

شدت بخشی آنومالی‌های مس رگه‌ای در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کردگان با آنالیز مرحله‌ای GMPI و SFA

احمد آریافرا^۱، سعید یوسفی*^۲، وحید خسروی^۳، محمد خراشادی^۴

۱. دانشیار دانشکده مهندسی، گروه معدن، دانشگاه بیرجند aaryafar@birjand.ac.ir

۲. استادیار دانشکده مهندسی، گروه معدن، دانشگاه بیرجند syousefi@birjand.ac.ir

۳. دانش آموخته دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود vah.khosravi@gmail.com

۴. دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. mkhorashadi@shahroodut.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۱ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴)

چکیده

ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کردگان در پهنه ساختاری لوت شمالی و در استان خراسان جنوبی قرار دارد. در این محدوده، کانه‌زایی اغلب به صورت رگه‌ای است که توسط ساختارهای گسلی با روند شمال غربی - جنوب شرقی، کنترل می‌شود. به منظور بهبود نتایج عملیات اکتشاف از سه راهکار استفاده شد. برای از بین بردن عناصر مزاحم و رسیدن به فاکتورهای تمیز در روند پیاده‌سازی روش آماری چند متغیره از روش آنالیز فاکتوری مرحله‌ای SFA استفاده شد. علاوه بر حذف عناصر بی اثر در محاسبات، عناصر غیر مرتبط با تیپ کانی‌سازی مس رگه‌ای نیز کنار گذاشته شد. در نهایت با استفاده روش نوین GMPI، آنومالی‌های به دست آمده، شدت بخشی و مرز دقیق آن‌ها مشخص شد. در طی عملیات اکتشافی در منطقه کردگان، ۸۳۶ نمونه رسوبات آبراهه‌ای و ۳۰ نمونه تکراری برداشت شد. نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای با روش ICP توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شمال شرق کشور مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. با انجام روش SFA در سه مرحله، عناصر Ag، Ni و Cd از محاسبات آنالیز فاکتوری کنار رفتند. در مرحله بعد عناصر Cr، Co، Fe، Mn، Sc، Ti، V، Sr، Ba و W که همخوانی با تیپ مس رگه‌ای ندارد حذف شدند و مجدداً آنالیز فاکتوری انجام شد. نتایج به دست آمده عناصر را در سه فاکتور طبقه‌بندی کرد که با روش GMPI تلفیق و کلاسه‌بندی شدند. بر اساس نتایج، ۸ منطقه امیدبخش اکتشافی به دست آمد که با تحقیقات گذشته منطقه و همچنین گسل‌ها و واحدهای آندزیت و توف آندزیتی با سن ائوسن به عنوان سنگ مناسب ذخایر رگه‌ای، همخوانی دارد. به نظر می‌رسد روش مورد استفاده قادر است با به کارگیری اثرهای ژئوشیمیایی چندعنصری و تلفیق این اثرها، آنومالی‌ها را منطبق با سایر شواهد اکتشافی شناسایی و استنتاج نمایند.

کلمات کلیدی

آنالیز فاکتوری مرحله‌ای SFA، شاخص احتمال کانی‌سازی ژئوشیمیایی GMPI، مناطق امیدبخش اکتشافی، ورقه کردگان، تیپ مس رگه‌ای

۱- مقدمه

پردازش داده‌های ژئوشیمیایی برای تشخیص الگوهای ژئوشیمیایی چندمتغیره یا سیگنال‌های مرتبط با کانی‌سازی، با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های فرکتالی [۱، ۲]، روش‌های هوشمند [۳، ۴]، روش‌های مبتنی بر احتمال [۵] و روش‌های آماری [۶] انجام می‌شود. در تفسیر داده‌ها با روش‌های آماری می‌توان از آمار تک‌متغیره و چندمتغیره استفاده کرد. البته بدیهی است که نقشه‌های چند عنصری می‌تواند موجب شدت بخشی (چه از نظر شدت آنومالی و چه از نظر وسعت) هاله‌های ژئوشیمیایی شود. در اکتشافات ژئوشیمیایی عموماً از تحلیل‌های چند متغیره ژئوشیمیایی نظیر آنالیز فاکتوری، برای استنتاج بهترین معرف یا معرف‌های چند عنصری کانی‌سازی استفاده می‌شود [۷]. زیرا این روش می‌تواند اهمیت نسبی ترکیب‌های مختلف از متغیرهای (عناصر) ژئوشیمیایی را به نحو مطلوب‌تری ارزیابی کند [۸].

آنالیز فاکتوری، اولین بار توسط چارلز اسپیرمن در اوایل دهه ۱۹۰۰ توسعه داده شد و در ادامه در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی استفاده شد [۹]. هدف از آنالیز فاکتوری این است که داده‌های چند متغیره را به کمک چند فاکتور که قابلیت توضیح و کشف روابط و ساختارهای پنهان بین داده‌های چند متغیره را دارد توضیح دهد. بنابراین از لحاظ تئوری، آنالیز فاکتوری برای بررسی تنوع ذاتی در داده‌های ژئوشیمیایی مناسب بوده و اغلب به‌عنوان یک ابزار برای تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی استفاده می‌شود [۱۰].

مسئله‌ای که در خصوص روش آنالیز فاکتوری وجود دارد این است که در خروجی آنالیز فاکتوری، در برخی موارد تمام عناصر ردیاب و معرف کانی‌سازی در قالب یک فاکتور، همراهی نشان نمی‌دهند. دلیل این عدم همراهی، اختلاف در خصوصیات و تحرک فیزیکی و شیمیایی عناصر و همچنین ماهیت روش آنالیز فاکتوری است که در آن از ماتریس کل داده‌ها استفاده می‌شود. استفاده از ماتریس کل داده‌ها باعث می‌شود که در صورت حضور عناصر مزاحم ژئوشیمیایی یعنی عناصری که در هیچ فاکتوری مشارکت ندارند، مقادیر امتیازات فاکتوری از مقدار اصلی خود فاصله گرفته و عناصر پارازنز یک تیپ

کانی‌سازی مشخص با هم در قالب یک فاکتور، همراهی نشان ندهند [۱۰]. به‌منظور بهبود این روش، آنالیز فاکتوری مرحله‌ای (SFA) [۱۱] توسعه داده شده است.

روش SFA این قابلیت را دارد که تعداد فاکتورها را کاهش و چگالی آنومالی را افزایش دهد. افزایش چگالی آنومالی‌ها به این معنی است که تعداد نمونه‌های آنومال مجاور هم در یک حوضه آبریز با توجه به تعداد کل نمونه‌های آنومال در منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. هرکدام از نقشه‌های SFA تعدادی از مناطق را به‌عنوان هدف اکتشافی و به‌صورت آنومالی‌های چند عنصری مشخص می‌کند. این نقشه‌ها ممکن است با سایر نقشه‌های توزیع ژئوشیمیایی همپوشانی داشته باشند و یا در هیچ نقطه‌ای همپوشانی نداشته باشند. در تحلیل نتایج آنالیز فاکتوری معمولاً یک یا چند فاکتور به‌عنوان فاکتور هدف، انتخاب و به‌صورت مجزا تحلیل می‌شوند. این رویکرد و عدم توجه به سایر فاکتورها می‌تواند باعث از دست رفتن بخشی از اطلاعات شود. بنابراین یکی از چالش‌های موجود، پیدا کردن روشی است که قادر باشد به نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های وزن مناسبی اختصاص دهد تا بتواند علاوه بر شدت بخشی به آنومالی‌ها، جوامع ژئوشیمیایی مختلف را تفکیک و با تلفیق فاکتورهای مهم، یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار را تولید کند.

شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی^۲ (GMPI) [۱۲] یک روش جدید طبقه‌بندی و وزن‌دهی است که به‌منظور تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های و افزایش احتمال موفقیت در به نقشه درآوردن پتانسیل‌های معدنی استفاده شده است. در این روش با استفاده از یک تابع لجستیک، داده‌ها به یک فضای جدید انتقال می‌یابد که به این ترتیب مرزها بارزتر و تفکیک پذیرتری جوامع برای تصمیم‌گیری با کیفیت مناسبی انجام می‌شود. تابع لجستیک انواع مختلفی دارند و می‌توانند اطلاعات را از یک بازه نامحدود از یک متغیر به محدوده بین ۰ و ۱ انتقال دهد [۱۳].

