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

دوره هفتم، شماره شانزدهم، سال ۱۳۹۱، صفحه ۲۵ تا ۳۲
Vol. 7, No. 16, 2012, pp. 25-32

استفاده از آنالیز تمایز بر روی داده‌های IP/RS برای جداسازی زون‌های پرعیار مس اززون‌های کم عیار - مطالعه موردی کانسار مس پورفیری چاه‌فیروزه

امین شیخ‌زاده[۱]، احمدرضامختاری*[۲]، نادرفتحیان‌پور[۳]، نادر صاحب‌الزمانی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف، دانشگاه صنعتی اصفهان، amin.sh.zadeh@gmail.com
۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ar.mokhtari@cc.iut.ac.ir
۳- دانشیاردانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان، fathian@cc.iut.ac.ir
۴- کارشناس شرکت ملی صنایع مس ایران، تهران، nsahebzamani@gmail.com

(دریافت ۱۰ مهر ۱۳۹۰، پذیرش ۱۱ دی ۱۳۹۰)

چکیده

به منظور بهره‌برداری حداکثر از داده‌های خام ژئوفیزیکی و تفسیردقیق منطبق بر واقعیت‌های زمین‌شناسی این داده‌ها لازم است تا مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوفیزیکی و کالیبراسیون آن با مغزه‌های حفاری گمانه‌های اکتشافی در هرنوع تیپ کانی‌سازی خاصی انجام شود. مشکل عمده در کانسارهای فلزی به خصوص کانسارهای مس پورفیری وجود زون‌های با IP بالا در مقاطع مدل‌سازی ژئوفیزیکی است که در حفاری‌ها به صورت زون‌هایی با عیار مس پایین و اغلب پیریتی ظاهر می‌شوند. در این پژوهش سعی شده است تا با تلفیق داده‌های IP/RS با اطلاعات زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی و آلتراسیون) حاصل از گمانه‌های حفاری در منطقه چاه‌فیروزه و به‌کارگیری آنالیز تمایز در این کانسار مناطق آنومال از مناطق زمینه جدا شود. با بکاربردن متغیرهای موجود و بهینه، نتایج آنالیز تمایز بهبود یافته و در نهایت منجر به ارائه یک مدل آماری خطی برای منطقه شده که با استفاده از آن می‌توان زون‌های با عیار مس بالا را از مناطق با عیار مس پایین که IP بالایی دارند جدا کرد. با اعتبارسنجی داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی حدود ۹۰ درصد کلاس‌بندی درست برای گروه زمینه و حدود ۸۷ درصد کلاس‌بندی درست برای گروه آنومالی به‌دست آمده است.

کلمات کلیدی

آنالیز تمایز، مس پورفیری، کانسار چاه‌فیروزه، داده‌های IP/RS

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون کانسارهای تیپ پورفیری که به عنوان اصلی‌ترین منابع مس دنیا شناخته می‌شوند، مطالعات اکتشافی این کانسارها امری مهم است. شناسایی کلیدهای اکتشافی در این نوع کانسارها و به‌کارگیری آنها در کانسارهای مشابه می‌تواند منجر به افزایش احتمال کشف و کاهش هزینه‌های اکتشاف شود. در این میان استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی که با مغزه‌های حفاری گمانه‌های اکتشافی تلفیق و کالیبره شده‌اند اهمیت زیادی دارد؛ زیرا که اینکار به تفسیر دقیق منطبق بر واقعیت‌های زمین‌شناسی داده‌های ژئوفیزیکی منجر خواهد شد.

مشکل عمده در اکتشافات ژئوفیزیکی کانسارهای فلزی به خصوص نوع پورفیری وجود زون‌های با IP بالاست که در حفاری‌ها به صورت زون‌هایی با عیار مس پایین و اغلب پیریت‌دار ظاهر می‌شوند. برای شناسایی و جداسازی این زون‌ها از مناطق پرعیار می‌توان از روش ژئوفیزیکیIP طیفی۱یا مقاومت ویژه مختلط۲ استفاده کرد [۱]. Xiang و همکاران ادعا کردند که با یک سیستم ترکیبیIP-EM می‌توان منابع مناسب پاسخ‌های IP را پیش‌بینی کرد [۲]. روش دیگر و کم هزینه‌تر برای این کار استفاده از روش‌های آماری چند متغیره است. آنالیز تمایز به عنوان یک مدل پیشگو-کننده می‌تواند در جداسازی و شناسایی مناطق پرعیار از مناطق کم عیار با استفاده از تلفیق داده‌های مختلف اکتشافی بکار گرفته شود.

در این مقاله سعی شده است تا با وارد نمودن متغیرهای موجود برداشت شده در آنالیز تمایز بر روی داده‌های اکتشافی منطقه چاه‌فیروزه نتایج حاصل را بهبود بخشیده و به شناسایی مناطق کانی‌زایی شده از مناطق عقیم که در مقاطع ژئوفیزیکی به صورت آنومالی ظاهر می‌شوند پرداخته شود. سپس یک مدل خطی ارائه می‌شود که با استفاده از آن بتوان نمونه‌های جدید را بر اساس این داده‌ها در دو گروه آنومالی و زمینه طبقه‌بندی کرد.

