



## مقاله پژوهشی

### تفکیک آنومالی های ژئوشیمیایی مرتبط با کانی سازی گرمابی مس با استفاده از تحلیل فاکتوری مرحله ای در برگه زمین شناسی فیض آباد

مبین صارمی<sup>۱</sup>، مهیار یوسفی<sup>۱\*</sup>، سعید یوسفی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، پردیس مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت: فروردین ۱۴۰۲، پذیرش: آبان ۱۴۰۲)

## چکیده

ژئوشیمی رسوب آبراهه ای یکی از روش های پرکاربرد برای اکتشاف کانی سازی در مقیاس وسیع است. پردازش دقیق داده های رسوبات آبراهه ای بسیار حائز اهمیت است زیرا اگر به طور دقیق پردازش نشود می تواند باعث از دست رفتن برخی از مناطق امیدبخش شود. در این پژوهش به منظور تفکیک دقیق تر آنومالی های ژئوشیمیایی مرتبط با تیپ های کانی سازی مس با منشأ گرمابی (مس - طلای پورفیری، رگه ای و IOCG) در بخش شمالی برگه یکصد هزار فیض آباد از روش تحلیل فاکتوری مرحله ای استفاده شد. در این روش علاوه بر حذف عناصر بی اثر در پردازش های چند متغیره، عناصر غیر مرتبط با منشأ گرمابی و همچنین عناصری که حداقل مشارکت گروهی را با سایر عناصر نشان می دهند نیز کنار گذاشته می شود تا فاکتورهای بدون نوفه و اصطلاحاً فاکتورهای تمیز به دست آید. نتایج به دست آمده نشان داد که فاکتورهای ۱ و ۲ در مرحله چهارم از تحلیل فاکتوری مرحله ای می توانند فاکتورهای مناسبی برای اکتشاف ذخایر مس در این منطقه باشند. جهت اعتبارسنجی مدل های ژئوشیمیایی، با استفاده از نمودار نرخ پیش بینی-مساحت، نتایج به دست آمده از روش تحلیل فاکتوری مرحله ای و روش تحلیل فاکتوری معمولی مقایسه شد. مقایسه فوق نشان داد که فاکتور دوم روش تحلیل فاکتوری مرحله ای در ۲۲ درصد از مساحت منطقه، ۷۸ درصد از کل اندیس های مس گرمابی را آشکارسازی می کند در حالی که فاکتور دوم روش معمولی، در ۲۵ درصد مساحت منطقه، ۷۵ درصد از اندیس های معدنی شناخته شده را در بر می گیرد؛ بنابراین در روش تحلیل فاکتوری مرحله ای، آنومالی هایی با مساحت کمتر، دقیق تر و قابل اعتمادتر آشکارسازی شده است.

## کلمات کلیدی

تحلیل فاکتوری مرحله ای، کانی سازی مس با منشأ گرمابی، رسوبات آبراهه ای، ژئوشیمی، فیض آباد

\*عهده دار مکاتبات: [m.yousefi.eng@gmail.com](mailto:m.yousefi.eng@gmail.com)

DOI: 10.22034/ANM.2023.19986.1593

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های مؤثر برای شناسایی ذخایر معدنی و مناطق امیدبخش در مراحل اولیه اکتشاف، بررسی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای است. پردازش داده‌های حاصل از این روش به خاطر ماهیت پیچیده، همواره با دشواری‌هایی مواجه است. به‌منظور پردازش داده‌های ژئوشیمیایی از روش‌های مختلفی همچون فرکتال [۷-۱]، روش‌های هوشمند [۸] و روش‌های آماری [۹، ۱۰] استفاده می‌شود. روش‌های آماری شامل روش‌های تک و چند متغیره می‌باشند. روش‌های پردازش چند متغیره با توجه به شدت بخشی هاله‌های ژئوشیمیایی چند عنصری، نتایج بهتری را نسبت به روش‌های تک متغیره ارائه می‌دهند. یکی از روش‌های پرکاربرد آماری چند متغیره، تحلیل فاکتوری است که پژوهشگران بسیاری از آن در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی استفاده کرده‌اند [۱۷-۱۱]. سان و همکاران (۲۰۱۱) از روش آنالیز چند متغیره فاکتوری برای شناسایی الگوی ژئوشیمیایی در منطقه شدولانگ در کشور چین استفاده کردند [۱۸]. همچنین ایوبی و همکاران (۲۰۱۳)، از روش آماری چند متغیره فاکتوری بر روی داده‌های ژئوشیمیایی آبراهه‌ای منطقه مسگران بیرجند برای شناسایی ناهنجاری‌های عناصر مختلف استفاده کردند [۱۹]. نتایج پژوهش‌های متعدد نشان داده است که این روش می‌تواند همراهی پنهان بین عناصر را با کاهش ابعاد داده‌ها به تعدادی فاکتور، با کیفیت مناسب‌تری آشکار کند [۲۰]. [۲۱]. باوجود استفاده زیاد از روش تحلیل فاکتوری، این روش با محدودیت‌ها و دشواری‌هایی همراه است و پرسش‌هایی در مورد آن مطرح می‌شود که باید به آن‌ها پاسخ داده شود. یکی از مهم‌ترین پرسش‌های مطرح‌شده این است که چند عامل معرف می‌بایست استخراج شود؟ هم‌چنین در هر فاکتور کدام عناصر باید وجود داشته باشند؟ و اینکه چگونه می‌توان با استفاده از تحلیل فاکتوری موفقیت اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای را افزایش داد؟ به‌منظور پاسخ به برخی از سؤالات بالا و بهبود تحلیل فاکتوری، یوسفی و همکاران تحلیل فاکتوری مرحله‌ای را پیشنهاد دادند که می‌تواند تعداد فاکتورها را کم کند و چگالی آنومالی را افزایش دهد [۲۲]. در این پژوهش به‌منظور تفکیک آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرتبط با کانی‌سازی تیپ مس پورفیری و شناسایی مناطق امیدبخش از روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای استفاده‌شده

است. داده‌های مورد استفاده، داده‌های رسوبات آبراهه‌ای است که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی برداشت شده است.

