

رتبه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی به روش آنالیز ویژگی و روش‌های VIKOR جهت شناسایی مناطق مستعد کانی‌زایی

حمید گرانیان*

استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند
(دریافت: خرداد ۱۳۹۸، پذیرش: تیر ۱۳۹۹)

چکیده

تجزیه نمونه‌های ژئوشیمیایی برای چندین عنصر و مرتبط بودن موقعیت و وسعت محدوده کانی‌زایی در یک منطقه اکتشافی با عناصر اصلی، ردیاب و نشانه، باعث برتری تعیین آنومالی مرکب (آنومالی چند عنصره) بر تک عنصره می‌شود. هدف این پژوهش معرفی روش‌های رتبه‌بندی برای تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب است. برای این منظور از سه روش رتبه‌بندی آنالیز ویژگی، VIKOR و FDAHP-VIKOR و ۳۶۵ نمونه ژئوشیمیایی برداشت شده در کانسار نقره-طلای اپی‌ترمال چاه‌زرد استفاده شده است. رتبه‌بندی داده‌ها در دو مد R و Q انجام شده است. نتایج رتبه‌بندی در مد R نشان دهنده معیار AS به عنوان با اهمیت‌ترین عنصر مرتبط با کانی‌زایی و عناصر Au، Ag، Sb در جایگاه‌های بعدی در منطقه مورد مطالعه است. همچنین رتبه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که آنومالی به دست آمده از هر سه روش رتبه‌بندی مشابه آنومالی‌های تجمعی هستند. نتیجه به دست آمده با الگوریتم FDAHP-VIKOR به دلیل مطابقت موقعیت و وسعت محدوده آنومالی رتبه‌بندی با عناصر اصلی کانی‌زایی یعنی طلا و نقره و حد وسط بودن وسعت این محدوده نسبت به دو روش دیگر رتبه‌بندی به عنوان محدوده مستعد کانی‌زایی معرفی می‌گردد. محدوده‌ای به وسعت ۰/۴۲ کیلومتر مربع برای طراحی شبکه حفاری گمانه در فاز اکتشافی تفصیلی و محدوده‌ای کوچک‌تر داخل آن با وسعت ۰/۱۰ کیلومتر مربع برای طراحی شبکه حفاری چگال‌تر پیشنهاد می‌شود. بنابراین روش‌های رتبه‌بندی را می‌توان به عنوان روشی جدید برای تعیین آنومالی‌های مرکب معرفی کرد.

کلمات کلیدی

آنالیز ویژگی، روش VIKOR، روش FDAHP-VIKOR، نقشه پتانسیل کانی‌زایی، کانسار چاه‌زرد

*عهده‌دار مکاتبات: h.geranian@birjandut.ac.ir

۱- مقدمه

نمونه‌برداری‌های ژئوشیمیایی از محیط‌های سنگی، خاکی و رسوبات آبراهه‌ای یکی از مهم‌ترین ابزارهای شناسایی مواد معدنی در فازهای مختلف اکتشافی محسوب می‌شود. از آنجا که این نمونه‌ها معمولاً برای تعداد زیادی عناصر به صورت هم‌زمان آنالیز می‌شود؛ بنابراین تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب (چند عنصره) بر تک عنصره برتری خواهد داشت. روش آنومالی‌های جمعی و یا ضربی، روش‌های تلفیق، روش‌های کاهش ابعاد، روش‌های خوشه‌بندی و روش‌های رتبه‌بندی راه‌حل‌های تعیین آنومالی‌های مرکب هستند [۱-۳]. در روش آنومالی‌های مرکب با جمع مقادیر استاندارد شده، می‌توان آنومالی‌های جمعی و با ضرب مقادیر خام، می‌توان آنومالی‌های ضربی را به دست آورد. این روش‌ها بیشتر برای تعیین هاله‌های ژئوشیمیایی مرکب استفاده شده‌اند [۴]. در روش‌های تلفیق کلیه لایه‌های اطلاعاتی، بر اساس مبنای الگوریتم‌های داده-محور (از قبیل شبکه‌های عصبی مصنوعی، اوزان شاهد، رگرسیون لجستیکی، ماشین بردار پشتیبان و طبقه‌بندی بیزین) و یا دانش-محور (از قبیل شاخص همپوشانی، منطق فازی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه‌حل ایده‌آل) به یک لایه یا نقشه تبدیل می‌شود [۵-۷]. الگوریتم‌های داده-محور برای مناطق دارای فعالیت‌های اکتشافی بالا و الگوریتم‌های دانش-محور برای مناطقی با اطلاعات اکتشافی کم کاربرد دارند [۶].

روش‌های تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل فاکتوری (FA) جزو روش‌های کاهش ابعاد محسوب می‌شوند که در آنها مولفه‌های و فاکتورهای اصلی به ترتیب نزولی و بر اساس واریانس مرتب می‌شوند. بنابراین نقشه به دست آمده از امتیاز مولفه و یا فاکتور مرتب با کانی‌زایی می‌تواند معرف آنومالی مرکب باشد [۸]. همچنین مولفه مرتبط با کانی‌زایی در روش تحلیل مولفه‌های مستقل (ICA) که مولفه‌های غیرهمبسته‌ای دارای بیشترین استقلال از یکدیگر را شناسایی می‌کند، می‌تواند به عنوان آنومالی مرکب در نظر گرفته شود [۹]. در روش‌های خوشه‌بندی نمونه‌ها بر اساس معیارهای شباهت (مهم‌ترین معیار شباهت فاصله اقلیدسی در فضای ابر داده‌ها است) به

چندین خوشه تقسیم می‌شوند به نحوی که، نمونه‌ها در هر خوشه بسیار به هم شبیه بوده و بین خوشه‌ها نیز کمترین شباهت وجود داشته باشد. بر این اساس، خوشه‌ها با بالاترین عیارها می‌توانند معرف مناطق دارای پتانسیل آنومالی ژئوشیمیایی باشند [۱۰]. روش‌های خوشه‌بندی به پنج گروه روش‌های مبتنی بر گرانیگاه، روش‌های بر پایه اتصال، روش‌های بر پایه توزیع داده‌ها، روش‌های مبتنی بر چگالی و روش‌های مبتنی بر گرید تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۱]. اما منظور از رتبه‌بندی داده‌ها، مرتب کردن آنها به صورت صعودی یا نزولی بر اساس معیارهای خاص و بسته به موقعیت و هدف مورد نظر است. برای رتبه‌بندی داده‌های چندمتغیره، می‌توان از روش‌های ساده‌ای همچون پارامترهای آمار توصیفی و روش‌های بصری و یا از روش‌های پیچیده‌تر آماری و داده‌کاوی استفاده نمود [۱۲].

در این مقاله ضمن معرفی دو روش آنالیز ویژگی^۱ (CA) و ویکور^۲ (VIKOR) از آنها برای رتبه‌بندی داده‌های ژئوشیمیایی استفاده خواهد شد. آنالیز ویژگی یک روش آماری چند متغیره است که بیشتر برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی، مدل‌سازی ژنتیکی، انتخاب اهداف اکتشافی و تصمیم‌گیری استفاده شده است [۱۳-۱۵]. در حالی که ویکور یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره محسوب می‌شود که بیشتر به عنوان یک روش برای انتخاب بهترین گزینه در مباحث اقتصادی، کشاورزی، مهندسی و مدیریتی از آن استفاده شده است. این روش در محدود کارهای اکتشافی و فقط به عنوان یک روش تلفیق به کار رفته است. از جمله این کارها می‌توان به مقایسه عملکرد روش‌های تاپسیس (TOPSIS) و ویکور در پتانسیل‌یابی کانی‌زایی مس در بخش مرکزی کمربند فلزایی کرمان [۱۶]، تعیین ابعاد بهینه بلوک در معدن انگوران [۱۷] و شناسایی مناطق مستعد اکتشافی در کمربند ولکانیکی-رسوبی ایران مرکزی [۱۸] اشاره نمود.

از آنجا که این روش‌ها تاکنون برای رتبه‌بندی استفاده نشده‌اند، با به کارگیری داده‌های ژئوشیمیایی محدوده اکتشافی چاه‌زرد در استان یزد و تهیه نقشه‌های آنومالی مرکب به روش رتبه‌بندی نمونه‌ها و مقایسه آنها با نقشه‌های کنتوری غلظت نمونه‌ها امکان معرفی چنین کاربردی در ادامه بررسی خواهد شد.

