

صلى الله عليه وسلم



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش استخراج

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر دمپ باطله فرآوری با

استفاده از روش‌های تخمین، مطالعه موردی - معدن طلای موته

نگارنده: بابک عابدی اورنگ

اساتید راهنما:

رضا خالوکاکایی

کیومرث سیف‌پناهی

استاد مشاور:

مهدی حکمت

دی‌ماه ۱۳۹۶



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره: ۹۶۹۶۲۰۱۹
تاریخ: ۹۶/۱۲/۱۲

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 / آقای بابک عابدی اورنگ با شماره دانشجویی ۹۴۱۱۶۷۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان مدل سازی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر دمپ باطله فرآوری با استفاده از روش های تخمین - مطالعه موردی معدن طلای موته که در تاریخ ۹۶/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ☒ خلی، خوب) ☐ مردود			
نوع تحقیق: ☒ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر رضا خالوکاکی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر کیومرث سیف پناهی	استادیار	
۳- استاد مشاور	مهندس مهدی حکمت	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد جهانی چگنی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمد عطایی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر اصغر عزیزی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:
۹۶/۱۲/۱۲

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود مجدداً باید در ۴ ماه برگزار شود.
مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود.

تقدیم به

مقدس‌ترین واژه‌ها در لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگیم را می‌یون مهر و عطوفت اومی دانم.

پدر، مهربانی‌مشتق، برادر و حامی.

برادر و خواهرم همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگیم

و همسر که نشانه لطف الهی در زندگی من است.

سپاسگزاری

از اساتید گرامیم جناب آقای دکتر رضا خالو کاکانی و جناب آقای دکتر کیومرث سیف‌پناهی بسیار سپاسگزارم چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان انجام این پایان‌نامه امکان‌پذیر نبود. از مهندس حسین ابراهیمی که با وجود خطرات جانی آزمایش‌های پایان‌نامه حاضر علاوه بر اساتیدم تنها کسی بود که همواره همراه و در کنار من بود تشکر ویژه دارم. مهندس کاظم سعیدی باره‌سنایی‌های سازنده سبب تسریع انجام پایان‌نامه بوده‌اند. مهندس آرشدرویشی، مهندس افشین قلی‌نیا، مهندس نوید افراسیابی، مهندس مهدی باجولوند و علیدین حتی نیز از همراهان همیشگی اینجانب در مشکلات زندگی بوده‌اند.

تعهدنامه

اینجانب **بابک عابدی اورنگ** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته استخراج دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع مدل سازی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر دمپ باطله فرآوری با استفاده از روش های تخمین، مطالعه موردی- معدن طلای موته تحت راهنمایی دکتر رضا خالوکاکایی و دکتر کیومرث سیف پناهی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 است 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 می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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 :

امضاء 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) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

محیط زیست از ارکان اصلی توسعه پایدار است. رشد اقتصاد و افزایش میزان تولیدات صنعتی، منجر به تولید مقادیر زیاد مواد باطله و محصولات جانبی بی ارزش، خطرناک و مضر می شود که منشأ پدید آمدن مشکلات زیست محیطی مختلفی می شود. در این تحقیق پس از نمونه برداری صحرائی (سطحی و عمقی) از دمپ باطله فرآوری معدن طلای موته و اندازه گیری آزمایشگاهی میزان سیانور موجود در نمونه، مدل سازی توزیع سیانید دمپ باطله انجام شد. برای انجام مدل سازی از روش های جدید یادگیری ماشین و زمین آمار در نرم افزار MATLAB استفاده شده است. بنابراین روش های ماشین های بردار پشتیبان، جنگل های تصادفی، آنالیز تشخیص خطی و آدابوست جهت مدل سازی مورد استفاده قرار گرفتند، که روش آدابوست بالاترین دقت در تخمین را ارائه داده است. زمین آمار برای پوشش ضعف این روش ها در بیان همگن و یا ناهمگن بودن محیط و محاسبه خطاهای تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج مطالعات زمین آماری غلظت سیانید در دمپ باطله به صورت همگن است و شعاع تاثیر حاصل از وریوگرام برابر $8/3$ متر می باشد. این شعاع تاثیر با نتایج تعداد نمونه های انتخاب شده برای تخمین همخوانی دارد و مقدار به دست آمده از اثر قطعه ای حاکی از خطای ناچیز نمونه برداری، آماده سازی و آنالیز نمونه ها می باشد. همچنین مدل مفهومی تحول و انتقال آلاینده سیانید در دمپ باطله فرآوری طلای موته به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن مکانیسم فیزیکی شیمیایی حاکم بر آن ارائه شده است. در پایان با تخمین مقدار کلی سیانید موجود در خاک، هزینه های تصفیه دمپ باطله محاسبه و همچنین راه های کسب درآمد از این دمپ باطله مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: سیانید، دمپ باطله فرآوری، معدن طلای موته، روش های یادگیری ماشین،

زمین آمار، مدل مفهومی.

فهرست

۱- فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ تأثیرات زیست محیطی.....	۵
۳-۱ معادن طلا.....	۷
۴-۱ معدن طلای موته.....	۸
۴-۱-۱ سیانید.....	۸
۵-۱ بیان مسئله.....	۹
۶-۱ ضرورت انجام تحقیق.....	۱۰
۷-۱ اهداف تحقیق.....	۱۰
۸-۱ روش تحقیق.....	۱۱
۹-۱ ساختار پایان نامه.....	۱۱
۲- فصل دوم: مروری بر پژوهش های پیشین.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۴
۲-۲ محیط زیست معدن.....	۱۴
۳-۲ محیط زیست معادن طلا.....	۱۶
۴-۲ روش های درون یابی فضایی.....	۱۹
۵-۲ جمع بندی.....	۲۳
۳- فصل سوم: مواد و روش آزمایش.....	۲۵

۱-۳	مقدمه.....	۲۶
۲-۳	سیانوراسیون در فراوری طلا.....	۲۶
۳-۳	تأثیر غلظت سیانید.....	۲۷
۴-۳	نمونه‌برداری.....	۳۱
۵-۳	اندازه‌گیری غلظت سیانور.....	۳۴
۱-۵-۳	آزمایش‌ها.....	۳۶
۱-۱-۵-۳	تصفیه سیانید درگیر با کلر.....	۳۷
	الف- مراحل انجام آزمایش (مرادیان و همکاران، ۱۳۹۲):.....	۳۷
	ب- مواد و تجهیزات مورد نیاز:.....	۳۷
۲-۱-۵-۳	آزمایش تقطیر.....	۳۸
۲-۵-۳	روش انجام آزمایش (مرادیان و همکاران):.....	۳۸
۳-۵-۳	مواد و تجهیزات مورد نیاز:.....	۳۹
۶-۳	روش اندازه‌گیری سیانید با روش کالریمتریک.....	۳۹
۱-۶-۳	مواد مورد نیاز:.....	۴۰
۲-۶-۳	روش انجام آزمایش کالریمتری:.....	۴۱
۷-۳	روش انجام آزمایش تیتراسیون.....	۴۱
۱-۷-۳	استاندارد کردن نیترات نقره.....	۴۲
۲-۷-۳	آزمایش اندازه‌گیری سیانید.....	۴۲
۸-۳	اندازه‌گیری سیانید نمونه‌ها.....	۴۳

۴۴	۳-۸-۱ نتایج آزمایش کالریمتری.....
۴۵	۳-۹ کلاس بندی داده های آزمایشگاهی.....
۴۶	۳-۱۰ انتخاب نرم افزار مدل سازی.....
۴۶	۳-۱۱ انتخاب روش مناسب مدل سازی.....
۴۹	۳-۱۲ جمع بندی.....
۵۱	۴- فصل چهارم: مبانی نظری روشهای مدل سازی.....
۵۲	۴-۱ مقدمه.....
۵۲	۴-۱-۱ آنالیز تشخیصی خطی.....
۵۲	۴-۱-۱-۱ تابع تشخیص دو کلاسی.....
۵۴	۴-۱-۱-۲ تابع تشخیص چند کلاسی.....
۵۷	۴-۱-۱-۳ حداقل مجموع مربعات خطا.....
۵۹	۴-۱-۲ آدابوست.....
۵۹	۴-۱-۲-۱ الگوریتم آدابوست.....
۶۳	۴-۱-۳ ماشین های بردار پشتیبان.....
۶۳	۴-۱-۳-۱ مفهوم بردار پشتیبان.....
۶۵	۴-۱-۳-۲ الگوریتم ماشین های بردار پشتیبانی.....
۶۸	۴-۱-۳-۳ ماشین بردار پشتیبان چند کلاسی.....
۶۹	۴-۱-۴ جنگل های تصادفی.....
۷۰	۴-۱-۴-۱ روش درخت های رده بندی و رگرسیونی.....

۷۱	 ۲-۴-۱-۴ اندازه درخت و هرس کردن
۷۲	 ۳-۴-۱-۴ جنگل‌های تصادفی
۷۳	 ۴-۴-۱-۴ الگوریتم روش جنگل‌های تصادفی
۷۳	 ۲-۴ تعیین همگن یا ناهمگن بودن محیط
۷۳	 ۱-۲-۴ بررسی نرمال بودن داده‌ها
۷۳	 ۱-۱-۲-۴ روش توصیفی در بررسی نرمال بودن داده‌ها
۷۵	 ۳-۴ آزمون‌های آماری جهت بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها
۷۶	 ۱-۳-۴ زمین‌آمار
۷۸	 ۴-۴ جمع‌بندی
۷۹	 فصل پنجم: مدل‌سازی توزیع سیانید دمپ باطله و ارزیابی اقتصادی نتایج مدل‌سازی
۷۹	 ۵- له تر معدن
۸۰	 ۱-۵ مقدمه
۸۰	 ۲-۵ مدل‌سازی
۸۰	 ۱-۲-۵ نتایج مدل‌سازی با روش جنگل‌های تصادفی
۸۲	 ۲-۲-۵ نتایج مدل‌سازی با روش آنالیز تشخیص خطی (LDA)
۸۳	 ۳-۲-۵ نتایج مدل‌سازی با روش SVM
۸۵	 ۴-۲-۵ نتایج مدل‌سازی با روش آدابوست
۸۷	 ۳-۵ تحلیل نتایج مدل‌سازی
۹۲	 ۴-۵ تخمین تناژ سیانید موجود در دمپ باطله با استفاده از مدل‌سازی آدابوست

۵-۵	بررسی همگنی و شعاع تأثیر محیط	۹۴
۵-۶	هزینه تصفیه دمپ باطله	۹۷
۵-۶-۱	بررسی فنی اقتصادی تصفیه سیانید	۹۷
۵-۶-۱-۱	هزینه‌های تصفیه	۹۷
۵-۶-۱-۲	عناصر نادر خاکی و عناصر گران قیمت	۹۸
۵-۷	جمع‌بندی	۱۰۱
۶-	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات:	۱۰۳
۶-۱	نتیجه‌گیری	۱۰۴
۶-۲	پیشنهادات	۱۰۵
	منابع	۱۰۷
	پیوست	۱۱۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: انتشار SO_2 بین سالهای ۱۸۵۰ تا ۲۰۰۰ ۳
- شکل ۲-۱: کارخانه فرآوری مجتمع طلای موته..... ۸
- شکل ۱-۳: تأثیر غلظت سیانید در سرعت انحلال طلا و نقره در محلول اشباع شده از هوا..... ۲۸
- شکل ۲-۳: نقاط تعیین شده جهت نمونه‌برداری از باطله معدن..... ۳۲
- شکل ۳-۳: نقاط نمونه‌برداری در دمپ باطله معدن..... ۳۲
- شکل ۴-۳: عمق نهایی نقاطه نمونه‌برداری شده..... ۳۳
- شکل ۵-۳: عکس هوایی محدوده نقاط نمونه‌برداری شده..... ۳۳
- شکل ۶-۳: تجهیزات آزمایشگاهی سیستم اندازه‌گیری سیانید موجود در خاک..... ۳۸
- شکل ۷-۳: نمای شماتیک فرآیند تیتراسیون..... ۴۳
- شکل ۸-۳: آموزش دهنده کلاس‌بندی برنامه..... ۴۷
- شکل ۹-۳: داده‌های تخمین آموزش داده شده برای روش..... ۴۸
- شکل ۱-۴: توضیح هندسه یک تابع تشخیص خطی در دو بعد ۵۴
- شکل ۲-۴: تابع تشخیصی چندگانه به صورت شماتیک: روش یک در مقابل دیگران..... ۵۵
- شکل ۳-۴: نمایش مناطق تصمیم‌گیری برای یک تشخیص خطی چند کلاسی..... ۵۷
- شکل ۴-۴: تأثیر داده‌های خارج از رده یا پرت بر نمودار حداقل مربعات..... ۵۸
- شکل ۵-۴: نمای اولیه از نحوه عملکرد الگوریتم آدابوست در دو کلاس..... ۶۰
- شکل ۶-۴: عملکرد بهتر چند کلاس‌بند ضعیف نسبت به یک کلاس‌بند قوی..... ۶۲
- شکل ۷-۴: کلاس‌بندی داده‌های غیر خطی با استفاده از روش آدابوست..... ۶۲
- شکل ۸-۴: الگوریتم شیوه امتیازدهی و تعیین کلاس هر داده در روش آدابوست..... ۶۳
- شکل ۹-۴: شکل شماتیک از مفهوم بردار پشتیبان..... ۶۴
- شکل ۴-۱۰: انتخاب کلاس‌بند موفق از میان کلاس‌بندهای مختلف ۶۵

- شکل ۴-۱۱: تأثیر توابع کرنل بر داده‌های غیر قابل تفکیک. ۶۶
- شکل ۴-۱۲: نمایش عملکرد یک ماشین بردار پشتیبان و مرزهای پشتیبان. ۶۷
- شکل ۴-۱۳: کلاس‌بندی داده‌ها با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان. ۶۷
- شکل ۴-۱۴: کلاس‌بندی داده‌های تفکیک‌ناپذیر در دو بعد. ۶۸
- شکل ۴-۱۵: نمونه‌ای از افراز درست و اشتباه. ۷۱
- شکل ۴-۱۶: افراز سلسله‌مراتبی. ۷۱
- شکل ۴-۱۷: شکل سلسله‌مراتبی افراز. ۷۲
- شکل ۴-۱۸: الگوریتم جنگل‌های تصادفی. ۷۴
- شکل ۴-۱۹: نتایج مربوط به آزمون‌های آماری در نرم‌افزار SPSS. ۷۶
- شکل ۵-۱: هیستوگرام داده‌های آموزش در کلاسها. ۸۱
- شکل ۵-۲: مدل‌سازی به روش جنگل‌های تصادفی. ۸۱
- شکل ۵-۳: مدل‌سازی به روش آنالیز تشخیص خطی. ۸۲
- شکل ۵-۴: مقایسه هیستوگرام داده‌های آموزش و داده‌های تخمین‌زده‌شده با روش آنالیز تشخیص خطی. ۸۳
- شکل ۵-۵: مدل‌سازی به روش ماشین‌های بردار پشتیبانی. ۸۴
- شکل ۵-۶: مقایسه هیستوگرام داده‌های آموزش و داده‌های تخمین‌زده‌شده با روش ماشین‌های بردار پشتیبان (کلاسها در محور X و فراوانی در راستای محور Y). ۸۴
- شکل ۵-۷: مدل‌سازی به روش ماشین‌های بردار پشتیبان. ۸۶
- شکل ۵-۸: مقایسه هیستوگرام داده‌های آموزش و داده‌های تخمین‌زده‌شده با روش آدابوست. ۸۶
- شکل ۹-۵: تصویر مقاطع افقی از دمپ باطله در الگوریتم آدابوست. ۸۸
- شکل ۱۰-۵: تصویر مقاطع عرضی از دمپ باطله در الگوریتم آدابوست. ۸۸

- شکل ۵-۱۱: تصویر مقاطع عرضی از دمپ باطله در الگوریتم آدابوست ۸۹
- شکل ۵-۱۲: مقطع عرضی دمپ باطله ۸۹
- شکل ۵-۱۳: دو مقطع عرضی متقاطع در دمپ باطله ۹۰
- شکل ۵-۱۴: نمای چند مقطعی دمپ باطله ۹۰
- شکل ۵-۱۵: نمای چندمقطعی دمپ باطله ۹۱
- شکل ۵-۱۶: نمای کلی دمپ باطله ۹۴
- شکل ۵-۱۷: واریوگرامهای برازششده در دو راستای مختلف ۹۵
- شکل ۵-۱۸: واریوگرام تجربی برازش شده بر توزیع سیانید در دمپ باطله طلای موته ۹۶
- شکل ۶-۱: مدل مفهومی تحول و انتقال سیانید در دمپ باطله فرآوری طلای موته ۱۰۱

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مرور منابع مربوط به پایش زیست‌محیطی معادن و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها... ۱۵
- جدول ۲-۲: تحقیقات زیست‌محیطی در زمینه معادن طلا و دمپ باطله تر..... ۱۷
- جدول ۳-۲: طبقه‌بندی روش‌های درون‌یابی داده..... ۲۱
- جدول ۱-۳: ارتباط غلظت سیانید با حجم محلول کار..... ۴۱
- جدول ۲-۳: کلاس‌بندی نمونه‌ها و تعداد نمونه‌های موجود در هر کلاس که از نتایج آزمایشگاهی تعیین غلظت سیانید به دست آمده است..... ۴۶
- جدول ۳-۳: دقت روش‌های مختلف در آموزش الگو از داده‌های آزمایشگاهی..... ۴۹
- جدول ۱-۵: تعیین میزان دقت روش‌های مختلف..... ۸۷
- جدول ۲-۵: تخمین سیانید موجود در دمپ مدل‌سازی شده..... ۹۲
- جدول ۳-۵: مقدار سیانید موجود در دمپ بر اساس مدل‌سازی آدابوست..... ۹۴
- جدول ۴-۵: نتایج به دست آمده از واریوگرام تجربی..... ۹۶
- جدول ۵-۵: هزینه‌های تصفیه سیانید موجود در دمپ باطله با اکسیدکننده‌های مختلف..... ۹۸
- جدول ۶-۵: میانگین عیار عناصر نادر موجود در باطله معدن طلای موته..... ۹۹
- جدول ۷-۵: عیار عناصر گران‌قیمت موجود در دمپ باطله..... ۱۰۰

فصل اول

کیست

۱-۱ مقدمه

معدنکاری و فرآوری مواد معدنی فلزی را می‌توان به عنوان یکی از دلایل اصلی آسیب‌های زیست‌محیطی عنوان کرد. مواد معدنی فلزی از طریق معدنکاری استخراج می‌شوند که این امر مستلزم برداشت سنگ معدن از زمین است. در مجموع کانسارهای بین سطح زمین تا عمق ۱۰۰ متری از طریق روش معدنکاری روباز و کانسارهای قرارگرفته در عمق بیشتر توسط روش معدنکاری زیرزمینی، استخراج می‌شوند. معدنکاری به روش روباز نسبت به روش زیرزمینی باطله بیشتری را تولید می‌کند. برای مثال در معدن مس بینگهام^۱ در ایالت یوتا، یکی از بزرگ‌ترین معادن روباز در جهان، روزانه ۲۲۵۰۰۰ تن سنگ برداشت می‌شود که تنها ۲۰٪ از این مقدار سنگ برداشت‌شده را ماده معدنی تشکیل می‌دهد (Kesler, 2015).

حدود ۹۰٪ از معادن در آمریکا از طریق روش روباز استخراج می‌شوند که این نسبت در کل دنیا تنها ۵۰٪ است. تمرکز زیست‌محیطی در مناطق تحت عملیات معدنکاری، ابتدا مربوط به آسیب‌های مکانیکی و سپس مربوط به تولید زهاب اسیدی معدن^۲ است. آسیب‌های مکانیکی نسبت به تولید زهاب اسیدی معدن و حضور فلزات سنگین در خاک به سبب معدنکاری، فرآوری و خالص‌سازی کانی‌های فلزی به دلیل فیزیکی بودن دارای پیچیدگی کمتری است (Barney 1980). حدود ۳۰۰۰ کیلومترمربع (حدود ۰/۲۶٪ از کل سرزمین آمریکا) از خاک‌های آمریکا توسط فعالیت‌های معدنکاری تحت پوشش قرار گرفته‌اند که این مقدار در مقابل ۱۰۰,۰۰۰ کیلومترمربع از زمین‌های اشغال‌شده این سرزمین توسط حیات‌وحش و پارک ملی و ۳۸۵,۰۰۰ کیلومترمربع مساحت بیابان‌های آمریکا مقدار ناچیزی است. میزان سرزمین‌های مربوط به معدنکاری در سراسر دنیا حدود ۰/۲٪ از سطح زمین است. تنها بین سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰ استفاده از زمین توسط معادن مس در دنیا حدود ۳ برابر افزایش داشته است. حدود ۶۰٪ از کل زمین‌های مربوط به معدنکاری برای انباشت باطله (خشک یا تر)^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد

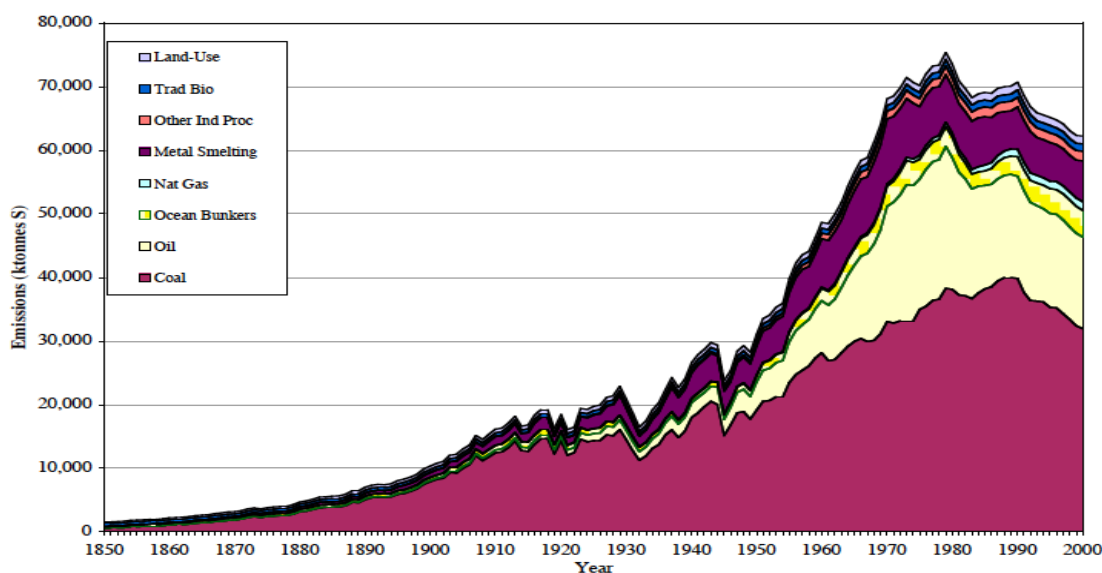
^۱ Bingham

^۲ Acid Mine Drainage or AMD

^۳ Waste or Tailing

(Kesker, 2015).

گرچه معادن بر اساس تولید غالبشان کلاس‌بندی می‌شوند اما ممکن است مقدار زیادی از عناصر دیگر را نیز به عنوان محصول فرعی^۱ تولید کنند. به‌عنوان مثال معادن روی در آمریکا ۷۲٪ از کل روی تولیدشده در این کشور را در حالی تولید می‌کنند که ۱۰٪ از کادمیم، ژرمانیم، ایندیم و تلوریم و به ترتیب ۳/۱٪، ۴/۱٪ و ۶/۱٪ از کل مقدار طلا، نقره و سرب آمریکا را نیز تولید می‌کنند (Minerals Yearbook, 1992). از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت، فرآوری مواد معدنی فلزی معمولاً منجر به آلودگی‌های چندعنصری در محیط‌زیست می‌شود (Dudka and Adriano, 1997). از جنبه اقتصادی، مواد معدنی تولیدشده از سولفیدهای فلزی حائز اهمیت هستند. این مواد به علت حاوی بودن SO_2 به تشکیل اسید سرعت داده و SO_2 را طی عملیات ذوب در جو نیز آزاد می‌کنند. انتشار SO_2 بین سال‌های ۱۸۵۰ تا ۲۰۰۰ در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. با وجود کاهش مداوم انتشار SO_2 از سال ۱۹۷۶ تا کنون، کارخانه‌های ذوب همچنان از منابع اصلی تولید آلودگی و گازها هستند (Dobrin and Potvin, 1992).



شکل ۱-۱: انتشار SO_2 بین سال‌های ۱۸۵۰ تا ۲۰۰۰ (WWW.wattsupwiththat.com).

^۱ By Product

تنوع و فراوانی میکروارگانسیم‌های خاک به دلیل گسترش فعالیت کارخانه‌های فرآوری و ذوب و اسیدی شدن خاک کاهش پیدا کرده است. کاهش این میکروارگانسیم‌ها، حاصلخیزی خاک را از طریق ایجاد آشفستگی در چرخه بیوژئوشیمی نیتروژن و کربن کاهش می‌دهد (Kesker, 2015). کارخانه‌های فرآوری و ذوب فلزات نقش بسزایی در آسیب پوشش گیاهی توسط SO_2 تولیدشده، اسیدی شدن خاک و آلودگی منطقه توسط فلزات ایفا می‌کنند (Freedman and Hutchinson, 1980; Marchwinska and Kucharski, 1990). جذب عناصر نادر از خاک‌های آلوده شده و رسوب مستقیم آلاینده‌ها از اتمسفر بر سطح گیاهان می‌تواند منجر به آلودگی گیاهان توسط آن‌ها شود (Winterhalder, 1984, 1988; Chaney et al., 1988; Rebele et al., 1993). در نتیجه این اتفاق ممکن است گیاهان منطقه سمی شده و پتانسیل انتقال آلودگی عناصر بر چرخه مواد غذایی قوت یابد. خاک فاقد پوشش گیاهی، به طور خاص نسبت به فرسایش حساس است، که این امر منجر به آسیب بیشتر محیط‌زیست در اطراف کارخانه‌های فرآوری و خالص‌سازی می‌شود. تأثیر فعالیت‌های معدنکاری و فرآوری مواد معدنی بر کیفیت محیط‌زیست با تأکید بر آلودگی خاک توسط عناصر نادر توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است (Dudka et al., 1996b). آزادسازی عناصر نادر به عنوان آلاینده‌های محیط‌زیست، توسط فعالیت‌های معدنکاری، فرآوری و خالص‌سازی توسط یک تخمین جهانی ارائه شده است.

باون هر عنصر موجود در محیط با یک فاکتور ۱۰ یا بیشتر نسبت به نرخ طبیعی آن را یک عنصر با پتانسیل آلودگی در نظر گرفته است (Bowen, 1979). بر این اساس، عناصر خطرناک بالقوه برای محیط‌زیست شامل نقره، سرب، کادمیم، کروم، مس، جیوه، منگنز، آنتیموان، قلع و روی هستند. مقدار مواد معدنی در دسترس برای استخراج به عنوان یک منبع مفید شناخته شده و منابع کوچک دیگر قابل بهره‌برداری به عنوان محصولات فرعی هستند که می‌توانند در سود استخراج نیز سهیم باشند، اما مازاد این مواد که غیرقابل استحصال بوده یا استحصال آن‌ها صرفه اقتصادی ندارند، سبب ایجاد آلودگی در خاک می‌شوند (McLaren and Skinner, 1987). میزان تولید مواد معدنی وابسته به عوامل متعددی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از (Kesler, 2015):

- دسترسی به مواد معدنی منابع،

- فعالیت بازار و میزان تقاضا،

- مقررات دولتی،

- افکار عمومی،

افکار عمومی به عنوان یک فاکتور بسیار تأثیرگذار مطرح است، اما میزان نفوذ آن در تعیین تقاضای جهانی مواد معدنی به سختی قابل پیش‌بینی است. به‌عنوان مثال در چند سال اخیر استفاده از اورانیوم به دلیل افکار عمومی منفی در مورد ایمنی نیروی هسته‌ای کمتر شده است.

اگر سطح مصرف مواد معدنی فلزی از ابتدای قرن ۲۱ ثابت فرض شود، ذخایر عناصر بسیار مهم از قبیل سرب-روی، مس و نیکل به ترتیب تنها برای ۱۰-۲۵ سال، ۲۵-۵۰ سال و ۵۰-۱۰۰ سال کفایت کرده و این نشان‌دهنده نیاز به کشف و استخراج ذخایر جدیدتر و در نتیجه ایجاد باطله‌ها و مشکلات زیست‌محیطی گسترده‌تر است (Kesler, 2015).

فراهم کردن جنبه‌های زیست‌محیطی عامل جدایی‌ناپذیر در تولید مواد معدنی است که موجب طولانی‌تر شدن کشف و گسترش ذخایر مواد معدنی و افزایش هزینه‌های تولید است. برای مثال در آمریکا ۸ کارخانه اصلی تولید مس در حال حاضر ۹۸٪ از SO_2 مربوط به خود را بازیابی می‌کنند. بازیابی بیشتر نیز امکان‌پذیر است اما هزینه‌های بسیار زیادی را بر معدن تحمیل می‌کند. سیستم جدید فلاش مداوم نصب شده در معدن بینگهام آمریکا، ۹۹/۹٪ از انتشار SO_2 را پوشش می‌دهد. این سیستم هزینه‌ای بالغ بر ۸۸۰ میلیون دلار برای معدن داشته که حدود ۱۵٪ از کل درآمد مورد انتظار معدن است (Kesler, 2015).

۲-۱ تأثیرات زیست‌محیطی

در صنایع معدنی، بخش با ارزش ماده معدنی خام که به دست آوردن آن حائز اهمیت است، بخش کوچکی از کل حجم ماده معدنی را تشکیل می‌دهد. برای مثال در صنعت معدنکاری مس، با یک نسبت معمولی فلز به ماده معدنی ۰/۶، نسبت مواد به کارگرفته شده به واحد فلز قابل‌عرضه به بازار

۱:۴۲۰ است. مواد معدنی کاربردی به خصوص مواد معدنی فلزی، مقدار زیادی از باطله یا مواد غیرمفید متمایز از صنعت معدنکاری را تولید می‌کنند. میزان این باطله نسبت به سایر صنایع به صورت قابل-ملاحظه‌ای بیشتر است.

باطله‌های حاصل از معدنکاری و فرآوری مواد معدنی را می‌توان در ۴ گروه بزرگ دسته‌بندی کرد (Salomons and Forster, 1988):

- باطله خشک معدن (روباره و سنگ‌های بی‌ثمر)،
- باطله تر معدن،
- آب حاصل از لیچینگ دمپ،
- آب مربوط به معدن.

اکثر مواد معدنی فلزی در دنیا از طریق روش‌های معدنکاری سطحی استخراج می‌شوند. روش‌های معدنکاری سطحی میزان بیشتری از باطله خشک را نسبت به معدنکاری زیرزمینی تولید می‌کند. باطله خشک حدود ۹-۲۷ درصد کل ماده معدنی خام را در معادن زیرزمینی تشکیل می‌دهد. در معادن روباز مقدار حجم باطله خشک ۲-۱۰ برابر کل حجم ماده معدنی خام است. باطله تر محصول کارخانه فرآوری است که در آن مواد معدنی برای آزادسازی بخش باارزش ماده معدنی از ماتریکس کم‌ارزش سنگ خرد می‌شوند (Kesler, 2015).

قابل توجه‌ترین شکل انتشار آلاینده‌های مربوط به صنعت تولید فلز، انتشار آلودگی‌ها در جو است. آلاینده‌های خروجی از دودکش‌های بلند کارخانه‌های ذوب، در ارتفاعاتی که انتشار گازهای آن‌ها به اندازه کافی رقیق شود، در لایه‌ی پایینی اتمسفر تخلیه می‌شوند تا کیفیت مناسبی از هوا پدید آید. مواد باطله به صورت عمده از طریق کارخانه‌های ذوب و خالص‌سازی ایجاد می‌شوند، که می‌توانند باطله‌های خطرناکی را شامل، باطله‌های فرآوری، باقی‌مانده‌های کنترل آلودگی هوا و ترکیبات شیمیایی آبی را تشکیل دهند.

۱-۳ معادن طلا

بخش معدن از طریق درآمد ارز خارجی، اشتغال و بهبود شرایط زندگی به رشد اقتصادی هر کشور کمک می‌کند. با این حال کشف نفت به عنوان پایه اصلی اقتصاد کشورهای صاحب نفت به عدم توجه کافی به معدن طلا در این کشورها با وجود پتانسیل امیدوارکننده آن‌ها منجر شده است. مطالعات نشان داده‌اند که استخراج و فرآوری طلا می‌تواند به طور قابل توجهی محیط زیست طبیعی (از جمله خاک، آب، رسوبات و کیفیت هوا)، سلامت و معیشت انسان را با مخاطره روبرو کند (Ako et al., 2014; Ansa-Asare et al., 2015). آلودگی‌های اصلی به وجود آمده در طی فرآیند استخراج و فرآوری طلا را می‌توان، هیپ لیچینگ همراه با سیانید، اکسیداسیون بیولوژیکی و مشکلات مربوط به ذوب برشمرده (Hilson, 2002; Leder et al., 2012). همچنین قوانین موجود در کشورهای در حال توسعه در مدیریت مؤثر صنایع استخراج طلا ناکارآمد بوده و این امر سبب تخریب بیش از حد محیط زیست در این کشورها می‌شود (Hilson, 2000).

با این حال در کشورهای غنی از طلا، صنایع معدنی (کوچک مقیاس یا بزرگ مقیاس)، به طور مداوم مواد سمی شیمیایی از قبیل جیوه (معمولاً در معادن کوچک مقیاس مورد استفاده قرار می‌گیرد)، سیانید و آرسنیک و محتویات مضر آن‌ها را در آب‌ها تخلیه کرده و کارگران و ساکنان در معرض این مواد را در برابر طیف وسیعی از خطرات بهداشتی از جمله عفونت‌های دستگاه تنفسی، بیماری‌های قلبی-عروقی، عفونت‌های پوستی و عفونت‌های سرطانی قرار می‌دهد (Adei et al., 2011; Obiri et al., 2010).

پس از احساس نیاز و مسئولیت در انجام فعالیت‌های زیست محیطی در پژوهش پیشرو، تعیین مطالعه موردی برای انجام مطالعات محیط زیستی انجام شد. برای این امر ابتدا مهم‌ترین معادن ایران انتخاب شده و سپس با توجه به فقر فعالیت‌های صورت گرفته نسبت به هر معدن و دغدغه‌های پیشرو با مشورت اساتید راهنما، معدن طلای مویه برای انجام تحقیق انتخاب شد.

۱-۳-۱ معدن طلای موته

معدن طلای موته در ۲۷۰ کیلومتری جنوب غرب تهران در رشته کوه‌های نسبتاً پست واقع در جنوب دلیجان-شمال غربی میمه و شمال شرقی گلپایگان قرار دارد. فاصله مجتمع معدنی موته (شکل ۲-۱) از روستای موته که در کنار جاده آسفalte گلپایگان قرار دارد، ۸ تا ۱۰ کیلومتر است. ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۹۰۰ تا ۲۳۰۰ متر است. کانسارهای شناخته شده در معدن طلای موته در مجموعه‌ای متامورفیک و در دوره پرکامبرین تشکیل شده‌اند. عملیات فرآوری در این معدن توسط لیج سیانید صورت می‌گیرد (گزارش کار معدن طلای موته، ۱۳۹۱).



شکل ۲-۱: کارخانه فرآوری مجتمع طلای موته.

۱-۳-۲ سیانید

سیانید به طور گسترده به عنوان یک ماده خام ضروری در چندین صنعت شامل نساجی، صنعت پلاستیک، رنگ، عکاسی، گالوانیک، کشاورزی، صنایع غذایی، صنایع دارویی و معدنکاری و متالوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه این ماده دارای میل ترکیبی بسیار بالا با طلا و نقره است، سیانید می‌تواند به عنوان شستشو دهنده منتخب این فلزات از ماده معدنی مورد استفاده قرار گیرد. سیانید در غلظت‌های بسیار پایین نیز موجب مسمومیت حاد شده و می‌تواند موجب مرگ شود.

بررسی وجود این ماده بسیار خطرناک در پساب^۱های معدن و باطله تر بسیار حائز اهمیت است.

۴-۱ بیان مسئله

با رشد روزافزون صنایع و توسعه صنعتی در کشورها بخصوص صنایع معدنی، حجم عملیات معدنی افزایش یافته و اهمیت آن بیشتر شده است. با توجه به مصرف روزافزون مواد معدنی در کشورهای درحال توسعه، استخراج آنها امری ضروری است. تولید و مصرف این مواد اثرات نامطلوبی بر محیط زیست و زندگی انسانها باقی می گذارد. بنابراین با افزایش استخراج مواد معدنی، افزایش اثرات زیست محیطی و مسئله سلامت مطرح می شود.

توسعه صنایع و در نتیجه رشد اقتصاد و افزایش میزان تولیدات صنعتی، منجر به تولید مقادیر زیاد مواد باطله و محصولات جانبی بی ارزش می شود که متأسفانه منشأ پدید آمدن مشکلات زیست محیطی مختلفی می شود. باطله های مربوط به صنایع معدنی شامل سنگ هایی هستند که بعد از جدا کردن کانی ها و مواد با ارزش از سنگ معدن، باقی مانده و معمولاً دور ریخته می شوند. معمولاً در طی سال های بهره برداری از معدن، به تدریج کیفیت کانسنگ در اثر استخراج ذخایر پرعیار، کاهش یافته و در نتیجه میزان باطله تولید شده مرتباً افزایش می یابد. انباشت باطله های معدنی و به ویژه باطله های حاصل از مراحل مختلف فرآوری، منابع مهمی در ایجاد مشکلات زیست محیطی ناشی از معدنکاری محسوب شده و لازم است توجه ویژه ای به آنها مبذول گردد.