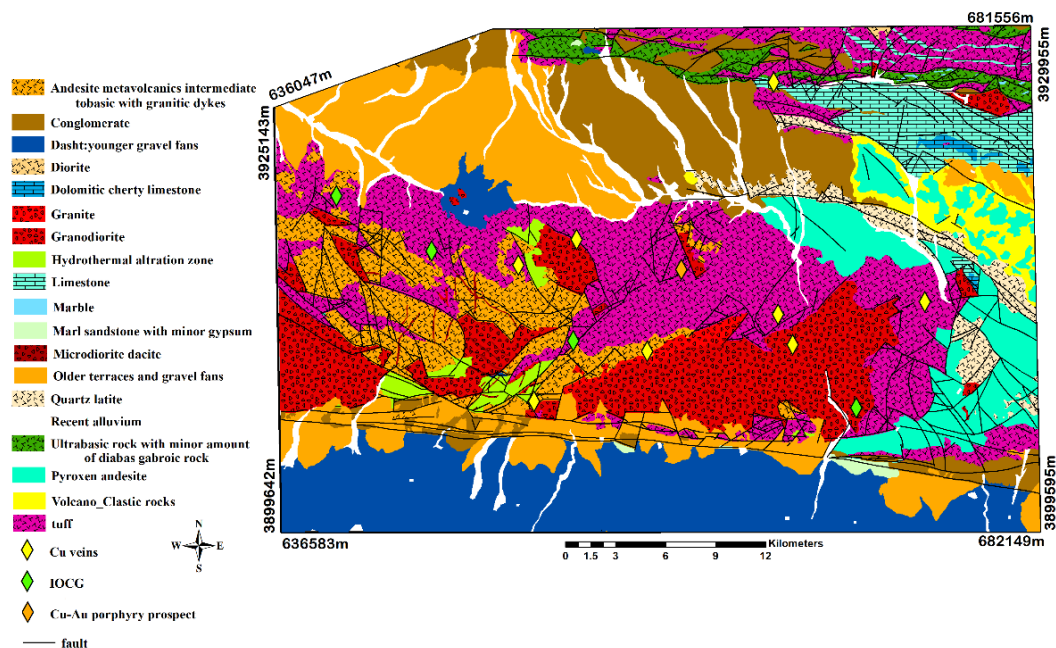
## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، بخش شمالی از برکه یک‌صد هزار زمین‌شناسی فیض‌آباد واقع در خراسان رضوی است. منطقه فیض‌آباد در ۱۸۵ کیلومتری جنوب مشهد واقع شده است که نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ آن بین طول جغرافیایی  $59^{\circ}$  تا  $30^{\circ}$  شرقی و عرض  $35^{\circ}$  تا  $30^{\circ}$  شمالی استقرار دارد. این ناحیه، بخشی از ورقه ۱:۲۵۰۰۰۰ تربت‌حیدریه را تشکیل می‌دهد. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این منطقه حرکت گسل‌ها نقش مهمی را در تغییرات رخساره سنگ‌ها ایفا نموده است. یکی از گسل‌های اصلی در این منطقه گسل درونه است که از مرکز ناحیه عبور می‌کند. بخش شمالی این گسل، عمدتاً از سنگ‌های ولکانیکی و آذرآواری ترشیری تشکیل شده است. در شمال ناحیه علاوه بر واحدهای نفوذی، واحدهای رسوبی نیز وجود دارند. انواع سنگ‌های پیروکلاستیکی، به‌ویژه توف‌های شیشه‌ای، توف جوش‌خورده و بلورین، توف سنگی، لاپیلی توف و گدازه‌ها نیز یافت می‌شوند. توف‌ها غالباً ترکیب ریولیتی تا ریوداسیتی داشته و گدازه‌ها ترکیب آندزیتی دارند. توده‌های نفوذی (با سن الیگومیوسن) به‌طور عمده در بخش شمالی منطقه رخنمون دارند. در این منطقه در مجاورت توده‌های نفوذی، کانی‌سازی‌هایی از مس، آهن و طلا مشاهده شده است. علاوه بر کانی‌سازی‌های ذکرشده، زون‌های دگرسانی در اثر نفوذ توده‌های گرانودیوریت و گرانیته مشاهده می‌شوند. در تشکیل این زون‌ها، گسل‌ها و درزه‌ها که جریان‌های مواد سیال را هدایت نموده‌اند نقش عمده‌ای را داشته‌اند [۲۳]. در برکه یک‌صد هزار فیض‌آباد، تعداد ۱۰۳۳ نمونه رسوب آبراهه‌ای توسط شرکت چینی جیانگ چنگ<sup>۱</sup> و با همکاری سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برداشته شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی مقدماتی و کدگذاری، با روش آنالیز ICP-OES برای ۲۸ عنصر و آماده‌سازی طلا به روش Fire-Assay در آزمایشگاه شرکت چینی جیانگ چنگ آنالیز شد. در این پژوهش به‌منظور انجام مطالعات ژئوشیمیایی از ۶۵۷ نمونه

تقسیم‌شده و در هر سلول تعدادی جز نمونه از آبراهه‌های موجود با سرشاخه‌های متفاوت برداشت‌شده و در قالب یک نمونه به مرکز سلول نسبت داده شده است. همچنین تمامی پیش‌پردازش داده‌ها قبل از بررسی آماری، انجام شده است.

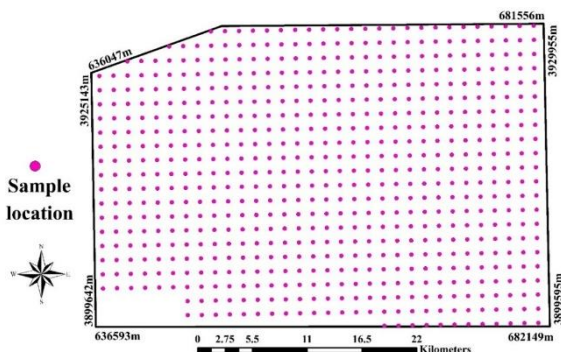
موجود در شمال فیض‌آباد استفاده شده است. نقشه موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده از محدوده مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. در محدوده حاضر نمونه‌برداری رسوب متفاوت از روش مرسوم بوده است و منطقه به سلول‌هایی



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه [۲۴].

شده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که اکثر عناصر دارای مقادیر چولگی مثبت مناسبی هستند که از دیدگاه اکتشافی امر مهمی تلقی می‌شود.

همچنین جهت بررسی هرچه بهتر تابع توزیع و بررسی جوامع ژئوشیمیایی، هیستوگرام‌های عناصر مهم‌تر و نزدیک‌تر به کانه‌زایی مورد جستجو در منطقه مورد مطالعه شامل طلا و مس رسم شده است. نمودارهای هیستوگرام فراوانی عناصر برای بررسی توزیع کلی، چولگی، کشیدگی و فراوانی داده‌ها در مقادیر مختلف به کار می‌رود. شکل ۳-الف نمودارهای هیستوگرام فراوانی داده‌های خام مربوط به عناصر طلا و مس را نمایش می‌دهد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که این عناصر از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند و از آنجایی که اکثر روش‌های آماری فرض نرمال بودن داده‌ها را به همراه دارند، می‌بایست توزیع داده‌ها به نرمال نزدیک شود. جهت نرمال‌سازی داده‌ها در این پژوهش از روش لگاریتمی در پایه عدد نپر (Ln) استفاده شده است. شکل ۳-ب توزیع عناصر مس و طلا را بعد از نرمال‌سازی نشان می‌دهد.



