیشین در ایران

نتایج ارزیابی آلودگی خاک در اطراف معدن سرب متروکه آی قلعه‌سی توسط آذرپیکان (۱۳۹۳) در جنوب منطقه تکاب نشان داد که میانگین غلظت فلزات مس، کادمیم، روی، آرسنیک به ترتیب ۹/۱، ۲، ۸/۶ و ۱/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. در نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها غلظت فلزات به جز Cd نسبت به استاندارد جهانی بالاست. در نمونه‌های خاک اطراف معدن نیز غلظت فلزات بالاست و با دور شدن از رگه‌های معدنی و معدن متروکه از غلظت آنها کاسته می‌شود. در نمونه‌های شاهد غلظت فلزات As, Zn, Pb, Ag نسبت به متوسط خاک جهانی بالاست که این امر نشان‌دهنده بالا بودن غلظت زمینه این عناصر در منطقه می‌باشد. خاک منطقه از نظر شاخص‌های زمین انباشت، ضریب غنی‌شدگی، ضریب آلودگی و درجه آلودگی و شاخص بار آلودگی برای عناصر Pb, Zn در اطراف محدوده معدنی دارای آلودگی بالا تا بی‌نهایت است. بر اساس ضریب همبستگی عناصر Cu, Zn, Pb, Ag دارای همبستگی بالایی هستند.

در مطالعه‌ای که توسط بختیاری (۱۳۹۳) در خاک‌های سطحی در اطراف معدن منگنز در استان قم صورت گرفت مشخص شد که میانگین غلظت منگنز، سرب، روی، مس و نیکل در نمونه‌ها به ترتیب ۶۲/۷۵، ۱۶/۷۴، ۶/۴۲، ۹۱/۲۱، ۷۱/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. میانگین غلظت منگنز و سرب بیشتر از حد آستانه این فلزات در خاک بوده و غلظت مس، روی و نیکل پایین‌تر از حد آستانه بدست آمد. نتایج تحلیل چند متغیره نیز نشان داد منگنز، سرب، مس و روی عمدتاً از منبع معدنی نشات گرفته‌اند، در صورتی که به نظر می‌رسد حضور نیکل در خاک تحت تأثیر منابع طبیعی است.

مطالعات قشلاقی (۱۳۸۸) بر روی اثرات زیست‌محیطی معدن سرب و روی انگوران (شمال شرق زنجان) نشان داد که فعالیت این معدن باعث افزایش غلظت فلزاتی چون سرب، روی، کادمیم و آنتیمونی در خاک‌های اطراف معدن شده است. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که گرچه بخشی از این فلزات در زمینه ژئوشیمیایی منطقه غلظت بالایی را نشان می‌دهند، اما فعالیت

معدنکاری همراه با تخلیه باطله‌های معدنی باعث افزایش غلظت این فلزات در خاک‌های پیرامونی شده است.

مطالعه چراغی و بلمکی (۱۳۸۶) بر روی اثرات زیست‌محیطی فعالیت معدن سرب آهنگران مشخص ساخت که غلظت که فلزات سرب، نیکل، کرم و مس در برخی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری از خاک، بیش از زمینه طبیعی آنها است. همچنین یافته‌های آنها نشان داد فعالیت‌های معدن کاری، خصوصاً تخلیه باطله‌های معدنی، اثرات قابل‌ملاحظه‌ای بر سیمای محیطی منطقه حفاظت شده لشگردر و پوشش گیاهی و جانوری داشته است.

در مطالعه ایی که توسط بابایی و خدای (۱۳۹۷) بر روی آلودگی خاک در اطراف معدن سرب و روی مهدی‌آباد (استان یزد) صورت گرفت مشخص شد که اکثر نمونه‌ها از نظر آلودگی فلزی در رده غیرآلوده تا کمی آلوده قرار دارند. همچنین فلز سرب با حداکثر میزان شاخص فاکتور تجمع در رده‌ی غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید قرار می‌گیرد.

مطالعه رخ بر (۱۳۹۶) بر روی خاک‌های گلخانه ایی اطراف معدن سرب و وی ایرانکوه (استان اصفهان) نشان داد که غلظت سه فلز Zn، Pb و Cd در نمونه‌های خاک در اثر فعالیت‌های معدنکاری به شدت افزایش یافته است و با نزدیک شدن به سد باطله بر درجه آلودگی هر سه فلز افزوده می‌شود. همچنین مشخص شد این سه فلز با سایر فلزات هم‌بستگی ضعیفی داشته و از بین خواص خاک نیز با درصد رس هم‌بستگی معناداری نشان می‌دهند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از روش استخراج تک مرحله ایی با استفاده از DTPA، معلوم شد که سهم غلظت دسترس‌پذیر از غلظت کل برای فلز Cd از دو فلز دیگر بیش‌تر است.





# فصل سوم

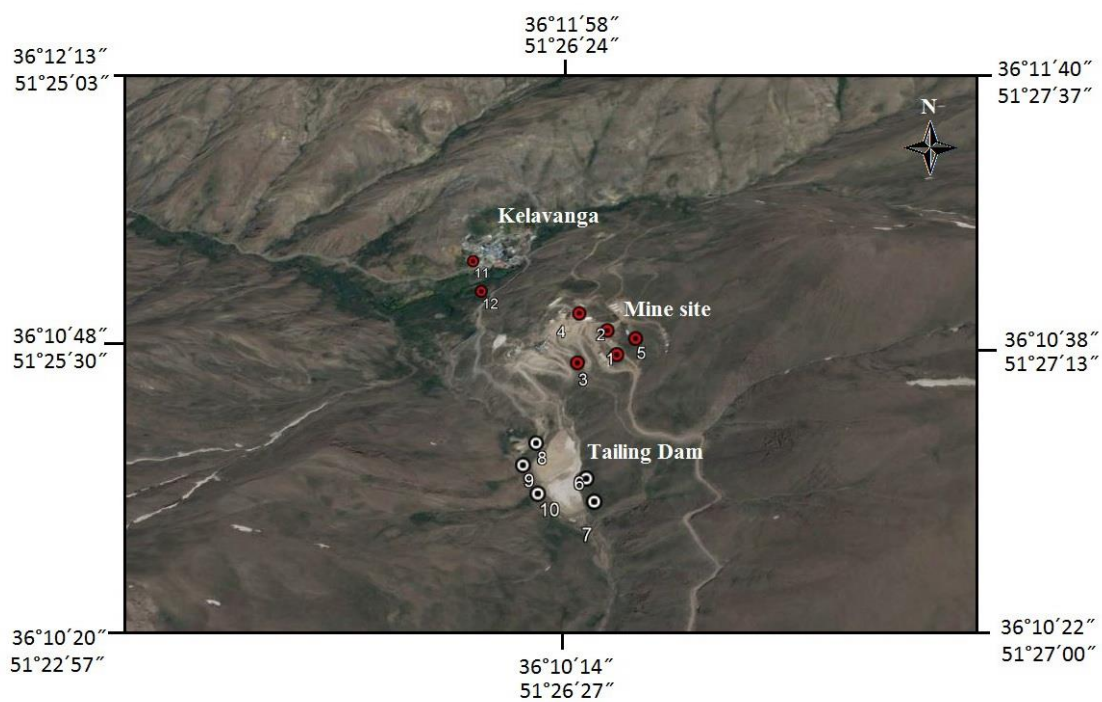
## مواد و روش ها

### ۳-۱- مقدمه

در هر مطالعه علمی، جهت دستیابی به نتایج صحیح می‌باید روش و شرایط نمونه‌برداری و همچنین روش تجزیه نمونه‌ها و تحلیل داده‌ها از مسیری مناسب و استاندارد پیش رود. این مسئله بویژه در محیط‌های متأثر از آلودگی و مطالعات زیست‌محیطی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این فصل به نحوه‌ی نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های استاندارد تعیین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک، اندازه‌گیری غلظت فلزات در نمونه‌های خاک اشاره می‌شود. در انتها نیز به برخی از شاخص‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده در ارزیابی آلودگی خاک و همچنین روش‌های آماری به کار رفته در این تحقیق اشاره خواهد شد.

### ۳-۲- نمونه‌برداری از خاک

نمونه‌برداری یکی از مراحل مهم هر پژوهش است. پیش از نمونه‌برداری باید هدف یا اهداف نمونه‌برداری را مشخص کرد. هدف از انجام این مطالعه، بررسی میزان آلودگی فلزی و همچنین تعیین منشأ احتمالی فلزات سنگین در خاک اطراف معدن سرب و روی دونا است. جهت دستیابی به این هدف پس از مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه و همچنین استفاده از تصاویر گوگل ارث (شکل ۳-۱-الف) محدوده نمونه‌برداری روی نقشه تعیین گردید. نمونه‌برداری از خاک اطراف معدن و کارخانه فرآوری در اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ انجام شد. در مجموع ۱۲ ایستگاه برای نمونه‌برداری از خاک به صورت تصادفی انتخاب شد. نمونه‌ها از عمق حدود ۲۰ سانتی‌متری برداشت گردیدند. همچنین از چند کیلومتری معدن نیز نمونه خاک به عنوان نمونه شاهد برداشت گردید. موقعیت هر ایستگاه نمونه‌برداری توسط دستگاه GPS ثبت شد (جدول ۳-۱). سپس نمونه‌های خاک و سنگ در کیسه‌های نایلونی ریخته شد و در محل کدگذاری گردیدند (شکل ۳-۱-ب).



شکل ۳-۱- الف: موقعیت نقاط نمونه‌برداری از خاک در اطراف معدن سرب دونا



شکل ۳-۱- ب: نمایی از روش نمونه‌برداری از خاک اطراف سد باطله

جدول (۱-۳) مختصات و مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری از خاک در اطراف معدن سرب دونا

شماره ایستگاه	محل ایستگاه	عرض جغرافیایی (UTM)	طول جغرافیایی (UTM)
۱	اطراف معدن	۴۰۰۴۴۶۹	۵۳۹۹۷۳
۲	اطراف معدن	۴۰۰۴۴۷۹	۵۳۹۹۰۷
۳	اطراف معدن	۴۰۰۴۳۵۱	۵۳۹۸۹۶
۴	اطراف معدن	۴۰۰۴۳۰۰	۵۳۹۶۴۲
۵	اطراف معدن	۴۰۰۴۳۶۲	۵۳۹۷۱۲
۶	اطراف معدن	۴۰۰۴۱۲۰	۵۳۹۶۴۶
۷	اطراف سد باطله	۴۰۰۳۹۷۰	۵۳۹۷۳۲
۸	اطراف سد باطله	۴۰۰۴۰۵۸	۵۳۹۵۸۱
۹	اطراف سد باطله	۴۰۰۳۹۷۰	۵۳۹۷۳۲
۱۰	اطراف سد باطله	۴۰۰۴۰۸۹	۵۳۹۶۵۲
۱۱	(نمونه شاهد) نزدیک روستا کلاونگا	۴۰۰۵۰۲۹	۵۳۹۳۲۰
۱۲	اطراف رودخانه الیکا	۴۰۰۴۱۱۲	۵۳۹۵۸۷

### ۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌های خاک به علت رطوبت بالا، به مدت ۴ روز در معرض هوای آزاد قرار داده شدند تا خشک شوند. سپس قطعات سنگی از نمونه‌ها جدا شده و با استفاده از هاون دستی از جنس عقیق پودر گردیدند. در مرحله‌ی بعد نمونه‌ها ابتدا با استفاده از الک ۲ میلی‌متر (۱۰مش) الک گردیدند تا قطعات درشت آن حذف گردد. سپس جزیی از خاک که از الک ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) عبور کرد برای آنالیز فلزات سنگین در نظر گرفته شد.

### ۳-۴- اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک

در این پژوهش برخی از پارامترهای کیفی نمونه‌های خاک شامل pH و ماده آلی اندازه‌گیری گردیدند که در زیر به روش اندازه‌گیری آنها اشاره شده است.

### ۳-۴-۱- اندازه‌گیری pH نمونه‌های خاک

برای اندازه‌گیری pH خاک از روش ۹۰۴۵D سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا استفاده شد (USEPA, 2004). بر اساس این روش pH خاک در آب مقطر با نسبت جامد به محلول ۱:۲ و پس از تعادل رسیدن به مدت ۱ ساعت با دستگاه pH متر کالیبره شده اندازه‌گیری می‌شود. در آزمایشگاه ابتدا مقدار ۲۰ گرم از خاک عبور داده شده از الک ۱۰ مش توسط ترازوی دقیق وزن گردیده و سپس در ۲۵۰ میلی‌متر ریخته شد و در نهایت ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به هر نمونه اضافه گردید. ارلن‌ها به مدت ۵ دقیقه بر روی همزن قرار گرفته و پس از آن به مدت یک ساعت کنار گذاشته شدند تا رس‌های معلق از محلول ته‌نشین شوند. سپس pH محلول‌ها با استفاده از pH متر کالیبره شده (مدل Jenway) اندازه‌گیری شد (شکل ۳-۲). مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری pH نمونه‌های خاک با طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس میزان pH (طبقه‌بندی انجمن خاک آمریکا) مقایسه شد (جدول ۳-۲).



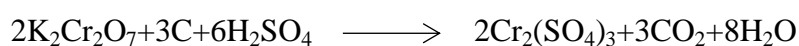
شکل ۳-۲- اندازه‌گیری pH نمونه‌های خاک در آزمایشگاه

جدول (۲-۳) طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس میزان pH (Soil Science Society of American., ) pH (1997)

pH	شرح
<۴/۵	به شدت اسیدی
۴/۶ - ۵/۵	اسیدی خیلی زیاد
۵/۶ - ۶	اسیدی زیاد
۶/۱ - ۶/۵	نسبتاً اسیدی
۶/۶ - ۷/۳	خنثی
۷/۴ - ۷/۸	کمی قلیایی
۷/۹ - ۸/۴	نسبتاً قلیایی
۸/۵ - ۹	قلیایی خیلی زیاد
>۹/۱	به شدت قلیایی

### ۲-۴-۳ - اندازه‌گیری مقدار ماده آلی نمونه‌های خاک

در این مطالعه برای تعیین میزان ماده آلی نمونه‌های خاک از روش والکی و بلاک (Walkley and Black, 1934) استفاده شد. در این روش خاک با اسیدسولفوریک غلیظ و بیکرومات در تماس قرار داده می‌شود و بعد از اتمام واکنش اکسیداسیون و احیا مقادیر اضافی بیکرومات باقیمانده با فروآمونیم سولفات تیترو می‌گردد. برای انجام این روش، ابتدا ۱ گرم خاک عبور داده شده از الک ۰/۵ میلی‌متر را در ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتر ریخته و به آن ۱۰ میلی‌لیتر دی‌کرومات پتاسیم ۱ نرمال اضافه می‌کنیم و به آرامی تکان داده تا ذرات آن در محلول پراکنده شود. سپس ۲۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ را خیلی سریع و بطور مستقیم به محلول اضافه کرده و به آرامی به مدت ۱ دقیقه تکان داده تا خاک با محلول‌ها مخلوط گردد و سپس به مدت ۳۰ دقیقه به صورت سکون رها می‌گردد. از نظر تئوری در این مرحله رابطه زیر برقرار است.



در مرحله بعد ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به محلول اضافه نموده و بعد از سرد شدن به آن ۱۰ قطره معرف ارتوفنانترویلین ۰/۲۵ گرم در لیتر اضافه شد و با فروآمونیم سولفات ۵/۵ نرمال تیترو گردید.

نزدیک به مراحل انتهایی تیتراسیون رنگ محلول سبز کدر می‌شود که با اضافه کردن چند قطره اضافی فروآمونیوم سولفات در مجاورت معرف به رنگ قرمز درمی‌آید. همه مراحل انجام شده، برای نمونه تهی (نمونه فاقد خاک) نیز تکرار شد در نهایت درصد ماده آلی توسط رابطه زیر محاسبه گردید:

$$OM\% = M \times 0.39 \times \{(V1 - V2) / S\}$$

در این رابطه، M نرمالیه فروآمونیوم سولفات، V1 حجم فروآمونیوم سولفات مصرفی برای نمونه تهی (برحسب میلی لیتر)، V2 فروآمونیوم سولفات مصرفی برای نمونه مجهول (برحسب میلی لیتر) و S وزن خاک خشک شده در هوای آزاد است. در شکل ۳-۳ نمایی از مراحل مختلف اندازه‌گیری ماده آلی در آزمایشگاه آورده شده است.



شکل ۳-۳- اندازه‌گیری مقدار ماده آلی نمونه‌های در آزمایشگاه

### ۳-۵- آنالیز XRD نمونه‌های خاک

به منظور شناسایی کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک، ۴ نمونه از خاک‌های برداشت‌شده انتخاب شدند و برای تجزیه به روش پراش پرتوایکس به آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران ارسال گردیدند.

### ۳-۶- تجزیه فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

برای تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک حدود ۲۰ گرم از کسر ریز اندازه (سیلت و رس) عبور داده شده از الک ۲۰۰ مش جدا و برای تعیین غلظت عناصر توسط دستگاه ICP-OES به آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران ارسال گردید.

### ۳-۷- تهیه مقطع نازک از نمونه‌های سنگ

به‌منظور شناسایی کانی‌های موجود در سنگ‌های اطراف معدن، نمونه‌برداری از سنگ نیز صورت گرفت. ۸ نمونه سنگ میزبان و باطله از نقاط مختلف برداشت شد. نمونه‌ها به کارگاه مقطع دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود انتقال داده شد و مقاطع میکروسکوپی صیقلی و دوبر صیقل از آنها تهیه گردید.