۲- روش‌های رتبه‌بندی

اندازه‌گیری شده باشد. ماتریس ضرایب تطبیقی بین ویژگی‌ها به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۳]:

$$S = (s_{jk}) = n^{-1} X^T X \quad (1)$$

$$= n^{-1} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_{ik} \quad j, k = 1, 2, \dots, m$$

سپس وزن هر یک از ویژگی‌ها به یکی از دو روش زیر محاسبه می‌شود.

الف) روش ریشه مربع: در این حالت وزن هر ویژگی (w) از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۳]:

$$w_j = [m^{-1} \sum_{k=1}^m s_{jk}^2]^{1/2} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

ب) روش مولفه‌های اصلی: اگر λ_j ، λ_1 ، $\lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$ باشد که A_j و A_j بردار ویژه λ_j ماتریس S باشد، ماتریس ضرایب تطبیقی را می‌توان به روش زیر تجزیه نمود [۲۳]:

$$S = \lambda_1 A_1 A_1^T + \lambda_2 A_2 A_2^T + \dots + \lambda_m A_m A_m^T \quad (3)$$

اگر مولفه اول به اندازه کافی بزرگ باشد، به نحوی که بخش اعظم تغییرپذیری (به طور مثال حدود ۸۰ درصد) توسط این مولفه قابل توجیه باشد، خواهیم داشت:

$$S \approx \lambda_1 A_1 A_1^T \quad (4)$$

بنابراین بردار وزن ویژگی‌ها، برابر بردار مولفه اول یعنی $W = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$ خواهد بود. در صورت منظم بودن بردارها رابطه (۵) نیز بین وزن ویژگی‌ها برقرار است:

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad \text{and} \quad 1 \geq w_j \geq 0 \quad (5)$$

وزن‌های بالاتر نشان دهنده معرفت‌تر بودن ویژگی‌ها (یا مستقل‌تر بودن آنها) و وزن‌های پایین‌تر نشان دهنده غیر معرفت‌تر بودن ویژگی‌ها (یا وابسته‌تر بودن آنها) برای توجیه پدیده مرتبط با آنالیز ویژگی خواهند بود [۱۵، ۲۳]. بنابراین با مرتب کردن وزن‌ها به ترتیب نزولی، ویژگی‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

۲-۲- روش VIKOR

روش راه‌حل توافقی و بهینه‌سازی چند معیار یا روش ویکور (VIKOR) اولین بار توسط اپریکوویچ و تزنگ در سال ۲۰۰۴ معرفی شده است (اپریکوویچ نخستین بار این

روش‌های رتبه‌بندی که بیشتر در بازیابی اطلاعات کاربرد دارند به دو دسته روش‌های بدون یادگیری و روش‌های یادگیری ماشین تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۹]. روش‌های آماری (از قبیل آنالیز ویژگی) و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (از قبیل SAW، AHP، PROMETHEE و ELECTRE، TOPSIS، VIKOR) جزو دسته اول محسوب می‌شوند که بدون نیاز به نمونه‌های آموزشی، داده‌ها را بر اساس معیارهایی (از قبیل دانش افراد خبره و اطلاعات آماری بین داده‌ها) رتبه‌بندی می‌کنند [۱۲، ۲۰]. روش‌های با یادگیری به سه بخش روش‌های مبتنی بر نقطه (از قبیل Prank و McRank)، روش‌های مبتنی بر جفت (از قبیل RankNet و RankingSVM) و روش‌های مبتنی بر لیست (از قبیل SVM MAP و SoftRank) تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر نقطه و جفت، مسائل رتبه‌بندی را با تغییر در نحوه داده‌ها به مسائل دسته‌بندی تبدیل می‌کنند، در حالی که روش‌های مبتنی بر لیست، بدون تغییری در داده‌های ورودی، با استفاده از بهینه کردن یک تابع هدف سعی در رتبه‌بندی پرس‌وجوی جدید می‌نمایند [۲۱]. با توجه به ماهیت داده‌های ژئوشیمیایی و هدف این مقاله، در اینجا از روش‌های بدون یادگیری برای رتبه‌بندی استفاده شده است که در ادامه توضیح الگوریتم روش‌های پیشنهادی ارائه می‌شود.

۲-۱- روش آنالیز ویژگی

روش آنالیز ویژگی (CA) اولین بار توسط بوتبال در سال ۱۹۷۱ پیشنهاد گردید [۲۲]. در صورت استفاده از مد R متغیرها و در صورت استفاده از مد Q نمونه‌ها در این روش رتبه‌بندی می‌شوند. برای استفاده از آنالیز ویژگی داده‌ها باید به صورت دو دویی (مقدار صفر به معنی نامطلوب یا ارزیابی نشده و مقدار یک به معنی مطلوب)، سه‌تایی (مقدار صفر به معنی نامطلوب، مقدار ۱- به معنی ارزیابی نشده و مقدار یک به معنی مطلوب) یا استاندارد شده (دارای دامنه تغییرات یکسان برای همه متغیرها) باشند. اگر مجموعه داده‌ها (X) شامل n نمونه (گزینه) باشد که برای هر نمونه m متغیر (ویژگی یا معیار) نیز

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (12)$$

۲- تعیین آنتروپی هر معیار:

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (13)$$

۳- تعیین عدم اطمینان یا درجه انحراف هر معیار:

$$d_j = 1 - E_j \quad (14)$$

۴- تعیین وزن هر معیار:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (15)$$

در نهایت معیارها (در صورت انجام محاسبات در مد R معیارها، متغیرها هستند و در صورت استفاده از مد Q نمونه‌ها، معیارها خواهند بود) بر اساس شاخص Q به ترتیب صعودی رتبه‌بندی می‌شوند. البته در صورتی که رتبه‌بندی معیارها بر اساس مقدار S، R و Q متفاوت باشد، می‌توان از شروط تعیین شده در مقاله پریکوویچ و تنگ در سال ۲۰۰۷ استفاده نمود [۲۵]. در سال ۲۰۱۱ روش دیگری برای رتبه‌بندی معیارها توسط جهان و همکارانش ارائه گردید، که بر این اساس مقادیر سودمندی و تاسف از روابط زیر به دست می‌آیند [۲۶]:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j (1 - e^{-\frac{|f_{ij} - f_j^+|}{f_j^+ - f_j^-}}) \quad (16)$$

$$R_i = \text{Max}[w_j (1 - e^{-\frac{|f_{ij} - f_j^-|}{f_j^+ - f_j^-}})] \quad (17)$$

پس از محاسبه شاخص Q از رابطه ۱۰، شاخص رتبه‌بندی نهایی M، از رابطه (۱۸) به دست می‌آید [۲۶]:

$$M_i = \frac{Q^+ - Q_i}{Q^+ - Q^-} \quad (18)$$

که $Q^+ = \text{Max } Q_i$ و $Q^- = \text{Min } Q_i$ است. مقادیر بالای M_i نشان دهنده رتبه‌بندی بالاتر و پتانسیل بالاتر برای کانی‌زایی خواهد بود. بنابراین در این حالت معیارها بر اساس این شاخص به صورت نزولی مرتب می‌شوند.

۳-۲- روش FDAHP-VIKOR

مراحل اجرایی روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی^۴ (FDAHP) که ترکیبی از روش دلفی فازی و سلسله

روش را در رساله دکترای خود در ۱۹۷۹ ارائه و در ۱۹۸۰ منتشر کرد. ولی شناخت جهانی آن در ۲۰۰۴ بوده است [۲۴]. از این روش بیشتر برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیار استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا بایستی ماتریس داده‌ها را به صورت رابطه (۶) بی‌مقیاس یا استاندارد نمود:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & \dots & f_{nm} \end{bmatrix} \quad f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (6)$$

در این حالت، بهترین (f_j^+) و بدترین (f_j^-) معیار زام ماتریس فوق از بین تمام گزینه‌ها برابر است با [۲۴، ۲۵]:

$$f_j^+ = \text{Max}_i f_{ij}, \quad f_j^- = \text{Min}_i f_{ij} \quad (7)$$

مقدار سودمندی (S)، مقدار تاسف (R) و در نهایت شاخص رتبه‌بندی VIKOR (Q) از رابطه‌های زیر به دست می‌آید [۲۴، ۲۵]:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \quad (8)$$

$$R_i = \text{Max} \left\{ w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\} \quad (9)$$

$$Q_j = v \left[\frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} \right] + (1 - v) \left[\frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \right] \quad (10)$$