پدیده تولید آلودگی بخصوص در مناطق معدنی فلزی پلی متال سولفیدی بسیار شدید است. درواقع وجود کانی هایی مانند پیریت، مارکاسیت، پیروتیت و کلکوپیریت در باطله کارخانه های فرآوری و زغال شویی باعث آلودگی محیط آب و خاک شده و عوارض جبران ناپذیری را بر خاک، آب های سطحی و سفره های آب زیرزمینی می گذارد. برای انجام یک تحلیل مناسب در مورد این آلودگی ها و بررسی مدیریت مشکلات زیست محیطی روش های مختلف بررسی تغییرات پارامترهای زیست محیطی در دمپ-های باطله ارائه شده اند. این روش ها به سه گروه (۱) روش های غیر زمین آماری، (۲) روش های زمین آماری

^۱ Waste Water

و ۳) روش‌های ترکیبی تقسیم می‌شوند (Li and Heap, 2008).

به منظور تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های مذکور، علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه موقعیت فضایی نمونه‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته، که این کار توسط زمین‌آمار صورت می‌گیرد. در زمین‌آمار به آن دسته از متغیرهایی پرداخته می‌شود که ساختار فضایی از خود بروز می‌دهند، بنابراین قبل از استفاده از روش زمین‌آمار، ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار فضایی بین داده‌ها از این روش استفاده می‌کنند.

۱-۵ ضرورت انجام تحقیق

معادن طلا با توجه به تأثیر آن‌ها بر اقتصاد کشور جزء معادن استراتژیک بوده و دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. با وجود اهمیت بسیار زیاد این معادن توجه به تأثیرات محیط‌زیستی این معادن با توجه به قوانین نامناسب کشورهای در حال توسعه به‌خصوص ایران، امری ضروری است.

به منظور بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری زیست‌محیطی و نحوه تولید و انتقال آلاینده‌ها در دمپ‌های باطله فرآوری معادن سولفیدی فلزی، ضروری است که ابتدا اکوسیستم آن از دو منظر فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار گیرد. لذا باید تحقیقاتی در مورد وضعیت آب و هوایی، عناصر و کانی‌های موجود در باطله، نفوذپذیری دمپ باطله (هیدرولوژی)، میزان رطوبت دمپ، میزان عناصر موجود در افق‌های مختلف دمپ، ترکیب شیمیایی باطله معدن، نوع و دانه‌بندی باطله و . . . صورت پذیرد. اگر مناطق آنومال از نظر زیست‌محیطی در دمپ باطله مشخص شود، می‌توان تولید و پخش آلودگی در محیط دمپ باطله را از نظر فیزیکی و شیمیایی کنترل کرد. از طرف دیگر می‌توان برای موارد مشابه هم این مدل را تعمیم داد.

۱-۶ اهداف تحقیق

با توجه به مطالب فوق، در این پایان‌نامه کارشناسی ارشد مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر دمپ باطله فرآوری با استفاده از روش‌های زمین‌آمار یا غیر زمین‌آمار در دمپ باطله کارخانه فرآوری معدن طلای موله اصفهان انجام خواهد شد. اهداف مهم دیگر پایان‌نامه حاضر را

می‌توان مطالب زیر بیان کرد:

- تعیین عناصر اقتصادی موجود در دمپ باطله و مدل‌سازی و تخمین میزان این عناصر،
- تحلیل اقتصادی تصفیه دمپ باطله با توجه به هزینه‌های تصفیه و درآمد حاصل از استحصال عناصر اقتصادی در صورت وجود.

۱-۷ روش تحقیق

با توجه به اهداف تعیین شده در این پژوهش، ابتدا غلظت سیانید موجود در دمپ باطله با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری و سپس مدل‌سازی توزیع سیانید دمپ باطله برای درک مناسب از شرایط شیمیایی و فیزیکی حاکم بر دمپ باطله صورت گرفته است. این مدل‌سازی بر اساس روش‌های کلاس‌بندی و با انتخاب روش برتر در میان روش‌های موجود انجام شده است. به این منظور فعالیت‌های زیر صورت گرفته است:

۱. مطالعه مشکلات زیست‌محیطی و بررسی سابقه علمی موضوع و جمع‌آوری اطلاعات

مورد نیاز

۲. بازدید از دمپ باطله و نمونه‌برداری

۳. اندازه‌گیری آزمایشگاهی غلظت سیانور موجود در دمپ

۴. تعیین روش مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی

۵. مدل‌سازی دویعدی و سه‌بعدی دمپ باطله با استفاده از روش‌های کلاس‌بندی

۶. مقایسه نتایج به دست‌آمده در روش‌های مختلف

۷. تحلیل نتایج به دست‌آمده از مدل‌سازی‌های صورت گرفته

۱-۸ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر در ۶ فصل تدوین شده است. فصل اول به بیان کلیاتی در خصوص مخاطرات محیط‌زیست صنایع معدنی و محیط‌زیست معادن طلا پرداخته شده است. فصل دوم مروری بر پژوهش‌های گذشته صورت گرفته در سه بخش محیط‌زیست، محیط‌زیست معدن طلا و روش‌های درونیایی

داده‌های زیست‌محیطی دارد. در فصل سوم روش‌های اندازه‌گیری غلظت سیانید موجود در نمونه‌های برداشت شده از معدن طلای موته بیان شده و نتایج آزمایش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه و تحلیل مدیریتی بر آزمایش‌های اندازه‌گیری سیانید انجام شده است. در فصل چهارم از بین روش‌های کلاس‌بندی، چند روش منتخب انتخاب و به بیان مبانی این روش‌ها پرداخته شده است. همچنین در این فصل نرمال بودن داده‌ها برای استفاده از این داده‌ها در زمین‌آمار مورد بررسی و خلاصه‌ای از مبانی زمین‌آمار بیان شده است. فصل پنجم پایان‌نامه شامل مدل‌سازی توزیع سیانید دمپ باطله معدن طلای موته و بررسی تغییرات ایجاد شده در دمپ است. در فصل ششم نیز نتیجه‌گیری‌های انجام شده از فصول گذشته بیان و پیشنهاداتی برای کاهش خطر زیست‌محیطی مورد مطالعاتی و همچنین پیشنهاداتی برای مطالعات آینده گنجانده شده است.

فصل دوم

مرور

پروژه‌های آموزشی

برای پیشبرد درست تحقیق و انتخاب روش تحقیق مناسب در زمینه مطالعاتی مورد بحث، استفاده از مطالعات و تجربه‌های پیشین امری ضروری است. در این فصل مطالعات و تحقیقات انجام‌شده مرتبط با موضوع پایان‌نامه پیش رو به ترتیب تقدم زمانی در سه بخش محیط‌زیست معادن، محیط‌زیست معادن طلا و روش‌های تخمین ارائه شده است. در ادامه با توجه به بررسی‌های انجام‌شده با توجه به مراجع تحقیق، اهم مطالعات پیشین تأثیرگذار بر مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲ محیط‌زیست معدن

مشکلات زیست‌محیطی معدن ممکن است به‌صورت مستقیم به دلیل استخراج ماده معدنی، حمل و نقل ماده معدنی، ذوب و پالایش، دفع باطله و پساب در اطراف محیط معدنکاری حاصل شود. در بین مشکلات ذکرشده، باطله‌های معادن اغلب مشکلات زیست‌محیطی جدی‌تری نسبت به موارد دیگر ایجاد می‌کند. آلاینده‌ها ممکن است توسط زهاب اسیدی معدن و یا وزش باد از باطله سنگ خشک یا تر به خاک‌ها منتقل شود. می‌توان با توجه به شرایط هیدرولوژیکی و آب و هوایی مناطق مختلف مکان‌های بالقوه آلودگی را تعیین کرد.

در پژوهش جسوایت^۱ و همکاران (۲۰۱۷) که یکی از جدیدترین کارهای انجام‌شده در زمینه‌ی ارزیابی و پایش آثار زیست‌محیطی است، ترکیب معدنکاری پایدار پیشرو با ارزیابی چرخه زندگی ساده‌تر در ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی معدنکاری، با توجه به نگرانی‌های واحد صنعت و خدمات، پیشنهاد شده است. اگر این فرآیند به طور صحیح و در سطح جهانی اجرا شود، کمینه کردن آثار مخرب معدنی می‌تواند منجر به کاهش تأثیرات زیست‌محیطی شود. افزایش میزان فعالیت‌های معدنکاری با توجه به افزایش میزان تقاضای واحد تولید، سبب افزایش نیاز به بازیافت مواد معدنی است. در صورت غیرقابل بازیافت بودن و یا فزونی میزان تقاضا نسبت به میزان بازیافتی، استفاده از روش معدنکاری پایدار پیشرو

^۱ Jeswiet

امری ضروری خواهد بود. تعیین سطح معدنکاری پایدار پیشرو در این مطالعه در ۱۷ بند مختلف (نظیر اشتغال، تولید، تأثیرات زیست‌محیطی، رعایت حقوق انسانی و ...) مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱-۲ نشان‌دهنده حجم بالای کارهای انجام‌شده در حوزه محیط‌زیست معدن در سال‌های اخیر در سراسر دنیا است. پژوهش‌های بیان شده در جدول فوق تعداد ناچیزی از تحقیقات صورت گرفته را نشان می‌دهند. اهمیت محیط‌زیست به‌ویژه در صنایع معدنی مشهود بوده و پرداختن به این مسئله امری ضروری است.

جدول ۱-۲: مرور منابع مربوط به پایش زیست‌محیطی معادن و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها.

عنوان	نتیجه پژوهش	محقق
یک روش جهت محاسبه پتانسیل خنثی‌سازی باطله خشک معدنکاری	زه‌اب اسیدی معدن حاصل از باطله خشک یا تر و دیگر عناصر معدنی مهم‌ترین مشکل زیست‌محیطی در صنعت معدنکاری است.	Lawrence and Scheske (1997)
زه‌اب اسیدی معدن: دلایل، تصفیه و مطالعه‌های موردی	در بسیاری از موارد، باکتری نقش اصلی در تسریع نرخ تولید اسید ایفا می‌کند در نتیجه بازداري از فعالیتهای باکتریایی می‌تواند منجر به کاهش نرخ تولید اسید شود.	Akcil and Koldas (2006)
تعیین مشخصات محیط‌زیستی سنگ باطله معدن زغال در کار صحرایی	در گذشته عدم توجه کافی به تولید اسید منجر به مشکلات زیست‌محیطی طولانی مدت توسط معادن قدیمی و سدهای باطله آن‌ها شده است.	Hughes et al. (2007)
تأثیر آنتیموان بر رشد میکروبی و فعالیتهای آنزیمی خاک	آنتیموان به عنوان ماده‌ای سرطان‌زا توسط آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان در نظر گرفته شده و تحقیق بر آثار زیست‌محیطی آن باید مورد توجه قرار گیرد.	An and Kim (2009)
تحرك و تأثیر فلزات نادر بر منطقه معدنکاری زغال باراپوکوریا	مواد اولیه برای تولید اسید در این تحقیق مواد معدنی سولفیدی، آب یا اتمسفر مرطوب و یک اکسیدان به‌ویژه اکسیژن اتمسفر یا منابع شیمیایی تعیین شدند و بیان شد میزان تولید اسید نسبت به محتویات باطله در شرایط گوناگون، متفاوت است.	Halim et al. (2013)

ادامه جدول ۱-۲

Moosavirad et al. (2013)	فلزات از قبیل کبالت، مس، آهن، نیکل، روی، کادمیم، سرب و ... زمانی که سولفید آن‌ها در معرض آب و هوا قرار می‌گیرند،	پتروگرافی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی زغال‌سنگ پابدانا استان کرمان
Lee et al. (2015)	طی فرآیند معدنکاری آنتیموان، باطله حاوی مقادیر پایینی از ماده معدنی، باطله و سایر مواد معدنی است. توده باطله آنتیموان ریسک بالایی از آلاینده‌گی را به محیط‌زیست اطراف تحمیل می‌کند.	بیولیچینگ آرسنیک از باطله معدن بسیار آلوده شده با استفاده از اسیدیتوباسیلوس
Esmaili and salari (2015)	نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده توانایی تولید اسید توسط باطله تر است و در ادامه مشخص شد که تحرک فلز به pH وابسته است.	مطالعه پتانسیل تولید زهاب اسیدی معدن در باطله فلوتاسیون معدن مس پورفیری سرچشمه
Deniz Yucel (2016)	نتایج تست‌های استاتیک نشان دادند که سنگ‌های معدن بخصوص زغال، ظرفیت بسیار بالایی برای تولید زهاب اسیدی معدن دارند و به عنوان تولیدکننده بالقوه اسید معرفی می‌شوند.	پیش‌بینی پتانسیل تولید زهاب اسیدی معدن از لیتولوژی‌های مختلف با استفاده از تست‌های استاتیک. مطالعه موردی معدن زغال‌سنگ ایتیلی، ترکیه
Jeswiet et al. (2017)	تعریف ۱۷ بند برای تعیین میزان کیفیت معادن از نظر معدنکاری پایدار پیشرو	چگونگی ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی در یک محصول چرخه حیات در مرحله پیش‌تولید (معدنکاری) با استفاده از اصول معدنکاری پایدار پیشرو ^۱

۳-۲ محیط‌زیست معادن طلا

ابتدایی‌ترین روش استحصال طلا روش ذوب بوده که قدمت آن به ۳۰۰۰-۶۰۰۰ سال قبل از میلاد بازمی‌گردد. پس از آن ملقمه‌گری با استفاده از جیوه از حدود ۱۰۰۰ سال قبل از میلاد جایگزین این روش شد. کارل ویلهلم^۲ (۱۷۸۳) توانایی شستشوی طلا با سیانید را کشف کرد، اما تا قبل از قرن ۱۹ این فرآیند کاربرد صنعتی نداشت. برای اولین بار در مقیاس بزرگ از این فرآیند در سال ۱۸۷۰ در

^۱ Toward Sustainable Mining(TSM)

^۲ Carl Wilhelm Scheele

معدن ویتواترزرند^۱ استفاده شد، که نتایج نشان داد این فرآیند توانسته است تا میزان ۹۷ درصد از طلای خالص موجود در خاک را استخراج کند. مشکلات زیست‌محیطی به وجود آمده به دلیل استفاده از جیوه را می‌توان آزاد شدن جیوه همراه با باطله‌ی تر و آزاد شدن جیوه در هنگام ذوب برشمرده (Dai et al., 2012). این دلایل سبب گسترش جایگزینی سیانید به جای جیوه در استحصال طلای سال‌های اخیر شده است. گرچه مشکلات زیست‌محیطی استفاده از سیانید در مقایسه با جیوه کمتر است اما به دلیل سمیت بالای این ماده، سیانید نیز مشکلات زیست‌محیطی منحصر به خود را دارد. جیوه، سیانید و آرسنیک را می‌توان اساسی‌ترین مواد مشکل‌ساز در معادن طلا از منظر زیست‌محیطی قلمداد کرد (جدول ۲-۲).

جدول ۲-۲: تحقیقات زیست‌محیطی در زمینه معادن طلا و دمپ باطله تر

عنوان	نتیجه	محقق
آلودگی زیست‌محیطی آرسنیک و تأثیرات بهداشتی آن در یک ناحیه معدنکاری طلا در شمال-شرق هند	با وجود مطالعات پیشین بر وجود سطوح آلودگی در این مناطق، این پژوهش برای اولین بار آرسنیکوز ^۲ را به صورت آشکار در این منطقه نشان داد. بر اساس این تحقیق ۵۸,۶ درصد از روستاهای ناحیه دچار آلودگی آرسنیک می‌باشند.	Dipankar et al. (2013)
ارزیابی زیست‌محیطی از آلودگی جیوه در باطله‌های معدنکاری طلا	از میان ۱۴ سایت مورد مطالعه در این تحقیق، در یک سایت غلظت بسیار زیاد جیوه گزارش شد. همچنین ۴ سایت با استانداردهای شورای وزیران کانادا همخوانی داشتند.	Morales and Leiva (2013)
آلودگی ناشی از دمپ باطله معدن لیچینگ طلا حوضه ویتواترزراند: یک رویکرد مدل‌سازی ژئوشیمیایی جدید	مدل‌های ژئوشیمی گسترش‌یافته در این تحقیق نشان دادند که مواد نفوذی از دمپ باطله اسیدی بوده و حاوی مقدار زیادی عناصر نادر است.	Hansen (2015)
جابه‌جایی و انتقال آرسنیک، کنترل آلودگی و اصلاح مناطق معدنکاری	جابه‌جایی و انتقال آرسنیک در ماده معدنی رآلگار منجر به سمیت متفاوت آرسنیک می‌شود. برای کنترل و اصلاح آلودگی این ماده خطرناک انجام سه مرحله الزامی است که شامل کنترل فرآیند تولید آلودگی، مسدود کردن مسیرهای جابه‌جایی و پایان فرآیند است.	Yang (2016)

^۱ Witwatersrand

^۲ Arsenicos

ادامه جدول ۲-۲

Xiao et al. (2016)	آلودگی قابل ملاحظه‌ای در روستاهای اطراف مناطق معدنکاری طلا نشان داده شد که عناصر نادر موجود در دمپ باطله مهم‌ترین عامل به وجود آمدن این آلودگی‌ها بیان شده است.	آلودگی فلزات سنگین خاک و خطرات بهداشتی همراه با معدنکاری طلا
بهنام‌فرد (۱۳۹۵)	اثرات زیست‌محیطی معدنکاری طلا مشتمل بر آب، خاک و هوا می‌شود. پدیده‌های زهاب اسیدی معدن، آبگیری معدن، رهایش محلول سیانیدی از واحدهای لیچینگ توده‌ای فعال و رهاسازی از باطله‌های هیپ لیچینگ پس از اتمام عملیات مهم‌ترین عوامل مشکل‌ساز برای محیط‌زیست توسط معادن طلا هستند.	شناسایی، مشخصه‌یابی و مدیریت پسماندهای فرآیندهای استخراج و فرآوری کانسنگ طلا دار و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی آن
Cai et al. (2017)	منابع اصلی آلودگی آرسنیک در دو ناحیه از رودخانه مجاور معدن شناسایی شده و پایین‌دست رودخانه نیز دچار آلودگی با میزان بالا شده است.	منابع، شکل‌گیری و انتقال گونه‌ها و کمپلکس‌های آرسنیک در معادن طلا
Akpalu and Normanyo (2017)	مدل ساده استفاده‌شده در این تحقیق نشان می‌دهد که قرار گرفتن در معرض آلودگی‌های معدنکاری طلا بر هزینه‌ی پایش‌های خاص زیست‌محیطی تأثیرگذار است.	آلودگی معدنکاری طلا و هزینه‌ی پایش‌های خاص زیست‌محیطی، غنا
Taiwo and Awomeso (2017)	سیانید موجود در آب منطقه اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از آن بیانگر بالاتر بودن این ماده از حد استاندارد مجاز است. آلودگی در آب‌های زیرزمینی بیشتر از آب‌های سطحی گزارش شده است.	ارزیابی غلظت فلزات سنگین و ریسک سلامت فعالیت‌های معدنکاری طلا در ایجشلند ^۱ ، ایالت اوسان نیجریه
Goncales et al. (2017)	میزان مصرف سیانید از ۱۲۷۰ تن در سال ۲۰۱۳ به ۲۰۳۳ تن در سال ۲۰۱۵ افزایش یافته است، که می‌توان مهم‌ترین دلیل آن را ممنوعیت استفاده از جیوه در کشور اکوادور برشمرد.	شواهد کاهش استفاده از جیوه و افزایش استفاده از سیانوراسیون در مراکز فرآوری طلا در اکوادور

تحقیقات بیان‌شده در جدول ۲-۲ را می‌توان جزء مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر در حوزه معادن طلا و مشکلات زیست‌محیطی حاصل از دمپ باطله عنوان کرد. با کمی دقت در تحقیقات پیشین در زمینه طلا، به‌راحتی می‌توان متوجه شد که اکثر این پژوهش‌ها در کشورهای درحال توسعه صورت گرفته است و دلیل این امر را می‌توان به مشکلات بسیار بیشتر این کشورها در

زمینه محیط‌زیست طلا با توجه به قوانین نامناسب آن‌ها دانست. بی‌توجهی و نادیده گرفتن مشکلات زیست‌محیطی به وجود آمده از فعالیت معادن طلا، در این کشورها برای از بین بردن مشکلات اجتماعی دیگری نظیر بی‌کاری و یا افزایش تولید ناخالص ملی به وفور دیده می‌شود.

۲-۴ روش‌های درون‌یابی فضایی

مدل‌سازی فضایی دمپ باطله می‌تواند در تحلیل مناسب مکانیسم‌های زیست‌محیطی مربوط به معدن کمک شایانی کند. بنابراین در این تحقیق از روش‌های درون‌یابی فضایی استفاده شده است. داده‌های پیوسته فضایی از متغیرهای بیوفیزیکی به میزان زیادی در علوم زیست‌محیطی و مدیریت مورد نیاز است. داده‌های توزیع فضایی از متغیرهای بیوفیزیکی اغلب به صورت نقطه‌ای جمع-آوری می‌شوند. با این حال مدیران محیط‌زیست برای گرفتن تصمیم‌های مؤثر و مطمئن، اغلب نیازمند داده‌های پیوسته فضایی از یک منطقه بوده و دانشمندان نیز به داده‌های پیوسته فضایی دقیق از سراسر آن منطقه برای داشتن یک تفسیر موجه نیازمند هستند.

روش‌های زیادی برای درون‌یابی فضایی گسترش یافته و اصطلاحات زیادی مانند روش‌های منطقی و تصادفی (Myers 1994)، روش‌های کریجینگ و غیرکریجینگ و روش‌های درونیاب و غیردرونیاب (Laslett et al., 1987) برای تفکیک آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

۳۸ روش درون‌یابی توسط لی و هیپ (۲۰۰۸) به طور خلاصه توصیف و در جدول ۲-۳ ارائه شده

است. این روش‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند (Li and Heap, 2008):

۱. روش‌های غیر زمین‌آماري،

۲. روش‌های زمین‌آماري،

۳. روش‌های ترکیبی.

با توجه به اینکه پژوهش حاضر، در راستای علوم زیست‌محیطی معدن است، از بیان فرمول‌های ریاضی و آماری پرهیز شده است. تقریباً همه این روش‌ها از فرمول ایجاد تخمین مشابهی استفاده می‌کنند (رابطه ۲-۱):

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1-2)$$

در این رابطه $\hat{z}$ مقدار تخمین زده شده از متغیر اولیه در نقطه x_0 ، مقدار مشاهده شده در نقطه نمونه برداری شده x_i ، λ_i وزن تعیین شده برای نقطه نمونه برداری شده i ام و n نشان دهنده تعداد نقاط نمونه برداری شده مورد استفاده جهت انجام تخمین است.

اعتقاد بر این است که زمین آمار از فعالیت های معدنی و زمین شناسی کریج^۱ (۱۹۵۰) سرچشمه گرفته است. البته دیدگاه دیگری نیز موجود است که منشأ زمین آمار را قدیمی تر دانسته و استفاده از آن را مربوط به سال ۱۹۱۰ در کشاورزی و ۱۹۳۰ در هواشناسی می داند. این علم توسط ماترون^۲ (۱۹۶۳) با تئوری متغیرهای ناحیه ای گسترش یافت. کریجینگ یک نام عمومی برای خانواده الگوریتم های رگرسیون حداقل مربعات کلی است، که در به رسمیت شناختن کار دانیه^۳ مورد استفاده قرار گرفته است. ۱۰ رشته برتر که زمین آمار در آن ها کاربرد دارد عبارت اند از (Zhou et al., 2007):

۱) علوم زمین ۲) منابع آب ۳) علوم محیط زیست ۴) علوم خاک یا کشاورزی ۵) ریاضیات ۶) آمار و احتمالات ۷) بوم شناسی ۸) مهندسی عمران ۹) مهندسی نفت ۱۰) زیست شناسی.

روش های مختلف درون یابی فضایی برای انواع داده های خاص گسترش یافته است. فاکتورهای زیادی بر قدرت پیش بینی روش های درون یابی فضایی تأثیرگذار است. هیچ داده ی سازگاری درباره چگونگی تأثیرگذاری این فاکتورها بر عملکرد روش های درون یابی فضایی موجود نیست. پرداختن به موضوع کلیدی استفاده از روش های درون یابی فضایی در داده های زیست محیطی دشوار است و انتخاب یک روش مناسب برای یک مجموعه داده ورودی بسیار پیچیده است.

مفاهیم اساسی (نظیر کریجینگ و واریوگرام) و فرضیات مرتبط به کریجینگ و برخی روش های درون یابی فضایی دیگر توسط لی و هیپ (۲۰۰۸) به طور خلاصه جمع آوری شده و جزئیات آن نیز توسط

^۱ Krige

^۲ Matheron

^۳ Danie

محققین زیادی نظیر کرسی (۱۹۹۳)، گووآرتس (۱۹۹۷)، ایساک و سریواستاوا (۱۹۸۹)، وبستر و الیور (۲۰۰۱) و واکرناگل (۲۰۰۳) مورد بررسی قرار گرفته است (Cressie, 1993; Goovaerts, 1997; Isaaks and Srivastava, 1989; Webster and Oliver, 2001; Wackernagel, 2003).

جدول ۲-۳: طبقه‌بندی روش‌های درون‌یابی داده (Li and Heap, 2008).

روش‌های ترکیبی	زمین‌آماری		غیر زمین‌آماری
	چندمتغیره	تک متغیره	
روش‌های کلاس‌بندی و ترکیب با روش‌های دورنیایی دیگر	کریجینگ جهانی	کریجینگ ساده	نزدیک‌ترین همسایگی
ترکیب آنالیز سطح روند و کریجینگ	کریجینگ ساده با تغییر میانگین‌های مکانی	کریجینگ معمول	شبکه بی‌نظم مثلثی
ترکیب نرخ لقاح و کریجینگ	کوکرکیجینگ ساده	کریجینگ فاکتوریال	همسایگان طبیعی
مدل‌های مختلط خطی	کوکرکیجینگ معمول	کریجینگ دوگانه	معکوس فاصله وزنی
ترکیب درخت‌های رگرسیونی با کریجینگ	کوکرکیجینگ معمول استاندارد شده	کریجینگ شاخص	مدل‌های رگرسیونی
کریجینگ رگرسیونی	کریجینگ مؤلفه اصلی	کریجینگ متفرقه	آنالیزهای روند سطح
پیش‌بینی‌کننده بی‌طرفانه ماکزیمم مقادیر باقی‌مانده	گرادیان به علاوه مربع فاصله معکوس	کوکرکیجینگ فضایی	سطوح روند محلی و شیب‌دار
	کریجینگ درون لایه‌ای	کریجینگ مدل مبنا	ورق‌های نازک دوتکه‌ای
	کریجینگ فاکتوریال چندمتغیره		روش‌های کلاس‌بندی
	کریجینگ با یک رانش خارجی		درخت رگرسیونی
	کریجینگ شاخص با یک رانش خارجی		
	کوکرکیجینگ شاخص		
	کریجینگ احتمالاتی		

تعدادی از روش‌های مربوط به رشته تحقیقاتی یادگیری ماشین^۱ برای درون‌یابی فضایی متغیرهای

^۱ Machine learning

زیست محیطی به تازگی معرفی شده‌اند و چندین روش هیبرید جدید گسترش یافته است. این روش‌ها شامل موارد زیر می‌باشند:

- ماشین بردار پشتیبان^۱ (Gilardi, 2002)،
 - جنگل‌های تصادفی^۲ (Bustamante et al., 2011)،
 - شبکه عصبی^۳ (Kanevski et al., 2008)،
 - شبکه فازی-عصبی^۴ (Friedel and Iwashita, 2013)،
 - درخت تصمیم‌گیری افزایشی^۵ (Li et al., 2012)،
 - ترکیب ماشین بردار پشتیبان با روش معکوس فاصله یا کریجینگ معمول (Li et al., 2011a, 2011b)،
 - ترکیب جنگل‌های تصادفی با روش معکوس فاصله^۶ یا کریجینگ معمول^۷ (Li et al., 2012)،
 - رگرسیون کلی شبکه‌های عصبی^۸ (Li et al., 2011c)،
 - ترکیب رگرسیون کلی شبکه‌های عصبی با کریجینگ معمول یا معکوس فاصله (Li et al., 2012)،
 - ترکیب درخت تصمیم‌گیری افزایشی با کریجینگ معمول یا معکوس فاصله (Li et al., 2012)،
- رگرسیون وزنی ژئوگرافیکی^۹ (GWR) به منظور درون‌یابی فضایی در داده‌های زیست محیطی دارای پتانسیل بالایی است. مزایای این روش را می‌توان بنای این روش بر اساس رگرسیون سنتی و ترکیب کردن رابطه‌های مکانی در مبنای یک روش صریح و بصری بیان نمود (Fotheringham et al.,)

۱ Support Vector Machine (SVM)

۲ Random Forest (RF)

۳ Neutral network

۴ Neuro-Fuzzy network

۵ Boosted decision tree (BDT)

۶ RFIDW

۷ RFOK

۸ General regression neural network (GRNN)

۹ Geographically weighed regression

2003). کاربرد این روش فضایی ارزشمند خواهد بود (Wheeler and Paez, 2010) اما کاربرد آن در علوم زیست‌محیطی نادر است (Harris et al., 2011). همچنین زمانی که تعداد نمونه‌ها کم است باید در استفاده از این روش با احتیاط عمل کرد (Paez et al., 2011).

۲-۵ جمع‌بندی

محیط‌زیست رکن اساسی توسعه پایدار بوده و توجه به آن امری الزامی است. قوانین زیست‌محیطی در کشورهای در حال توسعه چون ایران دارای مشکلات زیادی بوده و واحدهای صنعتی به دلیل هزینه‌دار بودن مسائل زیست‌محیطی در صورت عدم انجام تحقیقات آکادمیک و نظارت ارگان‌های مربوطه از رسیدگی به این اهم خودداری می‌کنند. مطالعات تحقیقات زیست‌محیطی در سال‌های اخیر نشان از تمرکز پژوهشگران بخش معدن به محیط‌زیست است. در میان معادن، معادن فلزی به‌ویژه معادن طلا مشکلات زیست‌محیطی بیشتری به وجود آورده و در میان این مشکلات سیانور، جیوه و آرسنیک مهم‌ترین مشکل این معادن محسوب می‌شود. با توجه به حضور سیانور در دمپ باطله، تحقیق بر روی این ماده خطرناک امری ضروری است. در این فصل مجموعه‌ای از مطالعات در زمینه‌های زیست‌محیطی، محیط‌زیست معادن طلا و روش‌های تحلیل نتایج زیست‌محیطی در سال‌های اخیر در دنیا، به ویژه کشورهای در حال توسعه بیان شد.

مولود و روش آزمایش و

انتخاب روش مدل ساز

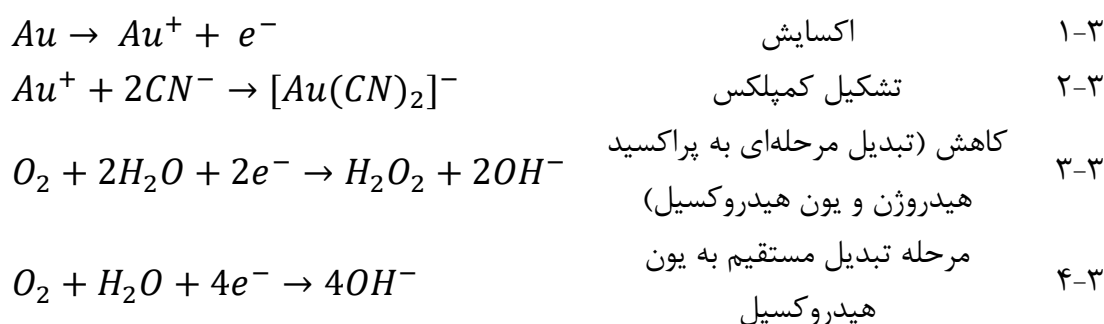
۳-۱ مقدمه

انحلال طلا توسط سیانید در سال‌های اخیر جایگزین روش‌های قدیمی نظیر ملغمه‌گری شده است. مطالعه بر روی نحوه عملکرد سیانورسیون^۱ در انحلال طلا برای توجیه لزوم استفاده از این ماده با توجه به مشکلات و هزینه‌های زیست‌محیطی به‌وجود آمده به سبب استفاده از آن امری الزامی است. همچنین روش‌های اندازه‌گیری غلظت سیانید موجود در خاک دارای مزایا و معایبی می‌باشند که نسبت به شرایط گوناگون انتخاب یکی از این روش‌های آزمایشگاهی انجام می‌گیرد.

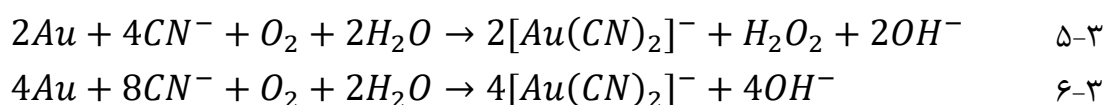
در فصل حاضر تلاش خواهد شد تا با لزوم انجام سیانوراسیون با وجود مشکلات زیست‌محیطی آن آشنا شده و پس از آن راه‌های اندازه‌گیری آن در دمپ باطله بیان و از طریق این روش‌ها اندازه‌گیری سیانید موجود در خاک انجام گیرد. در پایان با توجه به نتایج آزمایشگاهی روشی مناسب در میان روش‌های کلاس‌بند برای کلاس‌بندی، مدل‌سازی و تخمین سیانور دمپ باطله تعیین شود.

۳-۲ سیانوراسیون در فرآوری طلا

انحلال طلا یک فرآیند اکسایش-کاهش است که در آن یون‌های سیانید تشکیل کمپلکس قوی Au^+ می‌دهند و کاهش اکسیژن در سطح فلز به صورت جزئی با تبدیل به پراکسید هیدروژن رخ می‌دهد یا مطابق روابط زیر یون هیدروکسیل به وجود می‌آید (فتحی حبشی، ۱۳۹۱):



واکنش کلی:



^۱ Cyanidation

واکنش ۳-۳ با داده‌های آزمایشگاهی تطبیق می‌پذیرد و واکنش ۳-۴ به مقدار کمی صورت می‌پذیرد که شامل موارد زیر است:

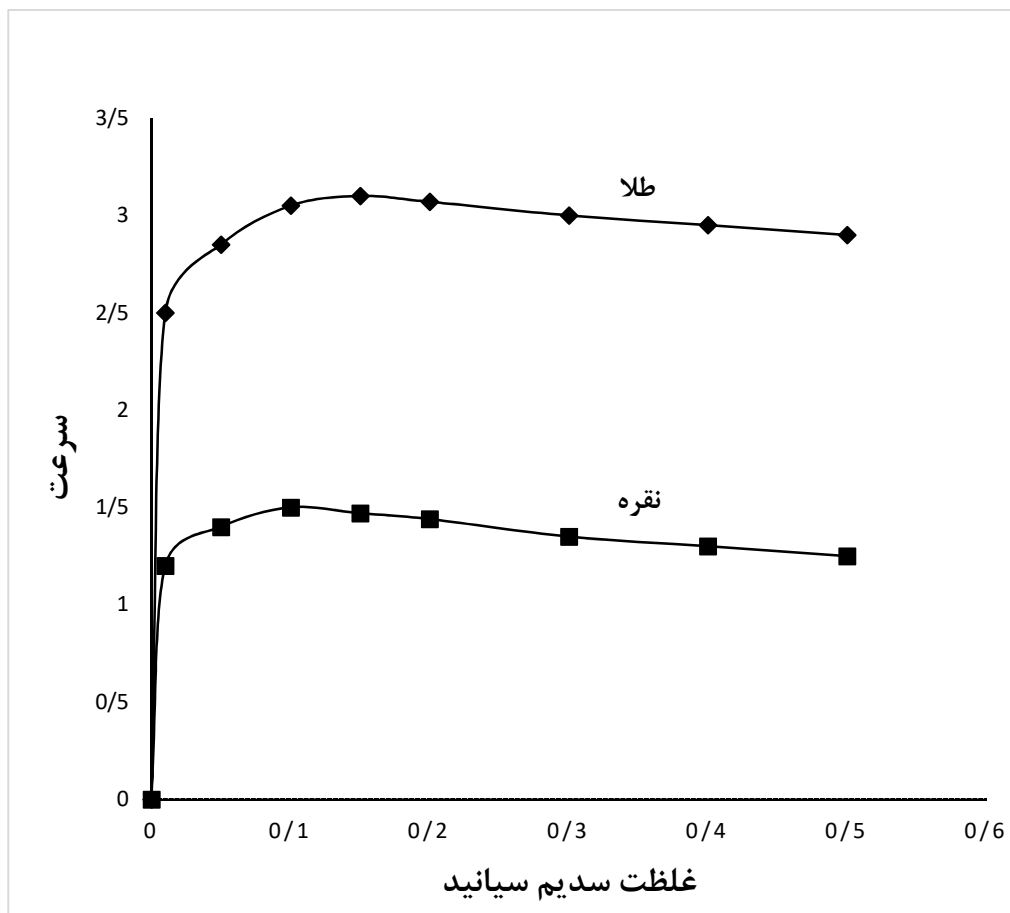
به ازای هر یک اکی والان از فلز حل شده ۲ مول سیانید مصرف می‌شود.
تقریباً به ازای هر ۲ اکی والان فلز حل شده یک مول اکسیژن مصرف می‌شود.
تقریباً به ازای هر ۲ اکی والان فلز حل شده یک مول H_2O_2 تولید می‌شود.
مطابق استوکیومتری فوق یک مول گرم اکسیژن و ۴ مول گرم NaCN باید در محلول موجود باشند. در دمای معمولی و فشار اتمسفر ۸/۲ میلی گرم O_2 در یک لیتر آب حل می‌شود، که برابر با $10^{-3} \times 0.27$ مول در لیتر O_2 است. به همین ترتیب انحلال طلا باید در غلظت $0.05 = 49 \times 10^{-3} \times$ گرم در لیتر یا $0.05\% NaCN$ صورت می‌پذیرد. بنابراین یک محلول خیلی رقیق سیانید سدیم برای انحلال طلا کافی است. این حقیقت که اکسیژن به چه دلیل مورد نیاز است کاملاً ناشناخته است، زیرا همان طوری که از محاسبات فوق پیداست، اکسیژن به مقداری که از انحلال هوا در آب حاصل می‌شود برای انجام واکنش کفایت می‌کند (فتحی حبشی، ۱۳۹۱).