۲- مبانی آنالیز تمایز

هدف آنالیز تمایز به‌دست آوردن قواعدی است که جداسازی بین گروه‌های مشاهده شده را تشریح می‌کند. علاوه بر این، اجازه می‌دهد تا مشاهدات جدید داخل یکی از گروه‌های شناخته شده و معلوم (استاندارد) طبقه‌بندی شود. این روش براساس میانگین واقعی و ماتریس مشترک داده‌ها یا قسمتی از داده‌ها است[۳].

درواقع آنالیز تمایز یافتن یک تبدیل که بیشترین اختلاف بین میانگین دو گروه چند متغیره نسبت به واریانس چند متغیره-ی داخل دو گروه را می‌دهد شامل می‌شود. اگر به دو گروه به عنوان تشکیل‌دهنده‌ی خوشه‌های نقاط در فضای چند متغیره توجه شود، باید دنبال یک چرخش بود که در امتداد آن دو خوشه بیشترین جدایش را دارند. بنابراین تابع تمایز یک پیوند اضافی میان آمار چند متغیره و یک متغیره ایجاد می-کند [۴].

شاید بتوان گفت کاربرد آنالیز تمایز در اکتشاف مواد معدنی به صورت ترکیبی با آنالیز فاکتوری، آماره‌ی بایزین و دیگر روش‌های آماری توسط هریس معرفی شده است که از آنالیز تمایز به عنوان ابزاری برای ارزیابی رابطه‌ی متغیرهای زمین‌شناسی در تعیین احتمال کانی‌زایی منطقه‌ای استفاده کرد [۵]. این روش سپس کاربرد وسیعی در اکتشاف پیدا کرد که چند نمونه از کاربرد آن در کارهای مختلف اکتشافی آمده است:

دبلیو رز (۱۹۷۲) بیش از ۱۸ متغیر زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی را در یک تابع تمایز برای تشخیص توانایی مناسب بودن سنگ‌ها برای کانسارهای مگنتیتی نوع کرنوال در ایالت پنسیلوانیا ترکیب کرد و درنهایت مناطق مستعد نزدیک بویرتاون و گتیسبورگ را شناسایی کرد [۵].

وایت‌هد و گووت (۱۹۷۴) توانستند با استفاده از روش آنالیز تمایز بر روی داده‌های ژئوشیمی سنگی عناصر ردیاب، یک آنومالی سرب-روی با وسعت ۱۲۰۰ فوت در بالا و ۴۰۰۰ فوت به صورت جانبی در سنگ‌های کوارتز- فلدسپار اطراف کانسار معادن هیت استیل را کشف کنند. این تمایز بر اساس اختلاف متغیرهای موجود در سنگ‌های بالادست و پایین-دست کانسار انجام شد [۶].

دیوی و همکارانش در سال ۱۹۷۹ از آنالیز تمایز در کانسارهای ماسیوسولفیدی کانادا برای شناسایی مناطق آنومال Cu, Pb, Zn, Ag, Au استفاده کردند [۷].

فیدیکوف و تورک در سال ۱۹۸۳ از آنالیز تمایز مرحله‌ای جهت شاسایی عناصری که در سنگ‌های بالادست، پایین دست و نیز رخنمون‌های کانسار سولیوان کانادا دارای غنی-شدگی هستند استفاده کردند [۸]. در سال ۱۹۸۸ وایت‌هد و دیویس از این روش در اکتشاف طلا استفاده کردند [۹].

در سال ۱۹۹۱ فریرا و دیگران با انجام یک آنالیز تمایز بر روی داده‌های حاصل از تجزیه ژئوشیمیایی برای عناصر اصلی و ردیاب توانستند بازالت‌های پیکریتی دگرسان شده و کانی-زایی شده در کمربند فلززایی آگاسیز را از بازالت‌های پیکریتی

دگرسان نشده جدا کرده و ۵ منطقه‌ی آنومال را مشخص کند[۱۰].

تیبجاس و دیگران آنالیز تمایز را برای شناسایی سن زمین-شناسی سنگ‌های ولکانوکلاستی منطقه‌ی شمال غربی کروتریا بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی بکار بردند [۱۱]. واراداچاری و موخرجی در سال ۲۰۰۴ با آنالیز تمایز و با استفاده از ۶ متغیر توانستند انواع کانی‌های رسی را برای ۴۶۴ کانی از قبل آنالیز شده مشخص کنند [۱۲].

اشنایدر و همکارانش با استفاده از روش آنالیز تمایز بر روی داده‌های ژئوشیمیایی دره داکار شمال غرب آفریقا، رابطه سکانس‌های مختلف توربیدیتی در دره‌های زیر دریایی را مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. طهماسبی و دیگران آنالیز تمایز را به منظور جداسازی آلتراسیون‌های معدن مس سونگون اهر با استفاده از درصد کانی‌ها و ترکیبات شیمیایی در نمونه‌های سنگی منطقه بکار برده‌اند [۱۴] .

