



مقاله پژوهشی

تعیین مناطق آنومال ژئوشیمیایی با استفاده از مدل سازی آماره U مقادیر فاکتور اصلی  
چندعنصری (U-PCA) مرتبط با کانی سازی طلائی پهنه های برشی

میرمهدی سیدرحیمی نیارق<sup>۱\*</sup>، حسین مهدیان فر<sup>۲</sup>

۱. استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، m.seydrahimi@uma.ac.ir

۲. استادیار مجتمع آموزش عالی گناباد، گروه مهندسی معدن، hssn.shahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

چکیده

هدف اصلی تجزیه و تحلیل داده های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه ای، شناسایی مناطق آنومالی ژئوشیمیایی است. در این مقاله برای ترسیم مناطق با پتانسیل کانی سازی طلائی پهنه های برشی، از روش جدید تلفیقی بر پایه روش های تحلیل مؤلفه های اصلی و آماره فضایی U استفاده شده است. در ابتدا روش PCA به عنوان یک روش کاهش ابعاد چند متغیره، برای استخراج ویژگی های ژئوشیمیایی و شناسایی عناصر پارائز کانی سازی طلائی پهنه های برشی منطقه سقز استان کردستان بکار گرفته شد. فاکتور اصلی کانی سازی بر اساس ماتریس اصلی چرخشی، تعیین گردید و عناصر پارائز W, As, Sb و Sn مرتبط با فرآیند کانی سازی شناسایی شد. جهت افزایش موفقیت اکتشاف و شدت بخشی به هاله های ژئوشیمیایی، مولفه کانی سازی چند عنصری حاصل از روش PCA مدل سازی شد. سپس روش آماره فضایی U بر روی مولفه اصلی کانی سازی پیاده سازی شد تا اهداف کانی سازی چند عنصری تعیین شده و جوامع ژئوشیمیایی مشخص و ترسیم گردد. با استفاده از این سناریو که در این پژوهش به عنوان یک روش مدل سازی جوامع ژئوشیمیایی بنام U-PCA مطرح شد، مناطق آنومال کانی سازی طلائی پهنه های برشی با دقت بیشتری تعیین گردید. از میان چهار کانسار و دو اندیس معرفی شده توسط عملیات اکتشافات محلی و ناحیه ای سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تعداد ۵ زون به خوبی شناسایی شدند. در کنار این روش، روش مرسوم آماره فضایی U نیز بر روی داده های عنصر طلا پیاده سازی شد و نتایج آن با یکدیگر مقایسه گردید. روش تلفیقی جدید نرخ پیش بینی اکتشافی را افزایش داد و نتایج بسیار مناسب تری را برای تعیین مناطق پتانسیل کانی سازی نشان داد.

کلمات کلیدی

مدل سازی پتانسیل معدنی، مدل سازی آماره U، روش تحلیل مؤلفه های اصلی، U-PCA، مناطق آنومالی، کانی سازی طلائی پهنه های برشی.

## ۱- مقدمه

تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های معمولاً در مراحل اولیه اکتشاف ذخایر معدنی انجام می‌شود [۱ و ۲]. شناسایی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی و تعیین مناطق با پتانسیل کانی‌سازی، از موضوعات مهم در این مرحله از ژئوشیمی اکتشافی است [۳-۵].

روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل تک متغیره و چند متغیره داده‌های ژئوشیمیایی برای جداسازی مؤلفه آنومالی از زمینه ژئوشیمیایی ارائه شده است [۶-۱۱]. روش‌های تک متغیره می‌توانند به دو روش ساختاری و غیر ساختاری تقسیم شوند. از بین این روش‌ها، روش فرکتال [۱۲-۱۵]، روش آمار فضایی U [۱۶-۱۸] و روش نمودار احتمال [۱۹-۲۱] به طور گسترده برای تعیین نقشه مناطق آنومالی بکار گرفته شده‌اند.

در روش‌های ساختاری برای تعیین مناطق آنومال، داده‌های ژئوشیمیایی بدون در نظر گرفتن نظر کارشناس و با در نظر گرفتن موقعیت نقاط نمونه‌برداری، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. روش آماره فضایی U یکی از نوع روش‌ها در تفکیک مناطق آنومال ژئوشیمیایی محسوب می‌شود. این روش نوعی روش میانگین‌گیری متحرک است، با این ویژگی که در هر نقطه خاص ابعاد پنجره‌ای که در داخل آن میانگین‌گیری صورت می‌گیرد، تغییر داده می‌شود. بنابراین برای هر نقطه خاص تعدادی از مقادیر برای آماره U آن نقطه از روی نقاط اطراف آن محاسبه می‌شود. بدین ترتیب ارتباط فضایی نقاط در این روش کاملاً در نظر گرفته می‌شود [۱۶ و ۲۲-۲۴]. روش‌های آماری تک‌متغیره به تنهایی نمی‌توانند رفتارهای ژئوشیمیایی عناصر پاراژنز کانی‌سازی را بررسی نمایند از این رو ممکن است دچار محدودیت در شناسایی تمام مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی شوند. روش‌های آماری چند متغیره می‌تواند روابط بین عناصر را تعیین کند و پاراژنز عناصر کانی‌سازی را شناسایی کند. بنابراین از این ویژگی‌های مهم این روش‌ها می‌توان در افزایش کارایی روش‌های آماری تک متغیره استفاده نمود.

مطالعات مختلفی با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره در تعیین ویژگی‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی انجام شده است [۲۵-۲۷]. روش آنالیز فاکتوری به عنوان یک روش چند متغیره به صورت مرحله‌ای به منظور بهبود فاکتور کانی‌سازی بر روی داده‌های ژئوشیمیایی انجام گرفته و شاخص GMPI به عنوان یک شاخص جدید ژئوشیمیایی بر مبنای روش آنالیز فاکتوری برای تعیین منطق با پتانسیل کانی‌سازی

معرفی گردیده و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸ و ۲۹].

صادقی و همکاران با استفاده از شاخص‌های جدید ژئوشیمیایی مبتنی بر ویژگی‌های حوضه ابریز نمونه‌های ژئوشیمیایی و روش‌های آماری، توانستند نقشه آنومالی ژئوشیمیایی عنصر طلا را بهبود بخشند [۳۰].

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به عنوان یک روش آماری چند متغیره، با موفقیت برای تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی و ترسیم مناطق آنومالی استفاده شده است [۳۳-۳۴]. این روش می‌تواند پیچیدگی مجموعه داده‌ها را به طور مؤثرتری نسبت به روش‌های تجزیه و تحلیل تک متغیره مورد بررسی قرار دهد. هدف اساسی PCA کاهش تعداد متغیرها به چند مؤلفه اصلی و شناسایی روابط بین متغیرها و ساختار پنهان موجود در داده‌های چندمتغیره است. عناصر ژئوشیمیایی مختلف می‌توانند به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شوند و به عنوان ورودی روش PCA مورد تحلیل قرار گیرند [۳۴-۳۶]. داده‌های ژئوشیمی چندعنصری در حوزه‌های مختلف از جمله حوزه فرکانس [۳۷]، حوزه مکان [۳۸ و ۳۹] و حوزه مکان-مقیاس و ویولت [۳۵ و ۴۰] با استفاده از روش PCA مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

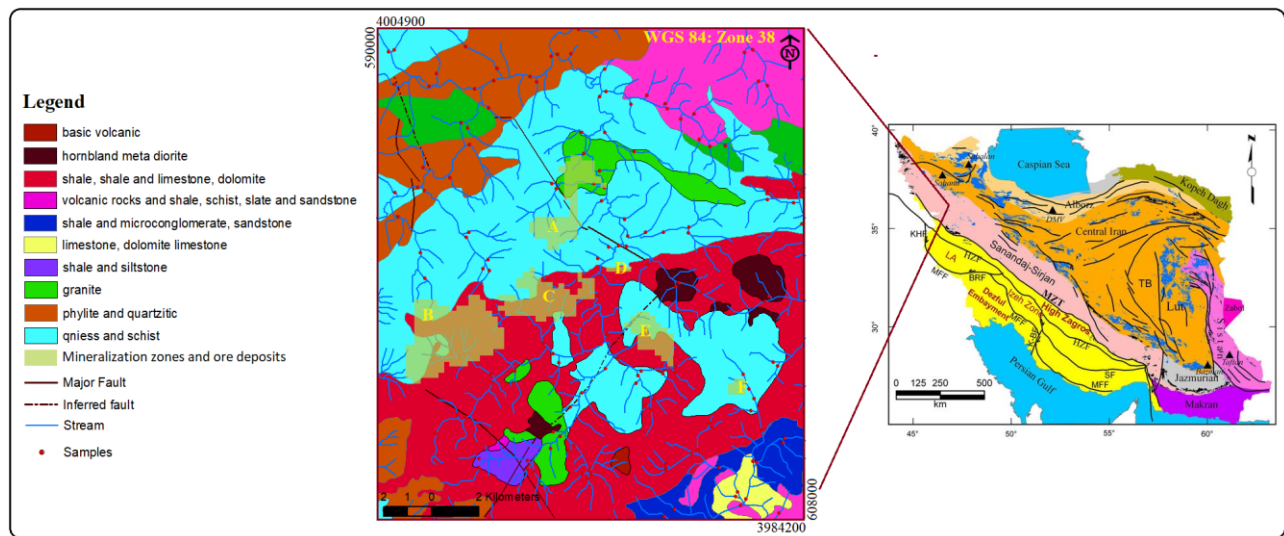
استفاده تلفیقی از روش‌های ساختاری و روش‌های تحلیل آماری چند متغیره می‌تواند موجب بهبود نتایج شود. در این مطالعه برای اولین بار از تلفیق روش آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی با روش آماره فضایی U استفاده شده است. روش آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور تعیین مؤلفه‌های مختلف زمین‌شناسی و کانی‌سازی و همچنین تعیین عناصر پاراژنز مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این روش می‌توان فاکتور مربوط به فرآیند کانی‌سازی را شناسایی و مورد تحلیل قرار داد، بنابراین داده‌های ورودی برای مدل‌سازی به روش آماره فضایی U از اعتبار بیشتری برخوردار خواهند بود. در نهایت خروجی حاصل از روش PCA، به عنوان ورودی روش آماره فضایی U، با این روش مدل‌سازی شده و نقشه آنومال ژئوشیمیایی تهیه گردید.

## ۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب غرب سقز در استان کردستان واقع شده است، که از نظر آب و هوایی، سرد و کوهستانی بوده و از طریق جاده اصلی سقز به بانه می‌توان به این محدوده دست پیدا کرد [۴۱ و ۴۲].

مطالعات دورسنجی مقدماتی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سقر به منظور شناسایی واحدهای سنگی، دگرسانی و پتانسیل‌های معدنی، با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی [۴۷] و [۴۸] می‌باشد.

