

# تحلیل پتانسیل کانی‌زایی با استفاده از روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای (SFA) در گستره خوشنامه، هسجین، استان اردبیل

سمیرا حسین‌پور نجاتی<sup>۱</sup>، کمال سیاه‌چشم<sup>۲\*</sup>، سید غفور علوی<sup>۳</sup> و پویا زرگری<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. استادیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۱۸

## چکیده

پهنه دگرسان شده خوشنامه، در ۲۰ کیلومتری جنوب خلخال و در منطقه فلزآیی هسجین واقع شده است. تزریق نفوذی‌های گرانودیوریتی الیگوسن به درون سنگ‌های تراکی بازالیت، آندزیتی و آذرآواری ائوسن سبب ایجاد دگرسانی گرمایی گسترده سرپستی، آرژلیک، سیلیسی، کلریتی و اکسیدهای آهن در غرب چنار، محمودآباد، شرق خوشنامه و رخداد کانی‌زایی چند فلزی سنجده، شال‌ولی و ام‌آباد در این مناطق شده است. نقطه عطف این پژوهش بررسی قابلیت روش آنالیز فاکتوری مرحله‌ای (SFA) برای بارسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی واقعی موجود در منطقه است. از آنجایی که مقدار تمرکز عناصر غیرمرتبط با کانی‌سازی، تاثیر منفی بر امتیازات فاکتوری عناصر دارند بنابراین تعداد فاکتورها کاهش داده شد تا شدت آنومالی افزایش یابد. برای رسیدن به این هدف در مرحله اول از نه فاکتور محاسبه شده، عناصر غیر معرف، مزاحم و عناصری که در هیچ‌یک از فاکتورها مشارکت نداشتند، شناسایی و از مجموعه داده‌ها حذف و تحلیل فاکتوری بار دیگر اعمال شد. پس از اعمال سه مرحله تحلیل روی داده‌ها، مؤثرترین فاکتورهای پیشگو و مهم کانی‌سازی مورد استنتاج قرار گرفت و در نتیجه تعداد فاکتورها به پنج مورد کاهش یافت. استفاده از این روش موجب افزایش شدت و تعداد آنومالی‌های ممکن و احتمالی و در نتیجه افزایش موفقیت اکتشاف در قیاس با روش آنالیز فاکتوری معمولی شده است. از اینرو آنومالی احتمالی کانی‌زایی عناصر فلزی  $\text{Ba}$ ،  $\text{Sn}$ ،  $\text{Pb}$  و  $\text{Mo}$  از فاکتور اول و عناصر  $\text{As}$ ،  $\text{Cd}$  و  $\text{Sb}$  از فاکتور چهارم در این گستره پیش‌بینی و معرفی می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آنومالی ژئوشیمیایی، روش‌های چند متغیره، تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، خوشنامه، اردبیل.

## مقدمه

شده است و به‌طور وسیعی برای پی‌جویی‌های ناحیه‌ای و شناسایی مقدماتی نواحی امیدبخش کانی‌سازی در مناطقی که دارای آبراهه هستند و وسعت حوضه آبریز زیاد باشد به کار می‌رود. بنیادی‌ترین پیش‌فرض در مطالعات ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای این است که رسوبات آبراهه‌ای معرف

روش اکتشاف ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای متداول‌ترین شیوه اکتشاف ژئوشیمیایی مقدماتی است که برای اکتشاف مقیاس کوچک تا متوسط کاربرد دارد. این روش براساس تجزیه شیمیایی رسوبات موجود در محل آبراهه‌ها پی‌ریزی

\* نویسنده مرتبط: kl\_siahcheshm@tabrizu.ac.ir

## موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

گستره اکتشافی خوشنامه از روستاهای توابع شهرستان هسجین، در ۲۰ کیلومتری جنوب خلخال در استان اردبیل بین طول‌های شرقی "۴۸°۱۶'۲۲" و "۴۸°۲۷'۱۸" و عرض‌های شمالی "۳۷°۲۵'۲۴" و "۳۷°۳۰'۰۰" واقع شده (شکل ۱-الف) و در چهارگوش زمین‌شناسی یکصد هزارم هسجین دارای وسعتی بالغ بر ۷۰ کیلومتر مربع می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی منطقه هسجین به‌عنوان بخشی از کمربند آتشفشانی-رسوبی تشریری البرز غربی-آذربایجان محسوب می‌شود (شکل ۱-ب). توده‌های نفوذی حدواسط تا اسیدی با سن الیگوسن، گدازه‌های تراکی بازالت، آندزیتی آگلومرا تا پیروکلاستیک ائوسن را قطع کرده و توسط نهشته‌های آهکی و مارنی میوسن زیرین با دگرشیمی فرسایشی پوشیده می‌شوند. به‌طور کلی رخنمون‌های سنگی موجود در گستره به‌صورت تناوب نهشته‌های آتشفشانی، آذرآواری و رسوبی پالئوژن، نئوژن و کواترنری می‌باشند. در کمربند فلززایی هسجین چندین ذخیره معدنی از قبیل معادن چند فلزی مس-سرب-روی سنجده، شال‌ولی، اندیس مس آم‌آباد و زئولیت نم‌هیل وجود دارد که هرکدام از این معادن در اطراف خود دارای هاله‌های دگرسانی هستند (قربانی، ۱۳۸۷).

براساس بررسی‌های صحرایی انجام شده در گستره اکتشافی خوشنامه کانی‌سازی مشهودی به‌صورت ذخیره معدنی گزارش و پی‌جویی نشده است ولی آثار وسیع دگرسانی گرمایی در سنگ‌های منطقه قابل تشخیص است. برخی انواع آنها به‌طور گسترده مناطق مختلفی را در چند ناحیه تحت تأثیر قرار داده است. این گستره‌های دگرسان شده در مناطق تکتونیزه که انتقال سیالات گرمایی با سهولت بیشتری صورت گرفته دارای وسعت بیشتری هستند و می‌توان از آنها به‌عنوان شاخص اکتشافی استفاده کرد. این دگرسانی‌ها به‌صورت یک نوار از شمال غرب تا جنوب شرق کشیده شده و مهم‌ترین آنها عبارتند از: سریسیتی (فیلیک)، آرژیلیک (کائولینیتی)، سیلیسی شدگی، کلریتی (پروپیلیتیک) و همچنین زون‌های آغشته به اکسیدهای آهن می‌باشد. براساس مطالعات این دگرسانی‌ها در چهار

محصول هوازدگی و فرسایش در بالادست محل نمونه هستند که با مطالعه آنها می‌توان منطقه بالادست هر نمونه را از نظر غنی‌شدگی عناصر گوناگون بررسی کرد (حسینی پاک، ۱۳۸۷).