۳-۳ تأثیر غلظت سیانید

با توجه به اینکه سیانید و اکسیژن برای واکنش انحلال طلا در فرآیند سیانوراسیون مورد نیاز است بنابراین سرعت انحلال بستگی به غلظت این دو خواهد داشت.
عملاً مشخص است که سرعت انحلال طلا به طور خطی با غلظت سیانید افزایش یافته و به ماکزیمم مقدار می‌رسد. از آن به بعد افزایش غلظت سیانید تأثیری در انحلال طلا ندارد (شکل ۳-۱).
منحنی شکل ۳-۱ برعکس آن چیزی است که در انحلال سایر فلزات به دست می‌آید. مثلاً در انحلال آهن در اسیدها، با افزایش غلظت اسید انحلال آهن نیز افزایش می‌یابد.

فرآیند سیانوراسیون با توجه به بازدهی عملیاتی بالا و همچنین هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری کمتر به عنوان فرآیند غالب در استحصال طلا از کانسنگ‌های طلادار در دنیا شناخته شده است. هم‌اکنون از این روش در سه معدن طلای ایران شامل موله، زرشوران و آق‌دره برای استحصال طلا

استفاده می‌شود. سیانور ماده‌ای بسیار سمی و خطرناک بوده و رهاسازی آن به داخل محیط زیست بدون لحاظ اقدامات کنترلی لازم، منجر به وقوع حوادث زیست محیطی وحشتناکی می‌شود. شناسایی، مشخصه‌یابی و مدیریت پسماندهای فرآیندهای استخراج و فرآوری طلا و ارزیابی اثرات زیست محیطی آن‌ها به دلیل آنکه اغلب آن‌ها آلوده به سیانور هستند از اهمیت زیادی برخوردار است (بهنام‌فرد، ۱۳۹۵).



شکل ۳-۱: تأثیر غلظت سیانید در سرعت انحلال طلا و نقره در محلول اشباع شده از هوا (فتحی حبشی، ۱۳۹۱).

سیانورها و اسید سیانیدریک دسته‌ای از نیتریل‌ها هستند که از نظر شیمیایی جزئی از هیدورکربن‌های ازت‌دار با فرمول R-CN هستند که عامل CN آن‌ها به شدت سمی است و موجب خفگی می‌شود. سیانیدها دارای آثار متفاوتی هستند که مهم‌ترین آن‌ها در زیر عنوان شده‌اند

(WWW.Tehranacie.com):

سیانیدها با چند سازوکار باعث هیپوکسی^۱ بافتی می‌شوند:

- مرکز تنفس را مهار و عمق تنفس را کم می‌کند.
- با سرکوب میوکارد^۲، برون‌ده قلب را کاهش می‌دهد.
- جدا شدن O₂ را از هموگلوبین مشکل می‌کند.
- برخی از سیانیدها برای اتصال به آهن هموگلوبین با اکسیژن رقابت می‌کنند.
- با آهن سیتوکروم^۳ اکسیداز در میتوکندری‌ها^۴ اتصال ایجاد کرده و تنفس سلول را مختل می‌کند.
- باعث مرگ سریع می‌شوند.

شکل‌ها آزاد سیانور می‌تواند به راحتی و در زمان کمی با ترکیبات مختلف شیمیایی واکنش داده و طیف وسیعی از ترکیبات را تولید کند. این ترکیبات به سه دسته‌ی ترکیبات ساده سیانور، کمپلکس‌های فلزی سیانور و ترکیبات مرتبط با سیانور تقسیم می‌شوند (Kuyucak, 2013):

۱. ترکیبات ساده سیانور:

ترکیبات ساده سیانور فقط از یک یون فلزی که به صورت ترکیب با سیانور وجود دارد، تشکیل می‌شوند. از جمله ترکیبات ساده سیانور می‌توان به سیانید سدیم، سیانید پتاسیم و سیانید کلسیم اشاره کرد. بیشتر این ترکیبات به سادگی در آب حل می‌شوند، اما بعضی از ترکیبات ساده سیانور نیز نامحلول هستند.

۲. کمپلکس‌های فلزی سیانور:

کمپلکس‌های سیانور از سیانور محصور شده بوسیله دیگر ترکیبات آلی و یا غیرآلی تشکیل می‌شوند. این کمپلکس‌ها در نزدیکی سطح زمین آزاد شده و در اثر تغییر فشار تجزیه می‌شوند. سرعت

۱ کم‌اکسیژنی

۲ ماهیچه قلب

۳ مجموعه بزرگی از هموپروتئین‌ها (ترکیب آهن و پروتئین) که در آن‌ها آهن موجود با دریافت یا از دست دادن الکترون تحت واکنش‌های اکسایش-کاهش قرار می‌گیرد.

۴ اندامکی که وظیفه آن تنفس سلولی است.

تجزیه این ترکیبات متفاوت است و بعضی سریع و بعضی به کندی می‌شکند. تجزیه این ترکیبات باعث آزاد شدن سیانور در آب و خاک می‌شود. البته بطور کلی سیانور آزاد شده از این روش غلظت نسبتاً پایینی دارد.

کمپلکس‌هایی که به سادگی شکسته و تجزیه می‌شوند را کمپلکس‌های ضعیف و کمپلکس‌های مقاوم را کمپلکس‌های قوی می‌نامند. کمپلکس‌های سیانوری ضعیف عبارت‌اند از سیانیدهای روی و کادمیم، کمپلکس‌های متوسط عبارت‌اند از کمپلکس‌های مس، نیکل و نقره و کمپلکس‌های قوی عبارت‌اند از کمپلکس‌های آهن، کبالت و طلا. بعضی از کمپلکس‌های قوی در مقابل اسیدهای قوی مقاوم‌اند اما در مقابل طول موج‌های مختلف، یون‌های سیانید را آزاد می‌کنند. این مورد بخصوص در مورد سیانیدهای آهن که از جمله ترکیبات معمول موجود در باطله‌های معدنی است نیز، صادق است (Kuyucak, 2013).

تجزیه این کمپلکس‌ها تحت تأثیر دمای آب، pH، جامد محلول و غلظت کمپلکس است. بعضی از کمپلکس‌ها وقتی در مجاورت نور آفتاب، دی اکسید کربن و هوا قرار می‌گیرند، سریع می‌شکند و بعضی نیز در زمان نفوذ در خاک، جذب شده و بوسیله آب و باد و یا بوسیله باکتری‌ها، تجزیه می‌شوند. کمپلکس‌های سیانور در pH کم یا خنثی سریعتر تجزیه می‌شوند، اما بعضی نیز ممکن است در مقابل این مسئله مقاوم باشند.

۳. ترکیبات مرتبط با سیانور:

از جمله این ترکیبات می‌توان به سیانات $[NCO]^-$ ، سیانوژن کلراید $[CNC]$ و سیانوژن $[CN^-]$ [NC] اشاره کرد.

سیانید از تعدادی میوه‌ها، برگ و ریشه بسیاری گیاهان مثل کاساوا^۱، درخت بادام و هلو ایجاد می‌شود، اما فعالیت‌های انسانی مسئول اصلی تولید سیانید در محیط‌زیست است.

جهت اندازه‌گیری و مدل‌سازی غلظت سیانید دمپ، ابتدا عملیات نمونه‌برداری از دمپ باطله

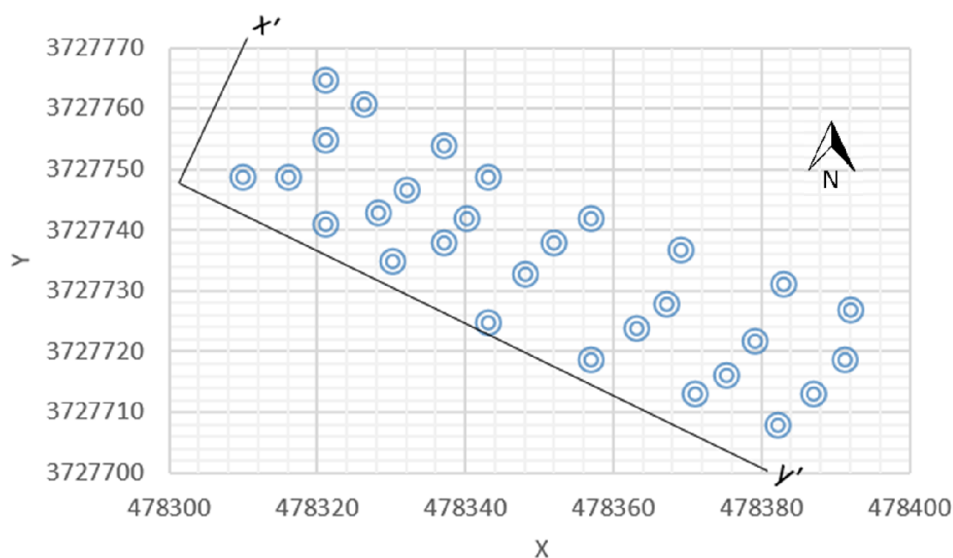
صورت گرفته و پس از آن با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مقادیر سیانید موجود در هر نقطه از دمپ تعیین خواهد شد.

۳-۴ نمونه برداری

دانشمندان و مدیران زیست محیطی برای داشتن تفسیر موجه و تصمیم‌های درست، باید اطلاعاتی مناسب از منطقه یا نمونه مورد مطالعه مورد نظر را در اختیار داشته باشند. عدم اتکا به اطلاعات مدیران پیشین و تلاش در جهت اطمینان از درستی تحلیل‌های زیست محیطی پیشین از اقدامات یک مدیر محیط زیستی موفق است. در همین راستا در این پژوهش تلاش شده است اطلاعات زیست محیطی با وجود تمام مشکلات موجود در ایران و عدم همکاری معادن، توسط پژوهشگران انجام شده تا تحلیل‌های مناسب‌تری از شرایط موجود صورت گیرد. همچنین با توجه به گسترش روزافزون استفاده از روش‌های داده کاوی، در این ادامه تلاش شده است روش‌های مناسب داده کاوی برای مدل سازی سیانور باقی مانده در دمپ باطله انتخاب شود.

اهداف بالا در این بخش به ترتیب مورد بررسی قرار گرفته و نتایج هر بخش در بخش بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابل ذکر است در این فصل از نتایج مربوط به روش آزمایشگاهی کالریمتری در فصل گذشته استفاده شده است.

عملیات نمونه برداری در بخش شمالی دمپ باطله قدیمی معدن طلای مویه به روش دستی صورت گرفت. به همین منظور ابتدا ۲۹ نقطه نمونه برداری از پیش تعیین شده، با توجه به عمر باطله طلا سه عمق نمونه برداری در هر نقطه تعیین شد. شبکه تعیین شده جهت نمونه برداری در معدن در شکل ۳-۲ با توجه به مختصات موجود نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: نقاط تعیین شده جهت نمونه برداری از باطله معدن.

باید توجه داشت که به دلایل محدودیتی از جمله فضای بسیار خطرناک دمپ باطله، قوانین امنیتی معدن و جوان بودن برخی قسمت‌های دمپ باطله تنها بخشی از دمپ باطله که از نظر فنی مناسب بوده، نمونه برداری شد. در شکل ۳-۳ تا شکل ۵-۳ به ترتیب نقاط نمونه برداری شده، عمق نهایی هر نقطه نمونه برداری و عکس هوایی منطقه نمونه برداری شده نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: نقاط نمونه برداری در دمپ باطله معدن.



شکل ۳-۴: عمق نهایی نقطه نمونه برداری شده.



شکل ۳-۵: عکس هوایی محدوده نقاط نمونه برداری شده.

چند نکته در مورد نقاط نمونه برداری در این پژوهش قابل ذکر است:

- تعداد نقاط نمونه برداری برای داده‌های آموزش با توجه به محدودیت‌های ذکر شده فقط ۲۹ نقطه است. در دو نقطه از چهار سطح (سطح دمپ باطله، عمق ۱ متری، عمق ۲ متری و عمق ۲/۲۵) و در نقاط باقی‌مانده در سه سطح (سطح دمپ باطله، عمق ۱ متری، عمق ۲ متری) نمونه برداری

انجام شد. در پایان در بین فضای نمونه برداری شده ۲۹ نقطه به عنوان نقاط تست انتخاب و نمونه برداری شد. در نهایت ۱۱۸ نمونه از این دمپ باطله برداشت شد.

- نمونه برداری از کل دمپ باطله به دلایل امنیتی و محدودیت زمان برای حضور بر روی دمپ باطله به دلیل بسیار سمی بودن آن و جوان بودن و نامناسب بودن برخی قسمت‌ها از نظر فنی، امکان پذیر نبود.

- نمونه برداری تنها تا عمق ۲ متری انجام شد زیرا تحقیقات گذشته بیانگر این مسئله بودند که بیشترین تغییرات تا عمق دو متری دمپ باطله صورت گرفته (Doulati, 2003) و تنها در ۲ نقطه نمونه برداری از عمق ۲/۲۵ متری برای در دست بودن نمونه با کمترین تغییرات نمونه برداری صورت گرفت.

- عملیات نمونه برداری تنها از خاک منطقه صورت گرفت و پارامترهای فیزیکی نظیر نفوذپذیری خاک اندازه گیری نشده است.

- نمونه برداری در نقاط معین در سطح خاک، عمق ۱ متری و عمق ۲ متری صورت گرفت.

- از هر عمق نمونه برداری ۱۰۰ گرم خاک باطله برداشت شد.

- عملیات نمونه برداری در ۵ روز صورت گرفت. نمونه برداری دستی و نابرابری شرایط آب و هوایی می تواند بر دقت نمونه برداری صورت گرفته تأثیرگذار باشد.

۳-۵ اندازه گیری غلظت سیانور

در کنار استفاده روزافزون سیانور در معدنکاری، این ماده مهم ترین چالش سازمان های حفاظت محیط زیست و دولت ها است. در واقع استفاده از سیانور همواره باعث بروز نگرانی هایی در مورد اثرات زیست محیطی آن بوده است. نگرانی های موجود و همچنین مسمومیت های ناشی از سیانور باعث شده تا مطالعات گسترده ای بر روی این ماده و روش های کاهش اثرات منفی آن انجام پذیرد. روش های مختلفی برای حذف سیانید از پسماندها وجود دارد. فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی به شکل موفقیت آمیزی برای تصفیه عناصر سازنده سیانید به کار رفته اند. این فرآیندها اغلب بسیار پرهزینه بوده

و عملکرد پیچیده‌ای دارند. تصفیه بیولوژیکی می‌تواند یک فرآیند کم‌هزینه‌تر و ساده‌تر نسبت به فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی باشد که متکی به توان میکروارگانیسم‌های بومی است (Kuyucak, 2013).

مباحث بیان شده اهمیت اندازه‌گیری غلظت سیانید در خاک و آب منطقه تحت تأثیر معدنکاری را به روشنی نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری غلظت سیانید روش‌های مختلفی وجود دارد که انتخاب روش بستگی به غلظت سیانور داشته و اهم آن‌ها عبارت‌اند از (دستورالعمل مرکز سلامت محیط کار، ۱۳۸۹):

- روش تیتراسیون: این روش برای اندازه‌گیری غلظت‌های بالاتر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر (mg/L) استفاده می‌شود.
- روش کالریمتریک: برای اندازه‌گیری غلظت‌های پایین بین ۱-۵ میلی‌گرم در لیتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- روش الکتروود: اندازه‌گیری غلظت‌های ۰/۰۵-۱۰ میلی‌گرم در لیتر را می‌توان با استفاده از این روش انجام داد.

در همه روش‌های بیان شده برای غلظت‌های متفاوت حذف تداخلات نظیر سولفیدها، عوامل اکسیدکننده، اسیدهای چرب، نیتريت‌ها، نیترات‌ها و سایر تداخلات امری ضروری است. مهم‌ترین تداخلات که باعث مزاحمت در اندازه‌گیری صحیح غلظت سیانور در ترکیبات خاکی و آبی هستند شامل کلرین‌ها، سولفیدها، نیترات‌ها و نیتريت‌ها هستند (مرادیان و همکاران، ۱۳۹۲).

اندازه‌گیری غلظت‌های سیانور حتی در عیارهای پایین در این تحقیق دارای اهمیت ویژه‌ای است. بنابراین روش استفاده شده برای اندازه‌گیری سیانور روش کالریمتریک است که دارای دقت بالاتری نسبت به روش تیتراسیون است. مراحل حذف مزاحم‌ها و اندازه‌گیری غلظت سیانور و روش‌های آزمایشگاهی آن در زیر به طور خلاصه بیان شده است.

مراحل جمع‌آوری و نگهداری نمونه‌ها عبارت است از:

۱. نمونه‌ها در ظروف پلاستیکی جمع‌آوری شده است.

۲. جهت تعیین کلر از تست یدید پتاسیم (KI) استفاده شده است. بروز رنگ آبی نشان‌دهنده وجود کلرین در نمونه‌ها بوده و در این صورت باید کلرزدایی صورت گیرد. جهت این کار از محلول سدیم آرسنیت ۰/۱ نرمال به صورت افزودن قطره‌ای آن تا زمان تغییر رنگ کاغذ KI به بی‌رنگ استفاده می‌شود. سپس ۵ میلی‌لیتر سدیم آرسنیت جهت اطمینان از حذف کامل کلر از محیط اضافه می‌شود.

۳. نمونه‌های مابی^۱ باید در سود ۵۰ درصد نگهداری شده تا pH آن بزرگتر از ۱۲ باشد.

۴. نمونه‌ها باید در دمای ۴ درجه سانتیگراد نگهداری شود.

با توجه به نکات ذکر شده، مواد مورد نیاز جهت جمع‌آوری و نگهداری نمونه‌ها به شرح زیر است:

سدیم آرسنیت^۲ ۰/۱ نرمال، آسکوربیک اسید^۳، هیدرواکسید سدیم ۵۰ درصد، استیک اسید ۱/۶ مولار، ۴و۲و۲ تری‌متیل‌پنتان^۴، هگزان^۵، کلروفرم^۶، معرف پتاسیم یدید.

۳-۵-۱ آزمایش‌ها

مرحله ابتدایی برای آزمایش‌ها اندازه‌گیری سیانید آزاد کردن این ماده از ترکیبات درگیر است. گرچه از نظر زیست‌محیطی گاهی کمپلکس‌های قوی فاقد خطر می‌باشند اما شرایط محیط، نظیر اسیدی شدن خاک، می‌تواند سیانید را از برخی کمپلکس‌های پیچیده نیز آزاد کند. در نتیجه اندازه‌گیری سیانید درگیر نیز در مسائل زیست‌محیطی حائز اهمیت است (مرادیان و همکاران، ۱۳۹۲).

۱ قابل امتزاج با آب

۲ NaAsO₂

۳ C₆H₈O₆

۴ C₈H₁₈

۵ C₆H₁₄

۶ CHCl₃

۳-۵-۱-۱ تصفیه سیانید درگیر با کلر

این تست به دلیل اینکه فروسیانورپتاسیم^۱ تولید شده تحت نور UV تجزیه شده و همچنین سیانید آزاد درگیر با کلر تحت نور فلورسنت یا نور خورشید مثبت است، باید در نور کم انجام شود. مراحل انجام آزمایش و مواد و تجهیزات مورد نیاز برای انجام آن به ترتیب در زیر بیان شده است.

الف- مراحل انجام آزمایش (مرادیان و همکاران، ۱۳۹۲):

- آزمایش آزادسازی کلر از ترکیبات سیانوری طبق مراحل زیر صورت می‌گیرد:
- دو نمونه مشخص مایه برای اندازه‌گیری سیانید درگیر با کلر مورد نیاز است.
 - به ۵۰۰ میلی‌لیتر نمونه یا نمونه‌ای که ۵۰۰ مرتبه رقیق شده، قطره قطره هیپوکلریت کلسیم اضافه شده و در حال همزدن pH نمونه با سود ۱/۲۵ نرمال به ۱۱-۱۲ رسانده می‌شود تا کلرین اضافی رنگ کاغذ KI را آبی کند. در این مرحله کلریناسیون قلیایی روی نمونه انجام می‌شود. به محض کمرنگ شدن رنگ کاغذ KI مجدداً هیپوکلریت کلسیم اضافه می‌شود تا رنگ کاغذ آبی شود و این فرآیند تا یک ساعت ادامه می‌یابد.
 - بعد از ۱ ساعت ۱ میلی‌لیتر آرسنیت سدیم ۰/۱ نرمال اضافه می‌شود تا رنگ کاغذ KI بی‌رنگ شده و سپس ۵ میلی‌لیتر آرسنیت سدیم به محیط اضافه می‌شود تا از وجود عامل احیاء‌کننده در محیط، اطمینان حاصل گردد.

ب- مواد و تجهیزات مورد نیاز:

- کلسیم هیپوکلریت^۲ ۰/۳۵ مولار^۳،
- هیدرواکسید سدیم ۱/۲۵ نرمال^۴،
- سدیم آرسنیت ۰/۱ نرمال،

^۱ K₃[Fe(CN)₆]

^۲ Ca(OCl)₂

^۳ ۵ گرم هیپوکلریت کلسیم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب حل می‌شود.

^۴ ۵۰ گرم هیدرواکسید سدیم در ۱ لیتر آب حل می‌شود.

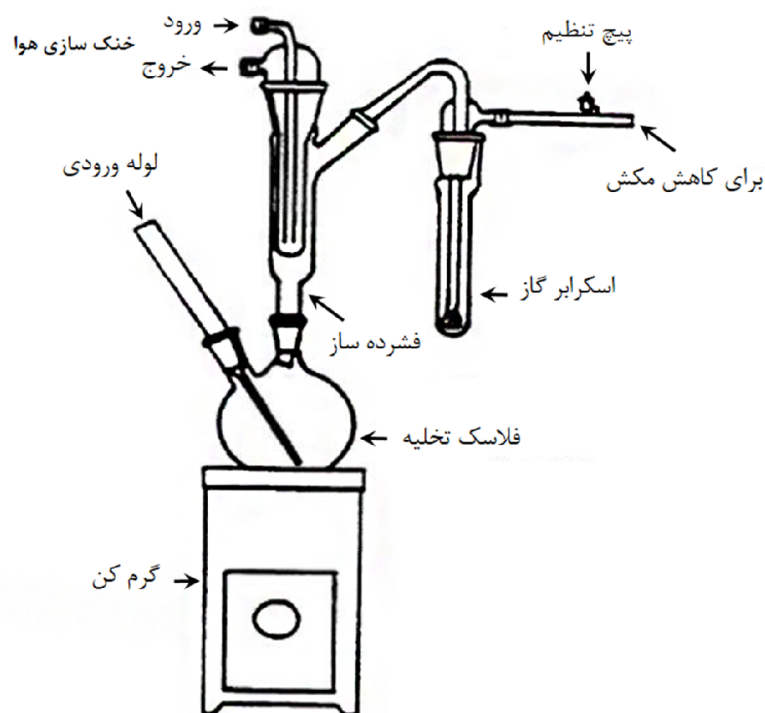
- کاغذ KI،

۳-۵-۱-۲ آزمایش تقطیر

این آزمایش به منظور جدا شدن ترکیبات سیانید آزاد شده در مراحل قبل انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش نیاز به دستگاه تقطیر معکوس است که در شکل ۳-۶ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

۳-۵-۲ روش انجام آزمایش (مرادیان و همکاران):

- ۵۰۰ میلی‌لیتر از نمونه داخل بالن ریخته می‌شود.
- داخل گاز خشک کن ۵۰ میلی‌لیتر سود ۱/۲۵ نرمال ریخته می‌شود.
- سیستم مطابق شکل زیر سوار می‌شود:



شکل ۳-۶: تجهیزات آزمایشگاهی سیستم اندازه‌گیری سیانید موجود در خاک.

- با تنظیم پمپ خلاء بخار هوا به آرامی وارد فلاسک شده و تنظیم به گونه‌ای صورت می‌گیرد که در هر ثانیه تقریباً دو حباب از لوله ورودی هوا وارد فلاسک شود.

- اگر از حضور سولفید در نمونه اطمینان حاصل شد، ۵۰ میلی لیتر بیسموت نیترات از لوله ورودی هوا وارد فلاسک شده و سه دقیقه هم زده می شود و از کاغذ استات سرب برای تست سولفید استفاده می شود.
- ۵۰ میلی لیتر سولفامیک اسید^۱ ۰/۴ نرمال از لوله ورودی هوا وارد فلاسک می شود.
- به آرامی ۵۰ میلی لیتر اسیدسولفوریک ۱۸ نرمال از لوله ورودی هوا وارد فلاسک شده و ۳ دقیقه هم زده می شود. سپس ۲۰ میلی لیتر کلرید منیزیم ۲/۵ مولار از لوله ورودی هوا وارد فلاسک می شود.
- فلاسک حرارت داده شده و فرآیند رفلکس به مدت یک ساعت انجام می شود. سپس در حالیکه گرم کن خاموش است، اجازه داده می شود جریان هوا برای ۱۵ دقیقه ادامه پیدا کند. بعد از خنک شدن، پمپ خلا خاموش و گاز خشک کن جدا می شود.
- محلول حاصل را به بالن ۲۵۰ میلی لیتری منتقل کرده و با آب دو بار تقطیر شده به حجم رسانده می شود.^۲
- اگر محلول تقطیر شده سریعاً اندازه گیری نشود، باید در دمای ۴ درجه سانتیگراد، در فلاسک کاملاً سربسته نگهداری شود.

۳-۵-۳ مواد و تجهیزات مورد نیاز

بالن ته گرد یک لیتری با لوله خروجی به عنوان خنک کننده، گاز جمع کن، صفحه داغ، pH متر، پمپ خلاء، ارلن مایر، کاغذ KI، بالن حجمی سنجی ۱۰۰، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ میلی لیتری،

۳-۶ روش اندازه گیری سیانید با روش کالریمتریک

پس از آزادسازی سیانید درگیر با مواد مختلف که در بالا به توضیح آن پرداخته شد، می توان سیانید موجود در خاک یا آب را اندازه گیری نمود. همانطور که در بخش اندازه گیری غلظت سیانور بیان

^۱ H3NSO3

^۲ اندازه گیری با روش EPA9014 و EPA9213 انجام می شود.

شد، برای این منظور سه روش موجود است که در تحقیق حاضر بنای کار روش کالریمتریک بوده و پس از آن تست‌های روش تیتراسیون نیز انجام شده است. از این رو در ادامه نحوه انجام این دو روش به تفصیل بیان شده است.

۳-۶-۱ مواد مورد نیاز

- هیدروکسید سدیم ۰/۲۵ نرمال (جهت تهیه ۱۰ گرم سود در یک لیتر آب حل می‌شود)،
- سدیم فسفات منو بازیک^۱ ۱ مولار^۲،
- محلول کلرآمین T^۳ ۰/۴۴ درصد (۱ گرم کلرآمین T در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب حل می‌شود)،
- معرف پیریدین باربی تیوریک اسید (فرمول شیمیایی این معرف $C_5H_5N.C_4H_4N_2O_3$ بوده و برای تهیه آن کافی است ۱۵ گرم باربی تیوریک اسید را در بالن ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته و آب به آن اضافه شود و سپس به مدت ۱ روز مانده تا کاملاً خیس بخورد. سپس ۷۵ میلی‌لیتر پیریدین را به آن افزوده و کاملاً محصول به دست آمده مخلوط شود. سپس ۱۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک افزوده و مخلوط شود تا در دمای اتاق خنک شده و این محلول به حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر رسانده شود.)،
- محلول استوک سیانید پتاسیم (۲,۵۱ گرم سیانید پتاسیم و ۲ گرم هیدروکسید پتاسیم به حجم ۱ لیتر رسانده شود)،
- محلول میانی استاندارد سیانید پتاسیم (۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول مرحله ۵ به حجم ۱ لیتر رسانده شود)،
- محلول کار استاندارد سیانید پتاسیم (۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول مرحله ۶ و ۱۰ میلی‌لیتر از محلول سود ۱ نرمال به حجم ۱ لیتر رسانده شود)،

۱ NaH_2PO_4

۲ ۱۳۸ گرم سدیم فسفات در یک لیتر آب حل می‌شود. این محلول باید در یخچال نگهداری شود.

۳ $C_7H_7ClNNaO_2S$

۳-۶-۲ روش انجام آزمایش کالریمتری

- تهیه محلول‌های استاندارد و شاهد در غلظت و حجم‌های مشخص انجام شده است (جدول ۳-۱)،

جدول ۳-۱: ارتباط غلظت سیانید با حجم محلول کار (مرادیان و همکاران).

غلظت سیانید (میکروگرم بر لیتر)	حجم محلول کار استاندارد (میلی لیتر)
۰	۰
۴۰	۱
۸۰	۲
۲۰۰	۵
۴۰۰	۱۰
۶۰۰	۱۵

- از محلول کار استاندارد سیانید پتاسیم غلظت‌های مندرج در جدول ۳-۱ ساخته می‌شود. حجم‌های مربوطه را برداشته و به آن ۵۰ میلی لیتر محلول سود ۱/۲۵ نرمال افزوده و در نهایت به حجم ۲۵۰ میلی لیتر می‌رسد (غلظت سود در نهایت ۰/۲۵ نرمال است).
- ۵۰ میلی لیتر از هر محلول برداشته، به بالن ۱۰۰ میلی لیتری انتقال داده و به هریک از استانداردها ۱۵ میلی لیتر محلول فسفات سدیم اضافه کرده و کاملاً مخلوط می‌شود. تست جهت ماده اضافی کلرین با کاغذ KI انجام شده و اگر جواب منفی بود ۰/۵ میلی لیتر کلرآمین به آن افزوده می‌شود. بعد از ۱ دقیقه تست KI دوباره جهت اطمینان از عدم حضور کلرین انجام می‌شود.
- به محلول ۵ میلی لیتر باربی تیوریک اسید اضافه شده و کاملاً مخلوط می‌شود. این محلول با آب به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسیده و ۸ تا ۱۰ دقیقه جهت تغییر رنگ کامل آن صبر می‌شود.
- با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۷۸ نانومتر و عرض سل ۱ سانتی متر جذب نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و در نهایت تخمین غلظت می‌شود.

۳-۷ روش انجام آزمایش تیتراسیون

- با وجود دقت بالاتر روش کالریمتری در آزمایشگاه معادن به دلیل سهولت اجرا و ارزان تر بودن از روش تیتراسیون برای محاسبه غلظت سیانور استفاده می‌شود. مراحل انجام این آزمایش به ترتیب زیر

است:

۳-۷-۱ استاندارد کردن نیترات نقره

- ساخت ۲۵ میلی لیتر محلول سدیم کلرید ۰/۱ مولار،
- افزودن معرف کرومات،
- انجام فرآیند تیتراسیون توسط نیترات نقره و یادداشت مقدار نیترات نقره بعد از تبدیل رسوب سفید رنگ تشکیل شده در ابتدای تیتراسیون به رسوب کرمی رنگ (V)،
- ایجاد محلول شاهد (۵۰ میلی لیتر آب مقطر که به آن ۰/۵ گرم رسوب کلسیم کربنات و معرف کرومات افزوده می شود)،
- انجام تیتراسیون با محلول شاهد و اندازه گیری حجم نیترات نقره مصرفی در زمان تشکیل رسوب کرمی رنگ (V_s).

$$V - V_s = \text{حجم تصحیح شده،}$$

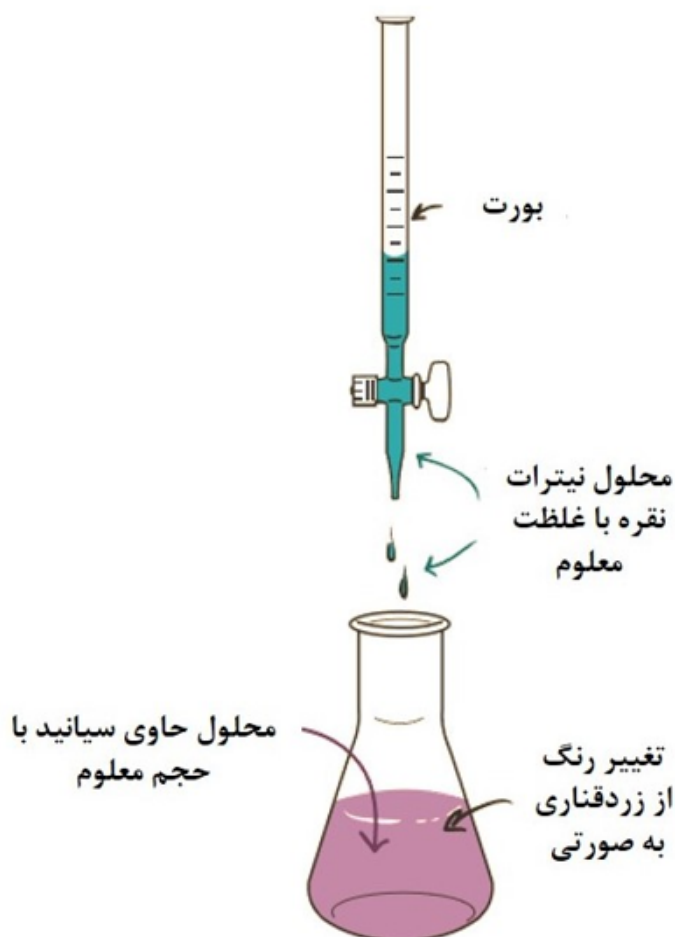
$$M_{AgNO_3} = \frac{M_{NaCl} * V_{NaCl}}{V_{AgNO_3}}$$

۳-۷-۲ آزمایش اندازه گیری سیانید

- شستشوی خاک مورد نظر در pH تقریباً اسیدی ۵/۵ تا ۶،
- خارج کردن فاز مایع پالپ موجود با استفاده از فیلتر فشار (این مرحله باید با احتیاط کامل صورت گیرد)،
- افزودن ۲۰ میلی گرم معرف پارا-دی متیل آمینو بنزال رودانین به ۱۰۰ میلی لیتر استون،
- افزودن پتاسیم هیدروکسید ۰/۱ مولار به محلول،
- انجام تیتراسیون توسط نیترات نقره استاندارد شده (V_1)،
- انجام تیتراسیون بر روی پتاسیم هیدروکسید به عنوان نمونه شاهد (V_2).

$$C_{CN}(ppm) = \frac{C_{AgNO_3} * V_{AgNO_3}}{V_{نمونه}} * 98000 \quad -$$

نمای شماتیک فرآیند تیتراسیون در شکل ۷-۳ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳: نمای شماتیک فرآیند تیتراسیون

۳-۸ اندازه‌گیری سیانید نمونه‌ها

درمجموع ۱۱۸ نمونه خاک برای اندازه‌گیری مقدار سیانید موجود در آن‌ها در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌های ۱۱۷ و ۱۱۸ که مربوط به عمق ۲/۲۵ متری دمپ باطله بودند، به صورت مجزا و به صورت مخلوط با یکدیگر مورد آزمایش قرار گرفتند. به‌طور کلی برای ۱۱۹ آزمایش اندازه‌گیری سیانید با روش کالریمتری صورت گرفت.

۳-۸-۱ نتایج آزمایش کالریمتری

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها، حداقل غلظت اندازه‌گیری شده در بین نمونه‌ها ۷۴۰ میلی‌گرم بر لیتر است که این نتیجه اختلاف زیادی با گزارشات موجود در معدن (حداکثر ۲۵۰-۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) دارد. برای اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده، در ابتدا برخی از نمونه‌ها به صورت تصادفی انتخاب و مجدداً مورد آزمایش قرار گرفت. اختلاف ناچیز نتایج آزمایش مجدد با آزمایش ابتدایی موجب انتخاب ۲۵ نمونه به صورت تصادفی برای اندازه‌گیری سیانید به روش تیتراسیون (روش رایج در معادن برای اندازه‌گیری سیانید) شد.

در روش تیتراسیون با معرف دی-متیل آمینو بنزال رودانین و نیترات نقره، نمونه حاوی سیانید از رنگ زرد قناری به صورتی کم رنگ تغییر رنگ می‌دهد. با توجه به خطاهای مربوط به تشخیص این تغییر رنگ آزمایش بر روی هر نمونه دو بار توسط دو کارشناس مختلف صورت گرفته و در صورت اختلاف زیاد (بالای ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) آزمایش سوم انجام گرفت.

با توجه به اینکه در آزمایشگاه معدن طلا اندازه‌گیری سیانید با معرف KI انجام می‌شود، در میان نمونه‌های انتخاب شده برای روش تیتراسیون، ۴ نمونه خاک (از هر سطح نمونه‌برداری یک نمونه) انتخاب شد و بدون رفع مزاحمت‌ها و با معرف KI تیتراسیون برای مقایسه با نتایج معدن انجام شد. این نتایج گرچه نسبت به نتایج دو آزمایش دیگر اختلاف بسیار کمتری با نتایج آزمایشگاهی معدن داشت، اما بین دو نتیجه آزمایشگاهی همچنان اختلاف مشاهده می‌شد. نکته مورد توجه، پایین‌تر بودن نتایج حاصل آزمایش‌ها صورت گرفته از میانگین گزارش شفاهی معدن بود. در گزارش شفاهی معدن میزان غلظت میانگین دمپ باطله، ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیان شد در حالیکه میانگین نتایج حاصل آزمایش این چهار نمونه، حدود ۲۲۰ میلی‌گرم بر لیتر است. نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های مربوطه را می‌توان در بخش پیوست مشاهده کرد.