از دیدگاه تکتونیکی، عامل اصلی کانی‌سازی طلا در منطقه، شرایط برشی و شدیداً تکتونیزه بوده که به همراه تشکیل سیالات گرمابی است. همچنین در بررسی‌های اکتشافی صورت پذیرفته توسط سازمان زمین‌شناسی کشور، کانی‌سازی طلا پهنه‌های برشی در درون سنگ‌های دگرگون پرکامبرین شناسایی شده است [۴۹]. بر اساس همین نتایج و مطالعات بعدی، چندین کانسار و اندیس طلا در منطقه شناسایی شده است، که شامل کانسارهای قره‌جر، قفله، کرویان، قباغلوچه و دو اندیس دیگر می‌باشد [۴۱ و ۵۰]. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت نمونه‌های برداشت شده و کانسارها و اندیس‌های شناخته شده آورده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه جنوب غرب سقر، شامل کانسارها و اندیس‌های مهم منطقه:

A: قره‌جر، B: قفله، C: کرویان، D: قباغلوچه، E و F: اندیس [۴۹]

### ۳- آماده‌سازی داده‌ها و روش‌ها

#### ۳-۱- داده‌ها، روش نمونه برداری و آنالیز

محل نمونه‌ها مشخص شده است. نمونه‌های خشک در محل از الک ۴۰ مش عبور داده شده و پس از جداسازی، بسته بندی شده‌اند. نمونه‌های مرطوب نیز در محل کمپ با حرارت غیرمستقیم خشک شده و ذرات ۴۰- مش آن جداسازی و بسته بندی گردیده است. ۱۰۰ گرم از هر نمونه بسته‌بندی شده به آزمایشگاه نمونه‌کوبی و آماده‌سازی ارسال و پس از پودر شدن، ذرات زیر ۲۰۰ مش با استفاده از روش جذب اتمی و طیف سنج‌نشی برای ۲۱ عنصر مورد تجزیه و آنالیز قرار گرفته

از لحاظ زمین‌شناسی ایران، این محدوده در پهنه سندانج-سیرجان قرار می‌گیرد (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، پهنه سندانج-سیرجان بخشی از کمربند کوهزایی زاگرس بوده که به صورت یک نوار ماگمایی-دگرگونی در راستای شمال غربی-جنوب شرقی کشیده شده است. این پهنه در برخورد پوسته عربی به صفحه ایران در کرتاسه-ترشیری شکل گرفته است [۴۳].

قبل از سال ۷۳، اطلاعات اکتشافی از منطقه آنچنان میسر نیست و دلیل آن به کمبود امکانات، دور بودن از مرکز و شرایط جنگ تحمیلی در آن زمان می‌باشد، که مطالعات و بررسی‌های علمی دقیق را ممکن ناساخته است. به همین دلیل علی‌رغم وجود پتانسیل‌های معدنی قابل توجه در منطقه، به لحاظ اطلاعات معدنی تقریباً بکر و دست‌نخورده باقی مانده است. بخشی از مطالعات انجام پذیرفته در منطقه مورد مطالعه شامل تهیه نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ مهاباد، گزارش زمین‌شناسی، ساخت‌های آلتراسیون منطقه، اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک ۱:۱۰۰۰۰۰ سقر، آلوت و تیژتیز [۴۴ و ۴۶]،

در این رابطه X نشان دهنده متغیرهای اولیه است که در معادله فوق، مقادیر مربوط به عناصر مختلف موجود در هر نمونه در معادله قرار می‌گیرند. متغیر b مقادیر وزن رگرسیون مربوط به هر عنصر در مولفه اصلی را نشان می‌دهد که بر مبنای مقادیر کواریانس و یا همبستگی داده‌های خام اولیه بدست می‌آید [۵۵].

### ۳-۳- روش آمار فضایی U

روش آماره فضایی U<sup>۲</sup> نوعی روش میانگین‌گیری متحرک<sup>۳</sup> است، با این ویژگی که در هر نقطه خاص ابعاد پنجره‌ای که در داخل آن میانگین‌گیری صورت می‌گیرد، تغییر داده می‌شود. تغییر در ایزوتروپی و ان‌ایزوتروپی متغیرها در شکل پنجره موثر است. فاصله ایستگاه‌های اطراف مرکز پنجره، برای محاسبه وزن این ایستگاه‌ها استفاده می‌شود. این وزن‌ها به مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه‌ها ضرب شده تا نهایتاً تخمینی برای نقطه مرکزی پنجره مورد نظر بدست آید.

مقدار متوسط مقادیر U که با  $U_i(r)$  نشان داده می‌شود، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸، ۲۱ و ۵۵]:

$$U_i(r) = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} w_j(r)x_j - \mu}{\sigma} + \frac{\sum_{k=1}^{n_2} w_k(r)x_k - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

$$= \frac{\bar{x}_i(r) - \mu}{\sigma}$$

که در آن  $\mu$  میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار کل داده‌ها می‌باشد.  $x_i$  و  $x_j$  مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های z و k داخل پنجره هستند.  $w_k(r)$  و  $w_j(r)$  وزن‌های این ایستگاه‌ها می‌باشند.  $\bar{x}_i(r)$  میانگین وزنی ایستگاه i بر اساس ایستگاه‌های اطراف است. در این رابطه، z مربوط به نمونه‌های با مقادیر زمین و k برای مقادیر آنومال می‌باشد. اگر میانگین جامعه آنومالی  $\mu_A$  و میانگین جامعه زمینه  $\mu_B$  باشد، آنگاه  $\mu_B \pi \mu \pi \mu_A$  است.

### ۳-۴- روش تلفیقی U-PCA

روش PCA می‌تواند شاخص‌های چندعنصری تحت عنوان مؤلفه‌های اصلی را تولید کند که این شاخص‌ها بر مبنای فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی و کانی‌سازی در منطقه حاصل می‌شوند و برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شاخص‌ها مبتنی بر مقادیر ویژه و بردارهای ویژه متغیرهای اولیه هستند و داده‌های اولیه بر اساس روش وریمکس<sup>۴</sup> در فضای جدید مورد چرخش قرار گرفته [۵۶، ۵۷] و در نتیجه شاخص‌های جدید ژئوشیمی با توجه به محورهای ایجاد شده، بدست می‌آیند. برای هر نمونه ژئوشیمیایی یک مقدار مشخصی در

است. از آنجا که محل برخی از مناطق کانی‌سازی طلا و اندیس‌های معدنی در منطقه طی انجام اکتشافات ناحیه‌ای و محلی توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران شناسایی شده است، لذا این مناطق برای اعتبارسنجی نتایج در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات آماری اولیه روی نمونه‌ها هیچ داده سانسوری را مشخص نکرد. یک نمونه با عیار خارج از ردیف وجود داشت که پس از اصلاح، جایگزین شد.

### ۳-۲- روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

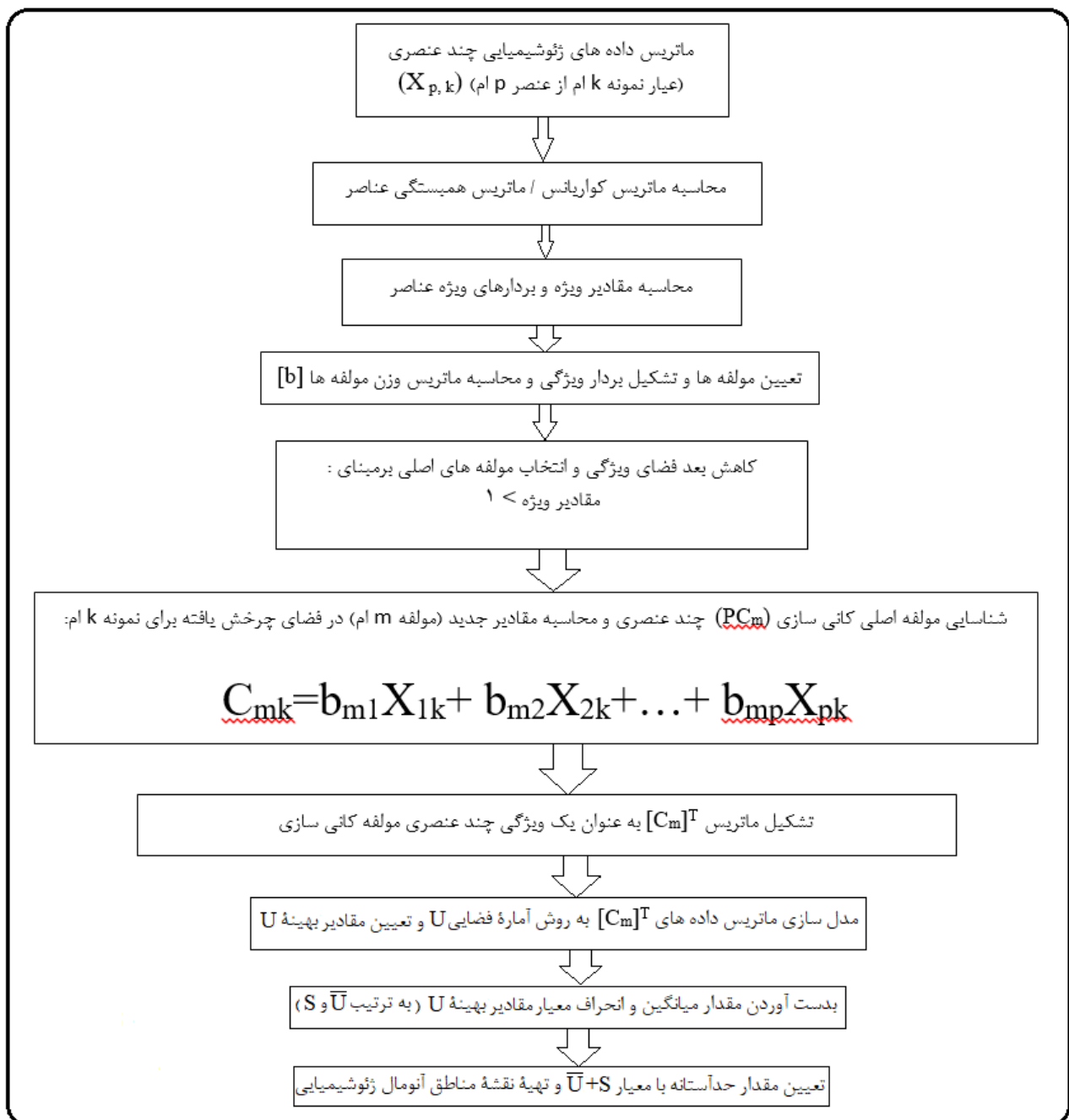
روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۱</sup> (PCA) یکی از معتبرترین روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره محسوب می‌شود [۵۱]. PCA به عنوان یک روش کاهش بعد فضای ویژگی، ابعاد متغیرهای اولیه را به تعداد کمتری از مؤلفه‌های اصلی غیر همبسته بر اساس ضریب همبستگی یا کواریانس کاهش می‌دهد. با انتقال داده‌های مربوط به متغیرهای اولیه به یک فضای جدید محورهای چرخانده شده و مختصات جدید، مقادیر مطلق جدیدی برای هر نمونه بدست می‌آید و مؤلفه‌های اصلی حاصل، جای متغیرهای اولیه را در این مجموعه به عنوان داده‌های جدید می‌گیرند [۵۱ و ۵۲]. بر این اساس وضعیت عیاری عناصر در هر نمونه بر اساس نقش آن‌ها در این مؤلفه‌های اصلی باز تعریف می‌شود. در فرآیند انتقال و تبدیل فضای ویژگی، محورهای فضایی اولیه می‌چرخند و محورهای جدیدی در جهت‌های با بیشترین تغییرپذیری موجود در داده‌های اولیه، ایجاد می‌شوند. موقعیت نمونه‌ها در فضای چندبعدی جدید، بر مبنای محورهای چرخش یافته و مقادیر عیاری عناصر در هر یک از نمونه‌ها تعیین می‌شود. در فضای ویژگی جدید، مقادیر عیار عناصر جای خود را به مقادیر مطلق مؤلفه‌های اصلی می‌دهند و این مقادیر در مراحل بعد مورد تحلیل قرار می‌گیرند. اطلاعات مهمی بوسیله این محورهای چرخشی و ماتریس حاصل از آن بدست می‌آید [۵۴-۵۱].

