نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره دوازدهم،شماره۳۶، پاییز ۱۳۹۶، صفحه۱۱۱ تا ۱۲۲
Vol. 12, No. 36, 2017, pp.111-122

تفکیک چندمتغیره و مدلسازی ژئومتالورژیکی بخش‌های اکسید و سولفید درکانسار سرب و روی مهدی‌آباد یزد

راضیه محلوجی[۱]؛ امید اصغری[۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد اکتشاف معدن؛ دانشگاه تهران **rmahlooji@ut.ac.ir**
۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن؛ دانشگاه تهران **o.asghari@ut.ac.ir**

(دریافت۵ اردیبهشت ۱۳۹۵،پذیرش۱۴شهریور ۱۳۹۶)

چکیده

امروزه اهمیت مدل‌سازی ژئومتالورژیکی به‌عنوان رابط بین اکتشاف و فرآوری برکسی پوشیده نیست. چرا که موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه-ها شده و چه بسا می‌تواند معدن را از حالت غیراقتصادی خارج کرده و به مرحله سوددهی برساند. بررسی نحوه کاربرد ژئومتالورژی در حال حاضر در صنعت معدن نشان می‌دهد که می‌توان ارتباطی بین اطلاعات زمین‌شناسی و پاسخ متالورژی متکی بر تعداد کمی از نمونه‌های آزمایش شده در آزمایشگاه به‌دست آورد. از این رو بررسی ژئومتالورژیکی روی کانسار مهدی‌آباد یزد که به سه بخش اکسیدی، سولفیدی و مرکب تقسیم‌بندی شده است، انجام شد. هدف از انجام این بررسی، تفکیک بخش مرکب به دو بخش اکسیدی و سولفیدی بوده است. در این کانسار به علت همبستگی زیاد بین داده‌ها روش آمار تک متغیره برای تفکیک بخش‌ها کارایی ندارد در نتیجه از یکی از روش‌های آمار چندمتغیره به نام آنالیز تفکیکی به‌منظور تفکیک بخش مرکب استفاده شده است. آنالیز تفکیکی یک روش آماری چند متغیره است که هر مشاهده را در یک گروه خاص از متغیرهای پیش‌بینی شده و براساس گروه‌های تعریف شده طبقه‌بندی می‌کند. این روش هم‌زمان به تمام ویژگی‌های نمونه توجه کرده و با استفاده از میانگین عیار نمونه‌ها، برای هر نمونه ضریبی منحصر به فرد (λ) تعیین می‌شود که این ضریب در نهایت منجر به تفکیک بخش مرکب به دو بخش اکسیدی و سولفیدی در معدن مهدی‌آباد یزد شده است.

کلمات کلیدی

ژئومتالورژی، معدن مهدی‌آباد یزد، آمار چندمتغیره، آنالیز تفکیکی

۱- مقدمه

آنالیزتفکیکی روشی مؤثر برای استخراج ویژگی‌هایی است که منجر به تفکیک‌پذیری کلاس‌های طبقه‌بندی می‌شود. این روش به‌طور گسترده‌ای در پردازش اطلاعات استفاده می‌شود[۱]. آنالیز تفکیکی یک روش آماری چند متغیره است که هر مشاهده را در یک گروه خاص از متغیرهای پیش‌بینی شده و براساس گروه‌های تعریف شده طبقه بندی می‌کند. یکی از کاربردهای آنالیز تفکیکی تشخیص آنومالی-های ژئوشیمیایی برای توصیف هدف مورد نظر است که در این زمینه روشنی و همکاران برای بررسی آنومالی کانی‌سازی مس پرفیری کوه پنج از این آنالیز استفاده کرده‌اند[۲]. کاربرد دیگر آن طبقه‌بندی داده‌ها است با این فرض که داده‌ها در هر کلاس به‌طور نرمال طبقه‌بندی شده-اند. [۳] پژوهش‌های مختلفی برای تفکیک زون آلتراسیون فیلیک و پتاسیک معدن مس پرفیری سونگون از این روش استفاده کرده‌اند انجام شده است[۴،۵،۶].

معدن مهدی‌آباد یزد شامل کانسارهای اکسیدی و سولفیدی سرب و روی است و شامل ۷ بخش اکسیدی، سولفیدی و مرکب است. در بخش مرکب امکان تفکیک کامل بخش‌های اکسیدی و سولفیدی وجود ندارد که این امر استخراج ماده معدنی را تیز با مشکل روبرو می‌کند. آنالیز تفکیکی یک روش آماری چندمتغیره است که می‌تواند در تفکیک بخش مرکب به دو بخش اکسیدی و سولفیدی مفید واقع شود. کانسار روی مهدی‌آباد یزد با عیار متوسط ۷٪ دومین ذخیره بزرگ غیرسولفیدی دنیا محسوب می شود. این معدن از دیرباز به‌صورت شدادی و معدن‌کاری دستی مورد بهره-برداری قرار گرفته است. بیشتر استخراج مواد به علت عیار بالای روی (بین ۲۰ تا ۵۰ درصد) از بخش اکسیدی بوده است. در سال ۱۳۲۹ معدن در اختیار شرکت مهشهر (پرژام) قرارگرفت و پس از عملیات اکتشافی، آماده‌سازی و استخراج کانی در سال ۱۳۳۵ آغازشد. در سال‌های بعد، ۱۹۹۴ متر گمانه و تعداد زیادی تونل و ترانشه در بخش اکسیدی و سولفیدی حفر شد و با تهیه نقشه زمین‌شناسی و انجام مطالعات ژئوفیزیکی ذخیره معدن حدود ۳۲ میلیون تن با عیار مجموع۷/۵ درصد سرب و روی اعلام شد (شرکت آماکس امریکا، ۱۳۴۲) حفر ۴۶۷۱ متر گمانه در زون اکسیدی و سولفیدی و انجام مطالعات ژئوفیزیکی، زمین-شناسی و کانه‌آرایی (شرکت مهشهر و شرکت میتسوی ژاپن، ۱۳۵۲) و حفر ۱۱ گمانه در شبکه ۲۰۰×۲۰۰ و ۳۰ گمانه در شبکه ۱۰۰×۱۰۰به میزان ۱۶۹۵۰ متر، تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ و ۱:۱۵۰۰ ، نمونه‌گیری و عیار سنجی ۴۷۱۰نمونه، حفر ۲۰۰ متر تونل اکتشافی در معدن کالامین و ۱۱۰۰ متر حفاری داخل تونل، مطالعات مینرالوژیکی و انجام آزمایش‌های کانه آرایی و تخمین ذخیره و مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی انجام شده‌است (شرکت مهشهر و شرکت میتسوی ژاپن، ۱۳۶۶). طرح اکتشاف تفصیلی به‌صورت پراکنده و مقطعی با احداث جاده از کارخانه ذوب روی به معدن به طول ۴۸ کیلومتر، حفر چاه اکتشافی به عمق ۳۱۴ متر به قطر ۴/۵متر، اجرای پوشش بتنی چاه تا عمق ۲۵۵ متری، ساخت تأسیسات و ساختمان-های رفاهی اولیه، جمع بندی اطلاعات و ارزیابی ذخیره نهایی معدن، انجام مطالعات آبشناسی، تهیه طرح استخراج مقدماتی و غیره ادامه یافت (شرکت مهشهر و شرکت B.R.G.M، ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۹). در سال ۱۳۷۹ کنسرسیومی متشکل از شرکت استرالیایی یونیون وشرکت ایتوک تاسیس شد و فعالیت خود را برروی معدن آغاز کردند. درطی سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ حفاری‌های مغزه-گیری به روش‌های مختلف به میزان ۱۳۸۳ متر انجام شد [۷].