### ۳-۸- استخراج ترتیبی فلزات در نمونه‌های خاک

در این تحقیق به منظور استخراج فلزات متصل به فازهای مختلف خاک بر روی ۴ نمونه خاک (۲) نمونه از اطراف محل معدنکاری و ۲ نمونه از اطراف سد باطله)، روش استخراج ترتیبی مرحله‌ای BCR (Community Bureau of Reference) انجام گردید. در این روش، ۴ فاز اصلی خاک یعنی فاز تبادل‌پذیر/ انحلال‌پذیر، فاز کاهش‌پذیر (متصل به اکسیدهای آهن و منگنز)، فاز اکسایش‌پذیر (متصل به ماده آلی و سولفیدها) و فاز باقی‌مانده (متصل به شبکه بلوری کانی‌ها)، با استفاده از معرف‌ها و واکنشگرهای مخصوص، به صورت عملیاتی استخراج می‌گردد. در جدول ۳-۳ مراحل انجام این آزمایش به اختصار توضیح داده شده است.



جدول (۳-۳) روش استخراج چهار مرحله‌ای BCR (Ure et al., 1993)

مرحله	فاز	شرایط آزمایشگاهی
۱	فاز اول (تبادل پذیر/متصل به کربنات)	۴۰ میلی‌لیتر استیک اسید (۰/۱۱ مولار)، دما ۲۵ C°، ۱۶ ساعت روی شیکر، سانتیوفاژ در دور ۴۰۰۰ برای مدت ۱۰ دقیقه
۲	فاز دوم (متصل به اکسیدهای آهن و منگنز)	۴۰ میلی‌لیتر هیدروکسیل آمین هیدروکلراید (۰/۵ مولار)، pH<1.5، دما ۲۵ C°، ۱۶ ساعت روی شیکر، سانتیوفاژ در دور ۴۰۰۰ برای مدت ۱۰ دقیقه
۳	فاز سوم (متصل به ماده آلی)	۱۰ میلی‌لیتر دی‌اکسید هیدروژن (۳۰ درصد)، دما ۸۵ C°، ۵۰ میلی‌لیتر آمونیوم استات (۱ مولار)، دما ۲۵ C°، ۱۶ ساعت روی شیکر، سانتیوفاژ در دور ۴۰۰۰ برای مدت ۱۰ دقیقه
۴	فاز چهارم (باقی‌مانده)	۱۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک + ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک + ۲ میلی‌لیتر اسید فلوریدریک، دما ۹۵ C°، دو ساعت

### ۳-۹- ضریب تحرک پذیری فلزات

به منظور ارزیابی تحرک و انحلال پذیری فلزات سنگین در خاک، معمولاً از ضریب تحرک پذیری (MF)

استفاده می‌شود که از زیر محاسبه می‌گردد: (Kabala and Singh, 2001)

$$MF = \frac{F_1}{\sum \text{Fractions}} \times 100$$

که در این رابطه  $F_1$ ، فلزات موجود در فاز تبادل پذیر/ انحلال پذیر (متصل به کربنات) است، بیشترین تحرک را نسبت دیگر فازهای خاک دارند و جذب گیاهان می‌شوند و  $\sum \text{Fraction}$ ، مجموع فلزات موجود در ۴ فاز ژئوشیمیایی خاک، هستند.

### ۳-۱۰- ارزیابی آلودگی فلزی در نمونه‌های خاک با استفاده از شاخص

#### های مختلف ژئوشیمیایی

جهت ارزیابی کمی میزان آلودگی در خاک‌ها از اندیس‌ها و برگ خریدهای ژئوشیمیایی خاص استفاده می‌شود. در این مطالعه از ۲ اندیس شامل ضریب زمین‌انباشت و ضریب غنی‌شدگی استفاده شد.

#### ۳-۱۰-۱- ضریب زمین‌انباشت (Geoaccumulation Index)

ضریب زمین‌انباشت اولین بار توسط مولر (Muller, 1969) برای ارزیابی آلودگی رسوبات به فلزات بالقوه سمی مورد استفاده قرار گرفت. این ضریب از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{geo} = \text{Log}_2(c_n / 1.5 B_n)$$

که در آن Cn غلظت فلز در نمونه‌های خاک مورد مطالعه و Bn غلظت فلز در ماده زمینه است. ضریب ۱/۵ برای تصحیح تغییرات ناشی از تغییرات سنگ‌شناختی استفاده می‌شود. مولر ضریب زمین انباشت را به ۶ رده زیر تقسیم کرده است (جدول ۳-۴):

جدول (۳-۴) شدت آلودگی در نمونه‌های خاک بر اساس شاخص زمین انباشت (Muller, 1969)

مقدار	رده	درجه آلودگی
≤۰	۰	ناآلوده
۱-۰	۱	ناآلوده تا آلودگی متوسط
۱-۲	۲	آلودگی متوسط
۲-۳	۳	آلودگی متوسط تا شدید
۳-۴	۴	آلودگی شدید
۴-۵	۵	آلودگی شدید تا بی‌نهایت
>۵	۶	آلودگی بی‌نهایت

در این مطالعه شاخص زمین‌انباشت نسبت به شیل میانگین و همچنین نمونه مرجع (شاهد) محاسبه گردید.

### ۳-۱۰-۲- ضریب غنی‌شدگی (Enrichment factor)

در همه‌ی مطالعات ژئوشیمیایی و ارزیابی آلودگی‌های زیست‌محیطی، تشخیص منشأ فلزات (انسان‌زاد یا زمین‌زاد) ضروری است (Selvaraj et al., 2004). ضریب غنی‌شدگی در مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی، یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی میزان تمرکز فلزات سنگین است که برای تشخیص منشأ فلز و ارزیابی درجه آلودگی خاک، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب از نسبت غلظت فلز مورد نظر در نمونه‌های خاک مورد مطالعه، به غلظت همان فلز در ماده مرجع به دست می‌آید. غلظت فلز مورد نظر را باید با یک فلز مرجع که کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد قرار گرفته است، به هنجار کرد. ضریب غنی‌شدگی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$EF = (M_{\text{sample}} / N_{\text{sample}}) / (M_{\text{background}} / N_{\text{background}})$$

در رابطه بالا،  $Ef$  ضریب غنی‌شدگی،  $M_{sample}$  غلظت فلز در نمونه خاک،  $N_{sample}$  غلظت فلز به هنجار در خاک،  $M_{background}$  غلظت فلز در ماده زمینه،  $N_{background}$  غلظت فلز به هنجار در ماده زمینه است. نکته مهمی که در این شاخص باید بر آن تأکید داشت. انتخاب صحیح عنصر مرجع و ماده یا نمونه زمینه است که در تعیین شدت آلودگی واقعی مؤثر است. به طور معمول در پژوهش‌های زیست‌محیطی از عناصری چون  $Al, Fe, Zr, Ti$  به عنوان عنصر به هنجار کننده استفاده می‌شود. در این پژوهش به منظور نرمال‌سازی ژئوشیمیایی عناصر مورد بررسی، از عنصر تیتانیوم به عنوان عنصر به هنجار کننده و همچنین از ترکیب پوسته میانگین به عنوان نمونه مرجع (زمینه) استفاده شد. در نمونه‌های خاک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه، تغییرات غلظت تیتانیوم نسبت به روند تغییرات دیگر عناصر، بسیار ناچیز و یکنواخت بوده است. در جدول ۳-۵- رده بندی ضریب غنی‌شدگی و میزان آلودگی بر مبنای مقدار عددی ضریب غنی‌شدگی آورده شده است.

جدول (۳-۵) رده آلودگی بر اساس مقادیر ضریب غنی‌شدگی (Chen et al., 2000)

شدت غنی‌شدگی	EF
بدون غنی‌شدگی تا غنی‌شدگی اندک	< ۱
غنی‌شدگی متوسط	۲-۵
غنی‌شدگی قابل توجه	۵-۲۰
غنی‌شدگی بسیار بالا	۲۰-۴۰
غنی‌شدگی بی‌نهایت بالا	> ۴۰

### ۳-۱۱- تحلیل آماری داده‌ها

در مطالعات زیست‌محیطی، استفاده از روش‌های آنالیز چند متغیره برای تحلیل رابطه بین پارامترهای فیزیکی‌وشیمیایی نمونه‌ها و غلظت فلزات سنگین رایج است. از پرکاربردترین روش‌های آماری دو متغیره می‌توان به روش تحلیل ضرایب همبستگی (Correlation coefficient) اشاره کرد که از این روش برای تعیین روابط احتمالی بین متغیرها استفاده می‌شود.

### ۳-۱۱-۱- ضریب همبستگی (Correlation Coefficient)

در تحلیل همبستگی رابطه (خطی) بین دو متغیر یا چند متغیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تشخیص ارتباط و همبستگی بین عناصر مختلف در ارزیابی‌های زیست‌محیطی مؤثر بوده و با درک این روابط می‌توان به میزان تأثیر تغییرات غلظت یک متغیر یا عامل این تغییرات پی برد. در روش همبستگی، شدت رابطه خطی را با ضریبی به نام ضریب همبستگی ( $r$ ) نشان می‌دهند (Mico et al., 2006). مقدار عددی این ضریب بین  $+1$  و  $-1$  تغییر می‌کند. هرچه ضریب همبستگی به  $+1$  نزدیک‌تر باشد همبستگی بیشتر است و رابطه خطی برقرار است یعنی با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد. اگر ضریب همبستگی به  $-1$  نزدیک‌تر شود، در این صورت دو متغیر همبستگی منفی دارند، به این معنی که با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر کاهش می‌یابد. در این پژوهش بعد از نرمال کردن داده‌ها از روش همبستگی پیرسون استفاده گردید.

### ۳-۱۲- نرم افزارهای به کار رفته جهت تحلیل داده‌ها

برای انجام مطالعات آماری در این پژوهش، از نرم افزارهای MS Excel-2016 و SPSS-12 و برای تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه و همچنین نشان دادن الگوی پراکندگی فلزات سمی در خاک‌های منطقه از نرم‌افزار Arc GIS-9.5 استفاده شد.

فصل چہارم  
تخلیل دادہ

## ۴-۱- مقدمه

در این فصل، به نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت کل فلزات در نمونه‌های خاک و خواص فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی آنها به تفصیل اشاره می‌شود. علاوه بر موارد ذکر شده شدت آلودگی فلزی در نمونه‌های خاک با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت با استفاده از روش‌های آماری، روابط متغیرهای خاک با یکدیگر مورد بررسی خواهد گرفت.

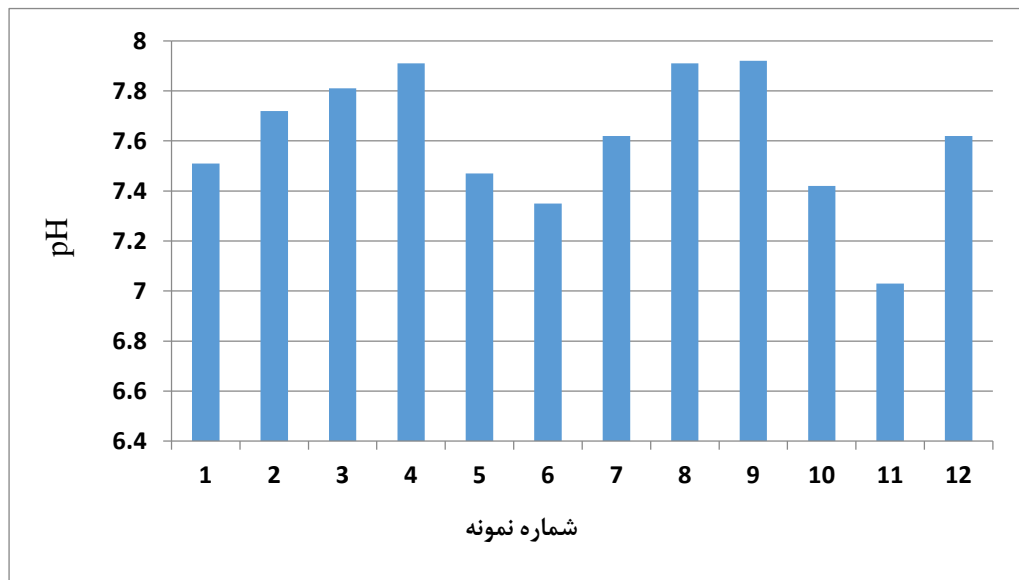
## ۴-۲- بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک

### ۴-۲-۱- pH نمونه‌های خاک

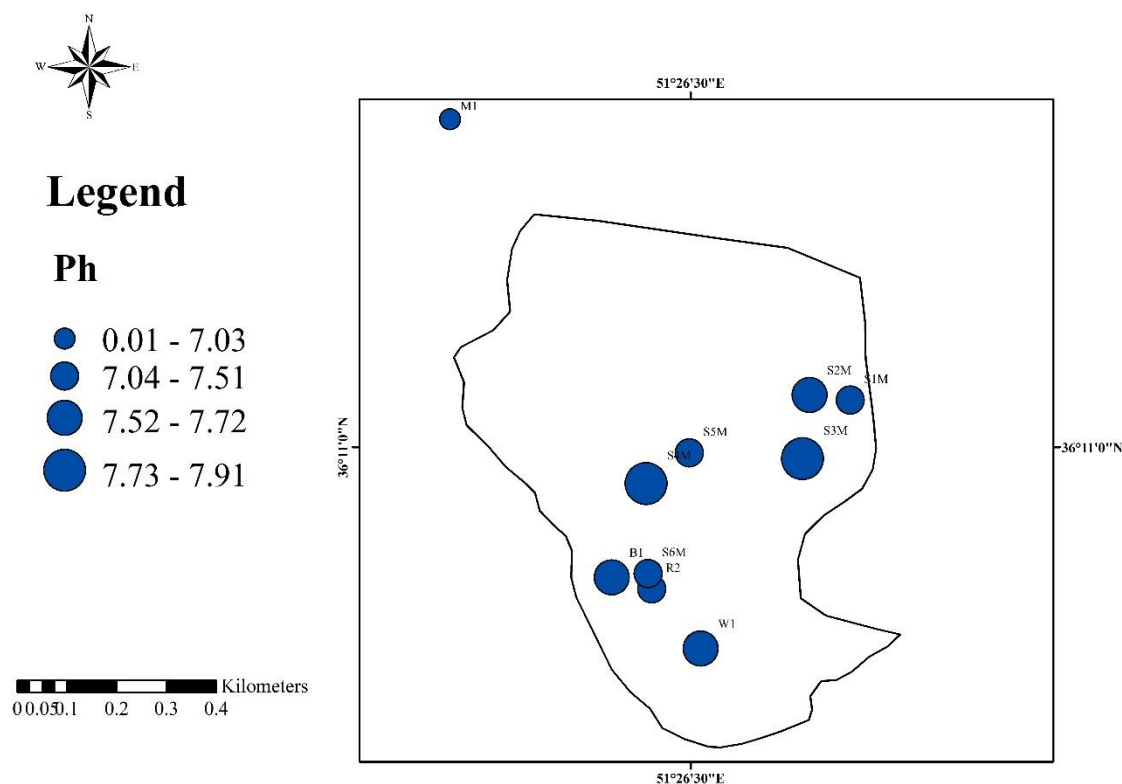
pH تأثیر زیادی بر توزیع و تحرک و دسترس‌پذیری غلظت فلزات در خاک دارد (Akkajit and Tongcumpou., 2010). معمولاً در شرایط اسیدی بیشتر فلزات انحلال‌پذیر هستند و در شرایط قلیایی تمایل به ته‌نشینی دارند. این مسئله به رقابت یون هیدروژن با کاتیون‌ها فلزی در اشغال مکان‌های جذبی در سطح کانی‌های رسی خاک بازمی‌گردد (Kabata-Pendias, 2010). بر اساس نتایج بدست آمده میزان pH نمونه‌های خاک تغییرات چندانی از خود نشان نمی‌دهند و در محدوده بین ۷/۰۳ تا ۷/۹۲ قرار می‌گیرد. همانطور که در جدول (۴-۱) مشاهده می‌شود کمترین میزان pH مربوط به نمونه شماره ۱۲ و بیشترین میزان آن مربوط به نمونه شماره ۷ است. pH برای نمونه‌های نزدیک سد باطله ۷/۹۲ و ۷/۴۲ و برای نمونه‌های خاک اطراف باطله ۷/۶۲ و ۷/۹۱ می‌باشد. بر طبق استاندارد انجمن خاک آمریکا (SSSA, 1997) خاک‌های منطقه مورد مطالعه به طور کلی از نظر pH در رده خاک‌های خنثی تا کمی قلیایی قرار می‌گیرند. وجود سنگ‌های میزبان آهنی تا دولومیتی در اطراف معدن می‌تواند دلیلی بر pH قلیایی نمونه‌های خاک باشد. تغییرات pH نمونه‌های خاک در شکل ۴-۱ (الف و ب) آورده شده است.

جدول (۱-۴) مقادیر pH نمونه‌های خاک

شماره‌ی نمونه	pH
۱	۷/۵۱
۲	۷/۷۲
۳	۷/۸۱
۴	۷/۹۱
۵	۷/۴۷
۶	۷/۳۵
۷	۷/۶۲
۸	۷/۹۱
۹	۷/۹۲
۱۰	۷/۴۲
۱۱ (خاک شاهد)	۷/۰۳
۱۲	۷/۶۲
حداقل	۷/۰۳
حداکثر	۷/۹۲
میانگین	۷/۶۰



شکل ۴-۱-الف: تغییرات pH نمونه‌های خاک در اطراف معدن دونا



شکل ۴-۱-ب: تغییرات pH در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

#### ۴-۲-۲- میزان ماده آلی نمونه‌های خاک

ماده آلی جزو لاینفک هر خاک بوده و بر بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد. اگرچه مقدار ماده آلی در مقایسه با جزئی معدنی خاک بسیار ناچیز می‌باشد (حداکثر ۵ درصد وزنی) ولی همین مقدار کم دارای تأثیر شدیدی بر خواص فیزیکوشیمیایی خاک و همچنین تحرک‌پذیری یا ته‌نشینی فلزات در خاک دارد. همانطور که در جدول (۴-۲) مشاهده می‌شود. میزان ماده آلی در نمونه‌های خاک بازه‌ای بین ۱/۳۸ تا ۲/۶۳ را در بر می‌گیرد.