فرض کنید دو جامعه معلوم وجود داشته باشد که n متغیر (خاصیت) مشترک از هر دو جامعه اندازه‌گیری شده باشد. با آنالیز تمایز رابطه‌ای مانند معادله ۱ به‌دست می‌آید:

$$D = a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n \qquad (۱)$$

که در آن x_1 تا x_n همان n متغیر و a_1 تا a_n ضرایب تاثیر بدست آمده از آنالیز برای هر کدام از متغیرها است.

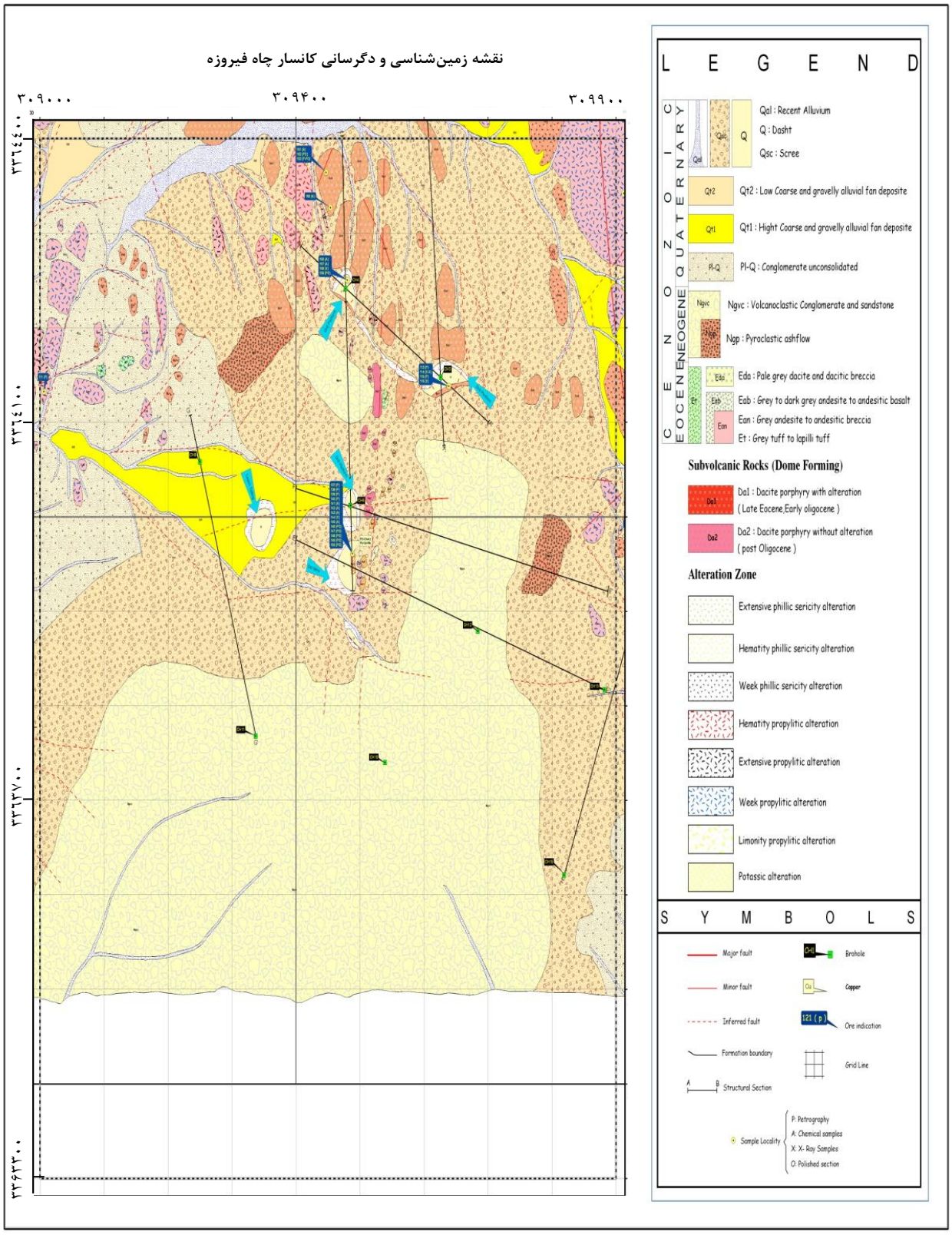
در واقع آنالیز تمایز یک ترکیب خطی از کل متغیرها می‌دهد. همچنین برای تمایز لازم است تا یک مقدار بحرانی مانند D_0 تعریف شود. اگر مقادیر متغیرهای x_1 تا x_n برای نمونه‌ی جدید اندازه‌گیری شود و در معادله‌ی تمایز D قرار داده شود، مقدار حاصل باید با مقدار بحرانی D_0 مقایسه شود و بر اساس آن قضاوت شود که این نمونه جدید به کدام یک از جوامع معلوم تعلق دارد. مثلا اگر $D>D_0$ باشد این نمونه در جامعه‌ی اول و اگر $D<D_0$ باشد در جامعه‌ی دوم قرار می‌گیرد. با استفاده از توابع بدست آمده برای تمایز و بکاربردن دوباره‌ی آن برای جوامع معلوم می‌توان درصد خطای آنالیز تمایز انجام شده را محاسبه کرد [۱۵]. روش دیگر برای انجام آنالیز تمایز این است که رابطه (تابع) خطی متغیرها را برای دو (یا چند) جامعه بدست آورد، سپس با جایگذاری ویژگی‌های نمونه جدید در این روابط، نمونه در جامعه‌ای قرار می‌گیرد که بیشترین مقدار را بدست دهد. در این مطالعه از این روش استفاده شده است.

