



کاربرد تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم با تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای و روش فرکتال عیار - مساحت برای جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی در کانسار طلا - آرسنیک زرشوران، شمال تکاب

احد نظریور*

۱- استادیار زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

* عهده‌دار مکاتبات: Ahad.nazarpour@gmail.com

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱/۱۷، پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۳/۲

چکیده

هدف از پژوهش حاضر جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی با استفاده از تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای در تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم و کلاسیک، مدل فرکتالی عیار- مساحت و ارائه مفیدترین روش که دارای بیشترین انطباق با ساختارهای زمین‌شناسی است در منطقه معدنی زرشوران می‌باشد. روش‌های بکارگرفته شده با استفاده از ساختارهای زمین‌شناختی، مساحت آنومالی‌های بدست آمده نسبت به کل منطقه معدنی، و شواهد صحرایی مورد قیاس قرار گرفتند. تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم (RPCA)، به همراه تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای ایزومتری (ilr) جهت باز کردن و کاهش اثر مشکل بسته بودن داده‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. نقشه آنومالی طبقه‌بندی شده با فاصله ۲۰ درصدی از نقشه‌های درونیابی شده از مولفه اول (PC1)، برای تحلیل مولفه‌های مقاوم و کلاسیک مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقادیر بالاتر (> ۸۰٪) از مولفه‌های اصلی مقاوم و کلاسیک به ترتیب شامل پوشش آنومالی ۳۲/۵۴ و ۱۸/۱۶ درصدی از منطقه معدنی زرشوران می‌باشند. بنابراین تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم با مساحت کمتر دارای انطباق بهتری با منطقه معدنی پیشین زرشوران، واحد زرشوران، آهک سیلیسی شده چالداغ، و مکان‌های جدید برای اکتشافات بیشتر که با بازدهی‌های صحرایی تأیید شده‌اند، می‌باشد. روش فرکتال عیار- مساحت با وجود پوشش آنومالی کمتر (۸/۰۶ درصدی)، موقعیت آنومالی‌ها صرفاً منطبق با منطقه معدنی زرشوران، بدون هرگونه منطقه اکتشافی جدید می‌باشد. مقایسه روش‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم با حذف مشکل بسته بودن داده‌های ژئوشیمیایی برای اکتشافات آتی طلا در محدوده معدنی زرشوران مفیدتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنومالی ژئوشیمیایی، تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای، تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم، فرکتال عیار- مساحت، زرشوران

(1982; Pawlowsky-Glahn, 2006).

۱- مقدمه

داده‌های ژئوشیمیایی جزئی از کل بوده و داده‌های ترکیبی نامیده می‌شوند، داده‌های ترکیبی (Compositional data)، داده‌های بسته حاوی اطلاعات نسبی می‌باشند، که حاصل جمع این‌گونه داده‌ها ثابت می‌باشد (Buccianti and Pawlowsky-Glahn, 2005). داده‌های ترکیبی همیشه مثبت می‌باشند، و هنگامی که به شکل بسته هستند فقط در بازه ۰ تا ۱۰۰ یا هر ثابت دیگری تغییر می‌نمایند (Filzmoser et al., 2009 and 2010).

به همین دلیل، ساختار همبستگی داده‌های ترکیبی شدیداً ناریب است و نتایج روش‌های آماری چند متغیره بدون اعمال تبدیلات مناسب بر داده‌ها، خطا دار می‌باشد. از جمله این تبدیلات، خانواده تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای (Log-ratio) است. مهمترین تبدیلات لگاریتمی ریشه‌ای شامل، لگاریتم ریشه‌ای مرکزی (clr) (Aitchison, 1989) و تبدیل لگاریتم ریشه‌ای مرکز ایزومتری (ilr) می‌باشند. اغلب جهت باز کردن داده‌های بسته از تبدیل لگاریتم ریشه‌ای مرکزی (clr) استفاده می‌گردد.

مشکلات کاربرد تحلیل‌های آماری در سیستم‌های عددی بسته در بسیاری از تالیفات بیش از ۳۰ سال پیش مورد بحث قرار گرفته است (Aitchison, 1986; Aitchison and Egozcue, 2005). داده‌های ترکیبی دارای خواص مهم و خاصی هستند که سبب شده نتوان از روش‌های آماری استاندارد استفاده نمود. روش‌های آماری استاندارد

جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی تک متغیره و چند متغیره از زمینه، از مهمترین بخش‌های یک پروژه اکتشافی است (Cheng et al., 2013; Nazarpour et al., 1994). شاید بتوان گفت که مهمترین نتایج حاصل از تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی، جدایش جوامع گوناگون آنومالی‌های ژئوشیمیایی از یکدیگر و نیز تعیین زمینه برای هر عنصر در منطقه مورد اکتشاف می‌باشد. با توجه به محدودیت‌هایی از قبیل عدم توزیع نرمال داده‌های ژئوشیمیایی، وجود داده‌های خارج از ردیف و همچنین عدم توجه به توزیع فضایی داده‌های ژئوشیمیایی، کاربرد روش‌های آماری کلاسیک، تعیین و بکارگیری حد آستانه یکپارچه (Uniform threshold) باعث به وجود آمدن ضعف‌هایی در تعیین میزان زمینه و آنومالی‌های ژئوشیمیایی در علم ژئوشیمی اکتشافی شده است (Ali et al., 2007; Bai et al., 2010; Zuo, 2014).

رسوبات آبراه‌های در هر نقطه در طول سیستم آبریز، ترکیبی از مواد حاصل از هوازدگی و فرسایش منابع بالادست خود را نشان می‌دهند. در اغلب نمونه‌ها، سهم مهمی از تغییرات در غلظت‌های تک عنصری رسوبات آبراه‌های ناشی از واحدهای لیتولوژیکی بالادست نقاط نمونه‌برداری می‌باشد. بنابراین در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی مهمترین مسئله‌ای که باید مدنظر قرار بگیرد، مسئله بسته بودن داده‌های ژئوشیمیایی می‌باشد (Aitchison,

شهرستان تکاب و ۸ کیلومتری شمال خاوری روستای زرشوران قرار دارد (شکل ۱). این منطقه از نظر تقسیمات ساختاری زمین‌شناسی در زون سندج سیرجان قرار می‌گیرد (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۸۰). پی‌سنگ منطقه شامل دو مجموعه از سنگ‌های دگرگونی است، که مجموعه ایمان‌خان با ترکیب آمفیبول-اپیدوت شیست، سرپانتینیت شیست، سرسیت-کلریت شیست، کوارتز-میکا شیست و کالک‌شیست در بخش زیرین و مجموعه چالداغ با ترکیب مرمر و کالک‌شیست در بخش فوقانی آن قرار دارد (قربانی، ۱۳۷۹؛ اجاقی، ۱۳۷۴). این مجموعه دگرگونی، ویژگی‌های رخساره شیست سبز را نشان می‌دهد. واحد سنگی زرشوران با ته‌نشست‌های آهک نازک لایه، دولومیت، شیل و میکاشیست‌های سیاه رنگ روی واحدهای قدیمی قرار گرفته و سنگ میزبان اصلی کانسار را تشکیل می‌دهند. توف و ریولیت‌های اسیدی قره‌داش که هم‌ارز خروجی گرانیته دوران محسوب می‌شود، روی واحد زرشوران قرار می‌گیرند (کریمی، ۱۳۷۲). در بخش باختری منطقه واحدهای دولومیتی معادل با سلطانیه، شیل و دولومیت معادل با سازند باروت و زاگون و ماسه‌سنگ لالون به طور هم‌شیب روی واحد ریولیتی قره‌داش قرار گرفته‌اند. پس از نبود ته‌نشینی طولانی از اردوئین تا الیگوسن، پیشروی دریای الیگومیوسن موجب ته‌نشست کنگلومرای بنفش، شیل میکادار و ماسه‌سنگ‌های آهکی الیگومیوسن (معادل سازند قم) روی واحدهای قدیمی تر شده است (Mehrabi, 1999; Asadi, 2000).