محورهای چرخش یافته جدیدی که بیشترین تغییرات موجود در داده‌ها را پوشش می‌دهند به عنوان مؤلفه‌های اصلی در نظر گرفته می‌شوند و سایر مؤلفه‌ها از داده‌ها حذف می‌گردند. PCA ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه بدست می‌آورد که با استفاده از این معادلات خطی و مؤلفه‌های اصلی محاسبه شده، فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی و کانی‌سازی قابل تشخیص خواهند بود. مؤلفه اصلی اول که بیشترین تغییرپذیری داده‌ها را توجیه می‌کند بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_1 = b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + L + b_{1p}X_p \quad (1)$$

توجه قرار می‌گیرد. در این مطالعه، فاکتور کانی‌سازی چندعنصری مربوط به عناصر پارائز با استفاده از روش آماره فضایی U مدل‌سازی شد. این روش تلفیقی با عنوان روش تلفیقی U-PCA، در حقیقت مدل U مقادیر APCS را برای تمامی نقاط نمونه‌برداری شده بدست آورده و حد آستانه‌ای جوامع ژئوشیمیایی این مقادیر را تعیین می‌کند. در این روش، در نهایت نقشه توزیع مقادیر U با درج مناطق آنومال، به عنوان نقشه پتانسیل مطلوب کانی‌سازی طلا رسم می‌شود. در شکل ۲، مراحل مختلف روش تلفیقی U-PCA در قالب یک چارت ارائه شده است.

هر مؤلفه اصلی بدست می‌آید این مقادیر به عنوان نمرات مطلق مؤلفه‌های اصلی<sup>۵</sup> (APCS)، می‌توانند به جای غلظت عناصر اولیه مورد تحلیل و بررسی قرار بگیرند. در صورتی که فاکتور اصلی کانی‌سازی در بین مؤلفه‌های اصلی بدست آمده از روش PCA شناسایی شود این مؤلفه را به عنوان شاخص جدید کانی‌سازی می‌توان در نظر گرفته و مورد تحلیل قرار داد. این شاخص جدید کانی‌سازی مجموعه‌ای از مقادیر APCS را در بر گرفته که بر اساس عیار عناصر پارائز کانی‌سازی بدست آمده‌اند و در حقیقت مؤلفه کانی‌سازی به عنوان یک شاخص جدید چندعنصری مورد



شکل ۲: مراحل مختلف روش تلفیقی U-PCA بر روی داده‌های عناصر ناحیه طلای پهنه‌های برشی جنوب غرب سقز

#### ۴- بحث و نتایج

شامل Au, Ag, As, Bi, B, Te, Se, Mo می‌باشد و عناصر همراه آنها عبارتند از K, Si, Rb, Ba, Li, Cs, Ti [۵۸].

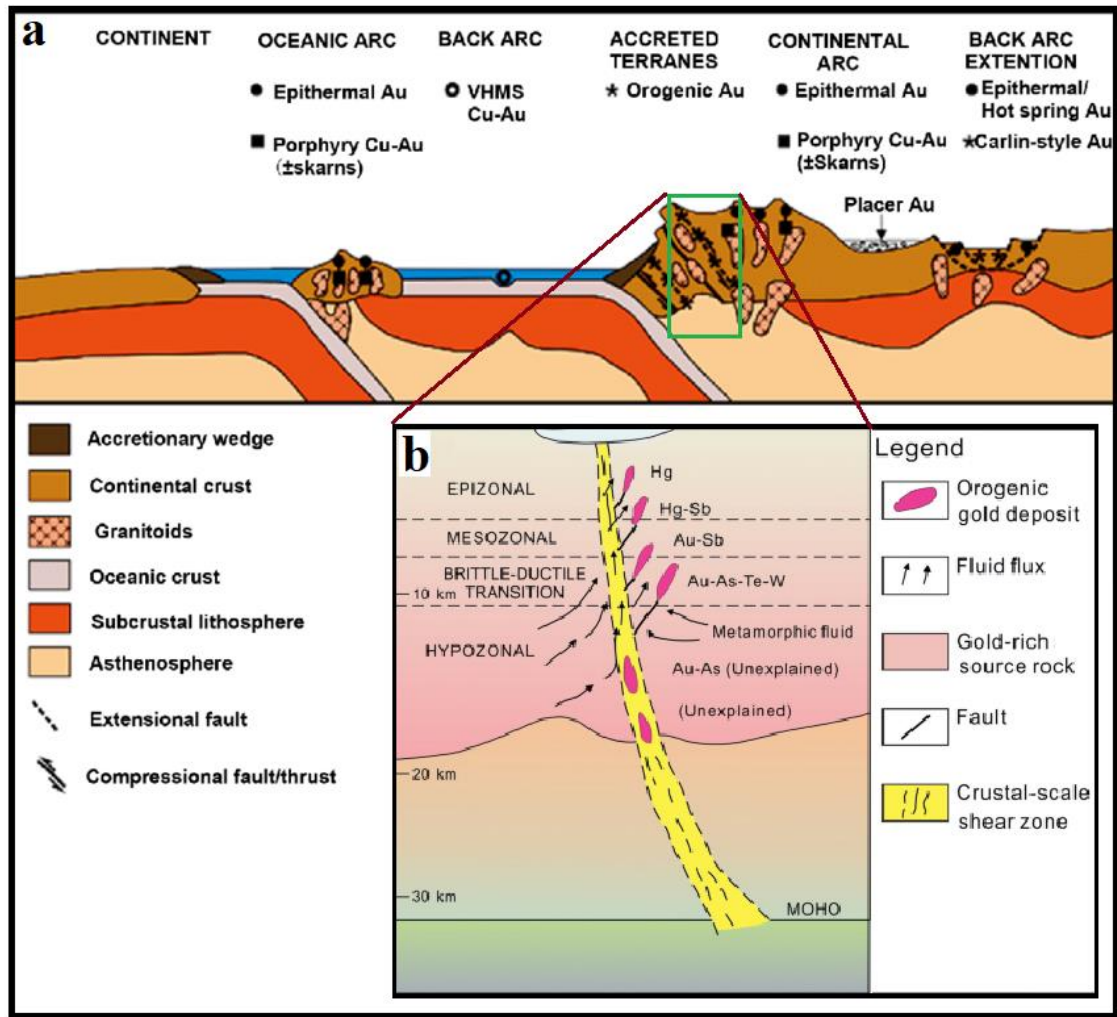
##### ۴-۱- نتایج روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

در منطقه کانی‌سازی طلای سقر نیز در قسمت‌های مختلف منطقه الگوهای متفاوتی از کانی‌سازی طلا وجود دارد. با تفکیک منطقه به ۳ محدوده مجزا از هم بر اساس حوضه آبریز و سنگ‌های زمینه می‌توان به نتایج مناسبی در تحلیل داده‌ها و شناسایی الگوهای کانی‌سازی دست یافت. همان طور که در شکل ۴ دیده می‌شود این محدوده‌های سه گانه مشخص شده است. سنگ‌های میزبان در محدوده ۱ شامل گنایس، شیست و در برخی قسمت‌ها واحدهای فیلیت و کوارتزیت و نفوذی‌های گرانیتی می‌باشد. محدوده ۲ سنگ‌های شیل، آهک و دولومیت را در برمی‌گیرد که با گنایس‌ها و شیست‌ها با وسعت محدود همراه هستند. سنگ زمینه در محدوده ۳ بیشتر از شیل، میکرو کنگلومرا و واحدهای ماسه سنگی تشکیل شده و در برخی قسمت‌ها سنگ‌های آهکی و دولومیتی مشاهده می‌شوند. سنگ‌های آندزیت و بازالت نیز در این محدوده مشاهده می‌شوند. مطالعات و بررسی‌های این پژوهش، به صورت مجزا و هم‌زمان بر روی این محدوده‌ها صورت گرفته است. ابتدا داده‌های خارج از ردیف مورد بررسی قرار گرفتند. در این خصوص یکی از داده‌ها خارج از ردیف بود که اصلاح شد. در ادامه روش کبیر<sup>۷</sup> جهت نرمالایز کردن بر روی داده‌ها صورت گرفت [۵۹] و سپس روش PCA مورد استفاده قرار گرفت. روش PCA بر روی داده‌های ژئوشیمی این مناطق نتایج جالب توجهی نشان داد. با توجه به نتایج بدست آمده، الگوهای متنوع کانی‌سازی همراه با عناصر مختلف پاراژنز در قسمت‌های شمالی-غربی، مرکزی-جنوب غربی و شرقی منطقه آشکار گردید.

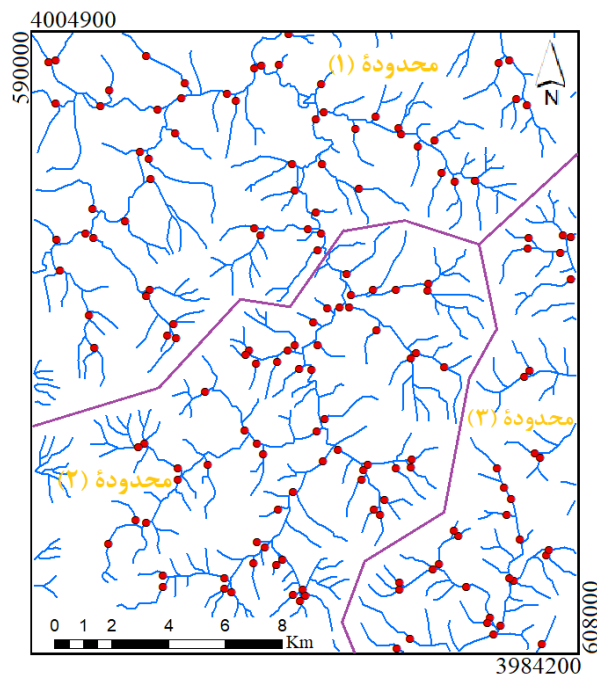
با توجه به وجود حوزه‌های آبریز مختلف در منطقه و همچنین تنوع سنگ زمینه، تعیین عناصر مرتبط با طلا و عناصر پاراژنز با چالش‌هایی مواجه است. به ویژه وجود همبستگی پایین بین عناصر مختلف با عنصر طلا در منطقه بر پیچیدگی مجموعه داده‌ها و همچنین تحلیل فرآیندهای کانی‌سازی در منطقه افزوده است. وضعیت ضرایب همبستگی عناصر مهم منطقه، بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، عنصر طلا با هیچ عنصری همبستگی قابل توجه و معناداری ندارد و عملاً با توجه به این ضرایب بسیار پایین همبستگی، نمی‌توان عناصر پاراژنز کانی‌سازی طلا را در منطقه تشخیص داد. در مناطقی که فازهای کانی‌سازی دارای تفاوت‌هایی در ویژگی‌های ژئوشیمی عناصر باشند، تعیین و تمایز الگوهای مختلف کانی‌سازی به دلیل پیچیدگی توزیع داده‌های ژئوشیمیایی با مشکل روبرو خواهد بود. ذخایر طلای پهنه‌های برشی زیرمجموعه ذخایر طلای اورونیک<sup>۸</sup> است. این ذخایر در کمریندهای دگرگونی متامورفیک (شامل دو نوع سنگ آتشفشانی و رسوبی) از آرکنن میانی تا ترشیاری واقع شده اند [۵۸]. بر اساس فرآیند شکل‌گیری ذخایر طلای پهنه‌های برشی و میزان حرارت و دما و عمق کانی‌سازی، تغییراتی در نوع کانی‌سازی می‌تواند ایجاد شود و عناصر پاراژنز کانی‌سازی را دست‌خوش تغییراتی کند. معمولاً در عمق‌های بالاتر به صورت شکننده و در عمق‌های پایین‌تر به دلیل تغییر در درجه حرارت و فشار از این حالت تبدیل به حالت شکل‌پذیر می‌شود. شکل ۳ رنج وسیعی از این تغییرات را بر حسب عمق نشان می‌دهد. مهم‌ترین پاراژنز فلزی این نوع ذخایر

جدول ۱: مقادیر ضریب همبستگی پیرسون موجود در داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای کل منطقه سقر