نتایج حاصل از روش تیتراسیون نیز نتایج نزدیکی با روش کالریمتری داشته و اختلاف زیادی با گزارشات شفاهی معدن نشان می‌داد. با مطالعه بر روی نتایج و دلایل آن، دلایل زیر را به عنوان عوامل

اصلی اختلافات ذکر شده در بالا می‌توان بیان کرد:

- در آزمایش‌های مرسوم در معادن ایران، رفع مزاحمت‌ها که در فصل سوم به تفصیل به روش‌های آن پرداخته شد، انجام نمی‌شود. این امر سبب خطای بالای اندازه‌گیری و کمتر نشان داده شدن میزان سیانید در آزمایشگاه می‌شود.
- در آزمایش‌های معادن از معرف KI به عنوان شناساگر در روش تیتراسیون استفاده می‌شود که بر خلاف ادعای کارشناسان آزمایشگاه مبنی بر نتایج مشابه، به دلیل تفاوت‌های این معرف با دی-متیل آمینو بنزال رودانین (دی- میتل آمینو بنزال رودانین، معرف حساس به نقره)، این معرف نتایج نادرستی را ارائه می‌دهد.
- استاندارد کردن نیترات نقره در معادن انجام نمی‌شود و این امر می‌تواند سبب نتایج کاملاً اشتباه از روش تیتراسیون با وجود رعایت دو دلیل بیان شده در بالا باشد. این اشتباه می‌تواند سبب بیشتر شدن میزان سیانید موجود در خاک در نتایج آزمایشگاهی معدن شده و هزینه‌های اضافی مربوط به فعالیت‌های زیست‌محیطی را در مواردی بر معدن وارد کند.

۳-۹ کلاس‌بندی داده‌های آزمایشگاهی

با توجه به نتایج حاصل از روش کالریمتری از مقدار سیانید موجود در نمونه‌های مختلف باطله، ابعاد کلاس‌های با توجه به بازه کلی مقدار سیانید در خاک که به طور قابل توجهی دارای تغییرات گسترده بود، به ۱۱ کلاس مختلف دسته بندی شد. کمترین مقدار سیانید در نمونه‌های سطحی، ۷۴۰ و بیشترین مقدار ۱۴۸۰ ثبت گردید. همچنین در تراز شماره ۲ (عمق ۱ متری) کمترین غلظت ۷۶۰ و بیشترین غلظت ۱۸۶۰ به دست آمد. در تراز پایانی که مربوط به عمق ۲ متری از سطح دمپ بود، کمترین و بیشترین غلظت به ترتیب ۸۱۰ و ۲۰۶۰ میلی‌گرم بر لیتر بودند. طریقه کلاس‌بندی نتایج آزمایشگاهی در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: کلاس‌بندی نمونه‌ها و تعداد نمونه‌های موجود در هر کلاس که از نتایج آزمایشگاهی تعیین غلظت سیانید به دست آمده است.

بازه غلظت (میلی گرم بر لیتر)	کلاس	تعداد نمونه‌های حاضر در کلاس
۸۰۰-۷۰۰	۱	۴
۹۰۰-۸۰۰	۲	۱۴
۱۰۰۰-۹۰۰	۳	۳
۱۱۰۰-۱۰۰۰	۴	۶
۱۲۰۰-۱۱۰۰	۵	۹
۱۳۰۰-۱۲۰۰	۶	۱۰
۱۴۰۰-۱۳۰۰	۷	۱۲
۱۵۰۰-۱۴۰۰	۸	۱۰
۱۶۰۰-۱۵۰۰	۹	۸
۱۷۰۰-۱۶۰۰	۱۰	۸
۱۷۰۰ به بالاتر	۱۱	۳

۳-۱۰ انتخاب نرم‌افزار مدل‌سازی

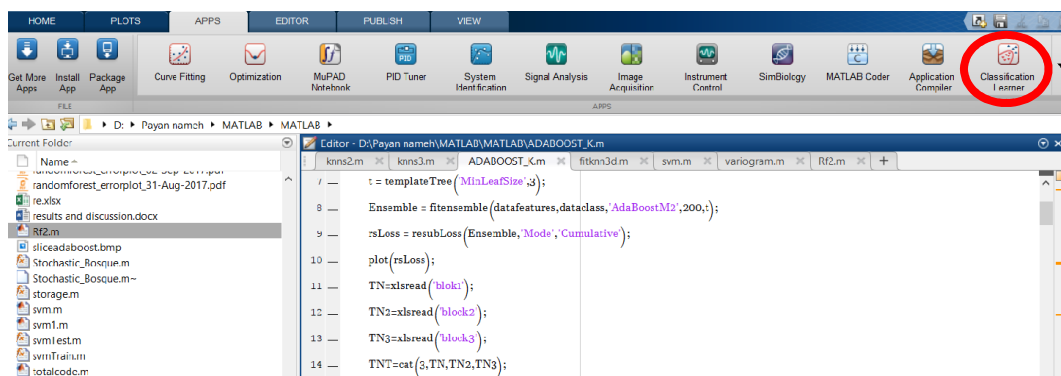
با توجه به گسترش استفاده‌ی روش‌های یادگیری ماشین در علوم مختلف و نتایج مطلوب این روش‌ها در علوم زیست‌محیطی و درونیابی فضایی، در پژوهش حاضر تلاش بر استفاده از این روش‌ها برای مدل‌سازی دمپ باطله‌ی طلا است. استفاده از چند نرم‌افزار مدل‌سازی برای روش‌های متفاوت، به عنوان یک مشکل در انتخاب بهترین روش مدل‌سازی به دلیل عملکرد متفاوت نرم‌افزارها شناخته می‌شود. بنابراین در این پژوهش از نرم‌افزار MATLAB به دلیل قابلیت کدنویسی برای مدل‌سازی با روش‌های مختلف مورد نظر استفاده شده است.

۳-۱۱ انتخاب روش مناسب مدل‌سازی

پس از انتخاب نرم‌افزار MATLAB به عنوان نرم‌افزار مدل‌سازی فضایی، انتخاب روش مدل‌سازی فضایی از بین روش‌های موجود که خلاصه آن‌ها در جدول ۳-۲ بیان شده است، مورد توجه قرار گرفت. با توجه به قابلیت نرم‌افزار MATLAB برای آموزش اولیه داده‌ها و تست آن‌ها جهت نشان دادن تناسب روش‌ها با نوع ورودی، سه روش کلاس‌بندی در بین روش‌های مذکور برای انجام مدل‌سازی انتخاب شد. همچنین از روش آدابوست (روش تقویتی برای بهبود عملکرد کلاس‌بندها) بر روی همه کلاس‌بندها

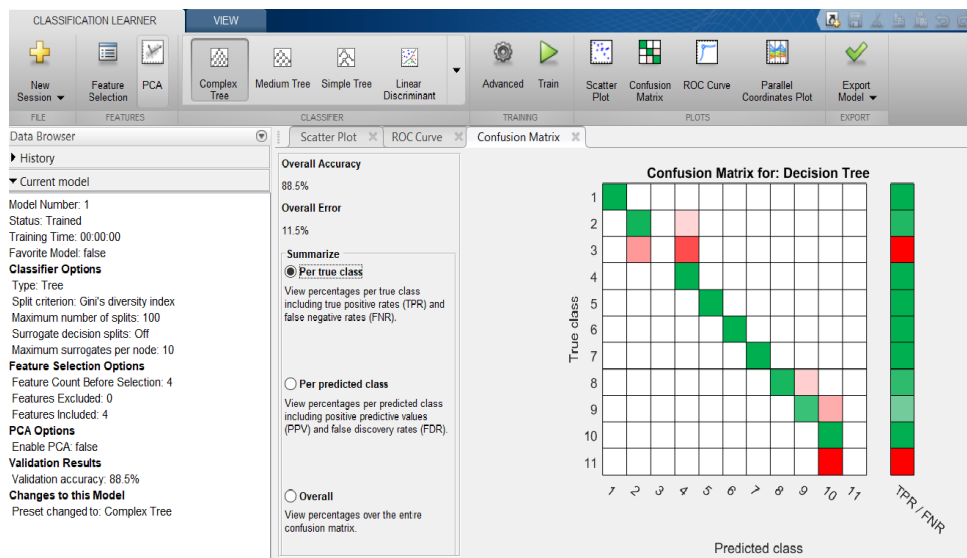
استفاده شده است.

در پنجره باز شده اصلی MATLAB در قسمت مربوط به App، در بخش Classification Learner، داده‌های مورد نظر برای مدل‌سازی را تحت آموزش نرم‌افزار قرار داده و با استفاده از نتایج این آموزش‌ها یک دید کلی از عملکرد کلاس‌بندی‌های مختلف بر داده‌ها به دست می‌آید. این بخش از نرم‌افزار در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸: آموزش‌دهنده کلاس‌بندی برنامه MATLAB.

برای مثال، زمانی که داده‌ها برای روش Complex Tree، تحت آموزش قرار می‌گیرند، دقت کلی ۸۸/۵٪ حاصل می‌شود (شکل ۳-۹). در بخش Classification Matrix، اطلاعات دقیقی از اینکه خطاهای حاصل مربوط به کدام یک از کلاس‌ها است، نشان داده می‌شود. به طور مثال در شکل ۳-۹ یک کلاس از کلاس‌های ۲ به اشتباه کلاس‌بندی شده و جزء کلاس ۴ در این روش قرار گرفته است. همچنین این روش در کلاس‌بندی کلاس ۳ به طور کامل مشکل داشته، همه داده‌های مربوط به این کلاس در مدل‌سازی با این روش به اشتباه در مدل آموزش دیده و در کلاس‌های دیگر قرار گرفته‌اند. کلاس‌بندی کلاس ۱۱ نیز در مدل Complex Tree، به درستی انجام نشده است. با توجه به وجه مشترک این دو کلاس، یعنی حضور تنها ۳ نمونه در این دو کلاس برای ایجاد مدل می‌توان دلیل اصلی این ضعف را کمبود نمونه‌های حاضر در این کلاس‌ها بیان نمود. در اکثر روش‌های کلاس‌بندی، کلاس‌های ۳ و ۱۱ با دقت مناسبی آموزش دیده نشدند.



شکل ۳-۹: داده‌های تخمین آموزش داده شده برای روش Complex tree.

دقت برای جداسازی کلاس‌ها با روش‌های مختلف مربوط به غلظت سیانید در دمپ باطله موته در جدول ۳-۳ خلاصه شده است که در بین روش‌های مختلف بیان شده ۳ روش انتخاب شده است. پس از انتخاب این سه روش، روش تقویتی آدابوست بر روی همه روش‌های کلاس‌بندی اعمال و نتایج مربوط به همه روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نتیجه بهترین نتیجه در میان آدابوست‌های مختلف با کلاس‌بندهای گوناگون نیز جزء روش‌های مدل‌سازی انتخاب شد. در نتیجه از بین روش‌های مختلف برای آموزش الگو، چهار روش برای مدل‌سازی انتخاب شد. جدول ۳-۳ دقت روش‌های مختلف کلاس‌بندی با استفاده از داده‌های آموزش را نشان می‌دهد.

۱. روش جنگل‌های تصادفی از زیر شاخه‌های روش Complex Tree.

۲. روش آنالیز تشخیص خطی^۱.

۳. روش ماشین‌های بردار پشتیبان،

۴. ترکیب الگوریتم آدابوست با هریک از روش‌های ذکر شده در جدول ۳-۳.

جدول ۳-۳: دقت روش‌های مختلف در آموزش الگو از داده‌های آزمایشگاهی.

روش	دقت (%)
Complex Tree	۸۸/۵
Medium Tree	۸۸/۵
Simple Tree	۵۵/۲
Linear Discriminant	۷۸/۲
Quadratic Discriminant	۷۳/۶
Linear SVM	۷۰/۱
Quadratic SVM	۷۰/۱
Cubic SVM	۷۰/۱
Fine Gaussian	۲۷/۶
Medium Gaussian	۶۰/۹
Coarse Gaussian	۳۴/۵
Fine KNN	۲۹/۹
Medium KNN	۲۸/۷
Coarse KNN	۱۶/۱
Cubic KNN	۲۷/۶
Weighted KNN	۳۵/۶

۳-۱۲ جمع‌بندی

بدست آوردن مقادیر صحیح آزمایشگاهی و تحلیل این نتایج در زمینه محیط‌زیست می‌تواند گام بلندی جهت تحلیل مناسب و تصمیم‌گیری درست بردارد. در این فصل تلاش شده است تا با انجام آزمایش‌های تعیین غلظت به روش درست و مقایسه این نتایج با مقادیر محاسبه شده آن در معادن، روشی درست برای اندازه‌گیری غلظت سیانید انتخاب شده تا از این روش برای اندازه‌گیری سیانید نمونه‌های برداشت شده استفاده شود. همچنین با توجه به همپوشانی تقریبی نتایج بین دو روش تیتراسیون و کالریمتری در آزمایشگاه، نتایج بدست آمده در آزمایشگاه معدن مورد بررسی قرار گرفته و در پایان دلایل اختلاف نتایج دانشگاهی با معدن بیان شد. در ادامه با توجه به داده‌های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی آموزش اولیه داده‌ها در نرم‌افزار MATLAB انجام شده و روش‌های مناسب کلاس‌بندی برای مدل‌سازی داده‌ها انتخاب شد. در پایان در بین روش‌های گوناگون کلاس‌بندی ۳ روش

LDA، SVM، RF و همچنین روش AdaBOOSt به عنوان روش تقویتی انتخاب شد. بررسی عملکرد روش‌ها و تفاوت آن‌ها در طریقه کلاس‌بندی را می‌توان از مبانی نظری آن‌ها متوجه شد. برای این منظور در فصل آینده به مبانی نظری این روش‌ها پرداخته خواهد شد.

مبانی نظری

روش های مدل سازی

برای آشنایی با مبانی نظری چهار روش بیان شده در فصل قبل، جهت درک نحوه عملکرد آنها بر داده‌ها، در فصل جاری به توضیح مختصر این روش‌ها پرداخته می‌شود. همچنین به دلیل ناتوانی این روش‌ها در بیان همگنی یا ناهمگنی محیط و با توجه به قابلیت زمین‌آمار در تعیین همگن بودن محیط مبانی کلی از زمین‌آمار و طریقه تعیین همگنی توسط واریوگرام نیز در فصل جاری مورد بحث قرار خواهد گرفت. توضیحات کامل روش‌های LDA، SVM و AdaBoost در کتاب «شناخت الگوها و ماشین یادگیری» به تألیف بی‌شاپ^۱، جمع‌آوری شده است (Bishop, 2006):

۴-۱-۱ آنالیز تشخیصی خطی

تابع تشخیص تابعی است که بردار ورودی x را گرفته و آن را به کلاس C_k اختصاص می‌دهد. در پژوهش حاضر تمرکز بر روش تابع تشخیص خطی (LDA) است.

۴-۱-۱-۴ تابع تشخیص دو کلاسی

ساده‌ترین نمایش یک تابع تشخیص خطی توسط به دست آوردن یک تابع خطی از بردار ورودی حاصل می‌شود، به طوریکه:

$$y(x) = w^T x + \omega_0 \quad (1-4)$$

که در آن w بردار وزن نامیده می‌شود و ω_0 نشان‌دهنده بایاس (با بایاس در مفهوم آماری اشتباه گرفته نشود) است. مقدار منفی بایاس آستانه نامیده می‌شود. در صورتیکه $y(x) > 0$ باشد، بردار ورودی X به کلاس C_1 و در غیر اینصورت به کلاس C_2 اختصاص داده می‌شود. مرز تصمیم‌گیری متناظر از این دو از طریق رابطه $y(x) = 0$ تعریف می‌شود که مطابق با یک ابر سطح (D-1) بعدی در داخل فضای ورودی D بعدی است. دو نقطه x_A و x_B که هر دو بر روی سطح تصمیم‌گیری قرار دارند. در این صورت:

$$y(x_A) = y(x_B) = 0 \quad (2-4)$$

می‌توان نتیجه گرفت:

^۱ Bishop

$$w^T(x_A + x_B) = 0 \quad (3-4)$$

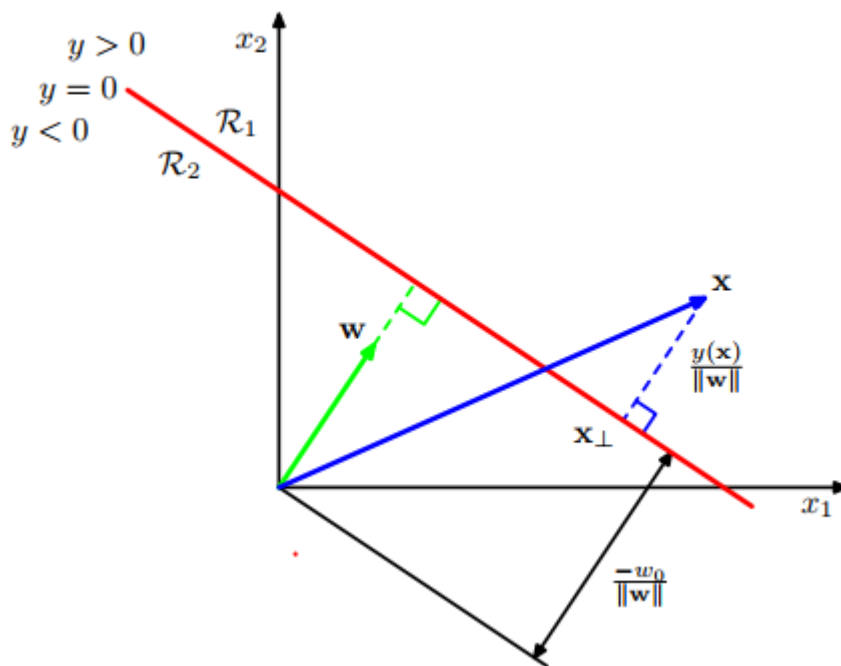
با توجه به نتیجه حاصل می‌توان بیان کرد بردار w بر هر بردار که در سطح قرار دارد متعامد است و از این رو w جهت سطح تصمیم‌گیری را تعیین می‌کند. به طور مشابه اگر x یک نقطه از سطح تصمیم‌گیری باشد، بنابراین $y(x) = 0$ بوده و در نتیجه فاصله نرمال مبدأ تا سطح تصمیم‌گیری از رابطه ۴-۴ به دست می‌آید:

$$\frac{w^T x}{||w||} = -\frac{\omega_0}{||w||} \quad (4-4)$$

بنابراین می‌توان مشاهده کرد که پارامتر بایاس (ω_0) محل سطح تصمیم‌گیری را مشخص می‌کند. این خصوصیات برای حالتیکه $D = 2$ باشد در شکل ۱-۴ توضیح داده شده است. در شکل ۱-۴، سطح تصمیم که عمود بر w است با خط قرمز نشان داده شده است و فاصله از مقدار واقعی با پارامتر بایاس ω_0 کنترل می‌شود. هم‌چنین فاصله عمودی نقطه x از سطح تصمیم‌گیری توسط رابطه $\frac{y(x)}{||w||}$ به دست می‌آید.

علاوه بر این، نشان داده شد که مقدار $y(x)$ ، یک معادله تعیین شده برای فاصله عمود (r) بر نقطه x از سطح تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد. برای درک این نکته، نقطه دلخواه x و $x_{\perp}$ به عنوان تصویر متعامد x بر روی سطح تصمیم‌گیری قابل تعریف است. به طوریکه:

$$x = x_{\perp} + r \frac{w}{||w||} \quad (5-4)$$



شکل ۴-۱: توضیح هندسه یک تابع تشخیص خطی در دو بعد (Bishop, 2006).

اگر هر دو طرف معادله بالا در w^T ضرب و با w_0 جمع شود، با توجه به رابطه ۴-۵ و نتایج زیر رابطه ۴-۶ حاصل می‌شود:

$$r = \frac{y(x)}{\|w\|} \quad (۴-۶)$$

اگر مقدار اضافی ورودی $x_0 = 1$ را در تابع وارد کرده و $\tilde{w} = (w_0; W)$ و $\tilde{X} = (x_0; x)$ تعریف

شوند نتیجه حاصله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$y(x) = \tilde{w}^T \tilde{x} \quad (۴-۷)$$

در این حالت w ، سطوح تصمیم‌گیری ابرصفحه‌ی D بعدی گذرا درون فضای گسترش یافته مقادیر واقعی است.

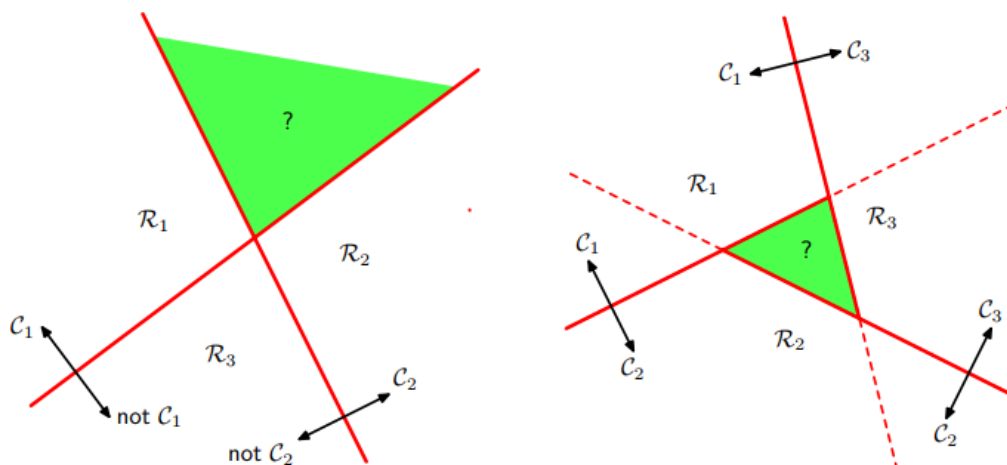
۴-۱-۱-۲ تابع تشخیص چند کلاسی

برای گسترش تابع تشخیص دو کلاسی به تابع تشخیصی چند کلاسی سه راه پیشنهاد شده است. راه‌های اول و دوم که در شکل ۴-۲ نشان داده شده‌اند، از ترکیب چند تابع تشخیص دو کلاسی ساخته و به ترتیب روش یک در مقابل دیگران و یک در مقابل یک نامیده می‌شوند. هر دو روش مذکور دارای

مشکل مناطق مبهم هستند. دودا و هارت^۱ (۱۹۷۳) به این مشکلات اشاره داشته و راه حل این مشکلات را استفاده از روش سوم، که در آن یک تابع تشخیص چندگانه جداگانه برای داده ها تعریف شده بیان کردند.

در روش یک در مقابل دیگران، در تمامی نقاط شرایط قرار گرفتن در کلاس C_k را با استفاده از تابع تشخیص حاصل از روش دو کلاسی بررسی نموده و برای هر نقطه تعیین وضعیت می شود. با توجه به اینکه در حالت چند کلاسی برای C_k نسبت به کلاس بندی آن با کلاس های دیگر چند تابع تشخیص معرفی می شود مناطق مبهم در این روش برای برخی نقاط تشکیل می شود.

در روش یک در مقابل یک، توابع تشخیص دودویی^۲ $k(k-1)$ تشکیل و برای همه جفت کلاس ها استفاده می شود. پس از آن بر طبق آرای اکثریت در میان توابع تشخیص، طبقه بندی صورت می گیرد. گرچه این روش مشکلات کمتری از روش یک در مقابل دیگران دارد اما مشکل مناطق مبهم در آن نیز به چشم می خورد. این روش در شکل ۴-۲ در سمت راست نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: تابع تشخیصی چندگانه به صورت شماتیک: روش یک در مقابل دیگران (چپ) و روش یک در مقابل یک (راست) - (قسمت های سبز نشان دهنده مناطق مبهم است) (Bishop, 2006).

در روش سوم با در نظر گرفتن یک تابع تشخیص k کلاسی، واحد شامل k تابع خطی می توان از

^۱ Duda and hart

^۲ Binary

مشکلات به وجود آمده در دو روش فوق‌الذکر چشم‌پوشی کرد.

$$y_k(x) = w_k^T x + \omega_{k0} \quad (۸-۴)$$

در این حالت برای هر $k \neq j$ اگر $y_k(x) > y_j(x)$ ، مرزهای تصمیم‌گیری بین کلاس C_k و کلاس C_j از رابطه $y_k(x) = y_j(x)$ به‌دست‌آمده، و از این رو یک ابر صفحه (D-1) بعدی از طریق رابطه ۹-۴ تعریف می‌شود:

$$(w_k - w_j)^T x + (\omega_{k0} - \omega_{j0}) = 0 \quad (۹-۴)$$

این حالت همانند مرز تصمیم‌گیری برای حالت دوکلاسی مورد بحث در بخش قبل بوده و به همین ترتیب خواص هندسی آن‌ها مشابه است.

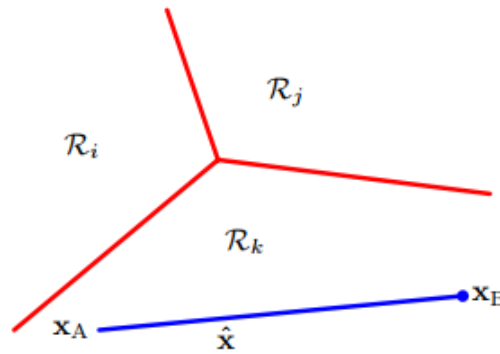
مناطق تصمیم‌گیری چنین تابع تشخیصی همواره به طور جداگانه متصل و محدب هستند. برای اثبات این مسئله دو نقطه x_A و x_B که هر دو در داخل منطقه تصمیم‌گیری R_k هستند را می‌توان در نظر گرفت. همانطور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، هر نقطه که بر روی خط اتصال x_A و x_B قرار گیرد، می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$\tilde{x} = \lambda x_A + (1 - \lambda) x_B \quad (۱۰-۴)$$

که در آن $0 < \lambda < 1$ است. با توجه به خطی بودن توابع تشخیصی:

$$y_k(\tilde{x}) = \lambda y_k(x_A) + (1 - \lambda) y_k(x_B) \quad (۱۱-۴)$$

با توجه به اینکه برای هر $k \neq j$ نقاط x_A و x_B در داخل منطقه R_k قرار می‌گیرند و $y_k(x_A) > y_j(x_A)$ و $y_k(x_B) > y_j(x_B)$ ، همچنین $y_k(x_A) > y_j(x_B)$ مشهود است که $y_k(\tilde{x}) > y_j(\tilde{x})$ را می‌توان نتیجه گرفت. بنابراین $\tilde{x}$ نیز در منطقه تصمیم‌گیری R_k قرار می‌گیرد. به این ترتیب این روش به طور جداگانه متصل شده و محدب است.



شکل ۳-۴: نمایش مناطق تصمیم‌گیری برای یک تشخیص خطی چند کلاسی (مرزهای تصمیم با خطوط نشان داده شده است) (Bishop, 2006).

۳-۱-۱-۴ حداقل مجموع مربعات خطا

هر کلاس C_k به وسیله مدل خطی مربوط به خود توصیف می‌شود. به طوریکه:

$$y_k(x) = w_k^T x + \omega_{k0} \quad (۱۲-۴)$$

که در آن $k=1, \dots, K$ است. می‌توان این موارد را به صورت یکجا با استفاده از علامت بردار گروه‌بندی کرد.

$$y(x) = \tilde{W}^T \tilde{x} \quad (۱۳-۴)$$

در رابطه ۱۳-۴، W ماتریسی است که k مین ستون آن شامل بردار $(D-1)$ بعدی، $\tilde{W} = (\omega_0, W)$ است و $\tilde{x}$ بردار ورودی عبارت متناظر $(1, x^T)^T$ همراه با یک ورودی مبهم $x_0 = 1$ است. در این صورت یک ورودی x جدید که به کلاس $y(x) = \tilde{W}^T \tilde{x}$ نسبت داده می‌شود، بزرگ‌ترین خروجی را دارد. اکنون می‌توان پارامتر ماتریس $\tilde{W}$ را از طریق حداقل کردن تابع مجموع خطاها تعیین کرد. اگر داده‌های آموزش شامل $\{x_n, t_n\}$ در نظر گرفته شده و $n = 1, \dots, N$ فرض شود، که T ماتریس n مین ردیف آن بردار t_n^T تعریف می‌شود، همراه با یک ماتریس $\tilde{X}$ که n مین ردیف آن بردار x_n^T است. با توجه به موارد ذکر شده تابع مجموع مربعات خطا را می‌توان به صورت رابطه ۱۴-۴ بیان کرد:

$$E_D(\tilde{W}) = \frac{1}{2} Tr \{ (\tilde{X}\tilde{W} - T)^T (\tilde{X}\tilde{W} - T) \} \quad (۱۴-۴)$$

اگر مشتق تابع بالا بر اساس $\tilde{W}$ برابر با صفر قرار داده شود، به صورت معادله زیر به دست

می‌آید:

$$\tilde{W} = (\tilde{X}^T \tilde{W})^{-1} \tilde{X}^T T = \tilde{X}^\dagger T \quad (15-4)$$

که در آن $\tilde{X}^\dagger$ معکوس ماتریس $\tilde{W}$ است. در نتیجه می‌توان تابع تشخیص را از طریق رابطه ۱۶-۴ محاسبه کرد:

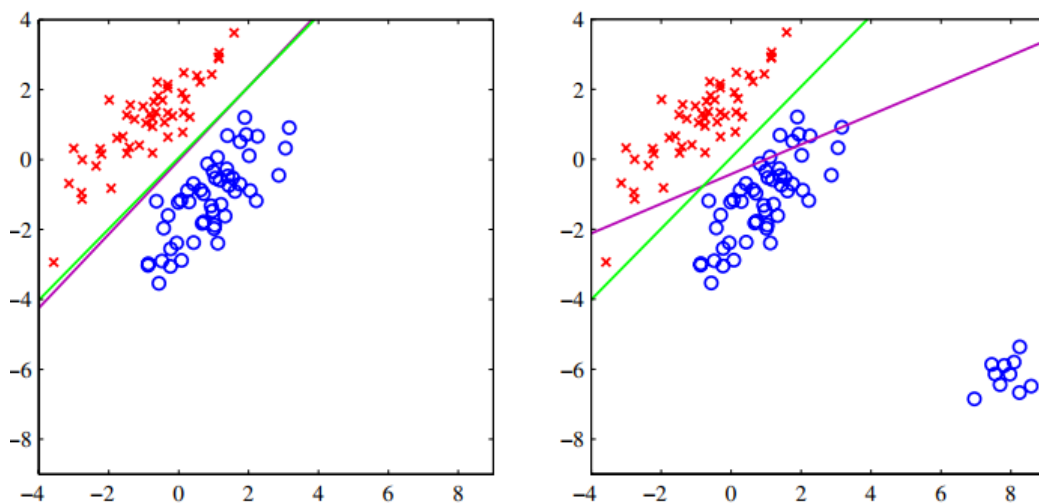
$$y(x) = \tilde{W}^T \tilde{x} = T^T (\tilde{X}^\dagger)^T \tilde{x} \quad (16-4)$$

یک ویژگی جالب برای روش حل حداقل مربعات با چند متغیر هدف، این است که هر بردار هدف در مجموعه آموزش، برخی محدودیت‌های خطی را برآورده می‌کند و می‌توان نوشت:

$$a^T t_n + b = 0 \quad (17-4)$$

در رابطه ۱۷-۴ برای برخی از ثابت‌های a و b ، پیش‌بینی مدل برای هر مقدار از x همان محدودیت را برآورده خواهد کرد، به طوریکه:

$$a^T y(x) + b = 0 \quad (18-4)$$



شکل ۴-۴: تأثیر داده‌های خارج از رده یا پرت بر نمودار حداقل مربعات (Bishop, 2006).

شکل ۴-۴ (نمودار چپ) نشان‌دهنده داده‌های مربوط به دو کلاس توسط دایره‌های آبی و ضربدرهای قرمز و مرز تصمیم‌گیری یافت شده توسط روش حداقل مربعات توسط منحنی بنفش و

همچنین مدل رگرسیونی منطقی با منحنی سبز رنگ نشان داده شده‌اند. نمودار سمت راست نشان‌دهنده نتایج متناظر به دست‌آمده در زمان اضافه شدن نقاط سمت راست پایین نمودار است. در نتایج این نمودار مشهود است که روش حداقل مربعات تابع تشخیص به داده‌های پرت بسیار حساس است (Bishop, 2006).

۴-۱-۲ آدابوست

الگوریتم بوستینگ^۱ برای اولین بار توسط شاپیر^۲ (۱۹۹۰) به کار گرفته شد. یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌های این خانواده آدابوست^۳ بوده که جزء ۱۰ الگوریتم برتر داده‌کاوی است. آدابوست (تقویت تطبیقی^۴) توسط یوآو فروند و روبرت شاپیر (۱۹۹۵) برای تولید یک طبقه‌بندی‌کننده قوی از یک مجموعه طبقه‌بندی‌کننده ضعیف به وجود آمد (Wang, 2012). در این روش، ارببی در کنار واریانس کاهش می‌یابد و مانند روش ماشین بردار پشتیبان حاشیه‌ها افزایش می‌یابد. این الگوریتم از کل مجموعه داده برای آموزش هر کلاس‌بند استفاده می‌کند (Ying, 2013).

۴-۱-۲-۱ الگوریتم آدابوست

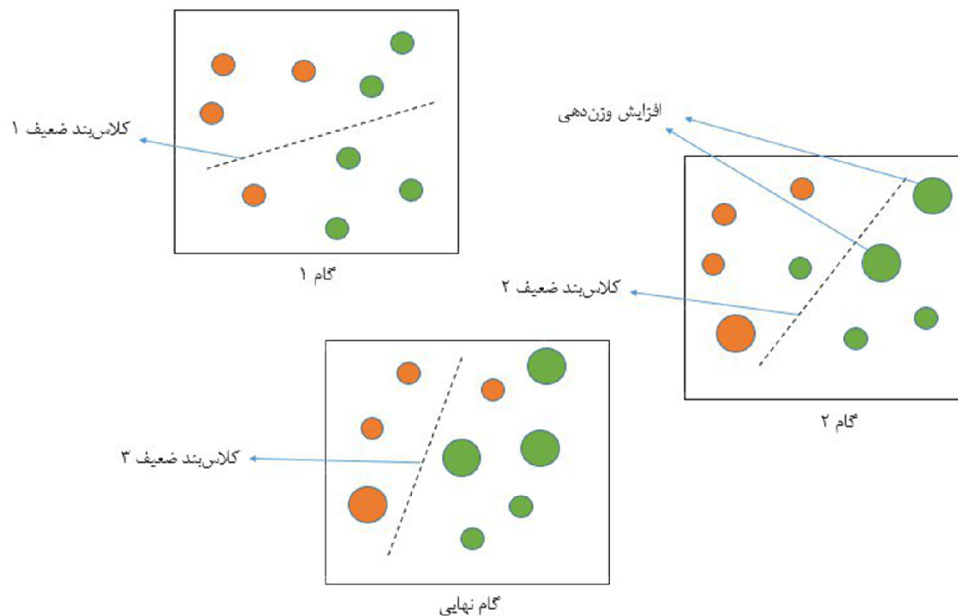
الگوریتم آدابوست مجموعه‌ای از آموزنده‌های ضعیف را با حفظ مجموعه‌ای از وزن‌ها بر روی داده‌های آموزش ایجاد می‌کند و آن‌ها را پس از هر چرخه ضعیف یادگیری اصلاح می‌کند. وزن نمونه‌های آموزشی که توسط آموزنده‌های ضعیف فعلی درست طبقه‌بندی نشده‌اند، افزایش می‌یابد در حالی که وزن نمونه‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند کاهش خواهد یافت. الگوریتم ابتدایی آدابوست در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

^۱ BOOSTing

^۲ Shapir

^۳ AdaBoost

^۴ Adaptive Boosting



شکل ۴-۵: نمای اولیه از نحوه عملکرد الگوریتم آدا بوست در دو کلاس.

$$H(x) = \text{sign}(\alpha_1 h_1(x) + \alpha_2 h_2(x) + \dots + \alpha_n h_n(x)) \quad (4-19)$$

یکی از ایده‌های اصلی الگوریتم آدا بوست حفظ توزیع یا مجموعه‌ای از وزن‌ها بر روی مجموعه آموزش است. وزن این توزیع در مثال آموزش i در دور t با $D_t(i)$ نشان داده شده است. در ابتدا همه وزن‌ها، مقداردهی ابتدایی برابر دارند، اما در هر دور وزن مثال‌های اشتباه طبقه‌بندی شده افزایش یافته به طوری که آموزنده‌های ضعیف به اجبار بر مثال‌های سخت (مثال‌هایی که به اشتباه کلاس‌بندی شده‌اند) در مجموعه داده‌ها تمرکز می‌کنند. وظیفه آموزنده‌های ضعیف یافتن یک فرضیه ضعیف $h_i: X \rightarrow \{-1, +1\}$ مناسب برای توزیع D_t است.

همان‌طور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، در ابتدا یک کلاس‌بند ضعیف برای کلاس‌بندی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای محاسبه خطا در این مراحل از کل داده‌های آموزش استفاده می‌شود. با توجه به خطای این دسته‌داده مقدار α_1 (وزن کلاس‌بند ۱) تعیین می‌شود. در گام بعدی وزن مثال‌هایی که به اشتباه کلاس‌بندی شده‌اند افزایش یافته و وزن بقیه داده‌ها اصلاح می‌شود. حال کلاس‌بند شماره ۲ با توجه به داده‌های با وزن جدید آموزش می‌بیند. در این مرحله نیز با توجه به خطای موجود در داده‌ها α_2 تعیین شده و وزن داده‌هایی که به اشتباه کلاس‌بندی شده‌اند افزایش یافته و وزن تمام

داده‌ها و همچنین وزن کلاس‌بندهای پیش از این کلاس‌بند اصلاح می‌شود. این فرآیند n بار تکرار می‌شود تا بهترین مجموعه از کلاس‌بندهای ضعیف برای تشکیل یک کلاس‌بند قوی به وجود آید.