ژئومتالورژی ترکیبی از اطلاعات زمین‌شناسی و متالورژی به‌منظور ایجاد فضایی مبتنی بر مدل پیش‌بینی برای کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی است. بررسی نحوه کاربرد ژئومتالورژی در حال حاضر در صنعت معدن نشان می‌دهد که می‌توان ارتباطی بین اطلاعات زمین‌شناسی و پاسخ متالورژی متکی بر تعداد کمی از نمونه‌های آزمایش شده در آزمایشگاه به‌دست آورد. برنامه ژئومتالورژی بر روش‌های سنتی برتری دارد زیرا: با کمک این روش از اطلاعات کانسنگ بهتر می‌توان استفاده کرد، کنترل بهتر معدن‌کاری با استفاده از اطلاعات جامع کانی‌شناسی، بهینه‌سازی کارخانه فرآوری (تغییرات در خوراک را بهتر کنترل می-کند)، ارائه راه حل‌های جدید (زیرا مشکلات ناشی از کانسنگ به خوبی از قبل مشخص شده‌اند و برنامه‌های

تحقیقاتی می‌توانند در حل این مسئله تمرکز کنند)، کاهش خطر در عملیات و فرصت‌های بهتر برای بهینه‌سازی اقتصادی عملیات با توجه به قیمت‌های فلزات نسبت. در راستای استفاده از برنامه ژئومتالورژی برای معدن مهدی‌آباد یزد آنالیز تفکیکی کمک شایانی به جداسازی بخش‌های اکسیدی و سولفیدی و درنتیجه کاهش هزینه های تولید و فرآوری می‌کند.

۲- تئوری روش

۲-۱ ژئومتالورژی

ژئومتالورژی ترکیبی است از اطلاعات زمین‌شناسی و متالورژی به‌منظور ایجاد فضایی برای مدل‌سازی پیش‌بینی کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی که شامل موارد زیر است:

- اطلاع از زمین‌شناسی تعدادی از نمونه‌های آزمایشی به‌منظور تعیین پارامترهای متالورژیکی.
- توزیع این پارامترها در کانسار با استفاده از روش زمین‌آماری قابل قبول برای پشتیبانی از شبیه-سازی مراحل متالورژیکی.این توزیع می‌تواند تحت تأثیر زمین‌شناسی کانسار قرار گرفته باشد، که در آن سنگ‌شناسی روی برخی از پارامترها تأثیر می-گذارد.

روش‌های سنتی برپایه تناژ و عیار اقتصادی مواد معدنی عمل می‌کند، با این حال با پیچیده‌تر شدن ترکیب شیمیایی کانی درحال بهره‌برداری و افزایش مقاومت آن، لزوم به-کارگیری مدیریت ریسک و بهره‌وری هزینه افزایش می-یابد[۸]. برنامه ژئومتالورژی تلاشی سازمان یافته برای ایجاد مدلی قابل اعتماد، عملی و مفید از ذخیره ماده معدنی و کارخانه فرآوری است که برای بهره‌برداری از منابع استفاده می‌شود.

بهترین تجربه در ارزیابی اقتصادی پروژه‌های معدن و بهره-برداری‌ها با استفاده از ارزش خالص فعلی و یا تجزیه و تحلیل واقعی گزینه‌ها است که اغلب براساس اطلاعات و استراتژی‌های زمین‌شناسی، معدن، متالورژی، زیست محیطی، بازاریابی، اقتصادی و شرکت‌های بزرگ است. علاوه بر این، تعدادی از اطلاعات و مفروضات ثابت و متغیر نیز در ارزیابی در نظر گرفته شده‌اند. با این‌حال، اطلاعات اساسی در ارزیابی درجات و ویژگی‌های چندمتغیره از منابع معدنی و ذخایر کانی‌های معدنی استفاده می‌شود. در واقع، ارزش اقتصادی مورد انتظار در یک دوره زمانی خاص از معدن، ترکیب، انباشت، فرآوری، ذوب، تصفیه و منابع سنگ بازاریابی با درجات و ویژگی‌های چند متغیره برآورد شده با روش‌های زمین‌آماری به‌دست می‌آید.

اصل اساسی در ارزیابی اقتصادی بیان می‌کند که استخراج و فرآوری دو بلوک ذخیره معدنی گسسته با حجم یکسان، دانسیته توده‌ای، بهبود عیار و متالورژی، کنسانتره یا محصول با همان محتوای فلزی بازیافتی تولید می‌شود. با این حال، در واقع محتوای فلز بازیافتی از دو بلوک ذخیره کانی معدنی گسسته متفاوت هستند و توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی فردی و ذاتی آن‌ها اساسی است.

ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافت کانی‌ها تأثیر بسزایی در میزان اقتصادی بودن آن دارد که متاسفانه در صنعت معدن تجربه کافی در این زمینه وجود ندارد. این ویژگی‌ها بخش اصلی از درجه آزادی فرآوری موادمعدنی و فرآیندهای انتخابی ذخایر معدنی هستند. علاوه بر این، کنسانتره یا محصولات مورد انتظار از موادمعدنی، باطله آزاد و انتخاب شده از معدن‌کاری، ترکیب، انباشت و فرآوری ذخایر کانسار با درجات مشابه اما با کانی‌های مختلف و ویژگی‌های بافتی ناشناخته است.

متاسفانه تاکنون فرضیات ساده و عملی و روش‌های مورد استفاده برای بهینه‌سازی پروژه‌های معدنی و اقتصاد بهره-برداری کافی نبوده‌اند. ارزیابی اقتصادی براساس فرآیند بهینه‌سازی باعث می‌شود تا کنسانتره کانی موردنظر به حداکثر رسیده و در نتیجه ترکیب، انباشت و فرآوری ذخایر کانی‌های معدنی به‌دست می‌آید. این ارزیابی کانی معدنی شامل بررسی کانی‌شناسی متمایز و ویژگی‌های بافتی و آزادی فرآوری موادمعدنی و پارامترهای انتخابی است. بهینه-سازی، منجر به اجرای هم‌زمان استخراج ذخایر معدنی و طراحی نمودار جریان فرآوری موادمعدنی پویا و قوی در

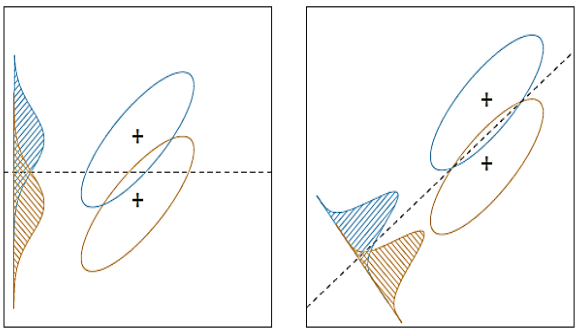
طول عمر مورد انتظار از پروژه‌های استخراج و عملیات‌ها می‌شود.