تجزیه و تحلیل فاکتوری، به‌عنوان یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل چندمتغیره به‌طور گسترده برای تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای استفاده می‌شود (Borovec, 1996). آنالیز فاکتوری، یک روش برای بررسی و مطالعه هم‌زمان تغییرات متغیرهای مورد بررسی در یک نقطه، انعکاس نحوه تغییرات آنها و در نتیجه روشی برای کاهش تعداد متغیرهای مورد بررسی است. هدف از آنالیز فاکتوری، تشریح تغییرات در یک مجموعه از داده‌های ژئوشیمیایی چندعنصری است که از طریق کاهش ابعاد داده‌ها و متغیرها به تعدادی فاکتور صورت می‌گیرد، و می‌تواند همراهی پنهان بین عناصر را آشکار کند (Tripathi, 1979). آنالیز فاکتوری شامل محاسبه ماتریس ضرایب‌های همبستگی بین متغیرها، تعیین متغیرهایی که به نظر می‌رسد وابستگی ضعیفی با سایر متغیرها دارند (با استخراج فاکتورها)، تعیین تعداد فاکتورها، روش محاسبه آنها و بالاخره دوران و اعمال تبدیلاتی خاص بر روی فاکتورها می‌باشد (Tabachnick and Fidell, 2001). اختلاف در خصوصیات و تحرک فیزیکی و شیمیایی عناصر و نیز ماهیت روش آنالیز فاکتوری که در آن از ماتریس کل داده‌ها استفاده می‌شود، سبب شده در خروجی آنالیز فاکتوری شاهد نبود راهنمایی عناصر ردیاب و معرفی کانی‌سازی در قالب یک فاکتور معین باشد. یکی از اهداف تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله‌ای آن است که با تعداد کمتری متغیر فاکتوری، مقدار بیشتری از تغییرپذیری توجیه شود. لذا برای بهبود خروجی می‌توان از آنالیز فاکتوری مرحله‌ای به‌منظور استنتاج بهترین معرف یا معرف‌های چندعنصری کانی‌سازی بهره برد. در این مقاله سعی شده تا از قابلیت روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای برای تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای منطقه خوشنامه جهت شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی شده در این منطقه استفاده شود.

دگرسانی شناسایی شده و در یک محل نیز از ترانسه‌های اکتشافی، نمونه‌برداری‌های لازم جهت شناسایی آنومالی‌های چندفلزی و طلا انجام شده است (زرخاب اکتشاف، ۱۳۸۵).

گستره به صورت گسترده و در مناطقی نیز در اطراف دایک‌ها و در موقعیت‌های کم‌وسعت‌تر شناسایی شده‌اند. این چهار محدوده عبارتند از محدوده دگرسانی غرب چنار، محمودآباد، شرق خوشنامه و دره‌بلاغ می‌باشد. از رخنمون سطحی کلیه



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مطالعاتی، ب) نقشه کمربندهای ساختاری-رسوبی شمال غرب ایران (نقل از نبوی، ۱۳۵۵ و آقانباتی، ۱۳۸۳) و موقعیت گستره در کمر بند البرز غربی-آذربایجان

## روش مطالعه

### پردازش مقدماتی داده‌ها

در بررسی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای هدف کشف آنومالی در هاله‌های ثانویه است؛ برای شناسایی آنومالی‌ها، از روش‌های آماری که توانایی به حداکثر رساندن اختلاف بین مقادیر آنومالی و روند ناحیه‌ای را دارند، استفاده کرده و در نتیجه، از طریق شدت بخشی آنومالی‌ها، به شناسایی هرچه دقیق‌تر آنها می‌پردازند.

در منطقه مورد مطالعه تعداد ۲۱۵ نمونه ژئوشیمیایی برداشت شده، که پس از آماده‌سازی به آزمایشگاه Amdel استرالیا ارسال شده و براساس انحلال در چهار اسید مورد آنالیز دستگاهی ICP-MS 44 عنصری قرار گرفته و اندازه‌گیری طلا نیز به روش FIRE ASSAY صورت گرفته

است. نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها توسط نرم‌افزارهای SPSS، Rockworks14، OriginPro 2016، GIS و Excel مورد تجزیه و تحلیل آماری تک متغیره، دو متغیره و چند متغیره قرار گرفته و با استفاده از نرم‌افزار Surfer 13 نقشه پراکندگی عناصر رسم و مورد تفسیر قرار گرفته است. برای تعیین مقادیر خارج از ردیف از روش نمودار چندک-چندک استفاده شد. این نمودار مقادیر چندک‌های توزیع فراوانی داده‌ها را در برابر مقادیر چندک‌های یک توزیع فرضی رسم می‌کند و قادر است تا کیفیت توزیع داده‌ها را به صورت بصری مشخص کند و میزان انحراف از تابع توزیع نرمال یا لاگ نرمال<sup>۲</sup>، خصلت چند جامعه‌ای و وجود داده‌های خارج از

1. Q-Q Plot

2. Lognormal distribution function

حالت نرمال شده است که از بین آنها به ارائه عناصر سرب و روی اکتفا شده است. چنانچه مشاهده می شود مقادیر خارج از ردیف برای عناصر مذکور به طور قابل توجهی کاهش یافته است. لازم به ذکر است برای جایگذاری مقادیر خارج از ردیف از آزمون آماری دیکسون<sup>۲</sup> که بنام روش Q نیز موسوم است، استفاده شده که به طریقه زیر محاسبه می شود:

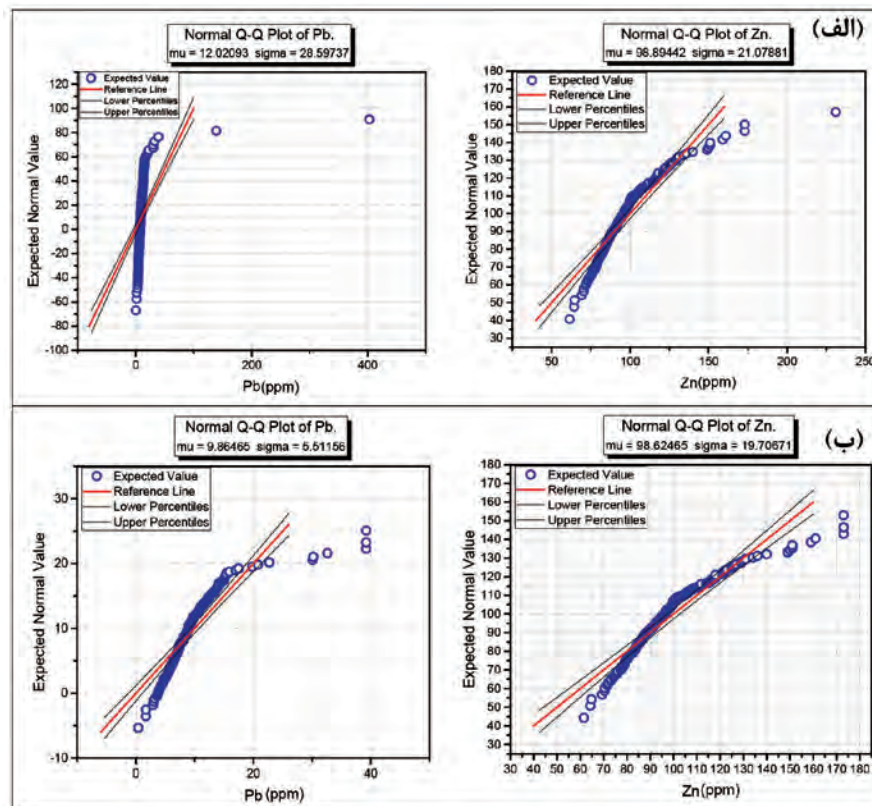
$$Q = \frac{X_i - S_{i-1}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

پس از محاسبه میانگین ( $\bar{Q}$ ) و انحراف معیار  $Q$ ها (SQ)، هر داده ای که از نامساوی زیر تبعیت نمی کند را حذف کرده و به جای آن مقدار میانگین عنصر مربوطه جایگزین شده است (Alfassi et al., 2005).

پس از جایگذاری مقادیر خارج از ردیف برای تبدیل داده ها به حالت نرمال از لگاریتم طبیعی که در مبانی  $e$  محاسبه می شود، استفاده شد.

ردیف را نشان دهد. با رسم این نمودار می توان محل جدایش توزیع را به عنوان مرز جدایش نمونه های خارج از ردیف تعیین کرد. به این ترتیب، مقادیری خارج از ردیف خواهند بود که از روند کلی بخش اصلی توزیع داده ها پیروی نکنند.

در این نمودارها هر چه مقدار داده ها، بهتر بر روی خط فرضی برازش<sup>۱</sup> شده باشند، به همان میزان، تابع توزیع نرمال تری خواهند داشت. داده هایی هم که از خط مزبور جدایش نشان می دهند، خارج از ردیف می باشند. توزیع های نامتقارن مجموعه داده های منحصربه فرد، برای استفاده باید به حالت متقارن تبدیل شوند، زیرا داده ها بایستی قبل از تخمین آستانه، به یک توزیع متقارن نزدیک شوند (Reimann et al., 2005). همان طور که در شکل ۲ مشخص است، اقدام به رسم نمودارهای Q-Q برای تمامی عناصر، در دو حالت قبل از تشخیص داده های خارج از ردیف و پس از تصحیح و جایگذاری داده های خارج از ردیف در

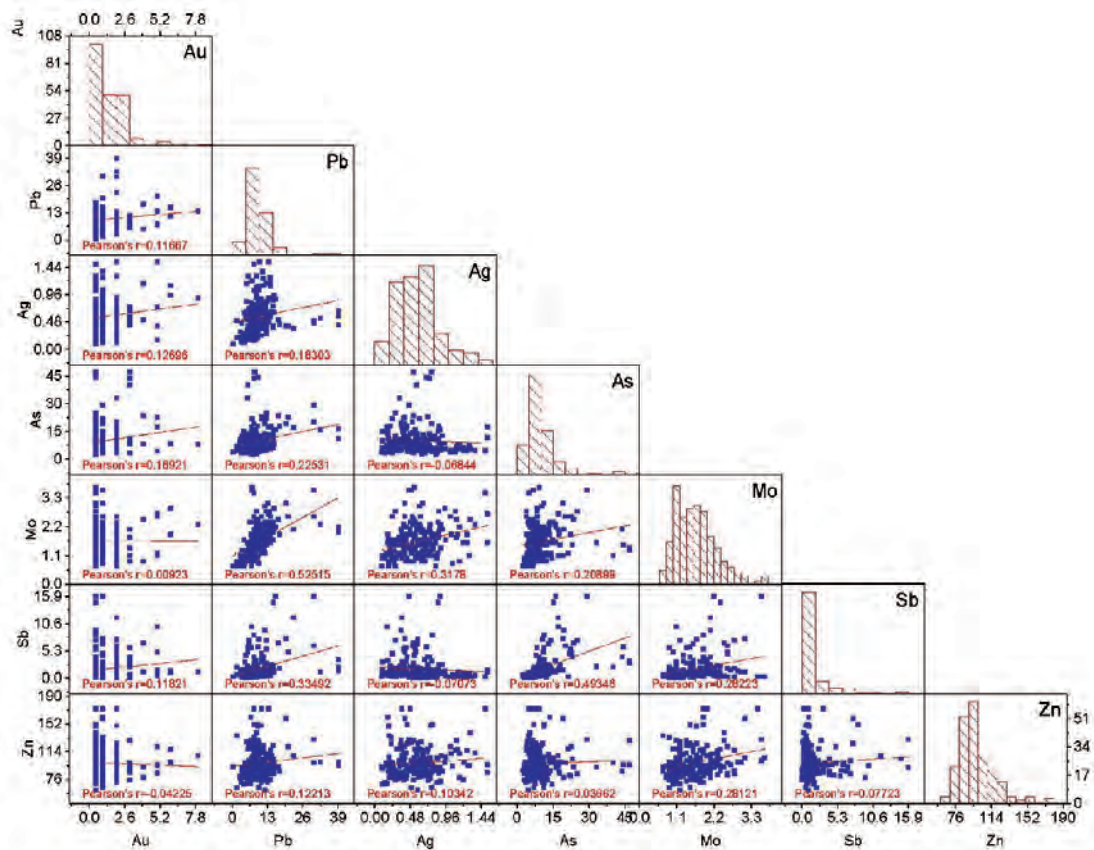


شکل ۲. نمودار Q-Q برای نشان دادن مقادیر خارج از ردیف برای دو عنصر انتخابی مس و روی، (الف) قبل از تصحیح، (ب) بعد از تصحیح

1. Fitting
2. Dixon Q test

برای منطقه مورد مطالعه، نمودارهای اسکاتریلات هر یک از مجموعه داده‌های خام و تبدیل یافته لگاریتمی آورده شده‌اند توزیع‌های تبدیل یافته لگاریتمی دارای تقارن بهتری در مقایسه با داده‌های خام مربوطه می‌باشد (شکل‌های ۳ و ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب‌های همبستگی پیرسون پس از نرمال‌سازی افزایش یافته است.