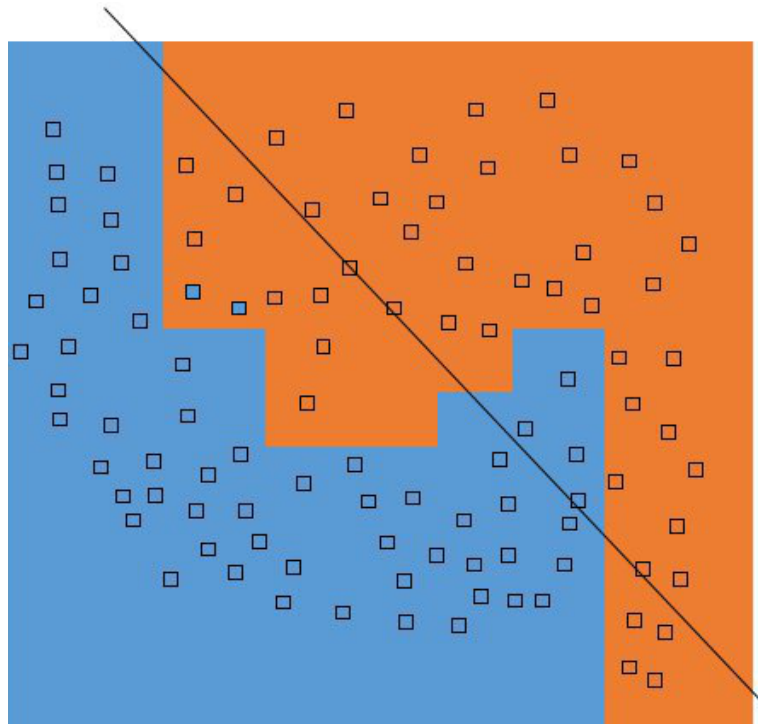
در پایان داده‌های تست برای تشخیص میزان کارایی مدل نهایی ارائه شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این صورت که با توجه به مقادیر α و h تعیین شده برای هر کلاس‌بند مقدار H نهایی تعیین شده و کلاس داده آزمایش با استفاده از مدل ارائه شده تعیین می‌شود. در صورتی که H مثبت باشد، این مثال مربوط به کلاس ۱، و در صورتی که H منفی باشد، این داده مربوط به کلاس ۲ است. در پایان با مقایسه کلاس واقعی داده‌های آزمایش با کلاس پیش‌بینی شده برای آن‌ها در این مدل، میزان کارایی این روش به دست می‌آید.

نکته حائز اهمیت در مورد این الگوریتم امکان بیش‌برازش است که در این صورت با وجود میزان خطای بسیار پایین (حتی صفر) در داده‌های آموزش، مدل کارایی مناسبی برای داده‌های تست از خود نشان نمی‌دهد.

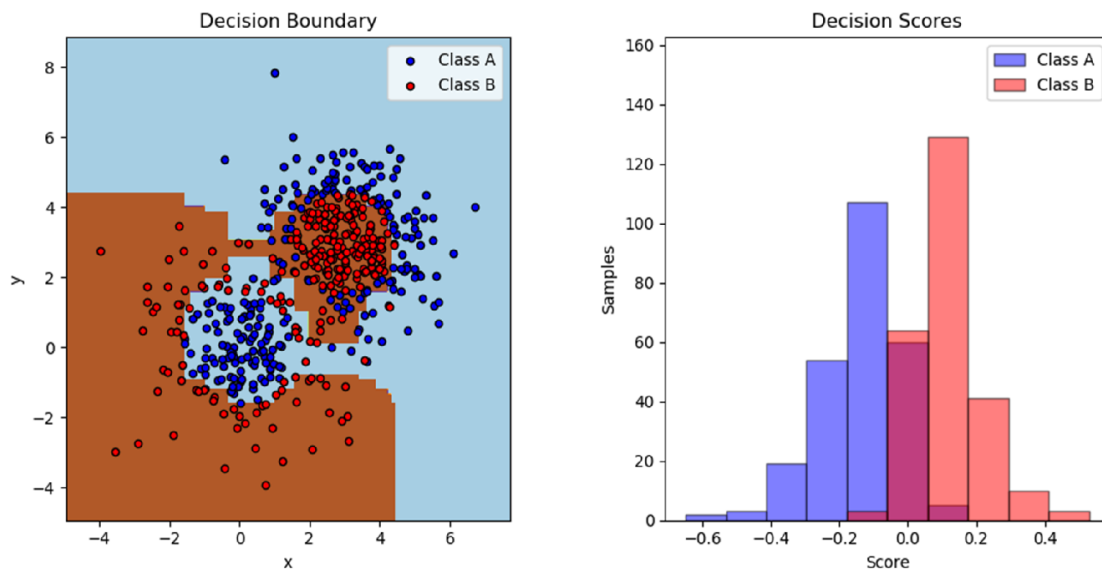
در حالت چندکلاسی به جای ارائه کلاس‌بندهای خطی، روش از کلاس‌بندهای صفحه‌ای و ابرصفحه‌ای به ترتیب برای حالت‌های ۳-کلاسی و بیشتر استفاده می‌کند.

در شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ نحوه تعیین کلاس‌های مختلف با استفاده از این روش در دو نوع دسته داده قابل مشاهده است. در شکل ۴-۶ مشهود است که حتی یک کلاس‌بند قوی توانایی کلاس‌بندی مناسبی برای این مجموعه داده را دارا نمی‌باشد در حالیکه با استفاده از روش آدابوست و تعیین ۱۱ کلاس‌بند ضعیف یک کلاس‌بندی قابل قبول برای این مجموعه داده ارائه شده است.

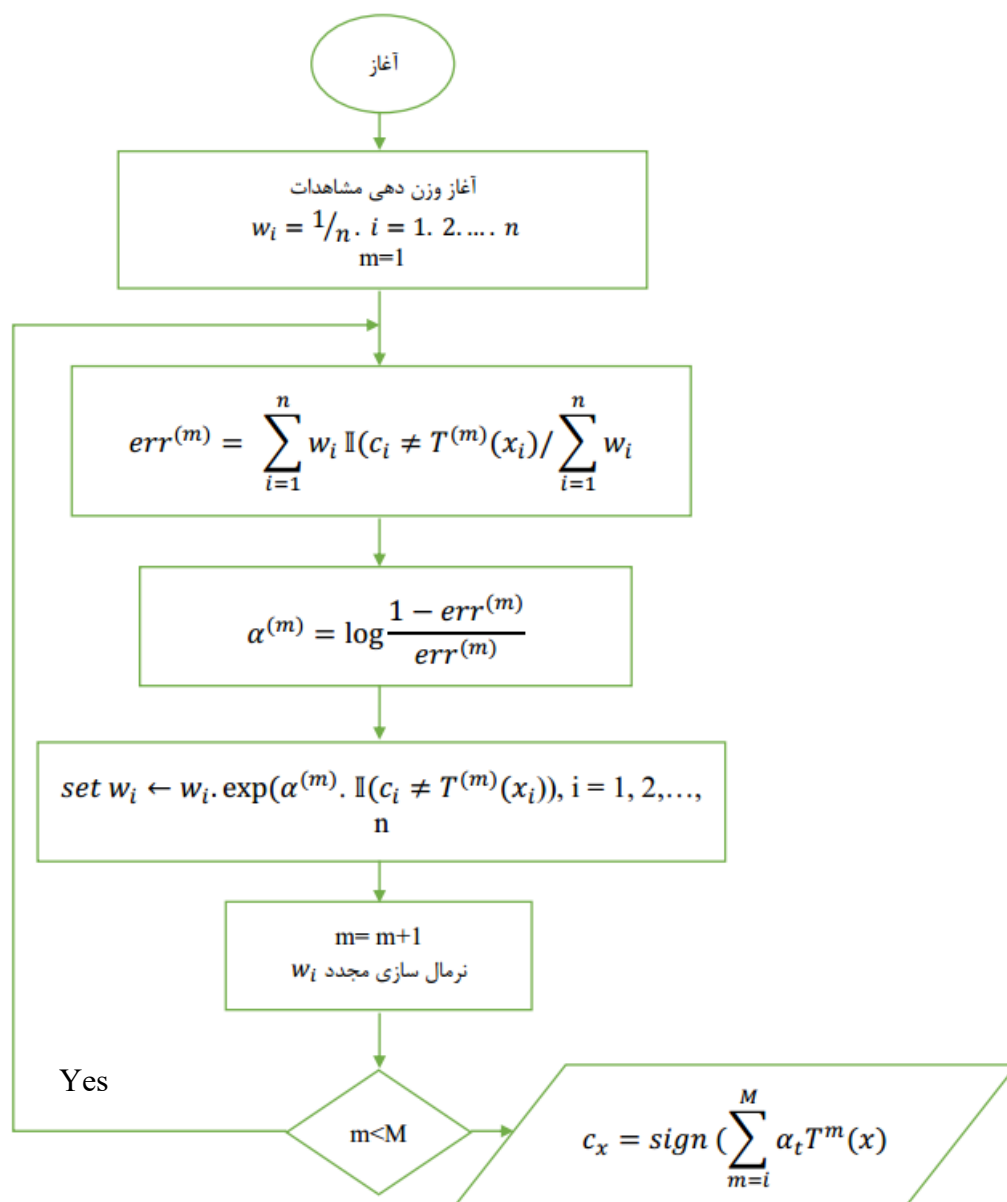
همچنین در شکل ۴-۷ نحوه تعیین کلاس‌های مختلف در یک ناحیه دو بعدی با این الگوریتم نشان داده شده است. همانطور که در نمودار امتیازات تصمیم مربوط به این شکل نشان داده شده است، مثال‌هایی که امتیاز مثبت دارند، مربوط به کلاس ۱ و مثال‌های دیگر مربوط به کلاس ۲ می‌باشند.



شکل ۴-۶: عملکرد بهتر چند کلاس‌بند ضعیف نسبت به یک کلاس‌بند قوی.



شکل ۴-۷: کلاس‌بندی داده‌های غیر خطی با استفاده از روش آداپوست (<http://www.scikit-learn.org/>).



شکل ۴-۸: الگوریتم شیوه امتیازدهی و تعیین کلاس هر داده در روش آدا بوست.

۳-۱-۴ ماشین‌های بردار پشتیبان

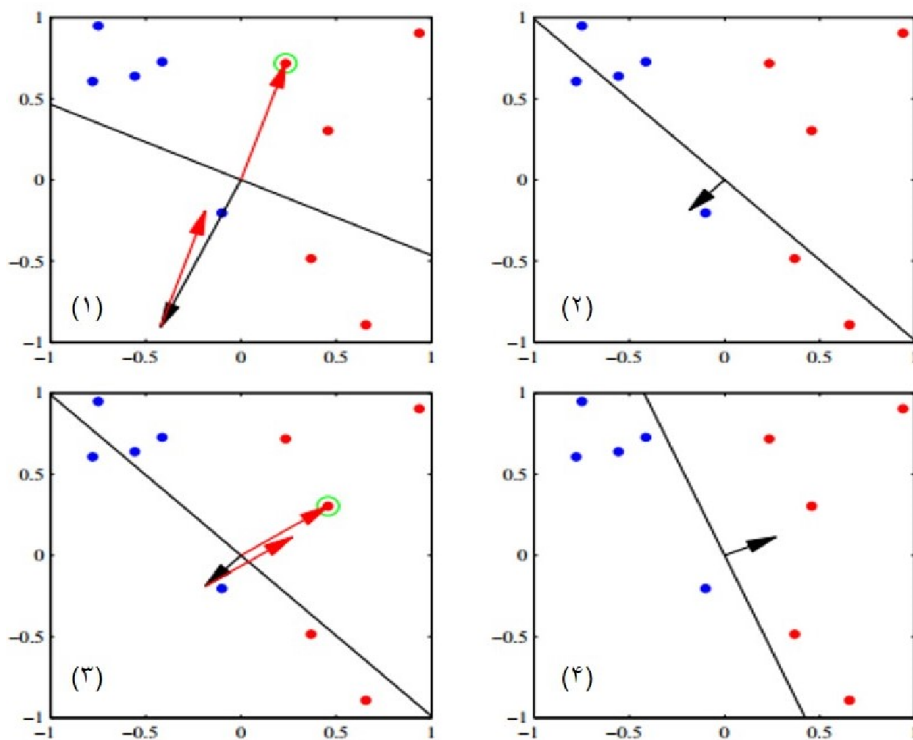
ماشین بردار پشتیبان توسط واپنیک^۱ از تئوری کمینه‌سازی ساختار ریسک توسعه یافت. برای آشنایی بیشتر با این الگوریتم الزامی است که مفهوم بردار پشتیبان درک شود.

۱-۳-۱-۴ مفهوم بردار پشتیبان

بردارهای پشتیبان، برای طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این بردارها اساس روش‌هایی

^۱ Vapnik

همچون ماشین‌های بردار پشتیبان هستند. این بردارها به دسته‌بندی داده‌ها در کلاس‌های مجزا کمک می‌کنند. نحوه کار این بردارها در شکل ۹-۴ نشان داده شده است. در این شکل مثال‌های متعلق به دو کلاس با دو رنگ قرمز و آبی در یک فضای ویژگی دو بعدی نشان داده شده‌اند. طریقه کار این بردارها به این گونه است که در ابتدا یک کلاس‌بند برای فضای داده انتخاب می‌شود. یک نقطه که اشتباه کلاس‌بندی شده است را انتخاب کرده که در این شکل یک دایره سبز به دور این نقطه رسم شده است. یک پارامتر اولیه با استفاده از رابطه ۴-۲۰ تعیین می‌شود. با توجه به علامت پارامتر اولیه جهت آن نیز تعیین می‌گردد. در شکل ۹-۴ پارامتر اولیه توسط خط مشکی جهت‌دار نشان داده شده است.



شکل ۹-۴: شکل شماتیک از مفهوم بردار پشتیبان (Bishop, 2006).

$$w^{(\tau+1)} = w^{(\tau)} - \eta \nabla E_P(w) = w^{(\tau)} + \eta \phi_n t_n \quad (۲۰-۴)$$

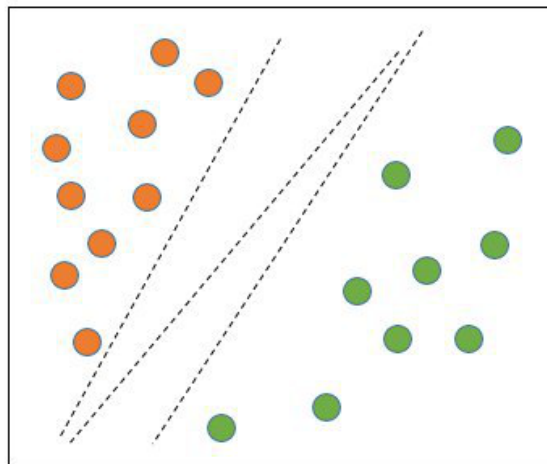
در این رابطه η پارامتر نرخ آموزش و τ شاخص گام‌های الگوریتم بوده که عددی صحیح است. به طور معمول پارامتر η برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که، وزن بردارها در طی

آموزش با استفاده از مجموعه‌ای از نقاط که غلط کلاس‌بندی شده‌اند، تکامل می‌یابد.

در گام بعدی از محل رسم خط مرزی به پارامتر اولیه، تا نقطه‌ی مورد نظر که به اشتباه کلاس‌بندی شده است، یک بردار رسم شده و برآیند این بردار با پارامتر اولیه به دست می‌آید. خط مرزی در جهت برآیند و به اندازه آن چرخانده می‌شود. این فرآیند در گام‌های ۳ و ۴ شکل نیز تکرار شده است. در پایان کلاس‌بند مناسب انتخاب می‌شود. باید توجه داشت که این شکل تنها مثالی بسیار ساده برای توضیح نحوه عملکرد روش ماشین بردار پشتیبان است. در فضای دو بعدی بردارهای پشتیبان، یک خط، در فضای سه بعدی یک صفحه و در فضای n بعدی یک ابرصفحه را تشکیل می‌دهند.

۴-۱-۳-۲ الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبانی

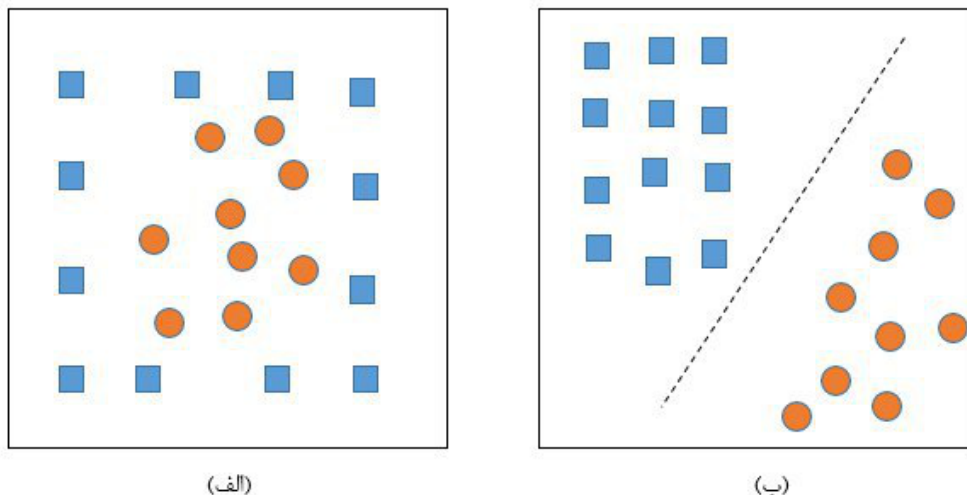
به ازای داده‌های موجود در شکل ۴-۱۰ تعداد زیادی مرزبندی را می‌توان تصور کرد که سه نمونه از این مرزبندی‌ها در این شکل آورده شده است. سوال اساسی اینجاست که بهترین مرزبندی کدام است؟



شکل ۴-۱۰: انتخاب کلاس‌بند موفق از میان کلاس‌بندهای مختلف.

یک راه ساده برای انجام این کار و ساخت یک کلاس‌بند بهینه، محاسبه فاصله مرزهای به دست آمده با بردارهای پشتیبان هر دسته و در نهایت انتخاب مرزی است که از دسته‌های موجود، مجموعاً بیشترین فاصله را داشته باشد. عمل تعیین مرز و انتخاب خط بهینه (در حالت کلی، ابر صفحه مرزی) با انجام محاسبات ریاضی ساده قابل انجام است.

در صورتی که توزیع داده‌ها به سادگی شکل بالا نباشند، این الگوریتم از توابع مرسوم به توابع کرنل برای تفکیک‌پذیر شدن داده‌ها استفاده می‌کند. در فضای جدید یافتن یک ماشین بردار پشتیبانی به راحتی امکان‌پذیر است. مفهوم این مطلب در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



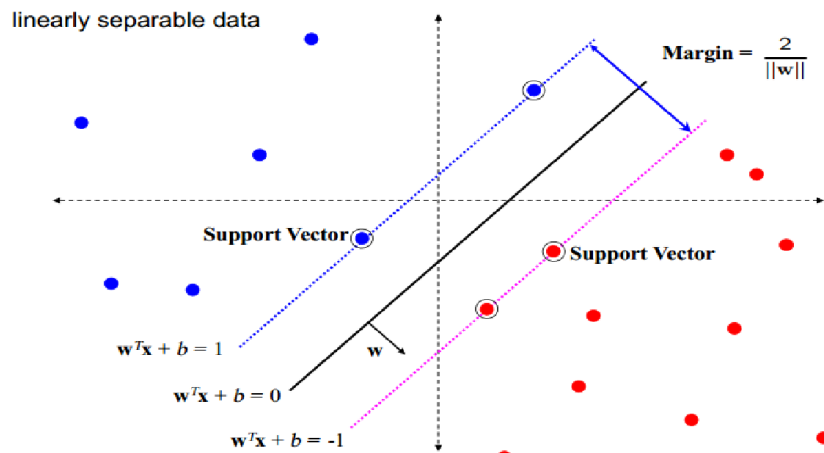
شکل ۴-۱۱: تأثیر توابع کرنل بر داده‌های غیر قابل تفکیک-الف) نشانگر حالت اولیه نقاط و ب) نشانگر

جاگیری نقاط بعد از نگاشت با توابع کرنل.

همانطور که اشاره شد، ماشین بردار پشتیبان، داده‌ها را با توجه به دسته‌های از پیش تعیین شده آن‌ها به یک فضای جدید می‌برد به گونه‌ای که داده‌ها به صورت خطی (یا ابر صفحه) قابل تفکیک و دسته‌بندی باشند و سپس با یافتن خطوط پشتیبان (صفحات پشتیبانی در فضای چند بعدی)، سعی در یافتن معادله خطی که بیشترین فاصله را بین دو دسته ایجاد می‌کند، دارد.

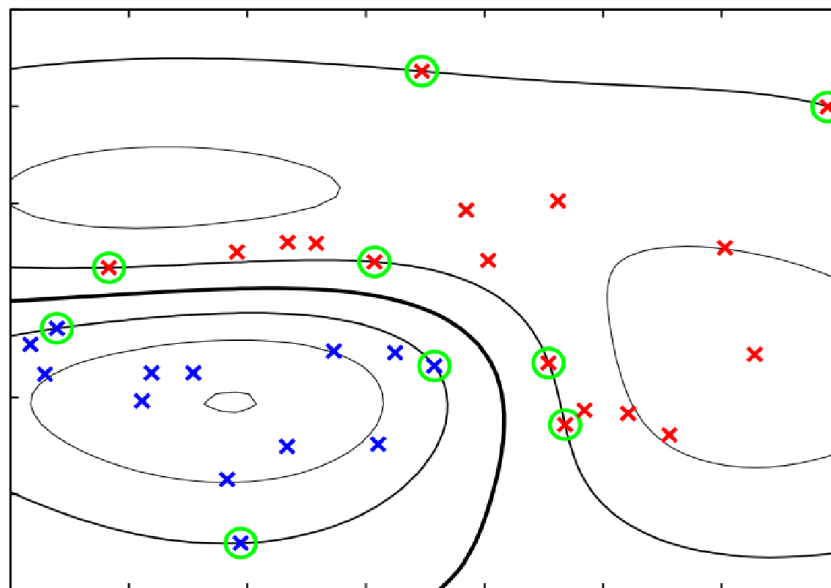
در شکل ۴-۱۲ داده‌ها در دو دسته آبی و قرمز نمایش داده شده‌اند و خطوط نقطه‌چین، بردارهای پشتیبان متناظر با هر دسته را نمایش می‌دهند، که این نقاط با دایره‌هایی دور آن‌ها مشخص شده‌اند و خط سیاه ممتد نیز همان ماشین بردار پشتیبان است. بردارهای پشتیبان نیز هر یک فرمول مشخصه متعلق به خود را دارد که خط مرزی هر دسته را توصیف می‌کند. همچنین کلاس‌بندی داده‌های چندکلاسی در شکل ۴-۱۳ با روش ماشین بردار پشتیبان نشان داده شده است.

Support Vector Machine



شکل ۴-۱۲- نمایش عملکرد یک ماشین بردار پشتیبان و مرزهای پشتیبان (فاصله بین خطوط نقطه چین تا

خط مرزی) (Bishop, 2006).



شکل ۴-۱۳: کلاس بندی داده ها با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان (Bishop, 2006).

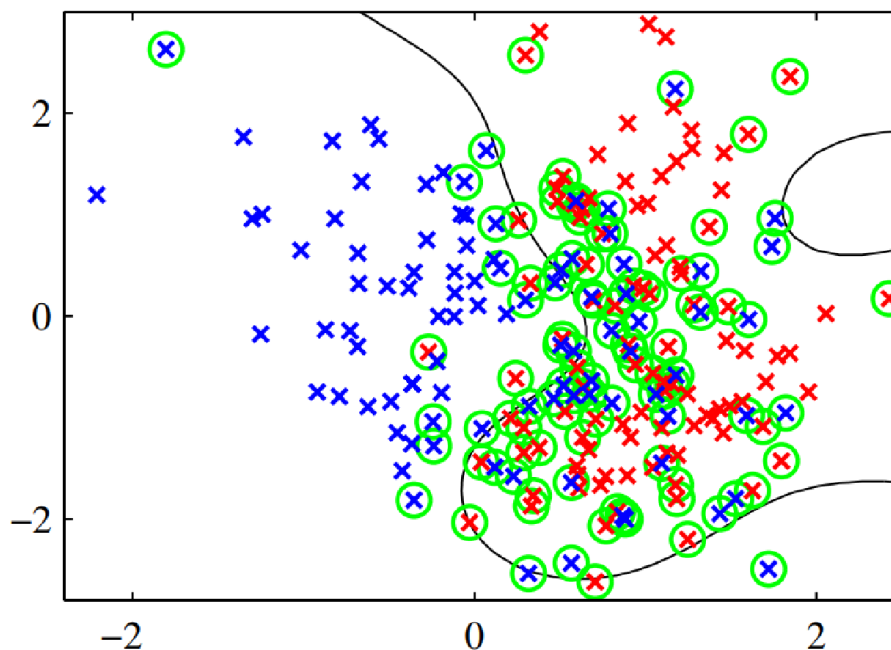
شکل ۴-۱۴ نمایانگر مثالی از داده های مصنوعی مربوط به دو کلاس در دو بعد است که

کنتورهای ثابت $y(x)$ که از ماشین های بردار پشتیبان تحت تأثیر تابع کرنل گوسی به دست آمده اند را

نمایش داده است. در این شکل مرزهای تصمیم گیری، حدود حاشیه و بردارهای پشتیبانی نیز نمایش

داده شده اند.

به منظور بهبود عملکرد واقعی ماشین بردار پشتیبان، برخی محققان از روش‌های تقویتی نظیر آدابوست استفاده می‌کنند. با این حال همواره الگوریتم آدابوست در عملکرد ماشین بردار پشتیبان بهبود مورد انتظار را نداشته و حتی در موارد خاصی عملکرد را ضعیف می‌کند. با این وجود این یک واقعیت است که ماشین بردار پشتیبان یک کلاس‌بند بسیار قوی است.



شکل ۴-۱۴: کلاس‌بندی داده‌های تفکیک‌ناپذیر در دو بعد (دایره‌های سبز رنگ نشانگر بردارهای پشتیبانی هستند) (Bishop, 2006).

روش بیان شده برای الگوریتم ماشین‌های پشتیبانی تا کنون برای حالت دوکلاسی بیان شده است. در ادامه نحوه کار الگوریتم چندکلاسی این الگوریتم بیان می‌شود.

۴-۳-۱-۳ ماشین بردار پشتیبان چندکلاسی

ماشین بردار پشتیبان اساساً یک کلاس‌بند دو کلاسی است، در حالیکه در عمل اکثر مسائل چندکلاسی هستند. روش‌های مختلفی برای ترکیب چند ماشین بردار پشتیبانی دوکلاسی برای ساخت یک کلاس‌بند چندگانه وجود دارد. به طور معمول ساختار متشکل از k ماشین بردار پشتیبانی مجزا یک رویکرد مورد استفاده رایج است (Vapnik, 1998). به طوریکه k -امین مدل $y_k(x)$ با استفاده از داده متعلق به کلاس C_k به عنوان نمونه‌ای مثبت و داده‌ی متعلق به کلاس $k-1$ به عنوان نمونه‌ای منفی

آموزش داده شده است. این روش به عنوان رویکرد "یک در مقابل دیگران" شناخته می‌شود. همانطور که در روش LDA چندگانه در شکل ۴-۲ نشان داده شد، استفاده از چند روش دوگانه می‌تواند سبب ایجاد مناطق مبهم شود که روش ماشین‌های بردار پشتیبان نیز از این نقص مستثنی نیست. این مسئله گاهی توسط پیش‌بینی برای ورودی x جدید با استفاده از رابطه ۴-۲۱ استفاده می‌شود.

$$y(x) = \max_k y_k(x) \quad (4-21)$$

متأسفانه این رویکرد ابتکاری دارای مشکل آموزش کلاس‌بندها با روش‌های مختلف است و به این دلیل هیچ ضمانتی وجود نخواهد داشت که مقادیر با ارزش واقعی $y_k(x)$ برای کلاس‌بندهای مختلف، مقیاس‌های متناسب داشته باشند.

یک رویکرد متفاوت جهت طبقه‌بندی چندگانه بر اساس کدهای خروجی صحیح و خطا توسط باگیری و دیتیریچ^۱ (۱۹۹۵) ارائه و توسط آلوین^۲ و همکاران (۲۰۰۰) برای ماشین‌های بردار پشتیبانی مورد استفاده قرار گرفت. این روش می‌تواند به عنوان تعمیمی از روش انتخاب "یک در مقابل یک" نیز بیان شود، به طوری که بیشتر بخش‌های معمول از کلاس‌ها جهت آموزش کلاس‌بندهای فردی استفاده می‌شوند (Bishop, 2006).

۴-۱-۴ جنگل‌های تصادفی

جنگل‌های تصادفی یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که در سال ۲۰۰۱ توسط بریمن^۳ متخصص آمار دانشگاه برکلی آمریکا ارائه شده است (Briman, 2001). از آنجا که ساختار جنگل‌های تصادفی را مجموعه‌ای از درخت‌های رده‌بندی یا رگرسیون^۴ (CART) مستقل تشکیل می‌دهند، ابتدا به توضیح این روش پرداخته می‌شود.

^۱ Bakiri and Dietterich

^۲ Allwein

^۳ Briman

^۴ Classification and regression trees

۴-۱-۴ روش درخت‌های رده‌بندی و رگرسیونی

این روش که توسط بریمن به عنوان جایگزینی برای روش‌های مبتنی بر شبکه معرفی شده است، هم برای رده‌بندی داده‌های کیفی و هم برای پیش‌بینی داده‌های کمی به کار می‌رود. با توجه به اهمیت پیش‌بینی داده‌ها در پایان‌نامه حاضر، تنها به توضیح بخش کمی این روش بسنده شده است. این روش بر پایه تقسیم کردن مجموعه داده به قسمت‌های کوچک‌تر است. در روش رگرسیون خطی، پیش‌بینی کننده‌های رگرسیونی، مدل‌هایی هستند که در آن‌ها یک مدل پیش‌بینی واحد روی کل فضای داده برقرار است. اما ممکن است به دلیل تفاوت رفتار متغیر پاسخ در نواحی مختلف، برقراری یک مدل واحد، کارایی لازم را نداشته باشد. لذا یک روش پیشنهادی، تقسیم‌بندی فضای داده به بخش‌های کوچک‌تر است تا بتوان رفتار متغیر پاسخ را به طور موضعی مدل‌سازی کرد. در روش درخت رگرسیونی هدف این است که از مجموعه کل داده‌ها، داده‌هایی که مقادیر متغیر پاسخ آن‌ها به یکدیگر نزدیک است، در یک ناحیه قرار گرفته و سپس به هر ناحیه، یک رویه پاسخ^۱ یا یک مدل رگرسیونی ساده نسبت داده شود. در این روش افراز یا تقسیم فضای کل توصیف‌گرها باید با این شرط انجام شود که تمامی نواحی ساخته شده به شکل مربع یا مستطیل باشد، در حالت سه متغیره و بیشتر، این قطعات به صورت مکعب مستطیل یا ابر مکعب خواهد بود. در شکل ۴-۱۵ افراز قابل قبول و غیرقابل قبول در این روش نشان داده شده است که در آن، x_1 و x_2 توصیف‌گرها هستند.

افراز کلاس‌ها در این روش به صورت سلسله مراتبی است که این امر در شکل ۴-۱۶ و شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. بنا به هدف دنبال شده در روش درخت رگرسیونی، رویه پاسخ در هر ناحیه مانند R_m ، توسط یک مدل ساده یعنی $\hat{Y}_{R_m} = C_m$ مدل‌سازی می‌شود که در آن بهترین تقریب برای C_m ، میانگین مقادیر متغیر پاسخ در ناحیه R_m است. به عبارت دیگر:

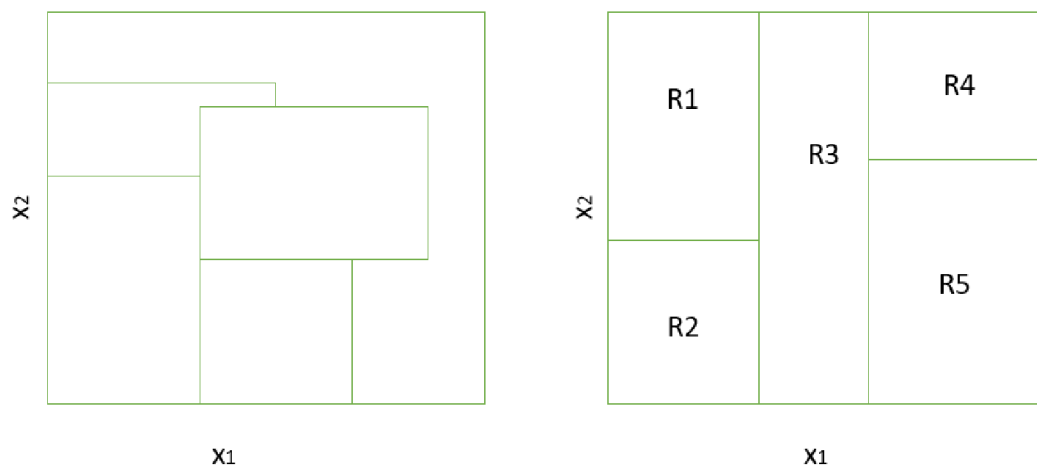
$$\hat{Y}_{R_m} = \bar{Y}_{R_m} = \frac{1}{n_m} \sum_{j=1}^n y_j \cdot y_j \in R_m \quad (۴-۲۲)$$

^۱ Response surface

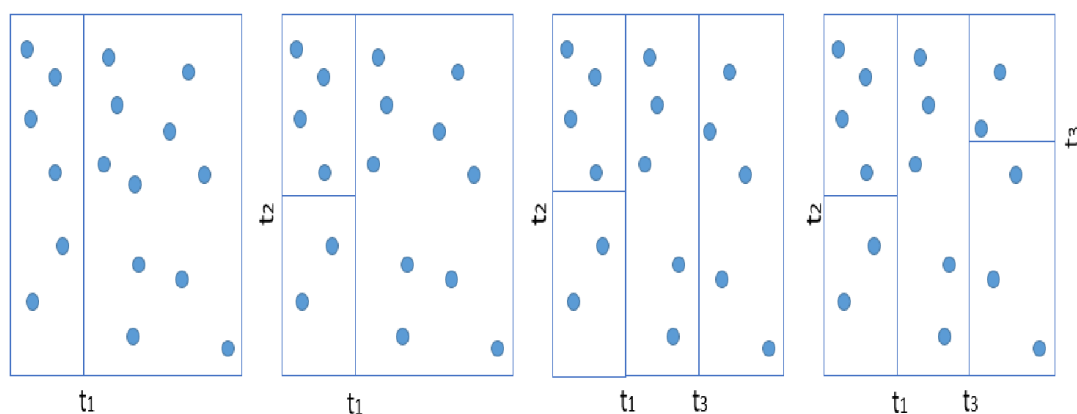
در رابطه ۲۲-۴، n_m تعداد مشاهدات مجموعه R_m است. بنابراین روش درخت رگرسیونی به

صورت رابطه ۲۳-۴ بیان می‌شود:

$$\hat{y} = \sum_{m=1} c_m I_{R_m}(x_1, x_2) \quad (23-4)$$



شکل ۴-۱۵: نمونه‌ای از افراز درست (راست) و اشتباه (چپ) (Briman, 2001).



شکل ۴-۱۶: افراز سلسله مراتبی (Briman, 2001).

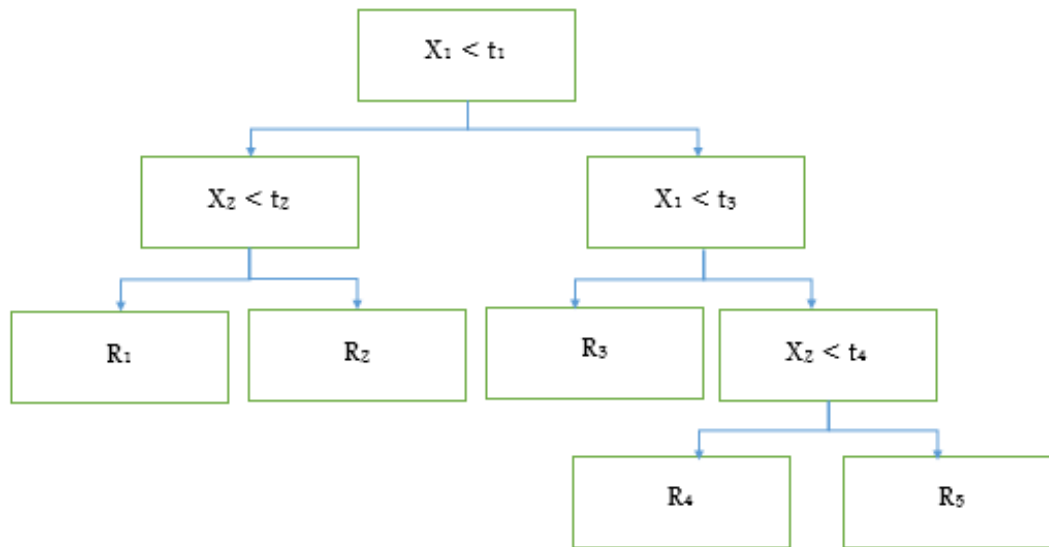
۴-۱-۲ اندازه درخت و هرس کردن

یک مطلب مهم در ساخت درخت رگرسیونی این است که هر درخت تا کجا می‌تواند رشد کند.

اگر درخت به اندازه کافی رشد نکند و یا به عبارت دیگر تفکیک فضای توصیف‌گرها در مراحل اولیه

متوقف شود، ممکن است مدل مناسبی ارائه نشود و اگر هم درخت بیش از اندازه رشد کند، احتمال رخ

دادن بیش‌برازش^۱ وجود دارد. برای انتخاب اندازه درخت نیاز به یک پارامتر در ساختار مدل است، به طوری که این پارامتر مقدار بهینه اندازه درخت را به دست آورد. در هر مرحله از رشد درخت، مدل حاصل از روش درخت رگرسیونی دقیق‌تر شده و مجموع توان‌های دوم خطا کاهش می‌یابد. یک راه توقف برای رشد درخت می‌تواند بر اساس میزان کاهش مجموع توان‌های دوم خطا باشد.



شکل ۴-۱۷: شکل سلسله مراتبی افراز (Briman, 2001).

۴-۱-۳ جنگل‌های تصادفی

اساساً روش جنگل‌های تصادفی وابسته به ماهیت روش درخت رگرسیونی است و متشکل از ترکیب مجموعه‌ای از درخت‌های رگرسیونی است. هر درخت، یک مدل تولید می‌کند و از برآیند یا ترکیب این مدل‌ها، مدل نهایی به دست می‌آید. برخلاف روش درخت رگرسیونی، در این روش برای ساخت هر درخت، تنها بخشی از داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ زیرا انتخاب داده‌های آموزش با جایگذاری انجام می‌شود. همچنین در جنگل‌های تصادفی برای افراز فضای توصیف‌گرها و ساخت هر گره، به جای استفاده از تمام توصیف‌گرها، از زیرمجموعه‌ای از توصیف‌گرها استفاده می‌شود.