نکته‌ای که در تجزیه و تحلیل تفریقی (آنالیز تمایز) لازم است به آن توجه شود این است که جوامع معلوم (استاندارد) باید توسط کارشناسان انتخاب شوند. این جوامع باید طوری انتخاب شوند که فاقد حالت‌های حدواسط باشند. دراین صورت می‌توان به تابع تمایز مناسبی دست یافت، و جداسازی را به نحو مطلوب انجام داد [۱۵].

۳- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

کانسار مس چاه فیروزه در همسایگی روستای کهتوکرها و در پیرامون ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان شهربابک در استان کرمان و در مسیر جاده آسفالتی شهربابک به انار واقع شده است. پیوند تنگاتنگ پدیده‌های ولکانوپلوتونیسم با تکتونوماگمایی باعث پیچیدگی‌های کانی سازی در این کانسار شده است. زیرا بجز رخساره دگرسانی پروپیلیتی که با رنگ سبز خود به‌طور کامل آشکار است، دگرسانی‌های تیپ سیلیسی-آرژیلی هماتیتی شده بصورت غیر قابل تفکیک بگونه‌ای ظاهر می‌شود که شناخت نوع کانی‌سازی را بر کارشناس مشکل می‌سازد. در کانسارچاه فیروزه و پیرامون آن یک سری گنبدهای حرارتی۳ با ریخت استوک و آپوفیزهای کوچک در پایین‌تر از سطح زمین که به صورت گروهی - خطی آرایش یافته‌اند موجب بهم ریختگی ساختار کانی سازی و تفکیک دگرسانی فیلیک از پروپیلیتی شده‌اند. به هر حال منشأ کانی سازی با سیالات و محلول‌های باردار و تأخیری استوک‌های داسیت پورفیر ارتباطی تنگاتنگ داشته و عنصرهای تکتونیکی موجب جایگیری آنها در سطوح درزه و شکاف سنگ‌ها در ابعاد و اندازه مختلف گرفته تا فیلم‌ها و تیغه‌های نازک با ترکیب آهن‌دار که آشکارا در جهات مختلف یکدیگر را قطع کرده‌اند، شده است. تراکم رگچه‌ها و تیغه‌های آهندار همراه با دگرسانی آرژیلی که در جهات مختلف یکدیگر را قطع کرده‌اند، در ظاهر یادآور کانی‌سازی تیپ استوک ورک پورفیری هستند [۱۶]. شکل ۱ نقشه زمین شناسی محدوده کانسار را نمایش می‌دهد.

در این منطقه نزدیک به ۴۲ حلقه گمانه اکتشافی حفر شده است که البته داده‌های ۲۶ گمانه در دسترس است. همچنین بر روی منطقه دو پروفیل ژئوفیزیکی IP/RS برداشت شده است. داده‌های گمانه‌ها شامل موقعیت، شیب و آزیموت، اطلاعات عیار عناصر Mo, Zn, Pb, Fe, CuO, Cu و نیز نوع سنگ و نوع آلتراسیون در هر گمانه می‌شود. داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی بر روی دو پروفیل با امتداد شرقی- غربی با روش pole-dipole نیز موجود است.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی محدوده کانسار چاه‌فیروزه[۱۶]

۴- مواد و روش تحقیق

هدف از انجام آنالیز تمایز در این پژوهش جدایش مناطق با عیار اقتصادی مس از مناطق با عیار پایین بر اساس داده‌های ژئوفیزیکی IP/RS و کمک‌گیری از اطلاعات موجود در گمانه‌های حفاری شده یعنی عیار، جنس سنگ و نوع آلتراسیون در کانسار چاه‌فیروزه است. در واقع به‌دنبال یک مدل آماری خطی هستیم تا بتوان با استفاده از آن مناطق کم عیار مس که IP بالایی دارند (مانند مناطق پیریت‌دار) را از مناطق آنومال جدا کرد.

در ابتدا برای رسیدن به این هدف داده‌های مورد نیاز به صورت فایل ورودی تهیه شدند. مدل سه بعدی از عیار عناصر، آلتراسیون و سنگ‌شناسی منطقه ساخته و با مشخص کردن مکان مقاطع IP/RS بر روی این مدل، داده‌های هم موقعیت عیار، لیتولوژی و آلتراسیون ژئوفیزیکی استخراج شدند. مدل‌های ساخته شده از عیار، سنگ‌شناسی و آلتراسیون این منطقه، پورفیری بودن این کانسار را تائید می‌کند. در ادامه مدلسازی معکوس ژئوفیزیکی بر روی مقاطع برداشت شده از کانسار انجام شده و در نهایت شبکه یکسان از داده‌های عیار، سنگ‌شناسی، آلتراسیون و مدل‌های IP/RS ساخته شد.