بخش آهکی واحد قم در تغییرات جانبی به آهک ریفی تبدیل می‌شود که حاوی قطعات خارتنان، مرجان‌ها و دوکفه‌ای فراوانی است. نهشته‌های آواری معادل با سازند سرخ فوقانی متشکل از تناوب‌های ماسه‌سنگ‌های آهکی سرخ، رس، مارن و میکروکنگلومرا، جدیدترین واحد رسوبی دریایی منطقه را تشکیل می‌دهد، و گدازه‌های آتشفشانی جوان از جنس آندزیت تا تراکی آندزیت با شیب ملایمی روی سازند سرخ فوقانی قرار می‌گیرند. نهشته‌های چشمه‌های آب گرم از نوع تراورتن در برخی از مناطق رخنمون‌هایی را تشکیل داده‌اند که نشانگر فعالیت گرمایی در منطقه است (علوی نائینی و عمیدی، ۱۳۶۱).

برای استفاده جهت داده‌های آزاد که در بازه $-\infty$ تا $+\infty$ تغییر می‌نماید، طراحی شده‌اند (Carranza, 2011).

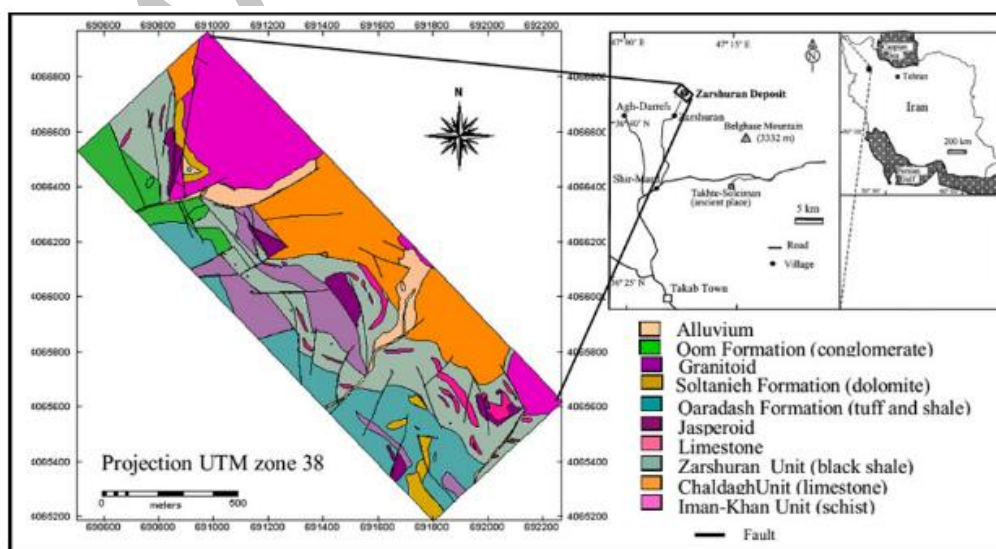
هدف از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، دستیابی به دستگاه محورهای مختصاتی است که بتواند با تعداد کمی بُعد (متغیر جدید) بخش عمده تغییرپذیری را توجیه کند. این روش به وجود مقادیر خارج از ردیف حساس می‌باشد و نتایج بدست آمده بدون حذف این مقادیر، با خطا همراه است (Horn et al., 2010). در PCA کلاسیک که براساس ماتریس کواریانس کلاسیک است، این مسئله بروز می‌نماید. در نتیجه بایستی از PCA مقاوم (Robust) برای رفع این مشکل استفاده نمود (Filzmoser et al., 2010). روش‌های PCA مقاوم که بر روی داده‌های تبدیل شده لگاریتم ریشه‌ای صورت می‌پذیرند.

روش‌های مقاوم که با داده‌های تبدیل یافته توسط لگاریتم ریشه‌ای مرکزی (clr) سازگار نمی‌باشند، بر اساس یک تخمین گر کواریانس مقاوم مانند دترمینان کواریانس مینیمم (MCD) می‌باشد (Maronna et al., 2006). در نتیجه بایستی از تبدیل لگاریتم ریشه‌ای ایزومتریک (ilr) استفاده نمود و سپس بارها و امتیازات بدست آمده بایستی به فضای (clr) تبدیل معکوس شوند تا بتوان متغیرها را تفسیر کرد (Filzmoser et al., 2009). تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها در نرم‌افزار R انجام می‌پذیرد که یک محیط رایانه‌ای قدرتمند برای تحلیل‌های آماری داده‌ها می‌باشد.

هدف از پژوهش حاضر در ابتدا بررسی روش‌های باز کردن سیستم‌های عددی بسته داده‌های ژئوشیمیایی و جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی با استفاده از مدل فرکتالی عیار-مساحت و تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای ایزومتریک در تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم و کلاسیک، در جداسازی آنومالی‌های تک عنصری و چند عنصری و در نهایت ارائه مفیدترین روش که دارای بیشترین انطباق با ساختارهای زمین‌شناسی است در منطقه معدنی زرشوران می‌باشد.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کانسار زرشوران در شمال باختری ایران و در ۴۹ کیلومتری شمال

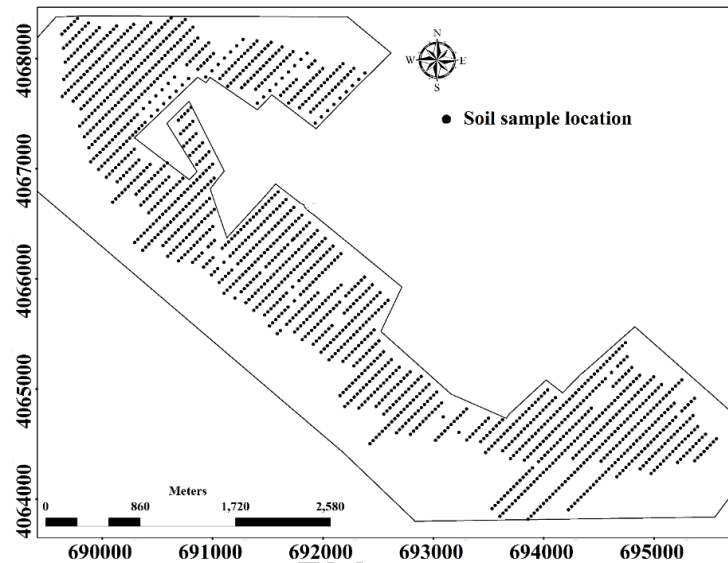


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی کانسار زرشوران (Asadi, 2000)

۳- نمونه‌برداری و آنالیز

سطحی برداشته شده، که در آزمایشگاه SGS مورد آنالیز ۴۵ عنصری به روش ICP-MS قرار گرفته‌اند. جهت اندازه‌گیری مقدار طلا از روش Fire Assay استفاده شده است. با توجه به اینکه مهمترین عناصر ردیاب کانی‌سازی طلا در کانسار زرشوان، As، Sb و Cu می‌باشد لذا پردازش‌های آنالیز چند متغییره کلاسیک و مقاوم شده روی عناصر مذکور صورت پذیرفته است. شکل ۲ موقعیت نمونه‌های برداشت شده را نشان می‌دهد.