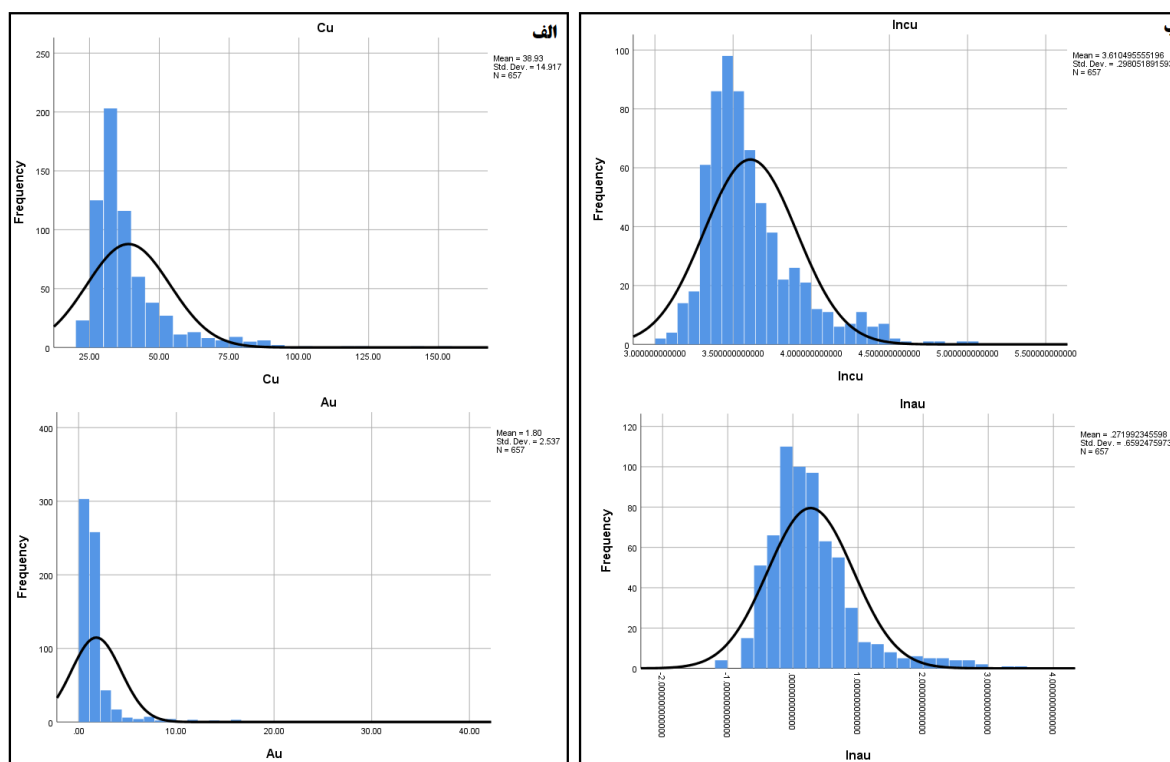
شکل ۲: موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه.

## ۲-۲- بررسی‌های آماری تک متغیره

به منظور شناسایی بهتر و دقیق‌تر آنومالی‌های ژئوشیمیایی و همچنین با توجه به رفتار هر عنصر لازم است ابتدا داده‌ها از نظر تک متغیره شامل بررسی توزیع و ویژگی‌های آماری مورد بررسی قرار گیرند. از مجموع عناصر آنالیز شده در این منطقه، ۱۳ عنصر شامل Au, Cu, Ag, Pb, Zn, Sn, Sb, Mo, As, Cr, Ni, Co و B انتخاب و مورد پردازش قرار گرفتند. در مطالعه حاضر ابتدا پارامترهای آماری مهم برای این عناصر محاسبه و در جدول ۱ آورده

جدول ۱: پارامترهای آماری داده‌های خام

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance	Skewness	Kurtosis
Ag	۶۵۷	۰٫۳۴	۰٫۶۶۰	۰٫۷۶۵۶	۰٫۳۶۹۳۶	۰٫۰۰۱	۸٫۲۷۳	۱۱۰٫۵۵۰
As	۶۵۷	۲٫۵	۵۲٫۶	۹٫۴۷۱	۴٫۳۵۴۶	۱۸٫۹۶۲	۳٫۶۷۵	۲۴٫۳۳۱
Au	۶۵۷	۰٫۳۴	۳۱٫۹۸	۱٫۸۰۳۹	۲٫۵۳۷۲۷	۶٫۴۳۸	۶٫۱۶۷	۵۰٫۷۷۵
B	۶۵۷	۱۰٫۹۷۹	۱۳۵٫۷۰۲	۴۲٫۱۲۵۶۲	۱۸٫۰۱۷۳۴۳	۳۲۴٫۶۲۵	۱٫۸۶۶	۵٫۴۸۸
Co	۶۵۷	۱۱٫۶۱	۵۹٫۰۱	۱۹٫۸۶۸۹	۶٫۰۱۵۹۲	۳۶٫۱۹۱	۱٫۹۲۶	۵٫۵۶۷
Cr	۶۵۷	۷۱٫۲	۵۴۴۸٫۲	۴۵۳٫۷۳۸	۵۵۷٫۲۸۴۲	۳۱۰۵۶۵۶۸۳	۲٫۹۴۵	۱۳٫۳۵۸
Cu	۶۵۷	۲۰٫۶۴	۱۵۳٫۹۴	۳۸٫۹۲۹۳	۱۴٫۹۱۷۳۹	۲۲۲٫۵۲۸	۲٫۹۱۰	۱۲٫۷۵۷
Mo	۶۵۷	۰٫۲۰	۳٫۸۰	۰٫۹۹۰۰	۰٫۵۶۶۰۱	۰٫۳۲۰	۱٫۲۲۲	۲٫۴۸۸
Ni	۶۵۷	۲۶٫۲۹	۹۳۲٫۸۳	۱۱۵٫۵۵۱۶	۱۰۹٫۷۰۶۹۲	۱۲۰۳۵۶۰۸	۲٫۹۶۴	۱۲٫۳۴۰
Pb	۶۵۷	۳٫۶	۲۵۶٫۶	۲۸٫۸۴۳	۲۲٫۶۶۹۵	۵۱۳٫۹۰۶	۳٫۴۷۲	۲۱٫۴۱۲
Sb	۶۵۷	۰٫۱۴	۴٫۲۰	۰٫۷۱۰۲	۰٫۴۳۲۰۷	۰٫۱۸۷	۲٫۱۱۲	۹٫۲۵۸
Sn	۶۵۷	۰٫۸۸۶	۴٫۲۳۳	۱٫۷۷۵۱۹	۰٫۴۵۶۰۷۹	۰٫۲۰۸	۱٫۰۲۷	۳٫۶۲۸
Zn	۶۵۷	۴۰٫۲۲	۳۱۱٫۹۹	۸۸٫۰۹۷۹	۳۷٫۱۸۴۵۹	۱۳۸۲٫۶۹۴	۱٫۷۰۰	۳٫۸۴۵



شکل ۳: هیستوگرام عناصر مس و طلا (الف) قبل از نرمال‌سازی (ب) بعد از نرمال‌سازی.