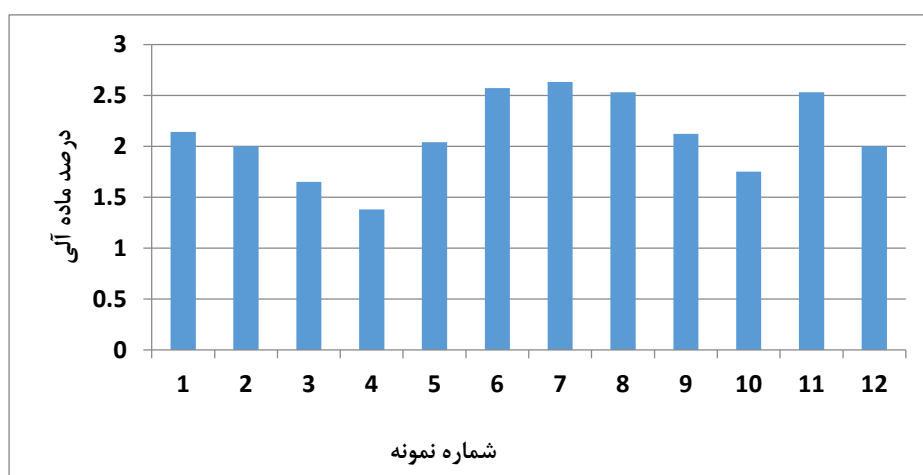


جدول (۲-۴) درصد ماده آلی نمونه‌های خاک مورد مطالعه

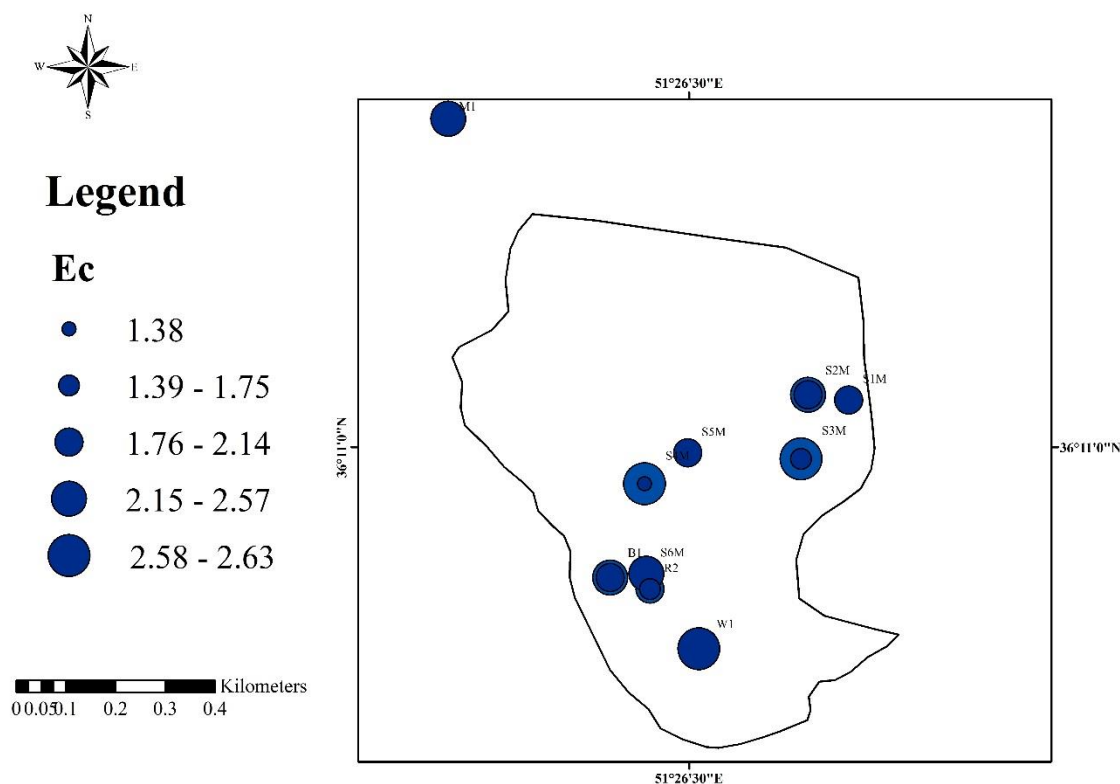
شماره‌ی نمونه	ماده آلی (%)
۱	۲/۱۴
۲	۲/۰۰
۳	۱/۶۵
۴	۱/۳۸
۵	۲/۰۴
۶	۲/۵۷
۷	۲/۴۸
۸	۲/۵۳
۹	۲/۱۲
۱۰	۲/۵۷
۱۱ (خاک شاهد)	۲/۵۳
۱۲	۲/۰۰
حداقل	۱/۳۸
حداکثر	۲/۵۶
میانگین	۲/۱۱

پایین بودن ماده آلی در نمونه‌های خاک منطقه به دلیل کوهستانی بودن منطقه و عدم وجود خاک حاصلخیز در منطقه است. با این حال نمونه شماره ۱۲ که خاک کمی بالغ‌تر است و همچنین در نمونه

خاک شاهد



شکل ۲-۴-الف: تغییرات ماده آلی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه



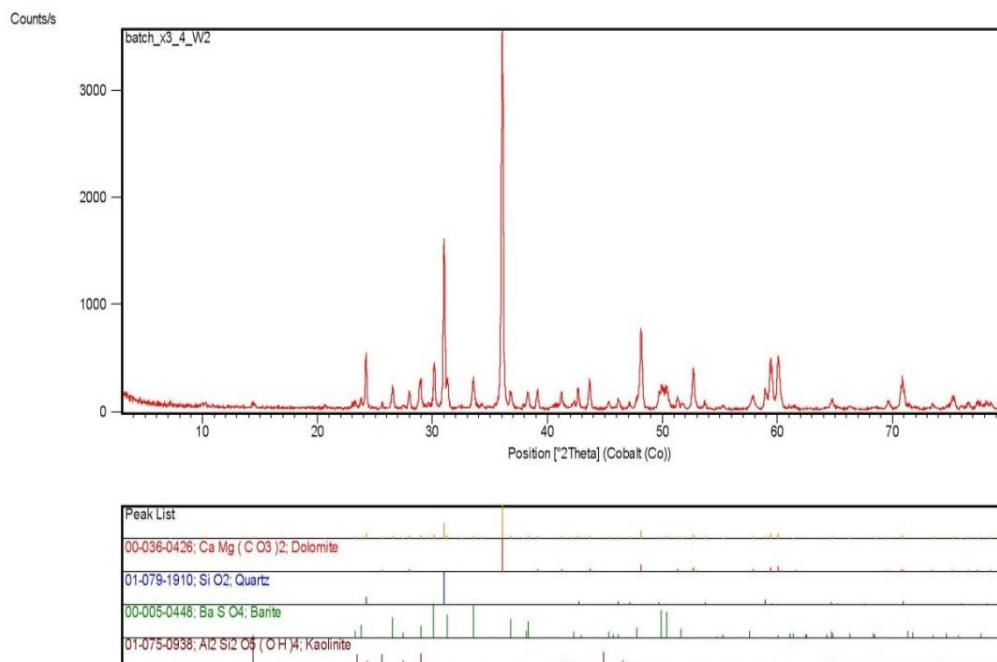
شکل ۴-۲-ب: روند تغییرات ماده آلی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

بر میزان ماده آلی تا حدی افزوده شده است. روند تغییرات ماده آلی در شکل ۴-۲-الف و ب) آورده شده است.

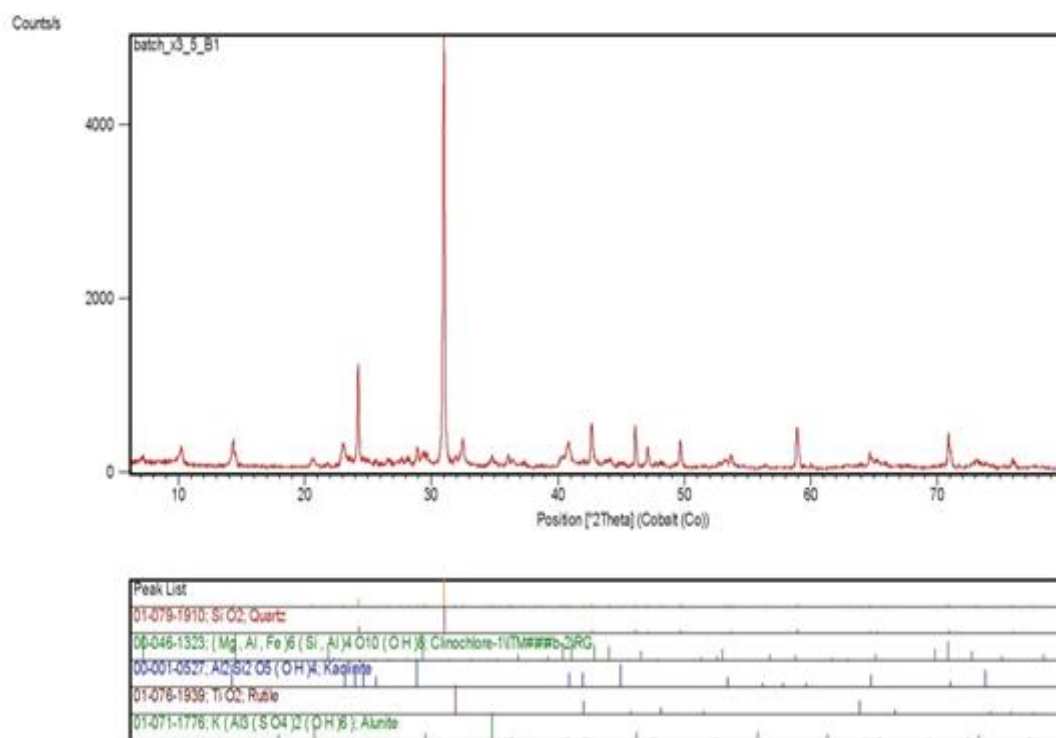
#### ۴-۳- کانی‌شناسی نمونه‌های خاک

به منظور ارزیابی و بررسی کانی‌های موجود در خاک منطقه، از نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. در شکل‌های ۴-۳ (الف، ب، ج و د) پراش‌نگار ۴ نمونه خاک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه آورده شده است. در شکل ۴-۳-الف که مربوط به نمونه خاک برداشت شده از اطراف سد باطله است کانی‌های دولومیت، کوارتز، باریت و کائولینیت حضور دارند. شکل ۴-۳-ب نشان می‌دهد در نمونه خاک شماره ۱۲ که پروفیل آن بالغ‌تر از سایر نمونه‌ها است هیدرواکسیدهای آبدار آلومینیم چون کلینوکلر، کائولینیت و آلونیت (سولفات آلومینیم آبدار) وجود دارند که نشان‌دهنده هوازدگی بیشتر این نمونه است.

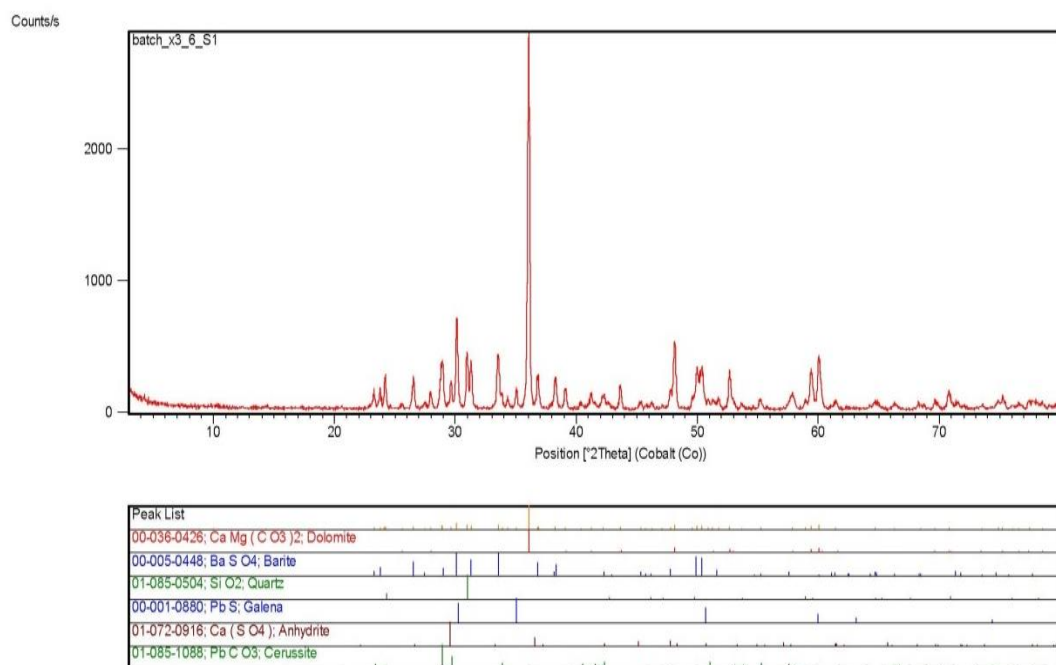
شکل ۳-۴ ج پراش‌نگار یک نمونه خاک اطراف پیت اصلی معدن دونا است که نشان‌دهنده حضور کانی‌های متنوعی چون دولومیت، گالن، باریت، و سرروزیت است که منطبق با کانی‌شناسی سنگ میزبان (دولومیت‌های سازند روته) و همچنین کانسنگ‌های اصلی معدن (گالن و سرروزیت) است. شکل ۳-۴- مربوط به پراش‌نگار یک نمونه خاک نسبتاً نابالغ است که بیانگر حضور کانی‌های مقاوم در برابر هوازدگی چون هماتیت، مسکویت و دولومیت و کوارتز است. در نهایت شکل ۳-۴- ت نیز میزان بالای کوارتز و دولومیت و به میزان کمتر هماتیت را در نمونه خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد.



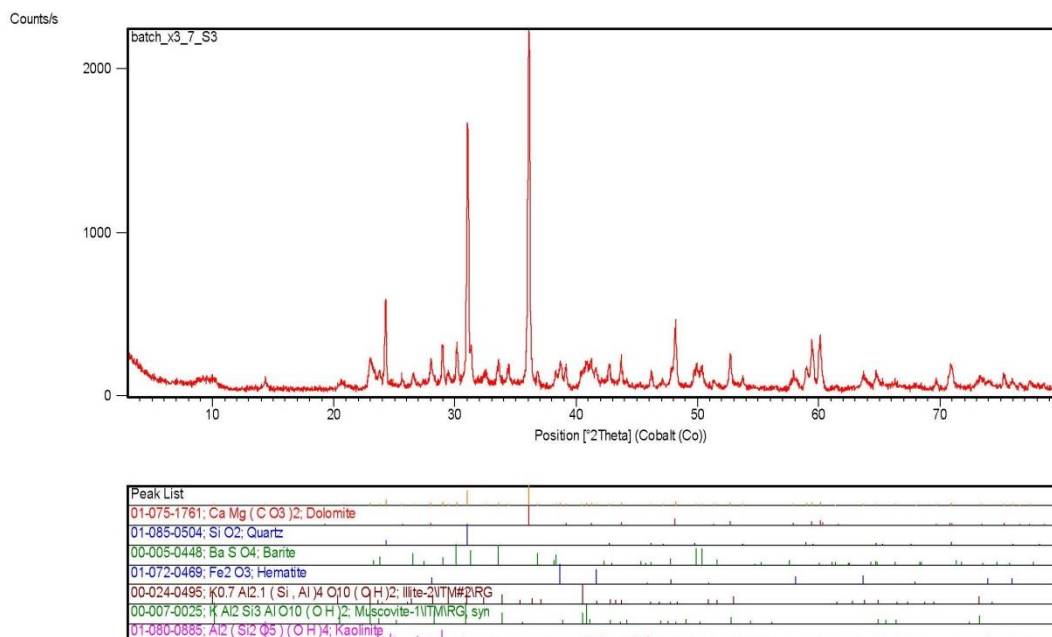
شکل ۳-۴- الف: پراش‌نگار XRD نمونه اطراف باطله معدن سرب دونا



شکل ۴-۳-ب: پراش‌نگار XRD خاک اطراف معدن سرب دونا



شکل ۴-۳-ج: پراش‌نگار نمونه خاک اطراف معدن سرب دونا



شکل ۴-۳-د: پراش نگار نمونه خاک اطراف معدن سرب دونا

## ۴-۴- غلظت کل و ژئوشیمی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

### ۴-۴-۱- توزیع فلزات در نمونه‌های خاک سطحی

غلظت کل فلزات اندازه‌گیری شده (Pb و Zn, Cd, Cu, As, Cr, Ni) در نمونه‌های خاک، در جدول (۳-۴) و نمودار توزیع فلزات و مقایسه آنها با میانگین پوسته‌ای و خاک‌های غیرآلوده جهانی در شکل‌های ۳-۴ (الف، ب، ج، د، و، ز، ح) آورده شده است. شایان ذکر است که به علت بالا بودن غلظت فلزات در برخی نمونه‌های خاک در تمامی نمودارها از مقایس لگاریتمی استفاده شده است. در زیر به تغییرات غلظت هر یک از فلزات پرداخته می‌شود.