تجزیه و تحلیل پیشرفته ریسک در ارزیابی اقتصادی شامل ترکیبی از ریسک نامطلوب و فرآیند بهینه‌سازی هم‌زمان است. فرآیند بهینه‌سازی نشان‌دهنده تغییرات فضایی خصوصیات کانی‌شناسی و بافتی در ذخایر معدنی است. علاوه بر این، نوع فرآوری موادمعدنی مورد استفاده (که دارای پارامترهای خطی، غیرخطی، افزایشی و غیرافزایشی می‌باشد) به‌صورت فضایی مدل‌سازی می‌شوند. عدم قطعیت مکانی این ویژگی‌ها و پارامترها، تأثیر مستقیمی در طراحی مورد انتظار معدن، ذخایر معدنی، توالی استخراج، برنامه-ریزی تولید، طراحی فلوشیت فرآوری موادمعدنی، کنسانتره و یا محصولات آزادشده و انتخابی از مواد معدنی کانی‌های معدنی، و ارزش اقتصادی پروژه‌های معدن و بهره‌برداری‌ها دارد[۹].

چارچوب ژئومتالورژی روش جامع نامطلوب ریسک است که فرآیند برنامه‌ریزی استراتژیک مشترک پروژه‌ها و بهره-برداری‌های معدنی را حمایت می‌کند. این فرآیند شامل ارزیابی اقتصادی بر اساس تجزیه و تحلیل ریسک عدم قطعیت فضایی از تنوع ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی در ذخایر کانی‌های معدنی است. تابع هدف ارزیابی اقتصادی عبارت است از به حداکثر رساندن ارزش اقتصادی در حالی که منابع متعدد عدم قطعیت را به حداقل می‌رسانیم. این منابع عدم قطعیت به تنوع فضایی ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی و آزادی فرآوری موادمعدنی و خواص انتخابی در ذخایر کانی‌های معدنی مربوط هستند. بهینه‌سازی توسط یک فرآیند تکرارشونده و جامع محدود به اطلاعات مشترک زمین‌شناسی، معدن، متالورژی، محیط زیست، بازاریابی، اقتصاد و حالات - برنامه ریزی استراتژیک توسعه یافته‌است[۱۰].

۲-۲ آنالیز تفکیکی

از این روش برای تفکیک و متمایزکردن دو جامعه تعریف شده از یکدیگر و تعیین میزان وابستگی و ارتباط یک نمونه به یکی از دو جامعه مشخص و معلوم استفاده می‌شود. در این روش لازم است دو جامعه موردنظر از قبل معلوم باشند یا حداقل تعریف شده باشند. فرض می‌شود دو جامعهg_1 و g_2 وجود دارند. نمونه جدیدی از یکی از این دو جامعه برداشته می‌شود ولی مشخص نیست این نمونه جدید برای کدام یک از دو جامعه است. بنابراین K خاصیت از نمونه مورد نظر اندازه‌گیری شده و براساس این خصوصیات، در مورد تعلق آن نمونه به یکی از دو جامعه موردنظر تصمیم‌گیری می‌شود.برای انجام این کار نیاز به تابعی به نام تابع تفکیک است. این تابع، برداری است که در جهت جداسازی بهینه دو جامعه امتداد می‌یابد و اگر داده‌های مربوط به دو جامعه در امتداد تابع تفکیک رسم شوند در حد ممکن از یکدیگر جدا شده و موقعیت نمونه‌های مجهول که تعلق آنها به یکی از دو جامعه نامعلوم است در همین امتداد مشخص خواهدشد (شکل ۲). تابع تفکیک $D(x_1 \ldots x_k)$ که در آن x_1 تا x_k همان k متغیر اندازه‌گیری‌شده برای نمونه مجهول است و همچنین مقدار D_0 که مقدار حد مرزی بین دو جامعه مورد تفکیک است را طوری می‌توان تعریف کرد که اگر مقدار تابع برای یک نمونه(D) به ازای مقادیر متغیرهای هر نمونه (x_1 تا x_k) بزرگتر از D_0 (حد مرزی) باشد آن نمونه متعلق به جامعه g_1 و در صورتی که کوچکتر از D_0 باشد، نمونه در جامعه g_2 طبقه‌بندی می‌شود. فرض کنید می‌دانیم نمونه‌ای متعلق به یکی از دو جامعه شناخته‌شده با بردار میانگین $\bar{A}$ و $\bar{B}$ و ماتریس کوواریانس S است.



شکل ۲: نمایش محور تفکیک. با استفاده از تابع آنالیز تفکیکی می‌توان محور جدیدی که برآیند وزن دار سایر متغیرها است، را تعریف کرد که در محور جدید حداکثر جدایش بین دو جامعه بر اساس متغیرهای موجود به‌دست می‌آید.

به‌منظور تعریف یک تابع تفکیک از ترکیب خطی متغیرها برای ایجاد متغیری با توزیع نرمال تک متغیره استفاده می-

شود. در اینجا لازم است که این تابع در امتداد بیشترین تمایز بین دو جامعه محاسبه شود. ضرایب چنین ترکیب خطی که فاصله میانگین‌های دو جامعه در امتداد آن حداکثر باشد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S\lambda = \mathrm{D} \rightarrow \lambda = [S]^{-1}D \qquad (۱)$$

که در آن $[S]^{-1}$ معکوس ماتریس کوواریانس مشترک بین دو جامعه، D ماتریس تفاضل میانگین پارامترهای دو جامعه و D ترکیب خطی مذکور است. ماتریس D را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$d_j = \bar{A}_j - \bar{B}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} a_{ij}}{n_a} - \frac{\sum_{i=1}^{n_b} b_{ij}}{n_b} \qquad (۲)$$

یا به عبارت دیگر:

$$D = \bar{A} - \bar{B} \qquad (۳)$$

منظور از بردار D، بردار تفاضل میانگین های هر یک از متغیرها در دو جامعه مورد نظر است. که در آن $\bar{A}$ و $\bar{B}$ تخمینی از بردارهای میانگین دو جامعه معلوم و $[S]$ ماتریس کوواریانس مشترک دو جامعه معلوم است. این وزن-ها یعنی مقادیر λ تابع تفکیک را تعریف می‌کنند. عبارت $\bar{B} - \bar{A}$ یا بردار D در اصل برداری است که میانگین‌های دو جامعه را به‌هم وصل می‌کند. حاصل ضرب این بردار در ماتریس کوواریانس می‌تواند امتداد قرارگیری بردار مورد نظر را در جهت بیشترین تفکیک بچرخاند. درایه‌های ماتریس-های S_A و S_B نیز از روی روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$SP_{Ajk} = \sum_{i=1}^{n_a} a_{ij}a_{ik} - \frac{\sum_{i=1}^{n_a} a_{ij}\sum_{i=1}^{n_a} a_{ik}}{n_a} \qquad (٤)$$

$$SP_{Bjk} = \sum_{i=1}^{n_b} b_{ij}b_{ik} - \frac{\sum_{i=1}^{n_b} b_{ij}\sum_{i=1}^{n_b} b_{ik}}{n_b} \qquad (٥)$$

در این روش فرض بر این است که ماتریس کوواریانس دو جامعه کل برابر است و ماتریس‌های کوواریانس دو جامعه نمونه بالا معرف ماتریس کوواریانس کل می‌باشند. در اینجا لازم است میانگین وزن‌دار دو ماتریس را به‌منظور داشتن تخمین بهتری از ماتریس کوواریانس کل محاسبه کرد.