جهت بررسی توزیع ژئوشیمیایی عناصر و تعیین محدوده کانی‌سازی و مرز عملیات اکتشافی در محدوده کانسار زرشوران از نمونه‌های ژئوشیمیایی خاک برداشت شده توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (IMIDRO) استفاده شده است. نمونه‌های مذکور با شبکه ۱۰۰*۵۰ متر به مساحت تقریبی ۱۴/۵ کیلومتر مربع، به تعداد ۱۶۲۷ نمونه خاک



شکل ۲- موقعیت نمونه‌های ژئوشیمی خاک

تبدیل ilr منتج به یک مشاهده چند متغییره در فضای D-1 بُعدی می‌گردد که تفسیر داده‌ها را غیرممکن می‌نماید و طبق معادله ذیل محاسبه می‌شود:

$$z = (z_1, \dots, z_{D-1}), = \sqrt{\frac{i}{i+1}} \ln \frac{\sqrt{\prod_{j=1}^i x_j}}{x_{i+1}}, i = 1, \dots, D-1$$

(Filzmoser et al., 2009) تایید نمود که علاوه بر تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای ارائه شده، هر نوع تبدیل دیگری برای باز کردن متغییرهای ترکیبی و سیستم‌های عددی بسته جهت تحلیل‌های آماری، مطلوب نمی‌باشند.

۵- تحلیل مولفه‌های اصلی و مقاوم کردن آن

تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری چند متغییره است که به طور وسیعی برای پیش پردازش و کاهش ابعاد داده‌ها استفاده می‌گردد و مولفه‌های منتج از آن برای تحلیل‌های آماری چند متغییره استفاده می‌شود (Filzmoser et al., 2010). در صورت استفاده از روش‌های مقاوم، تبدیل لگاریتم ریشه‌ای مرکزی (clr) مناسب نمی‌باشد اما تبدیل لگاریتم ریشه‌ای ایزومتریک (ilr) بایستی مورد توجه قرار گیرد (Filzmoser et al., 2009; Zuo et al., 2014). بنابراین قبل از به کار بردن تبدیل لگاریتم ریشه‌ای ایزومتریک (ilr) جهت محاسبه مولفه‌های اصلی مقاوم، فرض می‌شود که داده‌های خام یک توزیع نرمال چند متغییره را در فضای سیمپلکس (Simplex) دنبال می‌نمایند (Filzmoser et al.,

۴- تبدیلات داده‌های ترکیبی

مرجع کلیدی برای تحلیل آماری داده‌های ترکیبی اچیسون می‌باشند (Egozcue et al., 2003). بیش از ۲۰ سال است که طبیعت این نوع خاص از داده‌ها و چگونگی رفتار با آن‌ها شناخته شده است اما کارهای کمی در مورد آن به انجام رسیده است (Filzmoser et al., 2010). به دلیل محدودیت حاصل جمع ثابت در این نوع از داده‌ها، فضای هندسی استاندارد اقلیدسی کاربردی ندارد و از فضای ساده شده (Simplex) استفاده می‌گردد (Filzmoser et al., 2012). هندسه داده‌های ترکیبی تحت عنوان هندسه اچیسون شناخته شده است (Filzmoser et al., 2009). روش مطلوبی برای تبدیل داده‌های ترکیبی از فضای نمونه ساده شده به فضای اقلیدسی وجود دارد که تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای، نامیده می‌شود (Aitchison, 1986; Egozcue et al., 2006). دو نوع تبدیل وجود دارد که ارتباط یک به یکی از فضای ساده شده به اقلیدسی برقرار می‌نماید: تبدیل لگاریتم ریشه‌ای مرکزی (clr) (Aitchison, 1986) و تبدیل لگاریتم ریشه‌ای مرکز ایزومتریک (ilr). تبدیل clr منتج به یک مشاهده چند متغییره می‌گردد و به شرح ذیل تعریف می‌شود (Egozcue et al., 2006):

$$y = \left(\ln \frac{x_1}{\sqrt{\prod_{i=1}^D x_i}}, \dots, \ln \frac{x_D}{\sqrt{\prod_{i=1}^D x_i}} \right)$$

با ترسیم تغییرات مساحت در برابر عیار، در نمودار لگاریتمی، می‌توان بعد هر جامعه را از طریق شیب خط برازش شده به آن محاسبه نمود. بعد فرکتال بدست آمده به نحوی بیان کننده میزان مساحت احاطه کننده داده‌های موجود می‌باشد به طوری که بعد فرکتال آخرین خط برازش شده که دارای عیار بالایی می‌باشد، معمولاً دارای مقدار کمتری بوده که بیان کننده مقدار مساحت کمتر نمونه‌های با عیار بالا می‌باشد (Nazarpour et al., 2013; Goncalves, 2001). بعد از مرتب‌سازی داده‌ها از زیاد به کم و تعیین فراوانی هر عیار، نمودار لگاریتمی فراوانی تجمعی مساحت در مقابل عیار برای روش عیار- مساحت رسم گردید و با برازش خط‌های مستقیم به سری نقاط و با به دست آوردن نقاط شکست این خطوط، حدود آستانه‌های عناصر عیار- مساحت تعیین گردید.

۷- بحث

به منظور جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی چند عنصری، داده‌های خام ژئوشیمیایی و داده‌های تبدیل شده در لگاریتم ریشه‌ای تحت آنالیز مولفه‌های اصلی کلاسیک و مقاوم قرار گرفتند. مولفه اول (PC1) و مولفه دوم (PC2) بدست آمده از آنالیز مولفه‌های اصلی کلاسیک داده‌های خام به ترتیب ۴۸٪ و ۲۴٪ واریانس را به خود اختصاص داده‌اند. رابطه بین مولفه اول و مولفه دوم بدست آمده از نمودار دوتایی (Biplot) مولفه‌های اصلی کلاسیک (شکل ۳- الف) نشان می‌دهد که کلیه بارهای مولفه اول همبستگی منفی بین عناصر را نشان می‌دهند. همچنین تمامی داده‌های خام در محدوده صفر نمودار تمرکز کرده‌اند، که در نتیجه بسته بودن داده‌های ژئوشیمیایی می‌باشد. مولفه دوم دارای بار فاکتوری مثبتی از As و Au، و بار منفی از Cu و Sb می‌باشند. نقشه توزیع ژئوشیمیایی مولفه اول بدست آمده از تحلیل مولفه اصلی داده‌های خام در شکل ۴- الف آورده شده است. به منظور نشان دادن توزیع فضایی داده‌های خام مدل تحلیل مولفه‌های اصلی کلاسیک، نقشه توزیع شده با فواصل ۲۰ درصدی مورد طبقه‌بندی قرار گرفت. شکل ۴- الف نشان داد قسمتی از منطقه مورد مطالعه با مقادیر بالاتر از ۸۰ درصد از مولفه اول محدوده وسیعی (۳۲/۵۴٪) از منطقه مورد مطالعه با توزیع غیرهمسان و لیتولوژی متغییر را در بر گرفته است. به عبارت دیگر، ساختار همراهی عناصر، که در واقع نشان‌دهنده فرآیندهای زمین‌شناختی و ژئوشیمیایی می‌باشند، به خوبی قابل بیان نیستند.