که v پارامتر ثابتی است که به میزان توافق گروه تصمیم‌گیرنده بستگی دارد و معمولاً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۴، ۲۶]. همچنین سایر پارامترها از رابطه (۱۱) به دست می‌آیند:

$$S^- = \text{Min } S_i, \quad S^+ = \text{Max } S_i \quad (11)$$

$$R^- = \text{Min } R_i, \quad R^+ = \text{Max } R_i$$

در رابطه‌های ۸ و ۹ برابر ضریب اهمیت یا وزن هر معیار است. روش‌های گوناگونی برای تعیین این ضرایب وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های داده‌محور آنتروپی، لینمپ^۳ (LINMAP)، روش بردار ویژه و روش کمترین مربعات اشاره نمود [۲۵، ۲۷]. در این مقاله از روش آنتروپی استفاده شده است که دارای مراحل محاسباتی زیر است [۲۸]:

۱- محاسبه ماتریس P:

تقسیم امتیازهای در نظر گرفته برای عنصر i به عنصر j به دست می‌آید. سپس این ماتریس به روش دلفی فازی به اعداد فازی (\tilde{A}) تبدیل می‌شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{1}{a_{1i}} & \dots & 1 & \dots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \dots & \frac{1}{a_{in}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \dots & (\alpha_{1j}, \delta_{1j}, \gamma_{1j}) & \dots & (\alpha_{1n}, \delta_{1n}, \gamma_{1n}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (\frac{1}{\gamma_{1j}}, \frac{1}{\delta_{1j}}, \frac{1}{\alpha_{1j}}) & \dots & (1,1,1) & \dots & (\alpha_{in}, \delta_{in}, \gamma_{in}) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (\frac{1}{\gamma_{1n}}, \frac{1}{\delta_{1n}}, \frac{1}{\alpha_{1n}}) & \dots & (\frac{1}{\gamma_{in}}, \frac{1}{\delta_{in}}, \frac{1}{\alpha_{in}}) & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\tilde{a}_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}); \alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), \delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, \gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}) \quad (20)$$

[۳۲]، داده‌های فازی شهودی چندمتغیره [۳۳] و داده‌های فاصله‌ای [۳۴] اشاره نمود. در ادامه کاربرد روش‌های رتبه‌بندی معرفی شده برای شناسایی مناطق مستعد کانی‌زایی در کانسار طلا- نقره چاه‌زرد مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده کانسار نقره- طلا چاه‌زرد در استان یزد و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی این شهر در مختصات جغرافیایی $54^{\circ} 1' 50''$ الی $54^{\circ} 7' 25''$ طول شرقی و $31^{\circ} 4' 0''$ الی $31^{\circ} 7' 10''$ عرض شمالی قرار دارد. به لحاظ ساختاری این محدوده در بخش میانی کمان ماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است [۳۵]. مجموعه واحدهای سنگی منطقه مطالعاتی شامل دو بخش نهشته‌های آواری میوپلیوسن شامل مارن، ماسه‌سنگ و کنگلومرا است که به صورت تپه‌های کم ارتفاع با سطوح فرسایشی صاف و سیستم آبراهه‌های رشته‌ای دیده می‌شود و دیگری مجموعه سنگ‌های آتشفشانی- نفوذی میوسن- پلیوسن شامل آندزیت، تراکی آندزیت و داسیت است که تپه‌های بلند با سطوح فرسایشی ناهموار را تشکیل می‌دهد [۳۶، ۳۵]. بخش شمال شرقی محدوده را نیز رسوبات آبرفتی و پادگان کواترنه می‌پوشاند که بیشتر شامل ماسه، رس و شن هستند (شکل ۱).

مراتبی است، توسط لیو و چن در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است [۲۹]. برای این منظور ابتدا ماتریس مقایسه‌های زوجی (A) بر اساس نظر کارشناسان تشکیل می‌شود. در این ماتریس a_{ij} ترجیح عنصر i به عنصر j است که از

که β_{ijk} بیانگر اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه فرد k ام و γ_{ij} و α_{ij} به ترتیب حد بالا و پایین نظرها و δ_{ij} نیز میانگین هندسی این نظرها است [۳۰]. بین اعداد فازی رابطه $\alpha_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \gamma_{ij}$ برقرار است. همچنین هر عدد فازی در دامنه [۱/۹، ۹] تغییر می‌کند. وزن نسبی معیارها از رابطه (۲۱) به دست می‌آید:

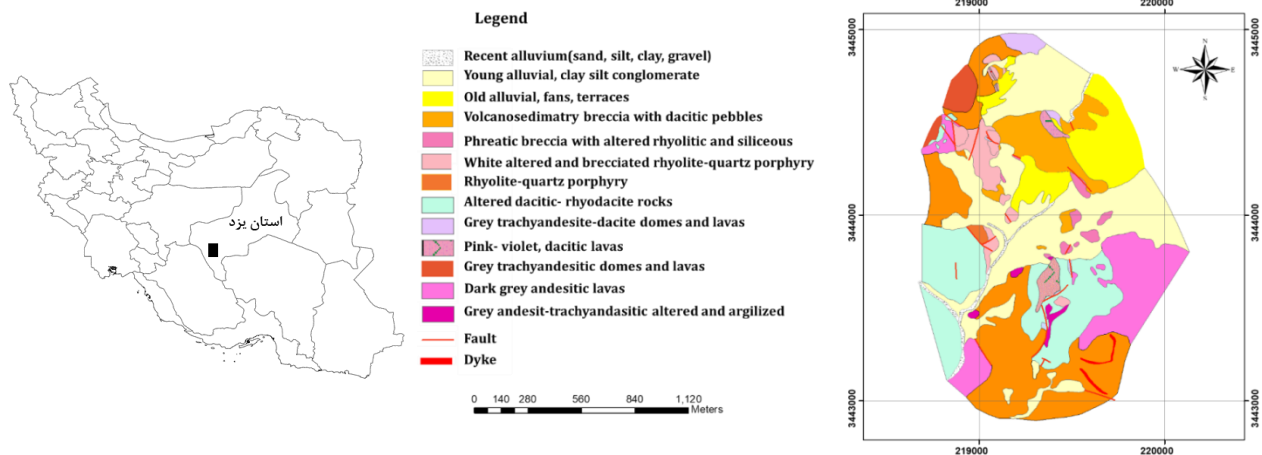
$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{i1} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n} \quad (21)$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)$$

که \tilde{W}_i یک عدد مثلثی و نشان دهنده وزن فازی معیار نام است. در رابطه (۲۱) بالا نمادهای \otimes ، \oplus و \ominus به ترتیب ضرب، تقسیم و جمع اعداد فازی است. در نهایت میانگین هندسی اعداد فازی هر وزن، برابر وزن هر معیار خواهد بود [۲۹، ۳۰]. یعنی:

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^3 \tilde{w}_j \right)^{\frac{1}{3}} \quad (22)$$

تفاوت روش FDAHP-VIKOR با روش VIKOR در نحوه محاسبه ضرایب اهمیت هر معیار است. در الگوریتم ویکور از روش‌های داده‌محور برای محاسبه این ضرایب استفاده می‌شود در حالی که در روش دلفی فازی- ویکور روش دانش‌محور فوق به کار می‌رود. محققان زیادی از زمان ارائه روش ویکور تاکنون به توسعه آن پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به کاربرد روش VIKOR بر روی مجموعه‌های فازی تعدیل شده [۳۱]، مجموعه فازی مردد



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱/۱۰۰۰ محدوده کانسار چاه‌زرد [۲۸] به همراه موقعیت این محدوده (مستطیل سیاه) بر روی نقشه جغرافیایی ایران

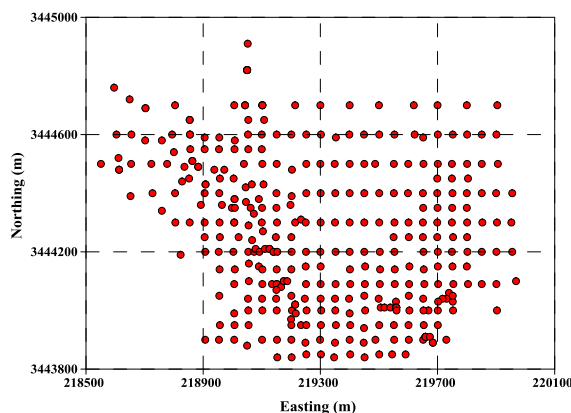
کانی‌زایی در محدوده کانسار چاه‌زرد در پنج مرحله صورت گرفته است که در شکل ۲ نمودار پاراژنز این کانی‌ها نشان داده شده است. بیشتر این کانه‌ها به صورت دانه‌های بی‌شکل و یا بلورهای خودشکل و یا نیمه‌خودشکل هستند در حالی که کانی‌های باطله اغلب ریز بلور بوده و گاه به صورت متوسط تا درشت بلور نیز هستند [۳۸]. دگرسانی‌ها در بخش‌های داخلی زون‌های کانه‌دار جایی که برشی شدن و رگه‌ها فراوان هستند، تمرکز بالایی دارد. دگرسانی کربناتی به صورت رگه (کلسیت \pm ایلیت \pm کوارتز) و سیمان برشی (کلسیت-آنکریت \pm دولومیت) در بخش‌های کم عیار دیده می‌شود. دگرسانی پتاسیک (فلدسپات آلکالن) بیشتر به صورت محلی درون توده‌های ریولیت پورفیری گسترش دارد. دگرسانی کلریتی-کلسیتی (کلریت، کلسیت \pm ایلیت \pm کوارتز) بیشتر در اطراف و حاشیه توده‌ای معدنی گسترش دارد. دگرسانی آرژیلیک پیشرفته (هماتیت، لیمونیت، ژاروسیت، ژیپس، آلونیت و کائولینیت) به صورت یک لایه با ضخامت‌های مختلف، دگرسانی‌های اولیه را می‌پوشاند [۳۷، ۳۸].