منطقه کردگان با قرار گرفتن در یکی از دوازده منطقه طلاخیز کشور و داشتن خصوصیات بارز زمین‌شناسی شامل موقعیت زمین‌ساختی، پویایی

دسترسی به ناحیه کردگان از مسیر بیرجند - خوسف - بصیران امکان‌پذیر است. در پهنه‌بندی زون ساختاری - رسوبی ایران، منطقه کردگان در شرقی‌ترین قسمت بلوک لوت قرار می‌گیرد. از نظر کانه‌زایی، بلوک لوت برای ذخایر رگه‌ای اپی‌ترمال و پورفیری فلزات پایه و قیمتی پتانسیل‌دار است. به مانند اکثر مناطق ایران، کانه‌زایی مس و طلا در این بلوک با ماگماتیسم ترشیری ارتباط دارد.

در پیمایش‌های صحرایی صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه، کانی‌سازی به صورت رگه‌های کوارتزی حاوی سولفید همراه با مالاکیت، رگه‌های سیلیسی و رگه‌های هماتیتمی لیمونیتی است که از ساختارهای گسلی پیروی می‌کنند [۱۷].

در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه و نقشه زمین شناسی آن آمده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است واحدهای سنگی منطقه شامل مونزونیت، داسیت، آندزیت، آندزیت بازالت، بازالت‌های آلکالن، آهک، ماسه‌سنگ و توف جریان‌ی است. علاوه بر واحدهای ذکر شده که مربوط به ترشیری هستند، رسوبات عهد حاضر (کواترنری) نیز در منطقه گسترش زیادی دارد و به صورت نهشته‌های پادگانه‌های آبرفتی، مخروط افکنه‌ها و کفه‌های نمکی گسترش یافته‌اند.

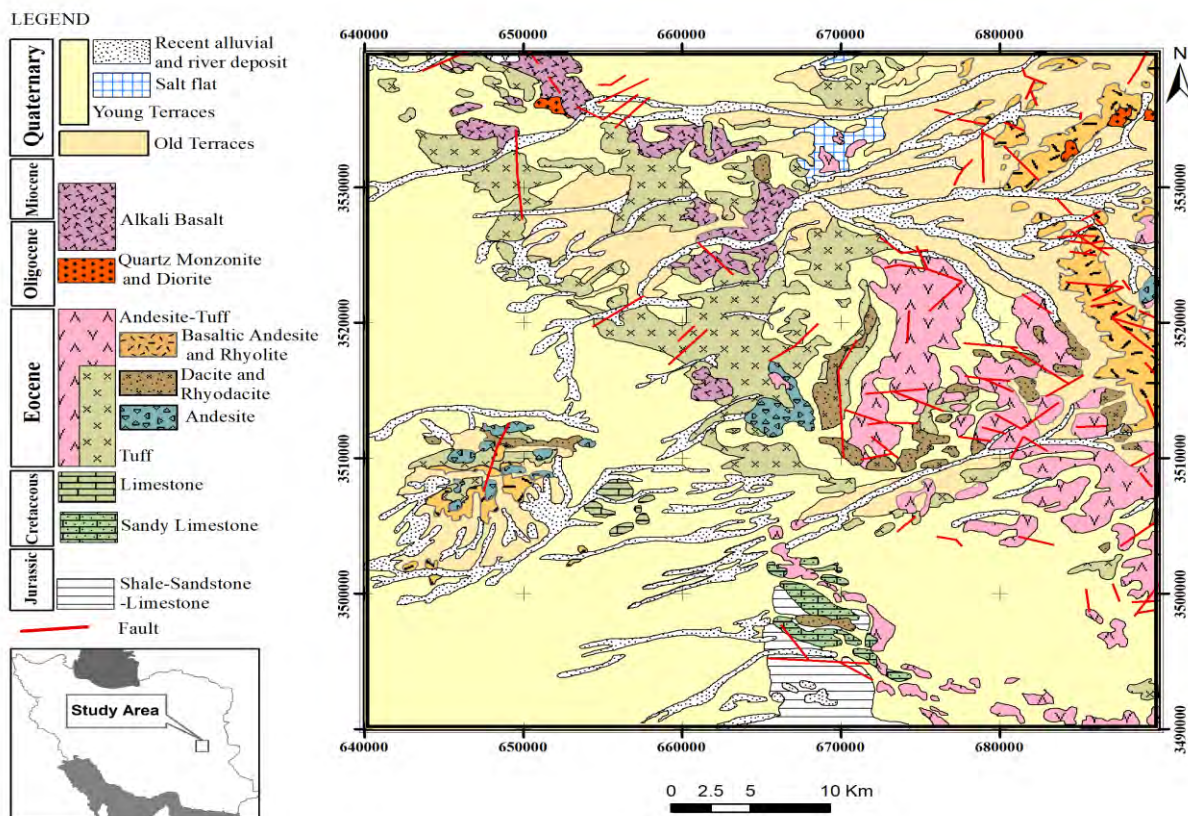
چین‌خوردگی ضعیف و گسلش امتدادلغز، مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی در گستره مورد مطالعه‌اند. به لحاظ تکتونیکی در منطقه مورد مطالعه به طور عمده دو مجموعه گسل و شکستگی با روندهای شمال شرقی - جنوب غربی و شمال غربی - جنوب شرقی قابل تشخیص است (شکل ۱).

ماگمایی، وجود دگرسانی‌ها و شرایط مساعد کانی‌سازی با سن ترشیری باعث شده است که این منطقه همواره به لحاظ اکتشافی مورد توجه باشد. در این منطقه که در بعضی تحقیقات با نام کودگان نیز نامبرده می‌شود، احتمال وجود ذخایری از طلا، مس، بیسموت، مولیبدن، سرب، روی، قلع و آنتیموان وجود دارد. در این راستا تحقیقاتی در اندیس‌ها و کانسارهای منطقه انجام شده است که از آن جمله می‌توان به معدن مس قلعه‌زری [۱۴]، [۱۵]، کانسار طلای هیرد [۱۵]، [۱۶]، معدن طلای چاه زاغو، معدن مس شورک و مسگران، معدن سرب و روی سه چنگی، آثاری از کانه‌زایی طلا در منطقه بیشه (۱۶ کیلومتری جنوب معدن قلعه‌زری) و اندیس معدنی چاه شلغمی اشاره کرد.

به نظر می‌رسد استفاده از روش SFA با در نظر گرفتن تیپ احتمالی کانسارهای منطقه و همچنین تلفیق فاکتورهای هدف با روش GMPI، بتواند نقشه شاهد ژئوشیمیایی دقیق‌تری برای مشخص کردن مناطق امیدبخش منطقه کردگان به دست دهد. با توجه به پتانسیل این منطقه برای کانی‌سازی رگه‌ای اپی‌ترمال مس (مشابه معدن مس قلعه‌زری) بنابراین هدف این مقاله، پیاده‌سازی این دو روش روی داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای منطقه کردگان با لحاظ تیپ مس رگه‌ای برای مشخص کردن مناطق امیدبخش اکتشافی خواهد بود.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه کردگان در استان خراسان جنوبی و به فاصله تقریبی ۱۸۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان بیرجند واقع شده است. این ناحیه بین طول‌های جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۹ درجه شرقی و عرض‌های ۳۱ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۲ درجه عرض شمالی قرار دارد.



شکل ۱- موقعیت و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کردگان [۱۸]

۲۲ عنصر از بین ۵۲ عنصر انتخاب گردید که عبارتند از: Mo, Mn, Fe, Cu, Cr, Co, Cd, Bi, Ba, As, Ag, Au, Zn, W, V, Ti, Sr, Sn, Sc, Sb, Pb, Ni, روش‌های مورد نظر روی داده‌ها، پیش‌پردازش‌های لازم، از نظر میزان دقت، صحت، مقادیر سنسورد، مقادیر خارج از ردیف و وضعیت نرمال بودن، بررسی و جایگزینی‌ها و تبدیلات لازم انجام شد.

۳-۲- روش آنالیز فاکتوری مرحله‌ای SFA

در آنالیز فاکتوری، روابط بین M متغیر (عناصر)، توسط P فاکتور جدید که مستقل از یکدیگر هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل فاکتوری به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$X_j = \sum_{r=1}^p a_{jr} f_r + \varepsilon_j \quad (1)$$

که در این رابطه:

براساس مشاهدات صحرایی و مطالعات میکروسکوپی، مهمترین دگرسانی‌های موجود در منطقه عبارتند از: آرژیلیک متوسط، سرسیستی، پروپیلیتیک، کلریت، اپیدوت، کربناتی، سیلیسی و کلاک‌های آهنی. دگرسانی سرسیستی، آرژیلیک و سیلیسی نسبت به دیگر دگرسانی‌های موجود در منطقه گسترده‌تر است [۱۷].