	Ag	As	Au	Ba	Cu	Mo	Pb	Sb	Sn	W	Zn
Ag	۱	۰٫۴۶	۰٫۰۷	۰٫۳۰	۰٫۶۷	۰٫۵۴	۰٫۶۴	۰٫۲۱	۰٫۱۷	۰٫۴۲	۰٫۷۶
As	۰٫۴۶	۱	-۰٫۰۷	۰٫۱۲	۰٫۳۱	۰٫۶۵	۰٫۳۹	۰٫۷۵	۰٫۲۲	۰٫۳۷	۰٫۵۷
Au	۰٫۰۷	-۰٫۰۷	۱	۰	-۰٫۰۶	-۰٫۰۲	-۰٫۰۹	-۰٫۰۱	۰٫۴۰	-۰٫۰۱	-۰٫۰۵
Ba	۰٫۳۰	۰٫۱۲	۰	۱	۰٫۵۵	۰٫۲۵	۰٫۲۵	-۰٫۱۱	-۰٫۱۶	۰٫۴۲	۰٫۴۱
Cu	۰٫۶۷	۰٫۳۱	-۰٫۰۶	۰٫۵۵	۱	۰٫۵۴	۰٫۴۵	۰٫۰۸	-۰٫۱۰	۰٫۴۳	۰٫۶۷
Mo	۰٫۵۴	۰٫۶۵	-۰٫۰۲	۰٫۲۵	۰٫۵۴	۱	۰٫۲۷	۰٫۴۴	۰٫۲۶	۰٫۳۰	۰٫۴۳
Pb	۰٫۶۴	۰٫۳۹	-۰٫۰۹	۰٫۲۵	۰٫۴۵	۰٫۲۷	۱	۰٫۱۴	۰٫۰۴	۰٫۲۸	۰٫۷۴
Sb	۰٫۲۱	۰٫۷۵	-۰٫۰۱	-۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۴۴	۰٫۱۴	۱	۰٫۱۹	۰٫۲۱	۰٫۲۸
Sn	۰٫۱۷	۰٫۲۲	۰٫۴۰	-۰٫۱۶	-۰٫۱۰	۰٫۲۶	۰٫۰۴	۰٫۱۹	۱	۰٫۰۵	۰٫۰۱
W	۰٫۴۲	۰٫۳۷	-۰٫۰۱	۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۳۰	۰٫۲۸	۰٫۲۱	۰٫۰۵	۱	۰٫۴۲
Zn	۰٫۷۶	۰٫۵۷	-۰٫۰۵	۰٫۴۱	۰٫۶۷	۰٫۴۳	۰٫۷۴	۰٫۲۸	۰٫۰۱	۰٫۴۲	۱



شکل ۳: a. تکتونیک ذخایر طلای کوهزایی، b. زون تصادم/انتقال [اقتباس از ۵۸]



شکل ۴: موقعیت نقاط نمونه برداری از رسوبات آبراه‌های در منطقه سقز و محدوده های ۳ گانه تفکیک شده در منطقه



داده‌های محدوده ۱ که قسمت شمالی و شمال غربی منطقه را پوشش می‌دهد تعداد ۲۱ عنصر اولیه را به ۶ بعد کاهش داد. در این کاهش بعد، مؤلفه‌هایی که مقدار ویژه بالاتری از عدد یک دارند به عنوان مؤلفه اصلی انتخاب شدند. سایر مؤلفه‌ها از ماتریس نهایی حذف شدند [۱۱ و ۶۰]. واریانس کلی که توسط این مؤلفه‌های اصلی توجیه می‌شود برابر ۷۸ درصد و واریانس مؤلفه اصلی کانی‌سازی برابر ۵/۵ درصد است. عناصر قلع و طلا

روش PCA بر روی محدوده‌های سه گانه و بر روی ۲۱ عنصر انجام گرفت. وضعیت مؤلفه‌های اصلی و نتایج مطالعات در جدول ۲ آورده شده است. ضرایب مربوط به عناصر مختلف در مؤلفه‌های اصلی در محدوده‌های سه گانه در جداول ۳ و ۴ و ۵ نشان داده شده است.

با استفاده از روش PCA سه الگوی پارائتری کانی‌سازی طلا در قسمت‌های مختلف منطقه بدست آمد. روش PCA بر روی

جدول ۲: نتایج روش PCA بر روی داده‌های ژئوشیمی ۲۱ عنصری در محدوده‌های سه گانه منطقه سقز

محدوده	تعداد مؤلفه‌های اصلی	مؤلفه کانی‌سازی	عناصر کانی‌سازی	واریانس کل	واریانس مؤلفه کانی‌سازی
محدوده ۱	۶	مؤلفه ۶	طلا و قلع	۷۸	۵/۵
محدوده ۲	۶	مؤلفه ۶	طلا، تنگستن	۷۷/۵	۶/۵
محدوده ۳	۴	مؤلفه ۲	طلا، آرسنیک، آنتیموان	۷۶/۵	۱۸

جدول ۴: ضرایب مربوط به عناصر مختلف در مؤلفه‌های اصلی در محدوده ۲

element	Component (area 2)					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Au	۰/۰۲	۰	-۰/۰۴	-۰/۲۴	-۰/۰۶	۰/۸۶
W	۰/۰۵	۰/۰۱	-۰/۰۴	۰/۴	۰/۳۱	۰/۶۷
Ti	۰/۷۹	-۰/۱۶	-۰/۰۷	۰/۱۲	-۰/۰۵	۰/۳۶
As	۰/۰۹	-۰/۰۳	۰/۳۱	۰/۰۲	۰/۸۱	۰/۱۶
Mn	۰/۶۹	۰/۳۹	۰/۲۵	-۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۱۶
Co	۰/۸۹	۰/۱۶	۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۸	۰/۱۵
Ag	۰/۱۷	۰/۵۱	۰/۶۹	۰/۰۹	-۰/۰۷	۰/۱
Ba	-۰/۰۱	۰/۶۱	۰/۰۲	-۰/۲۳	-۰/۰۱	۰/۰۶
Mo	-۰/۰۴	۰/۴۷	۰/۴	۰/۶۱	۰/۰۹	۰/۰۶
Sn	۰/۰۲	-۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۷۱	-۰/۴۵	۰/۰۳
Be	-۰/۰۱	-۰/۰۶	۰/۳۱	۰/۶۴	۰/۳۴	۰/۰۲
Zn	۰/۴۲	۰/۷۹	۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۲۶	۰
Sb	۰/۰۷	-۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۳۴	-۰/۰۱
B	۰/۳۹	۰/۳۸	-۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۷۶	-۰/۰۶
Cu	۰/۵۲	۰/۷	-۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	-۰/۰۸
Bi	-۰/۱۲	۰/۱۴	-۰/۲۱	۰/۷۲	۰/۰۲	-۰/۰۹
Hg	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۸۵	-۰/۰۴	-۰/۰۵	-۰/۱۲
Pb	۰/۰۹	۰/۸۵	۰/۲	۰/۳۲	۰/۱۸	-۰/۱۳
V	۰/۸	۰/۱۶	۰/۰۱	-۰/۰۸	۰/۳۸	-۰/۱۵
Cr	۰/۷۹	۰/۱۳	۰/۲۸	-۰/۱۸	۰/۱۱	-۰/۲۶
Ni	۰/۷۱	۰/۳۱	۰/۴۱	-۰/۱۲	۰/۱۹	-۰/۲۸

جدول ۳: ضرایب مربوط به عناصر مختلف در مؤلفه‌های اصلی در محدوده ۱

element	Component					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Au	۰/۰۴۲	۰/۰۲	-۰/۰۸۷	۰/۰۲۲	-۰/۰۲۴	۰/۹۰۶
Sn	۰/۲۳۶	-۰/۰۳۹	۰/۲۸۳	-۰/۰۳۰۸	۰/۴۶۱	۰/۶۲
Cr	۰/۹۰۴	۰/۰۵۲	-۰/۰۴۶	۰/۰۵۲	۰/۰۴۴	۰/۲۳۹
Hg	۰/۰۸۵	۰/۶۴۲	۰/۱۳۶	۰/۰۳۵	-۰/۰۱۹	۰/۲۱۳
Be	۰/۰۳۶	۰/۱۵۶	۰/۳۹۶	-۰/۵۶۲	۰/۴۰۶	۰/۱۶۸
V	۰/۷۸۵	۰/۰۹۳	۰/۳۹۱	۰/۱۶۳	۰/۲۸۶	۰/۰۹
B	۰/۱۳۹	۰/۱۳۵	۰/۵۹۹	۰/۵۹۲	۰/۱۶۸	۰/۰۷۹
Ti	۰/۱۰۷	۰/۰۱۲	۰/۱۵	۰/۱۵۵	۰/۹۱۵	۰/۰۵۶
Ag	۰/۳۰۵	۰/۷۴۹	۰/۲۳۶	۰/۱۶۹	۰/۲۶۳	۰/۰۴۱
W	-۰/۱۹۲	۰/۲۷۱	۰/۲۰۹	۰/۵۵۹	۰/۳۹۹	۰/۰۱۹
Sb	-۰/۱۱۷	۰/۱۷۴	۰/۸۱۶	-۰/۱۴۲	-۰/۰۷۳	۰/۰۱۸
Mo	۰/۳۴۱	۰/۱۵۲	۰/۷۸۳	۰/۳۰۴	۰/۱۳۷	۰/۰۱۲
Mn	۰/۳۱۶	۰/۲۷۵	-۰/۰۴۹	۰/۰۲۳	۰/۸۰۴	-۰/۰۰۴
Ni	۰/۹۴۱	۰/۱۴۸	-۰/۰۲۵	-۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	-۰/۰۱۷
Bi	۰/۰۰۵	۰/۵۴۷	۰/۳۱۱	۰/۵۱۷	-۰/۰۹۱	-۰/۰۲۲
Ba	۰/۳۱	۰/۱۸۴	-۰/۰۹۸	۰/۷۴۲	۰/۱۲۹	-۰/۰۳۲
As	۰/۰۷۵	۰/۳۴۵	۰/۷۹۳	۰/۰۰۷	۰/۱۸۷	-۰/۰۰۸
Pb	۰/۰۱۳	۰/۸۳۸	۰/۰۹۶	۰/۰۶۶	۰/۰۸۶	-۰/۰۹۳
Co	۰/۷۳۳	۰/۲۳۹	۰/۱۰۴	۰/۲	۰/۲۸	-۰/۰۹۵
Cu	۰/۴۱۸	۰/۴۹	۰/۱۶	۰/۵۹۴	۰/۰۴	-۰/۰۱
Zn	۰/۲۴۳	۰/۷۹۷	۰/۲۰۳	۰/۲۲۵	۰/۲۰۸	-۰/۱۴۵