مجموعه ولکانیکی-پلوتونیک چاه‌زرد یکی از این گنبد‌های آتشفشانی-نفوذی است که در زون گسله ده‌شیر با روند شمال باختری-جنوب خاوری تشکیل شده است. این زون گسله از نوع امتداد لغز طولی همراه با گسله‌های عرضی متعدد امتداد لغز عمده‌تاً چپ‌گرد است که باعث خردشدگی و برشی شدن اکثر واحدهای سنگی آذرین منطقه شده است. فعالیت‌های ماگمایی در این ناحیه نیز داخل زون گسله و در دو فاز صورت گرفته است. فعالیت‌های ابتدایی آن رخساره آندزیتی و تراکی آندزیتی و آتشفشانی است که در نهایت به نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق داسیت پورفیری و کوارتز پورفیری ختم می‌شود [۳۵، ۳۶]. کانی‌زایی طلا، نقره و فلزات پایه در پنج مرحله صورت گرفته است. طلا به صورت آزاد و همراه با ادخال‌هایی در کانی‌های پیریت، کوارتز، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت و نقره به صورت نمک‌های سولفور (تنانتیت-تتراهیدریت غنی از نقره، پیرازیت و میارزیت) به وجود آمده است. ژنز این کانسار از نوع اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا است که دارای آلتراسیون‌های کوارتز-آدولار، سریسیتی، کربناتی، کلریتی-کلسیتی و آرژیلیک پیشرفته در منطقه است [۳۷].

Stages		Stage I	Stage II				Stage III	Stage IV		Stage V
			A	B	C	D		A	B	
Ore	Pyrite	█	█	█	█	█	█	█		
	Marcasite		█			█	█			
	Arsenian pyrite		█			█	█			
	Arsenopyrite		█			█	█			
	Chalcocopyrite	█	█	█				█		
	Galena		█	█				█		
	Sphalerite		█	█				█		
	Ag-Sulfosalts		█	█				█		
	Gold		█		█		█	█		
	Chalcocite		█						█	
	Covellite								█	
	Digenite								█	
	Fe-Mn Oxides								█	
Gangue	Quartz	█	█	█	█	█	█			
	Adularia				█					
	K-Feldspar		█							
	Clay Minerals	█	█	█	█					
	Carbonate					█				
	Gypsum							█	█	
	Jarosite/Alunite								█	
	Kaolinite								█	

شکل ۲: نمودار پارازنز کانی‌های در محدوده اکتشافی چاه‌زرد [۲۹]

نرمال است. همچنین میانگین همه عناصر از عدد کلارک بالاتر است که می‌تواند نشان دهنده وجود آنومالی ژئوشیمیایی در منطقه است (به استثناء مس و منگنز که میانگین مقادیر آنها در حدود عدد کلارک است). در شکل ۴ نمودار فراوانی‌نمای دو عنصر مرتبط با کانی‌زایی در منطقه مورد مطالعه یعنی عناصر طلا و نقره به عنوان نمونه آورده شده است. چند جامعه‌ای بودن توزیع داده‌ها در این نمودارها نیز قابل مشاهده است. بنابراین از ماتریس داده‌ها با ابعاد 9×356 برای رتبه‌بندی در مرحله بعد استفاده شده است.



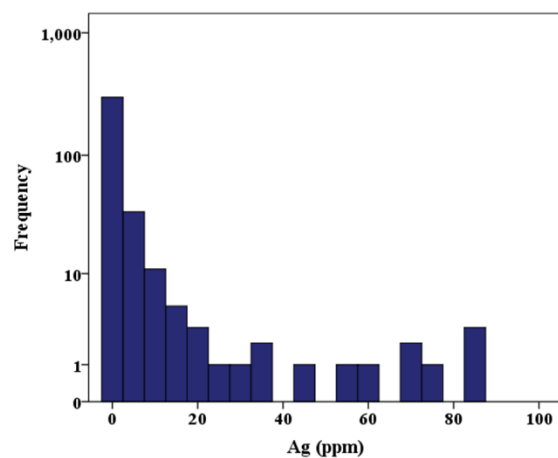
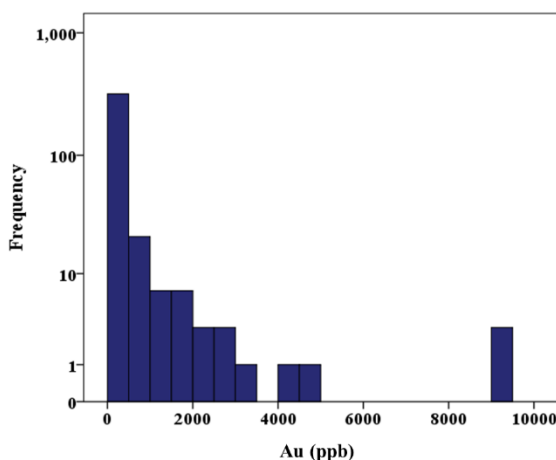
شکل ۳: موقعیت و پراکندگی نمونه‌های ژئوشیمیایی محیط خاکی در محدوده کانسار چاه‌زرد

۴- داده‌های ژئوشیمیایی منطقه مورد مطالعه

از محدوده مطالعاتی در فاز اکتشافی نیمه‌تفصیلی، ۳۶۵ نمونه ژئوشیمیایی از محدوده‌ای به ابعاد 1200×1600 متر برداشت شده است (شکل ۳). نمونه‌گیری از عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک و پس از عبور از الک ۴۰ مش و رساندن وزن هر نمونه به $1/5$ تا ۲ کیلوگرم صورت گرفته است. هر نمونه برای ۴۵ عنصر به روش ICP و طلا به روش Fire Assay آنالیز شده است (کلیه نمونه‌گیری و آنالیزها توسط شرکت پرشین گلد انجام شده است). در این مقاله نتایج آنالیز ۹ عنصر مرتبط با کانی‌زایی طلای اپی‌ترمال یعنی $Zn, Sb, Pb, Mn, Cu, Ba, As, Ag, Au$ به کار رفته است [۳۹]. در جدول ۱ پارامترهای آماری آنالیزهای شیمیایی پس از جایگزینی داده‌های سنسورد با سه چهارم $(\frac{3}{4})$ حد حساسیت دستگاه و تعدیل داده‌های پرت آمده است. همچنین از آنجا که داده‌های ژئوشیمیایی دارای سیستم بسته است، پارامتر مرکز (میانگین هندسی) هر متغیر در این جدول نیز ذکر شده است. مقدار واریانس کل داده‌ها نیز در سیستم بسته برابر $35/16$ است (برای نحوه محاسبه مرکز و واریانس داده‌ها در سیستم بسته می‌توان به منبع [۴۰] مراجعه نمود). پارامترهای آماری چولگی و کشیدگی نشان دهنده عدم تبعیت توزیع داده‌ها از منحنی