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- نمونه‌برداری

در طی عملیات اکتشافی، ۸۳۶ نمونه رسوبات آبراه‌ای و ۳۰ نمونه تکراری از جزء ۲۰۰- مش منطقه مورد مطالعه برداشت شد. این نمونه‌ها با روش OES-ICP، توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شمال شرق کشور مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. با توجه به مدل زمین‌شناسی اقتصادی منطقه که از نظر ذخایر رگه‌ای اپی ترمال و پورفیری اهمیت دارد، تعداد

غالباً داده‌های اکتشافی داده‌هایی پیوسته و نامحدود هستند. به این معنا که مقدار پیش‌بینی شده برای هر متغیر می‌تواند هر مقداری داشته باشد. حال چنانچه بخواهیم احتمال مربوط به هر متغیر را پیش‌بینی کنیم و یا در سیستم GIS لایه‌ها را تلفیق کنیم مقادیر خارج از محدوده [۰،۱] نامناسب خواهد بود. به منظور محدود کردن مقادیر در بازه [۰،۱]، کاکس و اسنل [۲۲] مدلی لجستیکی را بدین منظور ارائه کردند که بعدها این تابع لجستیکی توسط یوسفی و همکاران [۱۲] در طبقه‌بندی و تلفیق لایه‌های اکتشافی استفاده شد. تابع لجستیکی مذکور در رابطه ۲ آمده است.

$$GMPI = \frac{e^{Fs}}{1 + e^{Fs}} \quad (2)$$

که در این رابطه، e عدد نپر و Fs امتیاز فاکتور مورد نظر در هر نمونه است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- روش آنالیز فاکتوری مرحله‌ای SFA

پس از آماده سازی و تبدیل داده‌های ژئوشیمیایی ورقه کردگان، از آنالیز فاکتوری مرحله‌ای به عنوان یک روش جدید برای استنتاج بهترین ترکیب چند عنصری معرف کانی‌سازی در منطقه استفاده شد.

بر اساس نتایج نمودار خزش^۴ (اطلاعات بیشتر در [۲۳]) برای ۲۲ عنصر، شش فاکتور جهت انجام روش SFA، مناسب تشخیص داده شد. ماتریس بارهای فاکتوری SFA مرحله اول در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با توجه به حد آستانه بار ۰/۵، دو عنصر نقره و نیکل هیچ جایی در فاکتورهای مختلف به عنوان بار فاکتوری با اهمیت ندارند. بنابراین با حذف این دو عنصر، مرحله دوم آنالیز SFA انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

با توجه به جدول ۲ مشخص است که عنصر کادمیم در هیچ یک از فاکتورها بار معنی‌داری ندارد بنابراین با حذف این عنصر از محاسبات فاکتوری، مجدداً محاسبات آنالیز فاکتوری انجام شد. نتیجه این محاسبات در جدول

۲: فرم فاکتور معمول، p: تعداد فاکتورهای مشخص شده، ε_j : واریانس تصادفی منحصر به متغیر اولیه X_j است. از آن جایی که m متغیر اولیه X_j داریم بنابراین m متغیر تصادفی ε_j نیز خواهیم داشت. ضرایب a_{jr} بار j امین متغیر روی r امین فاکتور است [۱۹].

فاکتورها، میزان تغییرپذیری کل داده‌ها را بوسیله حداقل تعداد متغیرهای تصادفی که فاکتور نامیده می‌شوند، بیان می‌کنند که این فاکتورها برای تفسیر نسبت به داده‌های اولیه مناسب‌تر هستند [۲۰]. این فاکتورها عوامل فیزیکوشیمیایی محیط اکتشافی محسوب می‌شوند که در روابط علت و معلولی می‌توانند نقش علت را ایفا کنند.

روش اجرای SFA به این صورت است که اگر پس از اجرای یک مرحله آنالیز فاکتوری، در خروجی آن، عنصر یا عناصری وجود داشته باشند که در هیچ فاکتوری، با توجه به حد آستانه در نظر گرفته شده، مشارکت بالا نداشته باشند باید از مجموعه داده‌ها حذف شده و آنالیز فاکتوری تا جایی ادامه یابد که دیگر هیچ عنصری در خروجی آن وجود نداشته باشد که نتوان آن را در یکی از فاکتورها طبقه بندی نمود. در این حالت فاکتورهای معرفی شده، فاکتورهای تمیز بوده و اثر عناصر مزاحم در محاسبه امتیازات فاکتوری به حداقل رسیده است. در نتیجه این فاکتورها به عنوان یک اثر چند متغیره، بیشتر قابل اعتماد هستند [۲۱].

۳-۳- روش شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی

GMPI

شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی (GMPI) یک روش جدید وزن دهی فازی به منظور افزایش تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای و افزایش احتمال موفقیت در نقشه برداری پتانسیل‌های معدنی است.

ادغام داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای با سایر انواع داده‌های اکتشافی به ویژه در دانش ترسیم نقشه‌های پتانسیل معدنی^۲ MPM یک موضوع چالش برانگیز است. GMPI یک وزن است که قابلیت نقشه شدن دارد و بنابراین می‌تواند به عنوان یک نقشه مستدل در MPM به کار رود.

۳ آمده است.

جدول ۲: ماتریس بارهای فاکتوری مرحله دوم پس از حذف Ag و Ni

	Component					
	1	2	3	4	5	6
Au	-0.026	.805	-0.006	-0.036	-0.179	.047
As	.015	.014	-0.038	.077	.915	.005
Ba	.069	.008	.151	.883	-0.050	-0.044
Bi	.066	.701	.379	.012	.142	-0.013
Cd	.288	.294	.493	-0.009	-0.321	-0.256
Co	.864	-0.099	.070	.038	-0.063	.164
Cr	.808	.038	.098	-0.164	.235	-0.084
Cu	.458	.684	.015	-0.057	-0.031	-0.014
Fe	.974	.033	.030	.003	.055	-0.001
Mn	.944	.057	.026	.134	.004	.003
Mo	.475	-0.191	-0.175	-0.166	.595	.230
Pb	-0.245	.434	.552	-0.069	.036	.129
Sb	.091	.437	.652	-0.087	.179	-0.259
Sc	.745	.086	-0.141	.447	-0.037	.001
Sn	.098	-0.094	.774	.004	-0.159	.125
Sr	-0.131	-0.156	-0.391	.722	.114	.095
Ti	.716	.046	-0.003	-0.141	.110	.011
V	.972	.072	.060	.033	.002	-0.018
W	.059	.052	.022	.016	.081	.932
Zn	.870	.264	.140	-0.058	-0.068	-0.043

با دقت در جدول ۳ مشخص می‌شود تمامی متغیرها در فاکتورها دارای بارهای معنی‌دار است و اصطلاحاً تمامی متغیرها متغیر تمیز تلقی می‌شود. نقشه مربوط به فاکتورهای به دست آمده در شکل‌های ۳ تا ۷ آمده است. بر اساس جدول ۳ بهترین ترکیب خطی از متغیرها برای هر فاکتور به صورت زیر قابل تفسیر است.

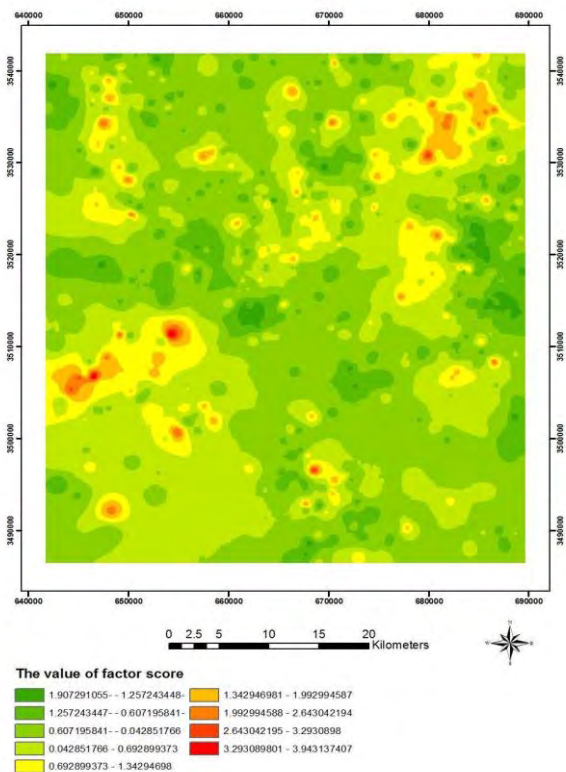
جدول ۱: ماتریس بارهای فاکتوری SFA مرحله اول