برای نشان دادن توابع توزیع آماری، ضریب همبستگی و نحوه پراکندگی مجموعه داده‌ها از نمودارهای ترکیبی استفاده شده است زیرا این نمودارها دید بهتری از رفتار و ساختار داده‌های تک متغیره و دو متغیره نسبت به نمودارهای مستقل را فراهم می‌کند. به‌جای تفسیر بصری هیستوگرام تک تک عناصر و ضریب همبستگی آن‌ها با دیگر عناصر، می‌توان از نمودارهای ترکیبی اسکاتریلات بهره جست.



شکل ۳. نمودار پراکندگی مجموعه داده‌های خام عناصر گسترده اکتشافی

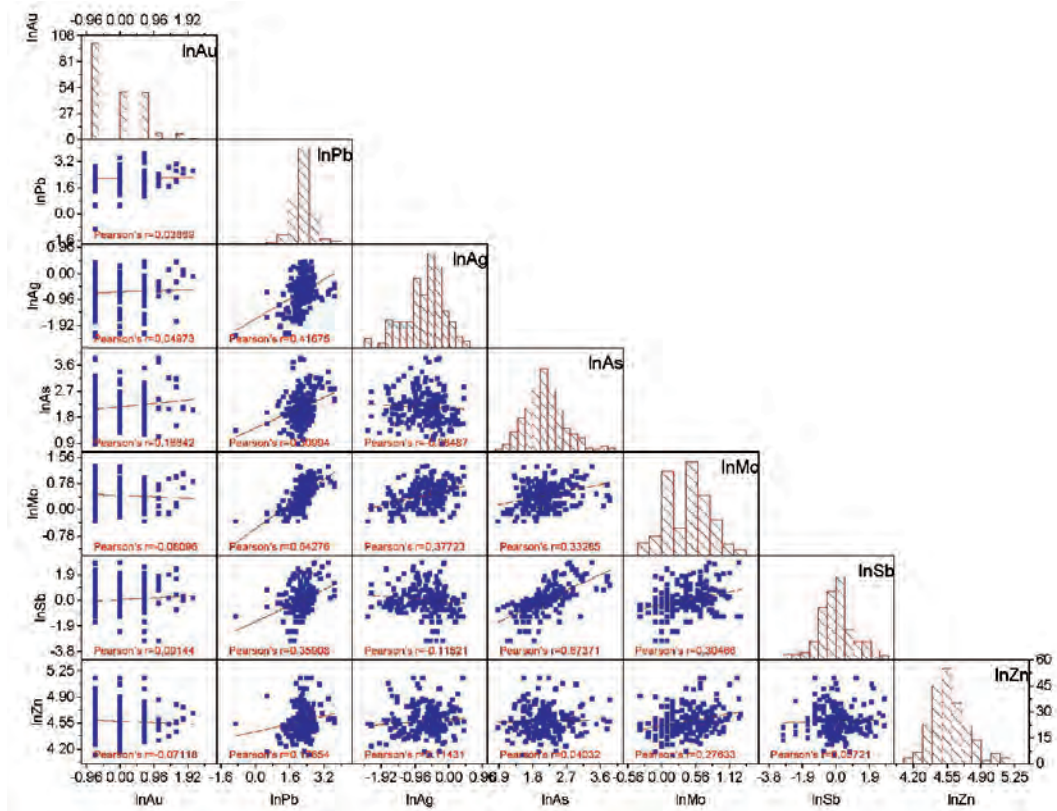
عمل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیگر هیچ عنصری در خروجی کار وجود نداشته باشد که نتوان آن را در یکی از فاکتورها طبقه‌بندی کرد. آنالیز فاکتوری مرحله‌ای در دو فاز عمده صورت می‌گیرد:  
 فاز اول: حذف عناصر مزاحم، یعنی عناصری که در هیچ فاکتوری مشارکت ندارند (استخراج فاکتورهای تمیز).

## بحث

### تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله‌ای (SFA<sup>۲</sup>)

مبنای آنالیز فاکتوری مرحله‌ای بدین‌گونه است که پس از اجرای آنالیز فاکتوری، در خروجی کار، عنصر و یا عناصری را که با توجه به حد آستانه در نظر گرفته شده برای مقادیر بار فاکتوری، در هیچ فاکتوری مشارکت نداشته‌اند از مجموعه داده‌ها حذف شده و آنالیز فاکتوری دوباره انجام پذیرد. این

1. Scatter plot
2. Staged Factor Analysis



شکل ۴. نمودار پراکندگی مجموعه داده‌های لگاریتمی عناصر گستره اکتشافی

عاملی را بر روی مقادیر بررسی کرد. برای این منظور از آزمون بارتلت و شاخص KMO بهره گرفته می‌شود. هر چه مقدار KMO به یک نزدیک‌تر باشد دلالت بر تأیید بیشتر تجزیه عاملی دارد. با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود که مقدار شاخص  $0/815$  می‌باشد که ضریب قابل قبولی است. نتایج تحلیل فاکتوری بر اساس مقادیر نرمال شده (با توجه به تابع توزیع هر متغیر در صورت نرمال نبودن از روش لگاریتم جهت نرمالیزه کردن مقادیر استفاده شده است) در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول مقادیر ویژه کل و نقش آنها در توجیه مقدار تغییرپذیری به دو صورت تک به تک و تجمعی و همچنین بار فاکتورهای مربوط به نه فاکتور اول قبل و بعد از چرخش آورده شده است.

فاز دوم: استخراج نواحی آنومال چندعنصره به‌منظور شناسایی تیپ کانی‌سازی و دستیابی به امتیازات فاکتوری قابل اعتماد.

هر یک از فازهای آنالیز فاکتوری ممکن است با توجه به داده‌های ژئوشیمیایی منطقه و نیز نوع کانی‌سازی موجود، به‌صورت مجزا تحت آنالیز مرحله‌ای قرار گیرند (Yousefi et al., 2012). به‌منظور نشان دادن کاربرد آنالیز فاکتوری مرحله‌ای، هر کدام از فازهای اصلی و مراحل آنها بر روی داده‌های منطقه مورد مطالعه انجام شد.

### تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله اول

قبل از انجام آنالیز فاکتوری ابتدا باید میزان اعتبار تجزیه

جدول ۱. آزمون بارتلت و شاخص KMO

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0.815
Approx. Chi-Square		10779.184
Bartlett's Test of Sphericity	df	861
	Sig.	0

- داده‌های جدول ۲ دلالت بر آن دارد که مؤلفه اول قادر است حدود ۲۶/۴۹٪ از کل تغییرپذیری را توجیه کند. این مقدار برای مؤلفه دوم افت کرده و به حدود ۱۶٪ کاهش می‌یابد. برای مؤلفه سوم این مقدار به حدود ۹٪ کاهش می‌یابد، بنابراین سه مؤلفه اول در مجموع ۵۲٪ تغییر پذیری را توجیه می‌کنند. این روند کاهش تا فاکتورهای چهارم، پنجم، ششم، هفتم و غیره که به ترتیب حدود ۷/۴٪، ۶٪، ۴/۵٪ و ۳/۳٪ تغییرپذیری را توجیه می‌کنند، ادامه دارد. در مجموع نه فاکتور استخراجی توانسته است ۷۹/۰۶۴٪ از کل تغییرپذیری را در منطقه مطالعاتی توجیه کند (جدول ۲).
- جدول ۳، ماتریس چرخش یافته آنالیز فاکتوری را نشان می‌دهد که جهت سهولت بررسی داده‌ها مقادیر بالای ۰/۵ با رنگ قرمز برای هر فاکتور مشخص شده‌اند. در هر یک از نه مؤلفه داده شده عناصر زیر اهمیت پیدا کرده‌اند:
- در مؤلفه اول بیشترین بار فاکتوری برای عناصر Zr و La، Th، Mo، Pb، Ce، Sn، Nb، Be، Ba مشاهده می‌شود. این فاکتور می‌تواند در ارتباط با معرفی مناطق دگرسانی درون‌زاد در گستره مورد نظر دارای اهمیت باشد.
  - در مؤلفه دوم عناصر Cu، Ti، (P-Sc-V)، Zn، Fe در مؤلفه سوم عناصر Sr و Mg، Ni، Cr قرار دارند. این عناصر در ارتباط با دگرسانی سنگ‌های بازالتی است و از کانی‌های مافیک آزاد شده‌اند. از اینرو این فاکتور اهمیت چندانی در فعالیتهای کانی‌سازی نخواهد داشت.
  - در مؤلفه چهارم عناصر W، Bi، Tl، Au و U قرار دارند که می‌تواند در ارتباط با فعالیتهای گرمایی و کانی‌سازی طلا در سنگ‌های آذرین آکالین در منطقه باشد.
  - در مؤلفه پنجم عناصر S، Li، As و Cd و Sb حضور دارند. همبوند ژئوشیمیایی این عناصر به احتمال قوی نشانگر کانی‌سازی گرمایی رگه‌ای دما پایین در سنگ‌های اسیدی منطقه می‌باشد.
  - در فاکتورهای بعدی عناصر به‌تنهایی ظاهر شده‌اند که فاقد جنبه اکتشافی می‌باشند.
  - نقشه ژئوشیمیایی امتیازات فاکتوری برای مؤلفه‌های مهم در پی‌جویی و اکتشاف مرتبط با مرحله اول آنالیز فاکتوری در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ رسم شدند.

جدول ۲. نتایج آنالیز فاکتوری

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
۱	۱۱/۱۲۹	۲۶/۴۹۸	۲۶/۴۹۸	۱۱/۱۲۹	۲۶/۴۹۸	۲۶/۴۹۸	۷/۴۹۴	۱۷/۸۴۳	۱۷/۸۴۳
۲	۶/۷۸۱	۱۶/۱۴۵	۴۲/۶۴۲	۶/۷۸۱	۱۶/۱۴۵	۴۲/۶۴۲	۵/۳۹۸	۱۲/۸۵۳	۳۰/۶۹۶
۳	۳/۹۵۳	۹/۴۱۱	۵۲/۰۵۴	۳/۹۵۳	۹/۴۱۱	۵۲/۰۵۴	۴/۴۵۱	۱۰/۵۹۷	۴۱/۲۹۳
۴	۳/۱۱۱	۷/۴۰۷	۵۹/۴۶۱	۳/۱۱۱	۷/۴۰۷	۵۹/۴۶۱	۴/۰۰۶	۹/۵۳۹	۵۰/۸۳۲
۵	۲/۵۲۲	۶/۰۰۵	۶۵/۴۶۵	۲/۵۲۲	۶/۰۰۵	۶۵/۴۶۵	۳/۰۴۷	۷/۲۵۴	۵۸/۰۸۵
۶	۱/۹۱۲	۴/۵۵۳	۷۰/۰۱۸	۱/۹۱۲	۴/۵۵۳	۷۰/۰۱۸	۲/۶۳۰	۶/۲۶۱	۶۴/۳۴۷
۷	۱/۴۱۳	۳/۳۶۵	۷۳/۳۸۳	۱/۴۱۳	۳/۳۶۵	۷۳/۳۸۳	۲/۴۰۰	۵/۷۱۵	۷۰/۰۶۲
۸	۱/۳۵۸	۳/۲۳۳	۷۶/۶۱۶	۱/۳۵۸	۳/۲۳۳	۷۶/۶۱۶	۱/۹۵۹	۴/۶۶۵	۷۴/۷۲۷
۹	۱/۰۲۸	۲/۴۴۸	۷۹/۰۶۴	۱/۰۲۸	۲/۴۴۸	۷۹/۰۶۴	۱/۸۲۲	۴/۳۳۷	۷۹/۰۶۴
۱۰	.۹۵۳	۲/۲۷۰	۸۱/۳۳۴						
۱۱	.۹۲۲	۲/۱۹۶	۸۳/۵۳۰						
۱۲	.۷۳۹	۱/۷۵۹	۸۵/۲۸۹						
۱۳	.۶۹۴	۱/۶۵۲	۸۶/۹۴۰						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

جدول ۳. ماتریس چرخش یافته آنالیز فاکتوری بر اساس مقادیر نرمال شده داده‌های خام در منطقه مطالعاتی