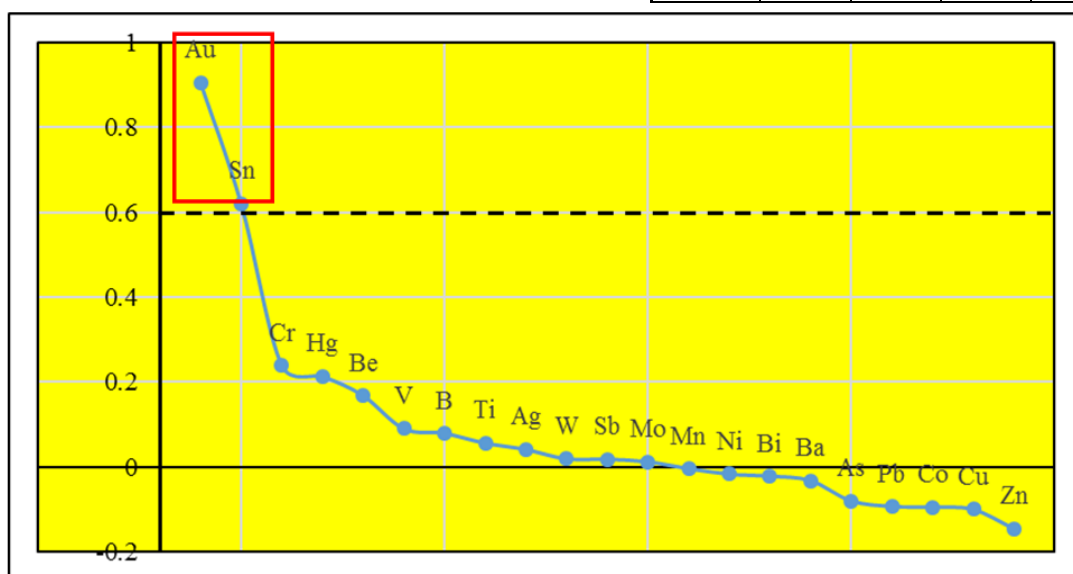
جدول ۵: ضرایب مربوط به عناصر مختلف در مولفه های اصلی در محدوده ۳

element	Component (area 3)			
	۱	۲	۳	pc4
Sb	-۰٫۱۲	۰٫۸۲	-۰٫۰۷	-۰٫۱۲
As	۰٫۲	۰٫۸۱	-۰٫۱	۰٫۳۱
Au	-۰٫۰۹	۰٫۷۳	۰٫۱۴	۰٫۰۵
Ba	۰٫۶۱	۰٫۵۵	-۰٫۲۵	۰٫۰۷
Ag	۰٫۶۲	۰٫۴۹	۰٫۲	-۰٫۰۴
W	-۰٫۲۶	۰٫۴۹	۰٫۴۲	۰٫۴۴
B	۰٫۷	۰٫۲۳	-۰٫۲۳	۰٫۵۲
Bi	-۰٫۱۱	۰٫۲۲	۰٫۲۶	۰٫۸۱
Be	۰٫۲	۰٫۲۱	۰٫۶۴	۰٫۵۱
Zn	۰٫۹۱	۰٫۲۱	۰٫۱۵	۰٫۱۶
Pb	۰٫۸	۰٫۲	۰٫۱۶	۰٫۲۵
Hg	۰٫۰۴	۰٫۱	۰٫۰۴	-۰٫۶۸
Sn	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۹	۰٫۲
Mn	۰٫۸۶	۰٫۰۲	۰٫۲۴	۰٫۰۳
Cu	۰٫۸۹	-۰٫۰۴	-۰٫۰۶	-۰٫۰۷
Mo	۰٫۵۲	-۰٫۰۸	۰٫۵۹	-۰٫۱۴
Cr	۰٫۸۸	-۰٫۱	۰٫۰۲	-۰٫۲۳
V	۰٫۸۹	-۰٫۱۱	۰٫۲۹	-۰٫۰۵
Ti	۰٫۵۴	-۰٫۱۴	۰٫۶۸	-۰٫۱۴
Co	۰٫۷۷	-۰٫۲۷	۰٫۴	-۰٫۳
Ni	۰٫۸۶	-۰٫۲۹	۰٫۱۴	-۰٫۱۶

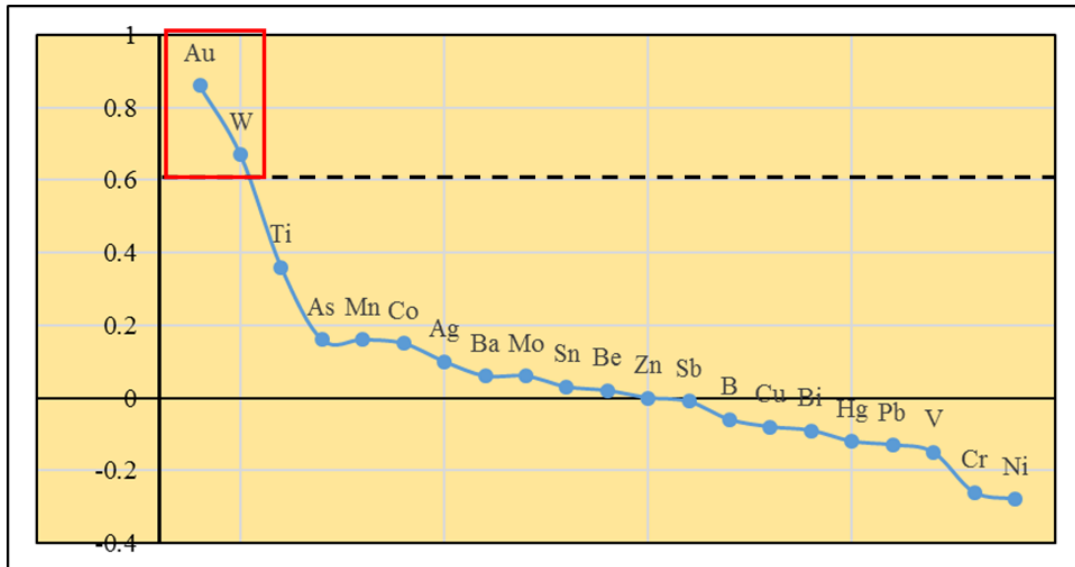
در مؤلفه کانی‌سازی ضرایبی بالاتر از ۰٫۶ دارند و به عنوان عناصر مربوط به فاز کانی‌سازی در نظر گرفته شدند. ضرایب موجود در مؤلفه کانی‌سازی برای عناصر مختلف در شکل ۵ نشان داده شده که عناصر پارائنز کانی‌سازی نیز در آن تعیین گردیدند. در محدوده (۲) نیز تعداد ۲۱ عنصر به ۶ مولفه اصلی تقسیم شده و واریانس کلی آن ۷۷٫۵ درصد و واریانس مؤلفه ۶ به عنوان مؤلفه کانی‌سازی برابر ۶٫۵ درصد است. عناصر طلا و تنگستن به عنوان عناصر مؤثر و شاخص در مؤلفه کانی‌سازی تشخیص داده شدند. شکل ۶ اهمیت عناصر مختلف در فاز کانی‌سازی را نشان می‌دهد که عناصر پارائنز کانی‌زایی شامل طلا و تنگستن در آن مشخص شدند. تعداد ۲۱ ویژگی در محدوده (۳)، به ۴ مؤلفه اصلی با واریانس تجمعی ۷۶٫۵ درصد، کاهش بعد دادند و مؤلفه دوم با واریانس ۱۸ درصد فاکتور مربوط به فرآیند کانی‌سازی تشخیص داده شد. در این مؤلفه اصلی بر اساس معیار ۰٫۶، عناصر طلا، آرسنیک و آنتیموان به عنوان عناصر پارائنز تعیین شدند (شکل ۷). با مقداری اغماض می‌توان عناصر نقره، تنگستن و باریم را نیز به عنوان عناصر پارائنز در نظر گرفت.

#### ۴-۲- مدل‌سازی آماره U داده‌های خام عنصر طلا و عناصر مرتبط با کانی‌سازی

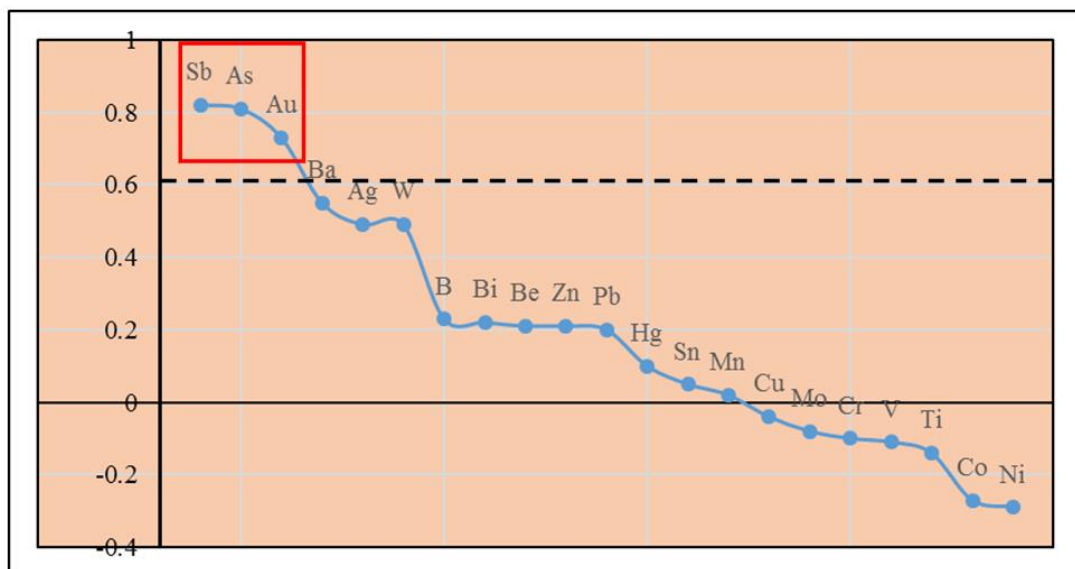
به منظور مقایسه نتایج روش U-PCA با روش آماره فضایی U، ابتدا داده‌های خام عنصر طلا با روش آماره U مدل‌سازی شد. همچنین با توجه به اینکه روش PCA عناصر Sn، W، As و Sb را به عنوان عناصر پارائنز و عناصر مرتبط با کانی‌سازی طلا



شکل ۵: ضرایب PCA مربوط به عناصر مختلف در مؤلفه اصلی کانی‌سازی (مؤلفه ۶) در محدوده ۱. عناصر پارائنز کانی‌سازی در داخل مستطیل مشخص شده‌اند.



شکل ۶: ضرایب PCA مربوط به عناصر مختلف در مولفه اصلی کانی سازی (مولفه ۶) در محدوده ۲. عناصر پارائز کانی سازی در داخل مستطیل مشخص شده اند.



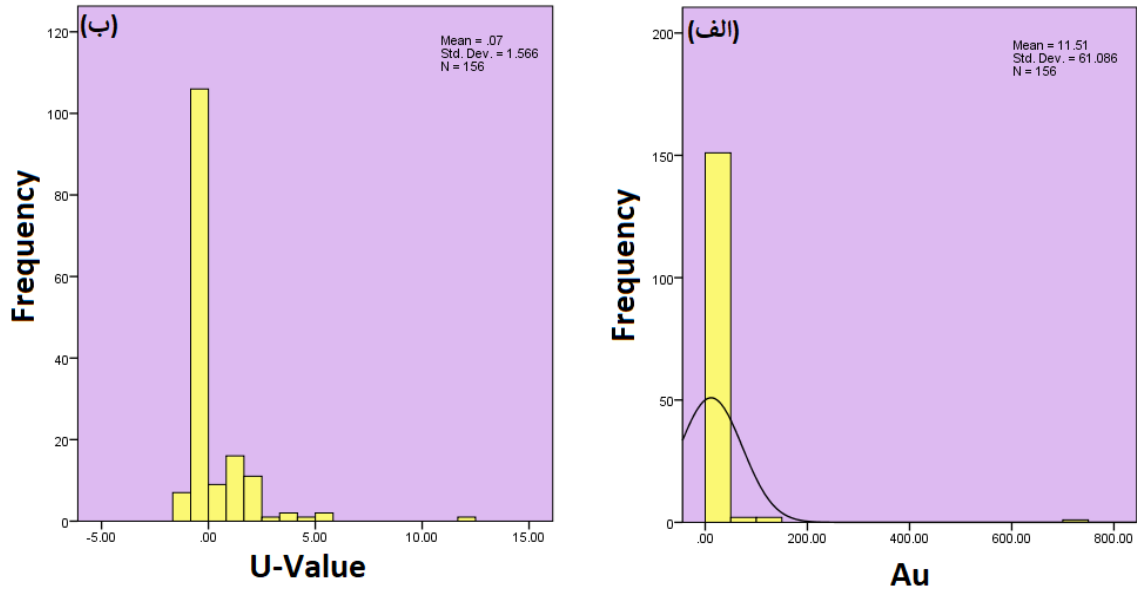
شکل ۷: ضرایب PCA مربوط به عناصر مختلف در مولفه اصلی کانی سازی (مولفه ۲) در محدوده ۳. عناصر پارائز کانی سازی در داخل مستطیل مشخص شده اند.