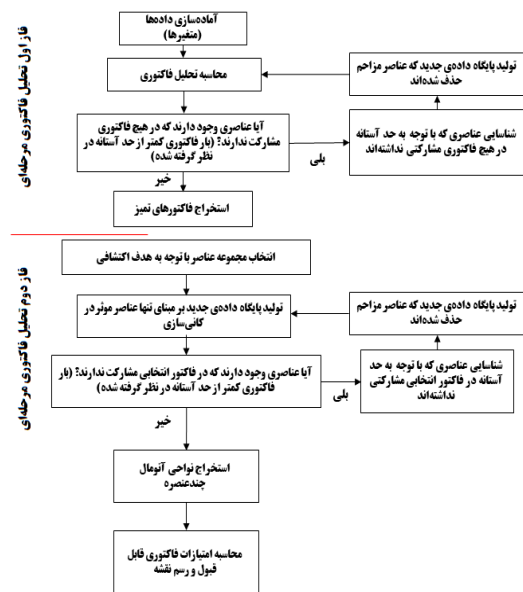
مجموعه داده‌ها حذف می‌شود. این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیگر هیچ عنصری وجود نداشته باشد که مشارکت پایینی در فاکتورها داشته باشد. با توجه به این‌که در این فاکتورها اثر نویزهای ژئوشیمیایی کم شده است به فاکتورهای خروجی این مرحله، فاکتورهای تمیز می‌گویند.

### ۳-۲- تحلیل فاکتوری مرحله‌ای

تحلیل فاکتوری مرحله‌ای شامل دو بخش اساسی است. در بخش اول پس از اجرای یک مرحله تحلیل فاکتوری، اگر در خروجی آن عناصری موجود باشد که در هیچ فاکتوری با توجه به حد آستانه، مشارکت بالا نداشته باشد، آن عناصر از

مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد دلالت بر تأیید این روش دارد. مقادیر شاخص بالاتر از ۰/۷ مناسب است. اگرچه بین ۰/۵ تا ۰/۷ نیز با احتیاط قابل قبول است. مقدار این ثابت برای داده‌های منطقه فیض‌آباد برابر ۰/۸۵۵ به دست آمد که نشان‌دهنده کفایت نمونه‌ها جهت بررسی تحلیل فاکتوری است. پس از انجام عملیات ذکر شده، تحلیل فاکتوری مرحله‌ای بر روی داده‌ها اجرا شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. طبق جدول ۲، در مرحله اول عناصر Co، Ni و Co در هیچ فاکتوری مشارکت مثبت بالایی ندارند بنابراین از مجموعه داده‌ها حذف و بر روی عناصر باقی‌مانده، مجدداً تحلیل فاکتوری انجام شد. در مرحله دوم نیز با توجه به تیپ غالب موجود در منطقه که کانی‌سازی تیپ پورفیری است، عنصر B به‌عنوان معرف کانی‌سازی اسکارن [۲۶]، حذف و تحلیل فاکتوری تکرار شد. هدف تحلیل‌های چند متغیره شناخت تغییرات گروهی و همراهی عناصر است اما نتیجه تحلیل فاکتوری نشان می‌دهد که عنصر بور با سایر عناصر در قالب یک فاکتور مشارکت ندارد و به‌طور مجزا قرار گرفته است. در چنین مواردی این عناصر می‌توانند به‌عنوان متغیرهای تک عنصری مورد بررسی قرار گیرند و نه چند عنصری؛ بنابراین عنصر بور در مرحله دوم در فاکتور ۳ به‌صورت مجزا از سایر عناصر قرار گرفته و در فاکتورهای ۱ و ۲ نقشی ندارد بنابراین از مجموعه داده‌ها حذف شد. در مرحله سوم، عنصر Ag نیز با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۵ از عناصر تأثیرگذار در فاکتورها، کنار گذاشته شد. سپس مجدداً به‌منظور استخراج فاکتورهای تمیز بر روی عناصر باقی‌مانده تحلیل فاکتوری انجام گردید که در نهایت در مرحله چهارم ۲ فاکتور اصلی به دست آمد. فاکتورهای ۱ و ۲ تولیدشده در این مرحله به ترتیب به علت حضور عناصر ردیاب و معرف می‌توانند برای پی‌جویی کانی‌سازی مس پورفیری در این منطقه مفید باشند. نتایج تحلیل فاکتوری مرحله‌ای مشخص می‌سازد که همراهی عناصر As، Pb، Zn، Sb، Mo و Sn می‌تواند مرتبط با کانی‌سازی‌های رگه‌ای این عناصر در واحدهای ولکانیکی منطقه باشد و فاکتور ۲ با همراهی عناصر Cu و Au می‌تواند وجود ذخایر پورفیری و احتمالاً IOCG را در واحدهای نفوذی و ولکانیک‌های مجاور آنها توجیه نماید. افزون بر موارد گفته‌شده به‌منظور آشکارسازی بهتر فاکتورهای استنتاج شده، نمودار پراکندگی نسبی عناصر در فضای چرخش یافته در هر چهار مرحله رسم شد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

در نتیجه این فاکتورها از قابلیت اعتماد خوبی برخوردار هستند [۲۵]. در بخش دوم با توجه به تیپ کانی‌سازی موردنظر، فاکتورهایی که ارتباط مستقیمی با تیپ هدف ندارند حذف می‌شوند و مجدداً تحلیل فاکتوری تکرار می‌شود. مشابه بخش قبل اگر عنصری با مشارکت پایین در فاکتورها مشاهده شود از مجموعه داده‌ها حذف می‌شود. شکل ۴ مراحل انجام تحلیل فاکتوری مرحله‌ای را به تفصیل نشان می‌دهد. در این پژوهش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای بر مبنای مؤلفه‌های اصلی و دوران وریمکس و با در نظر گرفتن حداقل بار فاکتوری ۰/۵، انجام گرفته است.



شکل ۴: مراحل انجام تحلیل فاکتوری مرحله‌ای [۲۲].