ماتریس مشترک $[S]$ نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$S = \frac{S_A + S_B}{n_a + n_b - 2} \qquad (٦)$$

که در آن S_A و S_B ماتریس‌های کوواریانس دو جامعه و n_a و n_b تعداد نمونه‌های هر یک از دو جامعه A و B هستند.

با استفاده از ضرب معکوس ماتریس S در ماتریس D (ماتریس تفاضلات)، ماتریس ضرایب λ بدست می‌آید:

$$\lambda = S^{-1}D \qquad (۷)$$

تابع تفکیک نیز از حاصل‌ضرب ضرایب λ در مقدار متغیرهای هر نمونه تعریف می‌شود که به‌صورت زیر است:

$$R_i = \lambda_1 x_{1i} + \cdots + \lambda_5 x_{5i} \qquad (۸)$$

با استفاده از رابطه بالا می‌توان برای هریک از نمونه‌ها، مقادیر حاصل از آنالیز تفکیکی را محاسبه کرد. نمودار مقادیر حاصل از رابطه آنالیز تفکیکی (R_i) را رسم می-نماییم. مرز جدایش دو جامعه را می توان تصویر میانگین بردارهای میانگین دو جامعه در امتداد بیشترین تفکیک در نظر گرفت:

$$R_0 = (D^T S^{-1} D)/2 \qquad (۹)$$

که در آن S^{-1} امتداد بیشترین تفکیک و حاصل $D^TS^{-1}D$ بردار تصویر شده بر روی آن است. بصورت ساده‌تر می توان مقدار میانگین هر متغیر را (میانگین کل نمونه‌ها و نه نمونه-های یک دگرسانی خاص) در رابطه فوق قرار داد و مقدار R_0 را بعنوان حد تفکیک یا مرزجدایش دو جامعه بدست آورد. مقدار R_0 بر روی نمودار فراوانی مرز جدایش دو جامعه نشان می دهد. مقادیر R_A و R_B به عنوان حدگذار هستند که فرمول آن‌ها در زیر آورده شده‌است[۱۱].

$$R_A = \lambda_1 \overline{A_1} + \cdots + \lambda_5 \overline{A_5} \qquad (۱۰)$$

$$R_B = \lambda_1 \overline{B_1} + \cdots + \lambda_5 \overline{B_5} \qquad (۱۱)$$

اگر جدایش در محدوده بین R_A و R_B به درستی انجام نشده‌باشد اما در خارج از این محدوده تفکیک به طور کامل انجام شده‌باشد، می‌توان از عدم تفکیک در محدوده مورد-بحث چشم‌پوشی کرد. و ادعا کرد که تفکیک به خوبی انجام شده است[۱۱].

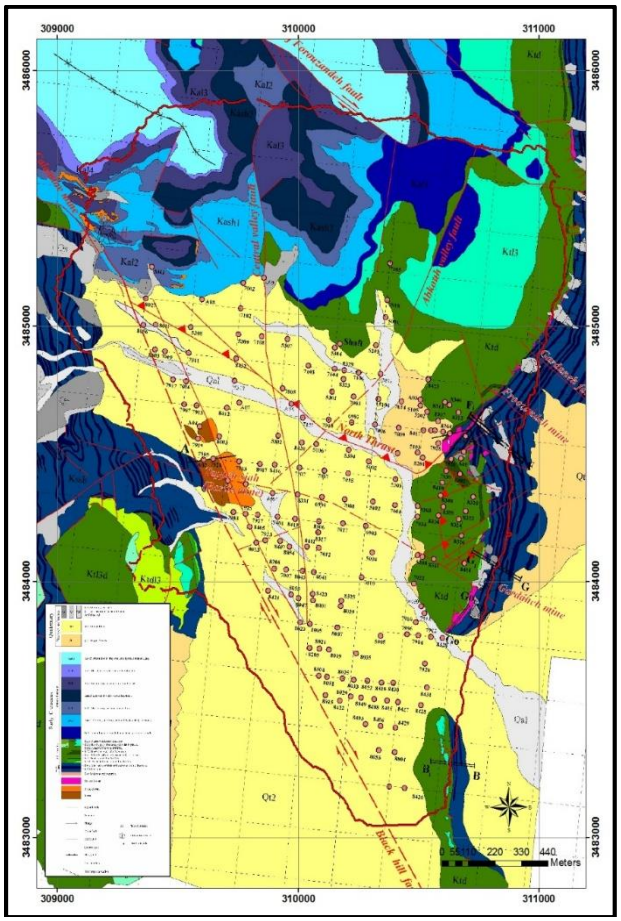
۳- زمین‌شناسی معدن مهدی‌آباد

کانسار مهدی‌آباد در فاصله تقریبی ۱۱۶ کیلومتری جنوب خاوری شهر یزد و در بخش مرکزی ایران مرکزی واقع شده است. نزدیک‌ترین روستا به ناحیه کانسار، روستای مهدی‌آباد بوده و مهم‌ترین راه ارتباطی کانسار مهدی‌آباد جاده آسفالته یزد-کرمان است.

کانسار سرب و روی مهدی‌آباد در صفحه مرکزی ایران که آهک‌ها و ماسه سنگ‌های کرتاسه سنگ‌های ژوراسیک را پوشیده‌اند، واقع شده است. پیشروی دریا ار ابتدای کرتاسه با کربنات‌ها و شیل آغاز شد. گسل‌های اصلی در طول کوهزایی کرمان فعال شد و منجر به ساختارهای هورست و گرابن در این مرکزی شد. این گرابن‌ها به عنوان حوضه رسوبی که در آن کانسار مهدی‌آباد بین گسل چاپدونی از شرق وگسل نایین-دهشیر از غرب تشکیل شد، عمل کردند. منطقه مهدی‌آباد توسط رسوبات آبراهه‌ای پوشیده شده است. لایه-های کرتاسه را می‌توان به سازند سنگستان در پایین، تفت در وسط و شکل‌گیری سازند آبکوه در بالای این دنباله چینه‌شناسی تقسیم کرد. این سازندها شامل سنگ‌های آواری سیلیسی و کربناتی هستند که از پایین به بالا میزان کربنات آن افزایش می‌یابد. کانسار مهدی‌اباد دو بخش اصلی دارد. بخش سولفیدی توسط رسوبات آبراهه‌ای (تا ۲۵۰ متر ضخامت) پوشیده شده است و بخش اکسیدی، در شمال غرب کانسار است و توسط گسل از بخش سولفیدی جدا شده است. کانی‌زایی سرب و روی در سازند تفت رخ داده است اما توسط گسل‌ها محدود شده است. از نظر ساختمانی منطقه معدنی مهدی‌آباد به صورت یک ناودیس باز با روند شمالی ـ جنوبی و میل محوری به سمت جنوب می‌باشد. بطورکلی بخش سولفیدی به همراه دولومیت یا آهک آنکریتی است. کانی‌زایی بخش اکسیدی درون سازند آبکوه و در آهک‌های کارستی برشی‌شده پوشاننده شیل‌های آهکی و اهک‌های مارنی تشکیل شده است. شکل ۳ نقشه زمین-شناسی کانسار مهدی‌آباد را نشان می‌دهد [۱۲].