(2009). غالباً در ژئوشیمی فرض می‌گردد که متغیرها از توزیع لاگ نرمال تبعیت می‌نمایند و بنابراین بایستی تحت تبدیل لگاریتمی قرار گیرند (Zuo et al., 2013). در اینجا نتایج تحلیل مولفه‌های اصلی داده‌های لگاریتمی بر روی داده‌های تبدیل یافته توسط لگاریتم ریشه‌ای ایزومتریک (ilr) که به فضای لگاریتم ریشه‌ای مرکزی (clr) تبدیل معکوس شده‌اند، انجام پذیرفته است. در این مقاله از بسته‌های نرم‌افزاری robCompositions و compositions و StatDA جهت تحلیل داده‌ها در R استفاده گردید. برنامه‌نویسی تحلیل داده‌ها، تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای و رسم نمودارها، در نرم‌افزار R و مطلب انجام شده است.

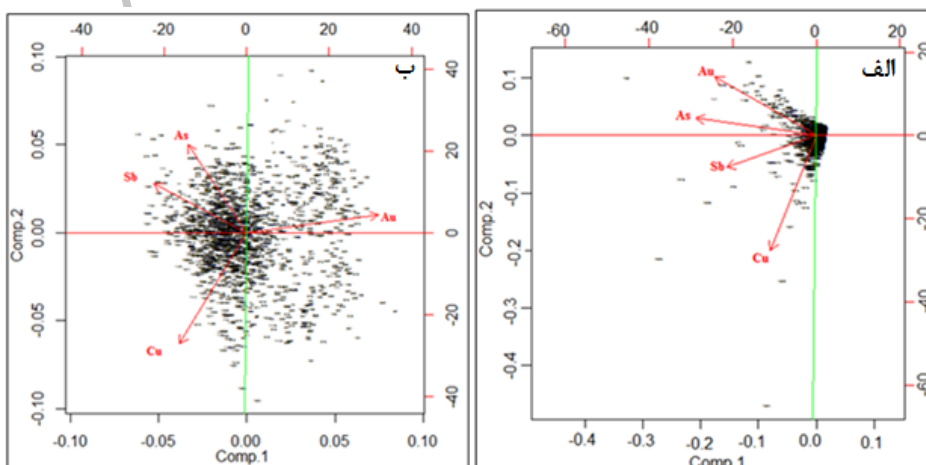
خروجی بدست آمده از لگاریتم ریشه‌ای و تحلیل مولفه‌های اصلی را در محیط Arc GIS به نقاط رستری تبدیل شده و سپس با روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) نقشه توزیع ژئوشیمیایی چند عنصری تهیه، و به نقشه‌های رستری تبدیل شدند. سپس نقشه رستری با پیکسل ۱۰*۱۰ متر بدست آمده تحت تحلیل مولفه‌های اصلی در ArcGIS در الحاقیه ArcToolbox قرار گرفت. با اعمال روش فرکتال عیار- مساحت بر روی پیکسل هر کدام از مولفه‌های اصلی در جداول توصیفی جمعیت‌های ژئوشیمیایی استخراج و در محیط اکسل نمودار لگاریتمی مساحت (تعداد پیکسل‌ها) در مقابل بار هر کدام از مولفه‌های اصلی، جمعیت‌های ژئوشیمیایی ترسیم شدند (شکل ۴- الف و ب).

۶- مدل فرکتالی عیار- مساحت

مدل فرکتالی عیار- مساحت (C-A) اولین بار توسط Cheng et al., (1994) به منظور جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه ارائه شد. این روش مبتنی بر میزان مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه مورد مطالعه اشغال نموده است. هر چه عیار عنصر افزایش یابد، میزان مساحت اشغالی توسط آن کاهش می‌یابد. این مدل دارای شکل عمومی رابطه زیر است (Cheng et al., 1994):

$$A(\geq \rho) \propto \rho^{-D}$$

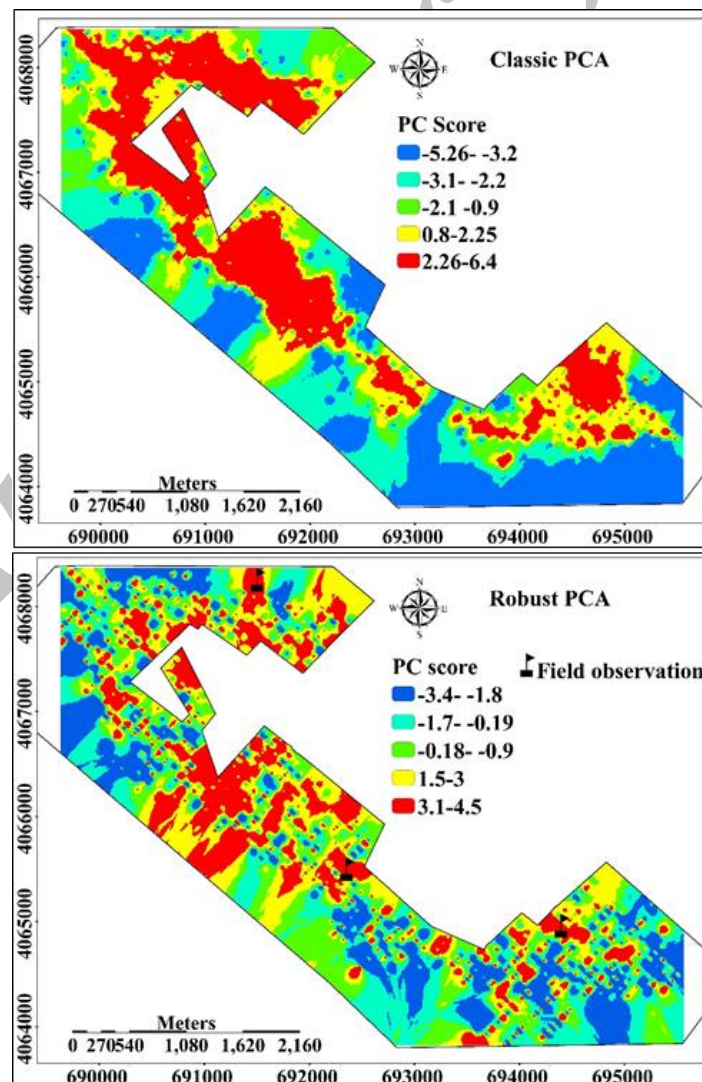
در رابطه فوق، ρ عیار عناصر، $A(\geq \rho)$ مساحت با مقادیر بزرگتر یا مساوی ρ ، مقدار D در واقع بعد فرکتال مربوط به دامنه‌های متفاوت ρ را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار دوتایی مولفه اول و دوم بدست آمده از تحلیل مولفه‌های اصلی کلاسیک (الف) و مقاوم شده (ب)