جدول (۳-۴) غلظت کل فلزات در نمونه‌های خاک مورد مطالعه (مقادیر بر حسب mg/kg)

Cr	Ni	Cu	Cd	Zn	Pb	شماره نمونه
۲۳	۲۴	۱۶۱۹	۳۶	۴۶۸۳	۵۳۲۳۷	۱
۱۹۴	۱۰۰	۳۳۵	۸	۱۰۷۵	۶۲۹۷	۲
۱۶۲	۷۷	۷۵۲	۴	۲۳۷	۲۲۷۳	۳
۵۹	۳۱	۱۴۷۲	۴	۴۱۴	۴۲۷۸	۴
۱۱۵	۶۳	۱۱۰	<۱	۲۰۶	۵۹۹	۵
۱۰۶	۵۹	۱۱۵	۲	۳۲۶	۱۲۱۰	۶
۱۰۹	۵۷	۱۸۳	۲	۴۲۵	۱۴۷۵	۷
۳۵	۲۰	۴۷۸	۱۶	۲۳۲۵	۱۳۹۱۳	۸
۴۰	۲۰	۱۹۰	۲۳	۳۲۶۷	۷۳۲۸	۹
۸۶	۵۱	۴۳۰	۱۰	۱۲۹۲	۶۵۴۹	۱۰
۸۱	۵۲	۶۶	<۱	۱۷۱	۴۶۳	۱۱ (نمونه خاک شاهد)
۹۹	۵۶	۷۷	<۱	۱۹۱	۴۲۶	۱۲ (نمونه خاک شاهد)
۴۰	۲۰	۶۶	۱	۱۷۱	۴۲۶	حداقل
۱۹۴	۱۰۰	۱۶۱۹	۳۶	۴۶۸۳	۵۳۲۳۷	حداکثر
۹۲	۵۰	۴۸۵	۹	۱۲۱۷	۸۱۷۰	میانگین
۱/۵۱	۰/۸۲	۱۰/۱	۲۱/۲	۴۱/۱	۵۷/۹	ضریب تغییرات (%)
۱۰۰	۲۰	۵۵	۰/۱	۷۰	۱۴	متوسط پیوسته ای <sup>a</sup>
۴۲	۱۸	۱۴	۱/۱	۶۲	۲۵	میانگین در خاک‌های غیرآلوده جهانی <sup>b</sup>

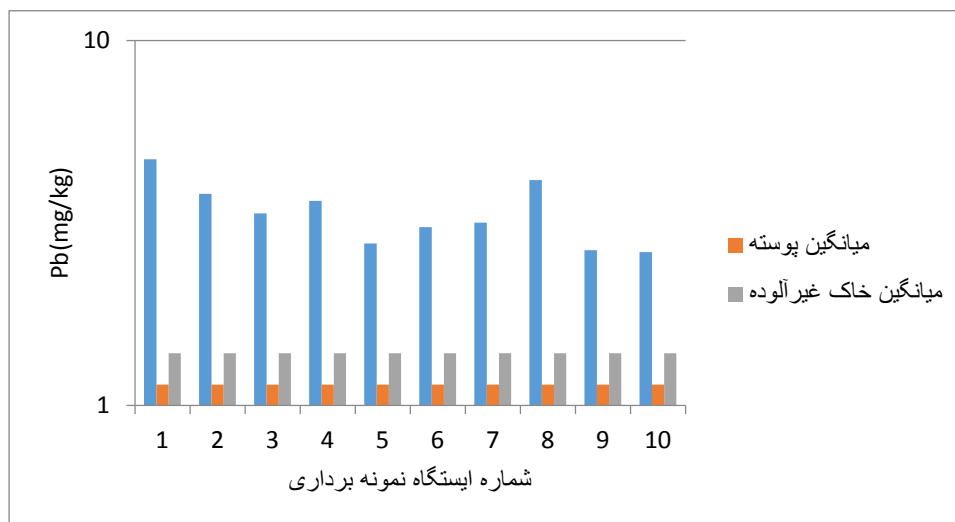
<sup>a</sup> Mason and Moore (1992)

<sup>b</sup> after Kabata-Pendias and Pendias (2001)

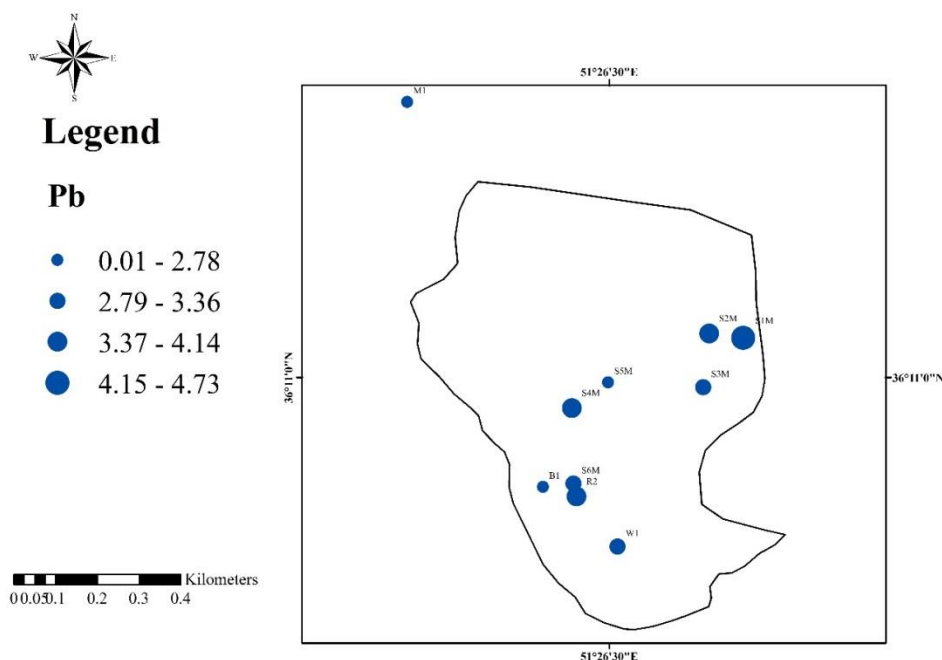
#### ۴-۴-۱-۱-سرب

یکی از آلاینده‌های مهم خاک، سرب است. غلظت سرب در خاک‌های طبیعی از ۱۵ تا ۳۰ میکروگرم بر لیتر تغییر می‌کند (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). غلظت بیش از ۱۰۰ mg/kg را به عنوان شاخص آلودگی نسبت به این عنصر در نظر می‌گیرند. جذب به وسیله ماده آلی مهم‌ترین عامل نگهداشت سرب در بافت خاک است. در خاک‌هایی که دارای اندکی ماده آلی هستند،  $Pb^{2+}$  عمدتاً جذب کانی‌های رسی یا هیدروکسیدهای آهن و منگنز می‌شود. میزان این جذب به pH خاک بستگی دارد.

غلظت سرب در نمونه‌های مورد مطالعه از ۴۲۶ و ۵۳۲۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است و میانگین آن ۸۱۷۰/۶ است. به علت بازه زیاد مقادیر ضریب تغییرات این فلز در نمونه‌های خاک بالا است (حدود ۵۷ درصد). ایستگاه‌های شماره ۱ و شماره ۵ به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین غلظت سرب را نشان می‌دهند. در مقایسه با غلظت در نمونه‌های شاهد (۱۱ و ۱۲) غلظت سرب در برخی نمونه‌ها (مانند نمونه‌های شماره ۱ و ۲) بیش از ۲۰ برابر افزایش غلظت نشان می‌دهد. نقاط نزدیک به محل معدنکاری و همچنین سد باطله بالاترین غلظت را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهند. این مقادیر نسبت به میانگین خاک‌های جهانی (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و میانگین پوسته‌ای (۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بسیار بالاتر است (شکل ۴-۴-الف). با توجه به اینکه معدنکاری در منطقه برای کانسنگ‌های اصلی سرب یعنی گالن و سرزویت انجام می‌شود لذا این غلظت‌های بالا در خاک‌های منطقه قابل توجیه است. با توجه به الگوی پراکندگی فلز سرب در خاک‌های منطقه (شکل ۴-۴-ب) بیشترین غلظت سرب در نواحی مجاور پیت اصلی معدن و همچنین نمونه‌های نزدیک به سد باطله مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های معدنی بر غلظت سرب در خاک‌های منطقه است.



شکل ۴-۴-الف: تغییرات غلظت سرب در خاک اطراف معدن دونا



شکل ۴-۴-ب: پراکندگی فلز سرب در نمونه‌های خاک منطقه دونا

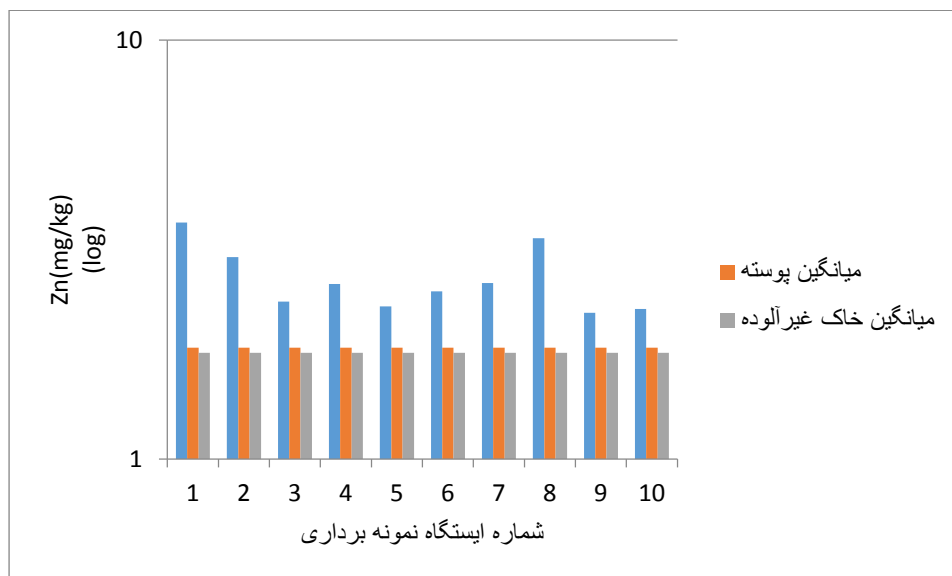
#### ۴-۱-۲-۴-۴ روی

فلز روی به طور غیر یکنواختی در خاک‌ها توزیع شده است. بالاترین غلظت روی در خاک‌های آهکی و آلی مشاهده می‌شود. به طور کلی غلظت روی در خاک‌های رسی بیش از خاک‌های ماسه‌ای است. روی از جمله عناصری است که تقریباً با تمام اجزاء خاک (ماده آلی، کانی‌های رسی و یا محلول خاک) واکنش می‌دهد. زیست‌دسترس‌پذیری این عناصر به pH خاک، شرایط ردوکس و نیز به وجود مواضع جذب یا لیگاندهای آلی بستگی دارد (Florence and Batley 1980).

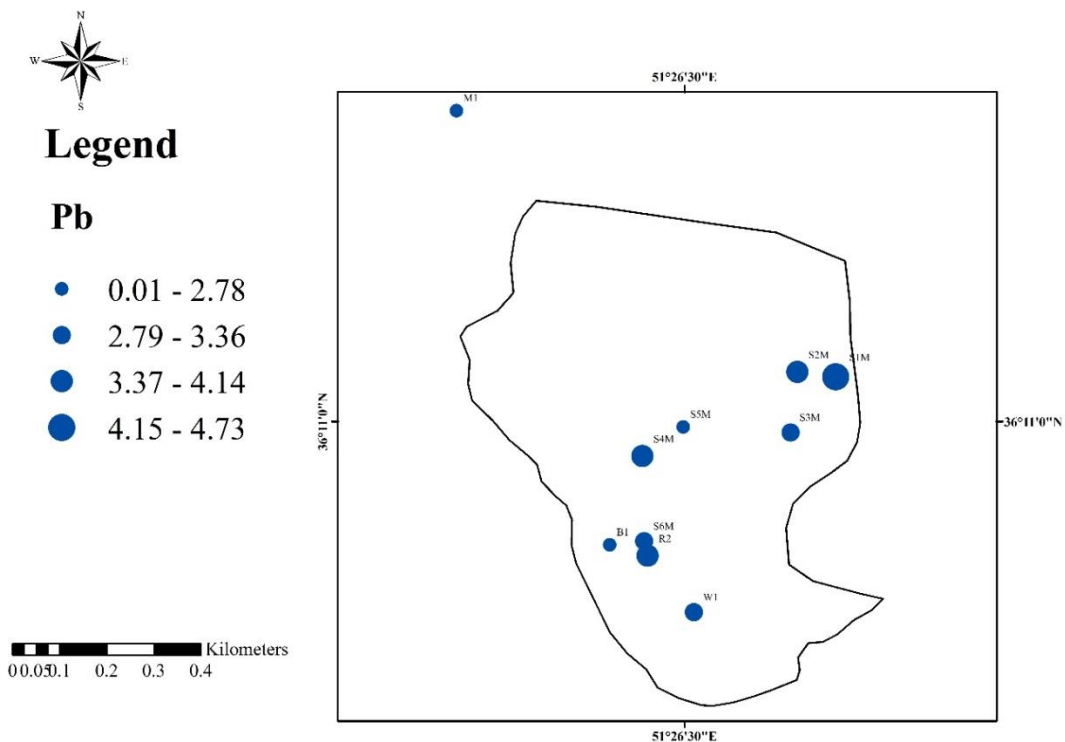
در نمونه‌های مورد مطالعه بازه تغییرات غلظت روی بین ۱۷۱ و ۴۶۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم است و میانگین آن ۱۲۱۷/۶ است. ضریب تغییرات روی نیز مانند سرب در نمونه‌های خاک بالا است (حدود ۴۲ درصد). غلظت این فلز در تمام نمونه‌های برداشت شده، بالاتر از میانگین آن در خاک‌های جهانی (۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و میانگین پوسته‌ای (۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است (شکل ۴-۵-الف) که دلیل آن عملیات معدنکاری و فراوری کانسنگ در منطقه دونا است. همچنین غلظت سرب در همه نمونه‌ها نسب به نمونه‌های خاک شاهد (به طور میانگین ۴۶۳ mg/kg) افزایش چند برابری نشان می‌دهند. وجود کانی اسفالریت به‌عنوان کانی اولیه در کانسنگ‌های معدن دونا می‌تواند غلظت بالای



Zn در خاک‌های اطراف معدن را توجیه نماید. همانطور که در شکل (۴-۵-ب) بالاترین غلظت روی در خاک‌های اطراف پیت اصلی معدن و اطراف سد باطله مشاهده می‌شود که تأییدی بر تأثیر فعالیت‌های معدنکاری بر غلظت این فلز در نمونه‌های خاک است.



شکل ۴-۵-الف: تغییرات غلظت روی در خاک اطراف معدن دونا

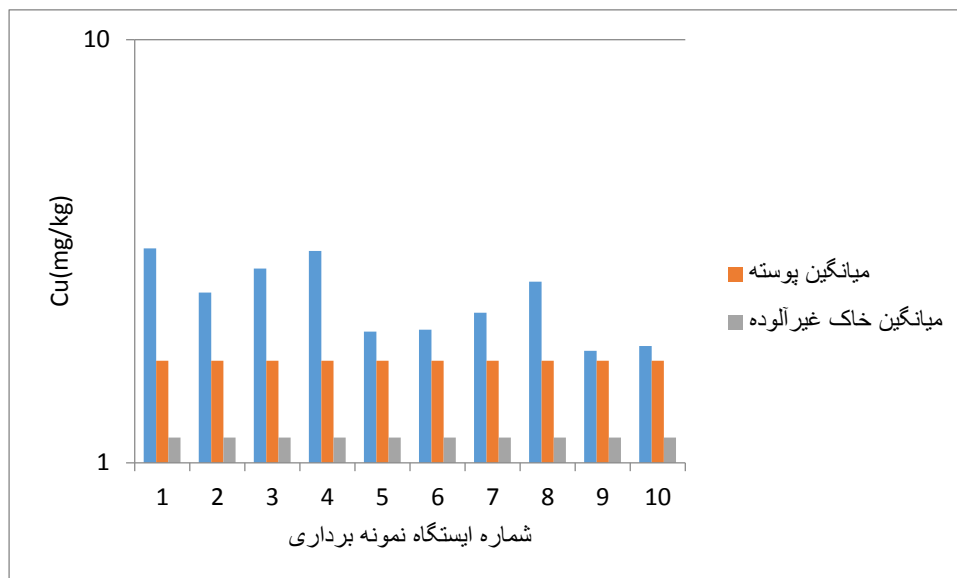


شکل ۴-۵-ب: پراکندگی فلز روی در نمونه‌های خاک معدن دونا

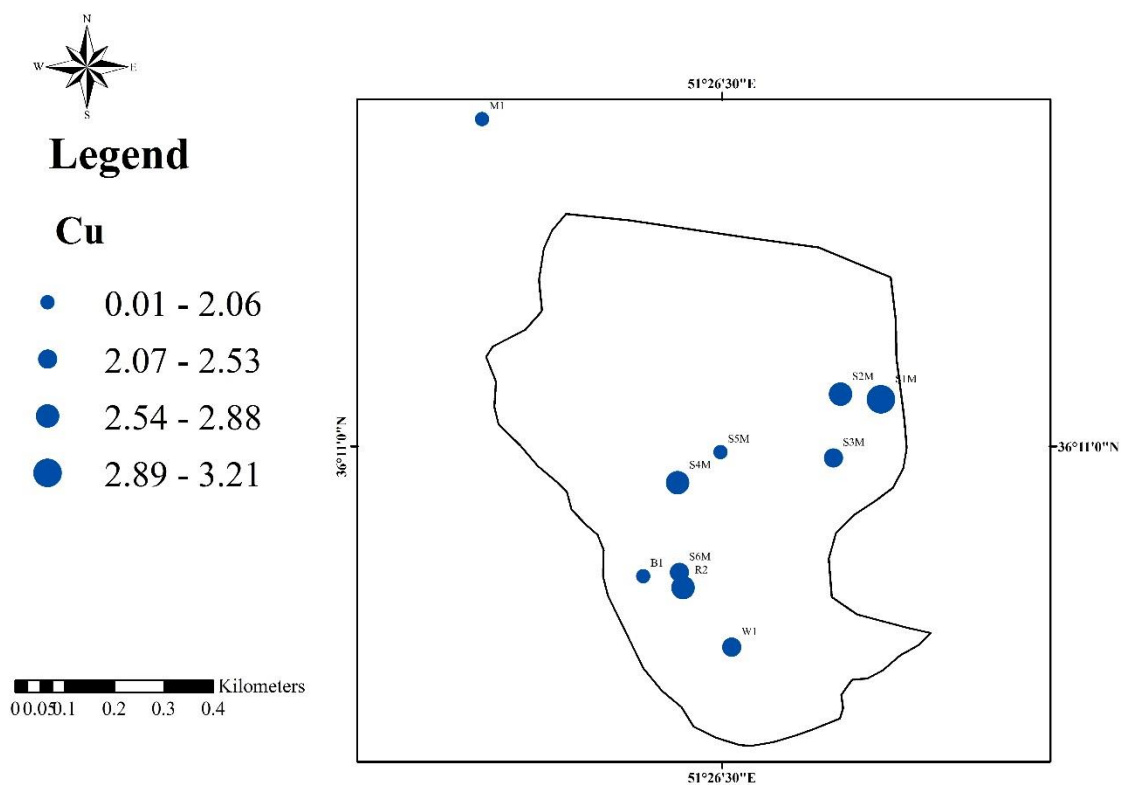
#### ۴-۴-۱-۳- مس

مس یکی از فلزات به نسبت فراوان پوسته زمین و غلظت آن در لیتوسفر به حدود ۵۵ mg/g می‌رسد (Li, 2000). این فلز در خاک یا در ساختار بلوری کانی‌ها قرار دارد و یا این که جذب فاز جامد خاک (به ویژه کربنات‌ها) و یا مواد آلی می‌شود. انحلال‌پذیری مس در شرایط اکسیدی و اسیدی بیشتر از شرایط کاهش و قلیایی است. در pHهای بیش از ۷، مس معمولاً به صورت فازهای کربناتی ته‌نشین می‌شود. مس از جمله عناصری است که تقریباً به وسیله همه گیاهان از خاک جذب می‌شود.