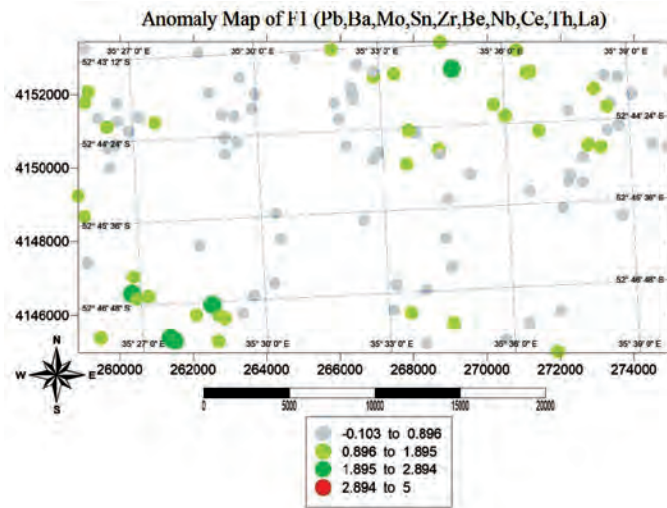
	Component								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
lnAu	.042	-.167	.305	.469	.153	-.033	-.369	.141	-.206
lnCr	-.126	.430	.829	-.030	-.043	.111	-.122	-.095	.018
Mn	.234	.461	.110	.036	.099	-.002	-.104	-.001	.416
lnNi	-.079	.317	.868	-.012	-.015	.103	-.186	.013	-.007
lnPb	.585	-.253	-.149	.156	.311	-.290	.106	-.204	.219
Sr	.234	.153	.600	-.548	-.125	-.189	-.048	.053	.029
lnBa	.595	-.055	.150	-.075	.248	.050	.281	-.372	.117
Be	.774	.159	-.040	.259	-.107	-.028	.314	.167	.020
lnTi	.256	.849	-.042	-.192	-.068	-.168	-.132	.035	.071
Fe	-.071	.901	.140	-.190	-.117	-.023	.019	.128	.094
Al	-.033	.050	.007	.005	-.212	.103	.100	.862	.032
La	.958	-.038	-.042	.050	.017	-.083	.080	.082	.039
Sc	-.459	.630	.351	.111	-.077	.099	-.174	.211	-.003
Ca	-.153	.036	.431	-.574	.185	.041	-.363	-.241	.184
lnLi	.400	-.059	.048	.156	.570	.306	-.084	-.259	-.335
lnP	.416	.240	.087	-.481	-.169	-.300	.093	.421	.084
V	-.117	.872	.207	-.189	-.096	-.008	-.068	-.080	.126
Mg	-.358	.329	.754	.009	-.179	.133	-.042	.067	-.076
K	.261	-.094	-.128	.162	.119	-.014	.808	.017	.036
Na	.352	.183	.280	-.333	-.221	-.439	.273	.170	.173
lnS	-.245	-.082	-.093	-.136	.674	-.177	.103	-.046	-.038
Zr	.725	.103	-.141	.105	-.168	-.256	-.145	.186	.288
lnHg	.099	.062	.029	.148	-.016	.446	.012	.417	-.054
lnAg	.371	-.025	-.108	.037	.008	-.753	.059	.068	-.136
lnAs	.123	-.061	.104	.205	.800	.143	.108	-.071	-.042
lnBi	.154	-.016	-.173	.670	.223	-.090	.139	-.140	.107
Co	-.255	.715	.522	-.100	.007	.047	-.040	.077	-.047
Cu	.094	.636	.432	-.169	.021	.093	-.037	.044	-.160
lnMo	.612	.037	-.301	-.059	.422	-.214	.174	-.058	.101
lnSb	.164	-.105	-.135	.254	.678	.302	.031	-.027	.166
lnZn	.359	.771	.076	.129	.014	-.104	.045	-.034	.169
lnSn	.561	.057	-.587	.427	.138	-.185	.020	-.085	.153
W	.435	-.240	.121	.675	-.046	.210	.148	-.083	.114
lnCs	-.186	-.103	.210	.003	.139	.811	.205	.187	-.120
lnNb	.857	.177	-.125	.059	.108	-.182	-.069	-.125	-.073
U	.444	-.230	-.082	.511	.052	.154	.217	-.374	.360
lnCd	.197	.054	-.229	.123	.603	-.110	-.137	-.211	.369
Rb	.101	-.160	-.194	.242	.088	.113	.857	.104	-.094
Th	.564	-.310	.003	.475	.005	.403	.244	-.063	.225
Y	.338	.072	-.493	.210	.073	-.014	.101	.047	.613
Ce	.918	-.041	-.184	.109	.096	.023	.102	.035	.096
Tl	.072	-.125	-.067	.784	.113	.014	.125	.210	.069

Extraction Method: Principal Component Analysis.

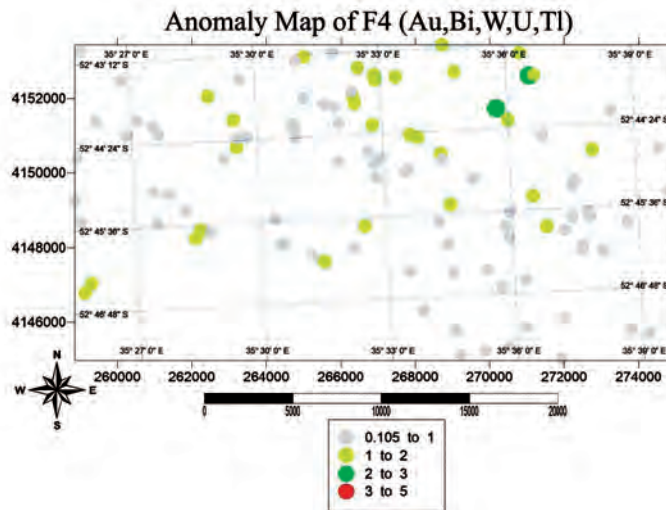
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 11 iterations.

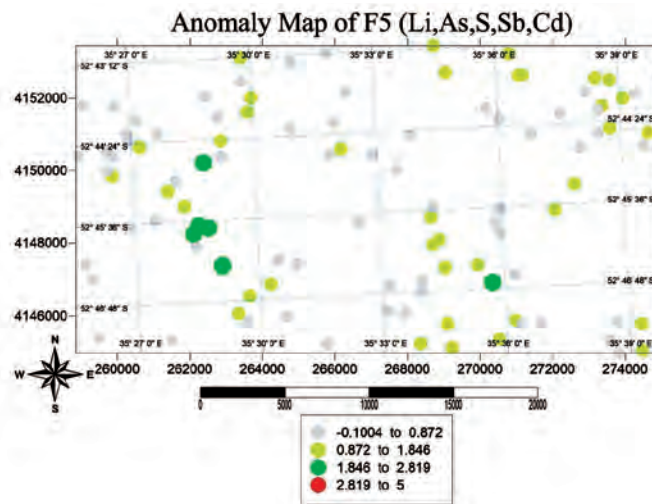




شکل ۵. نقشه امتیازات فاکتوری مرحله اول برای فاکتور اول



شکل ۶. نقشه امتیازات فاکتوری مرحله اول برای فاکتور چهارم



شکل ۷. نقشه امتیازات فاکتوری مرحله اول برای فاکتور پنجم

### تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله دوم

در مرحله اول، آنالیز فاکتوری بر روی تمامی عناصر انجام شد. عناصر Ca، Na، P، Hg، Mn و Ag با توجه به حد آستانه بار فاکتوری در نظر گرفته شده، در هیچ فاکتوری مشارکت نداشتند. بنابراین از مجموع داده‌ها حذف شده، آنالیز فاکتوری دوباره روی داده‌ها اعمال شد (مرحله دوم). جدول ۴ نشانگر داشتن اعتبار خوب برای فاکتورگیری بعد از حذف این عناصر است.