برای ساخت مدل خطی آنالیز تمایز در ابتدا دو گروه برای انجام آنالیز تمایز تعریف شد، یعنی گروه آنومالی و گروه زمینه. برای این منظور عیار مس ۰/۱۵ درصد به عنوان حد آستانه درنظر گرفته شد و نمونه‌هایی که عیار مس در آن‌ها بیشتر از این مقدار بود به عنوان گروه آنومال (کانی زایی شده) و نمونه‌هایی که عیار مس در آن‌ها کمتر از این مقدار بود به عنوان گروه زمینه در نظر گرفته شد.

در مرحله اول آنالیز تمایز تنها با استفاده از داده‌هایIP و RS انجام شد که نتایج خوب و قابل قبولی بدست نیامد (کمتر از ۶۰ درصد تمایز درست برای گروه‌ها). در ادامه برای بهبود مدل تصمیم گرفته شد تا متغیرهای سنگ‌شناسی و آلتراسیون به عنوان دیگر متغیرهای پیش‌گو کننده وارد آنالیز تمایز شوند. چون این دو متغیر، متغیرهای کیفی می‌باشندبنابراین لازم است تا به متغیرهای کمی تبدیل شوند. در ابتدا همبستگی هر نوع سنگ موجود در منطقه با عیار مس محاسبه شده تا با استفاده از آن امتیاز مربوط به هر نوع سنگ در آنالیز تمایز آورده شود. برای محاسبه این همبستگی از داده‌های گمانه‌های حفر شده در منطقه استفاده شده است.

از آنجا که یکی از متغیرها، متغیر کیفی (لیتولوژی و آلتراسیون) و دیگری کمی (عیار مس) است از ضریب همبستگی Point-biserial(r_{pb}) استفاده شده است.

ضریب همبستگی Point-biserial(r_{pb}) زمانی استفاده می‌شود که یک متغیر(برای مثال Y) از نوع باینری (دو بخشی) و متغیر دوم (X) یک متغیر پیوسته باشد. Y می‌تواند هم به طور طبیعی باینری باشد، مانند جنسیت، و هم یک متغیر باینری ساختگی باشد [۱۷].

برای محاسبه r_{pb} فرض می‌شود متغیر باینریY دو مقدار صفر و یک را دارد. اگر مجموعه داده‌ها به دو گروه یک با مقادیر «یک» و گروه ۲ با مقادیر «صفر» روی Y تقسیم‌بندی شود، ضریب همبستگی Point-biserial به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$r_{pb} = \frac{M_1 - M_0}{S_n}\sqrt{\frac{n_1 n_0}{n^2}} \qquad (۲)$$

که در آن M_1 میانگین متغیر پیوسته X برای همه داده‌های گروه ۱ و M_0 میانگین متغیر پیوسته X برای همه داده‌های گروه ۲ می‌باشد. همچنین n_1 تعداد داده‌های موجود در گروه ۱، n_0 تعداد داده‌های موجود در گروه ۲، n تعداد کل داده‌ها و S_n انحراف معیار مجموعه‌ی داده‌هاست [۱۱]. یعنی:

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (۳)$$

برای محاسبه این ضرایب همبستگی، نوع سنگی که همبستگی آن با مس مد نظر است به عنوان گروه یک انتخاب و بقیه انواع سنگ‌ها به عنوان گروه دو در نظر گرفته و r_{pb} طبق روابط بالا برای آن نوع سنگ محاسبه شده است. این کار برای تمامی انواع سنگ‌ها و انواع آلتراسیون‌ها انجام شده است. نتایج حاصل از این مرحله در جداول۱ و ۲ آورده شده است.

با توجه به ضرایب بدست آمده برای کانسار چاه‌فیروزه عیار مس بیشترین همبستگی را با سنگ‌های کوارتزمونزودیوریتی و کمترین همبستگی را با سنگ‌های حاشیه‌ای آندزیتی دارد. به تعبیر دیگر کانی‌زایی بیشتر در توده نفوذی و در مرکز محدوده مورد مطالعه شکل گرفته است. همچنین برای این کانسار بیشترین همبستگی آلتراسیون با مس برای آلتراسیون نوع پتاسیک است که با مدل‌های سه بعدی ساخته شده به-

طور کامل مطابقت دارد و پورفیری بودن تیپ این کانسار را تائید می‌کند.