غلظت فلز مس در نمونه‌های برداشت شده بازه ایی بین ۶۹ و ۱۶۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم را در بر می‌گیرد. این فلز نیز ضریب تغییرات بالایی را در نمونه‌های خاک نشان می‌دهد که نشان‌دهنده بازه تغییرات نسبتاً وسیع این فلز است. در برخی نمونه‌های مورد مطالعه مانند نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ غلظت فلز مس نسبت به میانگین خاک جهانی (۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و میانگین پوسته‌ای (۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) تا بیش از ۲ برابر افزایش یافته است (شکل ۴-۶-الف). نسبت به نمونه‌های شاهد نیز غلظت فلز مس تا ۱۰۰ برابر افزایش غلظت نشان می‌دهد. بر اساس الگوی پراکندگی (شکل ۴-۶-ب) غلظت فلز مس نیز مانند دو فلز سرب و روی در خاک‌های اطراف محل معدنکاری بالا رفته است. غلظت بالای این فلز را می‌توان به وجود فراوان کانی‌های حاوی مس مانند مالاکیت و آزوریت نسبت داد که در اثر عملیات استخراج و بهره‌برداری از معدن در معرض هوازدگی قرار گرفته‌اند.



شکل ۴-۶-الف: تغییرات غلظت فلز مس در خاک معدن دونا

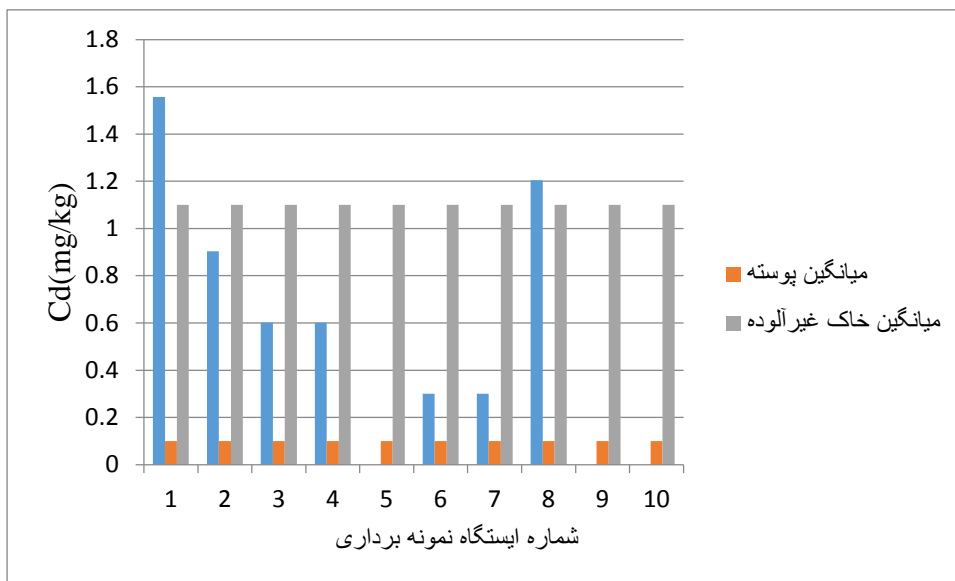


شکل ۴-۶-ب: پراکندگی فلز مس در خاک معدن دونا

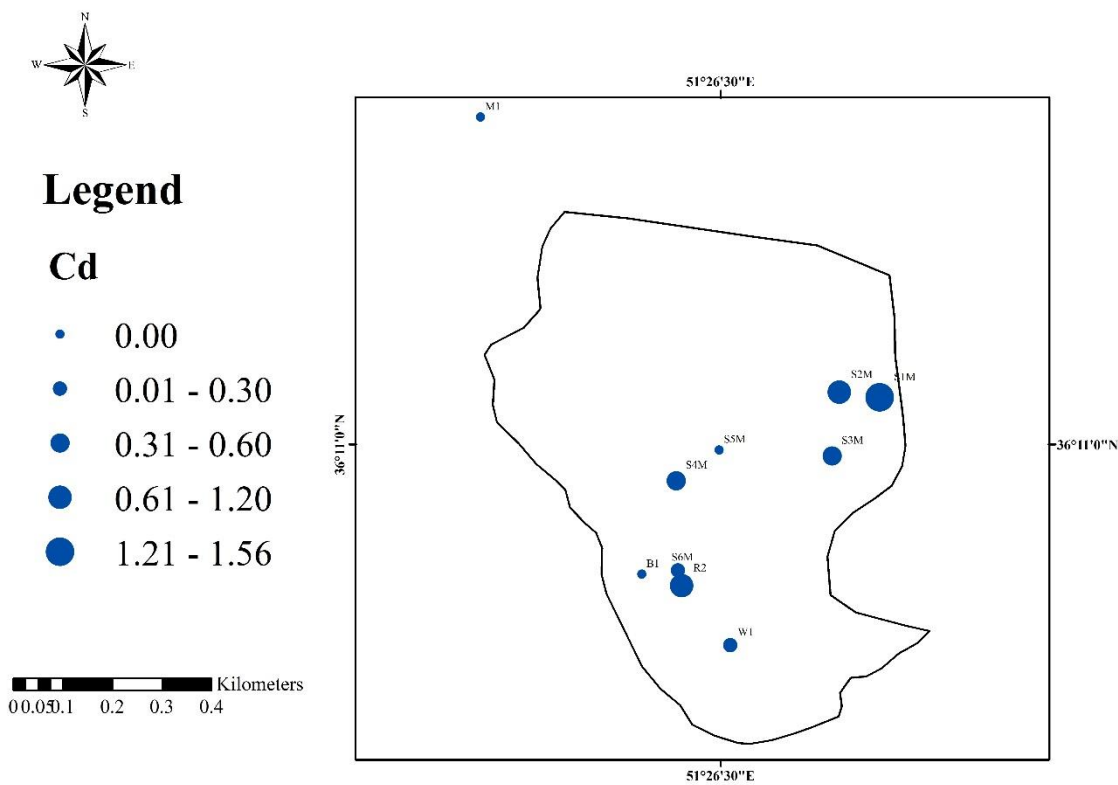
#### ۴-۱-۴-۴- کادمیم

کادمیم از نظر فراوانی شصت و هفتمین عنصر پوسته است و از این نظر عنصری کمیاب به حساب می‌آید. کادمیم در بیشتر کانسنگ‌های حاوی سرب و روی غنی‌شدگی نشان می‌دهد. متوسط غلظت آن در لیتوسفر زمین حدود  $0.67 \text{ mg/g}$  است (Callender 2005). غلظت کادمیم در خاک‌ها گستره‌ای بین  $0.1$  تا  $1/5$  میلی‌گرم بر گرم را در بر می‌گیرد و میانگین آن در حدود  $0.62$  میلی‌گرم بر گرم است. خاک‌هایی که دارای درصد بالایی از ماده‌آلی هستند (مانند هیستوسولها)، معمولاً غلظت بالایی از کادمیم دارند (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). pH خاک مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده تحرک پذیری کادمیم در خاک است. در خاک‌های قلیایی، مانند خاک‌های آهکی، کادمیم به صورت  $\text{CdCO}_3$  رسوب می‌کند، در حالی که در خاک‌های اسیدی، کادمیم بیشتر به صورت ترکیبات کلردار ظاهر می‌شود که این گونه‌های شیمیایی نیز تحرک کادمیم را افزایش می‌دهند (Xian and Shokohifard 1989).

در نمونه‌های خاک برداشت شده از معدن دونا، غلظت فلز کادمیم از  $1$  تا  $36$  میلی‌گرم بر کیلوگرم تغییر می‌کند. غلظت این فلز نسبت به خاک جهانی ( $1/1$  میلی‌گرم بر کیلوگرم) و میانگین پوسته‌ای ( $0.67$  میلی‌گرم بر کیلوگرم) بسیار بالاتر است (شکل ۴-۷-الف). نسب به خاک شاهد نیز ( $1 <$  میلی‌گرم بر کیلوگرم) غلظت Cd در خاک‌های منطقه معدنی چندین برابر افزایش نشان می‌دهد. بر اساس الگوی تغییرات مکانی (شکل ۴-۷-ب)، غلظت این فلز در خاک‌های اطراف محل معدنکاری و همچنین نمونه‌های اطراف سد باطله بسیار بالاتر از سایر مناطق است. اگرچه در نمونه‌های مورد مطالعه کانی خاص حاوی کادمیم یافت نشد اما این فلز می‌تواند در اثر هوازدگی گالن و یا سرزویت وارد محیط خاک شده باشد. ضمناً انحلال‌پذیری بیشتر کادمیم نسبت به سایر فلزات مورد مطالعه می‌تواند باعث گسترده شدن آلودگی ناشی از آن حتی تا مسافت‌های دورتر نسبت به منشأ شود.



شکل ۴-۷-الف: تغییرات غلظت فلز کادمیم در خاک معدن دونا

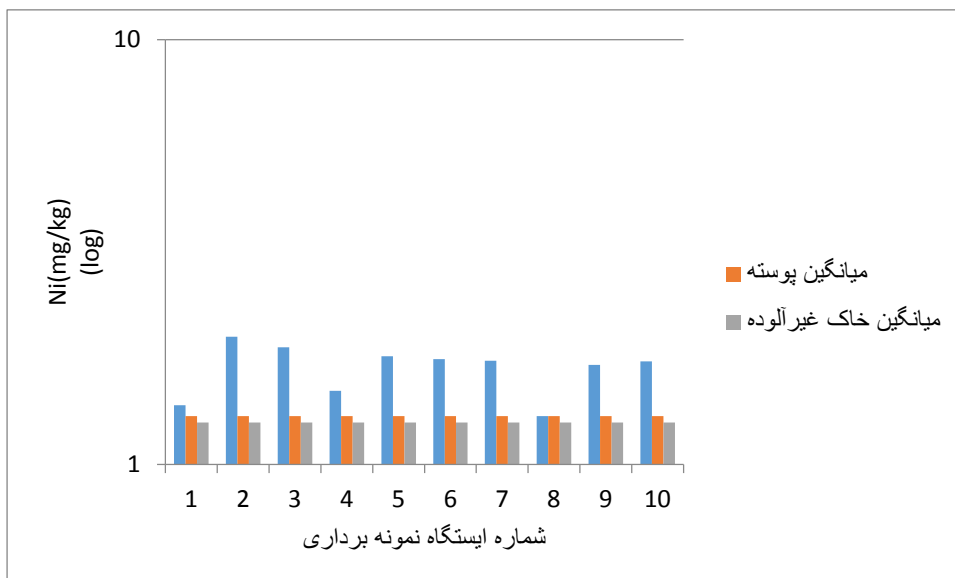


شکل ۴-۷-ب: پراکندگی فلز کادمیم در خاک معدن دونا

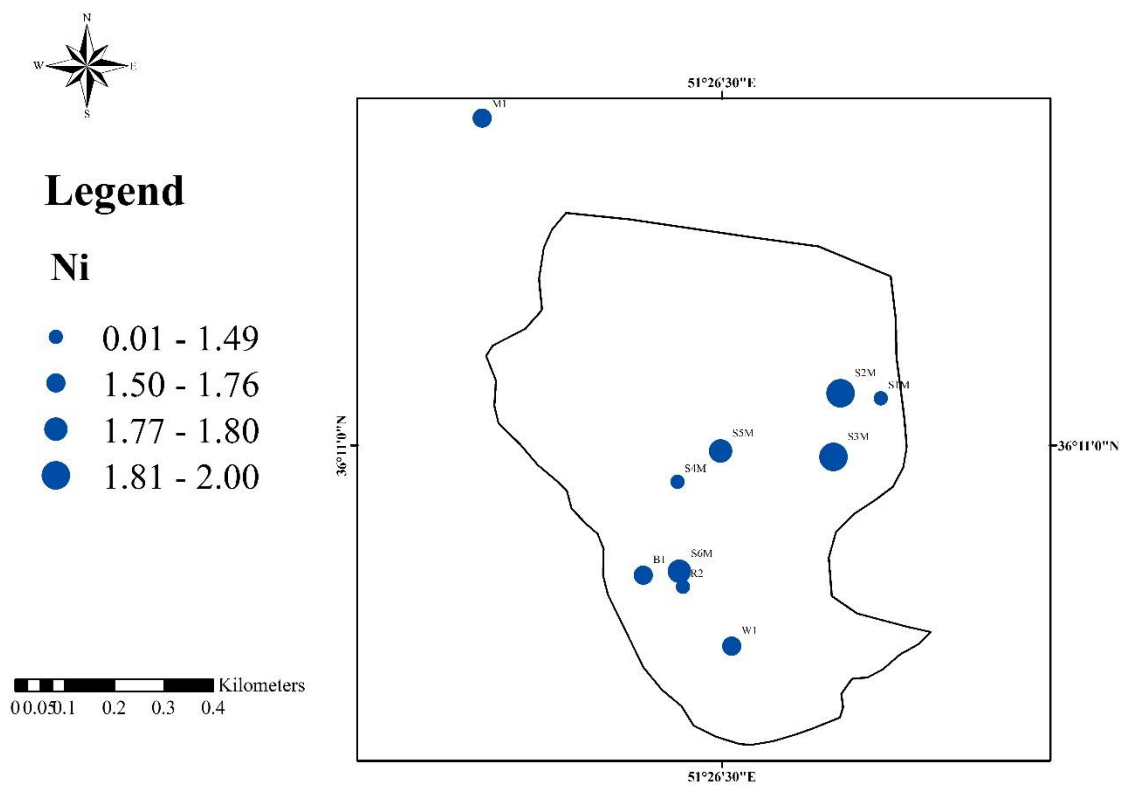
#### ۴-۱-۴-۵- نیکل

غلظت نیکل در لیتوسفر حدود  $85 \text{ mg/g}$  است (Li, 2000) اما غلظت آن در خاک‌های با سنگ بستر مافیک و الترامافیک بیشتر است. ترکیب نیکل سولفیدی (پنتلانیدیت) فراوان‌ترین کانی این عنصر در طبیعت است. عملیات معدنکاری یکی از منابع اصلی و انسانزاد نیکل در طبیعت است. غلظت نیکل خاک‌های غیرآلوده (طبیعی) از کمتر از  $0.2 \text{ ppm}$  تا حداکثر  $450 \text{ ppm}$  در خاک‌های رسی و آهکی تغییر می‌کند (میانگین غلظت حدود  $20 \text{ ppm}$  است) (Kabata-Pendias and Pendias 2001). نیکل در خاک به صورت ترکیب با کانی‌های هیدروکسیدی، به صورت جذب‌شده بر روی مواد آلی یا کانی‌های رسی و به صورت یون آزاد در محلول خاک یافت می‌شود.

با توجه به شکل (۴-۸-الف) غلظت نیکل برخی نقاط نمونه‌برداری بیشتر از غلظت میانگین آن در خاک‌های جهانی ( $18$  میلی‌گرم بر کیلوگرم) و میانگین پوسته‌ای ( $20$  میلی‌گرم بر کیلوگرم) است اما در برخی نقاط نیز غلظت آن در حد مقادیر استاندارد است. شایان ذکر آنکه میانگین غلظت در خاک‌های منطقه معدنی تقریباً در حد غلظت آن در خاک شاهد است ( $52 \text{ mg/kg}$ ) که نشان‌دهنده تأثیر کمتر فعالیت‌های معدنکاری بر غلظت Ni در خاک‌های مورد مطالعه است. همچنین ضریب تغییرات محاسبه شده برای این فلز از سایر فلزات پایین‌تر است که بیانگر تأثیر کمتر فعالیت‌های انسانزاد بر غلظت این فلز در نمونه‌های خاک است. با این حال غلظت این فلز نیز در نواحی نزدیک محل استخراج معدن افزایش نسبی نشان می‌دهد (شکل ۴-۸-ب) که می‌توان علت آن را به استخراج کانسنگ‌های سولفیدی مانند گالن و حضور گسترده کانی‌های اکسیدی (سوپرژن) مانند گوتیت که حاوی غلظت بالایی از نیکل هستند مرتبط دانست.