نقطه نمونه برداری محاسبه از دایره‌ای به شعاع صفر شروع و تا شعاع ۵۰۰۰ متر ادامه می‌یابد. جهت دقت در محاسبات فاصله بین شعاع دو دایره در دو مرحله متوالی ۱۰ m در نظر گرفته شد، لذا برای هر نقطه نمونه برداری ۵۰۰ دایره رسم شد و برای تک تک آنها مقدار آماره  $U$  محاسبه شد، بعد از محاسبه مقدار آماره  $U$ ، بزرگترین مقدار  $U$  از نظر قدر مطلق ( $U^*$ )، را در نظر گرفته و مقدار عددی  $U$  متناظر با آن، به نقطه مورد نظر اختصاص داده شد. اگر هیستوگرام مقادیر  $U$  برای عناصر رسم شود، در این صورت یک می‌نیم در نقطه صفر دیده می‌شود و این همان مرزی است که از

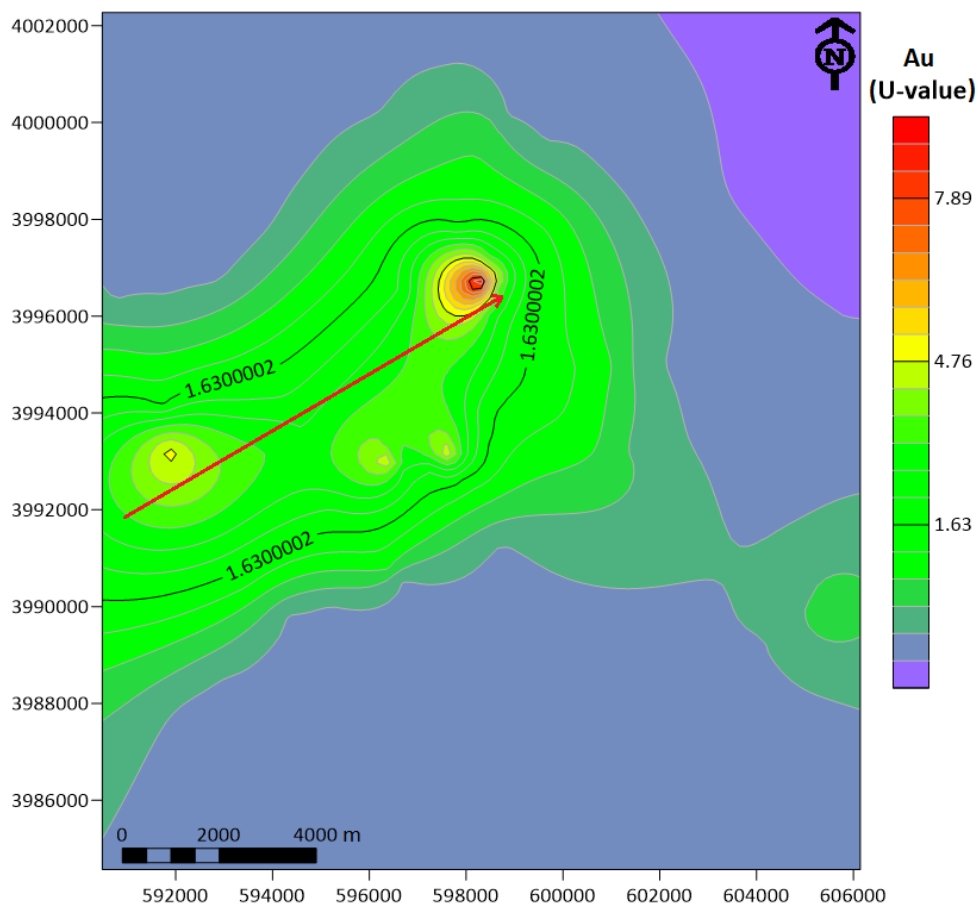
شناسایی کرد، نقشه توزیع ژئوشیمی این عناصر با روش آماره فضایی  $U$  نیز در این بخش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور برنامه‌ای در محیط نرم افزار مطلب<sup>۱</sup> جهت محاسبه آماره  $U^*$  نوشته شد. این برنامه برای هر نقطه نمونه برداری، از شعاع همسایگی صفر تا ۵۰۰۰ متر ( $r_{max}$ )، با استفاده از روابط فوق الذکر، مقدار  $U$  را محاسبه کرده و سپس بزرگترین مقدار  $U$  از نظر قدر مطلق به نقطه مورد نظر اختصاص می‌دهد. این محاسبات برای غلظت عناصر طلا، آرسنیک، قلع، آنتیمون و تنگستن با ۱۵۶ نمونه، انجام شد. نحوه محاسبه به این ترتیب است که برای هر

می‌شود (شکل ۸- الف)، عنصر طلا از توزیع غیرنرمال پیروی می‌کند. توزیع فراوانی داده‌های  $U^*$  این عنصر نیز یک می‌نیم در نقطه صفر نشان می‌دهد. مقادیر آنومالی با توجه به معیار  $\bar{U} + S$  جدا شدند، این مقدار بدون بعد، برای عنصر طلا ۱٫۶۳ بدست آمد.

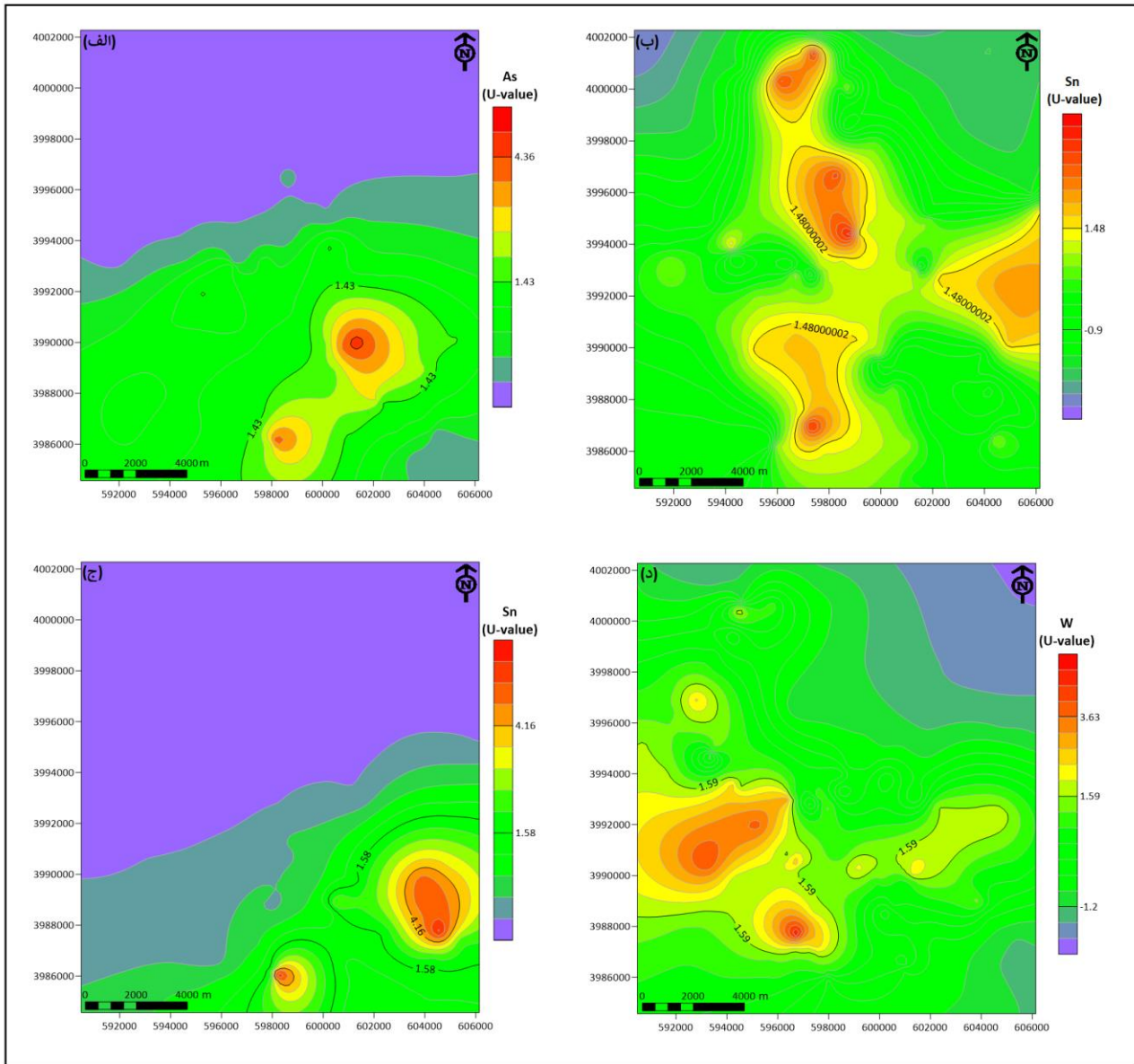
محدوده زمین خارج شده و به منطقه آنومال وارد می‌شود و در واقع این مرز، مرز تقریبی ناحیه آنومالی و زمینه را نشان می‌دهد. این نمودار و نمودار توزیع داده‌های خام عنصر طلا، در شکل ۸ آورده شده است. همانطور که از هیستوگرام داده‌های خام دیده



شکل ۸: توزیع فراوانی مقادیر عنصر طلا برای ۱۵۶ نمونه عنصر طلا، الف) داده‌های خام، ب) مقادیر  $U^*$



شکل ۹: نقشه توزیع ژئوشیمیایی مقادیر  $U$  عنصر طلا (مناطق آنومال بر اساس مقدار حدآستانه‌ای  $\bar{U} + S = 1٫۶۳$ )



شکل ۱۰: نقشه توزیع ژئوشیمیایی مقادیر U عناصر مرتبط با کانی‌سازی طلا. الف) آرسنیک ( $\bar{U} + S = 1,43$ ), ب) قلع ( $\bar{U} + S = 1,48$ ), ج) آنتیمون ( $\bar{U} + S = 1,58$ ), د) تنگستن ( $\bar{U} + S = 1,59$ )

هر چهار عنصر وجود اندیس‌های E و F را تأیید می‌کنند، بنابراین به نظر می‌رسد مطالعه و بررسی چندعنصری عناصر ضروری به نظر می‌رسد تا در اکتشاف این اندیس‌ها کمک کند.