جدول ۱: پارامترهای آمار توصیفی نتایج آنالیز شیمیایی عناصر انتخابی

عناصر (واحد)	Au (ppb)	Ag (ppm)	As (ppm)	Ba (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Pb (ppm)	Sb (ppm)	Zn (ppm)
میانگین	۳۰۳/۷۶	۳/۷۹	۳۰۱/۸۰	۷۸۵/۸۷	۳۰/۸۶	۵۴۴/۹۵	۱۰۶/۸۴	۱۱/۳۰	۹۲/۸۶
میانه	۲۷	۰/۵۰	۶۷/۷۴	۴۸۴/۹۲	۳۰/۷۳	۴۴۵/۳۹	۴۶/۷۹	۲/۵۰	۷۹/۶۸
انحراف معیار	۹۸۲/۶۹	۱۱/۷۵	۹۰۰/۴۰	۶۱۹/۹۸	۱۶/۳۲	۴۶۲/۹۸	۲۱۰/۷۴	۲۳/۸۱	۸۴/۶۴
چولگی	۶/۸۰	۵/۳۳	۷/۸۳	۱/۶۹	۲/۶۰	۱/۲۵	۵/۷۹	۵/۶۰	۲/۶۰
کشیدگی	۵۴/۷۱	۳۰/۰۴	۷۲/۴۶	۳/۴۴	۱۳/۲۲	۳/۳۴	۴۰/۹۹	۸۲/۳۸	۹/۵۲
حداقل	۰/۵۰	۰/۲۵	۲/۵۰	۶۹/۰۳	۴/۸۴	۲۰/۱۰	۱۱/۴۷	۲/۵۰	۷/۱۱
حداکثر	۹۱۵۳	۸۵/۸۸	۹۶۶۰/۳۴	۳۶۳۸/۸۲	۱۳۹/۸۹	۲۹۸۱/۴۹	۱۹۰۶/۹۲	۲۱۸/۷۲	۵۴۳/۶۳
آستانه	۷۵	۱/۰۱	۱۷۴/۸۵	۹۲۴/۷۲	۴۶/۰۹	۱۱۴۴/۸۲	۸۴/۶۱	۲/۵۰	۱۶۴/۵۸
مرکز	۳۵/۸۲	۰/۸۱	۸۳/۹۷	۵۹۸/۵۷	۲۷/۳۵	۳۳۳/۷۸	۵۶/۹۴	۵/۰۳	۶۵/۰۳



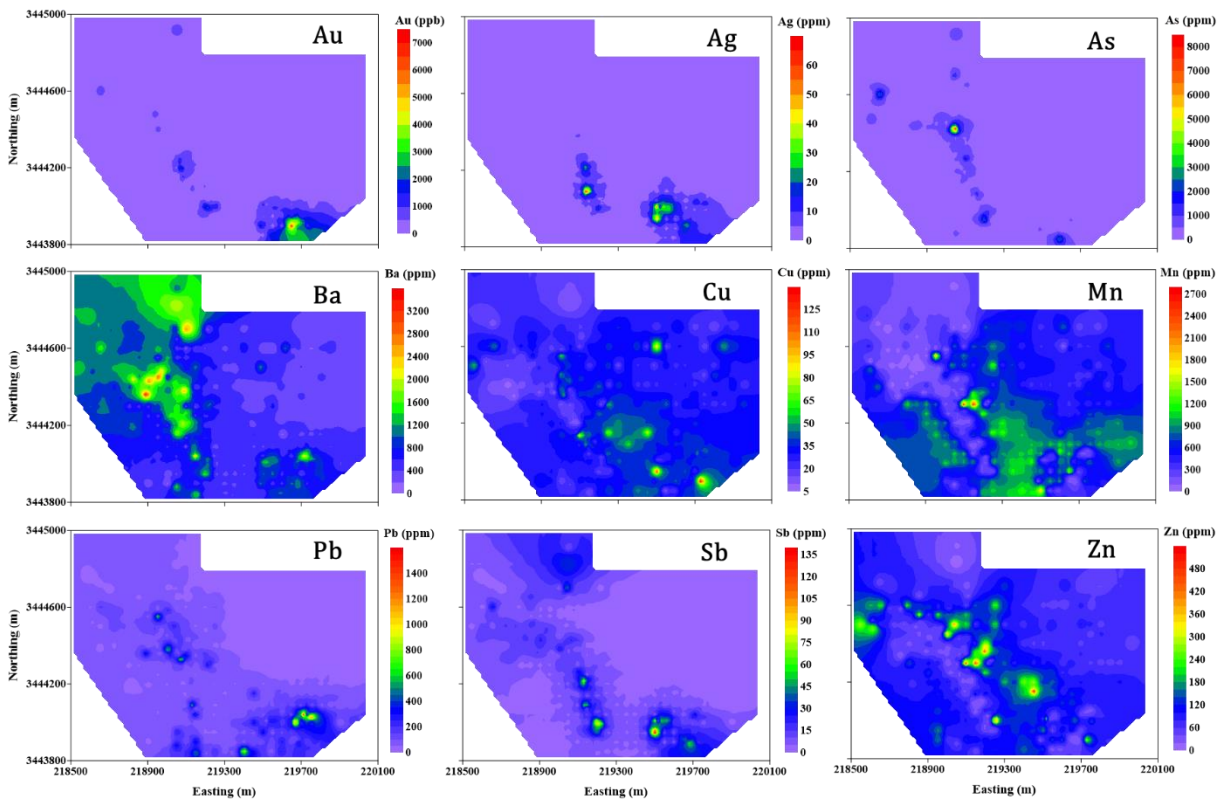
شکل ۴: نمودار فراوانی‌نمای (هیستوگرام) عناصر طلا و نقره داده‌های منطقه مورد مطالعه

عناصر طلا و نقره به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۶۳ کیلومتر مربع است.

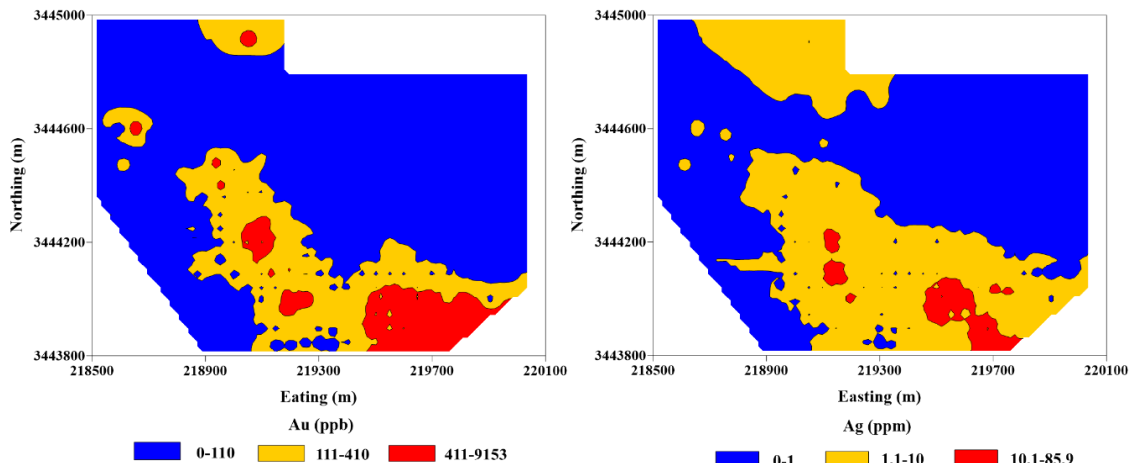
۵- رتبه‌بندی داده‌ها

اولین مرحله در رتبه‌بندی داده‌ها حذف اثر واحد اندازه‌گیری است. برای این منظور در روش آنالیز ویژگی از سیستم دو دویی و در روش VIKOR از استاندارد کردن ماتریس داده‌ها مطابق رابطه ۶ استفاده شده است. در سیستم دو دویی به نمونه‌های بالاتر از حد آستانه میانه + دو برابر انحراف مطلق از میانه، عدد یک (منظور نمونه‌ها با عیار بالا) و مقادیر کمتر از آستانه، عدد صفر (منظور نمونه‌ها با عیار پایین) نسبت داده شده است (مقادیر آستانه هر عنصر در جدول ۱ ذکر شده است). استاندارد کردن داده‌ها نیز توسط رابطه ۶ صورت گرفته است. رتبه‌بندی ماتریس داده‌ها در دو مد R و Q انجام شده که نتایج رتبه‌بندی متغیرها (مد R) در جدول ۲ آمده است.