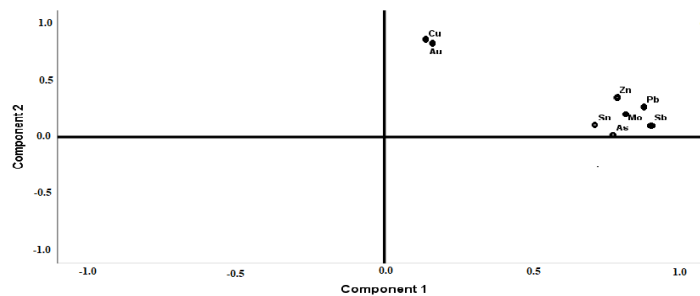
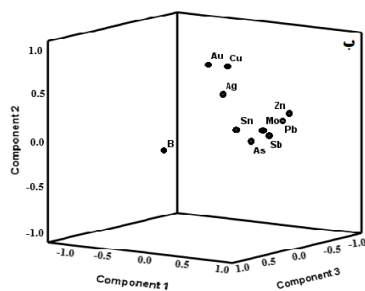
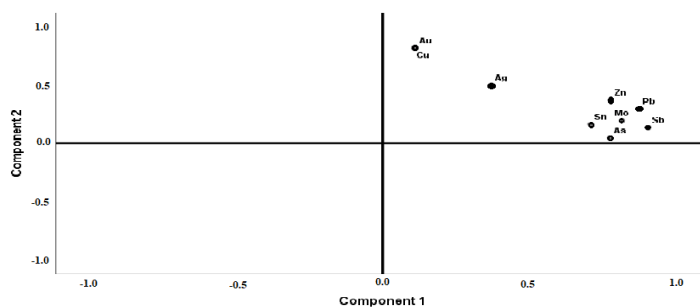
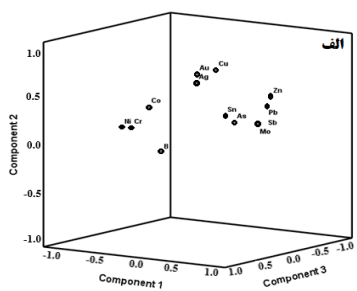
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اجرای تحلیل فاکتوری مرحله‌ای

به‌منظور پیاده‌سازی روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، پس از آماده‌سازی، توزیع داده‌ها با استفاده از تابع لگاریتم طبیعی تا حد قابل قبولی به توزیع نرمال نزدیک شد؛ زیرا این روش مانند بسیاری از روش‌های دیگر به داده‌های غیر نرمال، حساس است. جهت بررسی میزان اعتبار تعداد نمونه‌ها از شاخص  $KMO^2$  استفاده شده است. شاخص  $KMO$  شاخصی از کفایت نمونه‌گیری است که کوچک بودن همبستگی جزئی بین متغیرها را بررسی می‌کند و از این طریق مشخص می‌کند چقدر واریانس متغیرهای پژوهش، تحت تأثیر واریانس مشترک برخی عامل‌های پنهانی و اساسی است. این شاخص در بازه صفر تا یک قرار دارد. هرچه

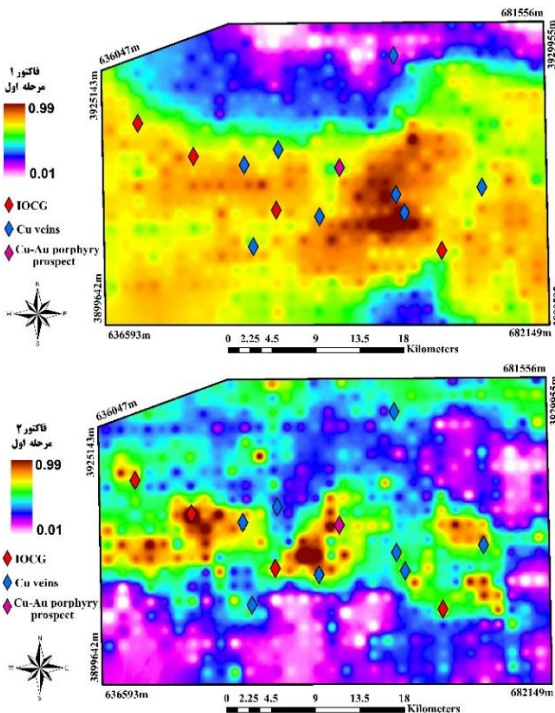
جدول ۲: نتایج تحلیل فاکتوری مرحله‌ای

فاز اول تحلیل فاکتوری مرحله‌ای						فاز دوم تحلیل فاکتوری مرحله‌ای							
مرحله اول			مرحله دوم			مرحله سوم			مرحله چهارم				
element	F1	F2	F3	element	F1	F2	F3	element	F1	F2	element	F1	F2
Zn	۰٫۷۱۳	۰٫۵۰۵	-۰٫۲۶۰	Zn	۰٫۸۴۱	۰٫۳۱۴	-۰٫۲۴۲	Zn	۰٫۷۷۵	۰٫۳۶۵	Zn	۰٫۷۸۸	۰٫۳۴۶
Pb	۰٫۸۰۷	۰٫۴۳۸	-۰٫۰۵۷	Pb	۰٫۹۰۰	۰٫۲۶۲	-۰٫۰۵۱	Pb	۰٫۸۷۰	۰٫۲۹۳	Pb	۰٫۸۸۱	۰٫۲۶۲
Ag	۰٫۱۵۴	۰٫۶۶۶	۰٫۲۳۷	Ag	۰٫۳۲۹	۰٫۵۳۱	۰٫۱۷۵	Ag	۰٫۳۷۰	۰٫۴۹۲	Cu	۰٫۱۳۱	۰٫۸۴۲
Cr	-۰٫۸۹۱	۰٫۰۳۰	-۰٫۱۱۲	Cu	۰٫۱۵۵	۰٫۷۷۵	-۰٫۱۵۵	Cu	۰٫۱۰۸	۰٫۸۰۸	As	۰٫۷۷۵	۰٫۰۱۷
Ni	-۰٫۹۵۷	۰٫۰۳۹	-۰٫۰۳۵	As	۰٫۷۳۵	۰٫۰۵۸	۰٫۲۵۸	As	۰٫۷۷۳	۰٫۰۴۴	Sb	۰٫۹۰۷	۰٫۰۱۰۵
Cu	۰٫۰۷۷	۰٫۷۳۲	-۰٫۲۱۲	Sb	۰٫۸۸۸	۰٫۱۲۸	۰٫۱۸۰	Sb	۰٫۹۰۲	۰٫۱۳۳	Au	۰٫۱۴۵	۰٫۸۰۹
As	۰٫۶۲۴	۰٫۲۸۴	۰٫۲۴۷	Au	۰٫۰۹۷	۰٫۸۲۳	۰٫۰۹۲	Au	۰٫۱۱۱	۰٫۸۰۷	Mo	۰٫۸۱۹	۰٫۱۹۹
Sb	۰٫۸۵۳	۰٫۲۸۴	۰٫۱۵۸	Mo	۰٫۸۰۳	۰٫۱۸۲	۰٫۱۵۹	Mo	۰٫۸۱۳	۰٫۱۹۱	Sn	۰٫۷۱۵	۰٫۱۰۶
Co	-۰٫۸۰۳	۰٫۲۳۵	-۰٫۲۹۰	Sn	۰٫۶۴۰	۰٫۲۰۱	۰٫۳۵۹	Sn	۰٫۷۰۷	۰٫۱۶۱	Var	۵۰٫۵۲۸	۲۰٫۱۷۵
Au	۰٫۰۴۶	۰٫۷۲۸	۰٫۰۷۵	B	۰٫۱۴۹	۰٫۰۰۹	۰٫۹۲۸	Var	۴۵٫۴۶۵	۲۰٫۵۲۲	Cum.Var	۵۰٫۵۲۸	۷۰٫۷۰۳
Mo	۰٫۸۱۷	۰٫۲۶۲	۰٫۱۱۳	Var	۴۰٫۶۲۹	۱۸٫۲۰۴	۱۲٫۳۹۱	Cum.Var	۴۵٫۴۶۵	۶۵٫۹۹۷			
Sn	۰٫۵۶۴	۰٫۳۶۱	۰٫۳۲۵	Cum.Var	۴۰٫۶۲۹	۵۸٫۸۳۲	۷۱٫۲۲۳						
B	۰٫۱۸۴	۰٫۰۲۷	۰٫۹۰۶										
Var.	۴۳٫۷۱۸	۱۸٫۲۶۴	۹٫۹۹۵										
Cum. var.	۴۳٫۷۱۸	۶۱٫۹۸۳	۷۱٫۹۷۷										