	Component					
	1	2	3	4	5	6
Au	-0.031	.094	.758	-0.009	-0.095	-0.026
Ag	.211	.019	.347	-0.386	-0.394	.336
As	.025	-0.044	.043	.043	.856	.089
Ba	.105	.082	-0.016	.850	-0.050	.021
Bi	.066	.449	.662	.077	.137	-0.009
Cd	.295	.554	.217	.031	-0.276	-0.274
Co	.865	.042	-0.109	-0.026	-0.062	.189
Cr	.809	.132	-0.005	-0.223	.283	-0.078
Cu	.455	.052	.710	-0.088	-0.077	.045
Fe	.973	.032	.030	-0.022	.052	.012
Mn	.946	.021	.057	.120	-0.004	.015
Mo	.467	-0.209	-0.130	-0.224	.512	.302
Ni	.220	-0.122	-0.300	-0.461	.438	.086
Pb	-0.243	.581	.374	-0.073	.030	.180
Sb	.098	.720	.365	-0.022	.181	-0.236
Sc	.758	-0.160	.088	.423	-0.020	.002
Sn	.100	.712	-0.127	.015	-0.246	.240
Sr	-0.104	-0.468	-0.130	.620	.125	.146
Ti	.706	.019	.055	-0.109	.097	-0.011
V	.971	.064	.069	.024	-0.006	-0.008
W	.038	.023	.016	.065	.136	.820
Zn	.868	.157	.265	-0.075	-0.095	-0.012

جدول ۳: ماتریس بارهای فاکتوری مرحله سوم پس از حذف Cd

	Component					
	1	2	3	4	5	6
Au	-0.019	.800	-0.067	-0.037	-0.185	.062
As	-0.003	.018	-0.044	.078	.924	.017
Ba	.076	.021	.156	.883	-0.059	-0.056
Bi	.076	.729	.327	.011	.131	-0.017
Co	.863	-0.102	.063	.036	-0.046	.171
Cr	.808	.043	.084	-0.164	.243	-0.084
Cu	.467	.678	-0.025	-0.055	-0.044	-0.018
Fe	.974	.029	.013	.003	.068	.004
Mn	.944	.052	.001	.132	.021	.015
Mo	.458	-0.209	-0.158	-0.164	.608	.239
Pb	-0.229	.474	.546	-0.067	.011	.097
Sb	.103	.495	.588	-0.092	.183	-0.258
Sc	.744	.071	-0.159	.446	-0.027	.014
Sn	.120	-0.041	.808	.007	-0.181	.069
Sr	-0.143	-0.188	-0.371	.724	.118	.106
Ti	.717	.039	-0.002	-0.139	.110	.004
V	.974	.070	.041	.033	.012	-0.014
W	.046	.041	.031	.013	.096	.951
Zn	.874	.267	.093	-0.061	-0.050	-0.029

دارد ولی به دلیل آنومالی های کوچک آن در بخش های مختلف ورقه، می بایست با نمونه برداری از این بخش ها و مطالعات کانی سنگین با دقت بیشتری احتمال کانی سازی این عنصر را بررسی نمود (شکل ۷).



شکل ۲- نقشه توزیع امتیاز فاکتوری فاکتور ۱ در سومین مرحله آنالیز فاکتوری (Co-Cr-Fe-Mn-Sc-Ti-V-Zn)

فاکتور اول شامل عناصر V, Ti, Sc, Mn, Fe, Cr, Co, Zn است. آنومالی های مربوط به پاراژنز این فاکتور در جنوب غربی منطقه دیده می شود که می تواند منطقه مناسبی برای کانی سازی احتمالی Fe در منطقه باشد. مقایسه نقشه فاکتور ۱ (شکل ۲) و نقشه زمین شناسی منطقه (شکل ۱) نشان می دهد این فاکتور در آندزیت ها و بازالت های شمال شرقی و جنوب شرقی منطقه، آنومالی های بارزی دارد.

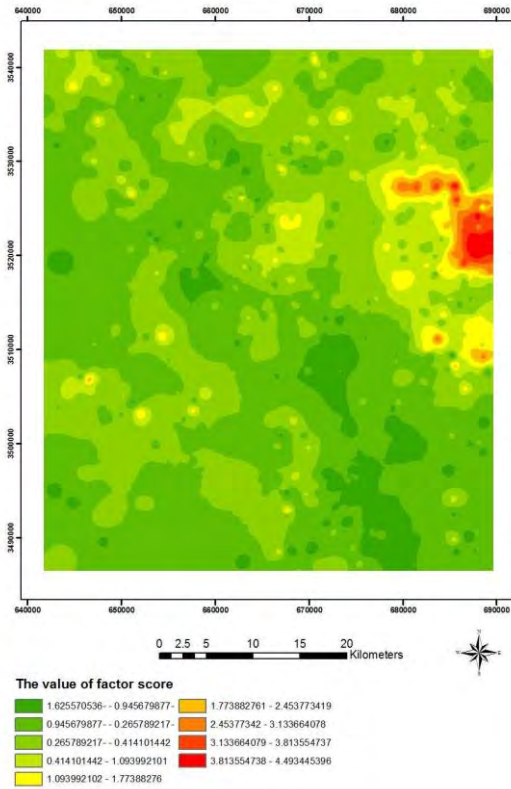
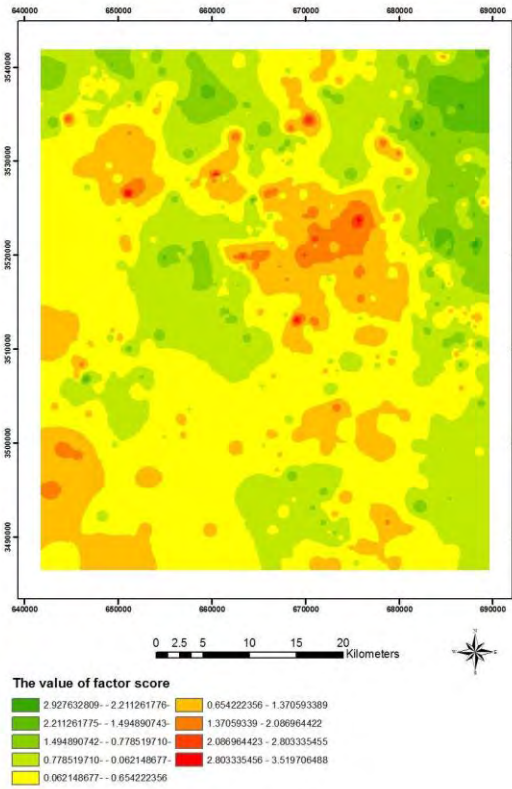
فاکتور دوم عناصر Sn, Sb, Pb و Cd را دربردارد. این فاکتور در آندزیت ها و بازالت های شرق منطقه دارای آنومالی است (شکل ۳). افزایش عنصر قلع در رسوبات رودخانه ای به علت عدم تحرک این عنصر توجیه خاصی نداشته و فقط می بایست با برداشت چند نمونه سنگی به طور مستقیم از واحدهای لیتولوژی، وجود احتمالی قلع و انتقال آن بر اثر هوازدگی مکانیکی را کنترل کرد.

در فاکتور سوم عناصر Au, Bi, Cu آمده است. این فاکتور منطبق بر واحدهای آندزیتی و داسیتی است که در بخشی از نوار شرقی ورقه قرار گرفته و به تنهایی آنومالی های قوی از خود نشان می دهد (شکل ۴).

فاکتور چهارم شامل عناصر Ba و Sr است. این فاکتور در بخش های مختلف ورقه به صورت پراکنده، آنومالی هایی از خود نشان داده است که قوی ترین آن ها در ناحیه مرکزی ورقه و بیشتر در ارتباط با تشکیلات توف، آندزیت توف، نهشته های کواترنری از جمله آبرفت های قدیمی می باشد (شکل ۵).