شکل ۵ نقشه کنترلی غلظت عناصر انتخابی در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد که به روش درون‌یابی عکس مجذور فاصله به دست آمده است. آنومالی‌های ژئوشیمیایی عناصر دارای راستای جنوب شرقی-شمال غربی است که تمرکز غلظت عناصر Au, Ag, Cu, Mn, Pb و Sb بیشتر در بخش جنوب شرقی منطقه است. آنومالی ژئوشیمیایی عناصر As و Ba برعکس عناصر قبلی در بخش شمال غربی و عنصر Zn در بخش مرکزی محدوده قابل مشاهده است. با توجه به کانی‌زایی نقره و طلا در محدوده کانسار چاه‌زرد، نقشه کنترلی این دو عنصر توسط الگوریتم فرکتالی عیار-مساحت به جوامع آماری تشکیل دهنده، تفکیک شده است. در شکل ۶ موقعیت این جوامع به همراه آستانه‌های به دست آمده، نشان داده شده است. مساحت محدوده آنومالی‌های احتمالی (منطقه قرمز رنگ در شکل ۶) برای عنصر طلا ۰/۱۳ کیلومتر مربع و برای عنصر نقره ۰/۵۰ کیلومتر مربع است. مساحت محدوده آنومالی‌های ممکن (منطقه زرد رنگ در شکل ۶) نیز برای



شکل ۵: نقشه کننتوری پراکندگی غلظت عناصر انتخابی در محدوده کانسار چاه‌زرد



شکل ۶: نقشه پراکندگی جوامع آماری غلظت عناصر نقره و طلا در محدوده کانسار چاه‌زرد

فراوانی و تاثیرگذاری یک عنصر برای شناسایی مناطق مستعد کانی‌زایی به سه عامل جنس سنگ‌ها، نوع کانی‌های مرتبط با فرایندهای کانی‌زایی و آلتراسیون منطقه بستگی دارد. سنگ‌های مرتبط با کانی‌زایی در منطقه شامل گنبد‌های جریان‌ی از جنس آندزیت تا تراکی آندزیت با بافت ریزدانه تا شیشه‌ای، سری فلیسیک با جنس داسیت تا ریولیت آتره شده با بافت پرفیری و سنگ‌های برشی از نوع برش‌های آواری- آتشفشانی، چند آمیخته و ترکیب شده تک آمیخته و چند آمیخته از جنس ریولیت، آندزیت و داسیت با زمینه کانی‌های رسی هستند [۳۷، ۳۸]. فراوانی

جدول ۲: نتایج رتبه‌بندی ماتریس داده‌ها در مد R

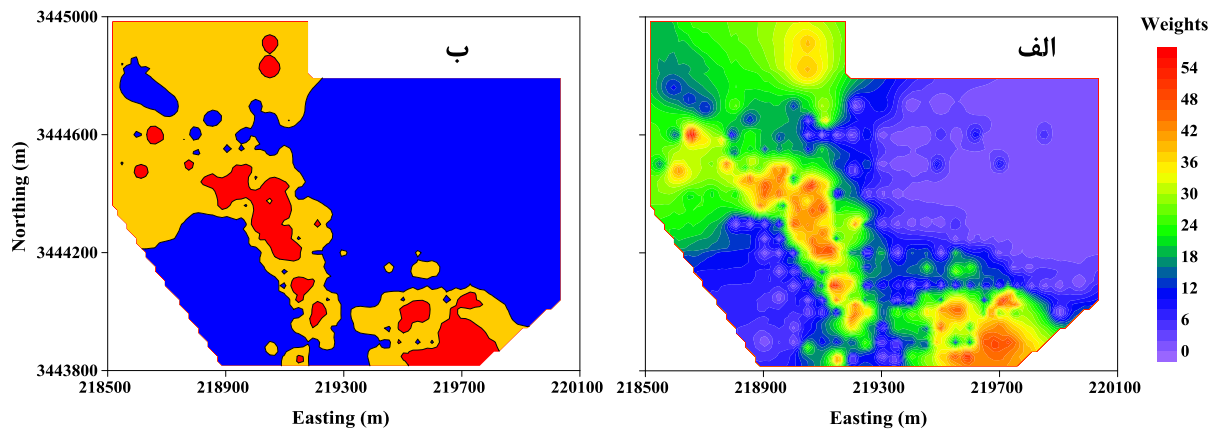
رتبه	روش آنالیز ویژگی	روش VIKOR
۱	Sb	As
۲	Ag	Au
۳	Ba	Ag
۴	Au	Sb
۵	As	Pb
۶	Pb	Ba
۷	Zn	Mn
۸	Cu	Zn
۹	Mn	Cu

در مرحله دوم رتبه‌بندی نمونه‌ها با سه روش فوق‌الذکر انجام شده است. شکل ۷ نقشه کنترولی رتبه‌بندی بر اساس وزن نمونه‌های ژئوشیمیایی را نشان می‌دهد که در الگوریتم آنالیز ویژگی و به روش ریشه مربع به دست آمده است. نقشه‌های رتبه‌بندی با مقیاس پیوسته و به صورت کلاسه‌بندی شده به روش فرکتالی عیار- مساحت به ترتیب در شکل ۷- الف و ۷- ب ارائه شده است. مقایسه شکل‌های ۵ و ۷ نشان دهنده همپوشانی بالای محدوده و موقعیت آنومالی‌ها در نقشه رتبه‌بندی با آنومالی ژئوشیمیایی تک عنصره طلا و نقره است. همچنین محدوده آنومالی‌ها در نقشه رتبه‌بندی (شکل ۷) تقریباً کلیه آنومالی‌های تک عنصره (شکل ۵) را پوشش می‌دهد. این نکته نشان می‌دهد که آنومالی رتبه‌بندی به دست آمده یک آنومالی تجمعی است. به عبارت دیگر نتیجه رتبه‌بندی نمونه‌ها با الگوریتم آنالیز ویژگی عملکردی مشابه تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب (چند عنصری) دارد. وسعت محدوده آنومالی احتمالی (محدوده قرمز رنگ در شکل ۷- ب) حدود ۰/۱۱ کیلومتر مربع و آنومالی ممکن (محدوده زرد رنگ در شکل ۷- ب) حدود ۰/۶۲ کیلومتر مربع است.

آلتراسیون آرژیلیک پیشرفته در سطح که با خود همراهی کانی آرسنوپیریت در این آلتراسیون را دارد و همچنین همبستگی بالای عنصر آرسنیک با عناصر طلا و نقره (جدول ۳)، می‌تواند باعث اهمیت‌دار کردن غلظت این عنصر به عنوان مهمترین معیار اکتشافی در منطقه مطالعاتی باشد. عناصر طلا، نقره و آنتیموان به دلیل همبستگی بالا (جدول ۳) و پارائنز کانی‌های آنها (شکل ۲) در جایگاه بعدی می‌توانند قرار داشته باشد. در انتهای رتبه‌بندی نیز عناصر Mn، Cu و Zn قرار خواهند داشت. در رتبه‌بندی متغیرها در روش آنالیز ویژگی عنصر منگنز بعد از این دو عنصر و در رتبه آخر قرار دارد، در حالی که در روش VIKOR قبل از عناصر روی و مس است (جدول ۲). با توجه به آنومالی ژئوشیمیایی وسیع‌تر عنصر منگنز و همپوشانی این آنومالی در مرکز محدوده با آنومالی‌های طلا و نقره (شکل ۵)، به نظر می‌رسد می‌توان جایگاه رتبه‌بندی این عنصر را بالاتر از عناصر روی و مس در نظر گرفت. عنصر Ba نیز به دلیل همبستگی بالا با عنصر As (جدول ۳) در جایگاه بالاتری از سه عنصر انتهای جدول قرار خواهد داشت. بنابراین در مجموع می‌توان نتایج رتبه‌بندی متغیرها بر اساس روش VIKOR را به روش آنالیز ویژگی برتری داد.