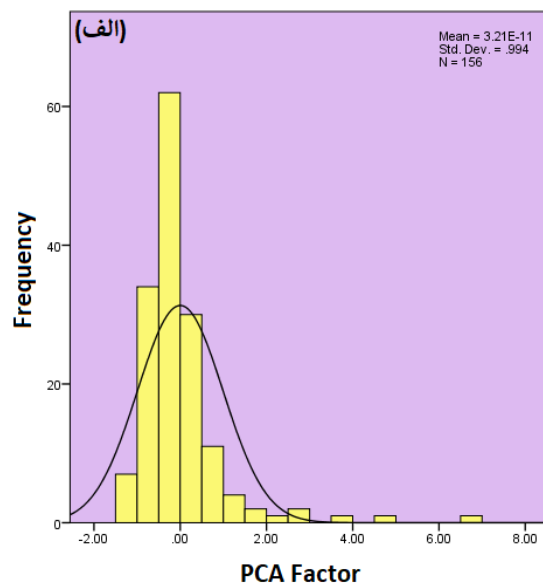
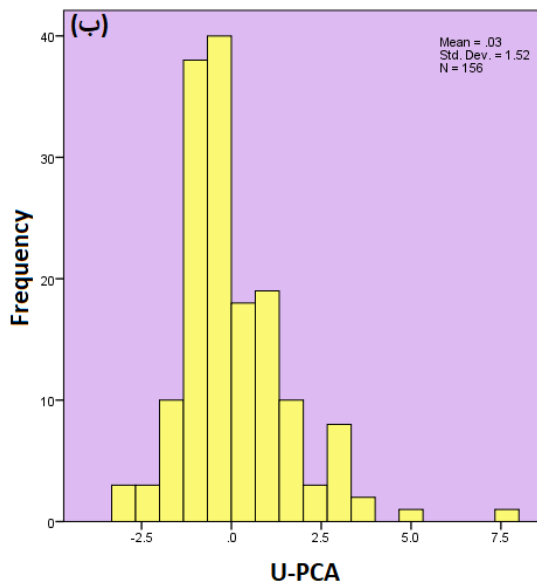
#### ۳-۴- مدل‌سازی مقادیر U مؤلفه اصلی چند عنصری کانی‌سازی (روش تلفیقی U-PCA)

هدف اصلی در این تحقیق، تعیین یک شاخص چند عنصری جهت تشخیص فرآیندهای کانی‌سازی طلای پهنه‌های برشی و شناسایی عناصر پاراژنز به منظور بهبود نقشه آنومالی ژئوشیمیایی و افزایش موفقیت اکتشاف در منطقه سقز است. بر اساس نتایج بدست آمده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، سه

در شکل ۹ نقشه توزیع ژئوشیمیایی مقادیر U عنصر طلا که بر روی آن مناطق آنومال نیز بر اساس مقدار حدآستانه‌ای ۱,۶۳ مشخص شده، نشان داده شده است. این نتایج برای نشان می‌دهد روند کانی‌سازی در منطقه، امتداد جنوب غربی-شمال شرقی دارد که شدت آنومالی در بخش‌های مرکزی رو به شمال و غرب منطقه افزایش یافته است و مناطق آنومال بدست آمده از این روش برای عنصر طلا با کنسازهای قره‌جر، قفله، کرویان، قباغلوچه (به ترتیب A, B, C و D در شکل ۱ مطابقت دارد. اما اندیس‌های E و F اکتشاف نشده است. در شکل ۱۰ نیز نتایج مربوط به عناصر مرتبط با کانی‌سازی طلا یعنی آرسنیک، قلع، آنتیمون و تنگستن آورده شده است. پراکندگی این عناصر نشان می‌دهد که

الگوی پارائزنی در قسمت‌های مختلف منطقه شامل (طلا-قلع)، (طلا - تنگستن) و (طلا - آرسنیک- آنتیموان) شناسایی شد. روش PCA توانست شاخص چند عنصری بر مبنای عناصر پارائز در منطقه را بدست آورد. بر این اساس، برای هر نمونه ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای در منطقه یک مقدار APCS به عنوان مقدار فاکتور کانی‌سازی محاسبه شد و در ادامه، این مقادیر شاخص چند عنصری کانی‌سازی، مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفت. برای تعیین مناطق آنومالی ژئوشیمیایی چند عنصری و تهیه نقشه پتانسیل مطلوب کانی‌سازی، مقادیر

اختصاص یافته به نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای بوسیله روش آماره U مدل‌سازی شد. هیستوگرام مقادیر U حاصل از مدل‌سازی آماره U داده‌های چند عنصری PCA در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود داده‌های مربوط به فاکتور PCA یک توزیع غیرنرمال با چولگی مثبت نشان می‌دهند (شکل ۱۱-الف) و در نمودار مقادیر U این داده‌ها (شکل ۱۱-ب)، مینم در نقطه نزدیک به صفر ظاهر شده است که بعد از این نقطه فاز کانی‌سازی صورت گرفته است.



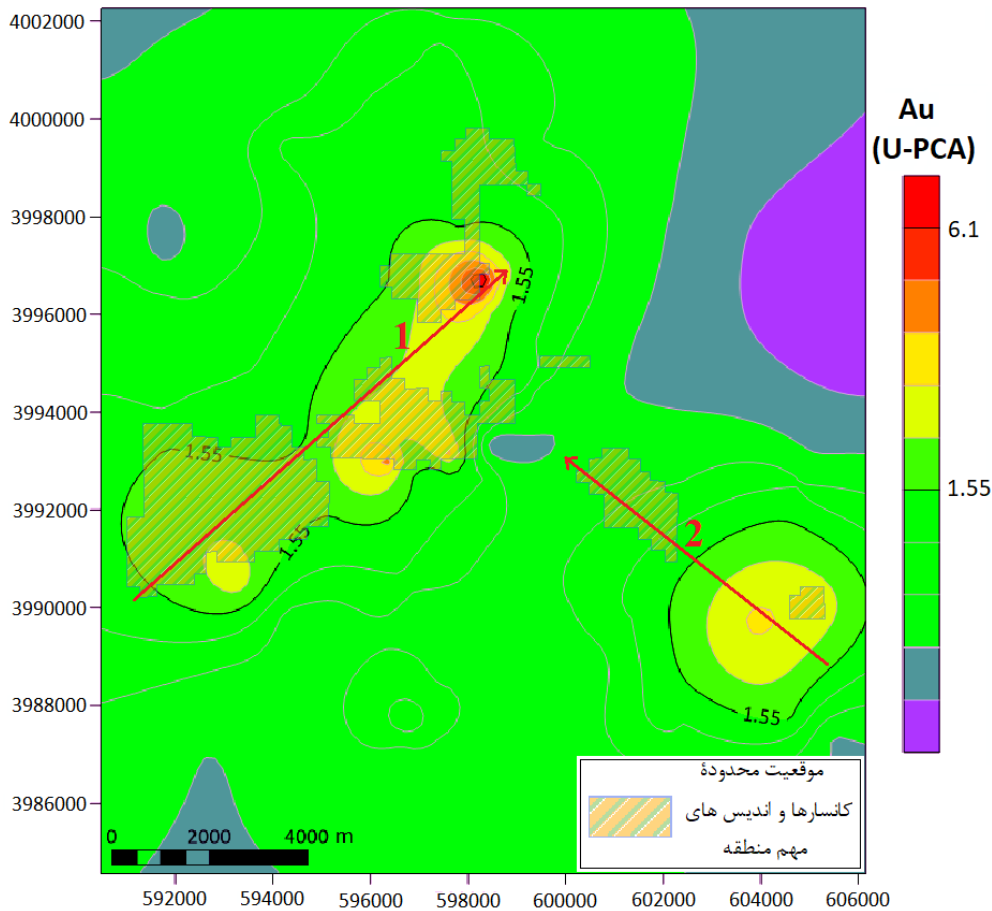
شکل ۱۱: الف. هیستوگرام داده‌های فاکتور کانی‌سازی در PCA، ب. داده‌های U فاکتور کانی‌سازی حاصل از روش PCA (U-PCA)

کانی‌سازی نیز که توسط روش آماره فضایی U یک راستا در جهت جنوب غربی-شمال شرقی در بخش مرکزی و غرب منطقه معرفی شده بود (راستای شماره ۱)، توسط روش جدید دومین روند نیز در بخش جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه در راستای جنوب شرقی-شمال غربی (راستای شماره ۲) با شدت کانی‌سازی کمتر معرفی شد که با مشاهدات صحرایی و مناطق پتانسیل دار منطقه کاملاً مطابقت دارد. اطلاعات زمین‌شناسی منطقه نیز نشان می‌دهد که کانی‌سازی طلا در زون‌های برشی گسلی در درون سنگ‌های دگرگونه پرکامبرین و سنگ‌های گرانیتوئیدی منطقه اتفاق افتاده است (شکل ۱). این مسئله حاکی از ارتباط نزدیک مناطق آنومال بدست آمده با زمین‌شناسی منطقه است. به نظر می‌رسد نتایج بررسی‌های چندعنصری توسط روش PCA و همچنین زون‌بندی منطقه مورد مطالعه با توجه به ماهیت نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای، ورودی واقعی‌تری را برای مدل‌سازی داده‌ها در روش آماره فضایی U فراهم می‌کند. در نتیجه قابلیت پیش‌بینی اکتشافی

مقدار حدآستانه‌ای بر اساس معیار  $\bar{U} + S$  عدد ۱/۵۵ بدست آمد و بر این اساس مناطق آنومال معرفی گردید. نتایج حاصل به روش تلفیقی U-PCA در قالب نقشه ژئوشیمیایی در شکل ۱۲ آورده شده است. برای تهیه این نقشه، از روش کریجینگ معمولی برای درون‌یابی داده‌های U-PCA با اندازه سلول‌های شبکه مناسب استفاده شده است. در این شکل مناطق آنومال با مقدار حدآستانه‌ای ۱/۵۵ مشخص گردیده و راستای کانی‌سازی نیز در آن نشان داده شده است. همچنین جهت مقایسه نتایج و اعتبارسنجی آن، موقعیت محدوده‌های کانسارها و اندیس‌های مهم منطقه بر روی این نقشه آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، محل زون‌های کانی‌سازی بدست آمده از روش تلفیقی U-PCA با کانسارها و اندیس‌های موجود در منطقه تطابق زیادی دارد. در واقع این روش توانسته ۹۰٪ اندیس‌ها و کانسارهای موجود در منطقه (شکل ۱) را معرفی کند که در مقایسه با روش آماره U از قابلیت‌های بیشتری در این زمینه برخوردار می‌باشد. همچنین روند

ارائه نماید مدل سازی آماره U مؤلفه کانی سازی حاصل به خوبی توانسته است مناطق آنومال را بهبود بخشد.

در روش تلفیقی جدید به مراتب بالا رفته است. با توجه به اینکه روش PCA به خوبی توانست عناصر پارائز کانی سازی را شناسایی کند و یک شاخص چند متغیره از این پارائزها را



شکل ۱۲: نقشه توزیع ژئوشیمیایی حاصل از روش U-PCA برای کانی سازی طلای پهنه های برشی جنوب غرب سقز

## ۵- نتیجه گیری

داده های حاصل از روش PCA، نقشه آنومالی ژئوشیمیایی چند عنصری مربوط به آماره U ترسیم گردید و ۵ زون از ۶ زون پتانسیل دار منطقه شناسایی شد. این روش تلفیقی جدید توانست هر دو روند کانی سازی منطقه را به خوبی تحلیل کند. نتایج نشان می دهد با زون بندی منطقه و بررسی چندعنصری در تحلیل داده ها، ورودی واقعی تری برای مدل سازی داده ها در روش آماره فضایی U فراهم می شود و قابلیت پیش بینی اکتشافی بالا را فراهم می کند. تلفیق روش چند متغیره PCA با مدل سازی آماره U توانست اندیس ها و کنسارهای طلای بیشتری را نسبت به روش های مرسوم در ژئوشیمی شناسایی کند. این روش احتمال موفقیت عملیات اکتشافی را افزایش داده و نقشه آنومال ژئوشیمیایی را بهبود می بخشد.