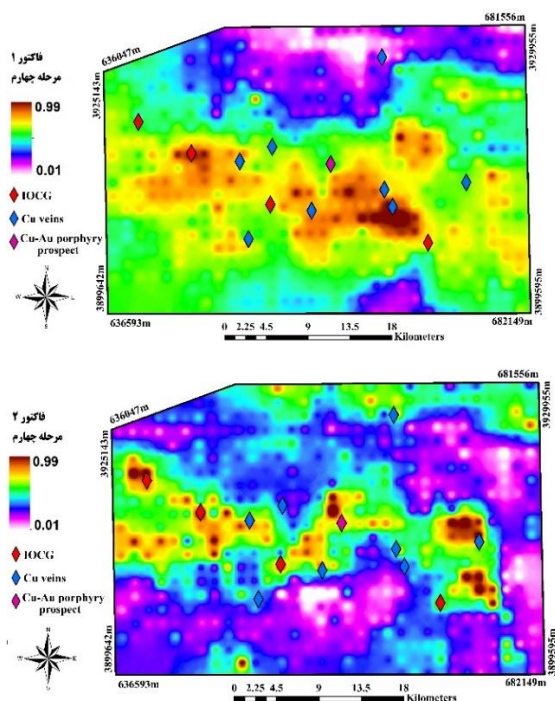


شکل ۵: نمودار پراکندگی عناصر در فضای چرخش یافته در تحلیل فاکتوری (الف) مرحله اول (ب) مرحله دوم (ج) مرحله سوم (د) مرحله چهارم برای کانی‌سازی ذخایر گرمایی مس.

در پیش‌بینی مناطق امیدبخش است. در بخش بعدی مقاله به بررسی کمی تغییرات مناطق آنومالی پرداخته می‌شود.



شکل ۶: نتایج تحلیل فاکتوری معمولی همراه با اندیس‌های مس منطقه الف) فاکتور ۱ مرحله اول ب) فاکتور ۲ مرحله اول.



شکل ۷: نتایج تحلیل فاکتوری مرحله‌ای همراه با اندیس‌های مس منطقه الف) فاکتور ۱ مرحله چهارم ب) فاکتور ۲ مرحله چهارم.

## ۲-۳- نقشه‌های تحلیل فاکتوری معمولی و مرحله‌ای

غالباً داده‌های اکتشافی داده‌هایی پیوسته و نامحدود هستند. به این معنا که مقدار پیش‌بینی‌شده برای هر متغیر می‌تواند هر مقداری داشته باشد. حال چنانچه بخواهیم مقیاس تغییرات نقشه‌ها متناسب و نقشه‌ها با هم قابل مقایسه باشند مناسب است که دامنه تغییرات نقشه‌ها به بازه [۰،۱] افزایش شود. به منظور محدود کردن مقادیر در بازه [۰،۱]، کاکس و اسنل [۲۷] مدلی لجستیکی را بدین منظور ارائه کردند که بعدها این تابع لجستیکی توسط یوسفی و همکاران [۲۸] در طبقه‌بندی و تلفیق لایه‌های اکتشافی استفاده شد. تابع لجستیکی مذکور در رابطه (۱) آمده است.

$$F_E = \frac{1}{1 + e^{-s(E-1)}} \quad (1)$$

که در آن  $F_E$  مقدار عضویت فازی و امتیاز فازی اختصاص‌یافته،  $s$  و  $i$  به ترتیب شیب و نقطه عطف تابع لجستیک و  $E$  مقدار عددی مربوط به شاهد فضایی که در دامنه [۰،۱] تبدیل می‌شود می‌باشند. هم‌چنین مقادیر  $s$  و  $i$  از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند.

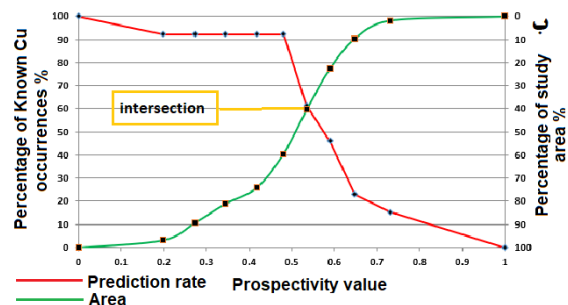
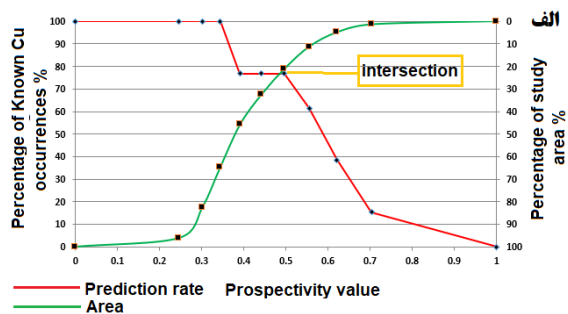
$$s = \frac{9.2}{E_{max} - E_{min}} \quad (2)$$