جدول ۴. آزمون بارتلت و شاخص KMO در مرحله دوم آنالیز فاکتوری

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Measure of Sampling Adequacy.		۰/۸۱۹
Approx. Chi-Square		۹۴۶۷/۳۶۴
Bartlett's Test of Sphericity	df	۶۶۶
	Sig.	.

در این مرحله از تحلیل فاکتوری دوباره عناصری که در هیچ یک از مولفه‌ها حضور نداشتند و فاکتورهایی که در ارتباط با کانی‌سازی نبودند و به‌عنوان آلودگی در منطقه حضور داشتند که سبب ایجاد آنومالی دروغین و پوشیده ماندن کانی‌سازی اصلی در منطقه می‌شد، حذف شدند تا بتوان به ایده‌آل‌ترین نتیجه ممکن با توجه به اعتبارسنجی‌ها در این پژوهش دست یافت.

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، هدف استفاده از تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، بهبود بخشیدن به آنومالی‌های واقعی موجود در منطقه است و از آنجایی که مقدار تمرکز عناصر غیرمرتبط با کانی‌سازی در منطقه یا عناصر سنگ‌ساز تاثیر منفی بر امتیازات فاکتوری عناصر دارند پس باید تعداد فاکتورها را کاهش داد تا شدت آنومالی افزایش یابد. افزایش شدت آنومالی بدین معناست که تعداد نمونه‌های آنومال موجود در منطقه نسبت به تعداد کل نمونه‌های ناهنجار در

منطقه مورد بررسی افزایش می‌یابد (Carranza, 2008). بنابراین در این مرحله از تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، عناصر موجود در فاکتورهایی که بیشتر به‌خاطر حضور واحدهای سنگی در منطقه بودند و همچنین عناصری که ارتباط مثبتی با هیچ‌یک از فاکتورها نداشتند حذف شدند و بار دیگر تجزیه و تحلیل فاکتوری بر روی داده‌ها اعمال شد (مرحله سوم).

### تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله سوم

نتایج آنالیز فاکتوری در مرحله سوم و ماتریس چرخش یافته آنالیز فاکتوری بر اساس مقادیر نرمال شده داده‌های خام در منطقه مطالعاتی در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است که با توجه به این جدول‌ها تعداد فاکتورها از نه به پنج در مرحله سوم کاهش یافت.

جدول ۵. نتایج آنالیز فاکتوری در مرحله سوم

Comp.	Initial Eigenvalues			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
۱	۸/۹۸۶	۳۰/۹۸۷	۳۰/۹۸۷	۶/۴۱۸	۲۲/۱۳۱	۲۲/۱۳۱
۲	۵/۵۲۹	۱۹/۰۶۵	۵۰/۰۵۳	۴/۶۶۲	۱۶/۰۷۵	۳۸/۲۰۶
۳	۲/۸۵۹	۹/۸۵۹	۵۹/۹۱۱	۴/۴۰۰	۱۵/۱۷۳	۵۳/۳۷۹
۴	۲/۱۷۲	۷/۴۹۱	۶۷/۴۰۲	۳/۱۸۶	۱۰/۹۸۵	۶۴/۳۶۴
۵	۱/۹۶۹	۶/۷۸۸	۷۴/۱۹۰	۲/۸۴۹	۹/۸۲۶	۷۴/۱۹۰
۶	۹۱۸.	۳/۱۶۷	۷۷/۳۵۷			
۷	۸۸۶.	۳/۰۵۵	۸۰/۴۱۲			

Extraction Method: Principal Component Analysis.

جدول ۶. ماتریس چرخش یافته آنالیز فاکتوری در مرحله سوم

	Component				
	1	2	3	4	5
LnAu	-.018	-.187	.323	.093	.541
lnCr	-.135	.370	.858	-.014	-.028
lnNi	-.099	.255	.903	-.015	-.019
lnPb	.634	-.191	-.268	.367	.092
Sr	.258	.158	.544	-.173	-.522
lnBa	.620	-.109	.136	.385	-.125
Be	.795	.138	-.032	-.102	.308
lnTi	.281	.862	.027	-.080	-.190
Fe	-.052	.904	.195	-.137	-.170
La	.961	-.051	-.026	.029	.078
Sc	-.470	.610	.426	-.138	.119
lnLi	.297	-.172	.193	.656	.173
V	-.092	.872	.260	-.074	-.194
Mg	-.372	.264	.787	-.196	.021
lnS	-.233	-.037	-.179	.621	-.231
Zr	.759	.181	-.167	-.211	.095
lnAs	.070	-.090	.113	.813	.234
lnBi	.169	.022	-.239	.269	.671
Co	-.263	.661	.590	-.009	-.124
Cu	.070	.546	.552	.024	-.191
lnMo	.643	.063	-.339	.439	-.097
lnSb	.100	-.102	-.101	.697	.345
lnZn	.388	.780	.101	.054	.147
lnSn	.587	.118	-.603	.168	.405
W	.423	-.263	.096	.042	.697
lnNb	.856	.155	-.076	.148	.030
lnCd	.204	.135	-.287	.643	.091
Ce	.911	-.054	-.148	.131	.134
Tl	.074	-.098	-.110	.065	.830

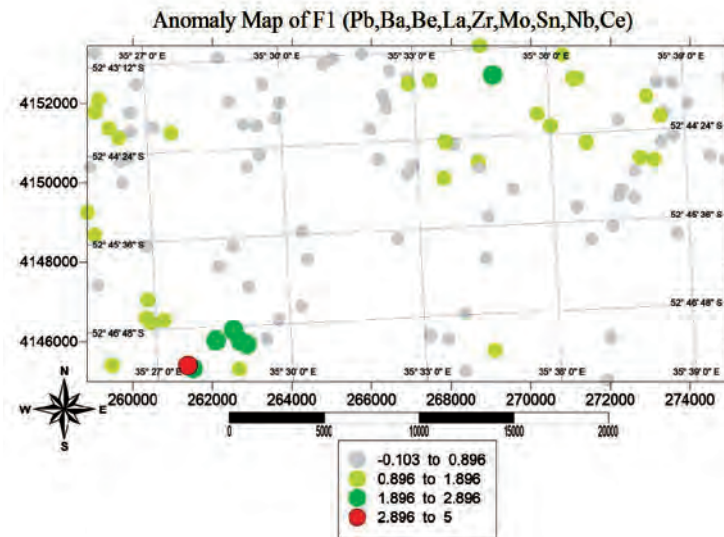
Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