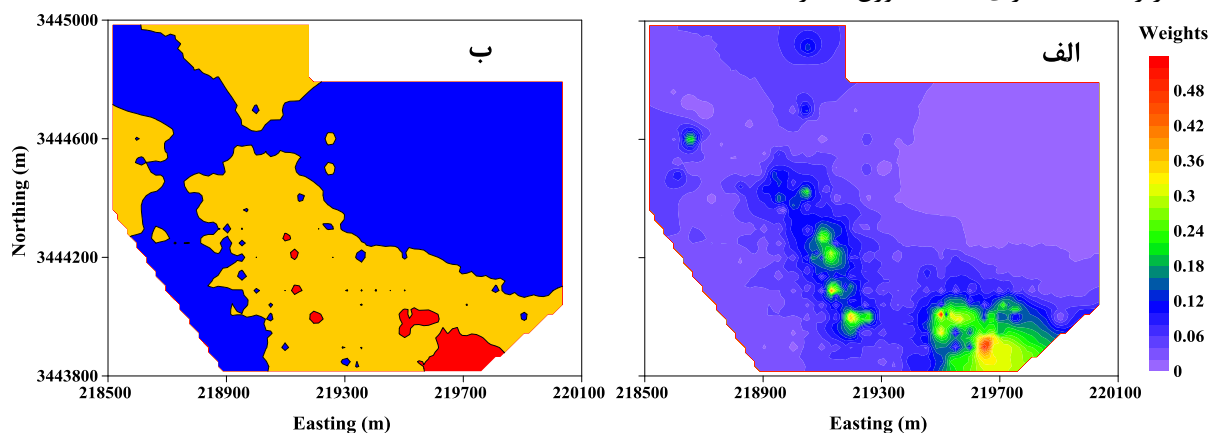
جدول ۳: ضرایب همبستگی بین عناصر

	Au	Ag	As	Ba	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn
Au	۱								
Ag	۰/۷۱	۱							
As	۰/۶۴	۰/۶۳	۱						
Ba	۰/۲۶	۰/۴۷	۰/۵۹	۱					
Cu	۰/۱۲	۰/۰۱	-۰/۱۶	-۰/۲۸	۱				
Mn	-۰/۰۷	-۰/۲۵	-۰/۳۷	-۰/۵۷	۰/۵۸	۱			
Pb	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۰۵	۱		
Sb	۰/۵۰	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۶۸	-۰/۲۹	-۰/۶۱	۰/۳۶	۱	
Zn	-۰/۱۷	-۰/۳۲	-۰/۳۲	-۰/۴۲	۰/۵۹	۰/۷۹	۰/۱۹	-۰/۶۱	۱



شکل ۷: نقشه کنتوری وزن رتبه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی به روش آنالیز ویژگی (الف: نقشه کنتوری پیوسته؛ ب: نقشه کنتوری کلاسه‌بندی شده با آستانه‌هایی با وزن ۱۷/۵ و ۳۶)

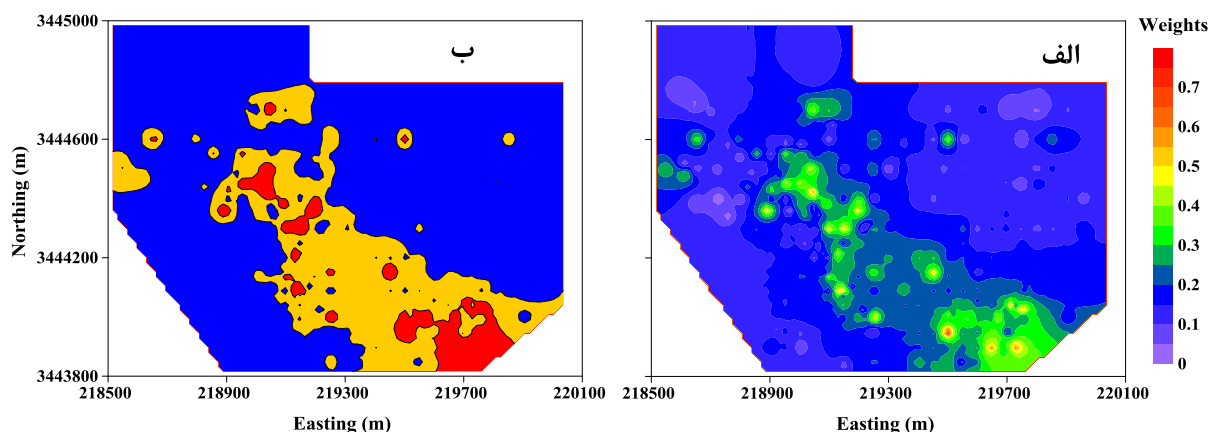
و سپس از رابطه (۱۸) (شاخص رتبه‌بندی M) رتبه هر نمونه محاسبه گردیده است. شکل ۹ نقشه کنتوری شاخص رتبه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی با مقیاس پیوسته (شکل ۹-الف) و به صورت کلاسه‌بندی شده (شکل ۹-ب) به نمایش می‌گذارد. همپوشانی بالا با آنومالی‌های طلا و نقره، همپوشانی قابل قبول با آنومالی‌های تک عنصره سایر عناصر، تجمعی یا مرکب بودن آنومالی به دست آمده و آنومالی‌های احتمالی و ممکن با وسعت ۰/۱۰ و ۰/۴۲ کیلومترمربع، مشخصات این نقشه کنتوری است. مقایسه نتایج به دست آمده از رتبه‌بندی نمونه با سه روش استفاده شده (شکل‌های ۷، ۸ و ۹)، نشان دهنده عملکرد مناسب هر سه روش در تعیین آنومالی ژئوشیمیایی سطحی، به عنوان محدوده مستعد کانی‌زایی است. این محدوده می‌تواند به عنوان محدوده پیشنهادی جهت طراحی شبکه حفاری گمانه برای فاز بعدی اکتشافی مطرح گردد.



شکل ۸: نقشه کنتوری شاخص رتبه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی به روش VIKOR (الف: نقشه کنتوری پیوسته؛ ب: نقشه کنتوری کلاسه‌بندی شده با آستانه‌هایی با وزن ۰/۰۴ و ۰/۲۳۵)

شکل ۸ نتایج رتبه‌بندی نمونه‌ها به روش VIKOR بر اساس شاخص Q را نشان می‌دهد که در شکل ۸-الف نتایج با مقیاس پیوسته و در شکل ۸-ب به صورت کلاسه‌بندی شده به روش فرکتالی عیار-مساحت ارائه شده است. در این الگوریتم نیز همپوشانی بالایی بین محدوده و موقعیت آنومالی‌ها در نقشه رتبه‌بندی (شکل ۸) با آنومالی ژئوشیمیایی تک عنصره طلا و نقره (شکل ۶) وجود دارد. تفاوت نتایج رتبه‌بندی با این دو الگوریتم در پوشش کمتر آنومالی‌های عناصر Ba و As در بخش شمال غربی منطقه مورد مطالعه با الگوریتم ویکور است. بنابراین آنومالی‌های رتبه‌بندی روش VIKOR نیز تقریباً یک آنومالی تجمعی و مرکب محسوب می‌شود. همچنین وسعت آنومالی‌های احتمالی و ممکن در شکل ۸ به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۶۶ کیلومتر مربع است.

در رتبه‌بندی نمونه‌ها با الگوریتم FDAHP-VIKOR ابتدا از رابطه (۲۲) برای محاسبه وزن معیارها استفاده شده



شکل ۹: نقشه کنتوری شاخص رتبه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی به روش FDAHP-VIKOR (الف): نقشه کنتوری پیوسته؛ ب: نقشه کنتوری کلاسه‌بندی شده با آستانه‌هایی با وزن ۰/۱۹ و ۰/۳

۶- نتیجه‌گیری

۴- محدوده‌ای به وسعت ۰/۴۲ کیلومترمربع برای طراحی شبکه حفاری گمانه در فاز اکتشافی تفصیلی و محدوده‌ای کوچک‌تر داخل آن با وسعت ۰/۱۰ کیلومترمربع برای طراحی شبکه حفاری چگالی‌تر در منطقه مطالعاتی پیشنهاد می‌شود.

۵- روش رتبه‌بندی (شامل روش‌های آماری و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره) به عنوان روشی جدید برای تعیین آنومالی چند عنصری (آنومالی مرکب) معرفی می‌گردد.

۷- تشکر و قدردانی

نویسنده مقاله سپاس و تشکر خود را از شرکت پرشین گلد به خاطر استفاده از داده‌های اکتشافی کانسار چاه‌زرد در این مقاله اعلام می‌دارد.

مراجع

- [1] Zhizhong, C., Xie Xuejing, X., Wensheng, Y., Jizhou, F., Qin, Z., and F., Jindong (2014). Multi-element geochemical mapping in Southern China. *Journal of Geochemical Exploration* 139, 183–192.
- [2] Hosseini-Dinani, H., Aftabi, A., Esmaeili, A., and M., Rabbani (2015). Composite soil-geochemical halos delineating carbonate-hosted zinc-lead-barium mineralization in the Irankuh district, Isfahan, west-central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 156, 114–130.
- [3] Ellefsen, K.J., and D.B., Smith (2016). Manual hierarchical clustering of regional geochemical data using a Bayesian finite mixture model. *Applied Geochemistry* 75, 200–210.