$$i = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} \quad (3)$$

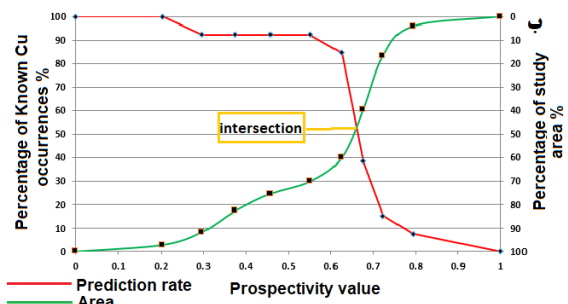
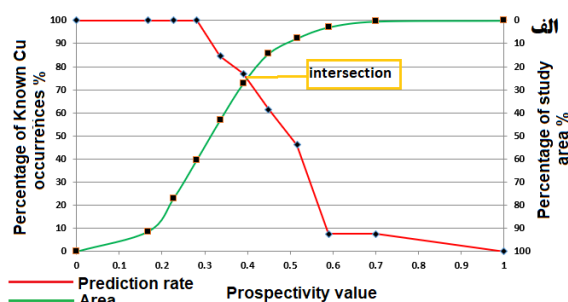
در این پژوهش به منظور مدل‌سازی نتایج آنالیز فاکتوری معمولی و مرحله‌ای، از روش عکس مجذور فاصله استفاده شده است. شکل ۶ نتایج تحلیل فاکتوری معمولی را پس از اعمال تابع لجستیک نشان می‌دهد. در نقشه حاصل از فاکتور ۱، عناصر Zn، Pb، As، Sb، Mo و Sn و در فاکتور ۲ عناصر Ag، Cu و Au تأثیر و مشارکت بالایی دارند. شکل ۷ نیز نتایج فاکتورهای ۱ و ۲ مرحله چهارم را پس از اعمال تابع لجستیک نشان می‌دهد. جهت بررسی نحوه قرارگیری مناطق آنومالی فاکتور ۱ و ۲ در منطقه، شکل ۱ و شکل ۷ مقایسه شد. همچنان که در این دو شکل مشخص است، مناطق حداکثر فاکتور ۱ و ۲ در مجاورت هم و هر دو فاکتور در حاشیه توده نفوذی گرانودیریت، در مناطق با گسل‌های متقاطع و در مواردی همراه با آلتراسیون‌های هیدروترمال همراه است. مقایسه بصری فاکتورهای ۱ و ۲ در مرحله اول (شکل ۶) با همین دو فاکتور در مرحله چهارم (شکل ۷) نشان‌دهنده کاهش نسبی مساحت بخش‌های آنومال و دقت

## ۳-۳- ارزیابی نقشه‌های تولیدشده

در این بخش نقشه‌های تولیدشده با استفاده از روش تحلیل فاکتوری معمولی و مرحله‌ای، از طریق بررسی ارتباط مکانی اندیس‌های شناخته‌شده در منطقه با هر یک از کلاس‌های مدل‌های ژئوشیمیایی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این پژوهش برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل تولیدشده از ۱۳ اندیس شناخته‌شده در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. یکی از روش‌های مبتنی بر داده که از آن برای ارزیابی مدل‌های تولیدشده استفاده می‌شود، نمودار مساحت-پیش‌بینی است. این نمودار شامل دو منحنی است که منحنی اول مربوط به نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته‌شده، متناظر با نقشه کلاس‌بندی شده و منحنی دوم مربوط به مساحت تحت پوشش هرکدام از کلاس‌ها نسبت به مساحت کل منطقه است. در نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت، نقطه تقاطع دو منحنی معیاری برای ارزیابی مدل تولیدشده است [۲۹، ۳۰]. نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت در واقع نموداری است که عملکرد مدل‌های اکتشافی را با توجه به مساحت تحت پوشش نواحی امیدبخش و دقت آنها در شناسایی ذخایر موجود در منطقه مورد مطالعه، مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مطابق شکل ۸، در نقشه‌های تولیدشده با استفاده از تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، ۷۸ درصد اندیس‌های معدنی در مساحتی حدود ۲۲ درصد از منطقه مورد مطالعه در فاکتور ۲ مرحله چهارم (شکل ۸-الف) و ۶۰ درصد اندیس‌های معدنی در مساحتی حدود ۴۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در فاکتور ۱ مرحله چهارم (شکل ۸-ب) پیش‌بینی شده‌اند. همچنین در مورد نقشه‌های تولیدشده با استفاده از تحلیل فاکتوری معمولی، ۷۵ درصد اندیس‌های معدنی در مساحتی حدود ۲۵ درصد از منطقه مورد مطالعه در فاکتور ۲ مرحله اول (شکل ۹-الف) و ۵۲ درصد اندیس‌های معدنی در مساحتی حدود ۴۸ درصد از منطقه مورد مطالعه در فاکتور ۱ مرحله اول (شکل ۹-ب) پیش‌بینی شده‌اند. بنابراین ارزیابی نقشه‌های تولیدشده نشان‌دهنده این موضوع است که روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای نرخ پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش تحلیل فاکتوری معمولی دارد و استفاده از آن می‌تواند باعث کاهش ریسک عملیات اکتشافی شود.



شکل ۸: نمودارهای پیش‌بینی-مساحت برای نقشه‌های تولیدشده با استفاده از روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، (الف) فاکتور ۲ مرحله چهارم (Cu و Au) و (ب) فاکتور ۱ مرحله چهارم (Sn, Mo, Sb, Zn, As, Pb).



شکل ۹: نمودارهای پیش‌بینی-مساحت برای نقشه‌های تولیدشده با استفاده از روش تحلیل فاکتوری معمولی، (الف) فاکتور ۲ مرحله اول (Cu, Ag, Zn, Au) و (ب) فاکتور ۱ مرحله اول (Sn, Mo, Sb, Zn, As, Pb).

عدم پیش‌بینی مناسب روش تحلیل فاکتوری معمولی نسبت به تحلیل فاکتوری مرحله‌ای به این دلیل است که در محاسبه امتیاز فاکتوری، وجود عناصر غیر مرتبط با



Iran. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 152(152), 143-151.

[3] Afzal, P., Farhadi, S., Boveiri Konari, M., Shamseddin Meigooni, M., & Daneshvar Saein, L. (2022). Geochemical anomaly detection in the Irankuh District using Hybrid Machine learning technique and fractal modeling. *Geopersia*, 12(1), 191-199.

[4] Farhadi, S., Afzal, P., Boveiri Konari, M., Daneshvar Saein, L., & Sadeghi, B. (2022). Combination of Machine Learning Algorithms with Concentration-Area Fractal Method for Soil Geochemical Anomaly Detection in Sediment-Hosted Irankuh Pb-Zn Deposit, Central Iran. *Minerals*, 12(6), 689.

[5] Torshizian, H., Afzal, P., Rahbar, K., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., & Fyzollahi, N. (2021). Application of modified wavelet and fractal modeling for detection of geochemical anomaly. *Geochemistry*, 81(4), 125800.

[6] Ghannadpour, S. S., & Hezarkhani, A. (2022). A new method for determining geochemical anomalies: UN and UA fractal models. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 56(2), 181-190.

[7] Zadmehr, F., & Shahrokhi, S. V. (2019). Separation of geochemical anomalies by concentration-area and concentration-number methods in the Saez 1: 100,000 sheet, Kurdistan. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11(3), 196-204.

[8] Ziaii, M., Pouyan, A. A., & Ziaei, M. (2009). Neuro-fuzzy modelling in mining geochemistry: identification of geochemical anomalies. *Journal of Geochemical Exploration*, 100(1), 25-36.