^۱ Over Fitting

۴-۴-۱-۴ الگوریتم روش جنگل‌های تصادفی

فرض کنید $i = 1, \dots, N$ و (X_i, Y_i) مجموعه‌ای از داده‌های آموزشی می‌باشد که در آن $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{im})$ برداری از M توصیف‌گر و Y_i متغیر پاسخ متناظر آن‌ها است. اگر تعداد کل درخت‌های مدل با $ntree$ نشان داده شود، الگوریتم زیر بیانگر مراحل ساخت هر درخت است.

۴-۲ تعیین همگن یا ناهمگن بودن محیط

چهار روش بیان شده در بخش‌های قبلی در تعیین همگن یا ناهمگن بودن محیط ناتوان هستند. برای تعیین همگن بودن محیط از واریوگرام در دو راستا می‌توان استفاده کرد. جهت این امر ابتدا باید نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته و پس از آن واریوگرام در جهات مختلف رسم شود. همچنین می‌توان برای مقایسه شعاع تأثیر این واریوگرام با شعاع تأثیر به دست آمده در روش‌های یادگیری ماشین استفاده کرد.

۴-۲-۱ بررسی نرمال بودن داده‌ها

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از دو روش کلی می‌توان بهره برد:

- روش توصیفی شامل نمودارها و بررسی شاخص‌های آماری
- روش استنباطی شامل آزمون فرض‌ها

۴-۲-۱-۱ روش توصیفی در بررسی نرمال بودن داده‌ها

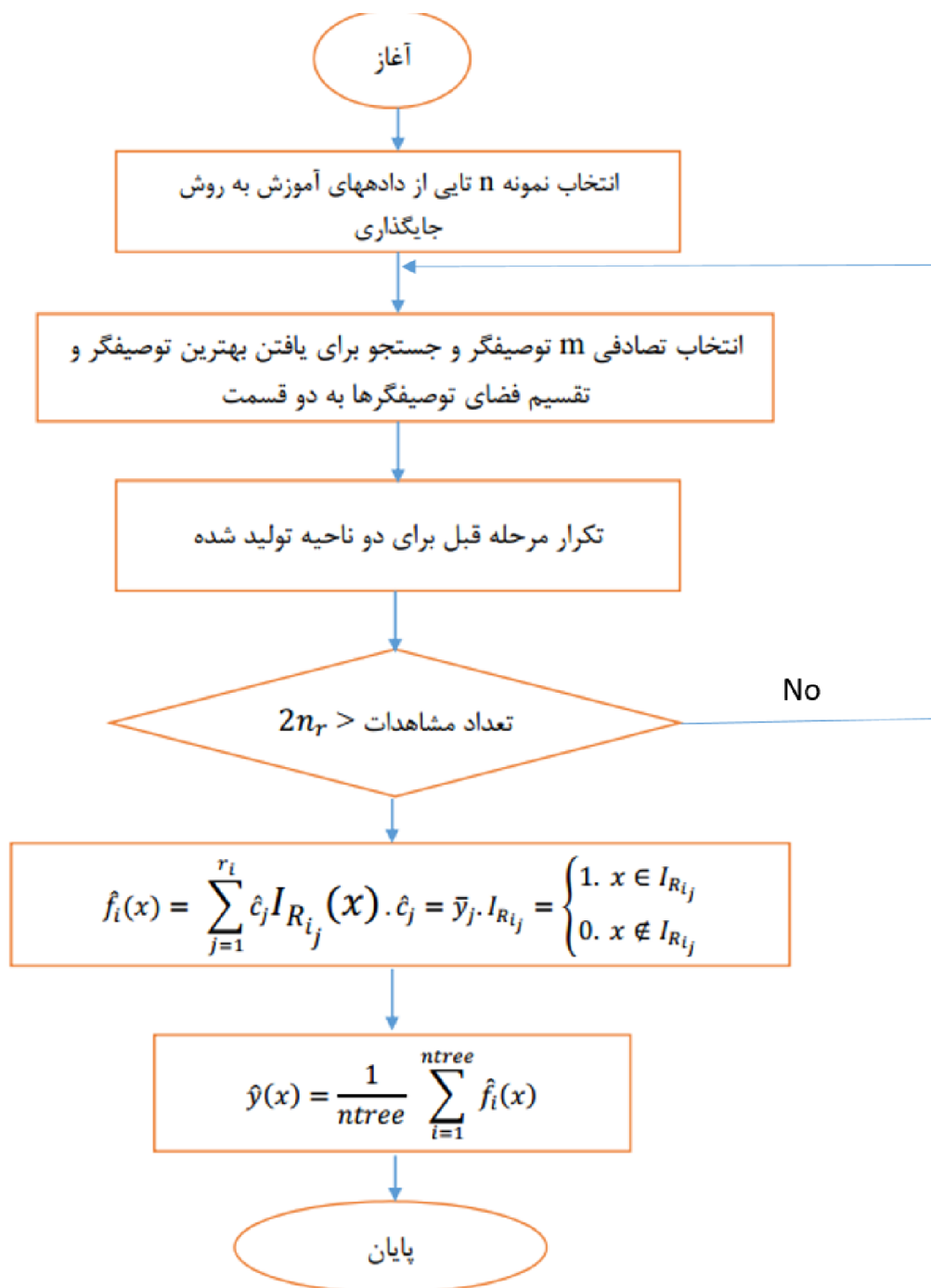
۱- رسم هیستوگرام داده‌ها و مقایسه آن با منحنی چگالی توزیع احتمال

معمولاً با این روش می‌توان نرمال نبودن توزیع داده‌ها و دلایل آن را مشاهده کرد. اگر هیستوگرام داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک بود آنگاه می‌توان به سراغ آزمون فرض رفت..

۲- بررسی میزان کشیدگی و میزان چولگی داده‌ها

دو معیار کشیدگی و چولگی در داده‌ها در تشخیص نرمال بودن توزیع احتمال داده‌ها، اهمیت بالایی دارد.

۳- رسم نمودار چند-چندک و احتمال-احتمال



شکل ۴-۱۸: الگوریتم جنگل‌های تصادفی

اگر داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کنند انتظار می‌رود که نمودار پراکنش چندک‌های نمونه‌ای داده‌ها در مقابل چندک‌های توزیع نرمال استاندارد در راستای یک خط راست قرار گیرند. در روش رسم نمودار احتمال-احتمال نیز مقادیر توزیع تجربی داده‌ها در مقابل مقادیر مورد انتظار توزیع نرمال رسم می‌شود. در صورتی که توزیع داده‌ها نرمال باشد، انتظار می‌رود که نمودار حاصل در امتداد یک خط

راست (نیمساز ربع اول) باشد (نعمت‌الهی، ۱۳۹۰).

۳-۴ آزمون‌های آماری جهت بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها

برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، آزمون‌های زیادی پیشنهاد شده است. از جمله: اندرسون-دارلینگ^۱، کلوموگروف اسمیرنوف^۲، شاپیرو-ویلک، لیلیفورس^۳، کای دو، دی آگوستینو^۴ و استفاده از آزمون‌های کلوموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک عمومیت بیشتری دارد. با افزایش حجم نمونه انتظار می‌رود که توان آزمون‌ها نیز بیشتر شود ولی به طور معمول آزمون شاپیرو-ویلک بیشترین توان و کلوموگروف-اسمیرنوف کمترین توان را دارد. توان آزمون شاپیرو-ویلک با افزایش حجم نمونه افزایش می‌یابد و برعکس این مطلب، در تعداد نمونه کم، این آزمون توان قابل توجهی ندارد (Shapiro and Wilk, 1965).

نکته قابل توجه عدم حساسیت آزمون کلوموگروف-اسمیرنوف به نقاط پرت و داده‌های خارج از رده در مقابل آزمون شاپیرو-ویلک^۵ است که به این نقاط حساس است (کریمی، ۱۳۹۴). تمامی بررسی‌ها و آزمون‌های بیان شده در بخش‌های ۵-۵-۱ و ۵-۵-۲ در این تحقیق در نرم‌افزار SPSS انجام شد. در ادامه تمامی نتایج حاصل از این آزمون‌ها بیان خواهد شد.

آزمون‌های هیستوگرام و چولگی-کشدگی، نتیجه‌ی درستی از نرمال بودن داده‌ها ارائه نمی‌دهد. به همین دلیل از تست‌های کلوموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک استفاده شده است. این دو روش در داده‌های کم نتایج تقریباً یکسانی در اکثر داده‌ها ارائه می‌دهند. در داده‌های این تحقیق به دلیل حضور داده‌های پرت یا خارج از رده (مربوط به کلاس ۱۱) روش شاپیرو-ویلک جواب یکسانی با روش کلوموگروف-اسمیرنوف ارائه نداده است. برای تأیید نرمال بودن داده‌ها بالاتر بودن ضریب تعیین که با پارامتر Sig در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است، باید بالاتر از ۰/۰۱ (برخی کارشناسان این مقدار را

^۱ Anderson and Darling

^۲ Kolmogorov and Smirnov

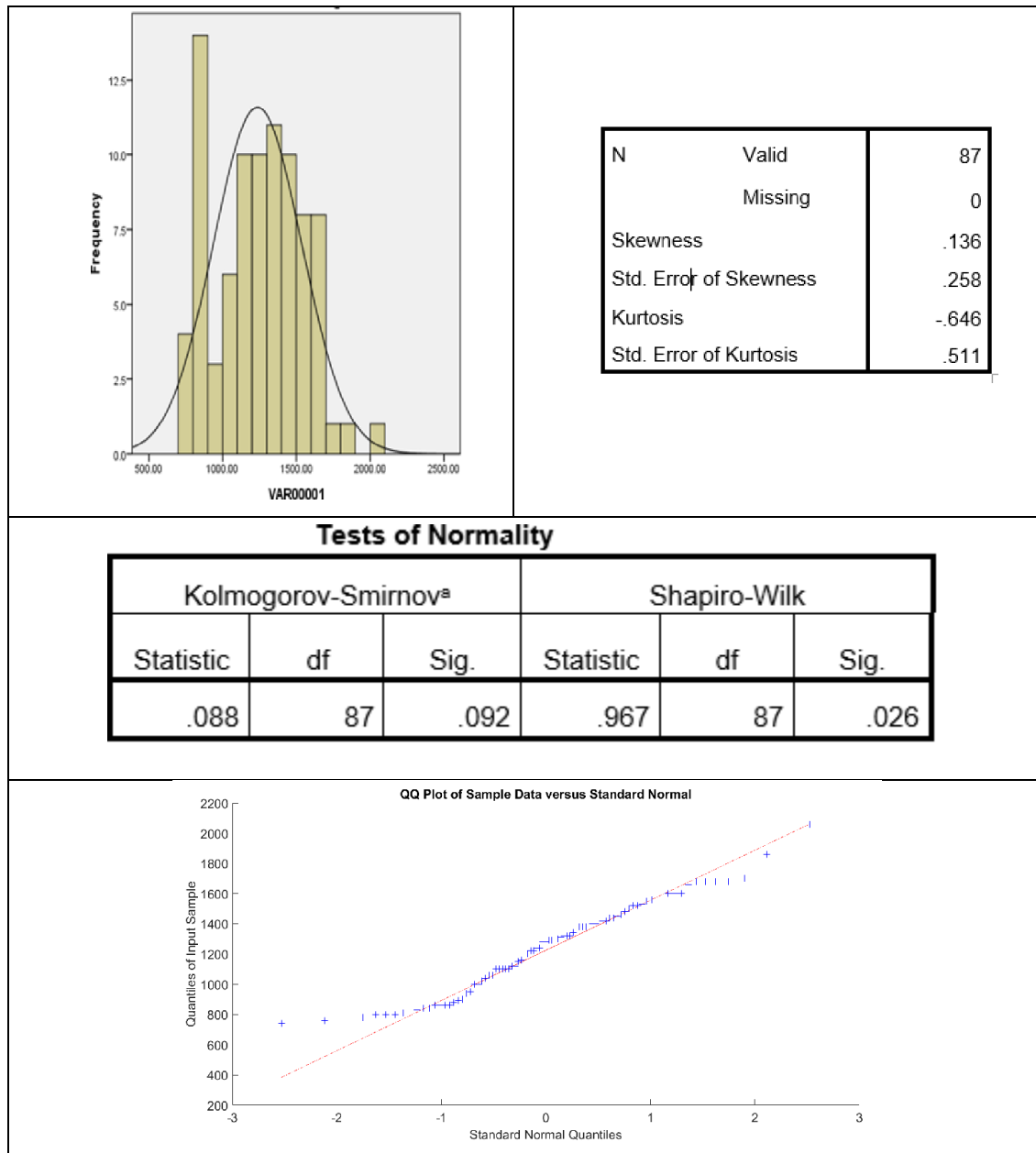
^۳ Lilliefors test

^۴ d'agostino

^۵ Shapiro and Wilk

۰/۰۵ در نظر می‌گیرند) باشد. با توجه به حضور داده‌های پرت و بهتر بودن نتایج روش کلوموگروف-

اسمیرنوف می‌توان داده‌ها را نرمال در نظر گرفت (کریمی، ۱۳۹۴).



شکل ۴-۱۹: نتایج مربوط به آزمون‌های آماری در نرم‌افزار SPSS.

۴-۳-۱ زمین‌آمار

در زمین‌آمار به بررسی آن دسته از متغیرها پرداخته می‌شود که ساختار فضایی از خود بروز می‌دهند. به عبارت دیگر این روش ابتدا به بررسی وجود یا عدم ساختار فضایی بین داده‌ها پرداخته و سپس در صورت وجود ساختار فضایی تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. البته ممکن است، نمونه‌های مجاور

تا فاصله معین در ساختار فضایی به هم وابسته باشند. در این حالت بدیهی است که میزان تشابه بین مقادیر مربوط به نمونه‌های نزدیک احتمالاً بیشتر است، زیرا در صورت وجود ساختار فضایی، تغییرات ایجاد شده در یک فضای معین شانس بیشتری برای تأثیرگذاری روی فضاهای نزدیک به خود دارند تا روی فضای دورتر از خود.

بنابراین از دیدگاه زمین‌آماري هر نمونه تا یک حداکثر فاصله معین با نمونه‌های اطراف خود ارتباط فضایی دارد. این فاصله حداکثری که دامنه تأثیر نامیده می‌شود، دارای اهمیت فراوانی است و در حقیقت نشان‌دهنده فاصله‌ای است که در آن می‌توان از تخمین‌گرهای زمین‌آماري استفاده کرد (حسنی پاک، ۱۳۸۹).

واریوگرام مرحله ابتدایی تخمین زمین‌آماري است که همان مرحله شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی عیار است و مفهوم پیوستگی، همگنی و ناهمگنی و بالاخره ساختار فضایی ذخایر معدنی بررسی می‌شود.

با توجه به نرمال بودن داده‌ها که شرط اولیه برای استفاده از تکنیک زمین‌آمار است، می‌توان واریوگرام محیط را ترسیم کرد. واریوگرام همانند واریانس اختلاف عیار نقاطی به فاصله h از یکدیگر است، مشروط به آنکه روند وجود نداشته باشد. در صورت وجود روند لازم است قبل از شروع عملیات اثر آنرا خنثی کرد و سپس روی مقادیر باقی‌مانده محاسبه واریوگرام را انجام داد. برای ترسیم واریوگرام لازم است ابتدا مقدار 2γ را به ازای مقادیر مختلف h (طول گام) محاسبه کرد. سپس واریوگرام به‌ازای فواصل h مختلف در یک نمودار رسم گردد. البته از مقادیر کم روند می‌توان با تقریب چشم‌پوشی کرد. رابطه (۵-۱) نحوه محاسبه سمیواریوگرام (نصف واریوگرام) را بیان نموده است.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(N-h)} \sum_{i=1}^{N-h} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (5-1)$$

هریک از مقادیر محاسبه شده واریوگرام یا سمیواریوگرام به همراه مقادیر نظیر h آن‌ها نقطه‌ای را در مختصات $\gamma - h$ مشخص می‌کند. با برازش یک مدل به این نقاط، منحنی واریوگرام تجربی به‌دست

می‌آید (حسنی‌پاک، ۱۳۸۹).

۴-۴ جمع‌بندی

در فصل جاری مبانی نظری روش‌های انتخاب شده بر اساس مطالعات انجام شده در این زمینه بیان شد. ایجاد خطا با بالاتر رفتن تعداد کلاس‌ها به دلیل ایجاد مناطق مبهم از ایرادات اساسی روش‌های کلاس‌بندی می‌باشد. همچنین پیچیده شده این روش‌ها با افزایش تعداد کلاس‌ها نیاز به سخت‌افزارهای قوی برای مدل‌سازی دارد. در پایان نیز مبانی کلی روش زمین‌آمار و طریقه عملکرد این روش برای تعیین همگن بودن محیط با توجه به عدم توانایی روش‌های کلاس‌بندی در تعیین همگن یا ناهمگن بودن محیط مورد بررسی قرار گرفت. همگن بودن محیط علاوه بر اینکه یک فاکتور مهم در تحلیل فیزیکی شرایط دمپ است، از منظر اینکه توانایی روش‌های کلاس‌بند در محیط‌های ناهمگن نامعلوم است، بسیار حائز اهمیت است. در فصل آتی با استفاده از این روش‌ها مدل‌سازی‌های مختلف انجام خواهد شد و پس از آن با استفاده از زمین‌آمار همگن بودن محیط مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مدل ساز توزیع سیانید

دمپ باطله و ارزیابی اقتصاد سرمایه

مدل ساز

۵-۱ مقدمه

استفاده از الگوریتم‌های بیان شده در فصل چهارم برای تعیین رفتار مکانی سیانید در دمپ باطله نیاز به نرم‌افزارهای توانمند در یادگیری ماشین دارد. تبدیل این الگوریتم‌ها از مبنای ریاضی به مبنای عددی در این فصل توسط کدهای کامپیوتری در فضای متلب انجام می‌شود. در آموزش اولیه داده‌ها، از داده‌های آموزش برای تعیین میزان دقت روش‌ها استفاده می‌شود (نه از داده‌های تست). در نتیجه تعیین میزان خطای کلاس‌بندی پس از مدل‌سازی با استفاده از داده‌های تست بیانگر بهترین روش مدل‌سازی خواهد بود. بنابراین در ادامه با استفاده از داده‌های تست، بهترین روش برای انجام تحلیل‌ها و انجام تخمین انتخاب خواهد شد. پس از انتخاب روش منتخب، بررسی‌های زیست‌محیطی و تخمین مقدار سیانید انجام شده و در پایان هزینه‌های تصفیه، حضور عناصر نادر و فلزات سنگین مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

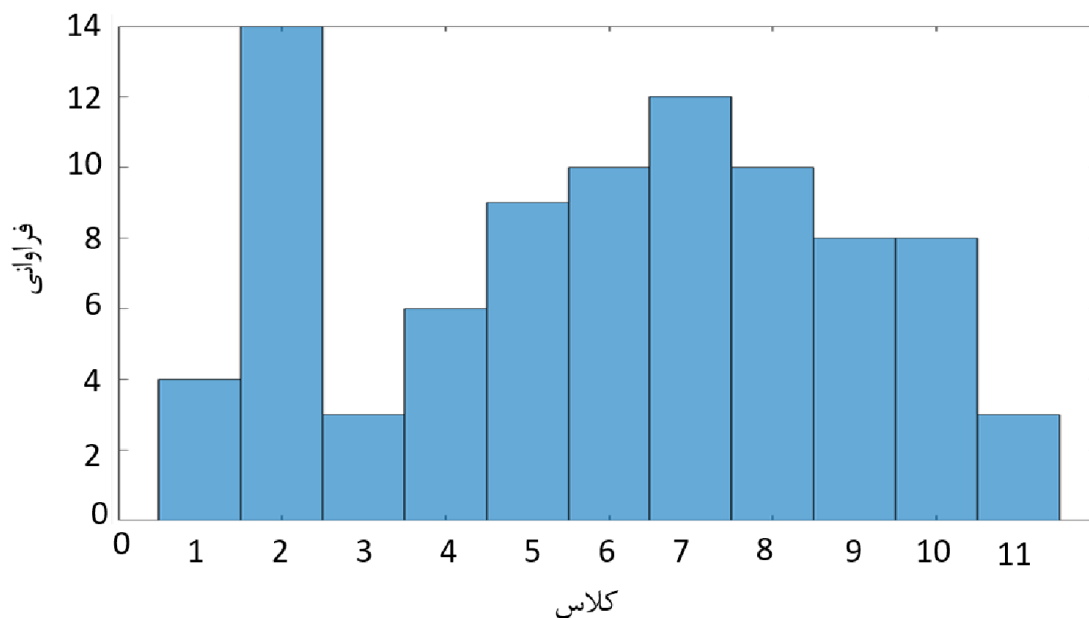
۵-۲ مدل‌سازی

در مدل‌های ارائه شده برای دمپ باطله معدن طلای موته، بردار ویژگی تشکیل شده از ۴ پارامتر شامل ۳ پارامتر مکانی و عیار است. همچنین در این مدل‌ها کلاس که به عنوان پاسخ مورد نظر است با رنگ نشان داده می‌شود. همانطور که در جدول ۳-۲ بیان شد، داده‌ها در ۱۱ کلاس تقسیم‌بندی شدند. توزیع ابتدایی داده‌های آموزش در کلاس‌های مختلف در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشهود است فراوانی کلاس‌ها از توزیع خاصی پیروی نمی‌کند. یکی از مزیت‌های روش‌های یادگیری ماشین و داده‌کاوی عدم احتیاج نرمال‌سازی داده‌ها است. این روش‌ها توزیع موجود در داده‌ها را کشف کرده و توزیعی مشابه با آن را مدل‌سازی می‌کنند.

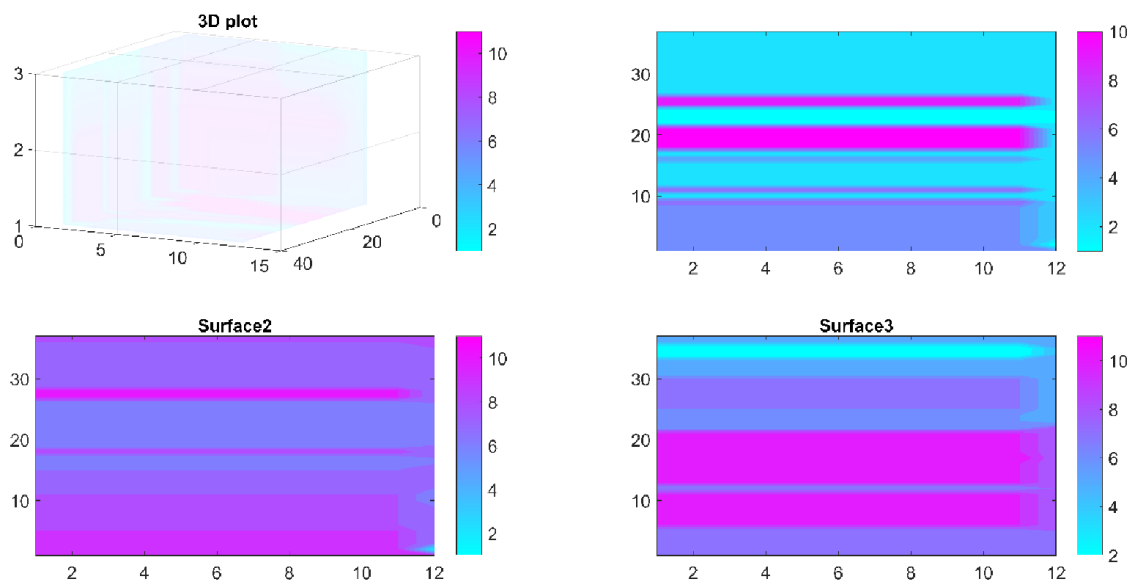
۵-۲-۱ نتایج مدل‌سازی با روش جنگل‌های تصادفی

شکل ۵-۲ نشان‌دهنده نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش جنگل‌های تصادفی است. این مدل در صورت محدود نشدن تعداد افزایندها چهار بیش‌برازش می‌شود. نتایج مدل‌سازی در این شکل در سه

سطح به همراه مدل سازی سه بعدی در حالت پیکسل نشان داده شده است. حالت پیکسل امکان مشاهده تمامی نقاط را در درون مکعب ایجاد شده در حالت سه بعدی فراهم می کند.



شکل ۵-۱: هیستوگرام داده های آموزش در کلاس ها.

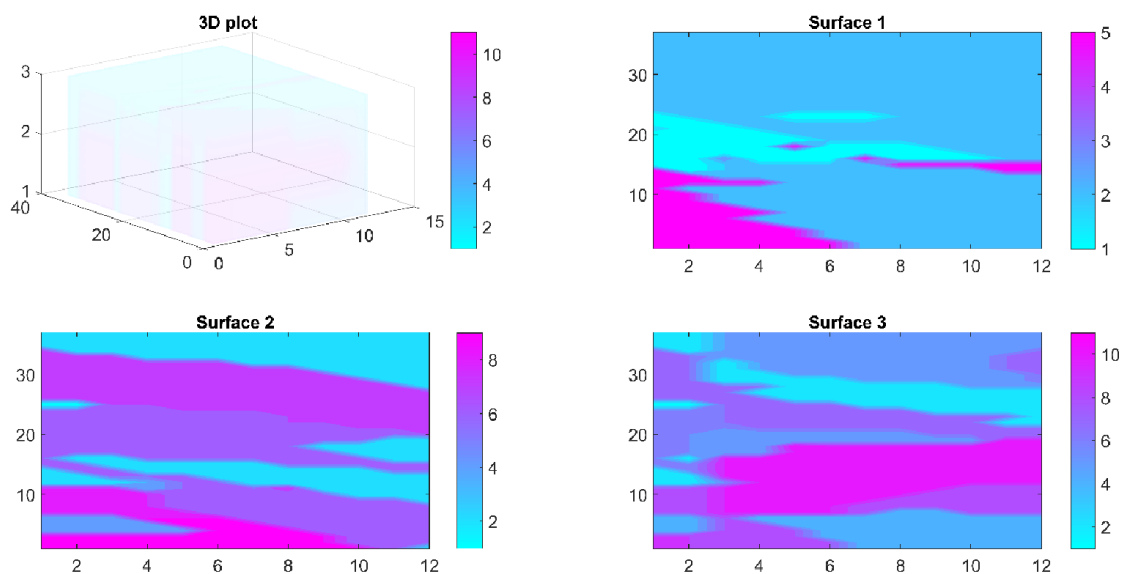


شکل ۵-۲: مدل سازی به روش جنگل های تصادفی. بالا چپ: توزیع غلظت سیانید در سطح دمپ باطله، بالا راست: توزیع غلظت سیانید در عمق ۱ متری، پایین چپ: توزیع غلظت سیانید در عمق ۲ متری، پایین راست: توزیع سه بعدی غلظت سیانید تا عمق ۲ متری.

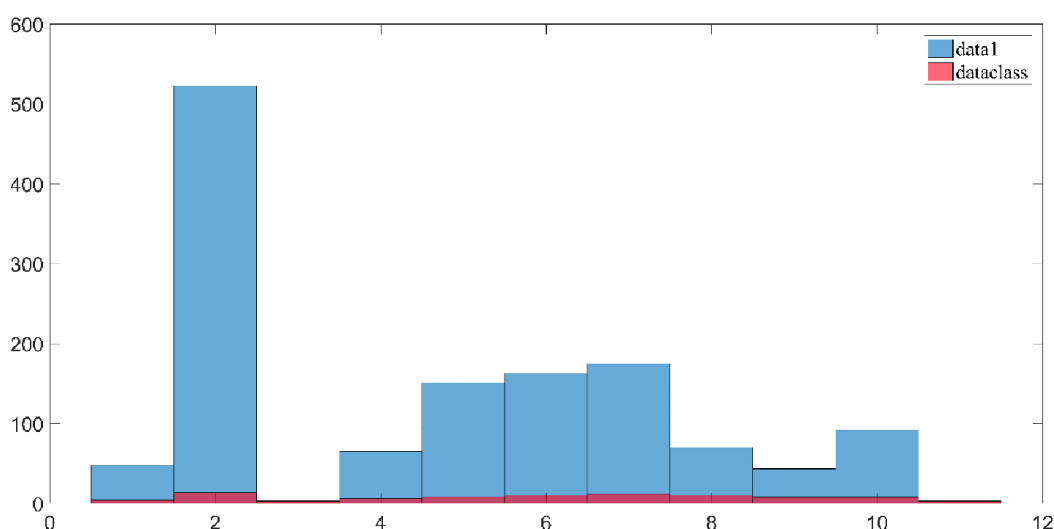
۵-۲-۲ نتایج مدل سازی با روش آنالیز تشخیص خطی (LDA)

نتایج حاصل از مدل سازی LDA در شکل ۵-۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مذکور مشاهده می شود در این مدل نیز همچون مدل جنگل های تصادفی، با افزایش عمق، تعداد کلاس های بالاتر که حاوی میزان بیشتری سیانید هستند، افزایش می یابد

مدل ارائه شده توسط روش آنالیز تشخیص خطی در سطح ۱، تغییرات را بین کلاس های ۱ تا ۵ بیان نموده است. همچنین این مدل تمام بلوک های تخمین زده شده متعلق به کلاس های ۱۰ و ۱۱ را در سطح ۳ قرار داده است. در شکل ۵-۴ توزیع بلوک های تخمین زده شده و بلوک های آموزش در یک تصویر نشان داده شده است. در این شکل، ستون های قرمز مربوط به بلوک های آموزش و ستون های آبی مربوط به بلوک های تخمین زده شده است.



شکل ۵-۳: مدل سازی به روش آنالیز تشخیص خطی. بالا چپ: توزیع سه بعدی غلظت سیانید تا عمق ۲ متری، بالا راست: توزیع غلظت سیانید در سطح دمپ باطله، پایین چپ: توزیع غلظت سیانید در عمق ۱ متری، پایین راست: توزیع غلظت سیانید در عمق ۲ متری.

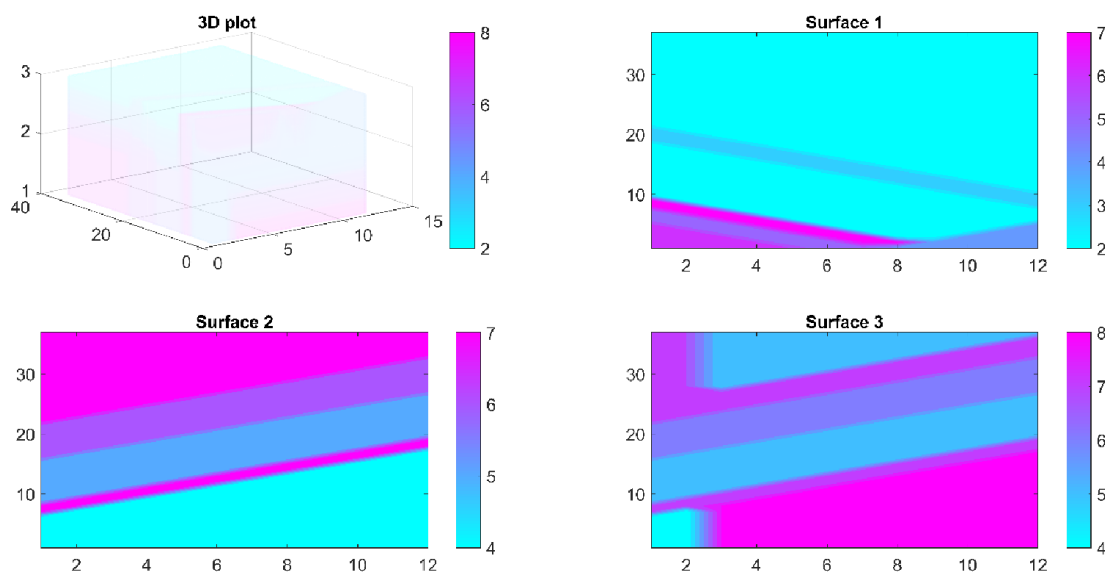


شکل ۵-۴: مقایسه هیستوگرام داده‌های آموزش و داده‌های تخمین زده شده با روش آنالیز تشخیص خطی.

همانطور که از شکل ۵-۴ مشهود است، این الگوریتم در پیش‌بینی کلاس‌های ۳ و ۱۱ با توجه به کمبود داده‌های آموزش نسبت به داده‌های دیگر در این کلاس‌ها ناتوان بوده است. همچنین با وجود اینکه تعداد کلاس‌های ۹ و ۱۰ در داده‌های آموزش برابر است، اما در داده‌های پیش‌بینی شده تعداد این دو کلاس تفاوت زیادی دارند. می‌توان نتیجه گرفت، این روش داده‌های پیش‌بینی شده‌ای که می‌بایست در کلاس ۱۱ قرار می‌گرفتند را در کلاس ۱۰ و داده‌های پیش‌بینی متعلق به کلاس ۳ را در کلاس ۲ قرار داده است. در واقع این روش پیش‌بینی به احتمال زیاد مقدار کمتری را نسبت به مقدار واقعی ارائه خواهد کرد.

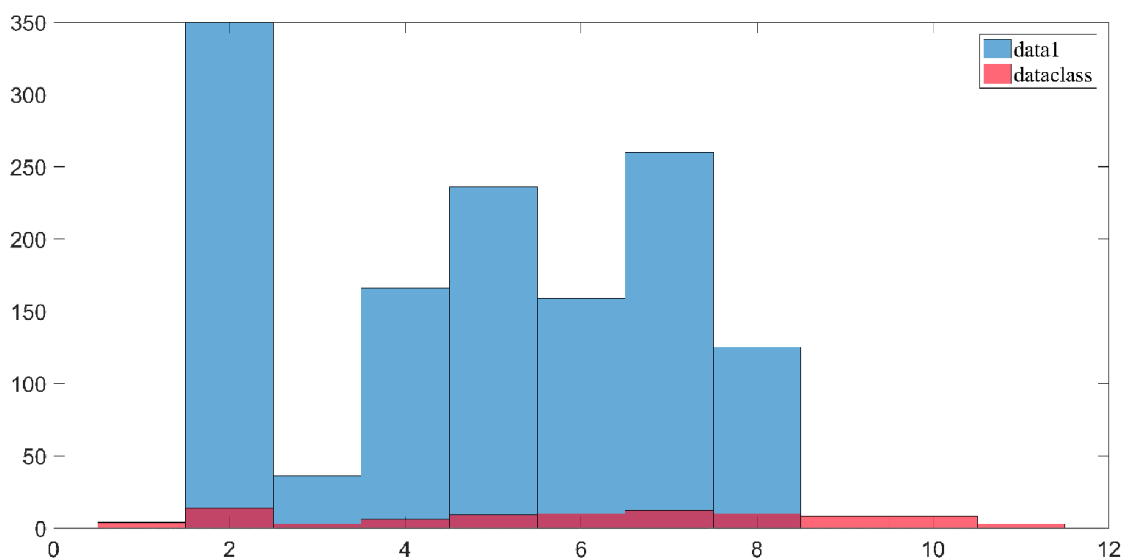
۵-۲-۳ نتایج مدل‌سازی با روش SVM

به طور معمول روش ماشین‌های بردار پشتیبانی در تعداد کلاس کمتر نتیجه مطلوبتری را ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از مدل‌سازی با این روش در شکل ۵-۵ نشان داده شده است. در شکل ۵-۶ مشخص است که این روش در کلاس‌بندی کلاس‌های ۱، ۹، ۱۰ و ۱۱ موفق نبوده است.



شکل ۵-۵: مدل سازی به روش ماشین های بردار پشتیبانی. بالا چپ: توزیع سه بعدی غلظت سیانید تا عمق ۲ متری، بالا راست: توزیع غلظت سیانید در سطح دمپ باطله، پایین چپ: توزیع غلظت سیانید در عمق ۱ متری، پایین راست: توزیع غلظت سیانید در عمق ۲ متری.

با مشخص کردن کلاس بندی داده های تست در مدل ارائه شده توسط این روش، مشخص شد مدل حاصل از این روش با وجود دقت مناسب برای کلاس های ۲ تا ۸ (۷۲٪ دقت) درمجموع کلاس بندی مناسبی ارائه نداده است. توزیع داده های آموزش و کلاس بندی صورت گرفته در این روش در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.



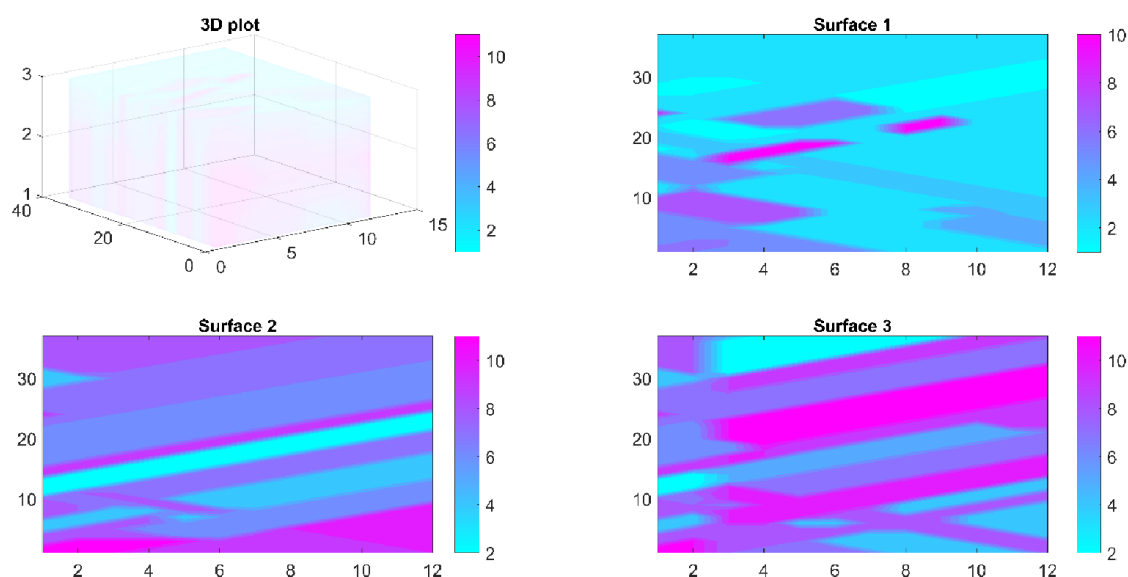
شکل ۵-۶: مقایسه هیستوگرام داده های آموزش و داده های تخمین زده شده با روش ماشین های بردار پشتیبان (کلاس ها در محور X و فراوانی در راستای محور Y).