شکل ۴-۸-الف: تغییرات غلظت فلز نیکل در خاک اطراف معدن دونا



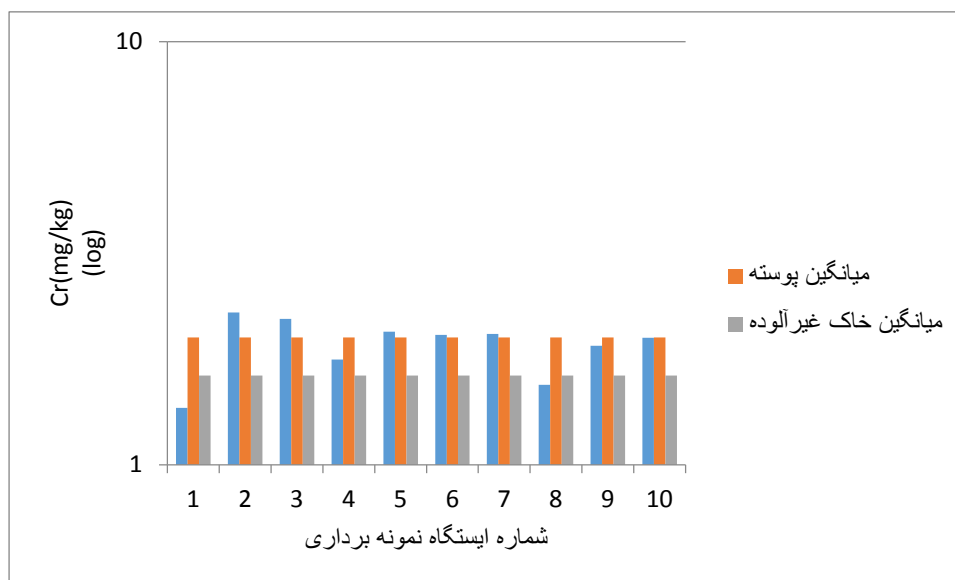
شکل ۴-۸-ب: پراکندگی فلز نیکل در خاک اطراف معدن دونا

#### ۴-۴-۱-۶- کروم

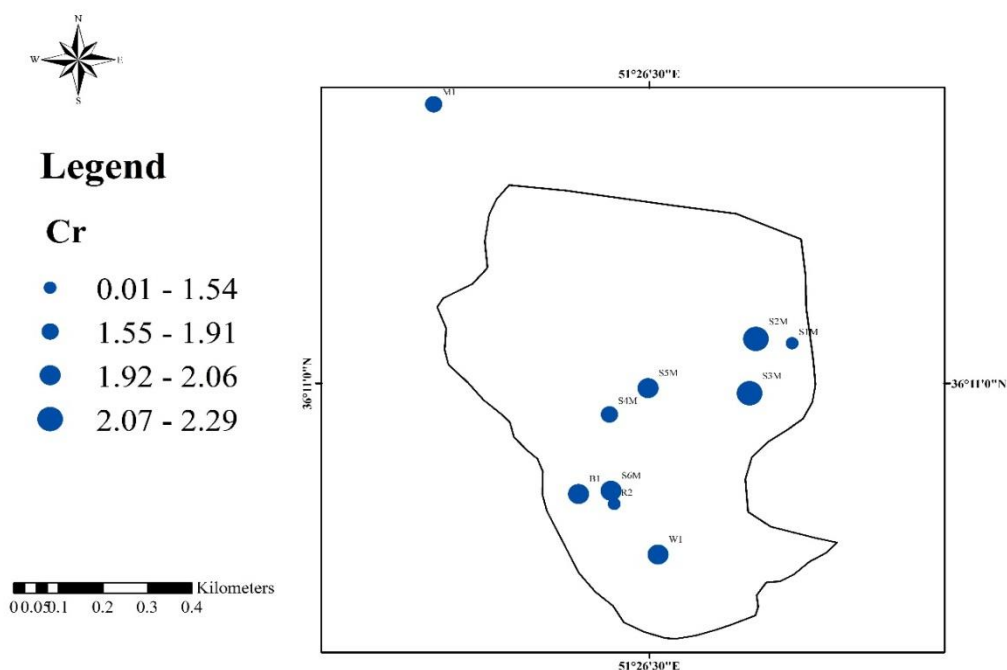
کروم با غلظتی حدود ۶۹ mg/g فراوان‌ترین فلز سنگین در لیتوسفر به شمار می‌آید (Mason and Moore 1982). این عنصر عمدتاً به صورت کانی کرومیت در طبیعت رخ می‌دهد. اگرچه ممکن است در بسیاری از کانی‌های دیگر نیز در مقادیر جزئی و به صورت جانشینی  $Al^{3+}$  و  $Fe^{2+}$  به وجود آید. تحرک و زیست‌دسترس‌پذیری Cr در خاک به pH و شرایط اکسایش-کاهش و همچنین به غلظت کل کروم در خاک بستگی دارد. به طور کلی زیست‌دسترس‌پذیری کروم نسبت به سایر فلزات پایین است (Kabata-Pendia and Pendias 2001). در pH‌های نزدیک به خنثی کروم سه ظرفیتی شکل غالب این عنصر در بیشتر خاک‌ها است. در pH‌های کمتر از خنثی (۴ تا ۶)،  $CrOH^{2+}$  و در pH‌های بالاتر (۶ تا ۱۱/۵)،  $Cr(OH)_4$  گونه غالب کروم به حساب می‌آیند.

در نمونه‌های مورد مطالعه بازه تغییرات غلظت کروم بین ۲۳ و ۱۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و میانگین آن ۹۲/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. ضریب تغییرات این فلز هم مانند فلز نیکل پایین بدست آمد (حدود ۱/۵۱ درصد). غلظت کروم نسبت به میانگین خاک جهانی (۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نمونه‌های شماره ۱ و ۸ و نسبت به میانگین پوسته‌ای (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نمونه‌ی شماره ۱، ۴، ۸، ۹ و ۱۰ میزان کمتری را نشان می‌دهد (شکل ۴-۹-الف). در مقایسه با خاک شاهد نیز غلظت Cr حدود ۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که تقریباً در حد میانگین پوسته‌ای آن است. در نواحی نزدیک محل معدنکاری غلظت Cr افزایش نسبی نشان می‌دهد (شکل ۴-۹-ب) که علت آن استخراج کانسنگ و در قرارگیری باطله‌ها در معرض هوازگی و فرسایش است. اگرچه کانی خاص کروم در باطله‌های معدنی شناسایی نشد اما گالن و باریت می‌توانند حاوی کروم در شبکه بلوری خود باشند.





شکل ۴-۹-الف: تغییرات غلظت فلز کروم در خاک معدن دونا



شکل ۴-۹-ب: پراکندگی فلز کروم در خاک معدن دونا

#### ۴-۵- گونه‌سازی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

در مطالعات زیست‌محیطی، تعیین فازهای ژئوشیمیایی غالب در خاک‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است چرا که این فازها عواملی چون تحرک‌پذیری، سمناکی و یا زیست دسترس فلزات را در محیط خاک کنترل می‌کنند (Tessier et al., 1979). در این پژوهش از روش استاندارد BCR برای

پیش‌بینی فازهای شیمیایی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه استفاده گردید که در زیر به نتایج آن به صورت عنصر به عنصر اشاره خواهد شد. در جدول (۴-۴) مقادیر استخراج شده فلزات بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم آورده شده است.

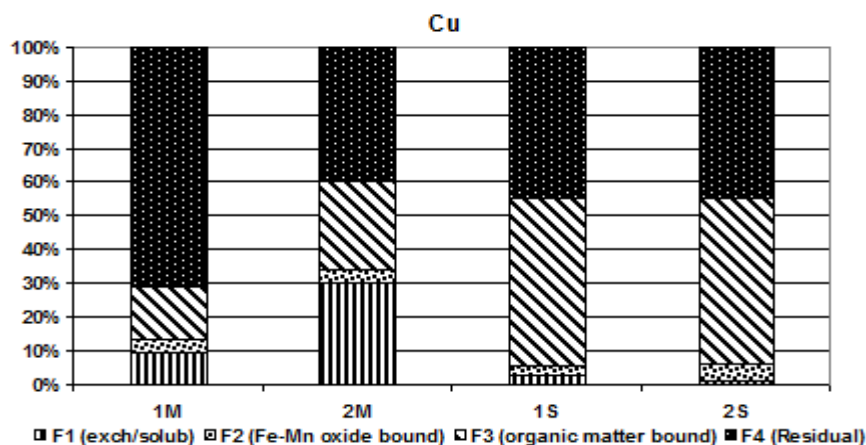
جدول (۴-۴) غلظت میانگین فلزات مورد مطالعه در فازهای مختلف ژئوشیمیایی بر حسب mg/kg

	Pb	Zn	Ni	Cu	Cr
F1	۱۰۰/۴	۵۱/۵	۳۵/۶	۱۳۲/۱	۹۵/۳
F2	۵۳۳/۴	۳۰۳/۳	۱۷۴/۷	۹۲/۸	۱۱۰/۵
F3	۱۵۵/۲	۳۶/۴	۸۸/۹	۲۰۲/۳	۹۶/۶
F4	۲۲۱/۴۶	۱۱۱/۹	۲۲۴/۲	۳۲۵/۲	۱۴۵/۲

#### ۴-۵-۱- مس

شکل ۴-۱۰- گونه‌سازی فلز مس را در نمونه‌های خاک مورد مطالعه، نشان می‌دهد. فلز مس تقریباً در همه فازها حضور دارد. بالاترین درصد مس (میانگین ۵۰/۷۴٪)، از فاز چهارم (فاز باقی‌مانده) استخراج شد. پس از آن فازهای متصل به کربنات‌ها (فاز اول) و فاز پیوندی با مواد آلی (فاز سوم) بیشترین غلظت مس را نشان می‌دهند. همراهی این فلز با فاز کربناته، به دلیل حضور این عنصر، در کانی‌های کربناتی مانند مالاکیت و آزوریت است. ضمناً فلز مس از جمله فلزاتی است که تمایل زیادی به تشکیل کمپلکس با مواد آلی دارد (Tessier et al., 1979). کمترین مقدار مس در دو فاز پیوند با اکسیدهای Fe-Mn قرار دارد. روند گونه‌پذیری مس در خاک‌های مورد مطالعه به صورت زیر است:

$$F4 > F3 > F1 > F2$$

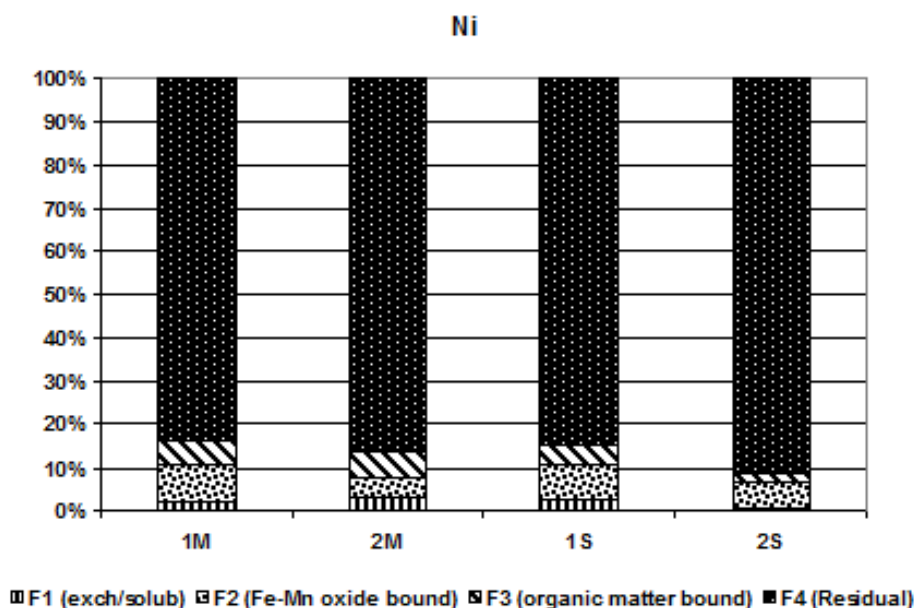


شکل ۴-۱۰- درصد مس استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی خاک

#### ۴-۵-۲- نیکل

شکل ۴-۱۱- درصد همراهی عنصر نیکل را با فازهای مختلف استخراج شده در ایستگاه‌های نمونه برداری نشان می‌دهد. بالاترین غلظت نیکل (۶۳/۵۶٪) در فاز باقی مانده حضور دارد. حضور نیکل در فاز باقی مانده، ممکن است به صورت جانشینی ایزومورفی با Fe و Al در کانی‌های سیلیکاته به ویژه کانی‌های رسی (اسمکتیت و ایلیت) باشد (Ghayoraneh and Qishlaqi, 2017). حضور نیکل در این فاز می‌تواند دلیلی بر منشأ زمین‌زاد این عنصر در نمونه‌های خاک باشد. فازهای اکسیدهای آهن و منگنز (دوم) و فاز پیوند با کربنات‌ها (اول)، به ترتیب ۵/۶۷٪ و ۱/۱۳٪ از عنصر نیکل را در بر می‌گیرند. ۲/۲۴٪ از نیکل نیز با فاز متصل به مواد آلی، همراه است. بر اساس این نتایج، روند گونه‌پذیری نیکل در خاک‌های مورد مطالعه به صورت زیر است:

$$F4 > F2 > F3 > F1$$



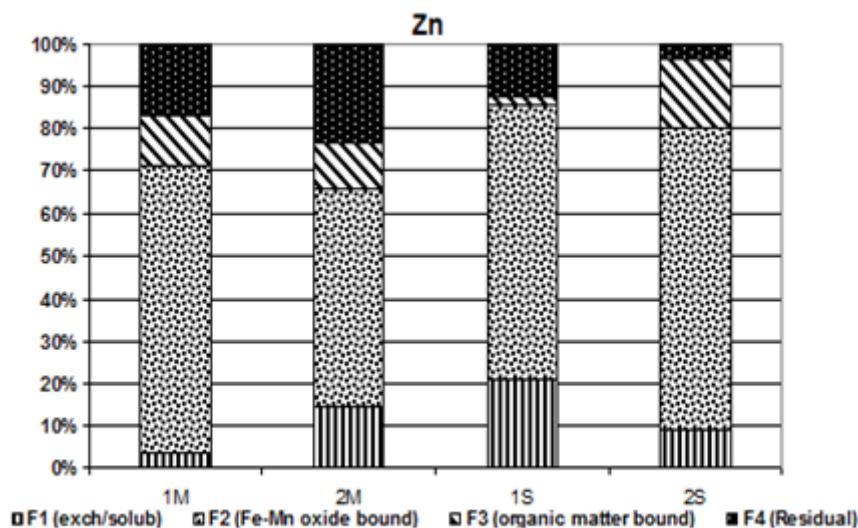
شکل ۴-۱۱- درصد نیکل استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی خاک

#### ۴-۵-۳- روی

گونه‌سازی عنصر روی را در نمونه‌های خاک در شکل ۴-۱۲ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، ۶۳/۷۷٪ از عنصر روی، در مرحله دوم (فاز متصل به اکسیدهای آهن-منگنز) قرار دارد. تمایل روی به فازهای کاهش‌پذیر، به دلیل تمایل آن به اکسی هیدروکسیدهای Fe-Mn، به ویژه در شرایط

قلیایی نمونه‌های خاک است (Tessier et al. 1979). ۱۴/۰۹٪ از فلز روی در مرحله آخر و از فاز باقی‌مانده استخراج شد. در این میان، فازهای متصل به مواد آلی و تبادل‌پذیر/انحلال‌پذیر، سهم ناچیزی از غلظت کل روی را در بر می‌گیرند (به ترتیب ۴/۰۹٪ و ۶/۸۶٪). درصد پایین روی در فاز تبادل‌پذیر را می‌توان به شرایط قلیایی نمونه‌های خاک نسبت داد؛ چرا که روی، در یک محیط قلیایی، تمایل به جذب سطحی بر روی کانی‌های رسی و مواد آلی خاک، توسط فرایند تبادل کاتیونی دارد (Ure et al. 1993). به طور کلی روند گونه‌پذیری روی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه به صورت تغییر می‌کند:

$$F2 > F4 > F1 > F3$$



شکل ۴-۱۲- درصد روی استخراج‌شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی خاک

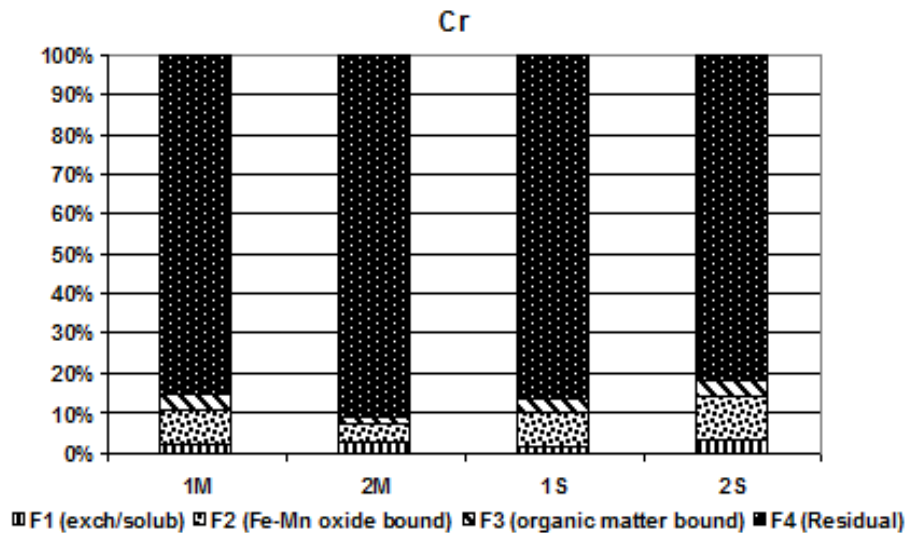
#### ۴-۵-۴- کروم

درصد همراهی عنصر مس با فازهای مختلف در نمونه‌های خاک مورد مطالعه در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. روند گونه‌سازی کروم تا حدی شبیه به فلز Ni است. بالاترین سهم کروم در فاز باقی‌مانده قرار دارد (به طور میانگین ۹۷/۲۱٪) زیرا  $Cr^{+3}$  می‌تواند جایگزین  $Fe^{+3}$  و  $Al^{+3}$  در شبکه کانی‌های سیلیکاته شود (Alloway, 2004) و بدین علت درصد بالایی در فاز باقی‌مانده نشان می‌دهد.