جدول ۱: ضرایب همبستگی بین Cu و لیتولوژی

نوع سنگ	r_{pb}	P value
آندزیت	-۰/۳۱	<۰/۰۰۰۱
داسیت	-۰/۱۲	<۰/۰۰۰۱
دیوریت	-۰/۰۹	<۰/۰۰۰۱
کوارتزدیوریت	-۰/۰۸	<۰/۰۰۰۱
کوارتزمونزودیوریت	+۰/۴۹	<۰/۰۰۰۱
توف	-۰/۰۳	<۰/۰۰۰۱

جدول ۲: ضرایب همبستگی بین Cu و آلتراسیون

نوع آلتراسیون	r_{pb}	P value
فیلیک	-۰/۲۶	<۰/۰۰۰۱
پتاسیک	+۰/۳۸	<۰/۰۰۰۱
پروپلیتیک	-۰/۱۴	<۰/۰۰۰۱

پس از محاسبه این ضرایب، همین مقادیر به عنوان امتیاز هر نوع سنگ و آلتراسیون درنظر گرفته شد. سپس مقادیر کلیه متغیرهای IP, RS, سنگ‌شناسی و آلتراسیون برای استاندارد کردن داده‌ها به بازه [۱/۰۰۱و۰/۰۰۱] انتقال داده شد. از مقادیر بدست آمده Ln گرفته شد تا جامعه داده‌های ورودی تا حد امکان توزیع نرمال داشته باشد. در نهایت این مقادیر وارد آنالیز تمایز شد.

۵- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج انجام آنالیز تمایز برروی داده‌ها آورده شده است. با اعمال تغییرات بالا آنالیز تمایز در مرحله دوم با تعریف کلاس‌های متعدد و جدید انجام شد.ملاک کلاس‌بندی عیار حدهای اقتصادی مورد استفاده در کارهای اکتشافی و تجربیات شخصی در کارهای ژئوفیزیکی بوده است. برای این کار از ۶، ۴ و ۲ کلاس که به صورت زیر تعریف شده است استفاده شد.

کلاس‌های تعریف شده برای آنالیز تمایز با ۶ کلاس:

A1: مس زیاد، IPکم؛ A2: مس زیاد IP متوسط؛ A3: مس زیاد، IP زیاد B1: مس کم، IPکم؛ B2: مس کم، IPمتوسط؛ B3: مس کم، IP زیاد

کلاس‌های تعریف شده برای آنالیز تمایز با ۴ کلاس:

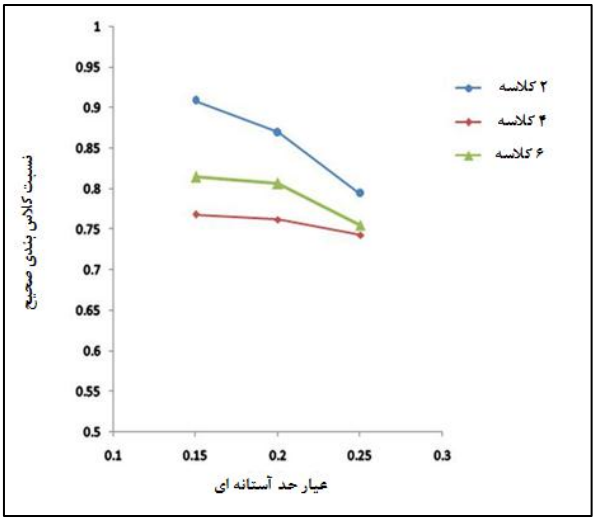
A=مس زیاد

B1: مس کم، IPکم؛ B2: مس کم، IPمتوسط؛ B3: مس کم، IP زیاد

کلاس‌های تعریف شده برای آنالیز تمایز با ۲ کلاس:

A: مس زیاد (آنومالی) B: مس کم (زمینه)

در این مرحله آنالیز تمایز به سه صورت انجام گرفت؛ یکبار با حد آستانه مس ۰/۱۵ درصد، بار دوم با حد آستانه ۰/۲ درصد و درنهایت با عیار ۰/۲۵ که گروه‌های آنومالی و زمینه بر اساس این سه عیار حد تعریف شده است. برای بررسی چگونگی تغییر نتایج آنالیز تمایز نسبت بهتغییرات عیار حد، نسبت کلاس‌بندی درست کل بر اساس حد آستانه‌های مختلف و به تفکیک کلاس‌بندی‌های مختلف برای کانسار چاه‌فیروزه در نمودار شکل۲ آمده است. نسبت کلاس‌بندی صحیح کلی برابر با تعداد کل نمونه‌های درست کلاس‌بندی شده به کل نمونه‌ها است.



شکل ۲: نمودار نسبت کلاس‌بندی صحیح کلی در حالت‌های مختلف

باتوجه به نتایج نمودار شکل۲، آنالیز تمایز با دو کلاس و حدآستانه ۰/۱۵ درصد به عنوان مدل پیشگو کننده بهترین میباشد ولیکن به‌دلیل اختلاف ناچیز آن با نتایج حدآستانه ۰/۲ درصد و نزدیکی بیشتر این عیار به عیار حد اقتصادی این مقدار در آنالیز تمایز انتخاب و بکار گرفته شد. بر این اساس ضرایب هر متغیر استفاده شده در توابع خطی بدست آمده و نیز مقادیر ثابت برای هر گروه در منطقه چاه‌فیروزه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: ضرایب و مقادیر ثابت برای توابع بدست آمده از آنالیز تمایز