[9] Yousefi, S.; Doulati Ardejani, F.; Ziaii, Karamoozian, M.; 2015; "The speciation of cobalt and nickel at mine waste dump using improved correlation analysis: a case study of Sarcheshmeh copper mine." *Environment, development and sustainability*, 17,(<sup>6</sup>)pp.1065-1084.

[10] Shahrestani, S., Mokhtari, A. R., & Alipour-Asll, M. (2019). Assessment of Estimated Bedrock and Stream Sediment Geochemical Backgrounds in Catchment Basin Analysis. *Natural Resources Research*, 28, 1071-1087.

[11] Wu, R., Chen, J., Zhao, J., Chen, J., & Chen, S. (2020). Identifying geochemical anomalies associated with gold mineralization using factor analysis and spectrum-area multifractal model in Laowan District, Qinling-Dabie Metallogenic Belt, Central China. *Minerals*, 10(3), 229.

[12] Satyanarayanan, M., Eswaramoorthi, S., Subramanian, S., & Periakali, P. (2017). Factor analysis of rock, soil and water geochemical data from Salem magnesite mines and surrounding area,

کانی‌سازی، تأثیر منفی دارد، بنابراین امتیاز هر نمونه از مقدار واقعی فاصله می‌گیرد و در نهایت باعث می‌شود که جداسازی نمونه‌های آنومالی با خطا همراه شود. افزون بر موارد گفته‌شده، یکی از لایه‌های بسیار مهم در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، لایه ژئوشیمی است که در آن معمولاً از یک ترکیب چند عنصری به‌جای تک عنصری استفاده می‌شود. در این زمینه استفاده از روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای می‌تواند موجب شدت بخشی به آنومالی‌ها و افزایش نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی شود و در نهایت باعث بهبود نقشه پتانسیل معدنی گردد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

یکی از مسائل بحث‌برانگیز در زمینه اکتشافات ژئوشیمیایی، انتخاب بهترین فاکتور معرف کانی‌سازی است. یکی از پیشنهادها برای بهترین ترکیبات عنصری پیش‌بینی کننده کانی‌سازی، روش فاکتوری مرحله‌ای است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شمال نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ فیض‌آباد، روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای قادر است نوبزه‌های ژئوشیمیایی و آنومالی‌های کاذب را حذف کند. همچنین در برخی از مناطق باعث شدت بخشی به آنومالی‌ها شود. نقشه فاکتور ۲ حاصل از تحلیل فاکتوری مرحله‌ای در مرحله چهارم که تحت تأثیر و مشارکت عناصر Cu و Au است، انطباق مناسبی با اندیس مس-طلای پورفیری دارد. همچنین اندیس‌های تیپ IOCG نسبت به تیپ رگه‌ای انطباق بهتری با این نقشه دارند. نمودارهای پیش‌بینی-مساحت نقشه‌های تولیدشده نشان می‌دهند که تحلیل فاکتوری مرحله‌ای با به‌کارگیری اثرهای ژئوشیمیایی چند عنصری و تلفیق مناسب این اثرها، آنومالی‌ها را منطبق با شواهد اکتشافی شناسایی و استنتاج می‌نمایند.

#### مراجع

[1] Darehshiri, A., Panji, M., & Mokhtari, A. R. (2015). Identifying geochemical anomalies associated with Cu mineralization in stream sediment samples in Gharachaman area, northwest of Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 110, 92-99.

[2] Momeni, S., Shahrokhi, S. V., Afzal, P., Sadeghi, B., Farhadinejad, T., & Nikzad, M. R. (2016). Delineation of the Cr mineralization based on the stream sediment data utilizing fractal modeling and factor analysis in the Khoy 1: 100,000 sheet, NW

- Sinai, Egypt. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 21(3).
- [22] 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.
- [23] M. Daviran, R. Ghavami, A. Maghsoudi, and R. Ghezalbash, Identification of Hydrothermal alteration zones using ASTER data in northern parts of Doruneh fault within the Feizabad sheet. 2017 (In Persian).
- [24] Behroozi A (1987) Geological map of Iran 1: 100,000 series, Feizabad. Geological Survey of Iran, Tehran (In Persian).
- [25] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., & Alipoor, M. (2014). Increasing the Exploration Success and Intensify of Stream Sediment Geochemical Halos Using Recognizing and Omitting the Non-Predictive Factors, Case Studies: Fluorite and Copper Mineralization. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(93), 85-92. doi: 10.22071/gsj.2014.43531 (In Persian).
- [26] Hassani Pak, A., A., (2016). *Geochemical exploration*, 9th edition, University of tehran press, (In Persian).
- [27] Cox, D.R., Snell, E.J., (1989). *Analysis of Binary Data*, 2nd ed. Chapman and Hall, London
- [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] Yousefi, M., & Carranza, E. J. M. (2015). 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.
- [30] Brown, W. M., Gedeon, T. D., & Groves, D. I. (2003). Use of noise to augment training data: a neural network method of mineral–potential mapping in regions of limited known deposit examples. *Natural Resources Research*, 12, 141-152.
- Salem, southern India. *Applied Water Science*, 7, 2607-2616.
- [13] Valsangkar, A. B., Karisiddaiah, S. M., & Ambre, N. V. (1992). Geochemistry, factor analysis and clay mineral distribution of the sediments and relationship with the associated ferromanganese nodules from the SW Carlsberg Ridge.
- [14] Uusikorpi, J. (2020). Factor analysis of a large geochemical exploration data set: example from Kalba gold belt, eastern Kazakhstan.
- [15] Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R.G. (2002). Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17, 185-206.
- [16] Sun, X., Deng, J., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L., & Zhao, Z. (2009). Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1), 6-16.
- [17] Van Helvoort, P. J., Filzmoser, P., & van Gaans, P. F. (2005). Sequential factor analysis as a new approach to multivariate analysis of heterogeneous geochemical datasets: an application to a bulk chemical characterization of fluvial deposits (Rhine–Meuse delta, The Netherlands). *Applied geochemistry*, 20(12), 2233-2251.
- [18] Sun, X., Deng, J., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L., & Zhao, Z. (2009). Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1), 6-16.
- [19] Ayoobi, I., Shamsipour Dehkordi, R., & Shiva, M. (2013). Anomaly recognition in stream sediment geochemical exploration using factor analysis in Mesgaran area of Birjand, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 5(1), 105-115 (In Persian).
- [20] Tripathi, V. S. (1979). Factor analysis in geochemical exploration. *Journl of Geochemical Exploration*, 11(3), 263-275.
- [21] Helba, H. A., El-Makky, A. M., & Khalil, K. I. (2021). Application of the CN fractal model, factor analysis and geochemical mineralization probability index (GMPI) for delineating geochemical anomalies related to a Mn-Fe deposit and associated Cu mineralization in west-central

---

<sup>2</sup> Kaiser-Meyer- Olkin

<sup>1</sup> Jiang Cheng