درصد بازیافت فلز Cr در فاز دوم ۱۱ درصد و در دو فاز اول و سوم تقریباً برابر و حدود ۳/۱ درصد

است. روند گونه‌پذیری کروم در خاک‌های منطقه مورد مطالعه به صورت زیر است:

$$F4 > F2 > F3 = F1$$

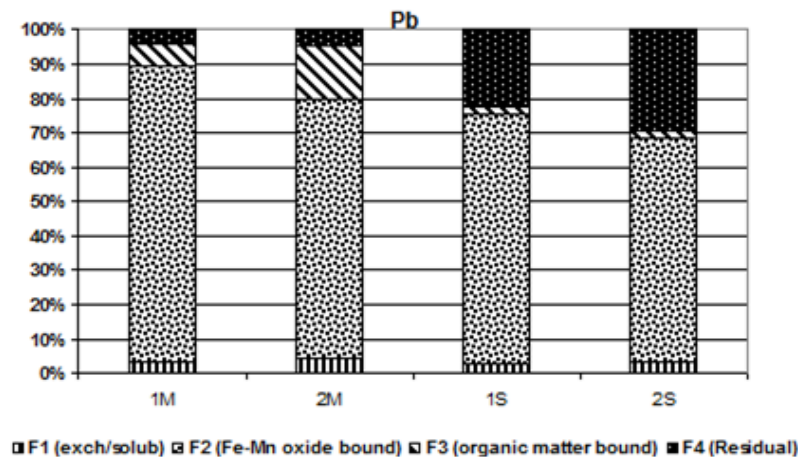


شکل ۴-۱۳- درصد کروم استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی خاک

#### ۴-۵-۵- سرب

بر اساس نتایج استخراج ترتیبی بیشترین غلظت سرب (۸۵/۳۴٪)، در مرحله دوم (فاز متصل به اکسیدهای آهن و منگنز) حضور دارد (شکل ۴-۱۴). بعد از آن بیشترین غلظت سرب، در مرحله آخر - فاز باقی‌مانده- (میانگین ۱۵٪) استخراج شد. سرب با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز اشکال پایداری را تشکیل می‌دهد (Ghayoraneh and Qishlaqi 2017). به عبارت بهتر یکی از جذب‌کننده‌های اصلی Pb در خاک‌ها اکسیدهای Fe-Mn است. بر اساس نتایج بدست آمده تنها ۳/۶۳٪ و ۶/۴۹٪ سرب در پیوند با فاز اول و سوم حضور دارد که نشان‌دهنده نقش کم کربنات‌ها و ماده آلی خاک در تمرکز سرب در نمونه‌های خاک است. با این حال وجود سرب در فاز کربنات‌ها، به دلیل حضور آن در کانی‌های کربناتی مانند سرروزیت ( $PbCO_3$ ) و هیدروسروزیت [ $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ ] است. روند گونه‌پذیری سرب در خاک‌های منطقه مورد مطالعه به صورت زیر است:

$$F2 > F4 > F3 > F1$$



شکل ۴-۱۴- درصد سرب استخراج شده از فازهای مختلف خاک

#### ۴-۶- ضریب تحرک پذیری فلزات در نمونه‌های خاک

تحرک‌پذیری فلزات سنگین در خاک تابع شکل ژئوشیمیایی آنها در خاک است. معمولاً چنین استنباط می‌شود که فلزاتی که با فاز اول همراه هستند تحرک‌پذیری و دسترس‌پذیری بالاتری نسبت به سایر فازها دارند. در این پژوهش، به منظور ارزیابی میزان تحرک فلزات سنگین، از ضریب تحرک‌پذیری (MF) استفاده شد. محاسبه این ضریب، یکی از رایج‌ترین روش‌های بررسی تحرک فلزات در محیط (خاک یا رسوب) است. درصد شاخص تحرک‌پذیری محاسبه شده برای فلزات سنگین مورد بررسی، در جدول ۴-۵ آورده شده است

جدول (۴-۵) مقادیر میانگین ضریب تحرک‌پذیری برای فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک

	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
MF	۰/۱۳۲	۰/۰۷۵	۰/۰۲۶	۰/۰۱۴	۰/۱۴۷
MF (%)	۱۳/۲۵	۱/۷۵	۷/۶۲	۰/۴۲	۰/۷۵

همانطور که مشاهده می‌شود از بین فلزات مورد مطالعه دو فلز Cu و Zn دارای بالاترین ضریب تحرک‌پذیری (به ترتیب ۱۳/۲۵٪ و ۷/۶۲٪) می‌باشند چرا که این دو فلز نسبت به سایر فلزات در فاز اول (تبادل پذیر/انحلال‌پذیر) درصد بیشتری از غلظت کل را به خود اختصاص می‌دادند.

به طور کلی با توجه به قلیایی بودن نمونه‌های خاک و درصد کم ماده آلی در این نمونه خاک‌های منطقه دونا غیر واکنش‌پذیر بوده و بدین درصد فلزات در فازهای غیر باقی‌مانده (non-residual) نسبتاً پایین است.

#### ۴-۷- رابطه آماری بین فلزات با یکدیگر و با پارامترهای فیزیکی شیمیایی

##### خاک

با بررسی ضرایب همبستگی می‌توان به رابطه آماری بین فلزات و یا فلزات با پارامترهای فیزیکی شیمیایی خاک پی برد. در این مطالعه بعد از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها از روش همبستگی پیرسون برای بررسی روابط آماری بین متغیرها استفاده شد. در جدول (۴-۶) ضرایب همبستگی فلزات مورد مطالعه و پارامترهای فیزیکی شیمیایی خاک آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده بین سه فلز سرب، روی و کادمیم همبستگی مثبت قوی در سطح اطمینان ۹۹ درصد برقرار است. همچنین بین سرب و مس، سرب و نیکل، سرب و کروم، کادمیم و مس همبستگی مثبت در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده می‌شود. این

جدول (۴-۶) ماتریسی همبستگی پیرسون بین خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک و فلزات سنگین خاک

پارامتر	سرب	روی	مس	نیکل	کروم	کادمیم	pH	درصد مواد آلی
سرب	۱							
روی	<u>۰/۸۶۲**</u>	۱						
مس	<u>۰/۶۹۲*</u>	۰/۴۷۳	۱					
نیکل	<u>۰/۶۱۲*</u>	-۰/۴۵۲	-۰/۳۷۴	۱				
کروم	<u>۰/۶۲۴**</u>	-۰/۵۱۲	-۰/۳۶۳	<u>۰/۹۸۳**</u>	۱			
کادمیم	<u>۰/۷۲۴**</u>	<u>۰/۶۱۱**</u>	<u>۰/۵۰۱*</u>	۰/۳۸۸	۰/۱۲۸	۱		
pH	۰/۰۴۴	۰/۲۵۷	۰/۳۲۷	-۰/۲۲۲	۰/۰۶۷	۰/۰۳۵	۱	
درصد مواد آلی	۰/۰۲۴	۰/۰۸۴	<u>۰/۵۱۷**</u>	-۰/۱۰۵	-۰/۱۶۰	۰/۱۲۰	-۰/۴۰۶	۱

روابط همبستگی می‌تواند دلیلی بر هم منشأ بودن این فلزات در نمونه‌های خاک باشد. به عبارت بهتر عملیات معدنکاری در منطقه منشأ اصلی ورود این فلزات به داخل خاک است. رابطه ضعیف‌تر نیکل و کروم با سایر فلزات می‌تواند به تأثیر کمتر فعالیت‌های معدنی بر غلظت این دو فلز در خاک باشد. pH خاک با هیچ‌یک از فلزات رابطه معناداری نشان نمی‌دهد که احتمالاً به علت بازه کم تغییرات pH در نمونه‌های خاک است. درصد ماده آلی خاک هم در سطح اطمینان ۹۹ درصد تنها با مس رابطه مثبت نشان می‌دهد. مس از جمله فلزاتی است که می‌تواند با ماده آلی خاک تشکیل کمپلکس‌های پایدار دهد.

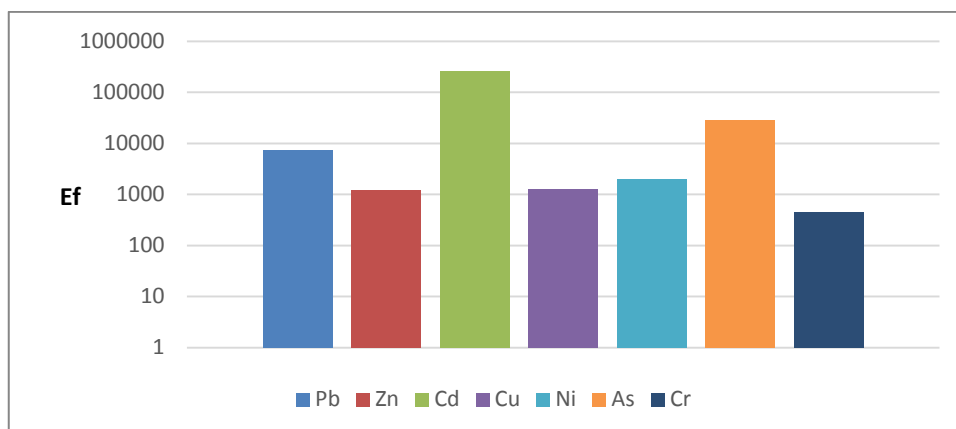
#### ۴-۸- ارزیابی کمی شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین

در این بخش با استفاده از برخی شاخص‌های ژئوشیمیایی (ضریب غنی‌شدگی و زمین‌انباشت) آلودگی فلزی نمونه‌های خاک مورد مطالعه، ارزیابی می‌شود.

#### ۴-۸-۱- ضریب غنی‌شدگی

ضریب غنی‌شدگی، نشان‌دهنده مقدار افزایش غلظت یک عنصر نسبت به غلظت طبیعی آن در پوسته، سنگ‌بستر یا خاک است. به عبارت دیگر ضریب غنی‌شدگی می‌تواند بیانگر شدت تأثیر عوامل خارجی (انسان‌زاد) باشد. بنابراین در اکثر تحلیل‌های زیست‌محیطی به منظور تشخیص میزان تأثیر عوامل انسانی از عوامل طبیعی در یک منطقه از ضریب غنی‌شدگی استفاده می‌شود (Zhang et al., 2007). در این مطالعه برای محاسبه ضریب غنی‌شدگی، از ترکیب میانگین پوسته‌ای به عنوان مرجع استفاده شد. همچنین فلز تیتانیوم (Ti)، به دلیل تغییرپذیری کم در خاک‌های منطقه، به عنوان فلز بهنجار کننده استفاده گردید. بر اساس رده بنده بندی ساترلند که در فصل سوم (جدول ۳-۳) ارائه گردید و طبق شکل ۴-۱۵- تمامی فلزات غنی‌شدگی بی‌نهایت بالا را نشان می‌دهند. در جدول (۴-۷) مقادیر عددی ضریب غنی‌شدگی برای نمونه‌های خاک سطحی آورده شده است.





شکل ۴-۱۵- میانگین ضرایب غنی‌شدگی فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک

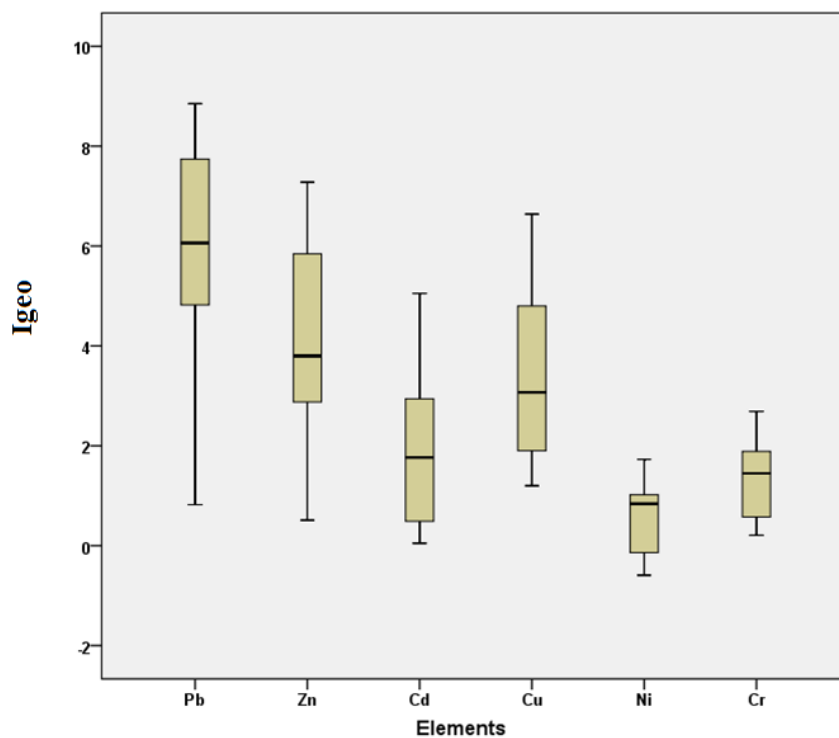
جدول (۴-۷) ضریب غنی‌شدگی فلزات برای نمونه‌های خاک مورد مطالعه

عنصر	حداقل	حداکثر	میانگین
<b>Pb</b>	۲۱۶۵/۷	۲۴۲۶۲/۸	۱۳۲۱۴/۲
<b>Zn</b>	۳۰۱/۲	۲۸۸۳/۵	۱۵۹۲/۳
<b>Cd</b>	۰	۱۱۴۴۰۰۰	۵۷۲۰۰۰
<b>Cu</b>	۳۶۳/۶	۳۵۲۰	۱۹۴۱/۸
<b>Ni</b>	۸۰۰	۲۰۵۳/۳	۱۴۲۶/۶
<b>Cr</b>	۱۷۶	۱۴۰۸	۷۹۲

#### ۴-۸-۲- ضریب زمین‌انباشت

شاخص زمین‌انباشت که اولین بار توسط مولر (Muller, 1969) ارائه شد، بیان دیگری از تعیین شدت و میزان آلودگی در خاک‌های یک منطقه است و در ارزیابی‌های زیست‌محیطی، به منظور تشخیص تأثیر عوامل انسان‌زاد و زمین‌زاد (طبیعی) استفاده می‌شود. در یک عبارت کلی، این شاخص می‌تواند بیانگر شدت تأثیر عوامل خارجی (انسان‌زاد) باشد (Zhang et al., 2007; Yaqin et al., 2008). مقدار Igeo برای فلزات سنگین در نمونه‌های خاک، با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی نمونه‌ها و غلظت‌های متناظر آن‌ها در نمونه مرجع (ترکیب شیل میانگین) محاسبه شد. شکل (۴-۱۶) نمودار جعبه‌ای مقادیر ضریب Igeo فلزات مختلف را در نمونه‌های خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد. پیش از این،

رده‌بندی آلودگی برای شاخص زمین‌انباشت در فصل سوم ارائه گردید. بر این اساس، شاخص زمین‌انباشت برای فلزات Cd و در بعضی نمونه‌ها Ni کمتر از صفر است و بنابراین خاک‌های مورد مطالعه نسبت به این فلزات ناآلوده هستند. خاک‌های مورد مطالعه نسبت به فلزات Cr و Ni آلودگی متوسط نشان می‌دهند. فلز Cu به جز نمونه خاک‌های شماره ۱ و ۳ و ۴ که آلودگی شدید را نشان می‌دهد در مابقی نمونه‌ها آلودگی متوسط دارند. نمونه‌های خاک نسبت به فلز Pb آلودگی بی‌نهایت را نشان می‌دهند و فلز Zn به جز در نمونه‌های ۱۱ و ۷، ۶، ۵، ۴، ۳ که آلودگی متوسط نشان می‌دهند، مابقی آلودگی بی‌نهایت دارند.



شکل ۴-۱۶- نمودار جعبه‌ای ضرایب زمین‌انباشت برای فلزات در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

فصل پنجم  
نتیجہ گیری و پیشہاوا

این مطالعه با هدف ارزیابی ژئوشیمیایی غلظت و تمرکز فلزات سنگین در خاک‌های اطراف مجتمع معدنی دونا صورت گرفته است. علاوه بر اینها، گونه‌سازی و دسترس‌پذیری این فلزات در نمونه‌های خاک نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش به نتایج بدست آمده از این پژوهش به صورت فهرست‌وار اشاره خواهد شد و در انتها نیز پیشنهادهایی برای مطالعات آتی ارائه می‌گردد.

## ۵-۱- نتایج

۱- بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی در نمونه‌های خاک نشان داد که pH نمونه‌ها به علت وجود سنگ‌های میزبان آهکی تا دولومیتی در منطقه، در محدوده خنثی تا قلیایی قرار می‌گیرد. همچنین میزان ماده آلی در خاک پایین است که علت آن کوهستانی بودن منطقه و عدم وجود پروفیل کامل خاک در منطقه است.