	A	B
Constant	−۵/۷۱	−۴/۳۹
IP	−۳/۵۹	−۱/۱۲
RS	−۱/۷۲	−۱/۷۸
Lithology	−۰/۰۷	−۰/۰۶
Altration	۰/۱۱	−۰/۶۸

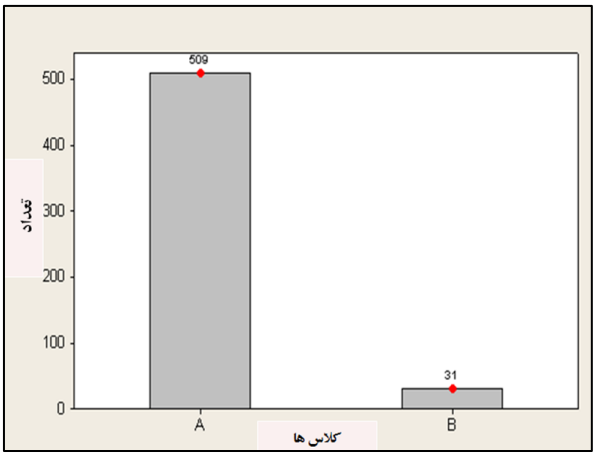
بعداز به‌دست آمدن ضرایب مختلف و مقادیر ثابت برای جوامع A و B، مشخصات تک تک نمونه‌ها در توابع خطی قرار داده می‌شود و هر نمونه در جامعه‌ای قرار می‌گیرد که بیشترین مقدار از آن بدست آید.

لازم به توضیح است تمامی این محاسبات تنها بر روی ۷۵ درصد داده‌های موجود در منطقه صورت گرفته و ۲۵ درصد باقی مانده داده‌هاکه به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند در اعتبارسنجی توابع بدست آمده استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا نمونه‌ها بر اساس حد آستانه‌ای ۰/۲ به گروه-های واقعی آنومالی و زمینه دسته‌بندی شد. سپس ویژگی-های هر نمونه (IP، RS، نوع سنگ و نوع آلتراسیون) در توابع قرار داده شد تا این بار بر اساس نتایج آنالیز تمایز دسته‌بندی شوند. در نهایت درصد صحیح کلاس‌بندی شده برای این نمونه‌ها بر اساس این دو نوع دسته‌بندی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.

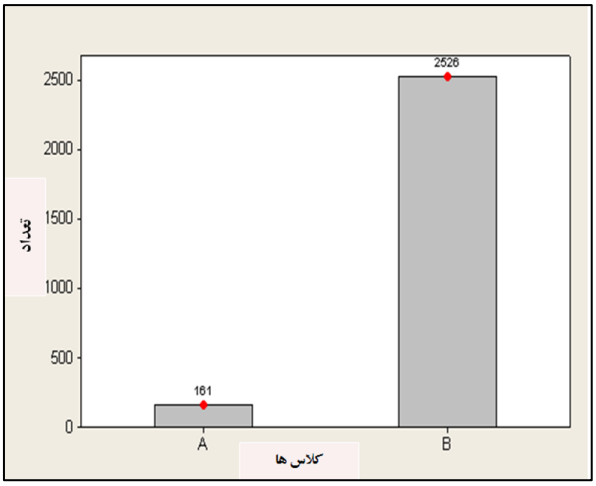
جدول۴ : نتایج اعتبارسنجی توابع بدست آمده از آنالیز تمایز

	A	B
Total N	۲۹۹	۸۵۴
N Correct	۲۶۹	۷۴۲
Proportion	۰/۹۰	۰/۸۷

همچنین به منظور نمایش عملکرد نتایج پیش بینی مدل تمایزی بدست آمده درصد صحیح کلاس‌بندی شده نمونه های آنومال و زمینه در پروفیل ۱۰۰۰n در نمودارهای میله-ای اشکال ۳و ۴ آورده شده است. در این نمودارها حرفA معرف آنومالی و حرف B زمینه است.



شکل ۳: نمودار نتایج آنالیز تمایز برای نمونه های آنومال در پروفیل ۱۰۰۰n



شکل ۴: نمودار نتایج آنالیز تمایز برای نمونه های زمینه در پروفیل ۱۰۰۰n

۶- نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که آنالیز تمایز می‌تواند در جداسازی مناطق آنومال از مناطق عقیم که به صورت زون‌های با IP بالا ظاهر می‌شوند کارساز باشد به شرطی که بتوان اطلاعات ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی را به صورت مناسب با هم تلفیق کرد. مقایسه نتایج در دو مرحله (بدون متغیرهای زمین‌شناسی و با متغیرهای زمین‌شناسی) نشان می‌دهد ورود متغیرهای سنگ‌شناسی و آلتراسیون در آنالیز تمایز موجب بهبود نتایج شده و هر چقدر تعداد متغیرهای استفاده شده در آنالیز تمایز بیشتر باشد نتایج بهتر و قابل قبول‌تری بدست می‌آید که البته این مستلزم صرف هزینه و وقت بیشتری است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان می‌دهد که با نتایج بدست آمده در این منطقه (و نیز مناطق مشابه) می‌توان تنها با داشتن نوع سنگ و نوع آلتراسیون موجود و مقادیر IP و RS میزان کانی‌زایی را تا حد قابل قبولی تشخیص داد. البته

باید به این نکته توجه داشت که برای کانسارهای جدید باید تیپ کانی‌زایی، خصوصیات ژئوفیزیکی و محیط زمین‌شناسی آن‌ها مشابه و قابل تعمیم باشد.
برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان‌تر و بهتر از آنالیز تمایز پیشنهاد می‌شود متغیرهای جدیدی مانند درصد پیریت و داده‌های مغناطیس‌سنجی در محاسبات وارد شوند. همچنین برای بهبود مدل می‌توان از آنالیز تمایز غیرخطی، SVM (Support Vector Machine) و سیستم‌های هوشمند نروفازی بهره جست.