در این الگوریتم بیشتر کلاس‌های پیش‌بینی شده در کلاس‌های ۴ تا ۸ قرار دارند. در واقع این الگوریتم غلظت بیشتر بلوک‌ها را نزدیک به غلظت میانه کل داده‌های در نظر گرفته است. این در حالی است که الگوریتم LDA اکثر بلوک‌های پیش‌بینی را به کلاس ۲، که در داده‌ها نیز دارای بیشترین تعداد مثال است، نسبت داده است. تا به اینجا می‌توان نتیجه گرفت هر دو روش LDA و SVM نیاز به داده‌های بیشتری برای مدل‌سازی بهتر دارند. بیان این نکته لازم است که در صورت بزرگتر بودن بردار ویژگی (معلوم بودن مشخصات بیشتر از فضای نمونه‌برداری) قطعاً این دو مدل نتایج به مراتب بهتری را ارائه خواهند کرد.

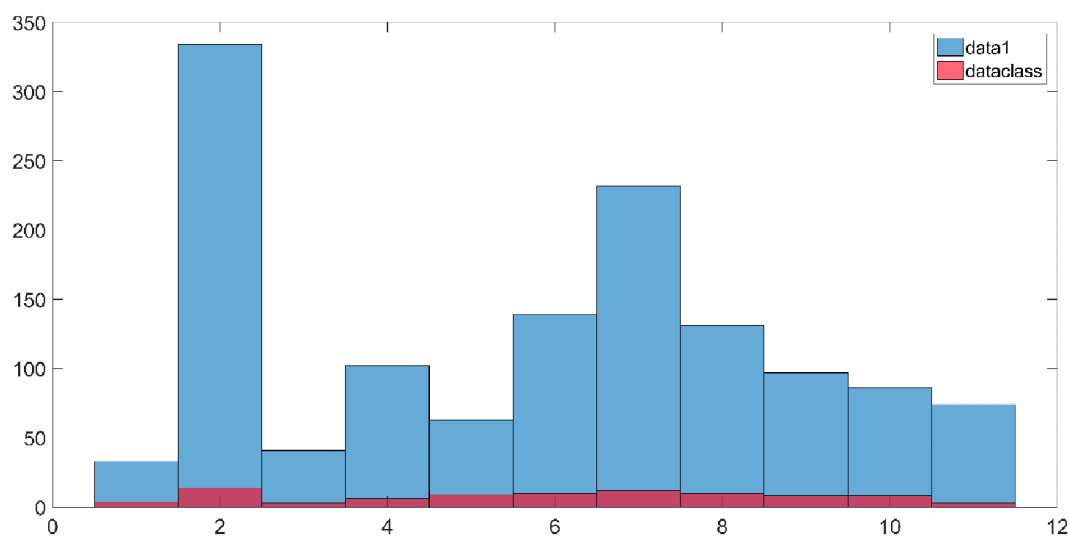
۵-۲-۴ نتایج مدل‌سازی با روش آدابوست

با توجه به مشکلات بیان شده در مدل‌سازی با روش‌های بیان شده در بالا، تصمیم گرفته شد از روش تقویتی آدابوست به همراه الگوریتم‌های کلاس‌بندی مختلف استفاده شود. با توجه به نتایج مختلف به دست آمده از همراه کردن این روش با الگوریتم‌های مختلف تنها به بیان بهترین نتیجه اکتفا می‌شود. نتیجه حاصل از الگوریتم آدابوست برای پیش‌بینی با روش KNN (الگوریتم بهینه‌شده نزدیکترین همسایگی، که K نشان‌دهنده تعداد همسایه‌ها برای استفاده در تخمین است) نتایج جالبی را در مدل به دست آمده، ارائه داده است. نکته جالب در این باره عدم توانایی کلاس‌بندی مناسب داده‌های آموزشی توسط روش KNN است، در صورتیکه پس از اعمال روش تقویتی آدابوست نتایج بهبود قابل ملاحظه‌ای نشان دادند. شکل ۵-۷ توزیع غلظت سیانور در کلاس‌های مختلف مدل‌سازی شده با الگوریتم آدابوست را نشان می‌دهد.

در مدل‌سازی با این الگوریتم در همه سطوح نشان داده شده در شکل ۵-۷ کلاس‌های مختلف کلاس‌بندی حضور دارند. برای درک میزان توانایی این روش در پیش‌بینی میزان سیانید موجود در بلوک‌های مختلف استفاده از هیستوگرام توزیع بلوک‌ها آموزش و بلوک‌های پیش‌بینی شده می‌تواند کمک شایانی کند.



شکل ۵-۷: مدل سازی به روش ماشین های بردار پشتیبان، بالا چپ: توزیع سه بعدی غلظت سیانید تا عمق ۲ متری، بالا راست: توزیع غلظت سیانید در سطح دمپ باطله، پایین چپ: توزیع غلظت سیانید در عمق ۱ متری، پایین راست: توزیع غلظت سیانید در عمق ۲ متری.



شکل ۵-۸: مقایسه هیستوگرام داده های آموزش و داده های تخمین زده شده با روش آدابوست.

همانطور که در شکل ۵-۸ معلوم است، این روش نسبت به روش های قبلی ذکر شده، توانایی بهتری در استخراج الگوی اولیه از خود نشان داده است. البته برای پیشنهاد مدل مناسب به دست آوردن دقت کلی داده های تست مورد استفاده قرار گرفته است. باید توجه داشت که با توجه به یکسان بودن طول بازه کلاس ها، تعداد داده تست که کلاس آن ها درست پیش بینی شده است، می تواند شاخص مناسبی برای انتخاب روش باشد. مقایسه تعداد کلاس با پیش بینی درست برای ۴ روش آدابوست، آنالیز

تشخیص خطی، جنگل‌های تصادفی و ماشین بردار پشتیبان با استفاده از داده‌های آزمایش در جدول ۱-۵ آورده شده است.

جدول ۱-۵: تعیین میزان دقت روش‌های مختلف.

روش	تعداد کلاس‌های با پیش‌بینی درست در داده‌ها تست	دقت (تعداد کلاس‌های تست با پیش‌بینی درست تقسیم بر تعداد داده‌های تست) (%)
ADABOOST	۲۶	۸۹
RF	۱۸	۶۲
LDA	۲۳	۷۹
SVM	۱۵	۵۱

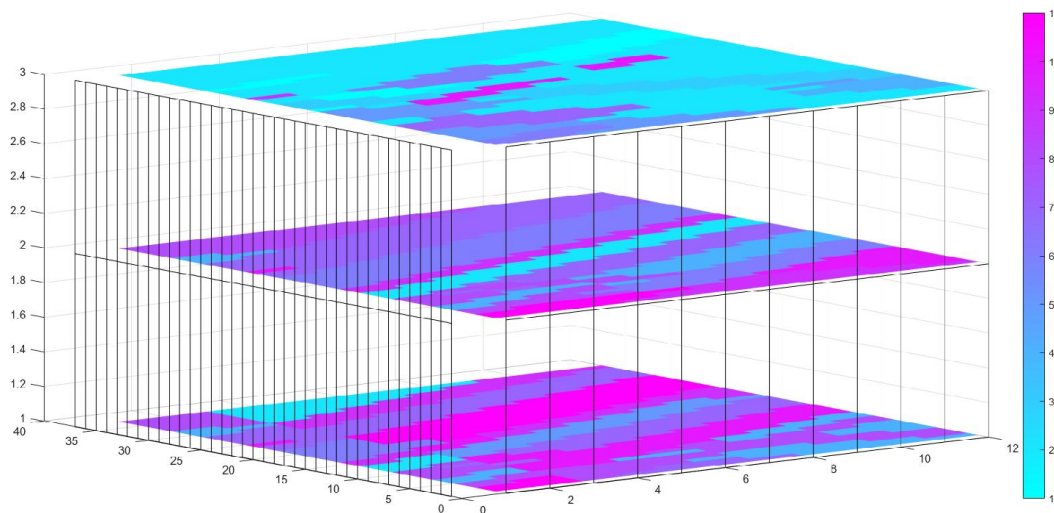
برای انتخاب روش مناسب مدل‌سازی و تحلیل استفاده از نتایج داده‌های تست امری ضروری است. برای این امر نتایج بدست آمده از هر مدل‌سازی برای بلوک‌های متعلق به داده‌های تست با کلاس‌های واقعی آن‌ها مقایسه می‌شود. جدول ۱-۵ بیانگر دقت بسیار مناسب روش آدابوست است. به همین دلیل این روش به عنوان روش برتر برای مدل‌سازی انتخاب شده است. باید توجه داشت که در میان داده‌های آزمایش داده‌های کلاس ۱ و ۳ دارای سهم کمتری بوده و این امر باعث شده با وجود اینکه روش LDA در تشکیل این کلاس‌ها ناتوان است، منجر به کاهش دقت این روش به صورت چشم‌گیری نشده است.

۳-۵ تحلیل نتایج مدل‌سازی

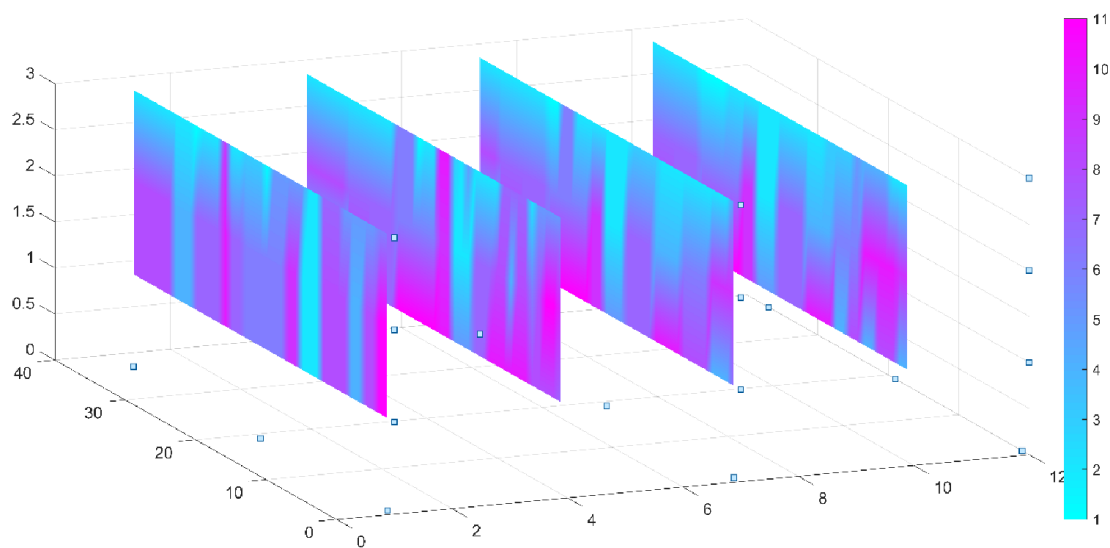
با انتخاب روش آدابوست به عنوان الگوریتم برتر برای انجام مدل‌سازی، نتایج حاصل از این مدل‌سازی برای تخمین میزان سیانید و مقدار هزینه تصفیه مورد استفاده قرار گرفته است. برای برخورداری از درک مناسب‌تر از تغییرات در توزیع سیانید در دو متری بالای دمپ باطله از برش‌هایی در مقاطع مختلف استفاده شده است. در شکل‌های ۵-۹ تا ۵-۱۵ نحوه تغییرات در سه دید مختلف دمپ باطله با برش‌های مختلف نشان داده شده است.

در شکل ۵-۹ می‌توان مشاهده کرد که بیشتر کلاس‌های بالاتر (دارای سیانید بیشتر) در سطح ۲ و ۳ قرار داشته و سطح ۱ را بیشتر کلاس‌های ۱ تا ۵ تشکیل داده‌اند. با توجه به اینکه مقدار تغییرات

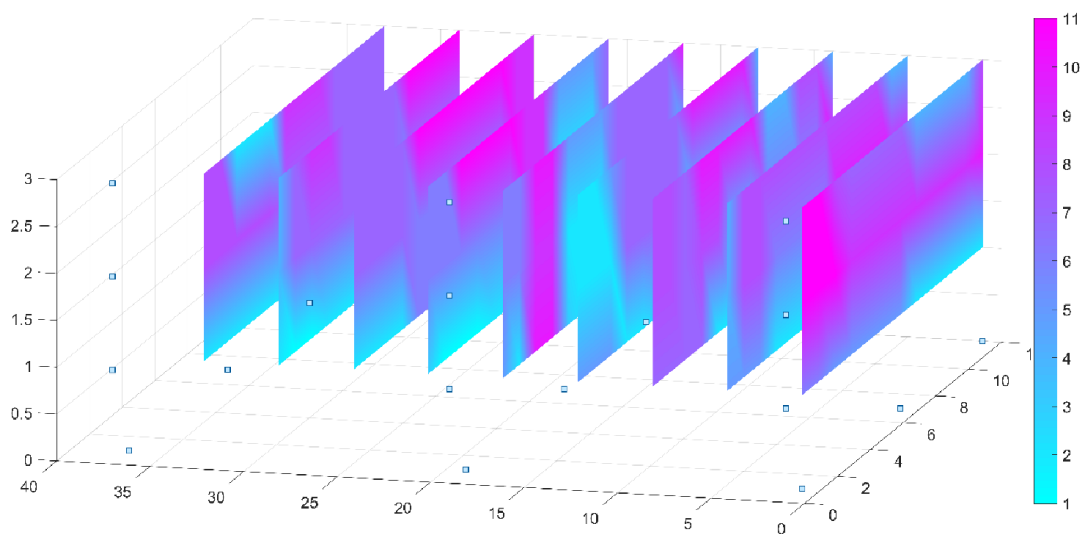
سیانید در عمق بیشتر از ۲ متری بسیار ناچیز است، می‌توان نتیجه گرفت، به طور کلی با افزایش عمق، میزان سیانید تا عمق دو متری افزایش یافته و پس از آن به مقداری تقریباً ثابت می‌رسد. در واقع اکثر بلوک‌های مربوط به عمق ۲ تا ۱۵ متری دمپ باطله متعلق به کلاس ۱۰ هستند. شکل ۵-۱۰ و شکل ۱۱-۵ توزیع سیانید در دو جهت عرضی را نشان داده‌اند.



شکل ۵-۹: تصویر مقاطع افقی از دمپ باطله در الگوریتم آدابوست.



شکل ۵-۱۰: تصویر مقاطع عرضی از دمپ باطله در الگوریتم آدابوست.

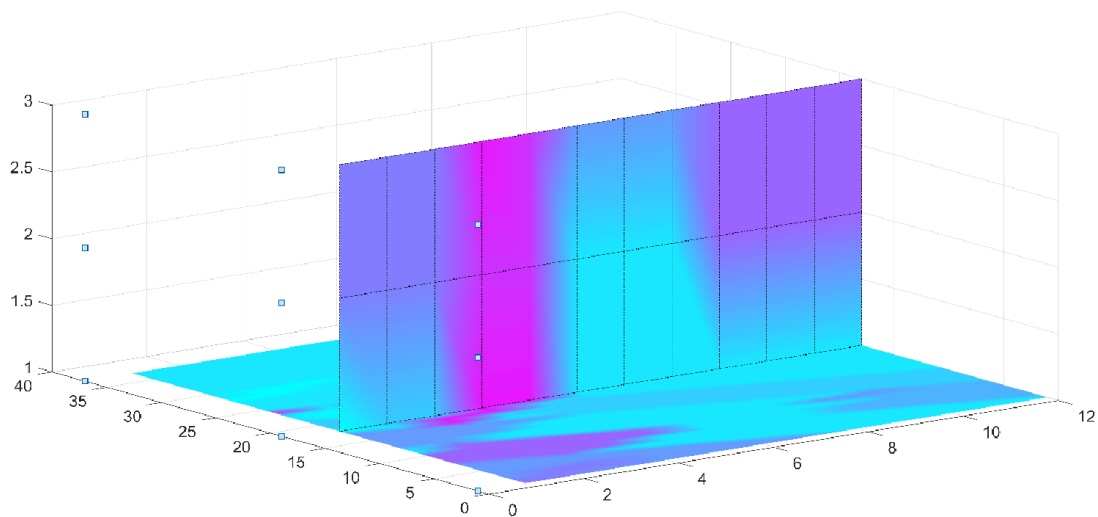


شکل ۵-۱۱: تصویر مقاطع عرضی از دمپ باطله در الگوریتم آدابوست.

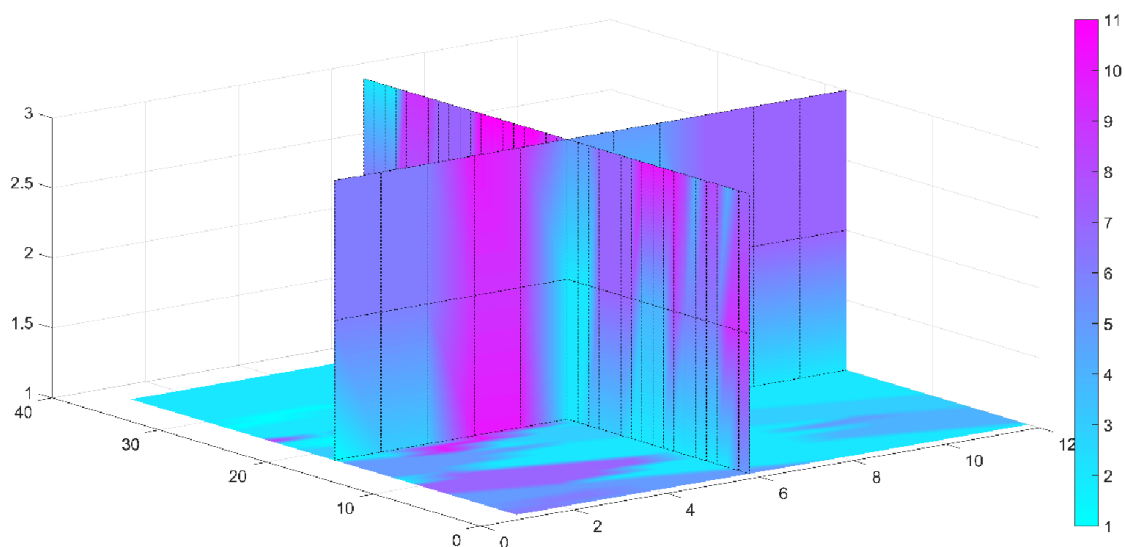
بررسی تغییرات سیانید در جهت‌های مختلف و با وضوح بیشتر از الزامات درک فرآیند حاکم بر

دمپ باطله است. در راستای این مسئله شکل‌های دیگر تغییرات در فضای سه‌بعدی در شکل ۵-۱۲

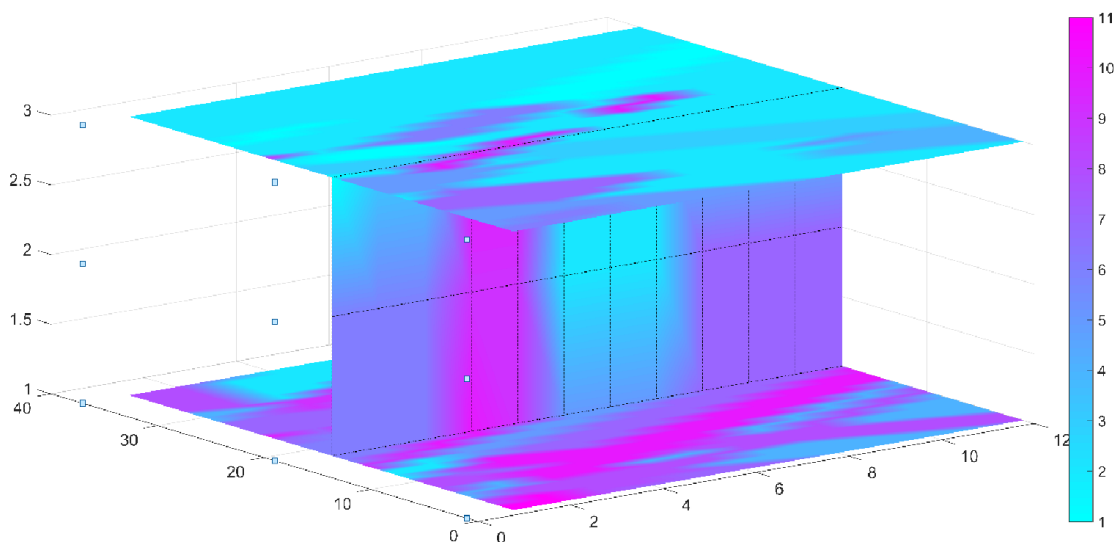
تاشکل ۵-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: مقطع عرضی دمپ باطله.

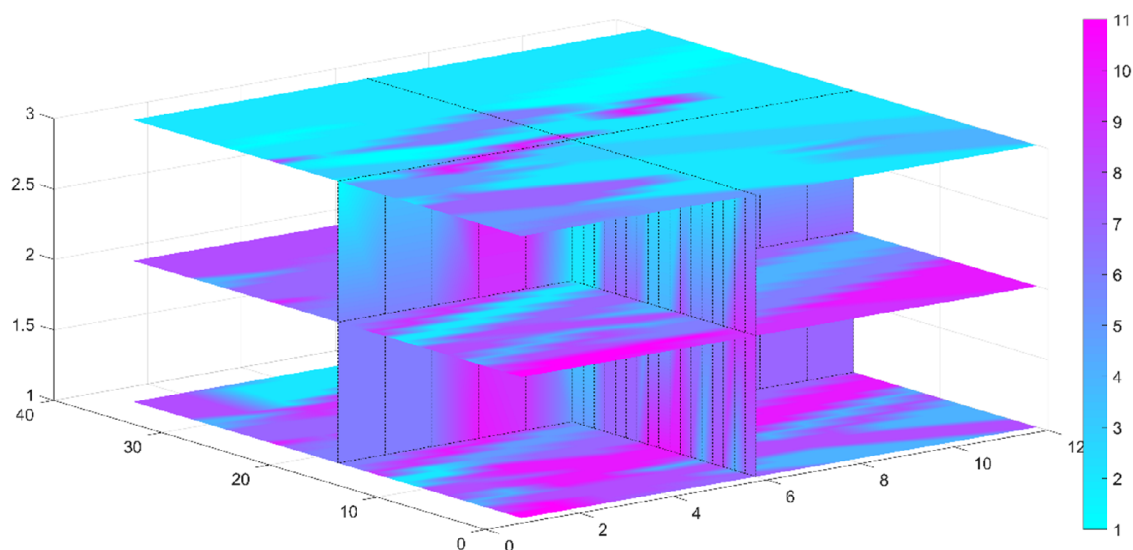


شکل ۵-۱۳: دو مقطع عرضی متقاطع در دمپ باطله.



شکل ۵-۱۴: نمای چند مقطعی دمپ باطله.

با توجه به شکل ۵-۹ می‌توان حضور کلاس‌های ۱۰ و ۱۱ را در سطح ۱ مشاهده کرد. این موضوع نشان‌دهنده ایجاد تغییرات در دمپ باطله در سطوح مختلف است. در واقع نمی‌توان میزان تغییرات زیاد در سطح دمپ را مربوط به فعالیت کارخانه فرآوری نسبت داد. عوامل زیر به عنوان اصلی‌ترین فرآیندهای حاضر در تغییرات شناسایی شده‌اند:



شکل ۵-۱۵: نمای چندمقطعی دمپ باطله.

- افزایش pH خاک به دلیل حضور کانی‌های سولفیدی و اکسیداسیون آن‌ها در حضور آب، اکسیژن و احتمالاً باکتری‌های موجود سبب آزاد شدن سیانید موجود در کمپلکس‌های ضعیف به فاز مایع شده و هم‌چنین می‌تواند موجب بخار شدن سیانید موجود در خاک شود. هرچه به سطح نزدیک‌تر شویم با توجه به افزایش سطح آزاد میزان تبخیر افزایش می‌یابد. اگر دمپ باطله را به صورت المان‌های مجزا در نظر گیریم، همین فرآیند در المان دوم سطح با کاهش نرخ تبخیر اتفاق خواهد افتاد. در حقیقت با افزایش عمق سرعت بخار شدن سیانید به دلیل دوری از سطح آزاد، کاهش می‌یابد تا اینکه در عمقی به بعد دیگر تبخیری صورت نمی‌گیرد.
- اسیدی شدن محیط و تشکیل جریانات اسیدی موجود در دمپ باطله، هم‌چنین می‌تواند سبب حرکت سیانید به سمت پایین در فاز مایع شود. این فرآیند نیز ابتدا از المان‌های بالایی سطح به سمت المان‌های پایین سطح تا زمانی که المان پایین اشباع شود اتفاق می‌افتد. به این دلیل نرخ تغییرات سیانید در بالای دمپ باطله دارای سرعت بیشتری است.
- با گذشت زمان و قرار گرفتن دمپ باطله در مجاورت هوا و آب‌های جوی حاصل از باران اکسیداسیون طبیعی مقدار زیادی از کمپلکس‌های ضعیف‌تر سیانید نظیر هیدروژن سیانید را تجزیه کرده و از این مواد کمپلکس‌های پایدارتر ایجاد می‌کند. سالانه مقدار زیادی از سیانید آزاد در دمپ

از این طریق تصفیه طبیعی شده و از میزان خطر آن به مقدار زیادی کاسته می‌شود.

همانطور که در شکل ۵-۱۵ می‌توان مشاهده کرد، در صورتی که در بلوک‌های بالایی تبخیر سیانید صورت نگیرد، که این امر بیانگر غیر اسیدی بودن آن بلوک است، تغییرات در راستای عمودی این بلوک بسیار ناچیز است. همچنین تفکیک میزان تأثیر هر یک از عوامل ذکر شده، امری زمان‌بر و دشوار است.

۴-۵ تخمین تناژ سیانید موجود در دمپ باطله با استفاده از مدل‌سازی آدابوست

با توجه به چگالی خاک، تعداد بلوک‌های تخمین زده شده، اندازه بلوک‌ها و غلظت سیانید در هر بلوک به راحتی می‌توان مقدار سیانید موجود در قسمت دمپ باطله که مدل‌سازی شده است را تخمین زد. نتایج تخمین در جدول ۵-۲ ارائه شده است. در این جدول C_{min} نشان‌دهنده حد پایین تخمین و C_{max} نشان‌دهنده حد بالای تخمین است. ابعاد بلوک‌ها در این تخمین نیز $۷۵ \times ۲ \times ۲$ است.

جدول ۵-۲: تخمین سیانید موجود در دمپ مدل‌سازی شده.

شماره کلاس	تعداد بلوک‌ها	C_{min} (ppm)	C_{avg} (ppm)	C_{max} (ppm)	مقدار کل سیانید		
					Max	avg	min
۱	۳۳	۷۰۰	۷۵۰	۸۰۰	۱۱۰۸۸۰	۱۰۳۹۵۰	۹۷۰۲۰
۲	۳۳۴	۸۰۰	۸۵۰	۹۰۰	۱۲۶۲۵۲۰	۱۱۹۲۳۸۰	۱۱۲۲۲۴۰
۳	۴۱	۹۰۰	۹۵۰	۱۰۰۰	۱۷۲۲۰۰	۱۶۳۵۹۰	۱۵۴۹۸۰
۴	۱۰۲	۱۰۰۰	۱۰۵۰	۱۱۰۰	۴۷۱۲۴۰	۴۴۹۸۲۰	۴۲۸۴۰۰
۵	۶۳	۱۱۰۰	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۳۱۷۵۲۰	۳۰۴۲۹۰	۲۹۱۰۶۰
۶	۱۳۹	۱۲۰۰	۱۲۵۰	۱۳۰۰	۷۵۸۹۴۰	۷۲۹۷۵۰	۷۰۰۵۶۰
۷	۲۳۲	۱۳۰۰	۱۳۵۰	۱۴۰۰	۱۳۶۴۱۶۰	۱۳۱۵۴۴۰	۱۲۶۶۷۲۰
۸	۱۳۱	۱۴۰۰	۱۴۵۰	۱۵۰۰	۸۲۵۳۰۰	۷۹۷۷۹۰	۷۷۰۲۸۰
۹	۹۷	۱۵۰۰	۱۵۵۰	۱۶۰۰	۶۵۱۸۴۰	۶۳۱۴۷۰	۶۱۱۱۰۰
۱۰	۸۶	۱۶۰۰	۱۶۵۰	۱۷۰۰	۶۱۴۰۴۰	۵۹۵۹۸۰	۵۷۷۹۲۰
۱۱	۷۴	۱۷۰۰	۱۷۵۰	۱۸۰۰	۵۵۹۴۴۰	۵۴۳۹۰۰	۵۲۸۳۶۰
مقدار کل (گرم)					۷۱۰۸۰۸۰	۶۸۲۸۳۶۰	۶۵۴۸۶۴۰

اگر فرض شود که در روز اول خارج شدن دمپ باطله از مدار کارخانه (۱۰ سال پیش) کل دمپ دارای

غلظت با تغییرات ناچیز بوده است، در آن روز میانگین میزان سیانید موجود در ۲ متر بالای دمپ به صورت زیر

محاسبه خواهد شد، که در آن N_b نشان‌دهنده تعداد بلوک‌ها، C_{1ave} غلظت سیانید اولیه دمپ، D چگالی خاک

و V بیان‌کننده حجم هر بلوک است.

$$N_b \times C_{1ave} \times D \times V = 8951040(gr)$$

$$1332 \times 1600 \times 1.4 \times 3 = 8951040(gr)$$

بنابراین با توجه به مقدار متوسط سیانید موجود در دمپ می توان میزان سیانید جابه جا شد طی

۱۰ سال گذشته را محاسبه نمود:

مقدار تخمین زده شده کنونی - مقدار اولیه = تناژ تغییرات سیانید

$$8951040 - 6828360 = 2961840(gr)$$

اینک با تقسیم مقدار بالا بر ۱۰ سال، میزان سیانید جابه جا شده در هر سال به راحتی محاسبه

می شود. میزان سیانید جابه جا شده در روز نیز در پایین محاسبه شده است:

$$\frac{2961840}{10} = 212268 \left(\frac{gr}{year}\right)$$

$$\frac{212268}{365} = 581.15 \left(\frac{gr}{day}\right)$$

باید توجه داشت تعیین سهم هر عامل در این میزان سیانید جابه جا شده در دمپ کار مشکلی

است. علاوه بر این باید سهم باد و گرد و خاک را نیز در جابه جایی سیانید در نظر گرفت. با توجه به

نتایج آزمایش ها در فصل سوم، می توان سهم سیانید آزاد و یا سیانید کمپلکس های ضعیف در هر بلوک

و در نهایت در کل دمپ باطله را به دست آورد. طبق نتایج آزمایش ۶۰ تا ۶۵٪ از سیانید محاسبه شده

در هر بلوک سیانید در گیر در کمپلکس های پیچیده است. بنابراین مقدار سیانید آزاد مقادیر بالا به شرح

زیر است:

$$212268 \times 0.4 = 84907.2 \left(\frac{gr}{year}\right)$$

$$581.15 \times 0.4 = 232.46 \left(\frac{gr}{day}\right)$$

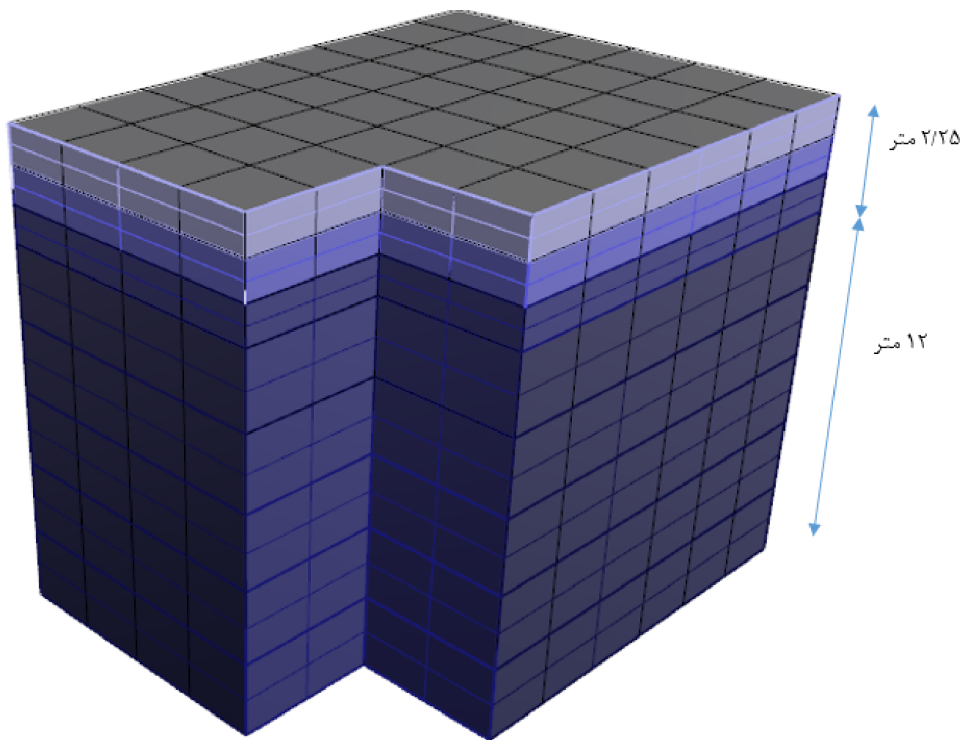
با تمام این تفاسیر حتی اگر درصد کمی از این مقدار در روز به صورت بخار سیانید وارد جو شود

می تواند خطری بسیار جدی برای محیط زیست به وجود آورد. با توجه به نتایج تحقیق دولتی (Doulati,

2003) در تمام مراحل پیشین انجام پژوهش، تحقیق بر سطح بالایی دمپ انجام شد. برای محاسبه

هزینه تصفیه و تصمیمات درست مدیریتی، باید کل دمپ باطله مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور

در ادامه به بررسی قسمت پایین دمپ پرداخته خواهد شد. با توجه به مقدار محاسبه شده ۱۶۰۰ میلی گرم بر لیتر سیانید در اعماق دمپ و با توجه به شکل ۵-۱۶ که نمای کلی دمپ باطله است، میزان کل سیانید دمپ محاسبه می شود.



شکل ۵-۱۶: نمای کلی دمپ باطله (غلظت از بالا به پایین افزایش یافته است).

میزان سیانید موجود در کل دمپ باطله در جدول ۵-۳ محاسبه شده است.

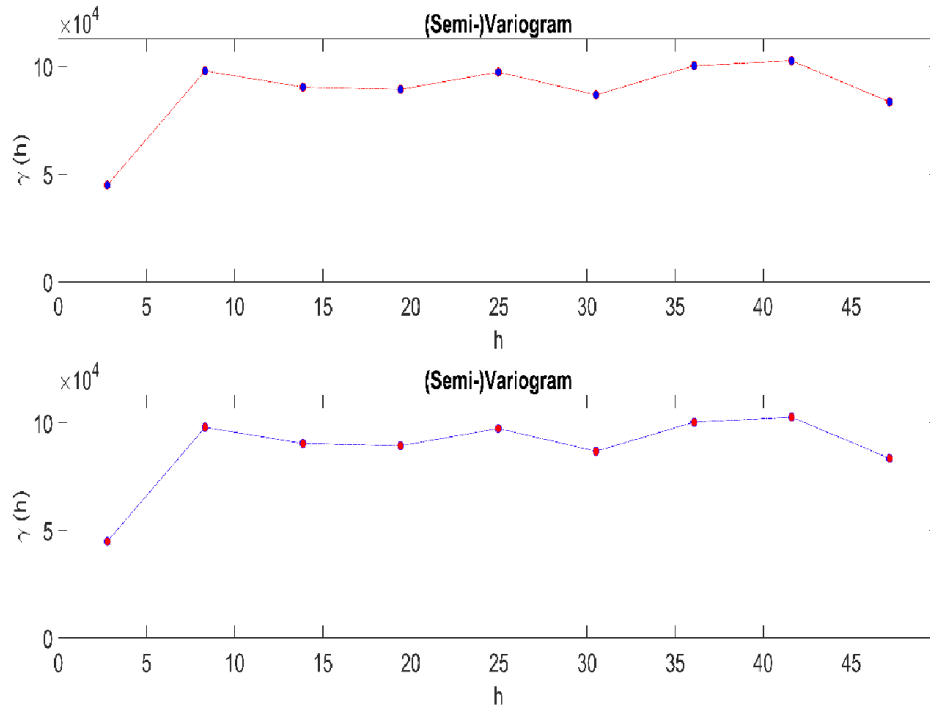
جدول ۵-۳: مقدار سیانید موجود در دمپ بر اساس مدل سازی آدابوست.