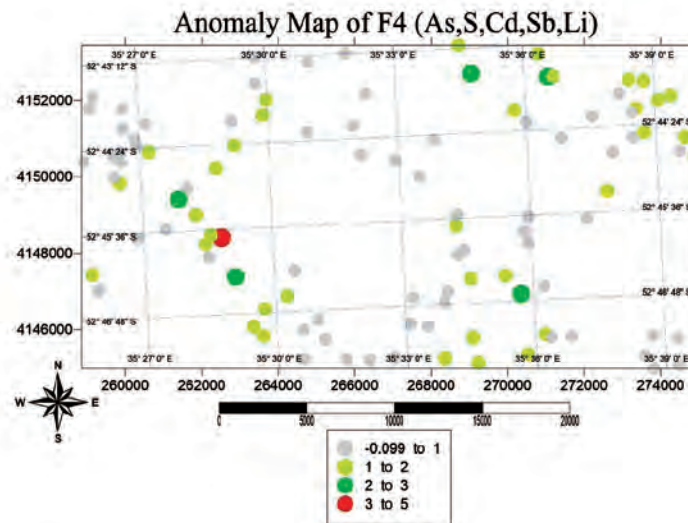
a. Rotation converged in 9 iterations.

فاکتوری مرحله سوم در شکل های ۸ و ۹ آورده شده اند. همان طور که ملاحظه می شود شدت ناهنجاری ها و تعداد آنومالی های ممکن و احتمالی در مقایسه با مرحله اول تجزیه و تحلیل فاکتوری افزایش یافته است.

هر یک از فاکتورهای شاخص بدست آمده در تحلیل فاکتوری سوم می تواند ارتباط زایشی با کانی سازی موجود در منطقه داشته باشد که با توجه به نتایج حاصل می توان فاکتورهای اول و چهارم را به عنوان فاکتور شاخص در اکتشاف معرفی کرد. نقشه های بدست آمده از امتیازات



شکل ۸. نقشه امتیازات فاکتوری مرحله سوم برای فاکتور اول



شکل ۹. نقشه امتیازات فاکتوری مرحله سوم برای فاکتور چهارم

## نتیجه‌گیری

تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، آنومالی‌های کاذب و فاکتورهای غیرمرتبط با کانی‌سازی موجود در منطقه حذف شدند که باعث برونزد هر چه بهتر شاخص‌های کانی‌سازی اصلی در مرحله سوم شده است. از این‌رو طبق تحلیل فاکتوری مرحله نهایی (سوم)، آنومالی احتمالی کانی‌زایی عناصر فلزی Pb، Sn، Ba، Mo از فاکتور اول، عناصر As، Cd و Sb از فاکتور چهارم را می‌توان به‌عنوان فاکتور شاخص در اکتشاف معرفی کرد (جدول ۷).

انتخاب بهترین فاکتور معرف کانی‌سازی، یک مسئله بحث‌برانگیز است که موجب ابداع روش‌های مختلفی در زمینه اکتشافات ژئوشیمیایی شده است. با توجه به نتایج حاصل از روش آنالیز فاکتوری SFA، سه فاکتور مهم برای گستره دگرسانی خوشنام مشخص شدند که با اعمال این روش می‌توان به ایده‌آل‌ترین نتیجه ممکن، با توجه به اعتبارسنجی‌ها در این پژوهش دست یافت. با توجه به نتایج بدست آمده در مرحله اول و دوم از

جدول ۷. مقایسه نتایج روش تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله‌ای (SFA)

	مرحله اول	
	آنومالی احتمالی	آنومالی ممکن
Ba,Be,Nb,Sn,Ce,Pb,Mo,Th, La,Zr	۰	۵
Au,Tl,Bi,W,U	۰	۲
As,Li,S, Sb,Cd	۰	۶
تعداد کل فاکتورها در مرحله اول	۹	

↓

	مرحله سوم	
	آنومالی احتمالی	آنومالی ممکن
Ba,Be,Nb,Sn,Ce,Pb,Mo, La	۱	۶
Au,Tl,Bi,W	۰	۴
As,Li,S, Sb,Cd	۱	۵
تعداد کل فاکتورها در مرحله سوم	۵	

centrations of trace elements in stream sediments by factor and cluster analysis and the sequential extraction procedure, *Science of the Total Environment*, 177, 1, 237-250.

- Carranza, E.J., 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS, *handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, 11. Elsevier, Amsterdam, 122.

- Reimann C., Filzmoser P. and Garrett R.G., 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination, *Science of the Total Environment*, 346, 1-16.

- Tabachnick, B.G. and Fidell, L.S., 2001. *Using Multivariate Statistics*, Allyn and Bacon, 392.

- Tripathi, V.S., 1979. Factor analysis in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 11, 263-275.

- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and 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.

به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از تحلیل فاکتوری مرحله‌ای باعث یافتن حداقل تعداد متغیر و گروه عناصری با بیشترین تغییرات، بهبود بخشیدن به شناسایی نشانه‌های ژئوشیمیایی ناهنجار، افزایش شدت آنومالی، بهبود میزان پیش‌بینی نقشه‌های پتانسیل مواد معدنی و در نهایت باعث افزایش موفقیت در مبحث ژئوشیمی اکتشافی می‌شود.

## منابع

- آقانی، س. ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶.
- حسینی پاک، ع.، ۱۳۸۷. اصول اکتشافات ژئوشیمیایی. چاپ ششم، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۰۱.
- زرناب اکتشاف، ۱۳۸۵. گزارش اکتشاف عناصر پلی‌متال (طلا و سایر عناصر) در محدوده روستای خوش‌نامه هشتجین. ۱۲۵.
- قربانی، م.، ۱۳۸۷. زمین‌شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه‌های معدنی ایران. انتشارات آراین زمین، ۶۳۹.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۹.
- Alfassi, Z.B., Boger, Z. and Statistical, Y., 2005. *Treatment of analytical data: outliers (Chapter 6)*. CRC Press, 512.
- Borovec, Z., 1996. Evaluation of the con-