تشکر و قدردانی

از مسئولین و مهندسین شرکت ملی صنایع مس ایران و امور تحقیق و توسعه این شرکت به‌خصوص جناب آقای مهندس خسروجردی بخاطر زحمات و همکاریشان تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

[1] Zonge, K.L. and Hughes, L.J.; 1980, *The Complex Resistivity Method*, Zonge Engineering &Research Organization Inc.

[2] Xiang, J., Jones, N.B., Cheng, D. and Schlindwein, F.S.; 2002; "*A New Method to Discriminate Between a Valid IP Response and EM Coupling Effects"*; Geophysical Prospecting, Vol. 50, pp. 565–575.

[3] Hubert, M. and Van Driessen, K.; 2004; "*Fast and Robust Discriminant Analysis"*; Computational Statistics & Data Analysis, vol. 45, 301-320.

[4] Davis, J.C.; 2003; *Statistics and Data Analysis in Geology (third edition)*; John Wiley & Sons.

[5] Rose, A.W.; 1972; "*Favorability for Cornwall-type Magnetite Deposits in Pennsylvania Using Geological, Geochemical and Geophysical Data in a Discriminant Function*"; Geochemical Exploration, vol. 1, pp. 181-194.

[6] Whitehead, R.E.S. and Govett, G.J.S.; 1974; "*Exploration Rock Geochemistry-Detection of Trace Element Halos Heath Steele Mines (N.B., Canada) By Discriminant Analysis";* Geochemical Exploration,Vol. 3, pp. 371-386.

[7] Divi, S.R., Thorpe, R. I. and Frankli, J. M.; 1979; "*Application of Discriminant Analysis to Evaluate Compositional Controls of Stratiform Massive Sulfide Deposits in Canada*"; Mathematical Geology, Vol. 11, No. 4, pp. 391-406.

[8] Fedikow, M.A.F and Turek, A.; 1983; "*The Application of Stepwise Discriminant Analysis to Geochemical Data from the Host Rocks of the Sullivan Pb-Zn-Ag Deposit, Kimberley, B.C., Canada";* Geochemical Exploration, vol. 18, pp. 231-244.

[9] Whitehead, R.E.S and Davies, J.F.; 1988; "*Discriminant Analysis Involving CO_2/CaO and Arsenic in Gold Exploration*"; Geochemical Exploration, vol. 30, pp. 243-253.

[10] Fedikow, M.A.F, Parbery, D. and Ferreira, K.J.; 1991; "*Geochemical Target Selection along the Agassiz Metallotect Utilizing Stepwise Discriminant Function Analysis*"; Journal of Economic Geology, vol. 86, pp. 558-559.

[11] Tibljas, D.,Loparic, V. and Belak, M.; 2002; "*Discriminant Function Analysis of Miocene Volcaniclastic Rocks from North-Western Based Geochemical Data*"; Geologia Croatica, vol. 55, pp. 39-44.

[12] Varadanchari, C. and Mukherjee, G.; 2004; "*Discriminant Analysis of Clay Mineral Composition*", Journal of Clay and Clay Minerals, vol. 52, pp. 311-320.

[13] Schnieders, L., Koelling, M. and Schuldz, H.D.; 2010; "*Correlation of Turbidite Sequences in a Submarine Canyon System Using Geochemical Fingerprints and Discriminant Analysis (Dakar Canyon NW-Africa)"*; EGU General Assembly, Vol. 12.

[14] Tahmasebi, P., Hezarkhani, A. and Mortazavi, M.; 2010; "*Application of Discriminant Analysis for Alteration Separation; Sungun Copper Deposit, East Azerbaijan, Iran";* Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 6, pp. 564-576.

[۱۵] علی اصغر حسنی پاک؛ ۱۳۸۰؛**تحلیل داده‌های اکتشافی،** انتشارات دانشگاه تهران.

[۱۶] شرکت ملی صنایع مس ایران، شرکت مهندسین مشاورکان ایران؛ ۱۳۸۷؛ **گزارش نهایی مطالعات زمین‌شناسی و آلتراسیون محدوده چاه‌فیروزه در مقیاس ۱:۲۰۰۰**.

[17] Glass, G.V. and Hopkins, Kenneth D. 1995; *Statistical Methods in Education and Psychology (third edition)*; Allyn & Bacon.

1 Spectral IP
2 Complex Resistivity
3 Thermal Domes