برداشت نمونه‌های ژئوشیمیایی سطحی یکی از ابزارهای اصلی اکتشافی در فازهای مختلف محسوب می‌شود. از آنجا که بیشتر نمونه‌ها برای تعداد زیادی از عناصر آنالیز می‌شود و تشخیص محدوده مستعد کانی‌زایی علاوه بر آنومالی عناصر اصلی به آنومالی عناصر ردیاب و معرف نیز بستگی دارد، بنابراین تعیین آنومالی مرکب بر آنومالی تک عنصره برتری محسوس خواهد داشت. در این مقاله روش‌ها رتبه‌بندی را برای شناسایی با اهمیت‌ترین ویژگی‌های مرتبط با کانی‌زایی و تعیین آنومالی ژئوشیمیایی مرکب پیشنهاد گردید. پیاده کردن سه الگوریتم رتبه‌بندی آنالیز ویژگی، VIKOR و FDAHP-VIKOR بر روی نمونه‌های ژئوشیمیایی محدوده اکتشافی چاه‌زرد نشان داد که:

۱- با اهمیت‌ترین عنصر مرتبط با کانی‌زایی در منطقه مطالعاتی عنصر As است. عناصر Au, Ag و Sb در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.

۲- آنومالی به دست آمده از نتایج رتبه‌بندی نمونه‌های تقریباً مشابه آنومالی‌های تجمعی یا مرکب هستند.

۳- مطابقت موقعیت و وسعت محدوده آنومالی رتبه‌بندی به دست آمده با الگوریتم FDAHP-VIKOR با عناصر اصلی کانی‌زایی یعنی طلا و نقره و حد وسط بودن وسعت این محدوده نسبت به دو روش دیگر رتبه‌بندی یعنی آنالیز ویژگی و VIKOR که می‌تواند کاهش ریسک سرمایه‌گذاری برای طراحی شبکه حفاری گمانه‌ها را به همراه داشته باشد، به عنوان محدوده مستعد کانی‌زایی معرفی می‌گردد.

- mineralization potential mapping at central part of Kerman metallogenic arc. MS Thesis, Isfahan University of Technology, (In Persian).
- [17] Hayati, M., Rajabzadeh, R., and M., Darabi (2015). Determination of Optimal Block Size in Angouran Mine Using VIKOR Method. *J. Mater. Environ. Sci.* 6(11), 3236-3244.
- [18] Abedi, M., Mohammadi, R., Norouzi, G.H., and M.S., Mir Mohammadi (2016). A comprehensive VIKOR method for integration of various exploratory data in mineral potential mapping. *Arabian Journal of Geoscience* 9:482.
- [19] Ghanbari, E., and A., Azadeh Shakery (2019). ERR. Rank: An algorithm based on learning to rank for direct optimization of Expected Reciprocal Rank, *Applied Intelligence* 49, 1185-1199.
- [20] Ishizaka, A., and P., Nemery (2013). *Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software*. Wiley, 310 p.
- [21] Ghanbari, E., and A., Shakery (2016). A new algorithm based on ensemble learning for learning to rank in information retrieval. *Journal of Information and Communication Technology* 7(25), 67-86, (In Persian).
- [22] Botbol, J. M. (1971). An application of characteristic analysis to mineral exploration: Proe. 9th Ins. Syra. on Techniques for Decision-Making in the Mineral Industry, Special Vol. 12, Canadian Inst. of Mineral and Metallurgy, Montreal, Canada, 92-99.
- [23] Pan, G., and D.P., Harris (1992). Decomposed and weighted characteristic analysis for the quantitative estimation of mineral resources. *Mathematical Geology* 24(7), 807-823.
- [24] Opricovic, S., and G.H., Tzeng (2004). The Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research* 156 (2), 445-455.
- [25] Opricovic, S., and G.H., Tzeng (2007). Extended VIKOR method in comparison with out ranking methods, *European Journal of Operational Research* 178, 514-529.
- [26] Jahan, A., Mustapha, F., Yousof Ismail. M., Sapuan. S.M., and M., Bahraminasab (2011). A comprehensive VIKOR method for material selection. *Material Decision* 32, 1215-1221.
- [27] Mardani, A., Kazimieras Zavadskas, E., Govindan, K., Amat Senin, A., and A., Jusoh (2016). VIKOR Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications, *Sustainability* 37, 1-38.
- [4] Beus, A.A., and S.V., Grigorian (1977). *Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits*. Published by Applied Publishing Ltd, 276 p.
- [5] Yousefi, M., A. Kamkar Rohani (2010). *Principles of Mineral Potential Modeling Methods*. Amirkabir University, 226 p, (In Persian).
- [6] Carranza, E.J.M. (2009). *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*. Elsevier, Netherlands, 365 p.
- [7] Carranza, E.J.M. (2010). Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10, 171-187.
- [8] Yang, J., and Q. Cheng (2015). A comparative study of independent component analysis with principal component analysis in geological objects identification, Part I: Simulations. *Journal of Geochemical Exploration* 149, 127-135.
- [9] Yang, J., and Q. Cheng (2015). A comparative study of independent component analysis with principal component analysis in geological objects identification. Part II: A case study of Pinghe District, Fujian, China. *Journal of Geochemical Exploration* 149, 136-146.
- [10] Geranian, H. (2018). Application of clustering methods in determining the Multi-elements anomalies in regional geochemical exploration; A Case study: 1/100000 Kordagan Sheet, South Khorasan Province. *Iranian Journal of Mining Engineering* 12(37), 81-94, (In Persian).
- [11] Aggarwal, C.C., and C.K., Reddy (2014). *Data Clustering: Algorithms and Applications*. CRC Press, 652 p.
- [12] Alvo, M., and P.L.H., Yu (2014). *Statistical Methods for Ranking Data*. Springer, New York, 279 p.
- [13] McCammon, R. B., Botbol, J. M., Sinding-Larsen, R., and R.W., Bowen (1983). *Characteristic Analysis--1981: Final Program and a Possible Discovery*. *Mathematical Geology* 15, 59-83.
- [14] He, J., Ding, W., Zhang, J., Li, A., Zhao, W., and P., Dai (2016). Logging identification and characteristic analysis of marine-continental transitional organic-rich shale in the Carboniferous-Permian strata, Bohai Bay Basin. *Marine and Petroleum Geology* 70, 273-293.
- [15] Bridges, N.J., Hanley, J.T., and R.B., McCammon (1985). PREPRO: A Computer program for encoding regional exploration data for use in characteristic analysis. *Mathematical Geology* 11(5), 513-519.
- [16] Maghsoudi Moud, F. (2016). Comparing operation of TOPSIS and VIKOR methods in Cu

- decision making problem with interval numbers. *Applied Mathematical Modelling* 33, 2257–2262.
- [35] Ataei, M. (2012). Investigation of exploration properties and determination of promising areas of mineralization of gold in Chah-Zard deposit, Yazd province. M.S. Thiess, Isfahan University of Technology, (In Persian).
- [36] Persian Gold Co. (2008). Final report of exploration operations in Ag-Au Chah-Zard deposit. 96 p., (In Persian).
- [37] Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S., and M., Hashem Emami (2012). Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold–silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Miner Deposita* 47, 425–440.
- [38] Kouhestani, H. (2011). Geology, alteration, isotope geochemistry and origin of Chah Zard Ag-Au deposit, SW Yazd. Ph D. Thiess, Tarbiat Modares University, (In Persian).
- [39] Wang, L., Qin, K.Z., Song, G.X., and G.M., Li (2019). A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification, *Ore Geology Reviews* 107, 434-456.
- [40] Pawlowsky-Glahn, V., Egozcue, J.J., and R., Tolosana-Delgado (2015). *Modeling and Analysis of Compositional Data*. John Wiley & Sons, United Kingdom, 275 p.
- [28] Ataei, M. (2010). Multi criteria decision making, Shahrood University Press, 323 p., (In Persian).
- [29] Liu, Y.C., and C.S., Chen (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering Geology* 89(1), 129-143.
- [30] Pooya, A., and A., Alizadeh Zoeram (2015). Solving the supplier selection problem using a model based On Fdahp-Vikor combined approach. *Organizational Resources Management Researchs* 4 (4), 23-48, (In Persian).
- [31] Alguliyev, R.M., Aliguliyev, R.M., and R.S., Mahmudova (2015). Multicriteria personnel selection by the modified fuzzy VIKOR method. *The Scientific World Journal* 2015, 1-16.
- [32] Zhang, N., and G., Wei (2013). Extension of VIKOR method for decision making problem based on hesitant fuzzy set. *Applied Mathematical Modelling* 37, 4938–4947.
- [33] Luo, X., and X., Wang (2017). Extended VIKOR method for intuitionistic fuzzy multiattribute Decision-Making based on a new distance measure. *Mathematical Problems in Engineering* 2017, 1-16.
- [34] Sayadi, M.K., Heydari, M., and K., Shahanaghi (2009). Extension of VIKOR method for

¹ Characteristic Analysis

² Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje

³ LINear programing technique for Multidimensional Analysis of Preference

⁴ Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Process