داده شده است. شکل ۴- ب همچنین نشان‌دهنده این است که قسمتی از منطقه مورد مطالعه با مقادیر ربع بالایی تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم شده (مقادیر بالای نمرات مولفه‌ها)، مناطق با مساحت آنومالی کمتر و انطباق با رخنمون‌های کانه‌زایی Au-As در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند. این مناطق منطبق با منطقه معدنی قدیمی زرشوران، رخنمون واحدهای زرشوران و آهک‌های سیلیسی چالداغ می‌باشند. مناطق تازه کاوش در این روش با استفاده از مشاهدات صحرایی تأیید شدند که بیشتر در مناطقی قابل مشاهده‌اند که گسل‌ها به طور گسترده‌ای توسعه یافته‌اند (شکل ۴- ب و ۵- الف- ج). گسل‌های موجود از جمله عوامل اصلی کانه‌زایی در منطقه هستند که مکان مساعدی را برای نهشت کانه‌ها فراهم کرده‌اند. مقادیر پایین مولفه اول (PC1) در منطقه مورد مطالعه، دارای انطباق با مناطقی هستند که شیب‌های ایمان‌خان و سنگ‌های مافیک رخنمون دارند (شکل ۵- د). مقایسه دو روش بکار گرفته شده نشان می‌دهد که در مقایسه با داده‌های خام، داده‌های ژئوشیمیایی تبدیل شده لگاریتم ریشه‌ای در هندسه حقیقی می‌توانند برای پهنه‌بندی و یافتن رابطه بین متغیرهای ژئوشیمیایی بهتر مورد پذیرش قرار بگیرند.

مولفه اول (PC1) و مولفه دوم (PC2) بدست آمده از تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم شده به ترتیب ۴۸٪ و ۳۲٪ کل واریانس را به خود اختصاص می‌دهند. نتایج بارهای فاکتوری مولفه اصلی با بار مثبت Au و مولفه دوم با بار مثبت As و Sb از تحلیل مقاوم در شکل ۳- ب به شکل نمودار دوتایی نشان داده شده‌اند. در مقابل تحلیل مولفه‌های اصلی کلاسیک، نتایج بدست آمده از داده‌های مقاوم، نشان‌دهنده این است که متغیرها به خوبی در سیستم مختصات نمودار دوتایی توزیع شده‌اند، که در واقع بیان‌کننده ساختار داده‌های باز شده در فضای حقیقی می‌باشند. بردار عنصر طلا در ربع اول شاخصی از ساختارهای غالب زمین‌شناختی (آهک سیلیسی شده چالداغ و واحد زرشوران) می‌باشند، که میزبان اولیه کانه‌زایی طلا در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. ربع چهارم با وجود بردار Cu منطبق با رخنمون سنگ‌های مافیک از قبیل شیب‌های ایمان‌خان و دیگر سنگ‌های مافیک در محدوده کانسار زرشوران می‌باشند. گروه As و Sb در ربع چهارم نیز دارای انطباق بسیار خوبی با کانه‌زایی طلا می‌باشند که هماهنگ با همراهی طلا و آرسنیک در منطقه مورد مطالعه است. توزیع فضایی مولفه اول (PC1) داده‌های مقاوم شده لگاریتم ریشه‌ای در شکل ۴- ب نشان



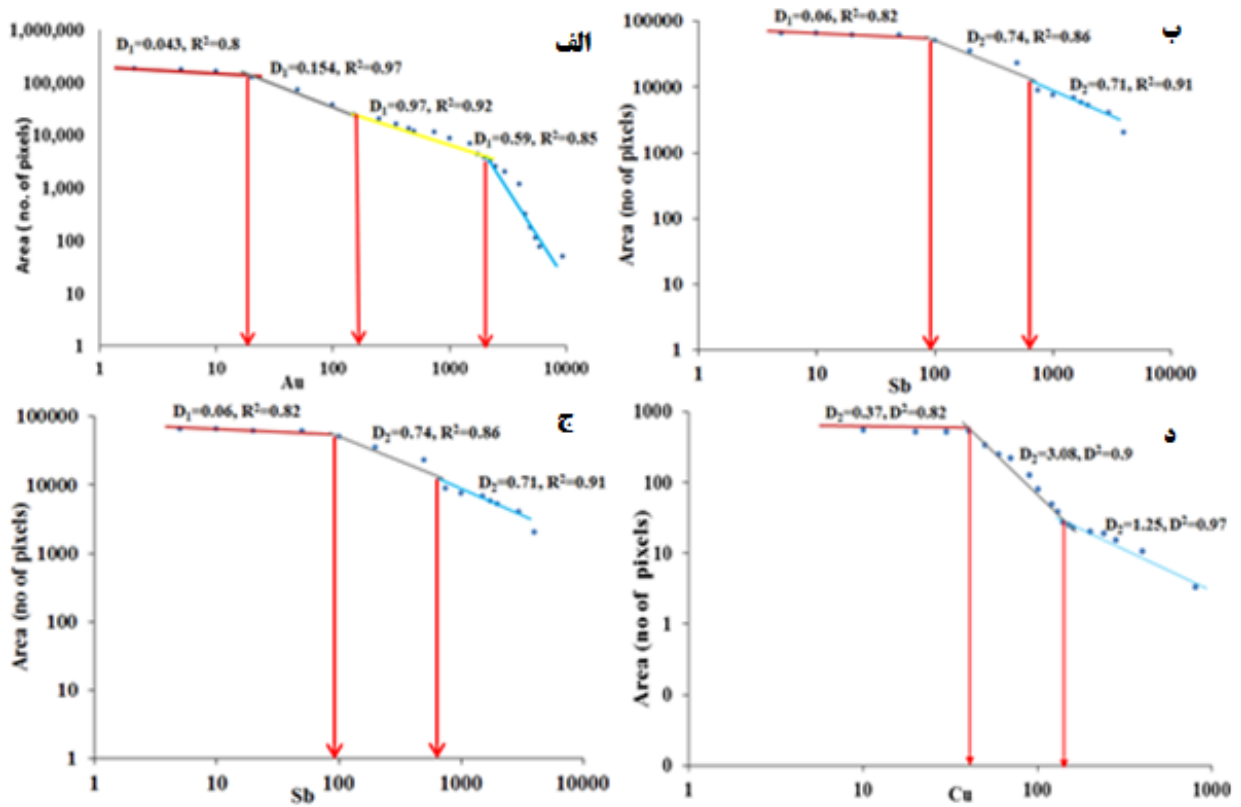
شکل ۴- توزیع فضایی مولفه اول در تحلیل مولفه‌های اصلی کلاسیک (الف)، و تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم شده (ب)