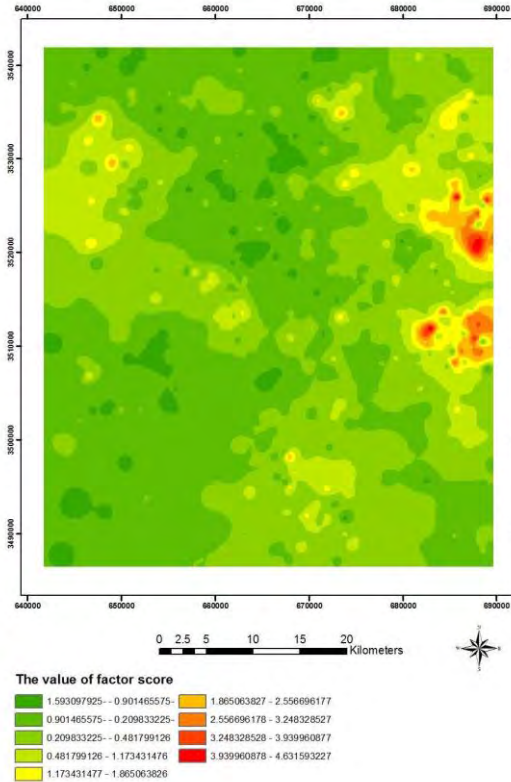
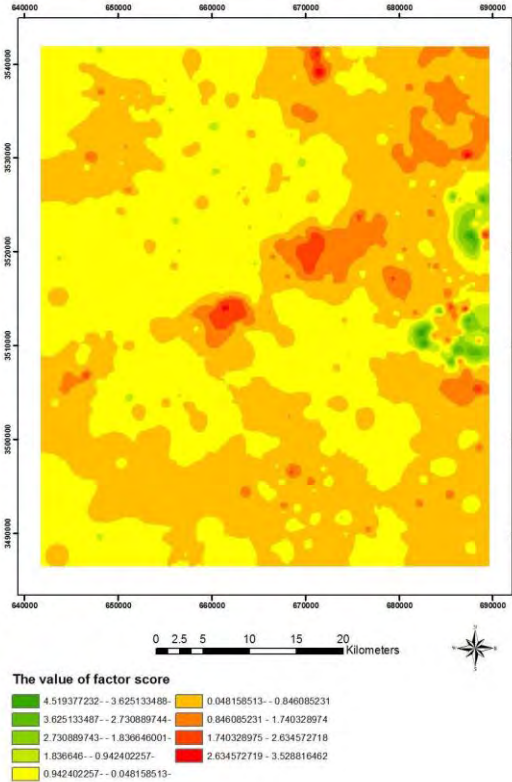
در فاکتور پنجم عناصر As و Mo وجود دارد. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، قوی ترین آنومالی های مربوط به این فاکتور در ناحیه مرکزی ورقه مشاهده شده است و با نهشته های آبرفتی و تشکیلات توف و آندزیت توف ارتباط دارد. از آنجا که عناصر موجود در این فاکتور می توانند نشانه های مثبتی برای کانی سازی مس در یک منطقه باشند و با توجه به سوابق گذشته منطقه مبنی بر احتمال وجود این نوع کانی سازی، بررسی بیشتر در مورد آن ضروری به نظر می رسد.

فاکتور ششم تنها شامل عنصر W است که با توجه به شرایط زمین شناسی منطقه احتمال تشکیل آن وجود



شکل ۵- نقشه توزیع امتیاز فاکتوری فاکتور ۴ در سومین مرحله آنالیز فاکتوری (Ba-Sr)

شکل ۳- نقشه توزیع امتیاز فاکتوری فاکتور ۲ در سومین مرحله آنالیز فاکتوری (Au-Bi-Cu)



شکل ۶- نقشه توزیع امتیاز فاکتوری فاکتور ۵ در سومین مرحله آنالیز فاکتوری (As-Mo)

شکل ۴- نقشه توزیع امتیاز فاکتوری فاکتور ۳ در سومین مرحله آنالیز فاکتوری (Sn-Pb-Sb)

حاصل تاثیر دادن تیپ کانی‌سازی مس رگه‌ای در محاسبات SFA است، نشان می‌دهد که عناصر با اهمیت در فاکتورها هیچ تغییری نکرده است ولی وزن آن‌ها در فاکتورها تفاوت دارد. بر اساس این نتایج، وزن عناصر Au، Bi، Pb و Sb کاهش و وزن عناصر Sn، Cu، As و Mo در فاکتورها افزایش یافته است. افزایش وزن این عناصر می‌تواند موید ارتباط مس رگه‌ای با کانی‌سازی مس پورفیری حاشیه قاره در این منطقه باشد.

جدول ۴: ماتریس دوران شده عناصر موثر در کانی‌سازی مس

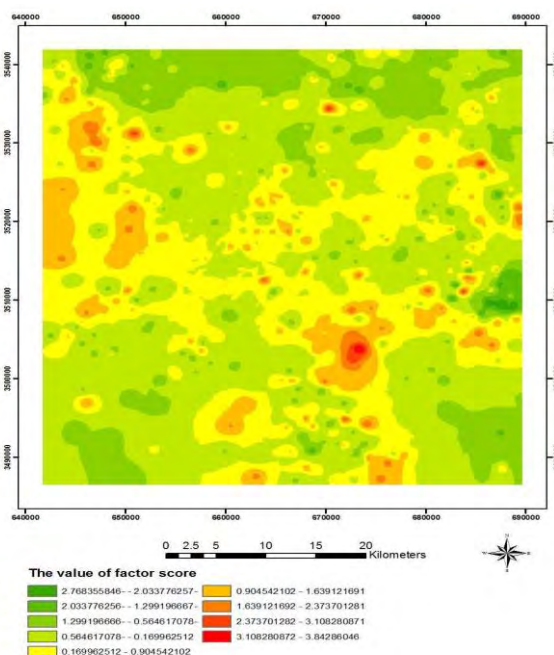
	Component		
	1	2	3
Au	.775	.063	-.240
As	.004	.046	.850
Bi	.674	.450	.068
Cu	.795	.063	.114
Mo	-.033	-.186	.819
Pb	.269	.665	-.162
Sb	.400	.684	.084
Sn	-.110	.759	-.083

۴-۳- محاسبه مقادیر GMPI برای نهشته‌های مس

رگه‌ای

با استفاده از روش SFA تا حد ممکن، تاثیر عناصر مزاحم حذف می‌شود. اما آنچه اهمیت بیشتری دارد ترکیب این نقشه‌ها و رسیدن به یک نقشه، مربوط به یک نوع نهشته و یا عنصر است که روش GMPI این امکان را فراهم می‌کند. پس از محاسبه مقادیر امتیازات فاکتوری فاکتورهای نهایی در بخش قبل می‌توان مقادیر GMPI مربوط به هر فاکتور را با استفاده از روابط ۳ تا ۵ بدست آورد.

$GMPI_{Au-Bi-Cu} = \frac{e^{FS_{Au-Bi-Cu}}}{1 + e^{FS_{Au-Bi-Cu}}}$	(۳)
$GMPI_{As-Mo} = \frac{e^{FS_{As-Mo}}}{1 + e^{FS_{As-Mo}}}$	(۴)
$GMPI_{Sn-Pb-Sb} = \frac{e^{FS_{Sn-Pb-Sb}}}{1 + e^{FS_{Sn-Pb-Sb}}}$	(۵)



شکل ۷- نقشه توزیع امتیاز فاکتوری فاکتور ۶ در سومین مرحله آنالیز فاکتوری (W)

۴-۲- اعمال تیپ کانی‌سازی در روش SFA

با توجه به پتانسیل حضور مس با ژنز رگه‌ای در منطقه کردگان به عنوان جزئی از بلوک لوت، مناسب است برای بهبود نتایج و تحلیل‌ها علاوه بر به کار بردن روش SFA، ژئوشیمی این تیپ ذخیره هم مورد توجه قرار گیرد. در رابطه با مطالعه نهشته‌های مس رگه‌ای تاکنون مطالعاتی زیادی صورت گرفته است [۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷]. این مطالعات نشان می‌دهد عناصر Sn، Cu، Zn، Bi، Au، Mo، As، Pb و Sb می‌توانند معرف‌های خوبی مبنی بر وجود این نوع کانی‌سازی باشند.

در این بخش حذف برخی از فاکتورهایی که ارتباط مستقیمی با این نوع نهشته ندارند علاوه بر کاهش تعداد فاکتورها، مناطق مستعد برای این نوع نهشته نیز شناسایی می‌شود. برای این منظور با حذف فاکتور اول که مربوط به عناصر Co، Cr، Fe، Mn، Sc، Ti، V و Zn، فاکتور چهارم مربوط به Ba و Sr و همچنین فاکتور ششم مربوط به W، فرآیند آنالیز فاکتوری، تکرار شد که نتایج به دست آمده در جدول ۴ آمده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود عناصر Au، Bi و Cu در فاکتور ۱، عناصر Pb، Sb و Sn در فاکتور ۲ و عناصر As و Mo در فاکتور ۳ قرار می‌گیرند. مقایسه جدول ۳ و ۴ که

جدول ۶: مقادیر GMPI فاکتورهای معرف بر اساس درصد فراوانی تجمعی ۹۹٪، ۹۷٫۵٪، ۹۵٪، ۹۰٪، ۸۴٪ و ۵۰٪.