۲- بررسی توزیع سطحی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک مورد مطالعه نشان داد که غلظت فلزات Cu, Pb, Cd, Zn در بیشتر نمونه‌ها برداشت از محدوده سایت معدنی بسیار بالاست که این امر به دلیل تأثیر فعالیت‌های معدنی و استخراج ماده معدنی بر ترکیب شیمیایی خاک‌های منطقه است. بالا بودن غلظت فلزات در نمونه‌های اطراف سد باطله نیز به دلیل فرسایش یا لیچینگ باطله‌ها است.

۳- مطالعه آمار توصیفی داده‌های مربوط به غلظت کل فلزات در نمونه‌های خاک مورد مطالعه نشان داد که میانگین غلظت فلزات در خاک به صورت  $Cd > Ni > Cr > Cu > Zn > Pb$  تغییر می‌کند. همچنین با توجه به اینکه تمامی فلزات دارای ضریب تغییرات بالایی هستند و ضریب تغییرات آنها بالاتر از ۱ است بنابراین می‌توان گفت آلودگی از نوع طبیعی یا زمین‌زاد است.

۴- نتایج مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین با برخی استانداردها و مقادیر مرجع جهانی نشان داد که غلظت تمامی فلزات به‌خصوص Pb و Zn در تمامی نمونه‌ها بسیار بالاتر از میانگین خاک جهانی است. همچنین از مقایسه میانگین غلظت فلزات در نمونه‌های خاک با ترکیب میانگین پوسته‌ای و شیل میانگین نیز همین نتیجه حاصل شد.

۵- بر اساس روابط بین فلزات و ضرایب همبستگی پیرسون نشان داد که بین دو فلز سرب و روی همبستگی مثبت قوی برقرار است. همین‌طور بین سرب و مس، سرب و نیکل، سرب و کروم همبستگی مثبت مشاهده می‌شود که بیانگر منشأ مشترک این فلزات در نمونه‌های خاک است. در مورد نیکل و کروم تأثیر فعالیت‌های انسانزاد (فعالیت‌های معدنکاری) نسبتاً کمتر است.

۶- از بین خواص ژئوشیمیایی خاک، pH با هیچیک از فلزات رابطه معناداری نشان نمی‌دهد که علت آن بازه کم تغییرات PH است. فلز مس تنها با درصد ماده آلی خاک در سطح اطمینان ۹۹ درصد رابطه با اهمیتی نشان می‌دهد. ضمناً مس در حین آنالیز استخراج ترتیبی در فاز اکسیدی (متصل به ماده آلی) درصد نسبتاً بالایی را نشان می‌داد که می‌تواند مؤید این همبستگی بالا بین درصد ماده آلی و مس باشد.

۷- بر اساس نتایج حاصل از آنالیز استخراج ترتیبی، دو فلز سرب و روی با فاز دوم (F2- متصل به اکسیدهای آهن و منگنز) و فلزات مس، نیکل و کروم با فاز چهارم (F4- فاز باقیمانده) بیشتر همراهی را نشان می‌دهند. از بین این فلزات، دو فلز روی و مس بالاترین ضریب تحرک‌پذیری را نشان می‌دهند. به طور کلی با توجه به قلیایی بودن نمونه‌های خاک و درصد کم ماده آلی خاک‌های منطقه دونا غیر واکنش‌پذیر بوده و بدین درصد فلزات در فازهای غیر باقی‌مانده (non-residual) یعنی فازهای اول، دوم و سوم نسبتاً پایین است.

۸- بر اساس ضرایب غنی‌شدگی تمامی فلزات نسبت به میانگین پوسته‌ای مقادیر بسیار بالاتری دارند. بنابراین می‌توان گفت تمامی فلزات غنی‌شدگی بی‌نهایت بالا را نشان می‌دهند.

۹- شاخص زمین‌انباشت و ضریب آلودگی برای فلزات Cd, Pb و Zn آلودگی بی‌نهایت بالا را در برخی نمونه‌ها نشان می‌دهد فلزات Cr, Ni و Cu نیز ضرایب زمین‌انباشت و آلودگی کمتری را نشان می‌دهند. مقادیر بالای این ضرایب برای سه فلز سرب، روی و کادمیم بیانگر تأثیر فعالیت‌های انسانزاد (فعالیت‌های معدنی) بر غلظت این فلزات در نمونه‌های خاک است. برای دو فلز کروم و نیکل ضرایب پایین‌تر نشان‌دهنده تأثیر کمتر فعالیت‌های معدنکاری بر غلظت این دو فلز در خاک‌های منطقه است.

## پیشنهادها

- ۱- با توجه به موقعیت معدن (که در بالادست قرار دارد) و غلظت بالای فلزات در خاکهای منطقه و احتمال آلودگی رسوبات منطقه (در پایین دست)، پیشنهاد می شود با انجام مطالعه دقیق ژئوشیمیایی-زیست محیطی بر روی رسوبات و آب رودخانه منطقه (رودخانه الیکا)، شدت آلودگی فلزی در آنها و همچنین عوامل مؤثر بر این آلودگی مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۲- انجام مطالعات بیوژئوشیمیایی بر روی گیاهان بومی منطقه و بررسی ارتباط آن با غلظت فلزات در خاکهای منطقه و معرفی گونه های انباشتگر مناسب برای اکتشافات ژئوشیمیایی و مطالعات پاک سازی خاک.
- ۳- با توجه به عیار بالای فلز در باطله های معدن دونا و به منظور جلوگیری از آلودگی خاک یا سایر بخش های محیط، پیشنهاد می شود که با ارتقای سطح تکنولوژی در کارخانه فراوری از این باطله ها مجدداً برای استحصال سرب استفاده شود.
- ۴- با توجه به گسترش و انباشت زیاد مواد باطله در منطقه (باطله های فراوری و باطله های استخراج) ، پیشنهاد می شود مطالعات دقیق کانی شناسی و ژئوشیمیایی با هدف تعیین پتانسیل آلوده کنندگی این باطله ها در منطقه صورت گیرد.

## منابع فارسی

ابوئیان م، (۱۳۹۵): "ارزیابی دسترسی زیستی فلزات سنگین در مناطق مجاور به کارخانه فرآوری سرب و روی باما"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۴۰ صفحه.

بابایی، ف؛ خدای، خ. (۱۳۹۷). "بررسی آلودگی زیست‌محیطی خاک‌های اطراف معدن سرب و روی مهدی‌آباد یزد". فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، جلد دوم، صفحه ۱۰-۲۲.

طاهری م، اسماعیلی م، خوش‌زمان ت، تکاسی م، عباسی م، (۱۳۹۴): "غلظت کل و قابل‌جذب فلزات سنگین و ارزیابی شاخص‌های آلودگی در خاک‌های شهرستان زنجان"، فصلنامه علمی-پژوهشی، شماره ۵، دوره ۳۴، جلد ۲۹.

بختیاری، ا، میرزایی، ر و سعیدسلطانی محمدی (۱۳۹۳). "ارزیابی آلودگی فلزات سنگین خاک سطحی در اطراف معدن منگنز در استان قم با استفاده از شاخص زمین‌انباشتگی". کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، راهکارها و چالش‌ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیط‌زیست و گردشگری، تبریز

سامانی راد، ش. (۱۳۷۸)، "زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی و تعیین ژنز معدن سرب دونا در البرز مرکزی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-شمال، ۱۲۰ صفحه.

کریمیان، ع. (۱۳۸۰). "گزارش زمین‌شناسی معدن سرب و روی-باریت دونا". سازمان معادن و فلزات استان مازندران. ۱۴۰ صفحه.

رخ بر م، (۱۳۹۵)، "بررسی زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین در خاک‌های اطراف سد باطله فرآوری معدن سرب و روی ایرانکوه-جنوب غرب اصفهان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۲۵ صفحه.

چراغی م، بلمکی، ب. (۱۳۸۶). "بررسی اثرات زیست‌محیطی معدن سرب و روی آهنگران بر منطقه حفاظت شده لشگردر". مجله علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دوره ۹، صفحه ۱۴۶-۱۶۶.

قشلاقی ا (۱۳۸۸)، "ارزیابی اثرات زیست‌محیطی معدنکاری، فرآوری و استحصال کانسنگ در منطقه معدنی انگوران، استان زنجان، شمال باختری ایران"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شیراز.

- Abdellah El Azharia, Ali Rhoujjatia, Moulay Laârabî El Hachimib, Jean-paul Ambrosic (2017). **Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco**: Ecotoxicology and Environmental Safety, 144, 464–474.
- Akkajit, P., & Tongcumpou, C. (2010). **Fractionation of metals in cadmium contaminated soil**: Relation and effect on bioavailable cadmium. Geoderma, 156, 126-132.
- Alloway, B.J. (1990). *Heavy Metal in Soils*. John Wiley and Sons, New York.
- Arenas-Lago D. Andrade M. L. Lago-Vila M. Rodriguez-Seijo A. and Vega, F.A. (2014) **Sequential extraction of heavy metals in soils from a copper mine: Distribution in geochemical fractions**. Geoderma., 230. 108-118.
- Bradl H. B. (2005). **Heavy metal in the Environment**. Elsevier, Amestrdam, p.105
- Chesworth W. (2008). *Encyclopedia of Soil sciences*. Springer-Verlog, Dordrecht,pp 860.
- Callender, E. (2005). **Heavy metals in the environment-historical trends**. p. 67–105. In Environmental Geochemistry Vol. 9 Treatise on Geochemistry, ed. by B. S. Lollar, Elsevier-Pergamon, Oxford
- Florence T. M. and Batley G. E. (1980) **Chemical speciation in natural waters**, Reveiw Analytical Chemistry. 219-296.
- Foth, H. D. and Ellis, B. G. (1997). *Soil fertility.*, (Ed. 2). p. 290.
- Frau, F., Andrau, C., Fanfani, L., (2009). **Environmental geochemistry and mineralogy of Lead at the old mine area of Baccu Locci (south-east Sardinia,Italy)**, Journal of Geochemical Exploration 100, 105-115.
- Foley, B.(2002). **Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties**. Jouranal of Environemnatal Quality, 31, 2086-95.
- Garrett R.G. (2000). **Natural source of metals of the environment**. Human Ecollogical Risk Assessmment. 6, 945-963.
- Ghayoraneh, M.; Qishlaqi, A. (2017).**Concentration, distribution and speciation of toxic metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in the northwest of Iran**. Journal of Geochemical Exploratio, 180, 1–14.
- Glaser B, Balashov E, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W.(2000). **Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region**. Organic Geochemistry, 31:669–78.



Gleyzes Ch. Tellier S. Astruc M. (2002) .**Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments**: a review of sequential extraction procedures. Trends in analytical chemistry, 21, 451-467.

Gunn A. M., Hunt D. T ., and Winnard D . A.(1989). **The effect of heavy metal speciation in sediment an bioavailability to tubificid worms** . In Environmental Bioassay Techniques and their Application. Springer Netherlands.p. 487-496.

Hoskin, W., Bird, G., Stanley, T.(2000). **Mining -facts, figures and environment**. Industry and Environment 23, 4-8.

Ikenaka, Y., Nakayama, S.M., Muzandu, K., Choongo, K., Teraoka, H., Mizuno, N. and Ishizuka, M., (2010). **Heavy metal contamination of soil and sediment in Zambia**.African Journal of Environmental Science and Technology, 4, 729-739.

Kabata , A. and Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants*. CRC, Washington.

Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. CRC press, Washington.

Koz, B., Cevik, U., Akbulut, S. (2012). **Heavy metal analysis around Murgul (Artvin) copper mining area of Turkey using moss and soil**. Ecological Indicator. 20, 17–23.

Li Y.H. (2000). **A Compendium of Geochemistry: from Solar Nebula to the Human Brain**, Princeton University Press, New Jersey, 475 pp

Liao, G. L., Liao, D. X. and Li, Q. M. 2008. **Heavy metals contamination characteristics in soil of different mining activity zones**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18: 207-211.

Li Q., Wu Z ., Chu B., Zhang N ., Cai S., and fang J.(2007). **Heavy metals in coastal wethland sediments of the pearl River Estuary, China**. Environmental pollution, 149, 158-164.

Lindsay, W. L. (1979). *Chemical equilibria in soils*. John Wiley and Sons Ltd.

Lottermoser, B. G. (2010). **Mine wastes: characterization, treat-ment, and environmental impacts**. Heidelberg: Springer-Verlag.

Mason B and Moore C.B. (1982). **Principles of Geochemistry**. Wiley & Sons. New York.

- Micó, C., Recatalá, L., Peris, M., & Sánchez, J. (2006). **Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis.** *Chemosphere*, 65, 863-872.
- Muller, G. (1969). **Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River.** *Geojournal*, 2, 108-118.
- Navarro, M. C., Perez-Sirvent, C., Martinez-Sanchez, M. J., Vidal, J., Nannoni, F., Protano, G., Riccobono, F., (2011). **Fractionation and geochemical mobility of heavy elements in soils of a mining area in northern Kosovo,** *Geoderma* 161, 63-73.
- Tovar, P. J. and Jaume, B. (2008). **Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone.** *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 110-125.
- Obiora, S.C., Chukwu, A., Toteu, S.F. and Davies, T.C. (2016). **Assessment of heavy metal contamination in soils around lead (Pb)- zinc (Zn) mining areas in Enyigba, southeastern Nigeria.** *Journal of the Geological Society of India*,87(4), 453-462.
- Obiora, S. C., Chukwu, A., & Davies, T. C. (2016). **Heavy metals and health risk assessment of arable soils and food crops around Pb–Zn mining localities in Enyigba, southeastern igeria.** *Journal of African Earth Sciences*, 16, 182–189
- Osman K.T (2014).**Soil pollution. In: soil degradation, conservation and remediation,** Springer, The Netherland, p. 149–226
- Praveena S.M., Aris A.Z., Radojevic M. (2010). **Heavy Metals Dyanamics and sourc in intertidal Mangrove Sediment of Sabah, Borneo Island.** *Environment Asia*, 3, 79-83.
- Sutherland R. A., Tack F . M . G., Tolosa C. A., and Verloo M. G.(2000). **Operationally defined metal fractions in road deposited sediment,** Honolulu, Hawaii. *Journal of Environmental Quality*, 29(5), 1431-1439.
- Salomons,, W (1995). **Environmental impact of metals derived from mining ctivities: Processes, predictions, prevention.** *Journal of Geochemical Exploration* 52, 5-23.
- Sherene T. (2010).**Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment.** *Biological Forum.*, 2, 112-121.
- Siegel E. R. (2002). *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals.* Springer verlag, New York, p.232
- Singh K. P., Mohan D., Singh V. K., and Malik A. (2005). **Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-a tributary of the Ganges India.** *Journal of hydrology*, 312, 14-27

Selvaraj, K., Ram Mohan, V., Szefer, P.(2004). **Evaluation of metal contamination in coastal sediment of the Bay of Bengal, India: geochemical and statistical approaches** Marine Pollution Bulliten, 49, 174-185.

Tessier, A., Campbell, P. G., & Bisson, M. (1979). **Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals**. Analytical chemistry, 51(7), 844-851.

Takac P. Szabova T. Kozakova L. and Benkova, M. (2009). **Heavy Metals and their Bioavailability from soils in the long-term polluted central Spis region of SR**. Plant soil environment, 55, **167-172**.

USEPA. (2004). **Test methods for evaluating solid waste**. In: Method 9045D, Washington,

Ure, A.M., Quevauviller, Ph., Muntau, H., Griepink, B., 1993.**Speciation of heavy metals in soils and sediments: an account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the Community Bureau of Reference (BCR)**. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 51, 135–151.

Perk, M. (2013). *Soil and water contamination*. CRC Press, Washington.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). **An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter**, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science, 37, 29-38.

Yaqin, J., Yinchang, F., Jianhui, W., and Tan, Z.(2008). **Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in china**. Journal of Environmental Science, 20, 571-578.

Zhang, L., Ye, X., Feng, H., and jing, Y.(2007). **Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China**. Marine Pollution Bullien, 54, 974-982.

Xian, X. and I. Shokohifard (1989). **Effect of pH on chemical forms and plant availability of cadmium, zinc and lead in pollution soils**. Water, Air & Soil Pollution, 45, 265-273.

## **Abstract**

Mining and its related activities are the most important source of metals in soils. The main aim of the present study is to investigate the accumulation and the pollution level of heavy metals in soil around Duna Pb-Zn mine and its tailing dam. To do so, 12 soil samples were collected from the mine site and around the tailing Dam. Several physicochemical parameters (Organic matter, Ph) of soil and the concentration of heavy metals (Pb,Zn,Cd,Cr,Ni and Cu) were measured by standard methods. In addition, some soil samples were analysed by four stage sequential extraction analysis (BCR) to determine the domainat geochemical forms. The result shows that the average amount of pH and organic matter are 7.60 and 2.11 which shows the uneven distribution in soils. According to geochemical data the concentrion of most metals specially Pb, Zn and Cd with a mean of 8170, 1217 and 9 mg/kg in the soils around mine site which are significantly higher than the global soils and local unpolluted soils. This is confirmed by (geoaccumulation ) and pollution factors. According to the results of sequential analysis more than %50 of Pb and Zn in the second phase and more than %60 of Ni, Cr and Cu is accosited with the residaul phase. According to this results, Zn and Cu have that most mobility factor among metals. The calculated correlation coefficient show the positive correlation between metals and also between metals and some physicochemical parameters of soil such as the amount of organic material which show the comman source of these metals related to mining activities in this site.

**Keywords:** Pb and Zn mine , Duna , heavy metals , tailing dam , processing , soil pollution



Shahrood University of Technology

**Faculty of Earth Sciences**

**M.Sc. Thesis in Geochemistry**

**Geochemical evaluation of soil contamination  
around Duna Pb mine**

**By: Bahar valinezhad**

Supervisor:

**Dr. A. Qishlaqi**

**July 2019**