## پی نوشت

- 1- Principal Component Analysis
- 2- U-Spatial Statistics Method
- 3- Moving Average

در این مقاله یک روش جدید تلفیقی بر پایه روش های تحلیل مؤلفه های اصلی و آماره فضایی U برای معرفی مناطق با پتانسیل کانی سازی طلای پهنه های برشی استفاده شد. روش PCA به عنوان یک روش کاهش ابعاد چند متغیره، با استفاده از فاکتور اصلی کانی سازی بر اساس ماتریس اصلی چرخشی، ویژگی های ژئوشیمیایی و عناصر پارائز کانی سازی طلای پهنه های برشی منطقه سقز استان کردستان را شناسایی کرد. عناصر پارائز کانی سازی شامل W, As, Sb و Sn هستند. در منطقه مورد مطالعه دو روند کانی سازی در مرکز، غرب و جنوب شرقی منطقه شناسایی شده بود که چهار کنسار و دو اندیس را شامل می شوند. با تفکیک منطقه به ۳ محدوده مجزا از هم، بر اساس حوضه آبریز و سنگ های زمینه و انجام روش PCA بر روی این محدوده ها، عناصر پارائز کانی سازی طلا در هر محدوده مشخص گردید. در ادامه با مدل سازی آماره U



- weighted principal component analysis for multi-element geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China. *Computers and Geosciences* 5, 662–669.
12. Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *J. Geochem. Explor.* 51, 109–130.
  13. Zuo, R., Wang, J., Chen, G., Yang, M., 2015. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *J. Geochem. Explor.* 148, 12–24.
  14. Aliyari, F., Afzal, P., Lotfi, M., Shokri, S. and Feizi, H., 2020. Delineation of geochemical haloes using the developed zonality index model by multivariate and fractal analysis in the Cu–Mo porphyry deposits. *Applied Geochemistry*, 121, p.104694.
  15. Shahbazi, S., Ghaderi, M., Afzal, P., 2021. Prognosis of gold mineralization phases by multifractal modeling in the Zehabad epithermal deposit, NW Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 13, 31–40.
  16. Cheng, Q., 1999, Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical exploration*, 65: 175–194.
  17. Ghavami-Riabi, R., Seyedrahimi-Niaaraq, M.M., Khalokakaie, R., Hezareh, M.R., 2010, U-spatial statistic data modeled on a probability diagram for investigation of mineralization phases and exploration of shear zone gold deposits, *Journal of Geochemical Exploration*, 104, 27–33.
  ۱۸. سیدرحیمی نیارق، م.م.، مهدیانفر، ح.، مدل سازی فرکتالی طیف توان داده های طیفی آماره U برای جداسازی مناطق آنومال ژئوشیمیایی مس پورفییری، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره شانزدهم، شماره پنجاه، ۷۲–۵۹ ص.
  19. Stanley, C.R., Sinclair, A.J., 1991. A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry, probability plots revisited. *J. Geochem. Explor.* 41, 1–22.
  20. Ghavami-Riabi, R., 2008. Detection of concealed Cu–Zn massive sulfide mineralization below eolian sand and a calcrete cover in the eastern part of the Namaqua Metamorphic Province, South Africa. *J. Geochem. Explor.* 97, 83–101.
  21. Seyedrahimi-Niaaraq, M., Hekmatnejad, A., 2021. The efficiency and accuracy of probability diagram, spatial statistic and fractal methods in the identification of shear zone gold mineralization: a case study of the Saqqez gold ore district, NW Iran. *Acta Geochimica*, <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00413-7>.
  22. Cheng, Q., Agterberg, F. and Bonham-Carter, G., 4- Varimax rotation method  
5- Absolute principal component scores  
6- Orogenic  
7- Kaiser normalization  
8- MATLAB
- منابع**
1. Liu, Y., Zhou, K., Cheng, Q., 2017. A new method for geochemical anomaly separation based on the distribution patterns of singularity indices. *Comput. Geosci.* 105, 139–147
  2. Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., Daviran, M., & Yilmaz, H., 2019. Incorporation of principal component analysis, geostatistical interpolation approaches and frequency-space-based models for portraying the Cu-Au geochemical prospects in the Feizabad district, NW Iran. *Geochemistry*, 79(2), 323–336.
  3. Yousefi, M., Carranza, E. J. M., 2015a. Prediction–area (P–A) plot and C–A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling. *Computers & Geosciences*, 79, 69–81.
  4. Zuo, R., Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: a review. *J. Geochem. Explor.* 164, 33–41.
  5. Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., 2018. Comparison of U-spatial statistics and C–A fractal models for delineating anomaly patterns of porphyry-type Cu geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *C. R. Geosci.* 350 (4), 180–191.
  6. Carranza, E.J.M., 2009. Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10, 171–187.
  7. Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P., 2009. Application of a hybrid method combining multilevel fuzzy comprehensive evaluation with asymmetric fuzzy relation analysis to mapping prospectivity. *Ore Geology Reviews* 35, 101–108.
  8. Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P., Xia, Q., 2009. Application of singularity mapping technique to identification local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, Western China. *Journal of Geochemical Exploration* 101, 225–235
  9. Carranza, E.J.M., 2010. Catchment basin modeling of stream sediment anomalies revisited: incorporation of EDA and fractal analysis. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10, 365–381.
  10. Grunsky, E.C., 2010. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 10, 27–74.
  11. Cheng, Q., Bonham-Carter, G.F., Wang, W., Zhang, S., Li, W., Xia, Q., 2011. A spatially



34. Muller, J., Kylander, M., Martinez-Cortizas, A., Wüst, R.A., Weiss, D., Blake, K., et al., 2008. The use of principle component analyses in characterising trace and major elemental distribution in a 55kyr peat deposit in tropical Australia: implications to paleoclimate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72 (2), 449–463.
35. Shahi, H., Ghavami, R., & Rouhani, A. K., 2016. Comparison of mineralization pattern of geochemical data in spatial and position-scale domain using new DWT-PCA approach. *Journal of the Geological Society of India*, 88(2), 235-244.
36. Ghezlbash, R., Maghsoudi, A., Daviran, M., 2019. Prospectivity modeling of porphyry copper deposits: recognition of efficient mono-and multi-element geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Acta Geochim.* 38 (1), 131–144.
37. Mahdianfar, H., 2020. A critique on power spectrum–area fractal method for geochemical anomaly mapping. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(25), 33-41.
38. Cevik, I. S., Olivo, G. R., & Ortiz, J. M., 2021. A combined multivariate approach analyzing geochemical data for knowledge discovery: The Vazante–Paracatu Zinc District, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 221, 106696.
39. Behera, S., & Panigrahi, M. K., 2021. Mineral prospectivity modelling using singularity mapping and multifractal analysis of stream sediment geochemical data from the auriferous Hutti-Maski schist belt, S. India. *Ore Geology Reviews*, 104029.
40. Shahi, H., Ghavami, R., Rouhani, A. K., Kahoo, A. R., & Haroni, H. A., 2015. Application of Fourier and wavelet approaches for identification of geochemical anomalies. *Journal of African Earth Sciences*, 106, 118-128.
۴۱. حیدری، س.م.، ۱۳۸۳، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فابریک کانه زایی طلا در پهنه‌برشی خمیری منطقه کرویان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۵۰ص.
۴۲. حریری، ع.، ۱۳۸۲، گزارش نقشه زمین‌شناسی ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ سقز، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ایران.
43. Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, M.R., 2003, Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran, *Journal of Asian Earth Science*, 21, 397-412.
۴۴. حسینی‌پاک، ع.ا.، ۱۳۷۸، اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در محدوده برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت در غرب 1996, A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*, 56: 183-195.
23. Lin, Y.P., (2002). Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals. *Environ. Geol.* 42, 1–10.
24. Zuo, R., Cheng, Q. and Xia, Q., 2009, Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. *Journal of Geochemical Exploration*, 102: 37-43.
25. Chandrajith, R., Dissanayake, C.B., Tobschall, H.J., 2001. Application of multi-element relationships in stream sediments to mineral exploration: a case study of Walawe Ganga Basin, Sri Lanka. *Applied Geochemistry* 16, 339–350.
26. Grunsky, E.C., Drew, L.J., Sutphin, D.M., 2009. Process recognition in multi-element soil and stream-sediment geochemical data. *Applied Geochemistry* 24, 1602–1616.
27. Ghezlbash, R., Maghsoudi, A., & Carranza, E. J. M., 2019b. Mapping of single-and multi-element geochemical indicators based on catchment basin analysis: Application of fractal method and unsupervised clustering models. *Journal of Geochemical Exploration*, 199, 90-104.
28. Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., & Carranza, E. J. M., 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 115, 24-35.
29. Saadati, H., Afzal, P., Torshian, H., Solgi, A., 2020. Geochemical exploration for Li using Geochemical Mapping Prospectivity Index (GMPI), fractal and Stage Factor Analysis (SFA) in NE Iran. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 20, 461-472.
30. Sadeghi, B., Yilmaz, H., & Pirajno, F. (2021). Weighting of BLEG data with drainage and catchment properties to enhance Au anomalies. *Geochemistry*, 81(2), 125733.
31. Carranza, E.J.M., 2008. *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*, Vol. 11 Elsevier.
32. Zuo, R., 2011b. Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb–Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum–area.
33. Farzamian, M., Rouhani, A. K., Yarmohammadi, A., Shahi, H., Sabokbar, H. F., Ziaie, M., 2016. A weighted fuzzy aggregation GIS model in the integration of geophysical data with geochemical and geological data for Pb–Zn exploration in Takab area, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 104.

- on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(3), 994-1012.
53. Garcia, R. J. L., da Silva Júnior, J. B., Abreu, I. M., Soares, S. A. R., Araujo, R. G. O., de Souza, E. S., ... & de Souza Queiroz, A. F. (2020). Application of PCA and HCA in geochemical parameters to distinguish depositional paleoenvironments from source rocks. *Journal of South American Earth Sciences*, 103, 102734.
54. Landis, M. S., J. P. Pancras, J. R. Graney, R. K. Stevens, K. E. Percy, and S. Krupa., 2012. "Receptor modeling of epiphytic lichens to elucidate the sources and spatial distribution of inorganic air pollution in the Athabasca Oil Sands Region." In *Developments in Environmental Science*, vol. 11, pp. 427-467.
55. Ghavami-Riabi, R., Seyedrahimi-Niaraq, M. M., Khalokakaie, R., & Hazareh, M. R., 2010. U-spatial statistic data modeled on a probability diagram for investigation of mineralization phases and exploration of shear zone gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 104(1-2), 27-33.
56. Harmon, H.H., 1976. *Modern Factor Analysis*, third ed. rev. University of Chicago Press, Chicago, IL.
57. Eilu, P., Groves, D., 2001, Primary alteration and geochemical dispersion haloes of Archaean orogenic gold deposits in the Yilgarn Craton: the pre-weathering scenario. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1: 183-200.
58. Killick, Andy; (2003); "Shear zone- hosted gold deposits"; The Mineral Corporation.
59. Kaiser, H. F., 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187-200. doi: 10.1007/BF02289233
60. Hopke, P.K., 1983. An Introduction to multivariate analysis of environmental data. In: Natusch, D.F.S., Hopke, P.K. (Eds.), *Analytical Aspects of Environmental Chemistry*. Wiley, New York, pp. 219-261.
- برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سقز، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۴۵. افتخارنژاد، ا.، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ مهاباد، ۱۳۵۲، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۴۶. ابوالمعالی، ش.د.، علوی، م.، ذعیم‌فرحزاری، ن.، ۱۳۷۷، گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در محدوده برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ سقز، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۴۷. مهدی‌زاده، س.، ۱۳۷۷، مطالعات دورسنجی مقدماتی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سقز به منظور شناسایی و جداسازی واحدهای سنگی مختلف بویژه واحدهای دگرسانی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۴۸. دانشفر، ب.، گیاهیچی، پ.، زعیم فرحزاری، ن.، ۱۳۷۷، تهیه نقشه‌های مقدماتی پتانسیل مواد معدنی در گستره ورقه سقز با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ با بهره‌گیری از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی GIS، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۴۹. سیدرحیمی نیارق، م. م.، ۱۳۸۷، تفکیک آنومالیهای ژئوشیمیایی با استفاده از روش‌های فرکتال و آمار فضایی U و مقایسه نتایج آن با روش مدل‌سازی نمودارهای احتمال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۴۸ ص.
۵۰. قوامی‌ریابی، ر.، سیدرحیمی نیارق، م.م.، خالوکاکایی، ر.، هزاره، م.ر.، ۱۳۸۹، رفتار و اختصاصات ژئوشیمیایی مناطق کانی‌سازی طلای پهنه‌های برشی کردستان، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره پنجم، شماره نهم، ۲۷-۳۶ ص.
51. Jolliffe, I.T., 2002. *Principal component analysis*. Springer, Berlin.
52. Iwamori, H., Yoshida, K., Nakamura, H., Kuwatani, T., Hamada, M., Haraguchi, S., & Ueki, K., 2017. Classification of geochemical data based