GMPI _{As-Mo}	GMPI _{Sn-Pb-Sb}	GMPI _{Au-Bi-Cu}	%
۰.۹۴۸	۰.۹۸۱	۰.۹۸۵	۹۹٪
۰.۸۹۴	۰.۹۴۵	۰.۹۴۰	۹۷.۵٪
۰.۸۳۶	۰.۸۶۷	۰.۸۶۲	۹۵٪
۰.۷۵۶	۰.۷۶۸	۰.۷۷۲	۹۰٪
۰.۶۸۷	۰.۶۶۸	۰.۶۸۱	۸۴٪
۰.۴۸۰	۰.۴۵۴	۰.۴۵۱	۵۰٪

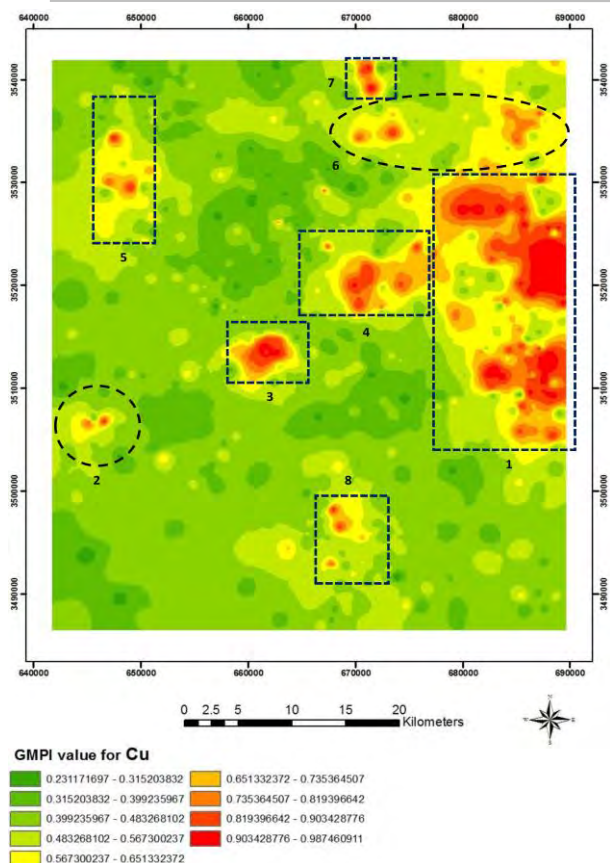
بنا به زیرروابط بزیر برای به دست آوردن یک نقشه GMPI نهایی ممکن است سه حالت وجود داشته باشد:

حالت اول: اگر برای یک نمونه یکی از مقادیر GMPI بیان شده بزرگتر یا مساوی ۹۵٪ فراوانی تجمعی و دو مقدار دیگر کوچکتر از ۹۵٪ فراوانی تجمعی باشد مقدار GMPI نهایی برابر با مقدار GMPI بزرگتر یا مساوی ۹۵٪ فراوانی تجمعی خواهد بود (روابط a-c).

حالت دوم: اگر برای یک نمونه یکی از مقادیر GMPI فوق‌الذکر کوچکتر از ۹۵٪ فراوانی تجمعی و دو مقدار دیگر بزرگتر یا مساوی ۹۵٪ فراوانی تجمعی باشد مقدار GMPI نهایی برابر با میانگین دو مقدار GMPI بزرگتر یا مساوی ۹۵٪ فراوانی تجمعی خواهد بود (روابط d-f).

حالت سوم: اگر برای یک نمونه هر سه مقدار GMPI فوق‌الذکر کوچکتر از ۹۵٪ فراوانی تجمعی و یا هر سه مقدار GMPI فوق‌الذکر بزرگتر یا مساوی ۹۵٪ فراوانی تجمعی باشد مقدار GMPI نهایی برابر با میانگین هر سه مقدار GMPI خواهد بود (روابط g-h).

اگرچه $GMPI_{Au-Bi-Cu}$ یک فاکتور چند عنصری موثر برای کانی‌سازی مس است ولی اهمیت مقادیر $GMPI_{As-Mo}$ و $GMPI_{Sn-Pb-Sb}$ نیز در رابطه با این نوع کانی سازی نباید نادیده گرفته شود. در حقیقت $GMPI_{Au-Bi-Cu}$ ، $GMPI_{Sn-Pb-Sb}$ و $GMPI_{As-Mo}$ هر سه برای نهشته‌های مس مهم است اما به دلیل اختلاف در تحرک‌پذیری شیمیایی و فیزیکی عناصر در رسوبات آبراهه‌ای، عناصر در نمونه‌های مختلف رسوبات آبراهه‌ای، آنومالی یکسانی از خود نشان نمی‌دهند. به این معنی که برای یک نهشته معین مس، نمونه‌های آنومال برای هر عنصر در موقعیت یکسانی از آن نهشته قرار ندارند. بنابراین می‌بایست روشی یافت تا از بیشترین فاکتورهای بدست آمده از آنالیز فاکتوری که مرتبط با این نوع کانی‌سازی است استفاده شود. اگر فقط یکی از مقادیر $GMPI$ (به عنوان مثال $GMPI_{Au-Bi-Cu}$ یا $GMPI_{Sn-Pb-Sb}$ یا $GMPI_{As-Mo}$) جهت تولید یک نقشه اکتشافی منطقه مورد نظر استفاده شود، $GMPI$ دو فاکتور دیگر برخلاف این که ممکن است امتیازات ژئوشیمیایی کافی جهت کانی‌سازی داشته باشند، نادیده گرفته خواهند شد، بنابراین می‌بایست آنومالی‌های منطقه بوسیله نقشه‌های توزیع $GMPI$ هر سه فاکتور مشخص شوند [۱۲] که ممکن است در برخی از مناطق با یکدیگر همپوشانی داشته و در برخی مناطق دیگر همپوشانی نداشته باشند. برای محاسبه $GMPI_{Cu}$ توجه به مقادیر $GMPI_{Au-Bi-Cu}$ ، $GMPI_{Sn-Pb-Sb}$ و $GMPI_{As-Mo}$ لازم است ابتدا حد آستانه‌ای برای جداسازی مقادیر Mo زمینه از آنومالی انتخاب شود. در این تحقیق، حد آستانه برابر ۹۵ درصد فراوانی تجمعی برای مقادیر $GMPI$ هر فاکتور در نظر گرفته شده است. مقادیر $GMPI$ را می‌توان بر اساس درصد فراوانی تجمعی ۹۹٪، ۹۷٫۵٪، ۹۵٪، ۹۰٪، ۸۴٪ و ۵۰٪ برای فاکتورهای معرف $As-Mo$ ، $Au-Bi-Cu$ و $Pb-Sb$ به دست آورد (جدول ۶) که درصد فراوانی ۹۵ وارد محاسبات $GMPI$ شد. برای محاسبه $GMPI_{Cu}$ می‌توان از رابطه ۶ استفاده کرد [۱۲] که با توجه به حد آستانه به دست آمده در جدول ۶ بر اساس چند زیررابطه به صورت شرطی میزان $GMPI$ را مشخص می‌کند.



شکل ۸- مناطق امیدبخش کانی سازی مس رگه ای با روش GMPI

۴-۴- اعتبارسنجی نتایج

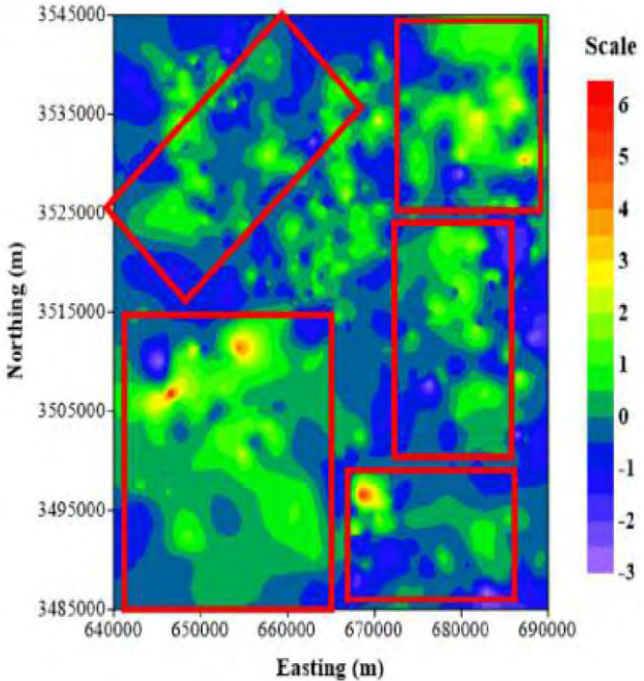
به منظور بررسی صحت نتایج، نقشه خروجی به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج تحقیق گرانیان [۲۸] در منطقه مقایسه شد. وی چهار روش خوشه بندی c- میانگین فازی، سلسله مراتبی چند مرحله ای، حداکثر انتظار و DBSCAN را روی داده های رسوبات آبراهه ای به کار برد و آنومالی های ژئوشیمیایی منطقه را مشخص کرد. از آن جایی که این آنومالی ها تنها مربوط به آنومالی مس نیست، محدوده آن ها بزرگتر از آنومالی های به دست آمده در این تحقیق است. شکل ۹ نقشه آنومالی به دست آمده با روش حداکثر انتظار را نشان می دهد که آنومالی های منطقه را در ۵ منطقه نشان می دهد که هماهنگی مناسبی با نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر دارد.