بخش اکسیدی کانسار بین دو گسل تپه سیاه از غرب و فروزان‌ده از شرق واقع شده است. سازند آبکوه میزبان کانی-زایی این بخش کانسار بوده است. سنگ میزبان به شدت گسلی و برشی شده و به صورت محلی میلونیتی شده است. کانی‌سازی فقط در زیر سطح دگرشیبی که در آن دولومیتیزاسیون، توسعه سیستم شکستگی‌ها و کارستی شدن رخ داده توسعه یافته است. سنگ میزبان این بخش آهک و آهک دولومیتی کم منیزیم است. سولفیدهای اولیه کاملا اکسیده شده‌اند. بر اساس ترکیبات زون سولفیدی احتمالا سولفیدهای اصلی گالن، اسفالریت، باریت و پیریت بوده است. کانی‌های غیرسولفیدی اکسیدی را می‌توان به دو بخش کانه روی قرمز (شامل هیدروکسیدهای آهن، گوئتیت، هماتیت، همی‌مورفیت، هیدروزنکیت، اسمیت‌زونیت) و کانه روی سفید (شامل هیدروزنکیت، همی‌مورفیت، اسمیت-زونیت) تقسیم کرد. کانه قرمز روی غنی از روی (تا ۳۰٪)، آهن (تقریبا ۱۷٪) و سایر فلزات مانند سرب و ارسنیک است. کانه سفید روی عموما شامل روی با عیار بالا (تا ۴۰٪) و آهن پایین (۷٪)، سرب و ارسنیک است [۱۲].

میزبان بخش زیادی از زون سولفیدی کانسار مهدی‌آباد سازند تفت بوده است. کانی‌های اصلی در بخش سولفیدی گالن، اسفالریت، باریت، پیریت و کمی کالکوپیریت است. کانی‌زایی سولفیدی در یک سیستم رگه‌ای مرسوم یا با افق-های چینه‌سان رسوبگذاری همراه نبوده بلکه در یک سیستم پیچیده از برش و شکستگی‌ها اتفاق افتاده است [۱۲].



شکل ۳. موقعیت کانسار مهدی‌آباد بر روی نقشه زمین-شناسی[۱۲].

۴- معرفی داده‌های موجود

داده‌های مورد استفاده جهت تخمین منبع معدنی مهدی‌آباد شامل داده‌های حاصل از حفاری گمانه‌های اکتشافی (از قبیل مختصات، شیب، آزیموت و عمق حفاری گمانه ها، اطلاعات لیتولوژیکی، داده های عیاری، تصاویر مغزه گمانه-های حفاری شده و ...) داده‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، گزارشات زمین‌شناسی و اکتشافی تهیه شده در ادوار گذشته می‌باشد. این داده‌ها مربوط به بخش‌های اکسیدی، سولفیدی و مرکب است.

تفکیک بخش‌ها براساس شواهد بصری و کانی‌شناسی انجام شده است. در بخش‌های اکسیدی کانی‌های اکسیده از جمله سروزیت، اسمیت زونیت، مالاکیت و آزوریت و در بخش‌های اکسیدی کانی‌های سولفیده از جمله گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت وجود دارند. بخش مرکب (mix zone) ترکیبی از دو بخش اکسیدی و سولفیدی می‌باشد. به این صورت که بدون وجود توالی مشخصی ترکیبی از دو بخش وجود دارد. در همه نمونه‌ها تمامی اطلاعات در مورد عیار و نوع بخش وجود نداشت بنابراین هر نمونه‌ای که یکی از عیارها را نداشت و یا نوع بخش در آن مشخص نبودحذف گردید. و تعداد نمونه هااز ۳۶۹۱ به ۳۲۹۱ تقلیل یافت. که از این تعداد نمونه بخش اکسیدی شامل ۸۱۰، بخش سولفیدی ۱۴۶۴ و mix برابر با ۱۰۱۷ نمونه می باشد[۱۳].

۵- تفکیک بخش‌های اکسیدی و سولفیدی معدن مهدی‌آباد یزد

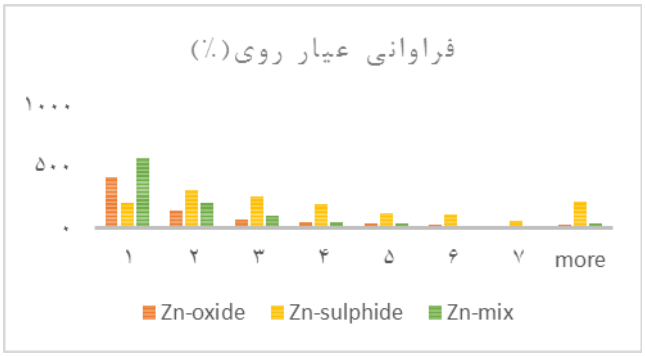
۵-۱ آمار تک‌متغیره

در این قسمت از آمار تک‌متغیره استفاده شده‌است. یعنی هریک از متغیرها به صورت جداگانه بررسی شد. همانطور که در شکل۴ مشخص می‌باشد، این داده‌ها اختلاط زیادی با هم دارند و اصلا بین آن‌ها تفکیکی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

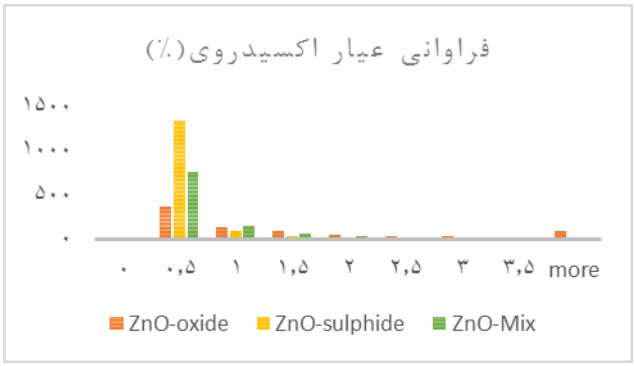
پس از بررسی هیستوگرام‌های مربوط به پارامترها این نتیجه حاصل شد که هیچکدام از متغیرها به تنهایی نمیتوانند عامل تفکیک و جدایش واحدهای اکسیدی و سولفیدی از یکدیگر باشند. به عبارت دیگر هیچکدام از پارامترهای مورد بررسی، دارای بازه مقادیر کاملاً متفاوت در هیستوگرام بر حسب نوع بخش نمی‌باشند.