نقاط شکست بدست آمده در این نمودار، توزیع جوامع ژئوشیمیایی مختلف عنصر طلا در شکل آورده شده است. جامعه اول، که شبیه نزدیک به خط افق دارد، در واقع زمینه مقدار عیار طلا در این کانسار می‌باشد. بنابراین، می‌توان مقدار زمینه عنصر طلا $13/48$ ppb در نظر گرفت. جامعه دوم، دامنه عیار بین $13/48$ تا $144/54$ ppb را نشان می‌دهد. جمعیت سوم دارای عیاری بین $144/54$ تا $2961/53$ را نشان می‌دهد. جامعه چهارم که دارای شبیه نزدیک به خط عمود می‌باشد، شدیدترین نوع آنومالی را در منطقه نشان می‌دهد، و دارای عیار بالاتر از 2691 ppb می‌باشد (جدول ۲). بر اساس نمودار لگاریتمی عیار-مساحت As به عنوان عنصر ردیاب طلا، بیشترین میزان آنومالی 223 و 839 ppm می‌باشند. توزیع فضایی هر کدام از عناصر مذکور با توجه به حد آستانه‌های بدست آمده در مدل فرکتال عیار-مساحت در شکل ۷ نشان داده شده است. نقشه‌های طبقه‌بندی شده در واقع نشان‌دهنده تمرکز آنومالی‌های بالا در منطقه معدنی قدیمی و سینه‌کار محدود به کانسار زرشوران می‌باشند. به طوری که آنومالی‌های طلا و آرسنیک به عنوان عاملی در اکتشافات بیشتر طلا در محدوده مورد مطالعه رخنمونی جز در منطقه معدنی قدیمی نشان نمی‌دهند (شکل ۷).

جهت ترسیم نمودار لگاریتمی مدل فرکتال عیار-مساحت بدست آمده از روش ارزش‌گذاری پیکسل‌ها استفاده شده است، سپس با اعمال روش طبقه‌بندی با فواصل ۵ درصدی، در جدول توصیفی، که یکی از توابع رایج در GIS می‌باشد، تعداد پیکسل‌های موجود در هر طبقه مشخص می‌گردد. با اعمال روش فرکتال عیار-مساحت، بر روی ارزش پیکسل‌های موجود تخمین آستانه با دقت بیشتری صورت می‌پذیرد. نمودار لگاریتمی مدل عیار-مساحت برای عناصر طلا، آرسنیک، آنتیموان و مس در شکل ۶ ارائه شده است. همچنین مقدار آستانه‌های تخمین زده شده در هر کدام از جمعیت‌های ژئوشیمیایی جدا شده در جدول ۲ آورده شده‌اند. در مدل عیار-مساحت، ابعاد فرکتالی از قسمت اول تا سوم افزایش می‌یابند (شکل ۶) که نشان‌دهنده این موضوع است که با افزایش عیار، مساحت احاطه کننده آن در مناطق حاوی کانه‌زایی کاهش می‌یابد که صحتی بر روش بکارگیری این روش می‌باشد (شکل ۷). بُعد فرکتال در قطعه چهارم نسبت به دیگر قسمت‌ها کوچکتر می‌باشد، نشان‌دهنده این است که عیارهای بالاتر محدود به مناطق حاوی کانه‌زایی و رخنمون‌های همراه با کانی‌زایی می‌باشند. منحنی لگاریتمی عیار-مساحت برای عنصر طلا، نشانگر چهار جامعه ژئوشیمیایی مختلف در کانسار زرشوران می‌باشد (شکل ۶-الف). بر اساس



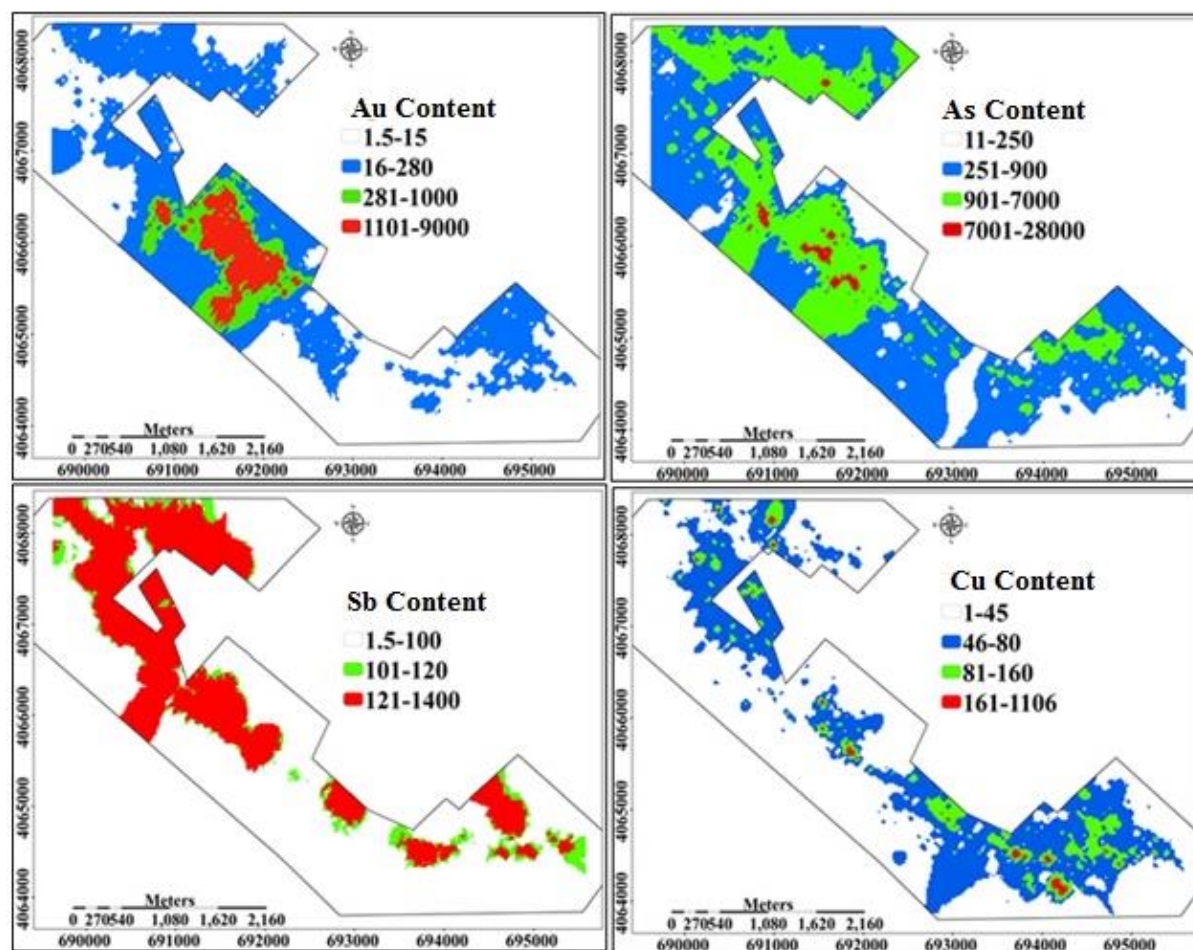
شکل ۵- شواهد صحرایی در محدوده معدنی کانسار زرشوران، رخنمون آهک کارستی و سیلیسی شده نواری (الف و ب)، واحد شیلی زرشوران و دگرسانی آرژلیک (ج) و شیست سبز ایمان‌خان (د)