- GMPI_{Cu} =
- (a) GMPI_{Au-Bi-Cu} if
GMPI_{Au-Bi-Cu} ≥ 0.862 and GMPI_{Sn-Pb-Sb} < 0.867 and
GMPI_{As-Mo} < 0.836
- (b) GMPI_{Sn-Pb-Sb} if
GMPI_{Sn-Pb-Sb} ≥ 0.867 and GMPI_{Au-Bi-Cu} < 0.862 and
GMPI_{As-Mo} < 0.836
- (c) GMPI_{As-Mo} if
GMPI_{As-Mo} ≥ 0.836 and GMPI_{Au-Bi-Cu} < 0.862 and
GMPI_{Sn-Pb-Sb} < 0.867
- (d) Average (GMPI_{Au-Bi-Cu}, GMPI_{As-Mo}) if
GMPI_{Au-Bi-Cu} ≥ 0.862 and GMPI_{Sn-Pb-Sb} and < 0.867 and
GMPI_{As-Mo} ≥ 0.836
- (e) Average (GMPI_{Au-Bi-Cu}, GMPI_{Sn-Pb-Sb}) if (۶)
GMPI_{Au-Bi-Cu} ≥ 0.862 and GMPI_{Sn-Pb-Sb} and ≥ 0.867
and GMPI_{As-Mo} < 0.836
- (f) Average (GMPI_{Sn-Pb-Sb}, GMPI_{As-Mo}) if
GMPI_{Au-Bi-Cu} < 0.862 and GMPI_{Sn-Pb-Sb} ≥ 0.867 and
GMPI_{As-Mo} ≥ 0.836
- (g) Average (GMPI_{Sn-Pb-Sb}, GMPI_{Au-Bi-Cu}, GMPI_{As-Mo})
if
GMPI_{Au-Bi-Cu} ≥ 0.862 and GMPI_{Sn-Pb-Sb} ≥ 0.867 and
GMPI_{As-Mo} > 0.836
- (h) Average (GMPI_{Sn-Pb-Sb}, GMPI_{Au-Bi-Cu}, GMPI_{As-Mo})
if
GMPI_{Au-Bi-Cu} < 0.862 and GMPI_{Sn-Pb-Sb} < 0.867 and
GMPI_{As-Mo} < 0.836

پس از پیاده سازی زیرروابط نشان داده شده در رابطه ۶ در منطقه کردگان، نقشه مناطق مطلوب اکتشافی به صورت شکل ۸ به دست آمد. بر اساس مناطق حداکثر GMPI، ۸ منطقه مطلوب شناسایی شد. شرق، شمال شرق و بخش هایی از مرکز ورقه (شمال، غرب و شمال غرب معدن مس قلعه زری)، بخش هایی از جنوب غربی ورقه (کوه بختان)، بخش هایی از شمال غرب ورقه (کوه میخ انبار) اصلی ترین مناطق امیدبخش اکتشافی هستند.

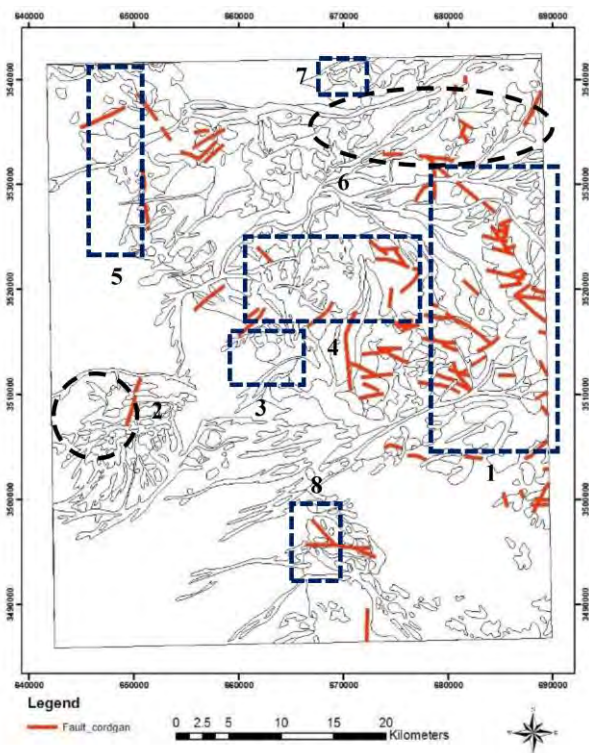
سنگ‌های آندزیت و توف آندزیتی با سن ائوسن است که صحت نتایج را تأیید می‌کند.

بررسی نمونه‌های آنومال مس (آنومالی تک عنصری) در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که تنها آنومالی‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ خود را نشان داده و سایر آنومالی‌ها حذف شده است. این در حالی است که مناطق آنومالی ۵ و ۷ تنها با دو و یک نمونه آنومال مشخص شده است که می‌تواند مهندس اکتشاف را برای آنومالی در نظر گرفتن این مناطق، دچار تردید کند. علاوه بر این، مقایسه خروجی روش‌های GMPI (شکل ۸) و SFA (شکل‌های ۲ تا ۷) نشان می‌دهد که روش GMPI، با تلفیق مناسب نتایج می‌تواند آنومالی‌ها را با مرزهای مشخص‌تر و گسترش دقیق‌تر نمایش داد. این تلفیق به دلیل در نظر گرفتن مناطقی که در کلاس‌های حداکثر قرار نمی‌گیرند ولی در فاکتورهای مختلف در کلاس‌های بااهمیت قرار دارند می‌تواند مفید باشد به طوری که چگالی آنومالی‌ها به خصوص در مناطق نزدیک و اطراف آنومالی‌های مشخص شده نسبت به روش SFA افزایش یافته است.



شکل ۹- نقشه آنومالی به دست آمده از روش حداکثر انتظار [۲۸]

به‌منظور بررسی بیشتر صحت نتایج، مناطق هشتگانه امید بخش اکتشافی بروی نقشه گسل‌های منطقه و نقشه نمونه‌های آنومال مس (نمونه‌های حائز غلظت بیش از ۹۵ درصد فراوانی تجمعی) به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ قرارگرفت. مقایسه این نقشه‌ها با نقشه خروجی GMPI (شکل ۸) نشان می‌دهد خروجی GMPI با گسل‌های منطقه (شکل ۱۰) که مکان مطلوب برای تشکیل ذخایر مس رگه‌ای هستند، تطابق دارد. این تطابق در آنومالی شماره ۲، ۳ و ۵ با علم به این مطلب که شیب عمومی منطقه به سمت جنوب و غرب است و مناطق متاثر از آنومالی به سمت جنوب و غرب گسل‌ها گسترش می‌یابد، روشن می‌شود. تنها منطقه کوچک آنومالی شماره ۷ در حاشیه شمالی نقشه با گسل ارتباطی ندارد که می‌تواند به دلیل در حاشیه بودن و ارتباط با گسل‌هایی در خارج محدوده، این حالت به‌وجود آمده باشد. همچنین مقایسه نقشه خروجی روش GMPI (شکل ۸) با نقشه زمین‌شناسی منطقه نیز آشکار می‌کند که مناطق امیدبخش با واحدهای آندزیت، آندزیت بازالت و توف آندزیتی مرتبط هستند که سنگ دربرگیرنده مناسبی برای ذخایر مس رگه‌ای به شمار می‌آیند. علاوه بر این سنگ درون‌گیر معدن قلعه‌زری که در این ورقه قرار دارد



شکل ۱۰- مقایسه مناطق امیدبخش اکتشافی با گسل‌های منطقه

As و Mo در فاکتورها افزایش داشت. افزایش وزن عناصر Cu و Mo میتواند ارتباط کانی سازی مس رگه ای را با سیستم پورفیری حاشیه قاره در این منطقه نشان دهد.

• نتایج روش GMPI هشت منطقه را به عنوان مناطق امیدبخش اکتشافی نشان داد که با گسل های منطقه و سنگ درون گیر مطلوب ذخایر مس رگه ای کاملاً هم خوانی داشت.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با استفاده از داده های برداشت شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی شمال شرق کشور انجام شده است که به این وسیله از این سازمان، صمیمانه سپاس گذاری می شود.

منابع

[1] Hosseini, S.A.; Afzal, P.; Sadeghi, B.; Sharmad, T.; Shahrokhi, S.V.; Farhadinejad, T.; 2015; "Prospection of Au mineralization based on stream sediments and litho geochemical data using multifractal modeling in Alut 1: 100,000 sheet, NW Iran". Arabian Journal of Geosciences, 8(6), pp.3867-3879.

[2] Zuo, R.; Wang, J.; 2016; "Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review". Journal of Geochemical Exploration, 164, pp.33-41.