حداکثر گرم سیانید	میانگین گرم سیانید	حداقل گرم سیانید	
۷۱۰۸۰۸۰	۶۸۲۸۳۶۰	۶۵۴۸۶۴۰	از سطح تا عمق ۲/۲۵ متری
۴۶۴۴۸۶۴۰	۴۴۹۹۷۱۲۰	۴۳۵۴۵۶۰۰	از عمق ۲/۲۵ تا کف دمپ
۵۳۵۵۶۷۲۰	۵۱۸۲۵۴۸۰	۵۰۰۹۴۲۴۰	کل

۵-۵ بررسی همگنی و شعاع تأثیر محیط

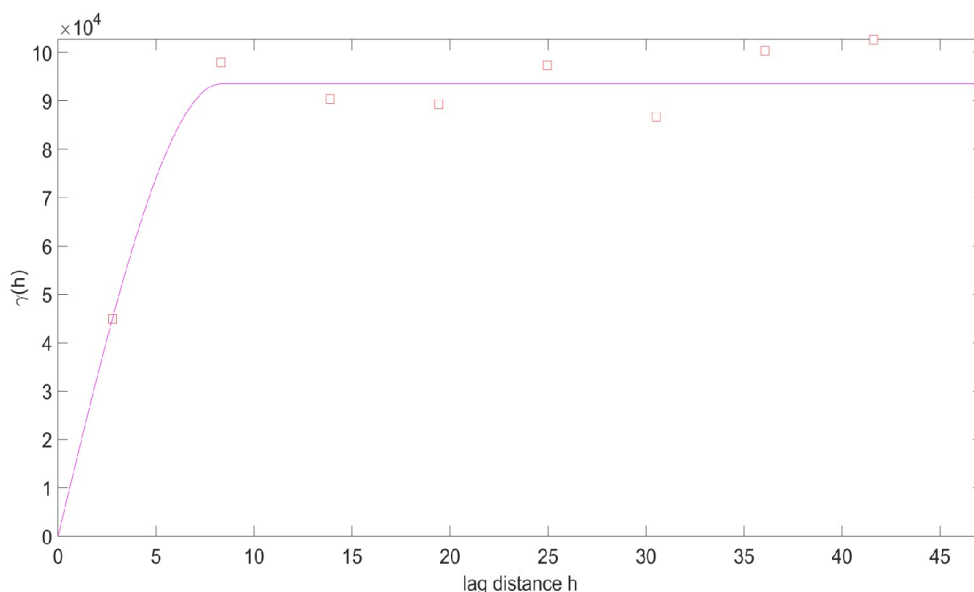
شکل ۵-۱۷ واریوگرام به دست آمده در دو راستای مختلف را نشان می دهند. تطابق این دو واریوگرام نشان دهنده همگن بودن محیط است. واریوگرام های به دست آمده در راستاهای ۳۰ و ۴۵ درجه نیز از همین روند تبعیت می کنند. در نتیجه می توان محیط را همگن در نظر گرفته و استفاده از

روش‌های کلاس‌بندی که ایزوتروپی و آنیزوتروپی را در نظر نمی‌گیرند (برای محیط‌های همگن مناسب هستند) در این داده‌ها ایجاد خطا نمی‌کند.



شکل ۵-۱۷: واریوگرام‌های برازش‌نشده در دو راستای مختلف.

با برازش واریوگرام تجربی و نتایج به دست آمده از آن می‌توان شعاع تأثیر و پارامترهای دیگر مربوط به محیط را به دست آورد. واریوگرام تجربی حاصل داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده و نتایج حاصل از آن نیز در جدول ۴-۵ بیان شده است.



شکل ۵-۱۸: واریوگرام تجربی برازش شده بر توزیع سیانید در دمپ باطله طلای موته.

جدول ۴-۵: نتایج به دست آمده از واریوگرام تجربی.

R-square	نوع مدل برازش	مدل برازش	اثر قطعه‌ای	سقف واریوگرام	شعاع تأثیر
۰/۸۶۲۱	سقف‌دار	کروی	$2/3 \times 10^{-7}$	۹۳۵۵۶	۸/۳۴

با توجه به جدول ۴-۵ نتایج زیر حاصل می‌شود:

- مقدار اثر قطعه‌ای بسیار به صفر نزدیک بوده که این امر نشان‌دهنده ناچیز بودن خطاهای تجربی (خطاهای موثر در نمونه‌برداری، آماده‌سازی و آنالیز) است.
- فاصله نمونه‌برداری حدود ۶ متر بوده که با توجه به نتایج واریوگرام این فاصله قابل قبول است.
- مقدار ناچیز اثر قطعه‌ای نشان از مناسب بودن فواصل نمونه‌برداری است.
- شیب زیاد واریوگرام در نزدیکی مبدأ دلالت بر ناپیوستگی متغیر ناحیه‌ای دارد.
- برازش با مدل کروی بوده که این مدل از مدل‌های دارای سقف بوده که نشان‌دهنده عدم وجود روند در مدل به دست آمده است.
- مقدار R-square، نشان می‌دهد این مدل یک مدل قابل قبول است.
- شعاع تأثیر نشان می‌دهد که در مدل‌سازی زمین‌آماري هر بلوک میانی تقریباً از ۸ نمونه‌ی اطراف خود برای تخمین استفاده می‌کند. البته این مقدار به محل بلوک مورد تخمین بستگی دارد اما

اکثر بلوک‌ها با توجه به فاصله حدوداً ۶ متری نقاط نمونه‌برداری از یکدیگر از ۸-۱۰ نمونه اطراف خود برای تخمین استفاده می‌کند.

با توجه به نتایج به دست آمده که بیان‌گر همگن بودن محیط و k قابل قبول در روش آدابوست است، با اطمینان بیشتری می‌توان تخمین صورت گرفته توسط این روش را قبول کرده و هزینه‌های مربوط به تصفیه را محاسبه کرد.

۵-۶ هزینه تصفیه دمپ باطله

با توجه به نکات ذکر شده، تصفیه دمپ‌های باطله طلا امری ضروری است. مشکلات سلامتی حاصل از سیانید بیان شده در بخش ۳-۳ اهمیت پرداختن به این ماده خطرناک و تصفیه آن از محیط زیست را نشان می‌دهد. قوانین نامناسب در کشور ایران سبب بی‌توجهی به مشکلات زیست محیطی حاصل از فعالیت‌های معدنی شده است. چشم‌پوشی از این مخاطرات می‌تواند هزینه‌های بسیار سنگینی در آینده به وجود آورد.

۵-۶-۱ بررسی فنی اقتصادی تصفیه سیانید

۵-۶-۱-۱ هزینه‌های تصفیه

انتخاب نوع اکسیدکننده تابع شرایط مختلفی بوده که شرایط اقتصادی از اهم عوامل انتخاب است. محاسبه مقدار مصرف اکسیدکننده‌ها برای رساندن سیانید ۴۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به زیر حد مجاز به ترتیب برای هیپوکلریت سدیم، هیپوکلریت کلسیم، هیدروژن پراکسید، هیدروژن پراکسید + مس (II) و فنتون برابر ۱۳۲، ۹۰، ۴۷۸، ۱۰۹ و ۱۰۰ گرم بر لیتر است. قیمت هر لیتر از اکسیدکننده‌ها به جز هیپوکلریت کلسیم برابر با ۱۰ دلار بوده اما قیمت هیپوکلریت کلسیم ۱۲ دلار است. همچنین قیمت کاتالیزگرهای مس و آهن دوز فیتی ۱۰۰ دلار بر کیلوگرم است (کامرانی، ۱۳۹۶). با این احتساب هزینه تصفیه سیانید در دمپ باطله با مواد مختلف در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۵: هزینه‌های تصفیه سیانید موجود در دمپ باطله با اکسیدکننده‌های مختلف.

اکسیدکننده	هزینه تصفیه بر اساس حداکثر سیانید تخمینی (میلیون دلار)	هزینه تصفیه بر اساس میانگین سیانید تخمینی (میلیون دلار)	هزینه تصفیه بر اساس حداقل سیانید تخمینی (میلیون دلار)
H_2O_2	۸/۱	۷/۸۴	۷/۵۸
$H_2O_2 + Cu(II)$	۲/۴۸	۲/۴۰	۲/۳۲
Fenton	۴/۳۱	۴/۱۷	۴/۰۳
$NaClO$	۲/۰۹	۲/۰۲	۱/۹۶
$Ca(ClO)_2$	۱/۸۳	۱/۷۷	۱/۷۱

جدول ۵-۵ هیپوکلریت کلسیم را اقتصادی‌ترین اکسیدکننده برای تصفیه دمپ معرفی کرده است. توجه به این نکته که تنها هزینه تصفیه مهم نبوده و با توجه به شرایط دمپ باید اکسیدکننده‌ی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. باید در نظر داشت هزینه‌های محاسبه شده مربوط به تصفیه کل سیانید موجود در خاک بوده، در حالیکه می‌توان از تصفیه بخشی از ترکیبات سیانیدها در کمپلکس‌های فلزی، در صورتی که مقدار pH محیط تحت کنترل باشد، صرف‌نظر کرد.

۵-۶-۱-۲ عناصر نادر خاکی و عناصر گران‌قیمت

وجود عناصر نادر خاکی در دمپ باطله معادن، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران و واحدهای اقتصادی بوده است. در پژوهش حاضر تخمینی از عناصر نادر دمپ باطله انجام خواهد گرفت. در صورت اقتصادی بودن استحصال این عناصر می‌توان از سود حاصل از فرآوری عناصر گران‌قیمت موجود در دمپ، بخشی از هزینه‌های تصفیه دمپ را تأمین کرد. با توجه به محدودیت‌های هزینه‌ای پایان‌نامه و عدم حمایت شرکت‌های معدنی در بخش مالی، تخمین محتوای عناصر گران‌قیمت و نادر باطله به صورت تخمین کلی با توجه به میانگین نمونه‌های ارسالی برای آنالیز (شامل ۴ نمونه برای آنالیز ۵۵ عنصری و ۱۴ نمونه شامل آنالیز طلا) صورت گرفت. این روش گرچه از دقت مناسبی برای سرمایه‌گذاری در این بخش برخوردار نیست اما می‌تواند یک دید کلی به مدیران بخش محیط‌زیست داده و در صورت ارائه نتایج مثبت مدیران معدن را به درآمد حاصل از عناصر گران‌قدر امیدوار و آنان را برای انجام روش‌های دقیق‌تر ترغیب نماید.

بر اساس مطالعات صورت گرفته در این زمینه، برای اقتصادی بودن استحصال این عناصر، باید جمع عیارهای مربوط به آن‌ها در بهترین حالت (اگر عناصر نادر همراه کانی‌های رسی قرار گیرند، که در این حالت با یک لیچ ساده می‌توان آن‌ها را استحصال کرد) باید از ۵۰۰ گرم بر تن بیشتر باشد. در جدول ۶-۵، نتایج حاصل از آنالیزها به صورت میانگین بیان شده و در پایان مجموع عیار عناصر نادر محاسبه شده است. با توجه به نتایج مربوط به جدول ۶-۵، استحصال عناصر نادر خاکی در این دمپ باطله فاقد صرفه اقتصادی است.

حضور عناصر گران قیمت نیز می‌تواند به عنوان یک پارامتر مثبت در زمینه اقتصادی مربوط به دمپ باطله مورد نظر باشد. برای تعیین غنی‌شدگی یک عنصر در دمپ باطله، باید غلظت آن در خاک حداقل ۱۵ برابر فراوانی پوستگی آن باشد. با استفاده از

جدول ۷-۵ می‌توان عناصر غنی‌شده در خاک را تعیین نمود.

جدول ۶-۵: میانگین عیار عناصر نادر موجود در باطله معدن طلای موته.

عناصر نادر خاکی (REE)	علامت اختصاری	میانگین (ppm)
ایتریم	Yb	1.03
ایتریم	Y	10.65
تولیم	Tm	0.19
تریم	Tb	0.57
اسکاندیم	Sc	13.75
لانتان	La	30.50
سریم	Ce	58.75
پرازئودیمیم	Pr	7.15
نئودیمیم	Nd	28.05
ساماریم	Sm	5.53
یورپیم	Eu	1.11
گادولینیم	Gd	4.10
دیسپروزیوم	Dy	3.14
اریم	Er	1.53
لوتتیم	Lu	0.11
مجموع:		166.16

جدول ۵-۷: عیار عناصر گران قیمت موجود در دمپ باطله.

عنصر	غلظت در پوسته زمین (ppm)	میانگین غلظت در نمونه ها (ppm)
زیر کونیم (Zr)	190	20.25
روی (Zn)	75	64.25
تنگستن (W)	160.6	20.875
وانادیم (V)	160	105.5
اورانیوم (U)	1.8	2.875
تالیوم (Tl)	0.6	0.1475
تیتانیوم (Ti)	5600	4285.75
توریم (Th)	12	8.45
تلوریم (Te)	0.005	1.5075
تانтал (Ta)	2	0.765

با توجه به نتایج آنالیزها، تنها تلوریم دارای غنی شدگی در خاک بوده و عناصر دیگر فاقد ارزش

سرمایه گذاری هستند. جدول ۵-۶ و

جدول ۵-۷، این فرضیه را که می توان با استحصال عناصر نادر و گران قیمت موجود در دمپ

سهمی از هزینه های تصفیه را برطرف کرد، رد می کند.

میانگین عیار طلای کربناته موجود در خاک ۰/۴ گرم بر تن است. طلا با این عیار در ذخایر

پورفیری به عنوان محصول جانبی مورد استحصال قرار می گیرد. با توجه به حجم دمپ، می توان ارزش

طلای موجود در دمپ را محاسبه کرد.

با فرض عیار متوسط ۰/۴ گرم بر تن در دمپ باطله و حجم باطله موجود، برای محاسبه یک

مقدار اولیه میزان طلای موجود در دمپ باطله در حدود ۱۵ کیلوگرم محاسبه می شود. با توجه به قیمت

جهانی طلا که حدود ۴۵۰۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم است، طلای موجود در دمپ ارزشی معادل با

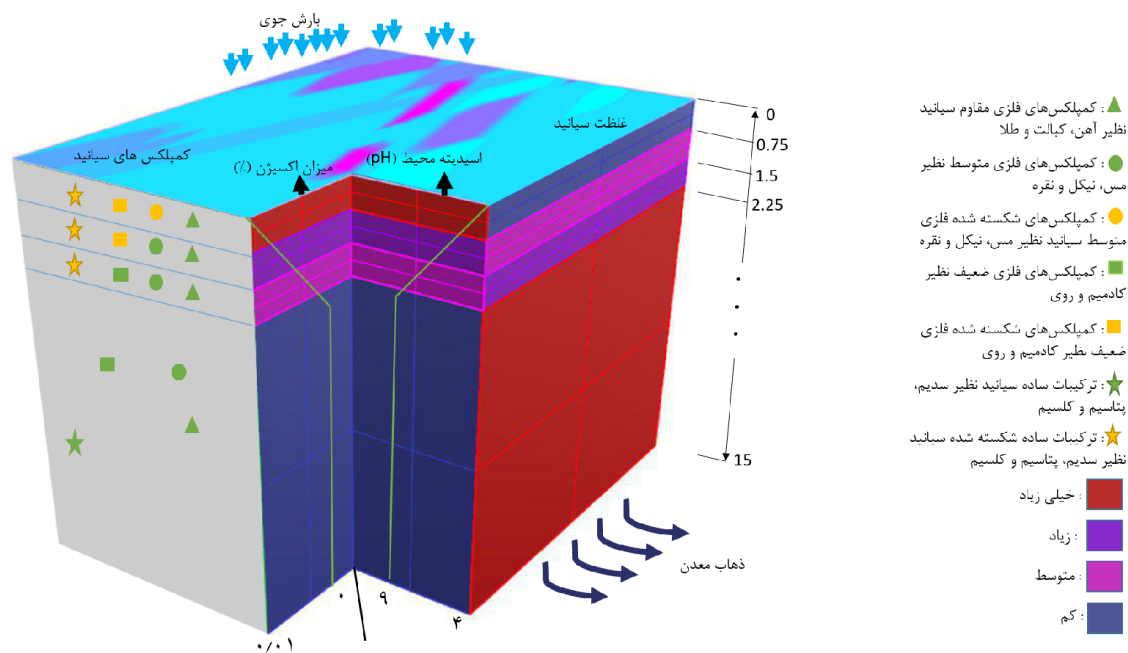
۶۷۵۰۰۰ دلار است. در صورتیکه بتوان با روش های نوین طلای موجود در دمپ را فرآوری کرد، سهم

بزرگی از هزینه هایی که در گذشته باید صرف فعالیت های زیست محیطی می شد، پوشش داده می شود.

۵-۷ مدل مفهومی

با توجه به نتایج به دست آمده حاصل از پایان نامه حاضر، می توان یک مدل مفهومی ارائه داد. این

مدل در واقع مجموع نتایج و مدل های به دست آمده در حالت بهینه می باشد.



شکل ۵-۱۹: مدل مفهومی تحول و انتقال سیانید در دمپ باطله فرآوری طلای موته.

در این شکل اسیدیته محیط، میزان اکسیژن در سطوح مختلف، تغییرات غلظت سیانید نسبت به عمق دمپ، کمپلکس های موجود در هر سطح و همچنین ترکیبات و کمپلکس های شکسته شده در سطوح نشان داده شده است.

کمپلکس های فلزی سیانید شکسته شده می توانند نقش کاتالیزگر را در شکست کمپلکس های قوی تر سیانید ایفا کنند. همچنین بالا رفتن اسیدیته محیط سبب تسریع شکست ترکیبات سیانیددار می شود. اکسیژن نیز به عنوان یک اکسیدکننده سبب آزاد شدن سیانید موجود در ترکیبات مختلف می شود، مقداری از اکسیژن موجود در هوا و ترسیب می تواند سبب شکست شدن کمپلکس های قوی تر سیانید نیز شود. گرچه برخی از این عوامل سبب بوجود آمدن عامل دیگر هستند (حضور اکسیژن سبب اسیدی شدن محیط می شود)، اما این عوامل در ایجاد تغییرات مربوط به سیانید مستقل از یکدیگر هستند.

۵-۸ جمع بندی

با توجه به نتایج مدل سازی با روش های منتخب در فصل ۳، و اعمال داده های تست برای تعیین دقت این روش ها در کلاس بندی روش AdaBOOST به عنوان روش برتر برای مدل سازی نهایی و تحلیل

زیست محیطی دمپ باطله انتخاب شد. نتایج به دست آمده از مدل سازی نشان دهنده عدم توانایی کارخانه فرآوری طلای موته در استحصال درست طلا و همچنین آسیب رسانی این کارخانه به محیط زیست است. گرچه این اطلاعات مربوط به دمپ قدیمی کارخانه بوده و عملکرد این معدن در سال های اخیر بهبود قابل ملاحظه ای داشته است، عدم توجه در این سال ها به مشکلات احتمالی دمپ های قدیمی می تواند از لحاظ زیست محیطی بسیار خطرناک باشد. با توجه به اینکه این معدن در سال ۳۰۰ کیلو گرم شمش طلا تولید می کند، میزان درآمد این معدن در سال را می توان حدود ۱۳/۵ میلیون دلار برآورد کرد. هزینه های تصفیه به دست آمده در بالا گرچه مقدار بسیار زیادی است، سهم ۱۰ تا ۱۵ درصدی از درآمد یک سال معدن را شامل می شود. این در حالی است که چشم پوشی از مشکلات زیست محیطی می تواند عواقب غیرقابل جبرانی در آینده برای معدن و محیط زیست به ارمغان آورد. در پایان باید توجه داشت که در یک پروژه ارزیابی، پایش و تصفیه زیست محیطی، اقتصادی بودن لزوم نیست، لذا هر مقدار که هزینه در برداشته باشد، باید لحاظ شود و گرنه خسارت های آتی چنین پروژه هایی صدها برابر بیشتر از درآمد سالانه آن خواهد بود.

فصل ششم

نتیجہ گیر سر ویشہادیت

۱-۶ نتیجه گیری

نتایج حاصل از پایان نامه حاضر در دو بخش مدل سازی داده های زیست محیطی و مدیریت زیست محیطی دمپ باطله بیان شده است:

• مدل سازی داده های زیست محیطی

۱. روش های داده کاوی نتایج قابل قبولی در زمینه تخمین و مدل سازی داده های زیست محیطی نسبت به روش های سنتی ارائه می دهند. استفاده از روش های کلاس بندی می تواند کنترلهایی با قابلیت تحلیل بالا ارائه دهد. این کنترورها می تواند تصمیم گیری مدیران زیست محیطی قرار گیرد.
۲. الگوریتم آدابوست از دقت بالاتری نسبت به سه الگوریتم ماشین های بردار پشتیبانی، درخت های تصمیم گیری و آنالیز تشخیص خطی برخوردار است. استفاده از چند کلاس بند ضعیف به جای یک کلاس بند قوی در شرایط حاکم (دامنه تغییرات زیاد) علت این دقت بالا است.
۳. نتایج حاصل از واریوگرام تجربی، نشان دهنده خطای پایین تجربی در داده های مدل سازی است. همچنین واریوگرام تجربی نشان می دهد محیط ایزوتروپ است. باید توجه داشت که آنیزوتروپی در مقیاس های کوچک در این مطالعه مورد توجه قرار نگرفته است.
۴. حفظ توزیع داده های اولیه و استفاده از آن فارغ از نوع توزیع، نقطه قوت روش های یادگیری ماشین است. در واقع این روش ها به جای استفاده از توزیع های خاص برای مدل سازی، توزیع های موجود را کشف و پیش بینی را انجام می دهند که این امر سبب دقت بالای این روش ها است.

• مدیریت دمپ باطله

۱. دمپ باطله معدن طلای موته حاوی مقدار زیاد سیانور است. غلظت اثر نقاط این دمپ از استانداردهای موجود بسیار بالاتر است که این امر می تواند خطرات غیرقابل جبرانی برای

ساکنین منطقه و کارکنان معدن به همراه داشته باشد. میزان کلی سیانور موجود در دمپ در سه حالت کمترین مقدار، متوسط و بیشترین مقدار موجود در دمپ، امکان محاسبه هزینه‌های تصفیه را فراهم کرده است.

۲. بررسی‌های لازم برای استحصال عناصر نادر خاکی و طلای باقی‌مانده در دمپ برای کسب درآمدهای مورد نظر جهت پوشش بخشی از هزینه‌های تصفیه دمپ انجام شد. در این بررسی‌ها معلوم شد عناصر نادر خاکی دمپ ارزش استحصال ندارد.

۳. اسیدی شدن خاک که سبب بخار سیانید و ترکیبات ساده آن می‌شود، به عنوان دلیل اصلی ایجاد تغییرات در سطح بالایی دمپ باطله مطرح است. البته شستشوی مواد سمی حاوی سیانید توسط آب باران و قرار گرفتن در معرض هوا در سطوح بالایی خاک از دلایل دیگر ایجاد این تغییرات است.

۴. برای مدیریت دمپ باطله، محاسبه و تصفیه بخش آزاد سیانور می‌تواند هزینه به مراتب کمتری از تصفیه کل سیانور داشته و همچنین خطرات ناشی از حضور سیانور در خاک را کاهش دهد.

۵. روش‌های نادرست آزمایشگاهی و نتایج غیرصحیح این روش‌ها سبب اختلاف در نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌های محیط‌زیستی و بخش‌های صنعتی در کشور ایران است. استفاده از معرف‌های پتاسیم یدید، غیر مرغوب بودن مواد آزمایشگاهی نظیر نیترات نقره و عدم رفع مزاحمت‌ها از دلایل اصلی نتایج ناصحیح در آزمایشگاه‌ها است.

۲-۶ پیشنهادات

۱. در پژوهش حاضر برای کلاس‌بندی داده‌ها از روش‌های یادگیری ماشین به تنهایی استفاده شده است. روش‌های ترکیبی کریجینگ و یادگیری ماشین می‌تواند نتایج با دقت بالاتری را به ارمغان آورد. البته این روش‌ها به سیستم‌های سخت‌افزاری قوی نیازمند هستند.

۲. بررسی تغییرات در مقیاس کوچک با نرم‌افزارهای المان مجزا نظیر PFC می‌تواند ابزاری

مکمل برای تحلیل نتایج حاضر در این تحقیق باشد.

۳. نمونه‌برداری در راستای عمق با فاصله نمونه‌برداری کمتر قابلیت استفاده از روش‌های زمین‌آماري را به صورت مجزا و مقایسه آن با روش‌های یادگیری ماشین را فراهم می‌کند.
۴. آزمایش‌های بررسی نرخ تغییرات خاک نسبت به زمان در حضور سیانید می‌تواند راه‌های ارزان و مفیدی برای کنترل این ماده خطرناک ارائه دهد.
۵. خاک‌ریزی بر روی سطح بالایی دمپ باطله به میزان ۱-۲ متر می‌تواند خطر بخارات سیانید را تا حد زیادی کاهش دهد (حداقل در جاهایی که عیار سیانید در سطح بالاتر است).
۶. فضا سازی برای دمپ باطله قبل از دیو دمپ در محل تعیین شده می‌تواند بخش زیادی از خطرات نشت سیانور به آب‌های زیرزمینی را کاهش دهد.

منابع

- فتحی حبشی، (۱۳۹۱) "هیدرومتالورژی"، جلد اول، چاپ دوم، مترجم: شفاهی ض، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- نعمت اللهی ن، (۱۳۹۰) "آمار و احتمالات مهندسی"، چاپ سیزدهم، انتشارات دالفک، تهران.
- حسنی پاک ع، (۱۳۹۲) "زمین آمار"، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران.
- کریمی ر، (۱۳۹۴) "راهنمای آسان تحلیل آماری با SPSS"، انتشارات هنگام، تهران
- مرادیان، مرضیه؛ مریم علیخانی و غلامرضا فتح ابادی، ۱۳۹۲، بهینه سازی اندازه گیری سیانید کل و سیانید درگیر با روش تقطیر در نمونه های زیست محیطی، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین المللی-تخصصی علوم زمین.
- بهنام فرد، علی، ۱۳۹۵، شناسایی، مشخصه یابی و مدیریت پسماندهای فرآیندهای استخراج و فرآوری کانسنگ طلا دار و ارزیابی اثرات زیست محیطی آنها، هشتمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، انجمن مهندسی محیط زیست ایران.
- Adei, D., Addei, I., and Kwadjosse, H. A. (2011). A study of the effects of mining activities on the health status of people: A case study. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 3(2), 99-104.
- Akcil, A., and Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. Journal of Cleaner Production, 14(12), 1139-1145.
- Ako, T. A., Onoduku, U. S., Oke, S. A., Adamu, I. A., Ali, S. E., Mamodu, A., and Ibrahim, A. T. (2014). Environmental impact of artisanal gold mining in Luku, Minna, Niger State, North Central Nigeria. Journal of Geosciences and Geomatics, 2(1), 28-37.
- Akpalu, W., and Normanyo, A. K. (2016). Gold mining pollution and the cost of private healthcare: The case of Ghana (No. 2016/121). WIDER Working Paper.
- An, Y. J., and Kim, M. (2009). Effect of antimony on the microbial growth and the activities of soil enzymes. Chemosphere, 74(5), 654-659.

Ansa-Asare, O. D., Darko, H., and Obiri, S. (2015). Assessment of carcinogenic risk and non-carcinogenic health hazard from exposure to toxicants in water from the Southwestern coastal river system in Ghana. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 21(2), 445-465.

Barney, G. O. (2013). *The Global 2000 Report to the President of the US: Entering the 21st Century: The Technical Report (Vol. 2)*. Elsevier.

Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. springer.

Bowen, H. J. M. (1979). *Environmental chemistry of the elements*. Academic Press..

Bustamante, R., Dichmont, C., Ellis, N., Rochester, W., Griffiths, S., Rothlisberg, P., ... and Deng, R. (2011). Effects of trawling on the benthos and biodiversity: development and delivery of a spatially-explicit management framework for the Northern Prawn Fishery.

Cai, Y., Zhang, H., Yuan, G., and Li, F. (2017). Sources, speciation and transformation of arsenic in the gold mining impacted Jiehe River, China. *Applied. Geochemistry*, 84, 254-261

Chakraborti, D., Rahman, M. M., Murrill, M., Das, R., Patil, S. G., Sarkar, A., ... and Das, K. K. (2013). Environmental arsenic contamination and its health effects in a historic gold mining area of the Mangalur greenstone belt of Northeastern Karnataka, India. *Journal of hazardous materials*, 262, 1048-1055.

Dai, X., Simons, A., and Breuer, P. (2012). A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores. *Minerals Engineering*, 25(1), 1-13.

Dobrin, D. J., and Potvin, R. (1992). *Air Quality Monitoring Studies in the Sudbury Area*. Ontario Ministry of the Environment, Northeastern Region, Sudbury, Ontario.

Doulati Ardejani, F. (2003). *Hydrogeological investigation of backfilled surface coal mine sites*. University of Wollongong, Wollongong.

Dudka, S., and Miller, W. P. (1999). Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human food chain. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 34(4), 681-708.

- Duda, R. O., Hart, P. E., & Stork, D. G. (1973). Pattern classification (pp. 526-528). Wiley, New York.
- Dudka, S., Ponce-Hernandez, R., Tate, G., and Hutchinson, T. C. (1996). Forms of Cu, Ni, and Zn in soils of Sudbury, Ontario and the metal concentrations in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 90(3), 531-542.
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., and Charlton, M. (2003). Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships. John Wiley and Sons.
- Freedman, B., and Hutchinson, T. C. (1980). Pollutant inputs from the atmosphere and accumulations in soils and vegetation near a nickel–copper smelter at Sudbury, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Botany*, 58(1), 108-132.
- Friedel, M. J., and Iwashita, F. (2013). Hybrid modeling of spatial continuity for application to numerical inverse problems. *Environmental modelling and software*, 43, 60-79.
- Gilardi, N. (2002). Machine learning for spatial data analysis. A thesis for PhD, University of Lausanne and Dalle Molle Institute of Perceptual Artificial Intelligence, 33-42.
- Halim, M. A., Majumder, R. K., Zaman, M. N., Hossain, S., Rasul, M. G., and Sasaki, K. (2013). Mobility and impact of trace metals in Barapukuria coal mining area, Northwest Bangladesh. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(12), 4593-4605.
- Hansen, R. N. (2015). Contaminant leaching from gold mining tailings dams in the Witwatersrand Basin, South Africa: A new geochemical modelling approach. *Applied Geochemistry*, 61, 217-223.
- Harris, P., Brunsdon, C., and Fotheringham, A. S. (2011). Links, comparisons and extensions of the geographically weighted regression model when used as a spatial predictor. *Stochastic environmental Research and Risk assessment*, 25(2), 123-138.
- Hilson, G. (2000). Barriers to implementing cleaner technologies and cleaner production (CP) practices in the mining industry: a case study of the Americas. *Minerals Engineering*, 13(7), 699-717.

Hughes, J., Craw, D., Peake, B., Lindsay, P., and Weber, P. (2007). Environmental characterisation of coal mine waste rock in the field: an example from New Zealand. *Environmental Geology*, 52(8), 1501-1509.

Jeswiet, J. (2017). Including Towards Sustainable Mining in Evaluating Mining Impacts. *Procedia CIRP*, 62, 494-499.

Kanevski, M., Timonin, V., and Pozdnoukhov, A. (2008, June). Automatic decision-oriented mapping of pollution data. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 678-691). Springer, Berlin, Heidelberg.

Kesler, S. E., and Simon, A. C. (2015). *Mineral resources, economics and the environment*. Cambridge University Press.

Kesler, S. E., and Simon, A. C. (2015). *Mineral resources, economics and the environment*. Cambridge University Press.

Kesler, S. E., and Simon, A. C. (2015). *Mineral resources, economics and the environment*. Cambridge University Press.

Küstel, G. (1863). *Nevada and California Processes of Silver and Gold Extraction...* FD Carlton.

Kuyucak, N., and Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*, 50, 13-29.

Laslett, G. M., McBratney, A. B., Pahl, P., and Hutchinson, M. F. (1987). Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *European Journal of Soil Science*, 38(2), 325-341.

Lawrence, R. W., and Scheske, M. (1997). A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*, 32(2), 100-106.

Lee, E., Han, Y., Park, J., Hong, J., Silva, R. A., Kim, S., and Kim, H. (2015). Bioleaching of arsenic from highly contaminated mine tailings using *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Journal of environmental management*, 147, 124-131.

Li, J., and Heap, A. D. (2008). A review of spatial interpolation methods for

environmental scientists.

Li, J., Heap, A. D., Potter, A., and Daniell, J. J. (2011). Application of machine learning methods to spatial interpolation of environmental variables. *Environmental Modelling and Software*, 26(12), 1647-1659.

Li, J., Heap, A. D., Potter, A., Huang, Z., and Daniell, J. J. (2011). Can we improve the spatial predictions of seabed sediments? A case study of spatial interpolation of mud content across the southwest Australian margin. *Continental Shelf Research*, 31(13), 1365-1376.

Li, J., Potter, A., Huang, Z., and Heap, A. (2012). Predicting Seabed Sand Content across the Australian Margin Using Machine Learning and Geostatistical Methods (p. 115). Geoscience Australia.

Li, J., Potter, A., Huang, Z., Daniell, J. J., and Heap, A. D. (2010). Predicting seabed mud content across the Australian margin. *Geoscience Australian Record*, 11.

Moosavirad, S. M., Rasouli, J., Janardhana, M. R., Moghadam, M. R., and Shankara, M. (2013). Petrographic, mineralogy, and geochemistry of coals of Pabedana, Kerman Province, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10), 3623-3634.

Morales, S. (2013). Environmental assessment of mercury pollution in urban tailings from gold mining. *Ecotoxicology and environmental safety*, 90, 167-173.

Myers, D. E. (1994). Spatial interpolation: an overview. *Geoderma*, 62(1-3), 17-28.

Obiri, S., Dodoo, D. K., Essumang, D. K., and Armah, F. A. (2010). Cancer and non-cancer risk assessment from exposure to arsenic, copper, and cadmium in borehole, tap, and surface water in the Obuasi municipality, Ghana. *Human and Ecological Risk Assessment*, 16(3), 651-665.

Páez, A., Farber, S., and Wheeler, D. (2011). A simulation-based study of geographically weighted regression as a method for investigating spatially varying relationships. *Environment and Planning A*, 43(12), 2992-3010.

Park, J. (1904). The cyanide process of gold extraction. C. Griffin and co..

Salomons, W., and Förstner, U. (Eds.). (2012). Chemistry and biology of solid waste: dredged material and mine tailings. Springer Science and Business Media.

Şanlıyüksel Yücel, D., and Baba, A. (2016). ***Prediction of acid mine drainage generation potential of various lithologies using static tests***: Etili coal mine (NW Turkey) as a case study.

USEPA, U. (1997). Exposure factors handbook. Office of Research and Development, Washington.

Wang, R. (2012). AdaBoost for feature selection, classification and its relation with SVM, a review. Physics Procedia, 25, 800-807.

Wheeler, D. C., and Páez, A. (2010). Geographically Weighted Regression. In. Fischer, MM–Getis, A.(ed.): Handbook of Applied Spatial Analysis Software Tools, Methods and Applications.

Wu, Y., Zhou, X. Y., Lei, M., Yang, J., Ma, J., Qiao, P. W., and Chen, T. B. (2017). Migration and transformation of arsenic: Contamination control and remediation in realgar mining areas. Applied Geochemistry, 77, 44-51.

Xiao, R., Wang, S., Li, R., Wang, J. J., and Zhang, Z. (2017). Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. Ecotoxicology and Environmental Safety, 141, 17-24.

Ying, C., Qi-Guang, M., Jia-Chen, L., and Lin, G. (2013). Advance and prospects of AdaBoost algorithm. Acta Automatica Sinica, 39(6), 745-758.

Zhou, F., Guo, H. C., Ho, Y. S., and Wu, C. Z. (2007). Scientometric analysis of geostatistics using multivariate methods. Scientometrics, 73(3), 265-279.

پیوست

نتایج غلظت حاصل از آزمایش تیتراسیون

شماره چاله	غلظت سیانور سطحی (ppm)	غلظت سیانور عمق ۱ (ppm)	غلظت سیانور عمق ۲ (ppm)	X	Y
1	800	1060	1100	478321	3727755
2	1290	780	1280	478340	3727742
3	1380	1320	810	478367	3727728
4	840	1200	1020	478379	3727722
5	890	1500	1060	478391	3727719
6	1000	1400	1660	478392	3727727
7	1100	1220	1480	478383	3727731
8	1040	900	1600	478369	3727737
9	840	1100	800	478357	3727742
10	1240	1240	1700	478343	3727749
11	880	1340	1380	478337	3727754
12	1580	1680	1320	478332	3727747
13	1550	780	1320	478326	3727761
14	860	1420	800	478321	3727765
15	860	1380	2160	478316	3727749
16	810	760	1520	478328	3727743
17	950	1580	1350	478337	3727738
18	1290	2060	1100	478348	3727733
19	1600	1560	1680	478352	3727738
20	1310	1460	1680	478363	3727724
21	1420	1640	1380	478375	3727716
22	1120	1520	1300	478387	3727713
23	1200	1860	1440	478382	3727708
24	1100	1000	1420	478371	3727713
25	1120	1160	1530	478357	3727719
26	740	860	1220	478343	3727725
27	830	1440		478330	3727735
28	940			478321	3727741
29	860			478310	3727749
30					

Abstract

The environment is a key pillar to the sustainable development. The development of industries, the growth of the economy and the increase in the amount of industrial production lead to the production of high amounts of waste materials, worthless and harmful side products that are the source of various environmental problems. In this research, after field sampling (on the surface and in the depth) from the tailing of Mouteh gold mine, and laboratory measurements of the existing cyanide in the samples, the modeling of the cyanide distribution in the tailing is performed. For modeling, new methods of the machine learning and the geostatistics are used in MATLAB software. Therefore, the methods of Support Vector Machines, Random Forests, Linear Discriminant Analysis and AdaBoost were used for modeling, which AdaBoost method provides the highest accuracy in estimation. Geostatistics is used to cover the weakness of these methods in identification of isotropy/anisotropy of the environment and to calculate empirical errors. According to the results of geostatistical studies, the concentration of cyanide in the tailing is homogeneous and the range of variogram is 8.3 meter. This range is in agree with the number of selected samples for the estimation. The obtained value from the nugget shows a negligible error of sampling, preparation and analyzing of the samples. Also, the conceptual model of evolution and transfer of cyanide in the tailing of Mouteh gold mine is presented in three dimensions and considering the governing physicochemical mechanism. In the last step, with estimation of total amount of existing cyanide in the tailing, the cost of purification of tailing is calculated and the ways to making profit from this tailing are investigated.

Keyword: Cyanide, Tailing, Mouteh Gold Mine, Machine Learning, Geostatistics, Conceptual Model.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation

**Modeling of Physical and Chemical Processes Governing
on Tailing Dam Using Estimating Methods, Case Study-
Muteh Gold Mine**

By: Babak Abedi-Orang

Supervisors:

Dr. Reza Khalookakaei

Dr. Kumars Seifpanahi-Shabani

Advisor:

Mehdi Hekmat

January 2018