شکل ۶- نمودار لگاریتمی عیار- مساحت فلزات طلا، آرسنیک، آنتیموان و مس در محدوده کانساز زرشوران

جدول ۱- مقادیر حد آستانه‌ای بدست آمده از روش فرکتال عیار- مساحت (مقادیر غلظت طلا ppb و عناصر دیگر ppm)

عنصر	حد آستانه	تفسیر
Au	$\leq 15/48$	زمیته
	$15/49 - 28/18$	زمیته یا لا
	$28/19 - 2630$	آنومالی
	≥ 2630	آنومالی یا لا
As	≤ 223	زمیته
	$234 - 891$	آنومالی
	≥ 891	آنومالی یا لا
Sb	≤ 100	زمیته
	$101 - 794/32$	آنومالی
	$\geq 794/32$	آنومالی یا لا
Cu	≤ 50	زمیته پایین
	$51 - 158$	زمیته
	≥ 159	آنومالی



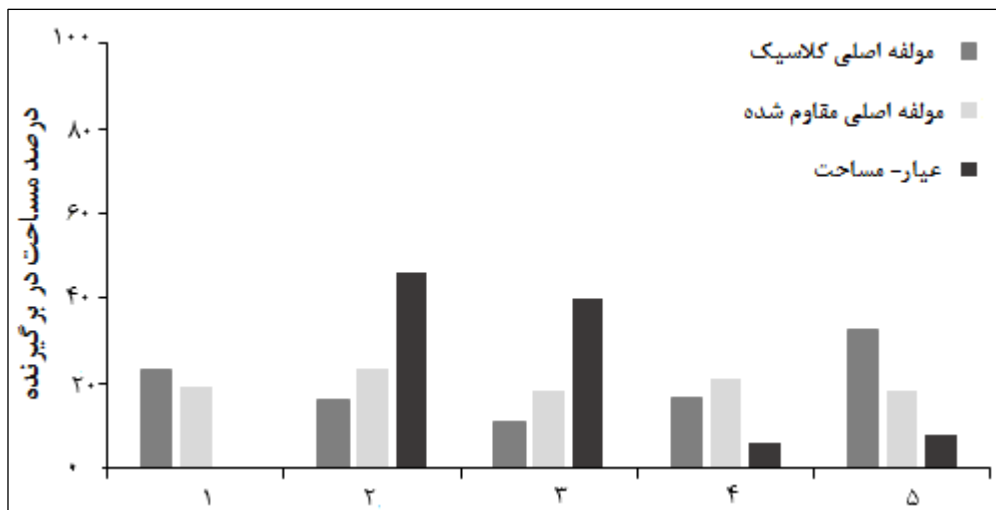
شکل ۷- نقشه توزیع جوامع ژئوشیمیایی عناصر طلا، آرسنیک، آنتیموان و مس در محدود کانسار زرشوران (مقادیر غلظت طلا ppb و عناصر دیگر ppm)

اند. واضح است که تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم مساحت‌های کوچک‌تر و مکان‌های بهتری جهت کارهای اکتشافی ارائه می‌نماید، که در واقع این مکان‌ها دارای پتانسیل اکتشافی دارای انطباق بسیار خوبی با رخنمون‌های از واحد شیلی زرشوران، آهک سیلیسی شده چالداغ می‌باشند. از طرف دیگر، مساحت آنومالی‌ها در مدل عیار- مساحت که آنومالی‌های طلا با مقدار بیشتر از $281/9$ ppb می‌باشد که مساحت کوچکتری نسبت به آنومالی‌های تعیین شده در روش‌های مولفه‌های اصلی کلاسیک و مقاوم نشان می‌دهد. با این وجود آنومالی‌های مشخص شده در روش عیار- مساحت منطبق با منطقه قدیمی معدن بوده، و اهداف اکتشافی بیشتری در مناطق دیگر را نشان نمی‌دهد. با مقایسه نقشه‌های درون‌یابی آنومالی‌های بدست آمده از روش‌های مولفه‌های اصلی مقاوم و روش عیار- مساحت با وجود اینکه هر دو روش دارای انطباق بسیار خوبی با رخنمون واحد زرشوران در منطقه دارند. مکان‌های دیگری که تحت عنوان مناطق دارای آنومالی معرفی شده‌اند، که به دلیل رخنمون کوچک این مناطق در مقیاس نقشه زمین‌شناسی و یا پوشش آنها توسط رسوبات جوان‌تر می‌باشد.

حضور آنومالی‌های ژئوشیمیایی در خاک و رسوبات آبراهه‌های تأییدی بر وجود قطعی آنومالی‌های ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه نمی‌باشد. بنابراین به کارگیری معیارهای خاصی جهت آزمایش یا الویت‌بندی آنومالی‌ها قبل از هرگونه کار اکتشافی لازم می‌باشد (Carranza, 2010; Yousefi et al., 2014). این الویت‌بندی می‌تواند بر اساس مساحت آنومالی موردنظر، یا درصد مساحت آنومالی با در نظر گرفتن مساحت کل منطقه مورد مطالعه باشد. در نظر گرفتن مقدار آستانه آنومالی طلا در منطقه مورد مطالعه ($281/9 \geq$ طلا) در مدل فرکتالی عیار- مساحت و مقادیر بالا (صدک بالایی) در هر دو روش مولفه‌های اصلی کلاسیک و مولفه‌های اصلی مقاوم کلیدهایی جهت اکتشافات بیشتر در منطقه معدنی زرشوران می‌باشند. (جدول ۲). از این جهت مقادیر پایین مساحت آنومالی برای مقادیر بالایی در مولفه‌های اصلی کلاسیک و مقاوم و همچنین مساحت آنومالی بدست آمده در روش فرکتالی عیار- مساحت مهمترین معیار در بین آنها می‌باشند. بر اساس اطلاعات موجود در جدول ۲، مناطق با پتانسیل بالا در هر دو روش مولفه‌های اصلی کلاسیک و مقاوم و همچنین مدل عیار- مساحت در شکل ۸ ترسیم شده-

جدول ۲- درصد مساحت دربرگیرنده آنومالی در تحلیل مولفه‌های اصلی کلاسیک مقاوم در محدوده کانسار زرشوران

شماره طبقه	دامنه طبقه	درصد آنومالی در PCA کلاسیک	درصد آنومالی در PCA مقاوم
۱	۲۰ <	۲۳/۲۱	۱۹/۲
۲	۲۰-۴۰	۱۶/۱۸	۲۳/۳۱
۳	۴۰-۶۰	۱۱/۲۰	۱۸/۲۸
۴	۶۰-۸۰	۱۶/۸۶	۲۱/۰۵
۵	۸۰-۱۰۰	۳۲/۵۴	۱۸/۱۶



شکل ۸- مقایسه درصد مساحت در برگیرنده در روش‌های مولفه اصلی کلاسیک، مقاوم و روش عیار-مساحت در محدوده کانسار زرشوران

نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر به شرح ذیل می‌باشند:

- ۱- تحلیل مولفه‌های اصلی کلاسیک و مقاوم بر داده‌های خام ژئوشیمیایی و داده‌های انتقال داده شده ایزومتریک اعمال شدند. تبدیلات لگاریتم ریشه‌ای باعث باز شدن داده‌های ژئوشیمیایی بسته شده‌اند و نتایج تجزیه تحلیل مولفه‌های اصلی داده‌های انتقال داده شده به لگاریتم ریشه‌ای نشان‌دهنده این است که درصد بالایی مولفه اول (PC1) وجود کانه‌زایی هیدروترمال طلا-آرسنیک، منطقه معدنی زرشوران و همچنین دیگر اهداف اکتشافی برای اکتشافات بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر مقادیر پایین مولفه اول (PC1) دارای انطباق با رخنمون شیست‌های ایمان‌خان می‌باشند.
- ۲- نتایج بدست آمده شده از مدل فرکتال عیار-مساحت ارائه شده در جدول ۱ نشان‌دهنده حداقل سه جمعیت ژئوشیمیایی با زمینه و آنومالی متفاوت می‌باشند. مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل عیار-مساحت با استفاده از تهیه نقشه آنومالی‌های جدا شده و مشاهدات زمین‌شناسی نشان‌دهنده ارتباط قوی بین آنومالی‌های مشخص شده با رخنمون‌های واحد زرشوران، آهک سیلیسی شده چالداغ می‌باشند و مقدار حد آستانه زمینه دارای انطباق کامل با شیست ایمان‌خان می‌باشد.
- ۳- مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های بکارگرفته شده با استفاده از درصد مساحت دربرگرفته شده نشان‌دهنده این است که مساحت آنومالی تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم نسبت به مدل فرکتالی عیار-مساحت کمتر

بوده و دارای انطباق بیشتری با ساختارهای زمین‌شناختی مرتبط با کانه‌زایی می‌باشد، از این‌رو مدل تحلیل مولفه‌های اصلی مقاوم با حذف اثر بسته بودن داده‌های ژئوشیمیایی برای اهداف اکتشافی بیشتر در محدوده معدنی زرشوران مفیدتر می‌باشد.

مراجع

- اجاقی، ب.، ۱۳۷۴، "زمین‌شناسی کانسار طلای زرشوران" مهندسین مشاور کاوشگران، گزارش داخلی، ۱۶۵ صفحه.
- باباخانی، ع.، ر.، قلمقاش، ج.، ۱۳۸۰، "گزارش زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان" انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۱۱۰ صفحه.
- قربانی، م.، ۱۳۷۹، "ماگماتیسیم و متالوژنی منطقه تکاب" پایان‌نامه دکتري، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۴۰۰ صفحه.
- کریمی، م.، ۱۳۷۲، "مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و نحوه تشکیل کانسار طلا و آرسنیک زرشوران (تکاب)" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم، تهران، ۲۵۰ صفحه.
- علوی نائینی، م.، عمیدی، م.، ۱۳۶۱، "گزارش زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب-صائین قلعه" انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۱۰۰ صفحه.

- Aitchison, J., 1982**, "The statistical analysis of compositional data", *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, P.139-177.
- Aitchison, J., 1986**, "The statistical analysis of compositional data", *Springer*, P.417.
- Aitchison, J., 1989**, "Measures of location of compositional data sets", *Mathematical Geology*, 21, P.787-790.
- Aitchison, J., Egozcue, J.J., 2005**, "Compositional data analysis: Where are we and where should we be heading?", *Mathematical Geology*, 37, P.829-850.
- Ali, K., Cheng, Q., Chen, Z., 2007**, "Multifractal power spectrum and singularity analysis for modelling stream sediment geochemical distribution patterns to identify anomalies related to gold mineralization in Yunnan Province, South China", *Geochemistry. Exploration. Environment. Analysis*, 7, P.293-301.
- Asadi, H., 2000**, "The Zarshuran gold deposit model applied in a mineral exploration GIS in Iran", *PhD Thesis, ITC, Netherlands*, P.208.
- Bai, J., Porwal, A., Hart, C., Ford, A., Yu, L., 2010**, "Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: Application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan, China", *Journal of Geochemical Exploration*, 104, P.1-11.
- Buccianti, A., & Pawlowsky-Glahn, V., 2005**, "New perspectives on water chemistry and compositional data analysis", *Mathematical Geology*, 37 (7), P.703-727.
- Carranza, E.J.M., 2010**, "Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes", *Geochemistry: Exploration. Environment. Analysis*, 10, P.171-187.
- Carranza, E.J.M., 2011**, "Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values", *Journal of Geochemical Exploration*, 110, P.167-185.
- Cheng, Q., Agterberg, F., Ballantyne, S., 1994**, "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods", *Journal of Geochemical Exploration*, 51, P.109-130.
- Egozcue, J.J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., Barceló-Vidal, C., 2003**, "Isometric logratio transformations for compositional data analysis", *Mathematical Geology* 35, P.279-300.
- Egozcue, J., Pawlowsky-Glahn, V., 2006**, "Simplicial Geometry for Compositional Data, In: Buccianti, A., Mateu-Figueras, G., Pawlowsky-Glahn, F., editors. Compositional Data Analysis in the Geosciences: From Theory to Practice .Bath, UK": *Geological Society Publishing House: P.67-77*.
- Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C., 2009**, "Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: problems and possibilities", *Science Total Environment*, 407, P.6100-6108.
- Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C., 2010**, "The bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data", *Science Total Environment*, 408, P.4230-4238.
- Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C., 2012**, "Interpretation of multivariate outliers for compositional data", *Computer & Geoscience*, 39, P.77-85.
- Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C., Garrett, R., 2009**, "Robust factor analysis for compositional data", *Computer & Geoscience*, 35, P.1854-1861.
- Goncalves, M.A., Vairinho, M., Oliveira, V., 2001**, "Characterization of geochemical distribution using multifractal models", *Mathematical Geology*, 1: P.41-46.
- Hron, K., Templ, M., Filzmoser, P., 2010**, "Exploratory compositional data analysis using the R-package robCompositions", *Oviedo, Spain*, P. 207.
- Maronna, R., Martin, R.D., Yohai, V.J., 2006**, "Robust statistics: Theory and methods", *John Wiley: New York*, P.978.
- Mehrabi, B., Yardley, B., Cann, J., 1999**, "Sediment-hosted disseminated gold mineralisation at Zarshuran, NW Iran", *Mineralum Deposita*, 34, P.673-696.
- Nazarpour, A., Omran, N.R., Paydar, G.R., 2013**, "Application of multifractal models to identify geochemical anomalies in Zarshuran Au deposit, NW Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, P.1-13.
- Pawlowsky-Glahn, V., Egozcue, J., 2006**, "Compositional data and their analysis: an introduction", *Geological Society, London, Special Publications*, P.264, 1-10.
- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E.J.M., 2014**, "Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping", *Geochemistry: Exploration: Environment: Analysis*, 14, P.45-58.
- Zuo, R., 2014**, "Identification of geochemical anomalies associated with mineralization in the Fanshan district, Fujian, China", *Journal of Geochemical Exploration*, 139, P.170-176.
- Zuo, R., Xia, Q., Wang, H., 2013**, "Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization", *Applied Geochemistry*, 28, P.202-211.