۵-۲ مطالعات آماری چندمتغیره

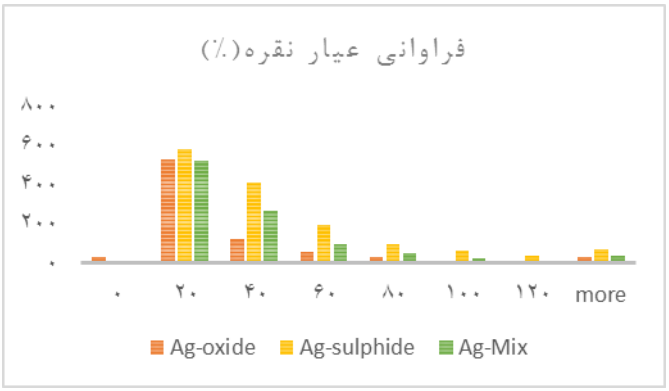
از آنجاییکه آمار تک متغیره توانایی تفکیک واحدهای اکسیدی و سولفیدی را ندارد، برای تفکیک این دو بر اساس پارامترهای یاد شده می توان از روش‌های آماری چندمتغیره استفاده کرد. روش مورد استفاده در راستای کمی‌سازی چندمتغیره و تفکیک بخش‌های اکسید وسولفید از یکدیگر، روش آنالیز تفکیکی می‌باشد. اساس این روش تفکیک و متمایز کردن دو جامعه تعریف شده از یکدیگر با استفاده از مجموعه‌ای از متغیرها است.



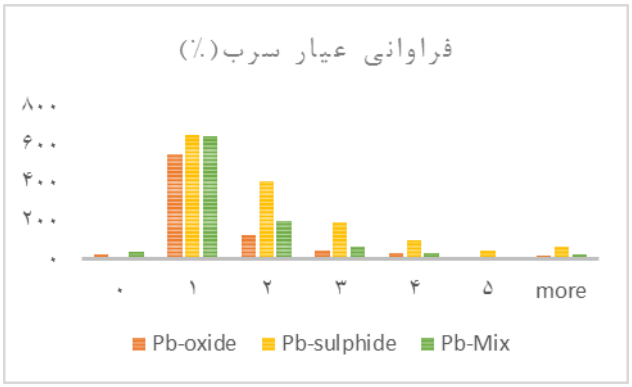
الف



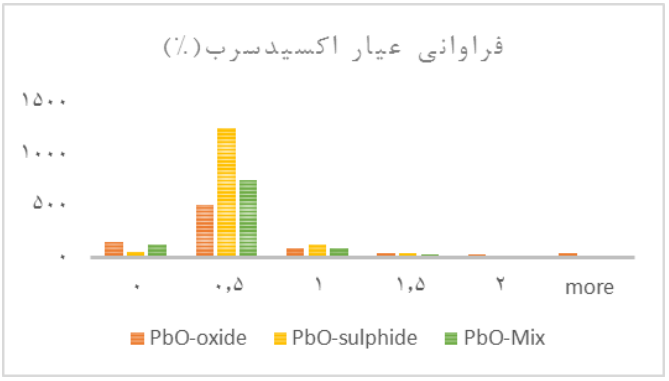
ب



ج



د



ه

شکل۴- فراوانی عیار برحسب درصد. الف) فراوانی عیارروی برحسب درصد. ب) فراوانی عیار اکسیدروی برحسب درصد ج) فراوانی عیار نقره برحسب ppm د) فراوانی عیار سرب برحسب درصد ه) فراوانی عیار اکسیدسرب برحسب درصد

جدول ۱. مشخصات آماری هریک از متغیرها به تفکیک در دو بخش اکسید و سولفید

		Zn	ZnO	Ag	Pb	PbO
اکسید	میانگین	1.98	1.45	24.66	0.92	0.39
	واریانس	8.16	4.78	1708	1.65	0.65
	ماکزیمم	28.7	19.33	410	9.91	8.36
	مینیمم	0.01	0.01	0	0	0
سولفید	میانگین	4.12	0.24	39.41	1.65	0.25
	واریانس	19.58	0.11	1715	2.78	0.11
	ماکزیمم	48	4.55	380	15.4	4.53
	مینیمم	0	0.01	0	0	0
مرکب	میانگین	1.71	0.47	29.25	0.98	0.27
	واریانس	7.94	0.69	1334	1.58	0.23
	ماکزیمم	29.95	9.24	330	9.9	5
	مینیمم	0.03	0.01	0	0	0

براساس رابطه ۳ بردار تمایز دو جامعه به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{bmatrix}1.98\\1.45\\24.66\\0.9\\0.39\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}4.12\\0.24\\39.41\\1.65\\0.25\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-2.14\\1.21\\-14.74\\-0.74\\0.14\end{bmatrix}$$

در اینجا لازم است میانگین وزن‌دار دو ماتریس را به منظور داشتن تخمین بهتری از ماتریس کوواریانس کل محاسبه کرد.(جدول ۲و۳). جدول ۴ ماتریس کوواریانس مشترک دو بخش اکسیدی و سولفیدی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ماتریس کوواریانس متغیرها برای جامعه آماری بخش اکسید

اکسید	Zn	ZnO	Ag	Pb	PbO
Zn	6602.11	4957.37	36481.9	1675.03	798.26
ZnO	4957.37	3866.97	27307.2	1266.06	612.04
Ag	36481.89	27307.24	1381764	30641.76	18127.7
Pb	1675.03	1266.06	30641.8	1332.54	685.55
PbO	798.26	612.04	18127.7	685.55	523.63

جدول ۳. ماتریس کوواریانس متغیرها برای جامعه آماری بخش سولفید

سولفید	Zn	ZnO	Ag	Pb	PbO
Zn	28646.43	1452.56	70914.4	6022.33	443.92
ZnO	1452.56	154.82	3802.53	302.01	39.37
Ag	70914.41	3802.53	2509260	64432.44	7355.14
Pb	6022.33	302.01	64432.4	4060.88	438.65
PbO	443.92	39.37	7355.14	438.65	166.16

جدول ۴. ماتریس کوواریانس مشترک متغیرهای دوبخش اکسید و سولفید

ماتریس مشترک	Zn	ZnO	Ag	Pb	PbO
Zn	15.51	2.82	47.27	3.39	0.55
ZnO	2.82	1.77	13.7	0.69	0.29
Ag	47.27	13.7	1712.6	41.85	11.22
Pb	3.39	0.69	41.85	2.37	0.49
PbO	0.55	0.29	11.22	0.49	0.3

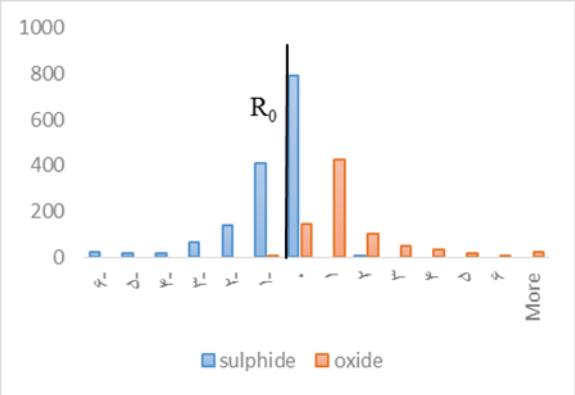
با استفاده از ضرب معکوس ماتریس S در ماتریس D (ماتریس تفاضلات)، ماتریس ضرایب λ بدست می آید(رابطه ۷):

$$\begin{bmatrix}0.13&-0.17&0.001&-0.2&0.2\\-0.17&0.9&-0.002&0.16&-0.76\\0.001&-0.002&0.001&-0.02&-0.01\\-0.2&0.16&-0.02&1.2&-1.09\\0.2&-0.76&-0.01&-1.09&5.83\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}4.12\\0.24\\39.41\\1.65\\0.25\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.32\\1.25\\-0.01\\-0.16\\0.43\end{bmatrix}$$

طبق رابطه ۸ تابع تفکیک بخش اکسید و سولفید نیز بصورت زیر بدست می‌آید

$$R_i = -0.32\times Zn + 1.25\times ZnO - 0.01\times Ag - 0.16\times Pb + 0.43\times PbO$$

مرز جدایش دو جامعه را می‌توان تصویر میانگین بردارهای میانگین دو جامعه در امتداد بیشترین تفکیک در نظر گرفت: با توجه به رابطه ۹ مقدار R_0 برابر با ۰/۲۵۹- بر روی نمودار فراوانی به عنوان مرز جدایش دو جامعه نشان داده‌شده-است.(شکل ۱۰)



شکل ۱۰. فراوانی مقادیر Ri حاصل از آنالیز تفکیکی جدا شده بر اساس نوع بخش بندی.