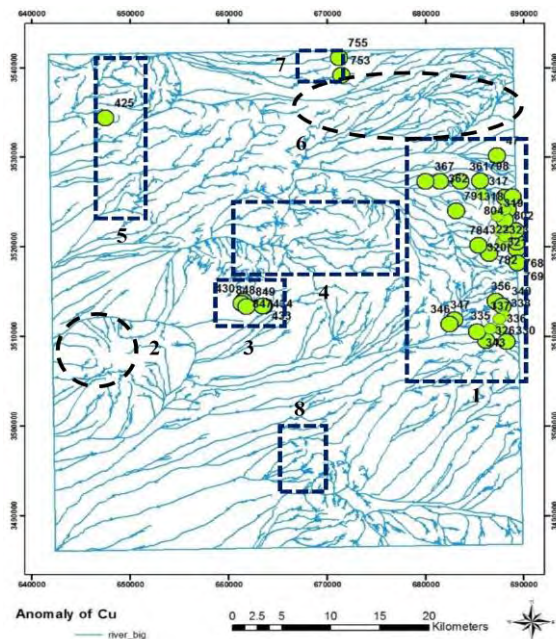
[3] Fatehi, M.; Asadi, H.H.; 2017; "Application of semi-supervised fuzzy c-means method in clustering multivariate geochemical data, a case study from the Dalli Cu-Au porphyry deposit in central Iran". Ore Geology Reviews, 81, pp.245-255.

[4] Ziiai, M.; Pouyan, A.A.; Ziaei, M.; 2009; "Neuro-fuzzy modelling in mining geochemistry: identification of geochemical anomalies". Journal of Geochemical Exploration, 100(1), pp.25-36.

[5] Liu, Y.; Cheng, Q.; Zhou, K.; Xia, Q.; Wang, X.; 2016; "Multivariate analysis for geochemical process identification using stream sediment geochemical data: A perspective from compositional data". Geochemical Journal, 50(4), pp.293-314.

[6] Yousefi, S.; Doulati Ardejani, F.; Ziiai, M.; 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(5), pp.1065-1084.

[7] Grunsky, E.C.; Drew, L.J.; Sutphin, D.M.; 2009; "Process recognition in multi-element soil stream-sediment geochemical data". Applied Geochemistry, 24(8), pp.1602-1616.



شکل ۱۱- مقایسه مناطق امیدبخش اکتشافی با نمونه های آنومال مس بر اساس ۹۵٪ فراوانی تجمعی

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از ۸۳۶ نمونه رسوبات آبراهه ای در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کردگان خراسان جنوبی تلاش شد با استفاده از روش SFA با نگرش بر تیپ کانی سازی مس رگه ای و تلفیق فاکتورها با روش GMPI، شناسایی مناطق امید بخش اکتشافی با دقت بالاتری انجام شود. مهمترین نتایج به دست آمده از این تحقیق را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

• پس از سه مرحله انجام آنالیز SFA سه عنصر Ag، Ni و Cd در هیچ فاکتوری قرار نگرفت.

• جهت تأثیر تیپ کانی سازی مس رگه ای عناصر Cr، Co، Fe، Mn، Sc، Ti، V، Zn، Sr، Ba و W که در فاکتورهای اول، چهارم و هفتم قرار گرفته بود از محاسبات حذف شد.

• پس از حذف عناصر مزاحم، عناصر Au، Bi و Cu در فاکتور ۱، عناصر Pb، Sb و Sn در فاکتور ۲ و عناصر As و Mo در فاکتور ۳ قرار گرفت. نتایج نشان داد که عناصر بااهمیت در فاکتورها هیچ تغییری نکرده است ولی وزن آنها در فاکتورها تفاوت دارد. به طوری که وزن عناصر Au، Bi، Pb و Sb کاهش و وزن عناصر Cu، Sn،

محدوده اکتشافی کودکان، خراسان جنوبی"، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۹، ص ۳۴-۴۷.

[۱۸] بلوریان، غلامحسین؛ ۱۳۸۹؛ "شرح نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کردگان"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

[19] Davis, J.C.; 1986; "Statistics and Data Analysis in Geology", John Wiley & Sons, New York, 646 pp.

[20] Shiva, M.; 1998; "A Stream Sediment Geochemical Exploration in the Arid Environment of East Iran", Ph.D Thesis, The University of Natingham, UK.

[۲۱] یوسفی، مهیار؛ کامکار روحانی، ابولقاسم؛ ۱۳۹۲؛ "استنتاج شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی فلورین تیپ دره می سی سی پی به عنوان یک اثر ژئوشیمیایی چند عنصری معرف"، اولین همایش زمین‌شناسی کاربردی ایران، دانشگاه دامغان.

[22] Cox, D.R.; Snell, E.J.; 1989; Analysis of Binary Data, 2nd ed. Chapman and Hall, London.

[۲۳] آریافر، احمد؛ کی‌خواه حسین‌پور، مجید؛ ۱۳۹۷؛ "روش‌های نوین تحلیل داده‌های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه بیرجند، بیرجند، ۲۲۰ صفحه.

[24] Halter, W.E.; Bain, N.; Becker, K.; Heinrich, C.A.; Landtwing, M.; VonQuadt, A.; Clark, A.H.; Sasso, A.M.; Bissig, T.; Tosdal, R.M.; 2004; "From andesitic volcanism to the formation of a porphyry Cu-Au mineralizing magma chamber: the Farallón Negro Volcanic Complex, northwestern Argentina". Journal of Volcanology and Geothermal Research, 136(1), pp.1-30.

[25] Landtwing, M.R.; Pettke, T.; Halter, W.E.; Heinrich, C.A.; Redmond, P.B.; Einaudi, M.T.; Kunze, K.; 2005; "Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: the Bingham porphyry". Earth and Planetary Science Letters, 235(1-2), pp.229-243.

[26] Arribas, A.; Hedenquist, J.W.; Itaya, T.; Okada, T.; Concepción, R.A.; Garcia, J.S.; 1995; "Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines". Geology, 23(4), pp.337-340.

[27] Weixuan, F.; Shefeng, Y.; Zhengao, L.; Xinglin, W.; Baochen, Z.; 2007; "Geochemical characteristics and significance of major elements, trace elements and REE in mineralized altered rocks of large-scale Tsagaan Suvarga Cu-Mo porphyry deposit in Mongolia". Journal of Rare Earths, 25(6), pp.759-769.

[۲۸] گرانیان، حمید؛ ۱۳۹۶؛ "کاربرد روش‌های خوشه

[8] Carranza, E.J.M.; 2010; "Improved wildcat modelling of mineral prospectivity". Resource geology, 60(2), pp.129-149.

[9] Treiblmaier, H.; Filzmoser, P.; (2010); "Exploratory factor analysis revisited: How robust methods support the detection of hidden multivariate data structures in IS research". Information & management, 47(4), pp. 197-207.

[10] 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), pp.2233-2251.

[11] 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(1), 45-58.

[12] 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, pp.24-35.

[13] Theodoridis, S.; Koutroumbas, K.; 2006; "Pattern Recognition", 3th Ed., Academic Press, Elsevier, USA, pp. 837.

[۱۴] دیمه‌ور، محمد؛ ۱۳۷۴؛ "بررسی زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوکانسار مس قلعه‌زری بیرجند"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، ۱۳۵ صفحه.

[۱۵] کریم‌پور، محمدحسن؛ ملک زاده سفارودی، آزاده؛ حیدریان، محمدرضا؛ عسگری، علی؛ ۱۳۸۶؛ "کانی‌سازی، دگرسانی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی طلا-قلع هیرد، استان خراسان جنوبی"، بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دوره ۱، شماره ۱، ص ۶۷-۹۰.

[۱۶] اشراقی، حسن؛ راستاد، ابراهیم؛ امامی، محمدهاشم؛ عسگری، علی؛ ۱۳۸۷؛ کانه زایی طلای هیرد: "نمونه‌ای از ذخایر طلای مرتبط با نفوذی‌های گرانیتوئیدی کاهیده در ایران (جنوب بیرجند)"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶۹، دوره ۱۸، ص ۱۹-۲۰.

[۱۷] امرایی، سکینه؛ نیرومند، شجاع‌الدین؛ ۱۳۹۵؛ "بررسی‌های سنگ زمین‌شیمیایی، کانی‌شناسی، دگرسانی و مطالعه میانبارهای سیال در سامانه رگه‌ای طلا مس‌دار کردگان

پی‌نوشت

بندی در شناسایی آنومالی‌های مرکب در اکتشافات
ژئوشیمیایی در کردگان خراسان جنوبی"، نشریه علمی-
پژوهشی مهندسی معدن، شماره ۳۷، دوره ۱۲، ص ۸۱-۹۴.

-
- 1- Stepwise factor analysis (SFA)
 - 2- Geochemical mineralization probability index
 - 3- Mineral potential mapping (MPM)
 - 4- Scree Plot