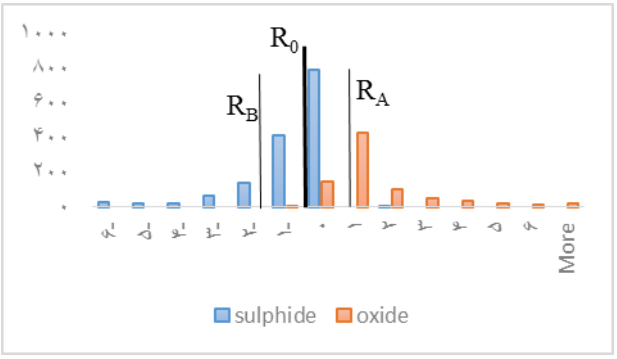
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده میشود، آنالیز تفکیکی توانسته است نسبت به هیستوگرام‌های اولیه بصورت بهتری اقدام به جداسازی بخش‌های اکسید و سولفید از یکدیگر نماید. ولی با این وجود تعدادی از نمونه‌ها درست تفکیک نشده‌اند. تعداد ۳۸ نمونه از نمونه‌های برداشته شده از بخش اکسیدی(۴/۶٪)، مقادیر R کوچکتر از R_0 بدست آوردند و در محدوده بخش سولفیدی قرار گرفتند و همچنین ۱۳۶ نمونه از نمونه‌های برداشته شده از بخش سولفیدی بدلیل R بزرگتر از R_0 در بخش اکسیدی طبقه‌بندی شد(۹/۳٪). اما سایر نمونه‌ها بطور مناسبی در بخش نظیر خود جانمایی شدند.

بر اساس روابط ۱۰ و ۱۱ مقادیر R_aو R_b به عنوان ناحیه گذار معرفی می شوند که اگر مقادیری که به درستی تفکیک نشده‌اند در این ناحیه قرار بگیرند می‌توان از آنها چشم‌پوشی نمود.

$$R_A = (-0.32 \times 1.98) + (1.25 \times 1.45) + (-0.01 \times 24.66) + (-0.16 \times 0.9) + (0.43 \times 0.39) = 0.99$$

$$R_B = (-0.32 \times 4.12) + (1.25 \times 0.24) + (-0.01 \times 39.41) + (-0.16 \times 1.65) + (0.43 \times 0.25) = -1.5$$

شکل ۱۱ فراوانی Riها را در محدوده ناحیه‌گذار نشان می‌دهد. اکنون که تفکیک به خوبی صورت گرفت می توان از آن برای تفکیک داده‌های بخش مرکب استفاده نمود. طبق این تابع داده‌هایی که مقادیر Ri آنها کمتر از ۰/۲۵۹- باشد در بخش سولفیدی قرار دارند و آنهایی که مقادیر Ri آنها بیشتر از۰/۲۵۹ است متعلق به بخش اکسیدی می باشد.



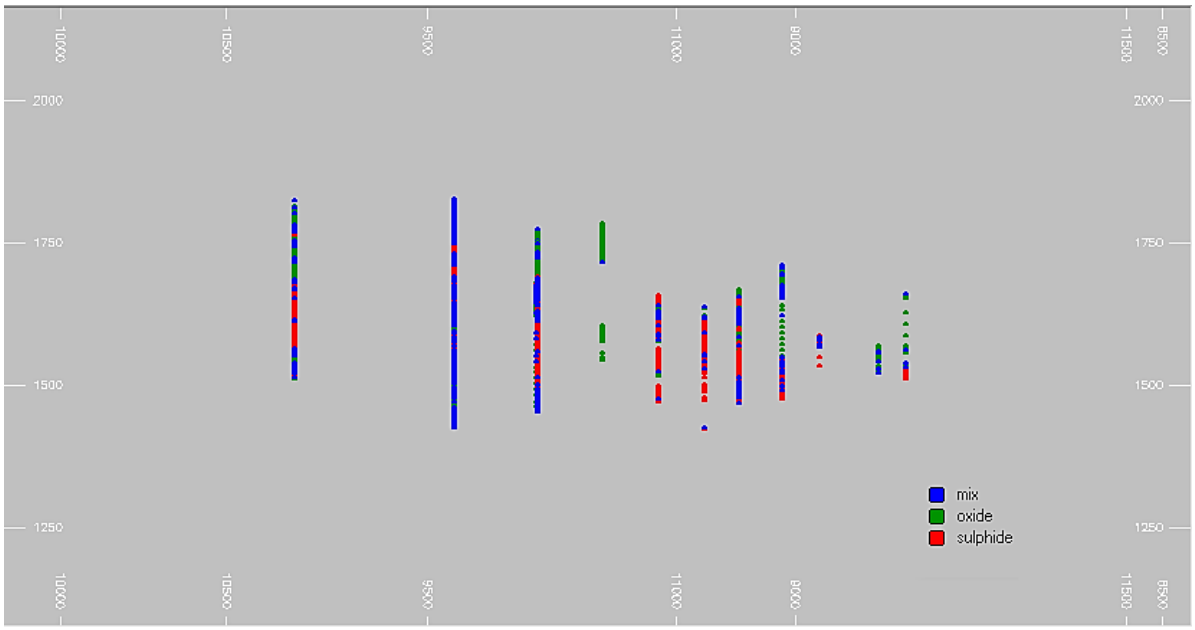
شکل۱۱. فراوانی مقادیر Ri نشان دهنده ناحیه گذار

شکل ۱۲ نحوه قرارگرفتن بخش مرکب را درکناربخش اکسیدی و سولفیدی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می-شود، قسمت قابل توجهی از شکل به رنگ آبی و متعلق به بخش مرکب است که نشان‌دهنده عدم‌قطعیت اکسید و سولفید می‌باشد و نمی‌توان بین بخش اکسیدی و سولفیدی تفکیکی قائل شد. استفاده از آمارچندمتغیره و نسبت دادن یک مقدار R_i به هر نمونه بخش قابل توجهی از عدم‌قطعیت اکسیدی و سولفیدی را برطرف کرده‌است و منجر به تفکیک کامل منطقه مهدی‌آباد به دو بخش اکسیدی و سولفیدی شد. و طبق شکل ۱۳ بخش مرکب هم باتوجه به مقدار R_i تفکیک شده‌است که کمک شایانی به تعیین مدل بلوکی استخراجی و طراحی فلوشیت‌های کارخانه فرآوری می‌شود.

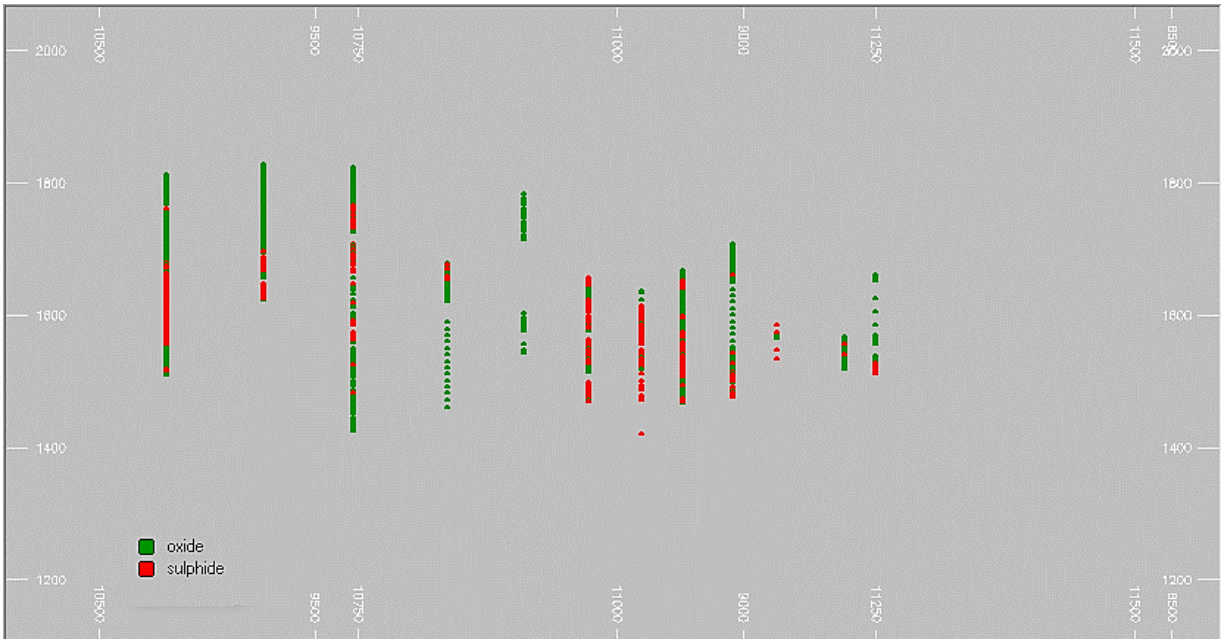
۶- نتیجه گیری

آنالیز تفکیکی به ازای هر داده ضریبی منحصر به فرد مشخص می‌کند که منجر به تفکیک داده‌ها می‌شود. در بخش مرکب معدن مهدی‌آباد نمی‌توان روش استخراج سرب و روی اکسیدی و یا سرب و روی سولفیدی را به تنهایی به کاربرد، زیرا نحوه استخراج و فرآوری در این دو بخش کاملا متفاوت می‌باشد. از آنجایی که این آنالیز برای منطقه مورد مطالعه به خوبی عمل کرده و بخش مرکب را تا حد ممکن به دو بخش اکسیدی و سولفیدی مجزا کرده‌است، میتوان از نتیجه آن برای مرحله فرآوری استفاده کرد. در عمل تفکیک دقیق زون مرکب به دو زون اکسیدی و سولفیدی امکان‌پذیر نیست زیرا بخش‌هایی وجود دارد که کانی‌های اکسیدی و سولفیدی کنار هم هستند و مرزبندی کامل را

نمی‌توان انجام داد. با این‌حال این تفکیک می‌تواند کمک زیادی به جداسازی زون‌ها از هم کند، زیرا با علم به اینکه منطقه اکسیدی و یا سولفیدی است روش‌های استخراج و فرآوری مربوط به خودش به کارگرفته می‌شود و درنتیجه در زمان و هزینه صرفه جویی می‌شود. پس ژئومتالورژی به عنوان واسطه ی مرحله اکتشاف وفرآوری مفید واقع شده است.



شکل ۱۲. نمایش بخش اکسیدی، سولفیدی و مرکب در منطقه مهدی‌آباد. رنگ قرمز نشان‌دهنده بخش سولفیدی، رنگ سبز نشان‌دهنده بخش اکسیدی و رنگ آبی نشان‌دهنده بخش مرکب می‌باشد.



شکل ۱۳. تفکیک بخش مرکب به دوبخش اکسیدی وسولفیدی. رنگ سبز نشان‌دهنده بخش اکسیدی و رنگ قرمز نشان‌دهنده بخش سولفیدی می‌باشد.

۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از آقای مهندس مهدی احدی و شرکت کوشامعدن بدلیل فراهم نمودن اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی می نماییم.

۸- مراجع

1. Cai, D., et al. (2008). **"Training linear discriminant analysis in linear time"** Data Engineering, 2008. ICDE 2008. IEEE 24th International Conference on, IEEE.
2. Roshani, P., et al. (2013). **"Objective based geochemical anomaly detection—application of discriminant function analysis in anomaly delineation in the Kuh Panj porphyry Cu mineralization (Iran)."** Journal of Geochemical Exploration 130: 65-73.
3. Rayan Tibshirani, 2013. **"Linear regression of indicators,linear discriminant analysis"**
4. Omid Asghari and Ardeshir Hezarkhani, **"Applying Discriminant Analysis to Separate the Alteration Zones Within the Sungun Porphyry Copper Deposit"**, Journal of Applied Sciences, 2008
5. HEZARKHANI A.*, TAHMASBI P., ASGHARI O., 2010, Separating the Sungun copper deposit alteration zones by applying artificial neural network, GEOSCIENCES FALL 2010 , Volume 20 , Number 77; Page(s) 41 To 46.
6. M Abbaszadeh, A Hezarkhani, S Soltani-Mohammadi, 2013, An SVM-based machine learning method for the separation of alteration zones in Sungun porphyry copper deposit, Chemie der Erde-Geochemistry

۷. محمدی، سیوان؛ دی ۱۳۹۱؛ **"خواص سنجی و توسعه فرآیند استحصال روی از بخش کم‌عیار کانسنگ اکسیده مهدی‌آباد"** پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. رشته مهندسی معدن- فرآوری موادمعدنی. دانشگاه صنعتی امیرکبیر. دانشکده مهندسی معدن و متالورژی.

8. SGS Minerals services- T3 SGS 354. www.SGS.com/mining
9. MacDonald, M., Adair, B., Bradshaw, D, Dunn,M., Latti, D., 2011**. "Learnings from five years of on-site MLA at Kennecott Utah Copper Corporation"**. 10th Int. Congr. Appl. Miner. Trondheim 2011.
10. SGS Minerals Services. Technical Bulletin 2010-1.
11. Davis,J.C.,2002, **"Statistics and Data Analysis in Geology"**.3rd End., John Wiley and Sons Publ., USA., ISBN:978-0-471-17275-8,pp:638
12. J. Monthel, J.P.Cassard, Ph.Lagny, H.Jahanshahi, J.Nomatian and P.Safaie," Mehdiabad **"lead-zinc deposit: geological assessment report"**, May1994

۱۳. گزارش تخمین منبع معدنی کانسار سرب و روی مهدی-آباد. مهندسین مشاور کوشامعدن. آذر۱۳۹۲